

## 2.2 アスベスト含有廃棄物の無害化・再資源化技術

### 2.2.1 オンサイト・移動式アスベスト無害化・資源化装置の開発

#### 開発概要

アスベスト廃棄物による環境リスク低減に資するため、アスベスト含有保温材を解体現場で速やかに溶融・無害化まで完結させる「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システム」の実用化を目指し研究開発を行った。主な成果として、従来の溶融処理（1,500℃以上）に比べ低い温度でアスベストを溶融・無害化できる処理システムを開発するとともに、処理システムをトレーラに搭載した移動処理車を開発し実用レベルにあることを確認した。以下に、取り組んだ研究課題とその成果について概要を示す。

#### 1. 飛散抑制ユニットの設計・製作

##### (1) 実用化飛散抑制ユニットの設計

平成18年度に開発した150kW誘導加熱溶融炉によるアスベスト溶融・無害化処理試験で判明した技術的課題を解決するため、①処理速度の向上、②保温材水分削減、③熱損失抑制を目指し、構成要素である破砕、予備乾燥、放熱抑制、攪拌、熱回収及び前置型集塵の各ユニットについて、予備試験及び方式選定調査を行った。その結果をもとに最適な機能・構造を決定し、実用規模の150kW誘導加熱溶融炉に対応した実用化飛散抑制ユニットを設計した。

##### (2) 実用化飛散抑制ユニットの製作

1.(1)の設計に基づいて各ユニットの仕様を決定し、トレーラへの搭載を想定したレイアウトで実用化飛散抑制ユニットを製作するとともに、実際の処理を模擬したノンアス保温材による溶融試験を実施し、不具合の洗い出しを行った。不具合を解消した後、アスベスト含有保温材による溶融処理試験を実施し、安定的な連続運転を行うための運転条件の見極めを行った。また、溶融物及び集塵装置排ガス、装置周辺大気いずれからもアスベストは検出されず、実用化飛散抑制ユニットが実用レベルにあることを確認した。

#### 2. 「吹付けアスベスト無害化・資源化処理の研究開発」

##### (1) 溶融ラボ試験

3kW誘導加熱溶融炉を用いて、クロシドライト、クリソタイルを含有する2種類のアスベスト含有吹付け材の溶融ラボ試験を行った。アスベスト含有保温材処理と同じアルカリ融剤を用いて、溶融温度1,100℃以下、融剤混合比（融剤添加重量／処理対象物重量）0.5の溶融条件で処理したところ、いずれの溶融物からもアスベストは検出されず、無害化されていることを確認した。

##### (2) 実用規模での溶融・無害化試験

150kW誘導加熱溶融炉を用いてクリソタイルを含有するアスベスト含有吹付け材の溶融処理を行ったところ、2.(1)と同様の条件で溶融処理することができた。また、溶融物からアスベストは検出されず、無害化されていることを確認した。

### 3. オンサイト式溶融・無害化処理システムを用いた実証試験

#### (1) 実用化飛散抑制ユニットの改良とトレーラの設計

開発の最終形態であるトレーラ搭載型のオンサイト式溶融・無害化処理システム（以下、「オンサイトシステム」という。）には、アスベストを飛散させることなく安全に保温材を投入できる自動投入機構や、溶融物の熱回収と取出しを容易にするユニットが必要なため、実用化飛散抑制ユニットを改良するとともに、道路運送車両法に則り公道を安全に走行できるトレーラの設計を行った。

#### (2) トレーラへの架装および商用運転を想定した長時間連続運転

150kW 誘導加熱溶融炉と飛散抑制ユニット、自動投入機構を製作したトレーラに架装するとともにアルミパネルの外壁で覆い、前室、中室、後室の3室構造とした。なお、アスベスト飛散の可能性のある主要機器は全て負圧室となる中室に配置した。

開発したオンサイトシステムを移動させて屋外に設置し、発電所構内で6昼夜（うちアスベスト含有保温材は1昼夜）の連続運転試験を行い、各装置の機能に問題がないことを確認した。また、溶融物および周辺大気からアスベストは検出されず、本システムの確実な無害化と安全性を確認した。

#### (3) 実証試験による安全性及び実用化評価

長時間連続運転後に若干の改良を加えたいうえで、オンサイトシステムによる最終的な実証試験を実施し、目標とする処理能力（208kg/時(5ト/日)以上）を確認した。また、溶融物および集塵装置排ガス、周辺大気からアスベストは検出されず、オンサイトシステムの確実な無害化と安全性を改めて確認した。

#### (4) 緊急時対応システムの構築と作動確認試験

地震や停電等の緊急事態が発生してもアスベスト飛散や機器損傷などのリスクを回避し、自動的に安全停止できる緊急時対応システムを構築した。実証試験に合わせて地震や停電状態を模擬した作動確認試験を行い、装置の安全な自動停止や電力・冷却水喪失時のバックアップ状況などシステムの有効性を確認した。

### 4. 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

本プロジェクトで開発したシステムの実用化に関するビジネスモデルを検討するため、アスベスト含有保温材処理の市場規模や適用先業種とオンサイト処理にあたっての技術的制約事項等を調査した。また、アスベスト含有吹付け材の処理については、オンサイト処理にあたっての技術的制約事項等を調査した。また、アスベスト削減効果、事業化、コスト、波及効果についての検討を行った。

## 第1章 研究開発の概要

### 1. 目的

アスベストによる健康被害が顕在化しクローズアップされている中、今後も引き続き年間100万トンの以上のアスベストを含む建材等が解体・更新に伴い排出されるものと予想されている。

一方、アスベスト廃棄物の殆どが最終処分場で埋立てされ、既存の熔融処理施設による無害化は1割にも満たないのが現状である。しかし、アスベスト廃棄物の受入が可能な最終処分場は立地地点や埋立て容量が限定されるため、処分費の高騰や受入忌避が現実のものとなってきた。このような状況が今後も続くようであれば、アスベスト廃棄物の滞留、引いては不適正処理が頻発して、人の健康又は生活環境に深刻な悪影響を及ぼす事態が懸念される。

特に、優先的な解体・廃棄が必要な飛散性アスベスト廃棄物については、その無害化処理技術の早期確立が喫緊の課題となっており、電力会社においても、大量に保有する飛散性のアスベスト含有保温材の処理は切実な問題である。

このような背景のもと、最終処分場の負荷を軽減し、アスベスト廃棄物の無害化処理を促進・誘導するため、平成18年10月に高度な技術を用いた無害化処理を環境大臣が認定する制度が施行された。

本事業は、アスベスト廃棄物の安全かつ効率的な熔融・無害化技術の開発を行い、国の認定制度を活用して速やかに実用化し、アスベスト廃棄物による環境リスクの低減と国内での水平展開を図ることを目的とする。

### 2. 概要

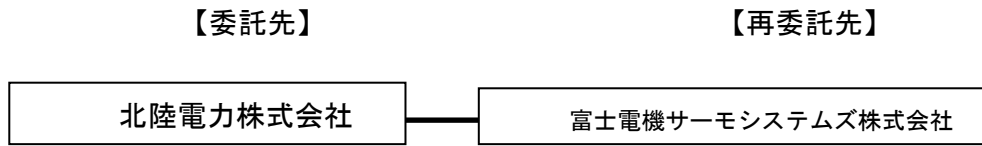
平成18年度、NEDO技術開発機構より「緊急アスベスト削減実用化基盤技術開発」として「オンサイト式（移動式）熔融・無害化処理システムの研究開発」を受託し、確実に熔融・無害化処理が行える実用規模の150kW誘導加熱熔融炉を開発するとともに、火力発電所で実施したアスベスト含有保温材を用いた熔融処理試験では、アルカリ融剤を併用することにより従来の熔融処理温度(1,500℃以上)より低温の1,100℃以下で熔融・無害化できることを確認した。

その成果を基に本事業では、オンサイト式アスベスト熔融・無害化処理システムの完成を目指す。具体的には、実用化に向け熔融処理の効率向上と粉塵飛散防止等を図る飛散抑制ユニットを開発して150kW誘導加熱熔融炉と一体化させ、それらをトレーラに搭載したオンサイト式アスベスト熔融・無害化処理システム（以下、「オンサイトシステム」という）を開発するものとする。また、北陸電力が自ら保有するアスベスト含有保温材を用いたトレーラを用いてオンサイトシステムによる長時間連続運転試験を実施し、条件の最適化、一層のコスト削減、機器の信頼性・安全性の確認を行うとともに、オンサイトシステムの安全・安定運転の更なる向上に向けた緊急時対応システムを構築し、発電所における実証試験の中で作動確認を行い、その有効性を確認する。

さらに、もうひとつの飛散性アスベスト廃棄物である吹付け材については、熔融ラボ試験の結果を踏まえ、開発したオンサイトシステムをベースに熔融・無害化処理方法の検討を行う。

### 3. 研究体制

#### ① 研究体制スキーム



(飛散抑制ユニットの設計・製作及びオンサイト式  
溶融・無害化処理システムを用いた実証試験の  
一部を再委託)



## 第2章 研究開発成果の内容

### 1. 飛散抑制ユニットの設計・製作

平成18年度の研究実施により、熔融・無害化処理技術の核となる150kW誘導加熱熔融炉を開発したが、以下の解決すべき問題点が明らかとなった。

#### ・ 熔融処理スピード

アスベスト飛散防止を極力抑制するため、原形サイズの保温材を誘導加熱熔融炉に投入し熔融・無害化処理を行ったが、原形サイズのままではかさ比重が小さく浮遊することに加え、比表面積が小さくて保温材内部にアルカリ融剤が浸透しにくいため、十分な熔融処理スピードが得られない。

#### ・ 保温材に含まれる水分

実際に解体現場から廃棄されるアスベスト含有保温材は、設置されていた環境や解体前の飛散防止対策（散水、湿潤）により、50%程度の水分を含んでいることが判明した。

水分を多く含んだ保温材を誘導加熱熔融炉に投入すると、内部の水分が蒸発し保温材表面から噴出するため、アルカリ融剤の浸透が阻害され、熔融完了までに余分な時間を要する。また、一気に多量の水分を含む保温材を投入した場合は、突沸が起こる危険性もあり、安全面からも問題である。

#### ・ 熔融処理に伴う熱損失

誘導加熱熔融炉の熔融処理試験では、原形サイズの保温材の投入、それを熔融したララス状の湯（以下、「湯」という）中に沈める押込み作業を繰り返したことから、炉上部を開放した状態で熔融処理を行わざるを得なかった。熔融処理に係る熱収支からは、坩堝側面輻射損、湯面輻射損による大気への放熱は投入エネルギーの約30%と試算され、この熱が十分利用されていない。また、熔融処理後に取り出し（以下、「出湯」という）した熔融物についても、冷却の過程で保有する大量の熱が大気中に無駄に捨てられて利用されていない。

以上の3つの技術的問題点を解決するため、図1に示すとおり破碎、予備乾燥、放熱抑制、攪拌、熱回収および集塵の6つのユニット（以下、「実用化飛散抑制ユニット」という。）を開発することとした。

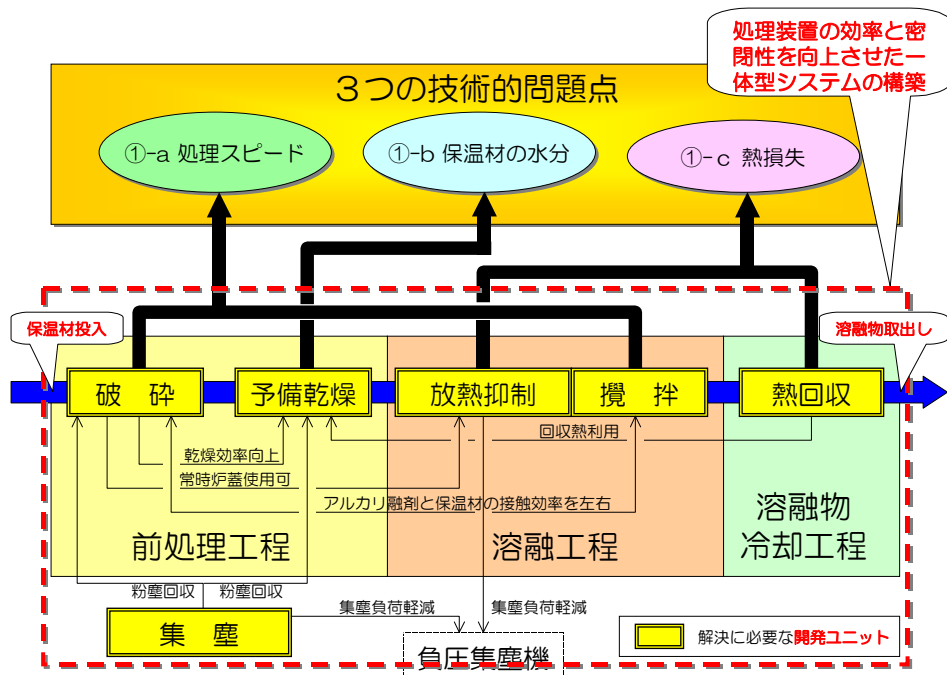


図1 3つの技術的問題点と6つの開発ユニット

## (1) 実用化飛散抑制ユニットの設計

飛散抑制ユニットの構成要素である破碎、予備乾燥、放熱抑制、攪拌、熱回収及び集塵の各ユニットについて、以下のとおり 60kW 誘導加熱溶融炉等を用いて予備試験を行い、最適な機能・構造を決定し、実用規模の 150kW 誘導加熱溶融炉に対応した実用化飛散抑制ユニットを設計した。




### ① 破碎ユニット



溶融処理スピードを向上させるため、解体された大きな保温材を細かくして比表面積を大きくする破碎ユニットを開発することとした。しかし、細かく破碎すれば比表面積増大により保温材内部にアルカリ融剤が浸透しやすくなる反面、粉体も多く発生し、破碎の後工程である予備乾燥、誘導加熱溶融炉での粉体発生量増大の原因となる。そこで、各種破碎機で保温材の破碎試験を行い、粉体の発生を極力抑えつつ溶融に適したサイズの破碎物が得られる最適な破碎機を検討した。

#### a. 破碎方式選定試験

調査した各種破碎機の中から表1に示す破碎機を選定し、ノンアスベストのケイ酸カルシウム保温材を用いて破碎試験を行った。

表1 選定した各種破碎機と主な特徴




破碎機	主な特徴	写 真
①せん断式二軸破碎機	2軸の回転刃が噛み合って低速回転させて発生するせん断力で破碎	
②薄刃式二軸破碎機	2軸の薄刃を互いに逆回転で低速回転させ、両刃間に挟み込んで原料をひねり割ることにより破碎 (①の改良型)	
③鬼歯式二軸破碎機	突起付きのローラーを互いに逆回転で低速回転させて、突起間に原料を挟み込んで折りながら破碎	



破砕機	主な特徴	写 真
④せん断式一軸破砕機	ロータに固定された三角形状の回転刃が比較的高速で回転し、ノコギリ状の固定刃と噛み合った時のせん断力により破砕	
⑤衝撃式破砕機	高速で回転するロータとスクリーンの中で切削により破砕	

投入する保温材の大きさは、解体・除去後の標準的サイズである 30cm 角程度とした。各種破砕機の破砕試験の状況を表 2 に示す。また、破砕された保温材はふるいにかけて、その粒度分布を測定した。

破砕後の各破砕機の破砕保温材粒度分布を図 2 に示すが、低速回転の二軸破砕機は、高速回転の一軸破砕機や衝撃式破砕機と比較して、粒度の小さな粉体の発生量が少ないことがわかった。

表2 各種破砕機の処理状況

破砕機	粉体発生状況	写 真
①せん断式二軸破砕機	せん断部分ですりつぶされた保温材から粉体が発生する。	
②薄刃式二軸破砕機	薄刃がスリット状の溝を作るだけで、簡単にひねり割ることができないため、薄刃通過毎に粉体が発生する。	
③鬼歯式二軸破砕機	スクリーンより落下しない保温材が何度も鬼歯に当たり粉体が発生する。	

破碎機	粉体発生状況	写真
④せん断式一軸破碎機	二軸破碎機よりも回転数が高い分、回転刃にて保温材を削り、粉体が発生する。	
⑤衝撃式破碎機	スクリーンより落下しない保温材は、何度も削られて粉体が発生する。 回転数が高いため、ロータに当たった保温材が崩れて粉体する。	

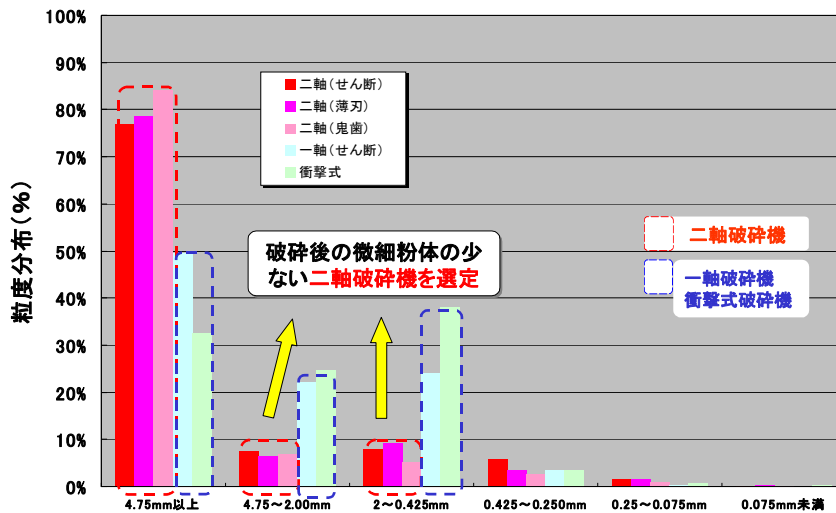


図2 各破碎機の破碎保温材粒度分布グラフ

### b. 各種破碎機の評価

試験時の破碎状況の目視確認及び破碎後の保温材粒度分布の結果から、保温材破碎時の粉体発生メカニズムについて考察を行った。比重が軽くポーラス状で無機質のケイ酸カルシウム保温材からの粉体発生は、図3に示す「衝撃(高速)」、「圧縮」、「せん断」、「削取」、「滞留・反すう」などの工程が順に寄与していることがわかった。

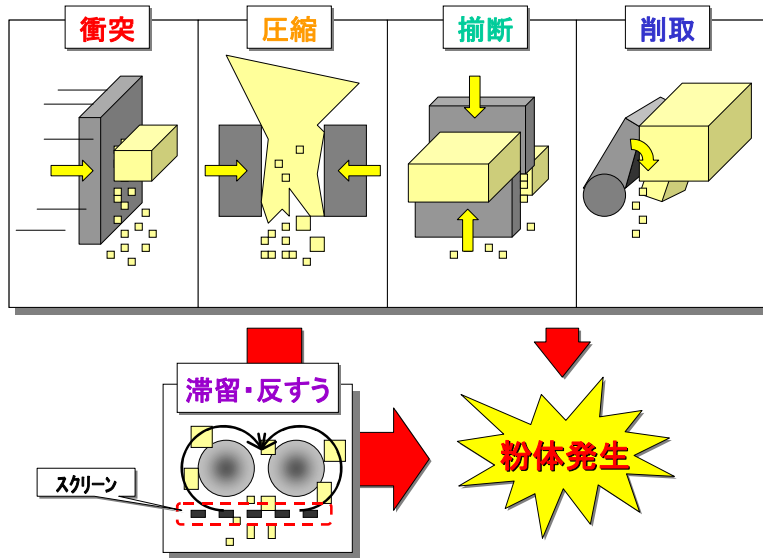


図3 保温材破碎時の粉体発生メカニズム

表3に各種破碎機の評価結果を示す。評価項目としては、破碎後の保温材粒度分布からみた「粉体発生量の少なさ」の他、トレーラに搭載することを前提にした「装置のコンパクトさ」、廃棄物中の異物混入による装置トラブルを考慮した「異物への適応性」を掲げた。評価の一例を示すと、粉体発生量の少なさからは、鬼歯式二軸破碎機が最も優れているが、一方で解体時に発生する細長い針金（保温材固定用）などの異物が軸に絡まりやすい構造で不適となる。以上の3項目を総合的に評価し、せん断式二軸破碎機を選定することとした。

表3 各種破碎機の総合評価結果

評価項目	粉体発生量の少なさ	装置のコンパクトさ	異物への適応性	総合評価
<b>せん断式二軸破碎機</b> (10rpm)	○	○	○	◎
薄刃式二軸破碎機 (10rpm)	○	○	×	△
鬼歯式二軸破碎機 (60rpm)	○	○	×	△
せん断式一軸破碎機 (90rpm)	×	×	○	×
衝撃式破碎機 (100rpm)	×	○	△	×

### c. 破碎ユニットの設計

前述の評価結果を踏まえ設計した破碎ユニットの仕様を表4に、外観図を図4に示す。

表4 破碎ユニットの主な設計仕様

項目	内容
概要	アスベスト含有保温材を熔融無害化する装置へ供給するための前処理破碎
処理対象物	ケイ酸カルシウム保温材
処理物の大きさ	最大寸法 500×500×100mm 程度
処理方式	二軸破碎機
処理量	250kg/h 以上
破碎サイズ	3～5cm 角程度
処理物投入間隔	一括投入 100L/回 [間隔 20回/h 程度]
稼動時間	24時間運転 (5日間程度連続運転)
外観寸法	長さ2m以内×幅1m以内×高さ2m以内
その他	極力、破碎に伴って粉塵を飛散させないこと トレーラに搭載することを想定したコンパクトな構造

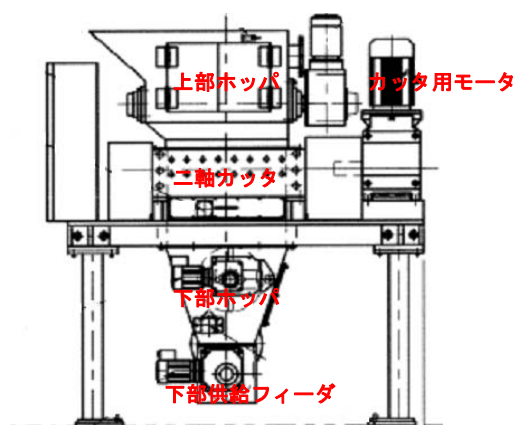


図4 破碎ユニット外観図

### ② 予備乾燥ユニット

水分を多く含む保温材をそのまま高温の炉へ投入すると、水分の蒸発に加えて水蒸気の過熱も伴うため、炉の熱損失が増えてしまう。従って、事前に保温材中の水分をできるだけ低減させておくことによりシステム全体のエネルギー使用の合理化を図ることができる。そこで、熔融工程の前処理として、粗破碎した保温材を予備乾燥するユニットを開発することとした。

本システムでは、熔融処理後の溶融物は高温で排出されるが、その後溶融物固化のため急速に冷却させる必要があり、高温の溶融物の廃熱をうまく利用することで、エネルギーの合理化

(省エネ化)にもつながることから、後述の熱回収ユニットで高温の溶融物から回収した熱空気を予備乾燥ユニットに活用することとした。

そこで、熱空気を媒体として乾燥を効率良く行える予備乾燥ユニットについて検討した。

#### a. 乾燥方式の決定

熱空気を活用した乾燥技術は、その大半が効率良く乾燥させるために熱空気を原料と直接接触させる方法である。しかし、対象としている原料はアスベスト含有保温材であり、乾燥に伴うアスベスト粉塵飛散抑制が重要な要素となる。また、トレーラ搭載を前提としており、限られたスペースで効率よく乾燥時間を稼ぐことができるコンパクトな構造が必要である。

そのため、乾燥ユニットには図5に示すスパイラルフィーダ式の乾燥機を採用することとした。本方式を用いれば、以下のようなメリットがある。

- 乾燥機のボックス内に熱空気が通過する際、保温材には直接風が当たらず、粉塵の飛散を抑制できる。
- 設置面積が小さく、コンパクトな構造でかつ乾燥時間を稼ぐことができる。
- 破砕機下部から誘導加熱溶融炉投入口へのリフトアップ(上昇搬送)機能も兼用できる。  
(全体システムのコンパクト化にも寄与)

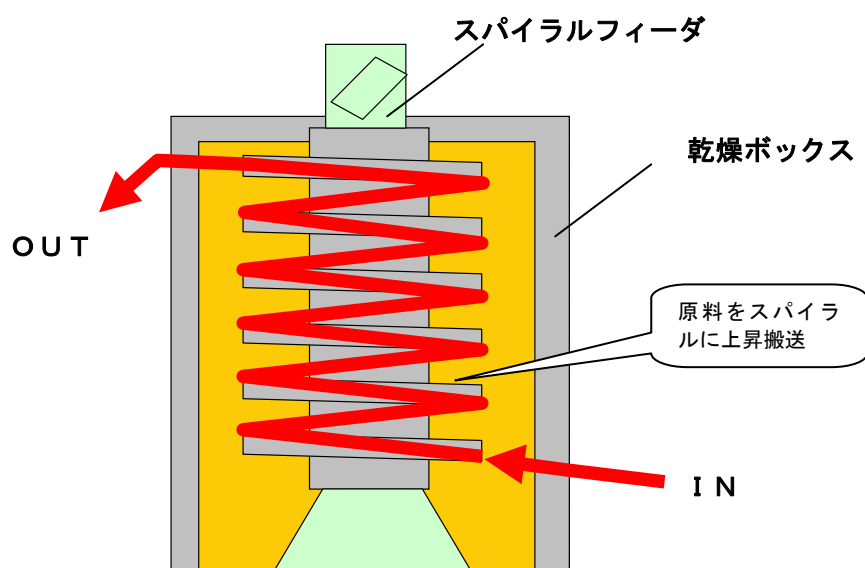


図5 スパイラルフィーダ乾燥機

#### b. 乾燥基礎試験

含水した保温材の乾燥特性を確認するため、オープンによる乾燥基礎試験を行った。金属トレーに含水率既知の破砕保温材 100g をセットし、雰囲気温度を一定に保持したオープン内に入れて乾燥させた。なお、保温材水分率と含水率の変化は、10分間隔でトレーを取出し、保温材重量を測定することにより把握した。

図6に乾燥基礎試験結果を示す。オープンを 130℃と 200℃の2パターンで乾燥試験を行っ



たが、いずれも乾燥時間 20 分までに保温材の水分蒸発が急速に進行しており、保温材の予備乾燥には少なくとも 10 分以上の乾燥時間をかける必要があることがわかった。

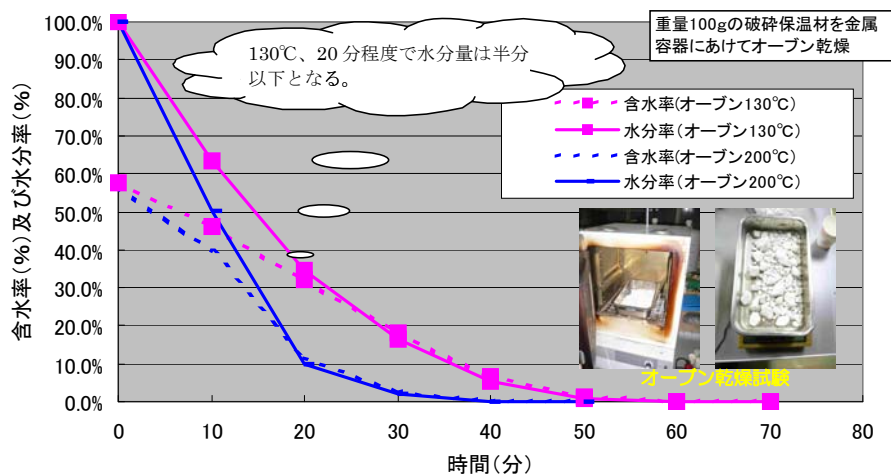


図6 オープンによる保温材乾燥基礎試験結果

### c. 搬送・乾燥試験

#### (a) 搬送試験

小型スパイラルフィーダを用いて、破碎したノンアス保温材の搬送テストを行った。スパイラルフィーダによる破碎保温材の搬送状況を図7に示すが、破碎保温材がスパイラル状のトレイを停滞することなく連続的に上昇搬送できること、搬送中でも、振動に伴う粉塵発生がないことを目視で確認した。



装置サイズ (外径 650φ-内径 350φ、16 段 (搬送距離: 約 25m))

図7 小型スパイラルフィーダによる搬送試験風景

表5に搬送試験結果を示す。スパイラルフィーダの搬送能力を超えて保温材を供給すると、搬送中のトレーからあふれ出して（オーバーフロー）してしまうが、いずれのパターンでもオーバーフローすることなく搬送できることがわかった。また、スパイラル下部より投入して上部より排出されるまでの通過時間は10分程度で、搬送周波数を低下させることにより搬送（滞留）時間を稼げることがわかった。

表5 スパイラルフィーダによる搬送試験結果

No.	供給速度 (kg/h)	スパイラル通過時間(m's'')	搬送周波数(Hz)	状況
T-1	102	3'00''	50	トレーからオーバーフローなく搬送(約5分目)
T-2	41	10'00''	36	トレーからオーバーフローなく搬送(約5分目)
T-3	82	9'00''	36	トレーからオーバーフローなく搬送(約7分目)

(b) 乾燥試験

小型スパイラルフィーダを用いて乾燥試験を行った。図8に乾燥試験概念図を、図9に乾燥試験風景を示すが、小型スパイラルフィーダを乾燥ボックスで囲い、ボックス内に熱空気を送風した状態で、破碎したノンアス保温材をスパイラルフィーダで搬送させながら乾燥を行った。なお、熱空気の熱源には、約600℃に金属るつぼを加熱した60kW誘導加熱溶融炉を用いた。

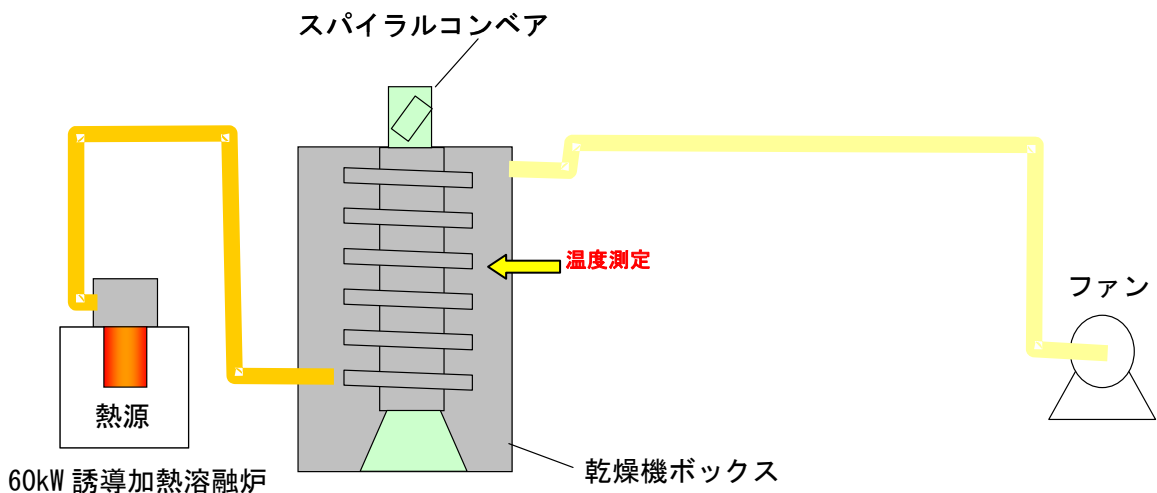


図8 乾燥試験 概念図



図9 乾燥試験風景

乾燥試験結果を表6に示す。なお、試験に用いた小型スパイラルフィーダの最長通過時間は10分程度しかないことから、20分程度の乾燥時間を模擬するため、スパイラルフィーダを2回通過させて乾燥状況を確認した。

表6 スパイラルフィーダによる乾燥試験結果

	乾燥時間（累積）（分）	含水率（%）
乾燥前	—	50.2
搬送1回目	12.2（12.2）	38.9
搬送2回目	13.8（26.0）	20.5

【乾燥条件】乾燥ボックス内の雰囲気温度：約130℃

スパイラルフィーダ搬送周波数：36Hz

乾燥試験結果から、乾燥時間20分まで乾燥が急速に進行していることがわかった。先に行ったオープンによる乾燥基礎試験結果と今回のデータを比較したところ、図10に示すとおり、乾燥状況は同じ傾向であった。

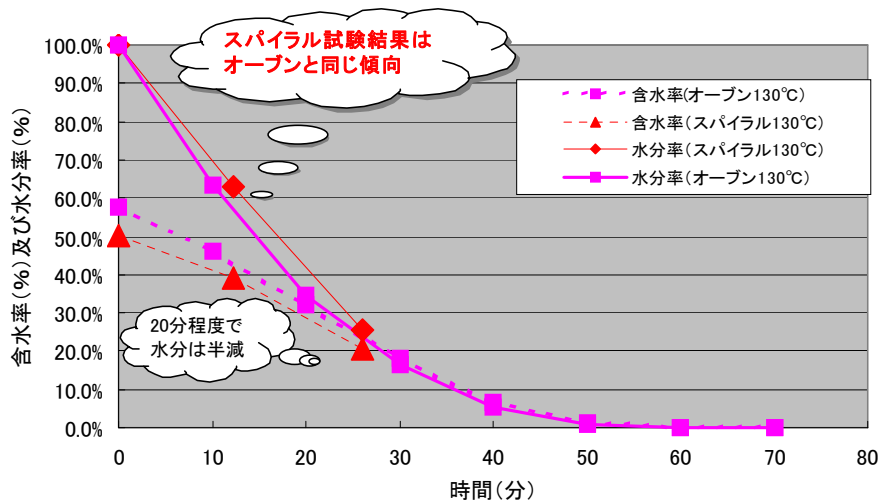


図 10 2種類の乾燥方法による乾燥状況

d. 予備乾燥ユニットの設計

前述の試験結果を踏まえ、設計した予備乾燥ユニットの仕様を表7に、外観図を図11に示す。

表7 予備乾燥ユニットの主な設計仕様

項目	内容
概要	破碎後のアスベスト含有保温材を溶融無害化装置への搬送、その間の乾燥
処理対象物	ケイ酸カルシウム保温材
処理物の大きさ	5cm 角アンダー（2軸破碎機による破碎物）
処理物の含水率	50%程度
処理方式	スパイラルフィーダ乾燥機
処理量	250kg/h 以上
搬送（乾燥）時間	10分以上
処理物投入間隔	連続投入
稼働時間	24時間運転（5日間程度連続運転）
外観寸法	長さ 1.5m 以内×幅 1.5m 以内×高さ 2.5m 以内
加熱源	熱空気
その他	極力、乾燥に伴って粉塵を飛散させないこと トレーラに搭載することを想定したコンパクトな構造

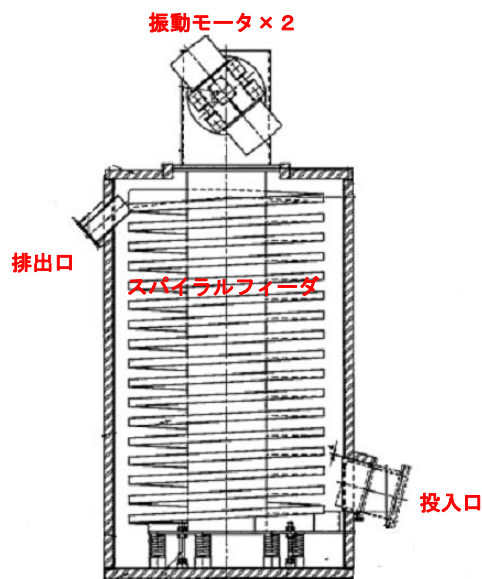


図 11 予備乾燥ユニット外観図

### ③ 放熱抑制・攪拌ユニット

誘導加熱熔融炉の坩堝側面や湯面から大気中に放熱している輻射損を抑制するため、熔融処理中も蓋を閉めた状態で保温材を連続投入できる断熱性に優れた放熱抑制ユニットを開発することとした。

合わせて、熔融処理速度を向上させるため、かさ比重が小さく浮遊しやすい保温材を効率的に攪拌し、熔融した湯中に沈み込ませる攪拌ユニットを開発することとした。

なお、攪拌ユニットは誘導加熱熔融炉上部に位置するため、放熱抑制ユニットと一体型の構造とすることとし、これらユニットの仕様を決定するため、以下のとおり 60kW 誘導加熱熔融炉を用いて熔融試験を行った。

#### a. 放熱抑制および攪拌効果の確認試験

放熱抑制および攪拌効果を確認するため、図 12 および図 1 に示すとおり、60kW 誘導加熱熔融炉上部に断熱材入りの放熱抑制用蓋および攪拌機を設置し、これらの有無による保温材の熔融時間および消費電力の違いを調べた。

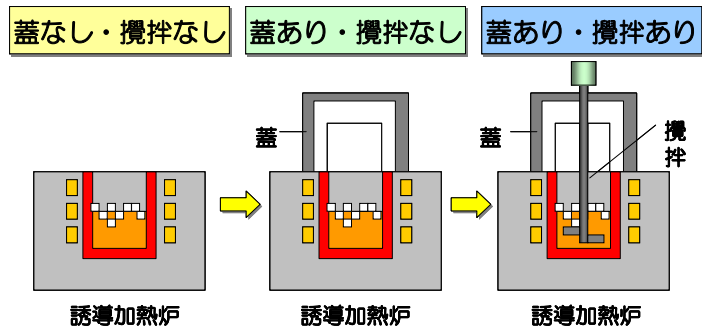


図 12 放熱抑制および攪拌効果の確認試験概念図

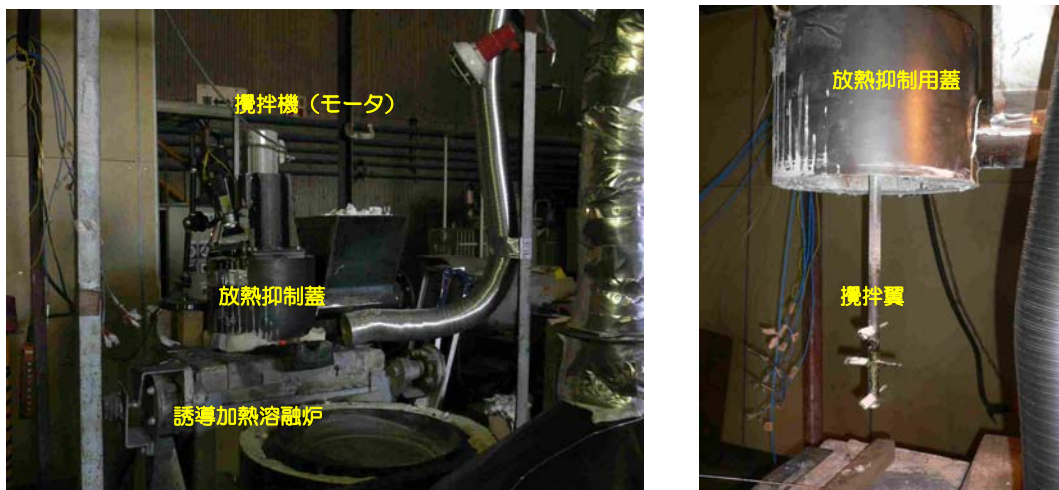
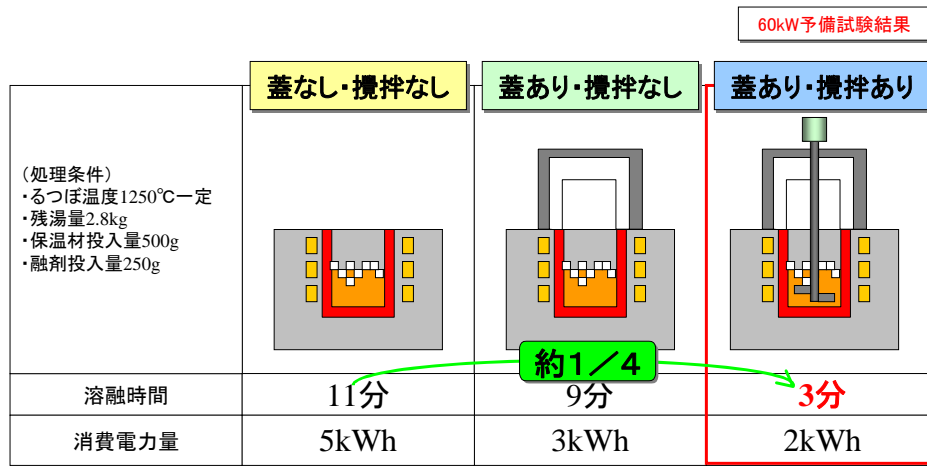


図 13 60kW 誘導加熱溶融炉放熱抑制蓋設置図

図 14 に溶融処理能力比較試験の結果を示す。蓋がない状態と比べ、蓋を設置、さらに蓋+攪拌機を設置することにより、溶融に必要な時間および消費電力量が大幅に減少し、溶融速度の向上、エネルギーロスの低減に寄与していることがわかった。また、溶融状況を観察したところ、攪拌がない場合は、投入された保温材が溶融した湯表面に浮遊したままゆっくりと溶融していくのに対して、攪拌がある場合は、保温材が回転する攪拌翼で湯中に押し込まれ速やかに溶融していくことがわかった。





蓋および攪拌の効果大

図 14 保温材溶融処理能力比較試験結果（放熱抑制・攪拌効果）

**b. 攪拌方法選定試験**

図 15 に攪拌羽根構造による溶融時間の比較結果を示す。同一回転数で回転させた場合、基準となる3段水平2枚の攪拌翼と比較して、枚数を変えずに千鳥で段数を増やした攪拌翼のほうが溶融時間を短縮できることがわかった。また、同じ枚数であっても、羽根の向きを水平から斜め下に傾斜させたほうが、より溶融時間を短縮できることがわかった。

溶融時間が異なる理由としては、図 16 に示すとおり、溶融進行に伴い浮遊する保温材位置（湯レベル）が上昇するため、攪拌翼の軸（高さ）方向に段数を増加させるなどしたほうが、浮遊する保温材位置の変化に対して押込効果を持続できるためと考えられる。

また、最も効率の良い攪拌翼Cを用い、回転数を変化させた溶融試験を行ったところ、図 17 のとおり、回転数を 60rpm 程度まで上昇させたほうが、溶融時間を短縮できることがわかった。

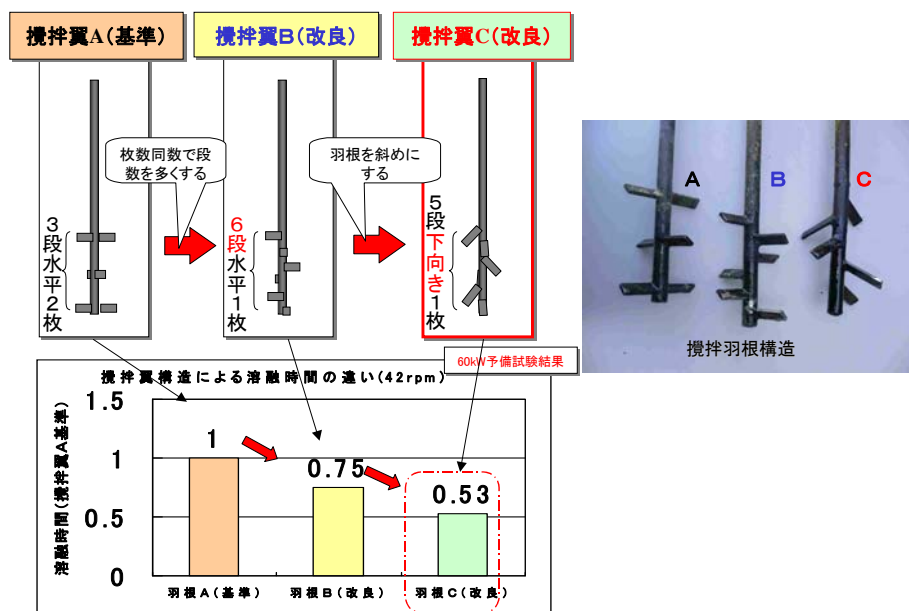


図 15 攪拌羽根構造による溶融時間の比較結果

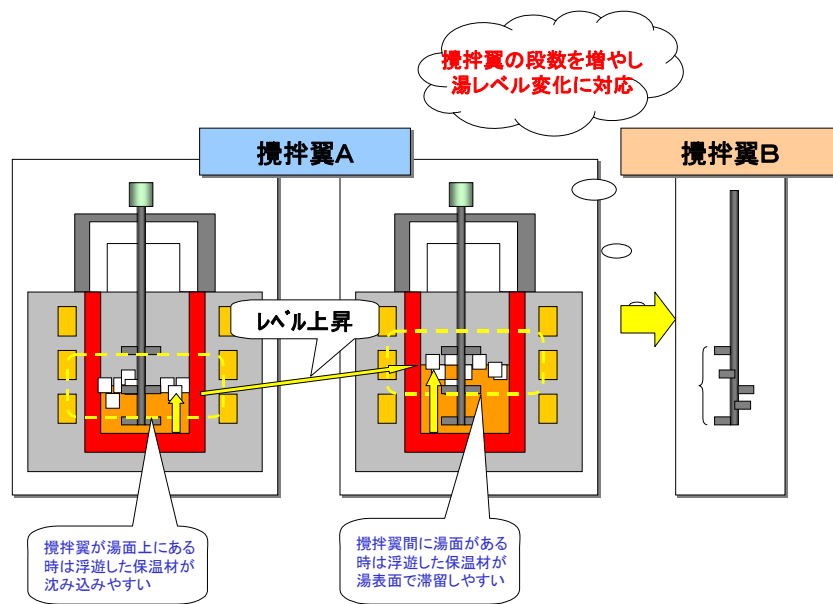


図 16 溶融処理における攪拌翼段数増加の効果

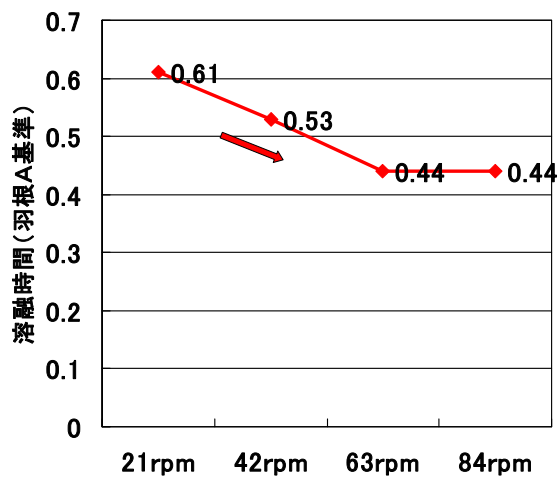


図 17 攪拌翼C 回転数による溶融時間の変化

c. 放熱抑制・攪拌ユニットの設計

前述の結果を踏まえ設計した放熱抑制ユニットおよび攪拌ユニットの仕様を表 8、表 9 に、両ユニットの外観図を図 18 に示す。



(a) 放熱抑制ユニット

表8 放熱抑制ユニットの主な設計仕様

項目	内容
概要	150kW 誘導加熱溶融炉上部からの輻射損失を低減
その他	中央上部には、攪拌ユニットを設置 炉内を監視できる覗き窓及びカメラを設置 炉内を負圧に保つための排気ダクトを設置

(b) 攪拌ユニット

表9 攪拌ユニットの主な設計仕様

項目	内容
概要	放熱抑制ユニット上部に設置した攪拌モータにより炉内を攪拌
モータ回転数	最高回転数 60rpm 以上
その他	表面に浮遊する保温材の押し込み効果が高い攪拌翼構造 高温でも強度が保てる構造

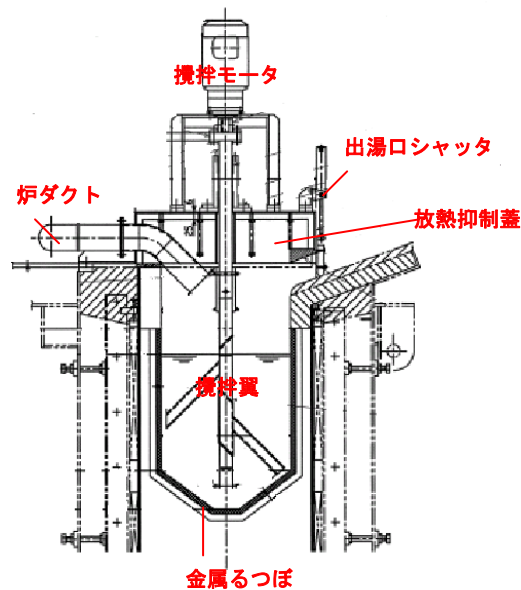


図18 放熱抑制ユニット及び攪拌ユニットの外観図

④ 熱回収ユニット

出湯直後の溶融物は高温（1,100℃以下）であるため、熱回収することにより保温材の予備乾燥に利用できることから、効率的に溶融物の廃熱を回収できる熱回収ユニットを開発することとした。

### a. 熱回収量確認試験

60kW 誘導加熱溶融炉で溶融した溶融物を用い、図 19 に示す試験方法で回収した熱空気の温度および風量を測定した。

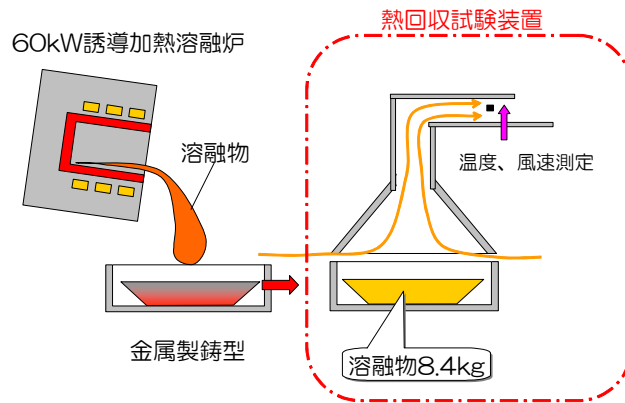


図 19 熱回収量確認試験概念図

熱回収開始からの溶融物及び熱空気の温度特性を図 20 に示す。溶融物は熱回収直後から冷却により温度が低下、これに合わせて熱空気温度が上昇している。熱空気温度特性からは、乾燥に必要となる高温の熱空気を回収可能であること、熱空気は風量が少ないほど高温を維持できることがわかった。

また、温度変化から単位時間当たりの熱量及び累積の総熱量を試算した。図 21 に示すとおり、熱空気の風量を多くしたほうが単位時間当たりの熱量は大きいものの、その後の低下も大きいことがわかった。また、溶融物の総熱量は 16,000kJ 程度と見積もられ、風量が最も少ない 1.4m<sup>3</sup>/min とした場合でも、30 分程度で溶融物の全熱量の 50%以上が回収できることを確認した。

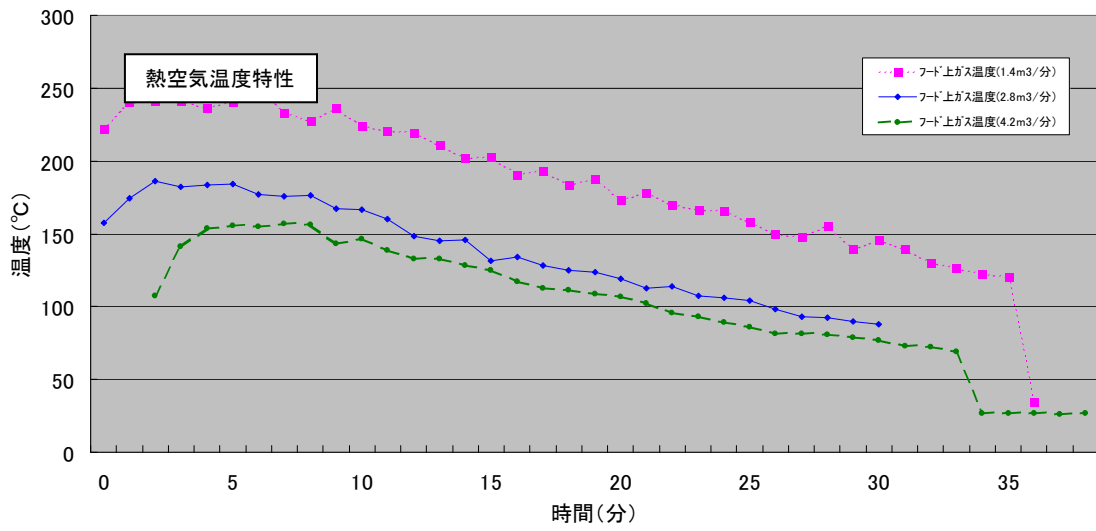
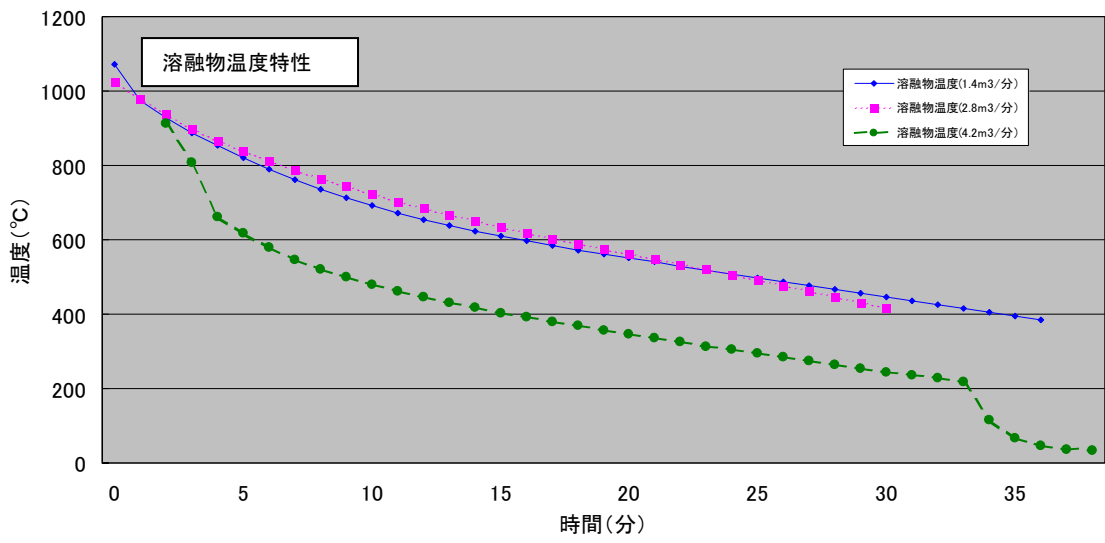
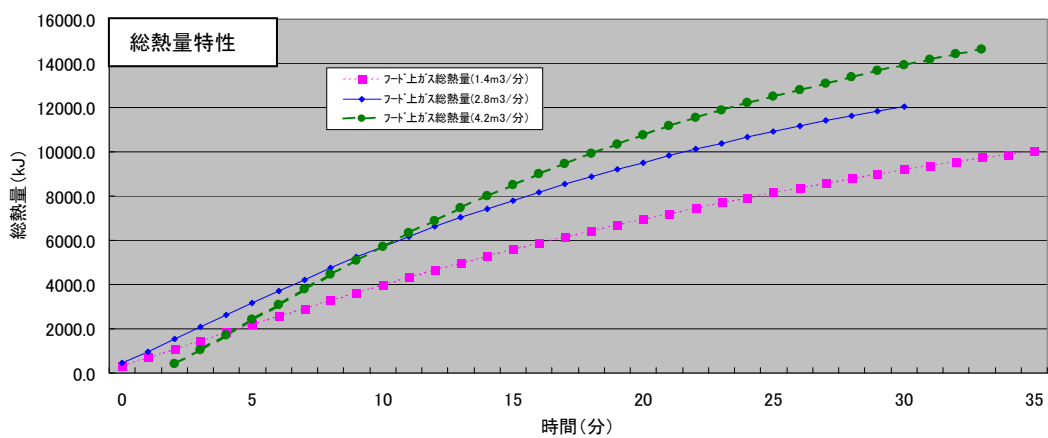
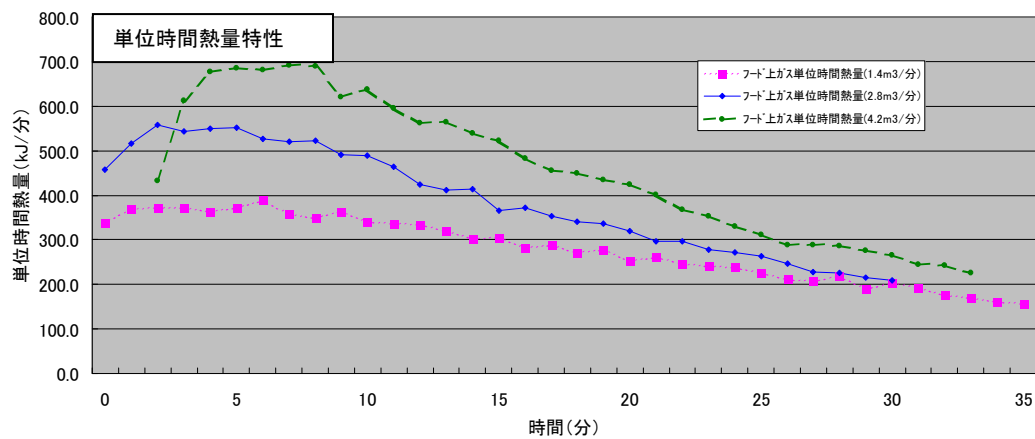


図 20 溶融物熱回収に伴う熱空気温度特性



※ 空気比熱は 1.007kJ/kg・K、空気比重は 1.24kg/m<sup>3</sup> として熱量試算を行った。

図 21 溶融物熱回収に伴う熱量特性

### b. 熱回収ユニット（プロトタイプ）の設計

熱回収ユニットは、類似する技術もなく新規開発する必要があること、開発した各ユニットを地上に据置く場合、トレーラを想定したレイアウトが模擬できないことを踏まえ、まずはプロトタイプを試作して様々な課題抽出を行うこととした。設計した両ユニット仕様を表 10 に、外観図を図 22 に示す。

表 10 熱回収ユニットの主な設計仕様

項目	内容
概要	溶融炉から排出された溶融物を鋳型で受け、その保有熱を熱空気として回収
その他	鋳型収納エリアは負圧室と区切られたボックス構造 溶融炉のトラブル発生時にも炉内の溶融物を全排湯できる構造 輻射熱をうまく熱空気として回収できるフード

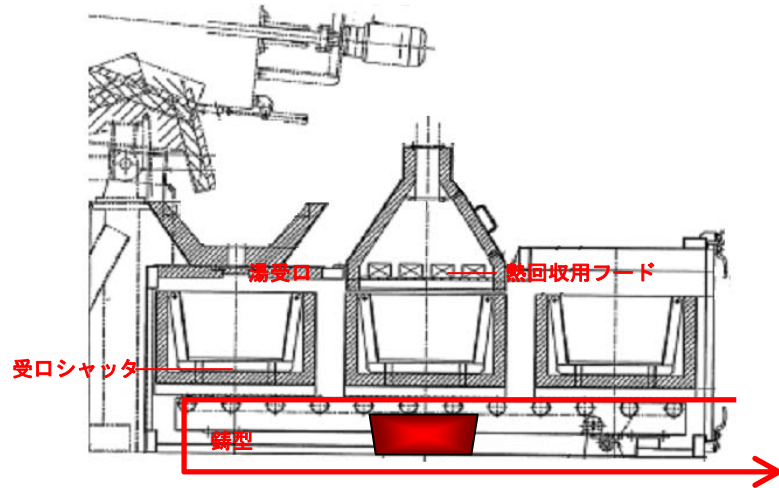


図 22 熱回収ユニット外観図

### ⑤ 集塵ユニット

150kW 誘導加熱溶融炉に破碎・予備乾燥プロセスが新たに追加されることに伴い、粉塵発生量の増加が危惧されることから、誘導加熱溶融炉と破碎・予備乾燥ユニットの内部を負圧状態に保つことができる集塵ユニットを開発することとした。

#### a. 集塵ユニット構成の最適化

集塵ユニットの仕様としては、コンパクトな構造以外に、連続集塵ができ、かつ万が一のことがあってもシステムから外部へアスベストを飛散させないことが大前提となる。図 23 に示すとおり、3つのケースを想定して、それぞれのケースのメリット・デメリットを整理した。装置と負圧室の集塵をひとつの集塵装置で行うケース 1、ケース 1 に前置集塵機を追加したケース 2、さらに 2つの集塵機能を独立させたケース 3 について評価したが、装置用集塵装置、室内用負圧集塵機いずれかのトラブル時も、外部へアスベストを飛散させない多重防護（フェールセーフ）の観点からケース 3 を採用することとした。

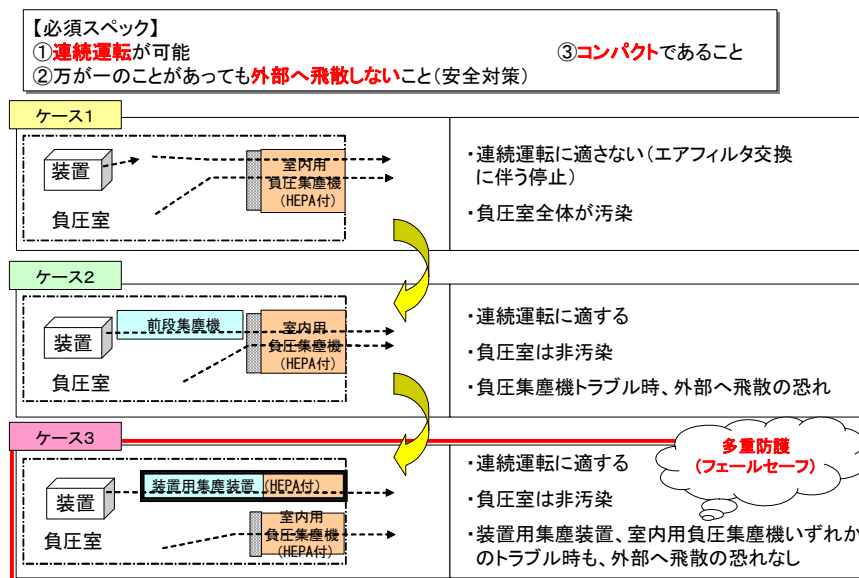


図 23 集塵ユニット構成比較

また、集塵ユニットの集塵方式として表 11 に示す 4 種類を選定し、集塵効率、連続運転、排水処理、装置サイズ、熱空気風量変化対応、動力といった項目毎に評価を行ったが、最も重要となる集塵効率の高さや連続運転への対応の観点から、バグフィルタ（自掃式）集塵機を選定することとした。

表 11 各種集塵方式の評価

粗集塵方式	集塵効率	連続運転	排水処理	装置サイズ	風量変化対応	動力	備考	評価
サイクロン集塵機	△	○	－	△	△	△	・微細粒子は集塵効率が低い ・装置側の排気風量に変動がある場合、サイクロンの集塵能力に影響	△
エアフィルタ（取替え式）集塵機	○	×	－	○	○	○	・目詰まり発生毎のフィルタ交換が必要	×
バグフィルタ（自掃式）集塵機	○	○	－	△	○	○	・一定範囲内の風量変化には追従性あり ・据付面積が大きい ・捕集粉の処理が容易 ・パルス運転により連続運転可能	◎
湿式集塵機	○	○	×	△	○	△	・アスベストを含む排水の処理が必要	×

#### b. 集塵ユニットの設計

前述の検討結果を踏まえ設計した集塵ユニットの仕様を表 12 に、外観図を図 24 に示す。

表 12 集塵ユニットの主な設計仕様

項目	内容
概要	アスベスト含有保温材溶融・無害化システムから局所的に発生する粉塵を集塵
処理対象物	ケイ酸カルシウム保温材破碎粉等
粉塵濃度	15 g/m <sup>3</sup> 程度（予想）
最大風量	20m <sup>3</sup> /分
処理方式	HEPA付き自掃式バグフィルタ
稼動時間	24 時間運転（5 日間程度連続運転）
外観寸法	長さ 2.3m 以内×幅 2.3m 以内×高さ 2.2m 以内
その他	粉塵による目詰まりが発生しにくく、連続運転できること 集塵機本体はトレーラに搭載することを想定したコンパクトな構造

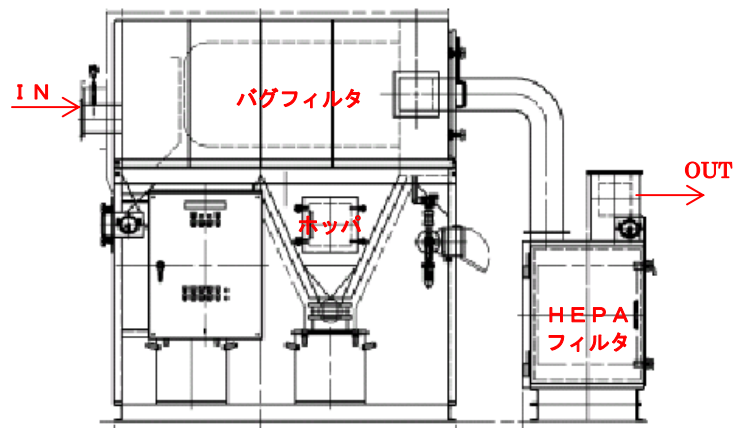


図 24 集塵ユニット外観図

## (2) 実用化飛散抑制ユニットの製作

### ① 一体化システムの開発

(1) で設計した各ユニットを集結した飛散抑制ユニットと 150kW 誘導加熱溶融炉を北陸電力株式会社の火力発電所構内に設置して一体化したシステム（以下、「一体化システム」という。）を構築した。

図 25 にシステムのイメージ図を示すが、処理物の流れに沿って、破碎機、搬送乾燥機、攪拌機、熱回収装置、集塵装置で構成されている。さらに、集塵装置を除く各装置はビニール養生で囲い別に負圧集塵することでアスベスト飛散防止の多重防護化を図っている。一体化システムの配置レイアウトを図 26 に、配置状況を図 27 に示す。

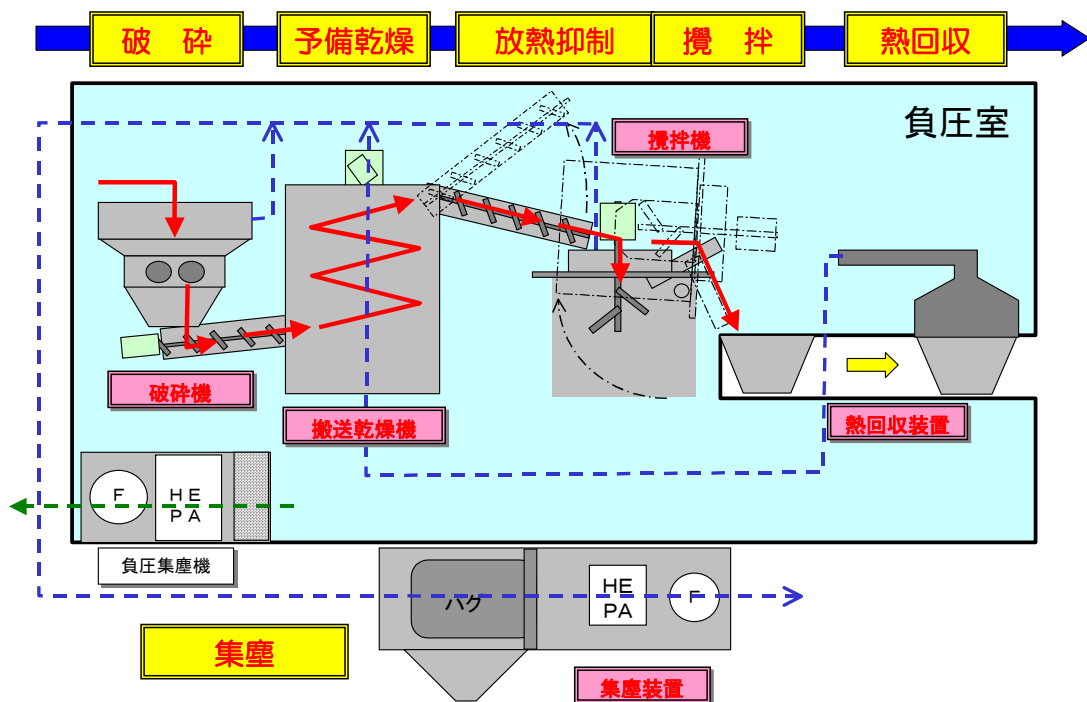


図 25 一体化システムの構成イメージ図



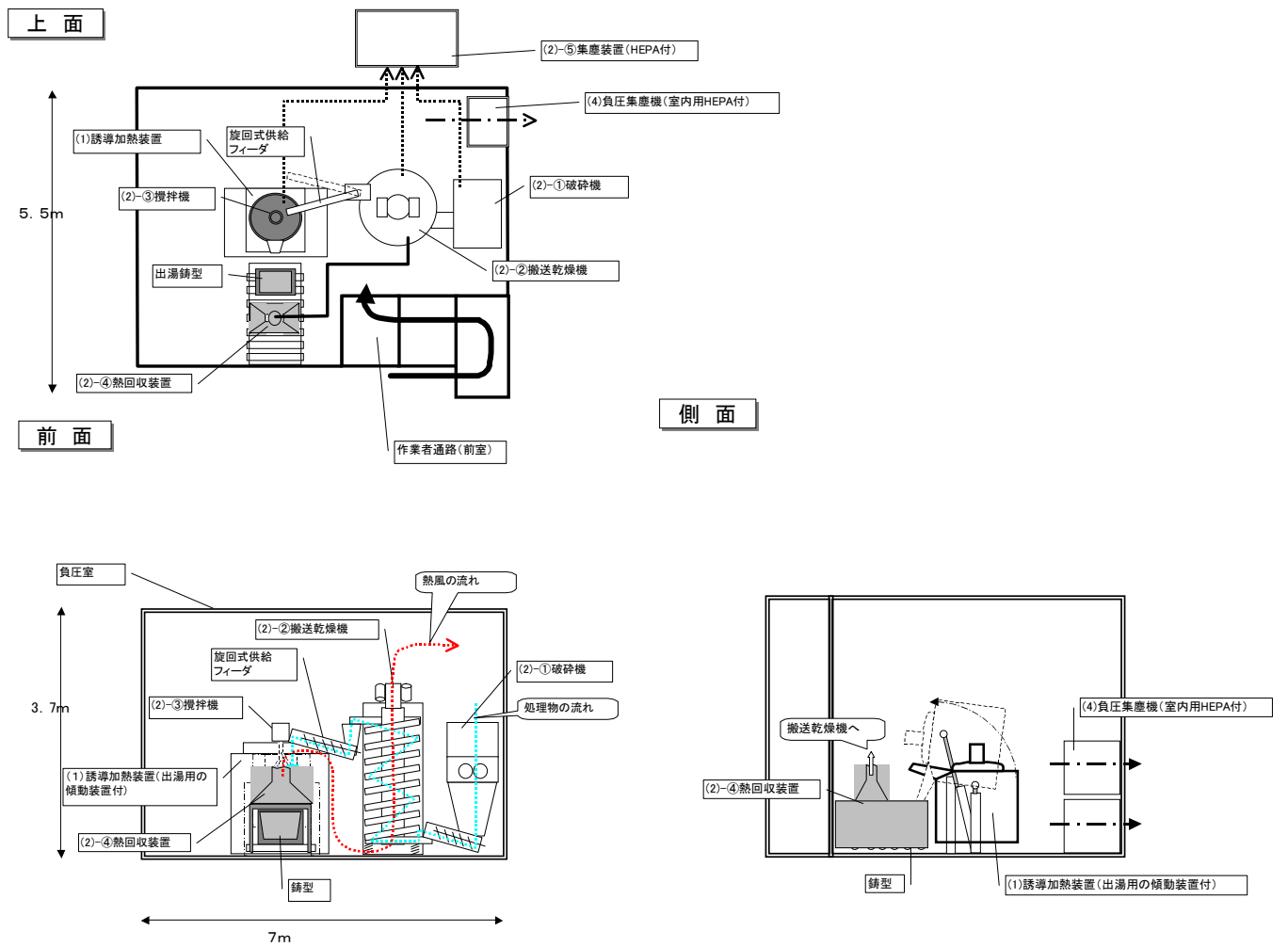


図 26 一体化システムの配置レイアウト



図 27 一体化システムの配置状況

## ② 課題の抽出と対策

### a. 課題の抽出

アスベスト含有保温材での熔融試験前に、ノンアス保温材を用い一体化システムで事前の熔融試験を行った。負圧室内で破砕機上部ホッパに保温材を投入する操作を除き、負圧室外からの遠隔操作で処理を行った。処理中は、今回開発の各ユニットを連動させて正常に機能することを確認したが、一方で図 28 に示す不具合が発生した。

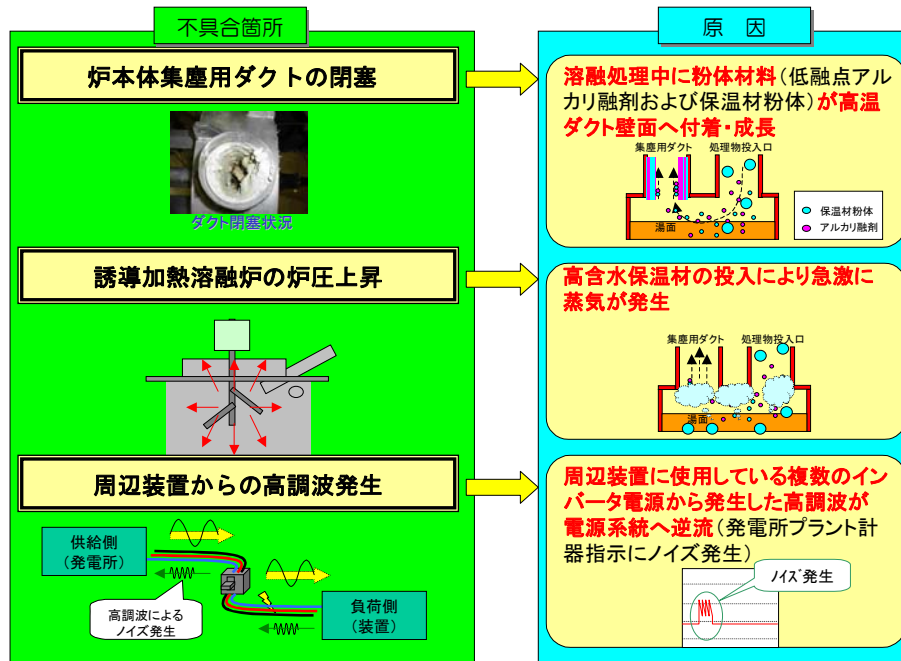


図 28 熔融試験時の不具合箇所

炉本体集塵用ダクトの閉塞原因について調べるため、停止中にダクト入口部の点検を行ったところ、低融点のアルカリ融剤と粉体材料が高温ダクト壁面へ付着し、積層していることが判明した。

また、誘導加熱熔融炉の炉圧上昇は、連続で投入される保温材からの水分蒸発に起因しており、特に保温材中水分が多い場合、炉圧が正圧となって炉から水蒸気が噴出す恐れもある。このような炉内圧力の変動に対しては、集塵装置ブロワ回転数を変化させて炉内圧力を制御する仕組みとなっているが、急激な変化には十分追従しきれていないと考えられる。

さらに、周辺装置からの高調波発生により火力発電所プラント計器指示値にノイズが混入する事象が発生した。(ただし、発電プラント運転状態に影響はなし。) これは、新たに開発した飛散抑制ユニットの各モータに設置されているインバータから高調波ノイズが発生し、発電所電源系統に逆流していることが原因であると考えられる。

### b. 対応策と効果確認

#### (a) 炉本体集塵用ダクトの閉塞対策

炉本体集塵用ダクト閉塞対応策として、図 29 に示すとおり、投入口に落下した粉体が集塵ダ

クト側へ流入しないよう、近接していた投入口と集塵ダクト位置を隔離し、粉体の巻き込みを抑制する構造とした。

また、投入口と集塵ダクト間に邪魔板となるフードを設置し、投入口から粉体が炉内へ落下せずにショートカットしてダクト側へ吸引されるのを抑制する構造とした。

さらに、集塵ダクト側には、閉塞を防止するためのダクトスクレーパを新設し、付着・固化した粉体材料を炉側へ掻き落とす構造とした。

以上の対応策に加え、現状より粗い粒度のアルカリ融剤に変更し、ダクトへの融剤吸引抑制を図ることとした。

これらの対応策を全て実施した後に再度溶融試験を行ったところ、ダクト閉塞は解消され、安定した連続処理が行えるようになった。

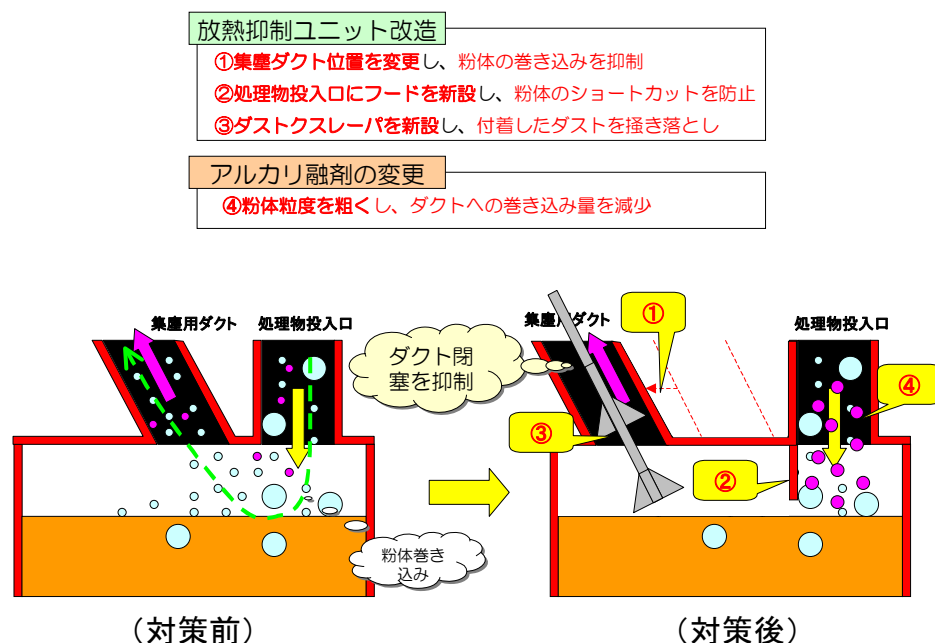


図 29 炉本体集塵用ダクト閉塞対策

### （b）炉圧上昇対策

溶融処理中に炉内圧を正圧にしないためには、想定される最大水蒸気発生量以上に常時吸引しておけば問題はないが、炉内吸引量の増加は、炉本体集塵用ダクトの閉塞を誘発したり、炉内熱の排気によるエネルギーロス増加にもつながるため、一定の炉圧を維持したうえで炉圧変動を調整することが望ましい。

そのため、炉内圧を監視して急激な炉圧上昇に対して即座に追従できる新しい炉圧制御システムを構築した。図 30 に改良型炉圧制御システムの系統を示す。従来は、集塵装置ブロワの回転数を変化させ炉圧変動に追従させる方法であったが、新システムではブロワ吸引量を固定したうえで、炉ダクト近傍に設置した複数の大気導入弁を開閉させることにより炉圧変動に追従する方式を採用することとした。この方法によれば、炉圧上昇時に大気導入弁を瞬時に閉とすることで吸引パuffアを即座にカットできるため、急激な炉圧変動にも対応が可能となる。

また、炉圧上昇抑制には、炉へ投入される保温材のさらなる水分低減が効果的であることか

ら、熱空気を利用した予備乾燥ユニットの乾燥能力の更なる向上を目的に、図 31 に示すとおりスパイラルフィーダトレイ上部に遠赤外線式シーズヒータを新たに設置することとした。

以上の対応策を実施した後に再度溶融試験を行ったところ、溶融処理中、若干の炉圧変動はあるものの、安定した炉内の負圧維持ができるようになった。

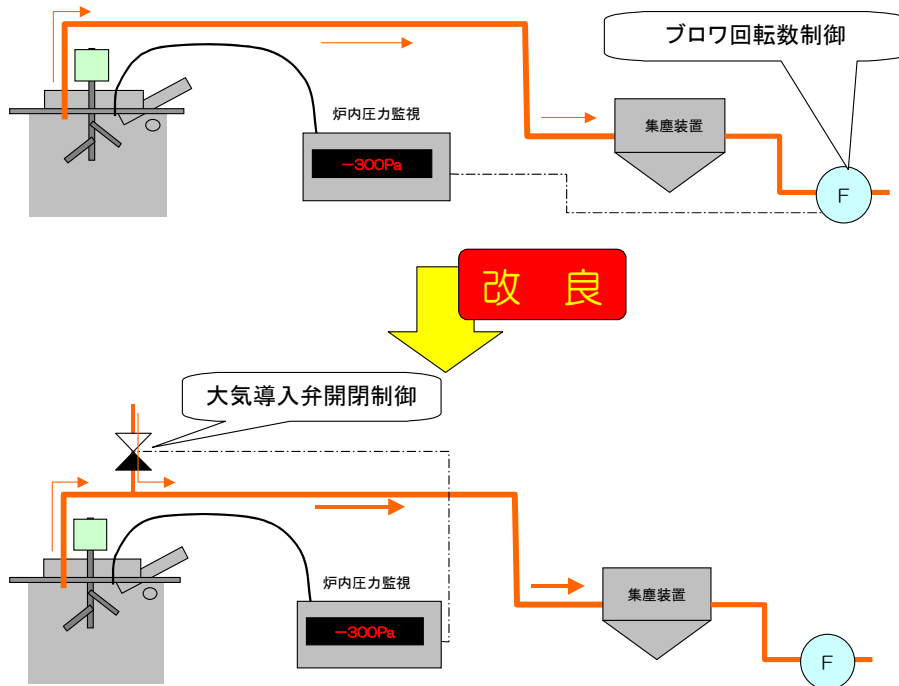


図 30 改良型炉圧制御システム

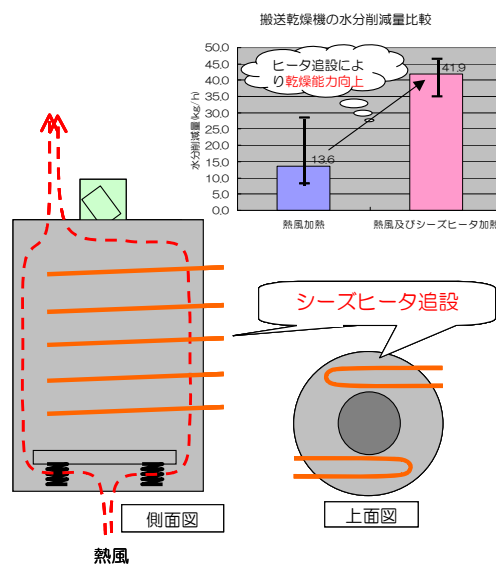


図 31 改良型予備乾燥ユニット

### (c) 周辺装置からの高調波抑制対策

高調波を抑制するため、図 32 のとおり、一体化システムの電源系統内で特にノイズが多いと考えられる 200V 系統に力率コンデンサ及び絶縁トランスを仮設し、一体化システムの運転を行ったところ、発電所プラントの計器指示値へのノイズ混入を解消することができた。

一方、運転中の発電プラントに悪影響を及ぼさないよう万全の対策を図るためには、別系統で受電する誘導加熱溶融炉用のインバータも含めたトータルの高調波抑制対策が必要であることから、一括受電しつつ高調波を抑制できる受電ユニットの開発を新たに検討することとした。

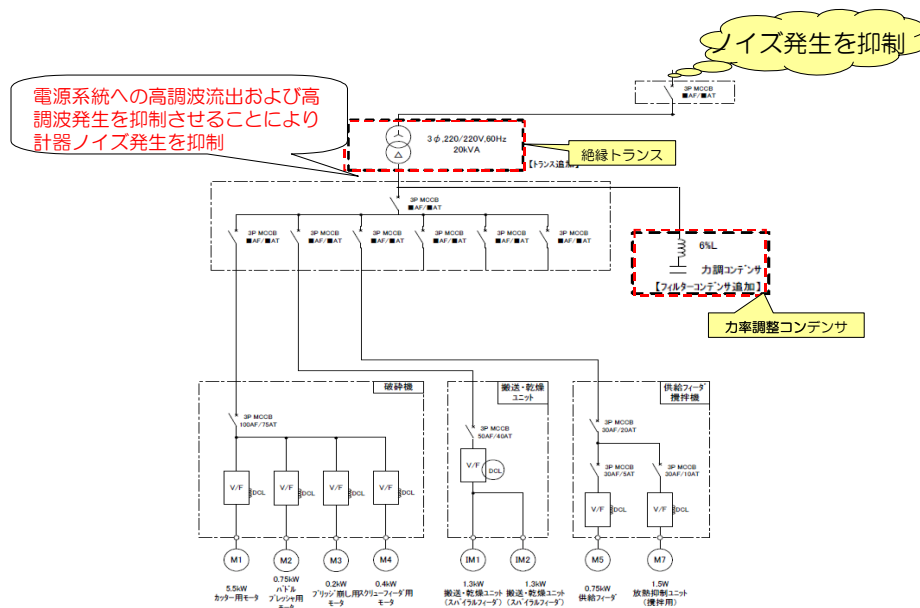


図 32 高調波抑制対策

### ③ 一体化システムによるアスベスト含有保温材溶融試験

対応策を施した一体化システムによりアスベスト含有保温材を用いた溶融・無害化試験を行った。図 33 に溶融処理中の各種データトレンドを示す。これまでの 150kW 誘導加熱溶融炉の溶融試験結果から、金属るつぼ温度を 1,200°C程度とすることで、溶融温度を 1,050°C以上に保持できることがわかっている。今回の試験でも、処理中や出湯前において金属るつぼ温度は 1,200°C程度であり、1,050°C以上で溶融処理されていることがわかる。なお、出湯時に温度が一時的に低下しているのは、溶融炉の加熱を停止していたためである。

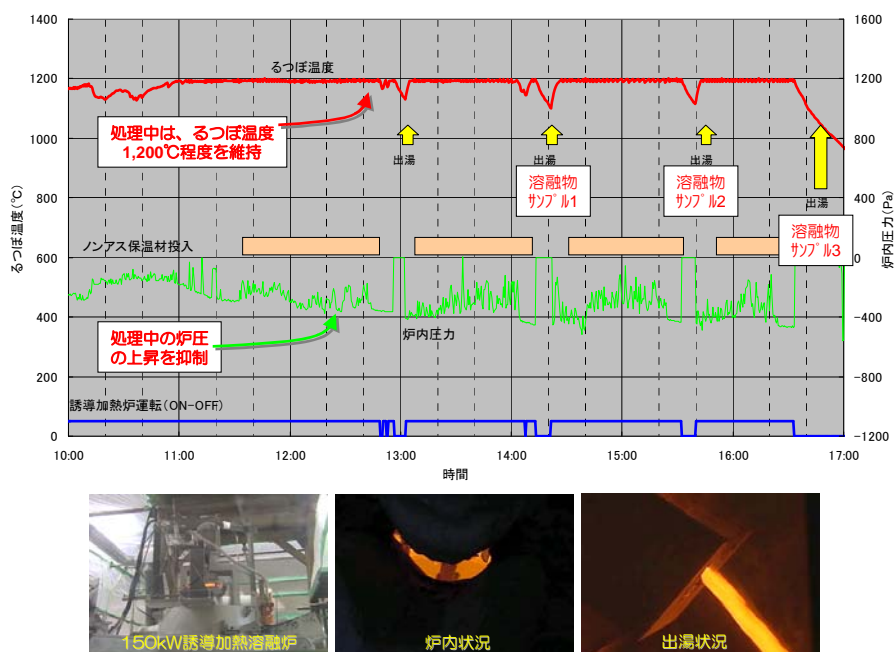


図 33 溶融処理中の各種データおよび試験風景

溶融試験結果を表 13 に示す。溶融処理後の溶融物のサンプル 3 回分について、公定法である JIS A1481 によりアスベスト濃度を測定したが、アスベストは検出されず、確実に無害化処理できていることを確認した。また、図 34 に X 線回折分析結果を示すが、アスベストに起因するピークは消失し、それ以外の結晶ピークも消失していることから、溶融物はきれいにガラス化していることがわかる。

表 13 アスベスト含有保温材および溶融物のアスベスト濃度測定結果

分析項目	試料	分析方法	分析結果	定量下限
石綿含有量	保温材	JIS A1481	アモサイト 0.6% 〔それ以外の 5 種類の 石綿は不検出〕	0.1%
石綿含有量	溶融物	JIS A1481	不検出	0.1%

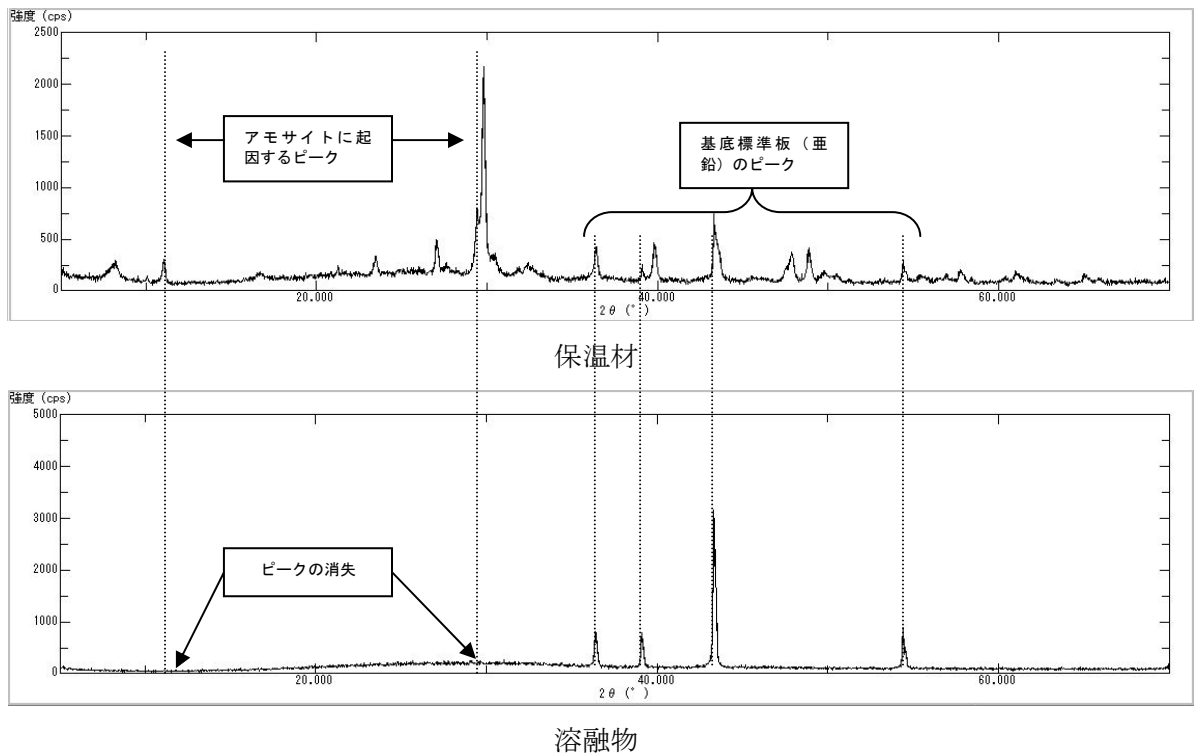


図 34 溶融前後サンプルの X 線回折分析結果

また、図 35 に示す箇所で溶融処理中の集塵装置排気および周辺大気環境中のアスベスト濃度を測定したが、表 14 に示すとおりアスベストは検出されず、一体化システムの安全性が確認できた。

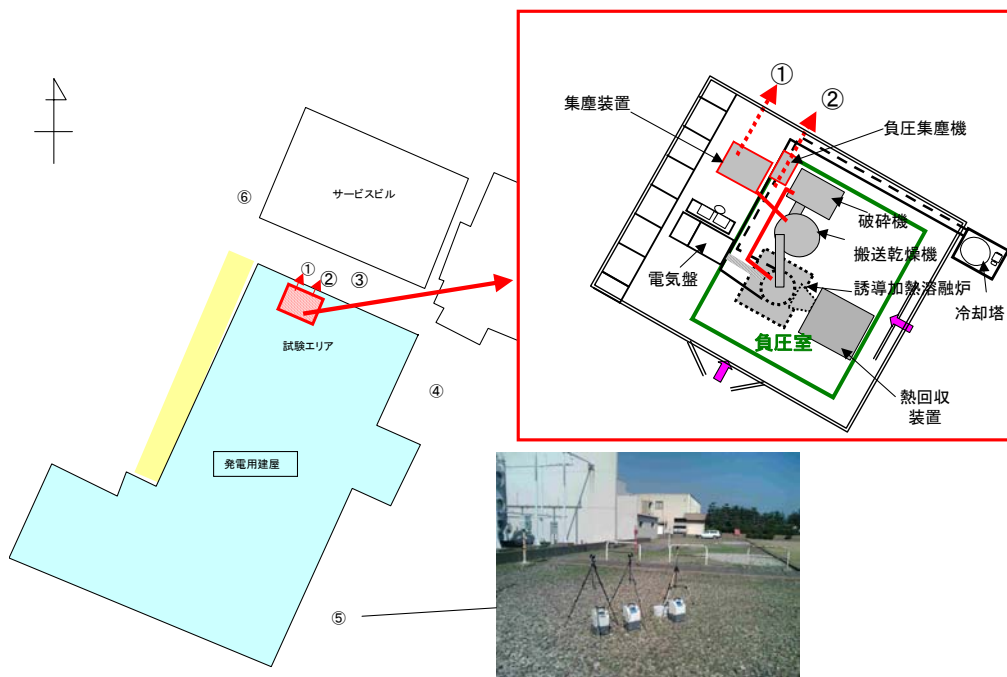


図 35 集塵装置排気および周辺大気のアスベスト濃度測定位置

表 14 集塵装置排気および周辺大気のアスベスト濃度測定結果

(装置排気)

分析項目	採取場所		分析方法	分析結果	定量下限
石綿濃度 (単位：本/L)	①	集塵装置排気口 (HEPA 出口)	石綿を含む廃棄物における 無害化処理認定制度申請の 手引き(第 1 版) 別添 1 廃棄物処理施設に係る石綿 のサンプリング・分析方法 の概要[暫定版]	不検出	0.3
	②	トレーラ負圧室排気口 (HEPA 出口)		不検出	

(周辺大気)

分析項目	採取場所		分析方法	分析結果	定量下限
石綿濃度 (単位：本/L)	③	測定点 1	石綿に係る特定粉じんの濃 度の測定方法（平成元年環 境庁告示第 93 号）	不検出	0.3
	④	測定点 2		不検出	
	⑤	測定点 3		不検出	
	⑥	測定点 4		不検出	



## 2. 吹付けアスベスト無害化・資源化処理の研究

### (1) 熔融ラボ試験

アスベスト含有吹付け材には、施工時にセメント、水、アスベストを一緒に吹付ける「乾式吹付け材」、施工時にセメント、水、アスベストを予め混合して吹付ける「湿式吹付け材」があるが、特に「乾式」の吹付け材は、アスベスト含有率が10%以下である保温材に比べ30~40%と高いこと、保温材とは成分構成の異なるセメントが含まれていることから、出力3kW誘導加熱熔融炉を用いて熔融ラボ試験を行った。

熔融ラボ試験には、北陸電力建物から除去された2種類の乾式吹付け材サンプルを用いた。ひとつはクロシドライト（青石綿）を35%含有する吹付け材、もうひとつはクリソタイル（白石綿）を24%含有する吹付け材である。

図36に熔融ラボ試験装置、表15および図37に試験結果を示すが、添加するアルカリ融剤の種類や添加量を保温材と同様にしたところ、表中写真に示す、きれいなガラス状の熔融物となった。この熔融物を公定法であるJIS A1481でアスベスト濃度を分析したところ、アスベストは検出されず、確実に熔融・無害化できることがわかった。

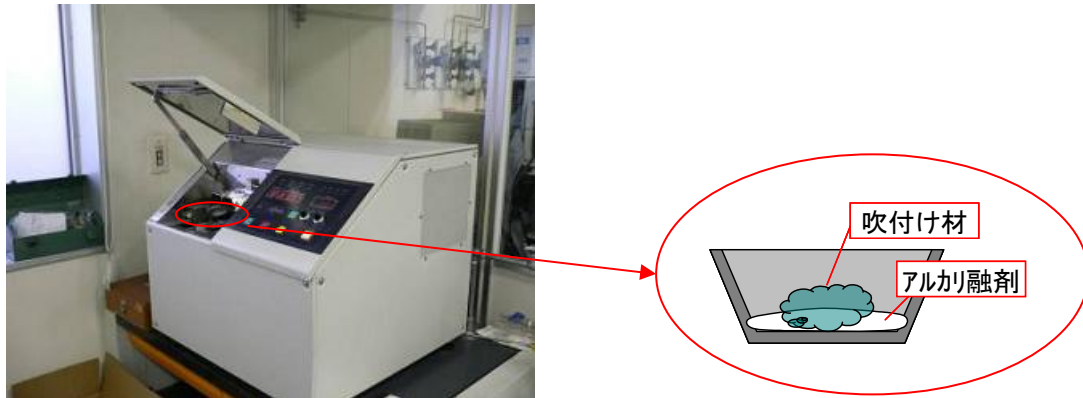
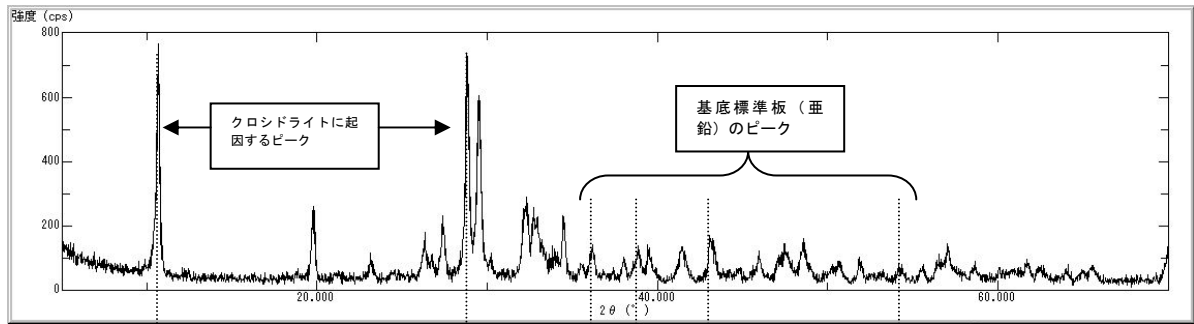


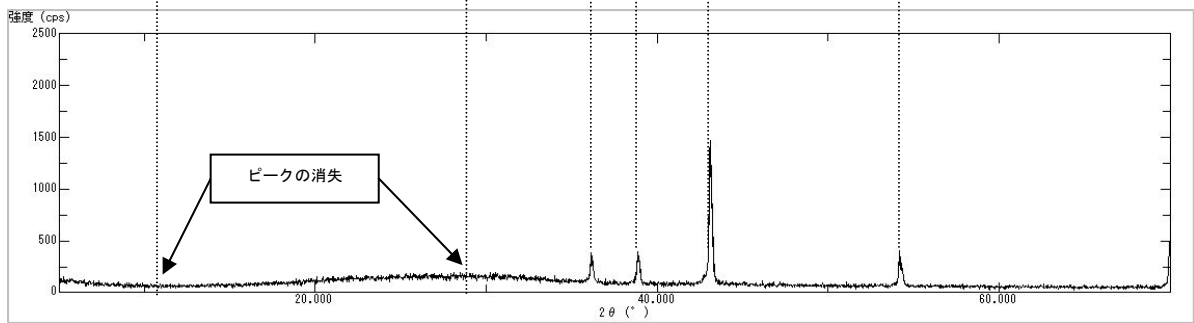
図 36 熔融ラボ試験装置（3kW 誘導加熱熔融炉）

表 15 アスベスト含有吹付け材の溶融試験結果

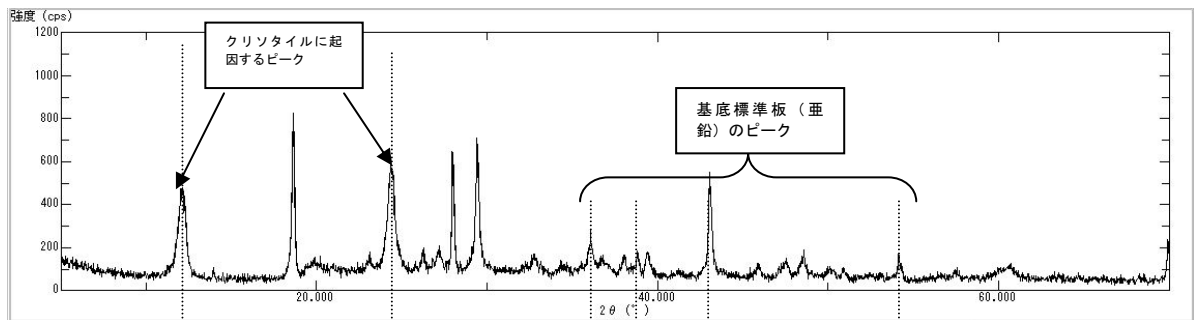
テスト	クロシドライト吹付け材	クリソタイル吹付け材
吹付け材/融剤比	1 : 0.5	1 : 0.5
設定/実測温度	1,100℃ (るつぼ内温度 約1,050℃)	
溶融処理時間	3 m i n	
吹付け材 石綿濃度 (JIS A-1481)	クロシドライト : 35% それ以外の5種類の 石綿は不検出 (X線回折結果は図 37 参照)	クリソタイル : 24% それ以外の5種類の 石綿は不検出 (X線回折結果は図 37 参照)
溶融状況	○	○
	溶融物内に溶け残りや 濁りは認められない	溶融物内に溶け残りや 濁りは認められない
溶融物 石綿濃度 (JIS A-1481)	不検出 (X線回折結果は図 37 参照)	不検出 (X線回折結果は図 37 参照)
溶融前		
溶融後		



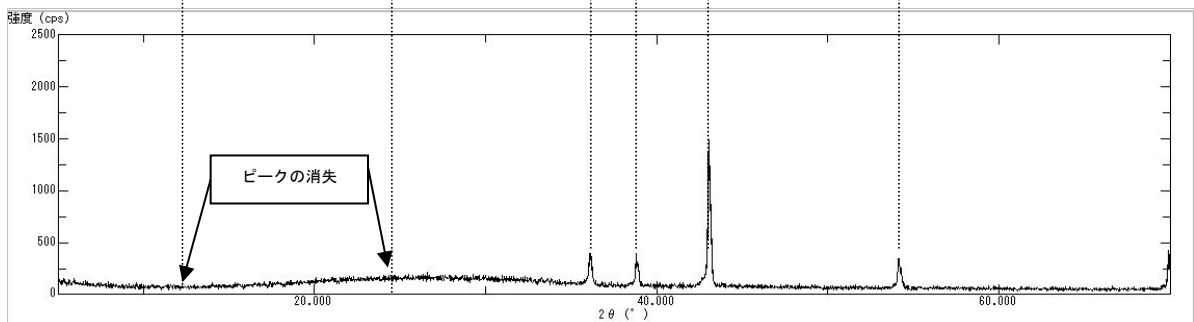
クロシドライト吹付け材 (溶融前)



クロシドライト吹付け材 (溶融後)



クリソタイル吹付け材 (溶融前)



クリソタイル吹付け材 (溶融後)

図 37 溶融前後サンプルの X線回折分析結果

## (2) 実用規模での溶融・無害化試験

### ① 溶融試験

実用規模の 150kW 誘導加熱溶融炉を用いてアスベスト含有吹付け材の溶融試験を行った。図 38 に示すとおり、実用化飛散抑制ユニットを経由せず、温度上昇前のるつぼ内にアスベスト含有吹付け材とアルカリ融剤を事前投入した後、溶融処理を行った。なお、アスベスト含有吹付け材は北陸電力建物から除去されたクリソタイル 3.1%を含む乾式吹付け材をサンプルとして用いた。

表 16 に公定法 JIS A1481 による溶融物のアスベスト濃度測定結果を、図 39 に X 線回折分析結果を示すが、溶融物からアスベストは検出されず、実用規模の誘導加熱溶融炉での溶融処理が可能であることがわかった。

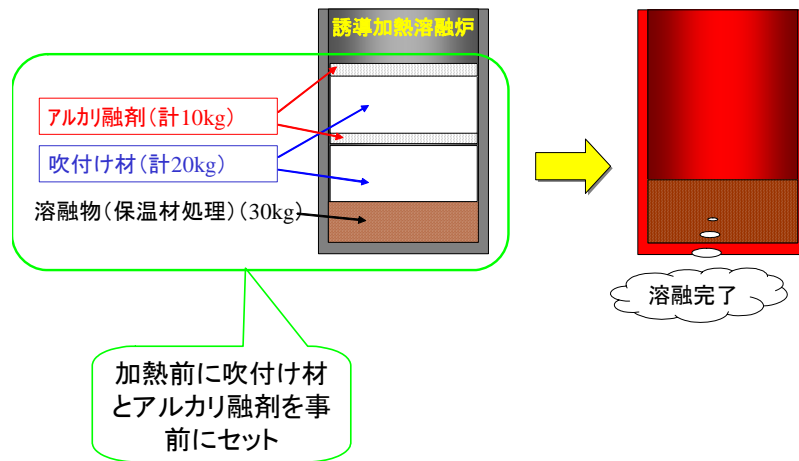


図 38 150kW 誘導加熱溶融炉による吹付け材溶融試験概念図

表 16 吹付け材および溶融物のアスベスト濃度測定結果

分析項目	試料	分析方法	分析結果	定量下限
石綿含有量	吹付け材	JIS A1481	クリソタイル 3.1% 〔それ以外の5種類の 石綿は不検出〕	0.1%
石綿含有量	溶融物	JIS A1481	不検出	0.1%

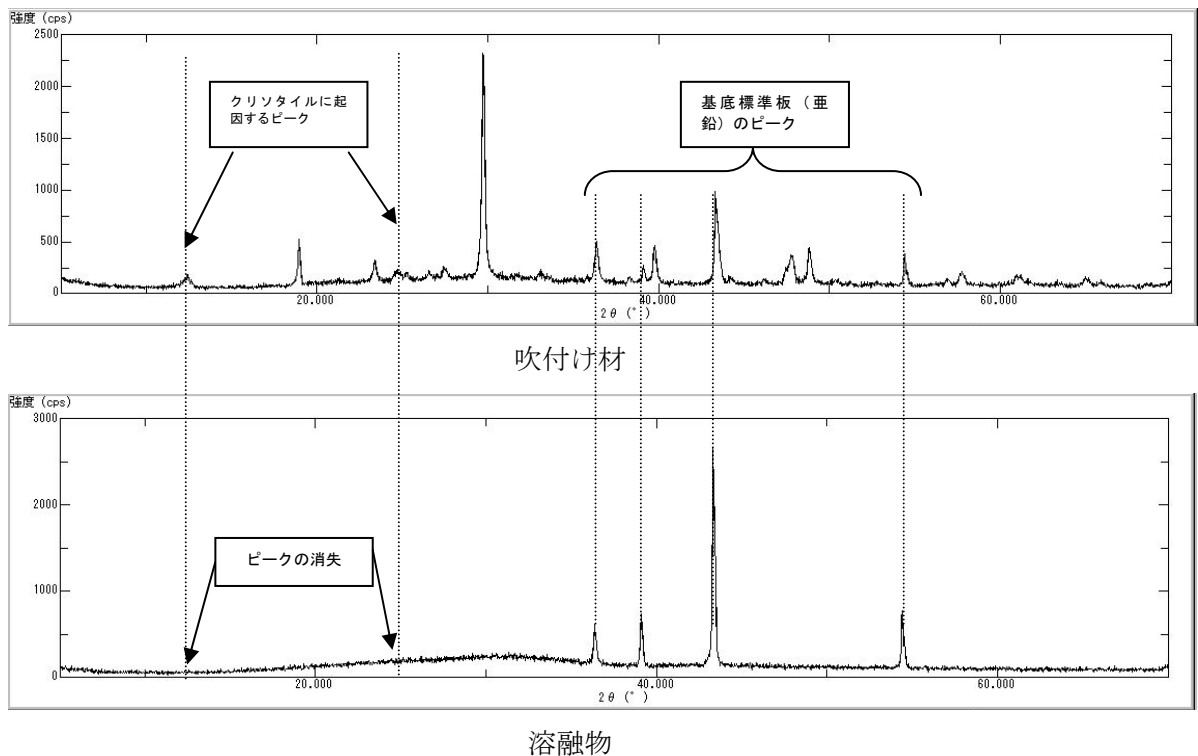


図 39 溶融前後サンプルの X 線回折分析結果

## ② 一体化システム適用にあたっての課題

今回、実用規模の誘導加熱溶融炉でアスベスト含有吹付け材処理が可能であることは確認できたが、一体化システムに適用するには、これまでの保温材を対象とした実用化飛散抑制ユニット開発プロセスと同様、入念な事前調査と予備試験が必要である。具体的には、現場で解体除去される吹付け材の廃棄状況（吹付け材種類、水分量、固化剤処理など）の調査、実用化飛散抑制ユニットからの粉塵飛散量の違いによる排気系統の変更、保温材との比重の違いに伴う攪拌方法の変更など、吹付け材の各種物性を十分考慮して開発を進めていく必要がある。

特に廃棄される吹付け材は多種に渡っているため、それら全て満足するシステムとする場合は装置の大型化も予想される。トレーラ搭載型の移動式処理を目指す場合は、処理の対象とする吹付け材を限定することも必要である。

### 3. オンサイト式溶融・無害化処理システムを用いた実証試験

#### (1) 実用化飛散抑制ユニットの改良とトレーラの設計

これまでに開発した一体化システムは、破砕機上部への保温材の投入を作業者が行っていたが、開発の最終形態であるトレーラ搭載型のオンサイト式溶融・無害化処理システム（以下、「オンサイトシステム」という。）には、アスベストを飛散させることなく安全に保温材を投入できる自動投入機構や、溶融物の熱回収と取出しを容易にするユニットが必要となることから、実用化飛散抑制ユニットを改良するとともに、道路運送車両法に則り公道を安全に走行できるトレーラの設計を行った。

##### ① 保温材自動投入機構の開発

オンサイトシステムは、名前のとおり現地で解体除去された廃棄物を同一敷地内で処理することを想定している。廃棄されたアスベスト含有保温材の梱包には、従来、使い捨ての2重ビニール袋が使用されているが、オンサイトシステムではオンサイト処理のメリットを活かし、堅牢で密閉性が高く何度も繰り返し利用できるプラスチックドラム（以下、密閉容器という。）を使用することとしている。なお、密閉容器には、危険物の海上輸送などに用いられるUN規格品を選定した。

図 40 に改良した実用化飛散抑制ユニットを組み込んだオンサイトシステムの構成イメージ図を示すが、自動投入機構は処理フローの最も上流に位置し、図 41 に示すとおり、密閉容器を自動投入機構にセットした後は、容器の傾動（上昇）～蓋開け～保温材の落とし込み～蓋閉め～傾動（下降）までを自動的に行うことができる。

なお、保温材投入時の外部へのアスベスト飛散を防止するため、自動投入機構内部は常時負圧状態を維持している。

また、投入された保温材はベルトコンベアで水平搬送された後、後段のバケットリフタにより破砕機上部ホッパへ上昇・投入される。なお、ベルトコンベア搬送中に万が一異物を発見した場合は、グローブバックのハンドホールを用いて異物を除去できる構造となっている。

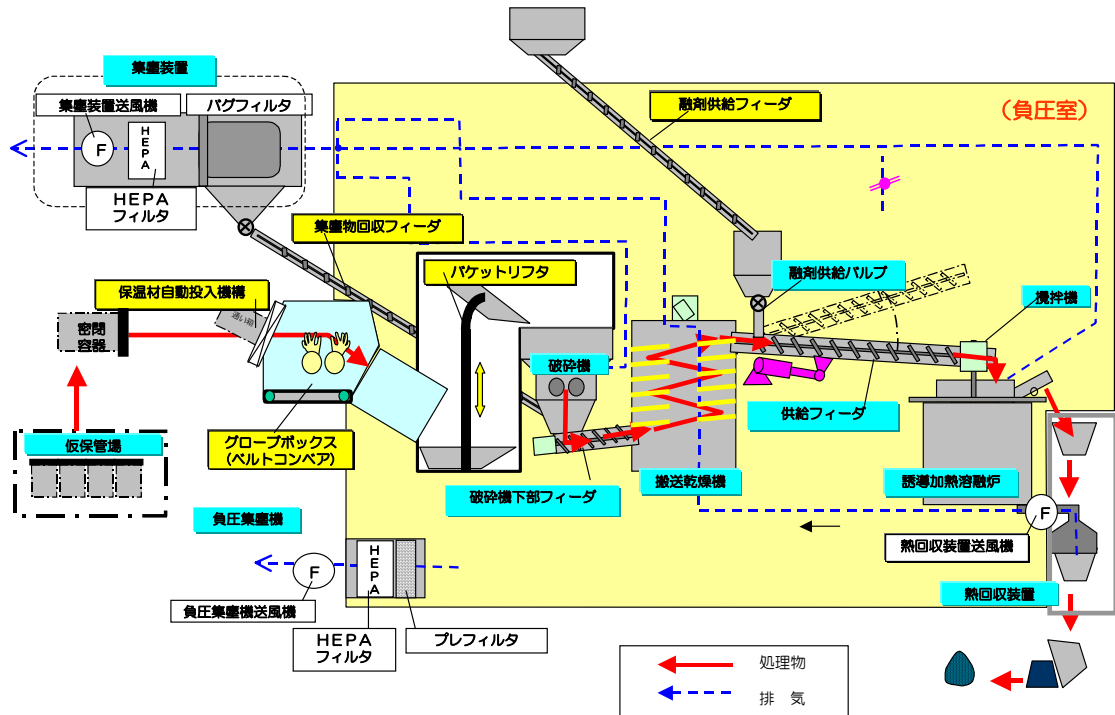


図 40 オンサイトシステムの構成イメージ図

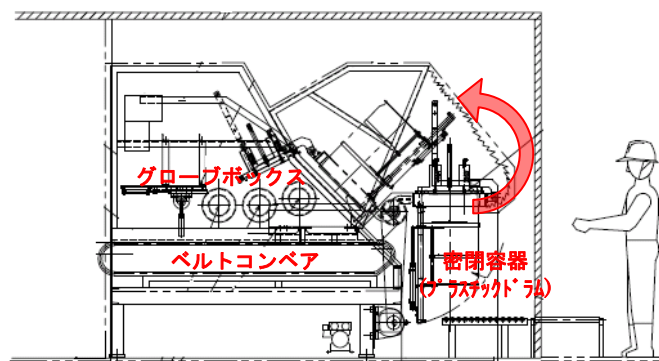


図 41 保溫材自動投入機構

## ② 改良型熱回収ユニットの開発

1. (2) ③「一体化システムによるアスベスト含有保溫材溶融試験」結果からは、試作したプロトタイプ熱回収ユニットの安全性及び有効性を確認することができた。一方、炉から排出される溶融物を受ける鋳型を一箇所の開口部から出し入れするため、鋳型移動時には熱回収を中断せざるを得ないなど連続処理には不向きであることから、今回、改良型の熱回収ユニットを開発することとした。

表 17 に示すとおり、処理後の溶融物を受ける鋳型は、「スタンバイ位置」→「出湯位置」→「熱回収位置」→「取出位置」の順に移動させていく必要がある。図 42 に改良型の熱回収ユニットを示すが、4つの鋳型の移動は同じタイミングで行う必要があるため、熱回収ユニットには二箇所の開口部を設け、鋳型は一方方向にワンスルーで移動可能な構造とした。具体的には、

熱回収ユニット入口に連結した鑄型を4台配置し、「スタンバイ位置」→「出湯位置」→「熱回収位置」→「取出位置」の順にローラコンベアで一方向に水平移動できるようにした。これにより、溶融物からの熱回収を連続的に行えるようになった。

表 17 実処理における鑄型の移動パターン

	溶融 処理	出湯	溶融 処理	出湯	溶融 処理	出湯	溶融 処理	出湯
処理工程	[Diagram showing continuous processing flow with hatched areas and downward arrows]							
鑄型 1	出湯位置	熱回収位置	取出し位置	自然冷却 (取出し後)				
鑄型 2	スタンバイ位置	出湯位置	熱回収位置	取出し位置	自然冷却			
鑄型 3		スタンバイ位置	出湯位置	取出し				
鑄型 4			スタンバイ位置	出湯位置	熱回収位置			
・	・	・	・	・	・	・	・	・
・	・	・	・	・	・	・	・	・
・	・	・	・	・	・	・	・	・

4つの鑄型が同時に移動すれば最も効率的

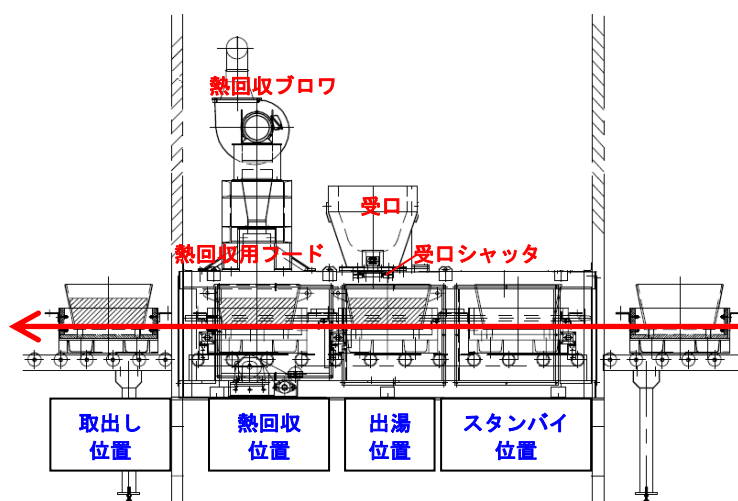


図 42 改良型熱回収ユニット

### ③ トレーラ仕様の検討

保温材自動投入機構や熱回収ユニットなど追加した一体化システムを搭載できるトレーラ台車の構造を検討した。台車は牽引用のトラクタと切り離し可能なセミトレーラとした。図 43 で示すとおり、セミトレーラには、低床式、中低床式、平床式などいくつかの種類があるが、機器をトレーラに搭載する際には高さ制限がクリティカルとなることから、車体中央部分が低く最も収納高さを確保できる中低床式セミトレーラを採用することとした。



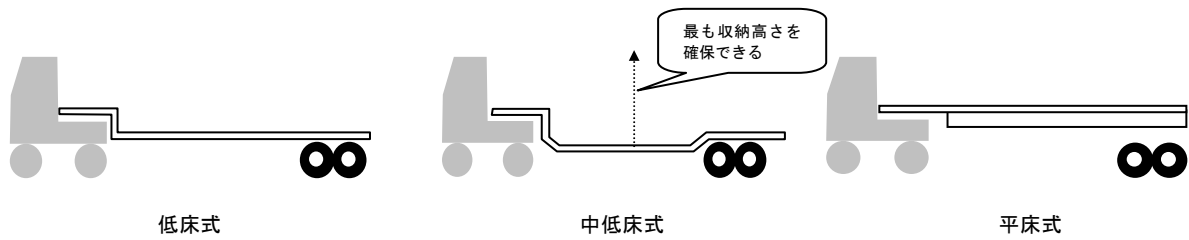


図 43 セミトレーラの種類

また、セミトレーラが公道を走るために遵守すべき必要な道路運送車両法の車両保安基準を表 18 に示すが、外寸法その他、重量や転倒防止角など様々な基準を満足させる必要がある。

これらの基準を満足しつつ、処理の動線を最適化したセミトレーラの装置搭載レイアウトを、図 44 に示す。なお、セミトレーラへの装置搭載に当たっては、目的に応じて、誘導加熱溶融炉をはじめとする処理装置を収めた「処理エリア」、保温材投入機構や集塵装置を収めた「処理物投入・集塵エリア」、制御盤をはじめ操作員が監視・操作を行う「制御・操作エリア」を3つのゾーンに区分けしアルミパネル外壁で覆った。特に、処理エリアは、負圧状態に維持することにより、アスベスト飛散防止の多重化を図っている。

表 18 セミトレーラの主な車両保安基準と仕様

項目	制限値	設計値
全長	12m 以下 (連結装置中心から当該セミトレーラ後端までの水平距離)	11.9m
幅	2.5m 以下	2.48m
高さ	3.8m 以下	3.79m
総重量	28t 以下 (連結装置中心から最後部の車軸中心までの水平距離が 9.5m 以上の場合)	28t 以下
安定性	転倒防止角 30° 以上 (車両総重量が車両重量の 1.2 倍以下の自動車の場合)	35° 以上

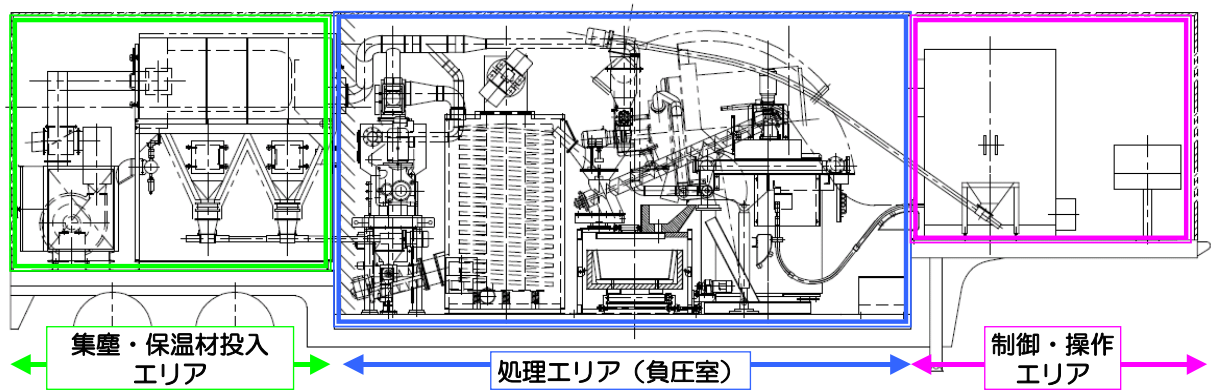


図 44 セミトレーラの装置搭載レイアウト

(2) トレーラへの架装および商用運転を想定した長時間連続運転

① トレーラへの架装

3. (1) の設計に基づき、機器が損傷しないよう細心の注意を払いながら、トレーラに機器とアルミパネルの架装を行った。

図 45 に完成したオンサイトシステムを示すが、トレーラの前室には操作者の出入口が、中室には点検用の扉が、後室には作業用の作業台を兼ねた扉が設置されている。



図 45 完成したオンサイトシステム

## ② 商用運転を想定した長時間連続運転

### a. 長時間連続運転

完成したオンサイトシステムを北陸電力の火力発電所に搬入・設置して、昼夜を通じた長時間連続運転試験を行った。試験時の状況を図 46 に示すが、実用化を念頭に今回、初めてトレ

ーラを屋外に設置し、雨じまい対策も施したうえで連続運転試験を行った。

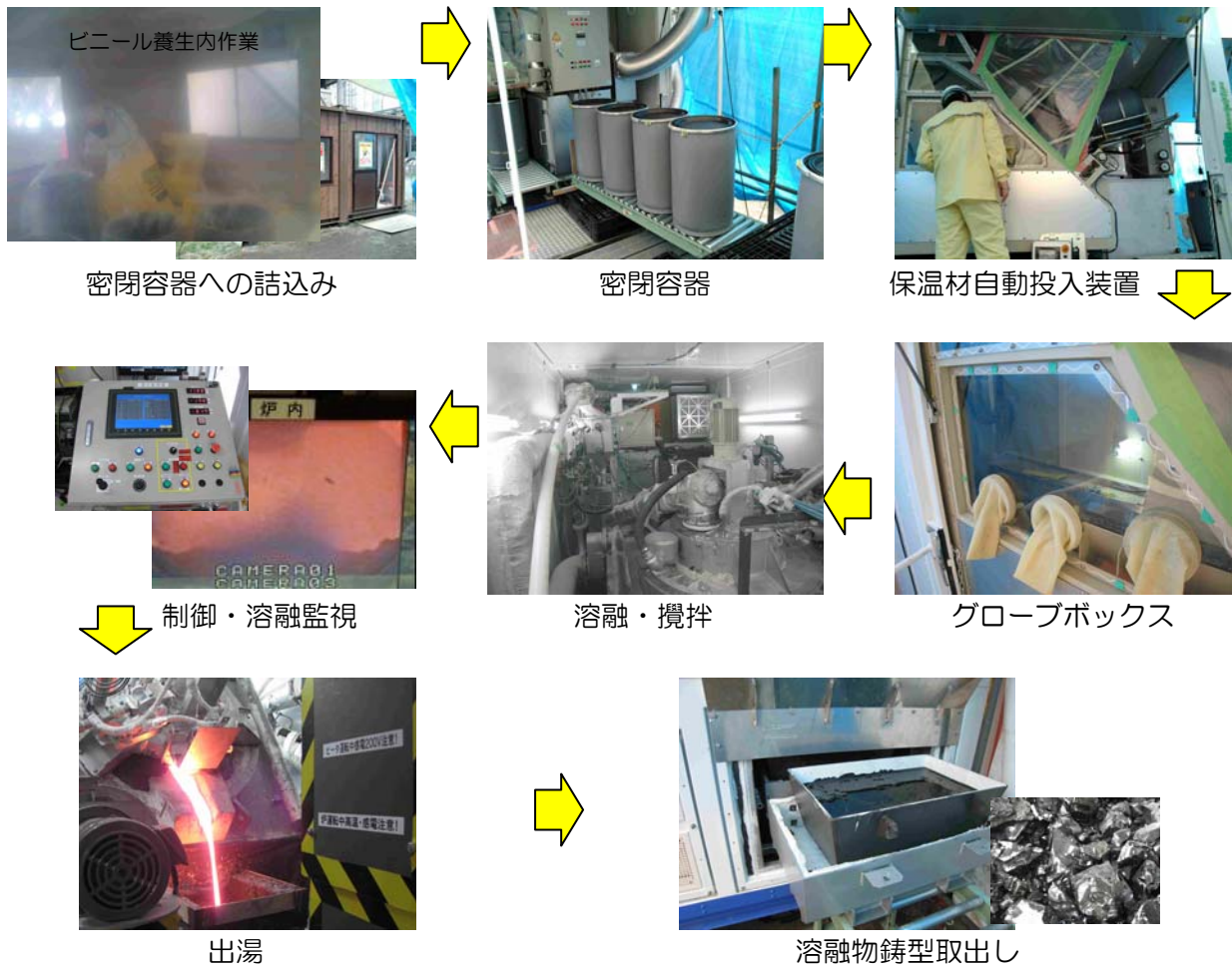


図 46 連続運転試験状況

図 46 に工程毎の状況を示すが、溶融処理に用いるアスベスト含有保温材は、プラスチック

製の専用の密閉容器（UN規格適合品）に詰め、重量を測定して、順次、保温材自動投入装置に持ち込みセットした。保温材自動投入装置により密閉容器から投入されたアスベスト含有保温材は、グローブボックス内のベルトコンベア上で異物の有無を確認した後、破砕機、搬送乾燥機の前処理工程を経て、アルカリ融剤とともに誘導加熱溶融炉へ供給される。誘導加熱溶融炉では、アスベスト綿含有保温材とアルカリ融剤を強制攪拌し、速やかに溶融物の中に分散させ溶融する。溶融物が一定レベルに達したことを炉内監視モニタで確認したら保温材の供給を停止し、溶融温度が 1,050℃以上（金属るつぼ温度 1,200℃）に回復するまで保持した後、誘導加熱溶融炉を傾動し溶融物の半量程度を金属製鋳型へ排出して 1 バッチが完了する。

なお、溶融物が入った金属製鋳型は、熱回収装置で空気と熱交換して高温の熱空気として搬送乾燥機に送り、保温材の乾燥に有効利用した。

図 47 に連続運転試験実績を示す。搬入・設置後からノンアス保温材で 4 日間、アスベスト含有保温材で 2 日間の計 6 日間、誘導加熱溶融炉を停止させることなく運転したが、各装置の機能面での大きな不具合は発生しなかった。

（連続運転試験実績）

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目
ノンアス保温材 溶融試験						
アスベスト含有 保温材溶融試験						
ノンアス保温材 ラインパージ処理						□

図 47 連続運転試験実績

また、図 48 に、試験中の各種データを示すが、溶融温度を制御している金属るつぼ温度は、1,190～1,200℃の範囲で推移しており、溶融処理中の炉内圧力も変動がみられるものの負圧状態を維持している。



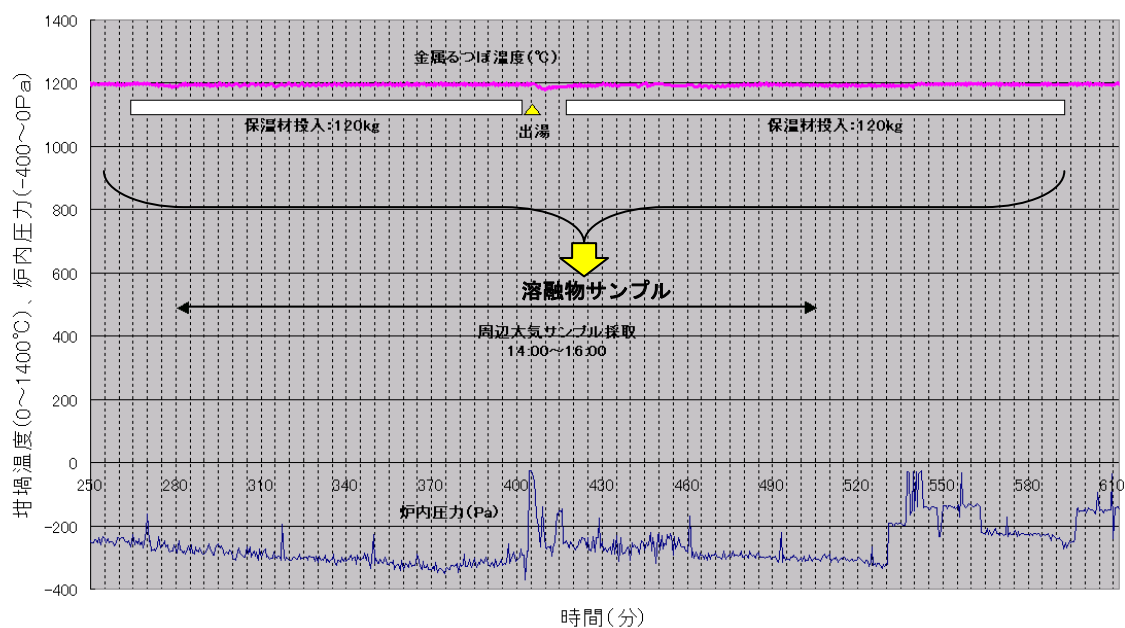


図 48 試験データ

さらに、溶融処理を行った 2 回分の溶融物のサンプルについて、公定法 JIS A1481 によりアスベスト濃度を測定したところ、表 19 に示すとおりアスベストは検出されず、確実に無害化処理できていることを確認した。X線回折分析結果でも図 49 に示すとおり、アスベストに起因するピークは消失し、それ以外の結晶化ピークも消失していることから、溶融物はきれいにガラス化していることがわかる。

表 19 アスベスト含有保温材および溶融物のアスベスト濃度測定結果

分析項目	試料	分析方法	分析結果	定量下限
石綿含有量	保温材	JIS A1481	アモサイト <b>0.3%</b> 〔それ以外の 5 種類の 石綿は不検出〕	0.1%
石綿含有量	溶融物	JIS A1481	不検出	0.1%

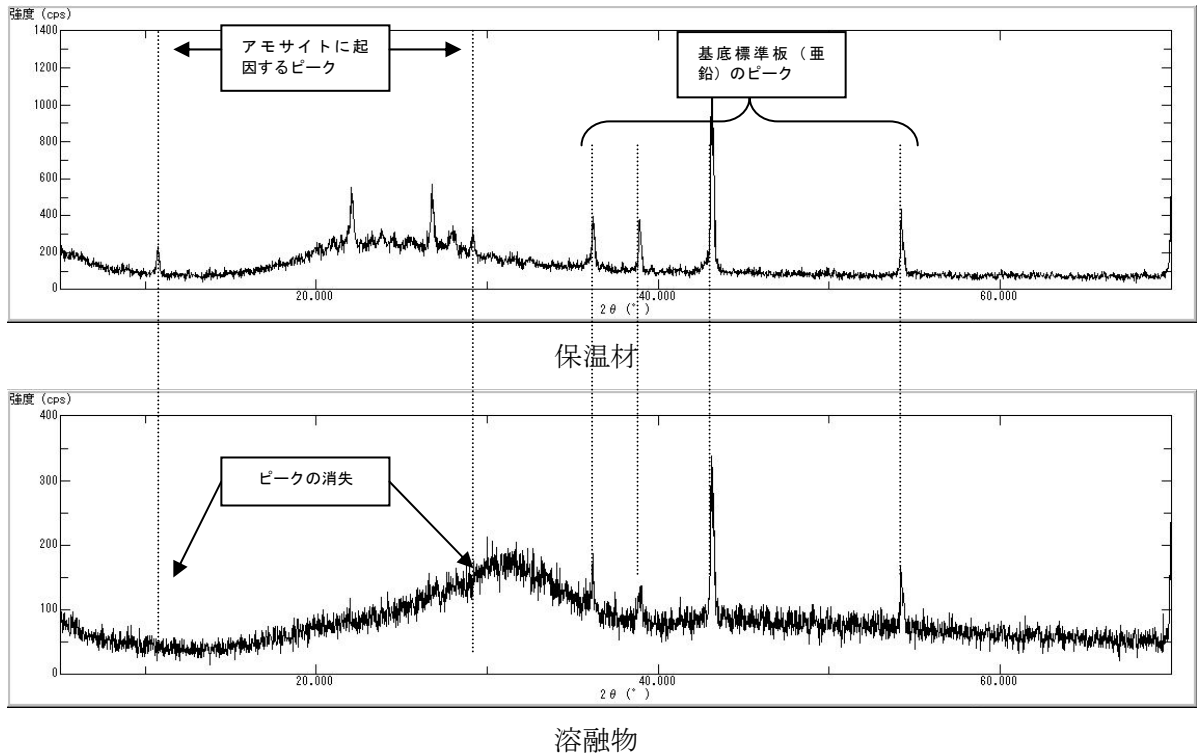


図 49 溶融前後サンプルの X線回折分析結果

一方、図 50 に示す箇所で溶融処理中に周辺大気環境中のアスベスト濃度を測定したが、表 20 のとおりアスベストは検出されなかった。

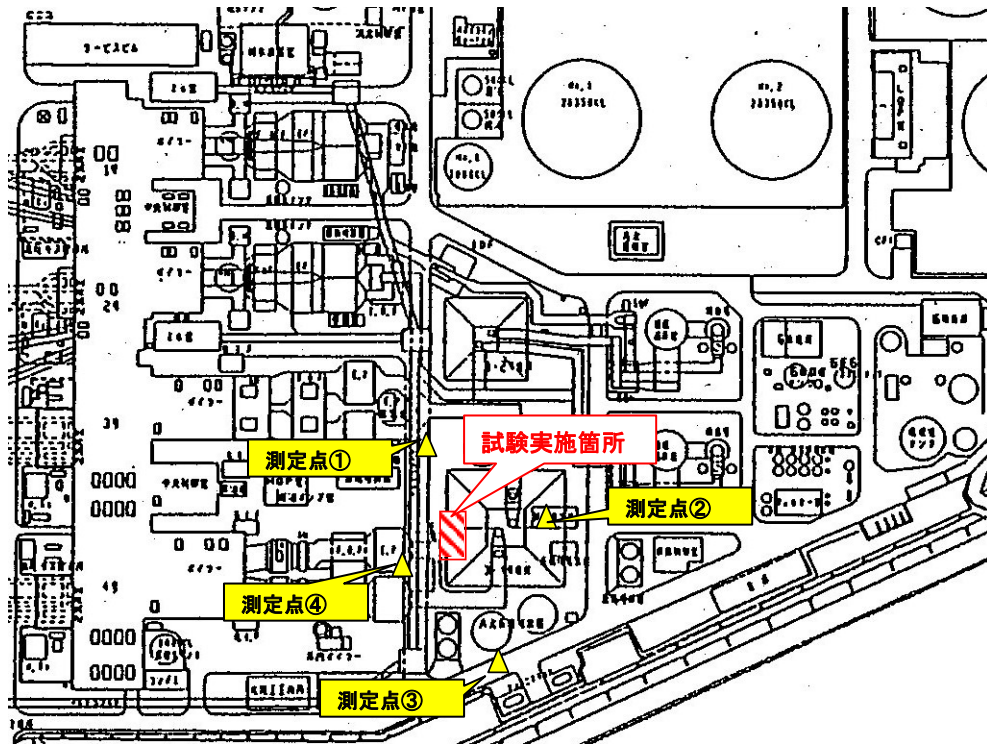


図 50 装置周辺大気の測定点

表 20 周辺大気のアスベスト濃度測定結果

(周辺大気)

分析項目	採取場所		分析方法	分析結果	定量下限
石綿濃度 (単位:本/L)	③	測定点 1	石綿に係る特定粉じんの濃度の測定方法(平成元年環境庁告示第 93 号)	不検出	0.3
	④	測定点 2		不検出	
	⑤	測定点 3		不検出	
	⑥	測定点 4		不検出	

b. 受電ユニットの開発

これまでの装置受電方法は、誘導加熱溶融炉用インバータ盤は440V系統から、トレーラ内の各装置は210V系統と別々の電源系統で受電していたが、電源接続のしやすさなど一括受電できる場合のメリットは大きい。また、(2)②の試験で判明した受電機器からの高調波発生に対して、事業化するには電源供給元となる客先のプラント制御などに外乱を与えることのないよう、一括受電したポイントで高調波抑制することが望ましい。

以上の理由から、新たに高調波抑制のためのフィルタを内蔵した一括受電可能な受電ユニットを開発することとした。図 51 に開発した受電ユニットを示すが、高調波フィルタは、事前にフィルタ接続前の高調波成分を調査したうえでの設計した。また、図 51 に受電ユニット接続前後の高調波測定結果を示すが、電圧ひずみ率が目標以下まで低下するとともに、各高調波成分も高調波抑制対策技術指針の基準値以下まで低減していることがわかり、十分高調波抑制がなされていることがわかった。

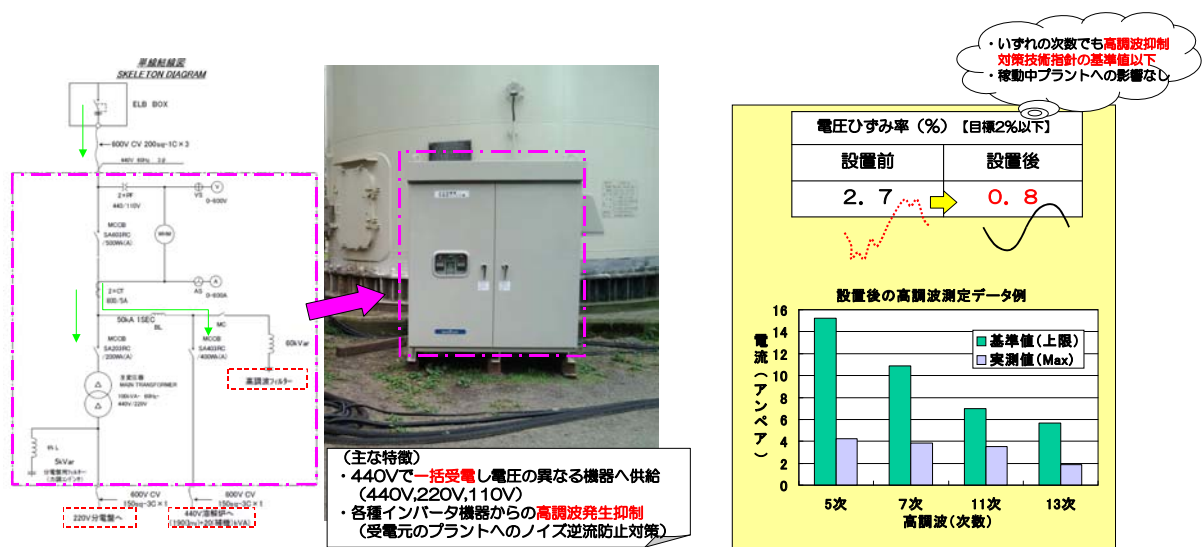


図 51 受電ユニット設置効果の確認



### (3) 実証試験による安全性および実用化評価

#### ① 実証試験

前述の長時間連続運転試験結果を踏まえ、誘導炉本体や周辺装置の点検・保守を行った後、別の火力発電所に移動し最終の実証試験を行った。試験時の状況を図 52 に示す。

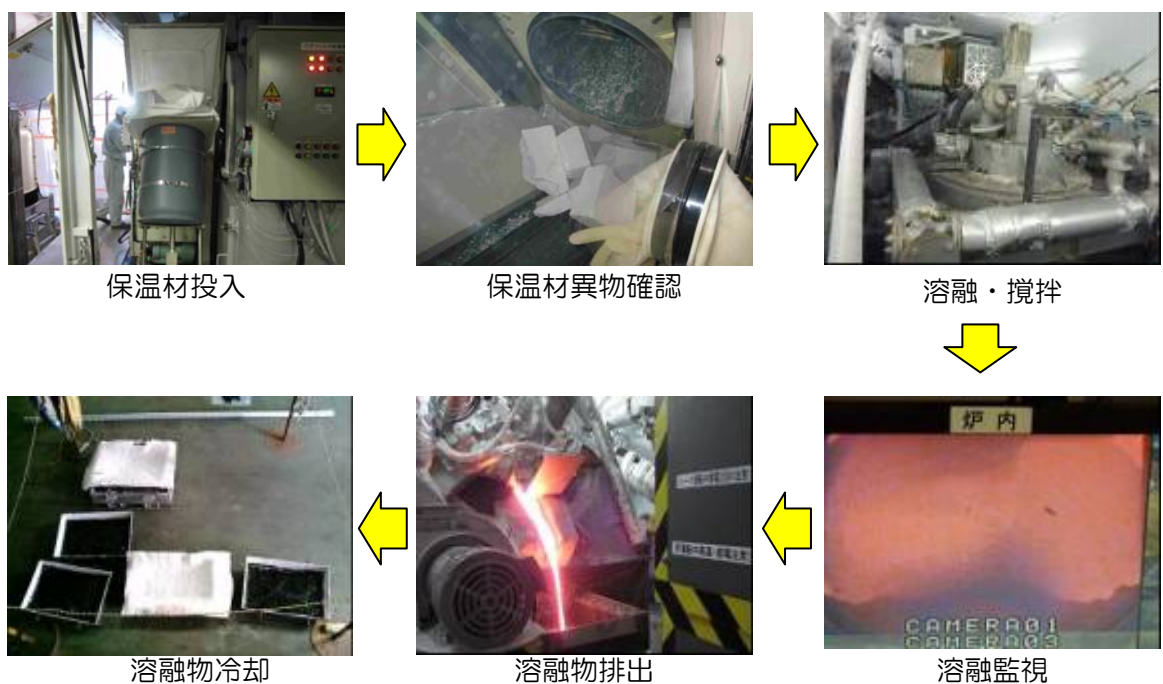


図 52 実証試験状況

図 53 に実証試験時のデータを示すが、アスベスト含有保温材の投入は、安全安定運転を最優先に限られた試験材料の中で分析試料のサンプリング時間を確保するため、4 バッチに分けて投入した。

溶融温度を制御している金属るつぼ温度は、1,190～1,200℃の範囲で維持しており、溶融温度が一定に保たれていることがわかる。なお、金属るつぼ温度を 1,200℃で制御することにより、溶融設定条件である 1,050℃以上を保持できることを事前に確認している。

また、アスベスト含有保温材の投入は、炉内監視モニタにより溶融状態及び湯面レベルを定期的に監視しつつ行った。溶融処理中の炉内圧力は変動がみられるものの負圧状態を維持しており、投入完了後は、金属るつぼ温度の 1,200℃復帰と溶融状態の確認を行い、誘導加熱溶融炉を傾動させ金属製鋳型に溶融物を排出した。

なお、溶融物のサンプルは、翌日、放冷した溶融物から、集塵装置排ガス、負圧集塵機排気及び周辺大気のサンプル採取は、溶融処理中に 4 時間かけて採取した。

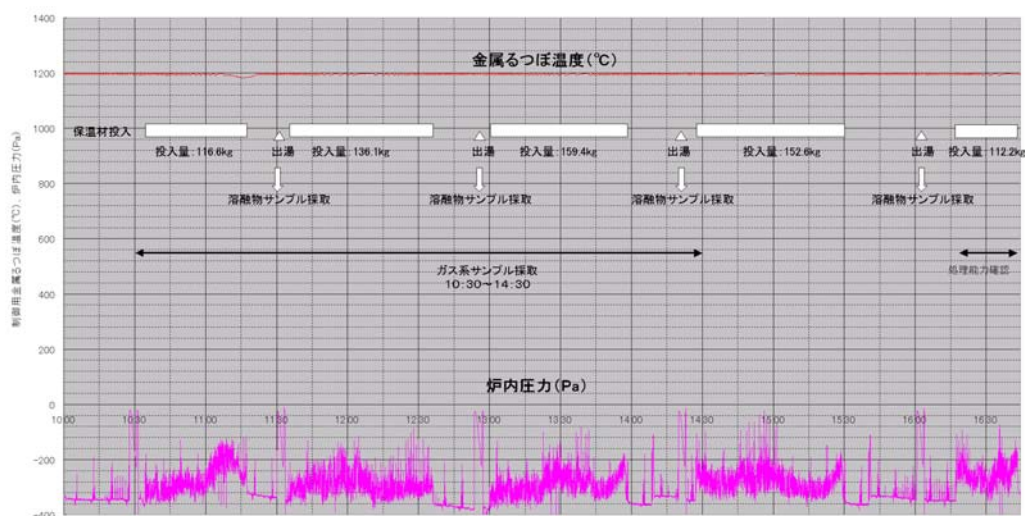


図 53 実証試験データ

溶融物のサンプルについて、公定法である JIS A1481 によりアスベスト濃度を測定したところ、表 21 に示すとおりアスベストは検出されず、確実に無害化処理できていることを確認した。また、図 63 に X 線回折分析結果を示すが、アスベストに起因するピークは消失し、それ以外の結晶化ピークも消失していることから、溶融物はきれいにガラス化していることがわかる。

さらに、環境省の「石綿を含む廃棄物における無害化処理認定制度申請の手引き(第 1 版)」に基づく電子顕微鏡分析 (TEM 法) も実施したが、アスベストが検出されなかった。

表 21 アスベスト含有保温材および溶融物のアスベスト濃度測定結果

分析項目	試料	分析方法	分析結果	定量下限
石綿含有量	保温材	JIS A1481	アモサイト 0.3% { それ以外の 5 種類の 石綿は不検出 }	0.1%
石綿含有量	溶融物	JIS A1481	不検出	0.1%
		TEM 法	不検出	1Mf/g

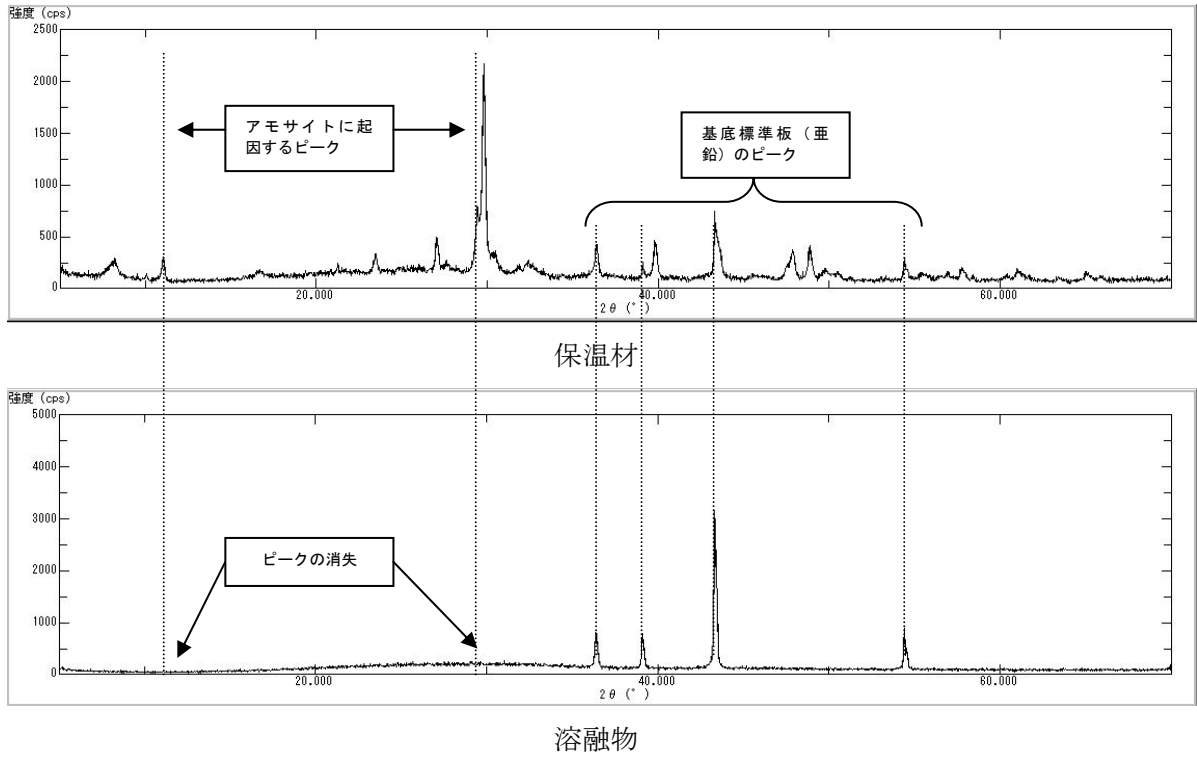


図 54 溶融前後サンプルの X線回折分析結果

溶融処理中の排気および装置周辺大気環境中のアスベスト濃度を図 55 に示す箇所で測定したが、表 22 に示すとおりアスベストは検出されず、システムの安全性を確認した。

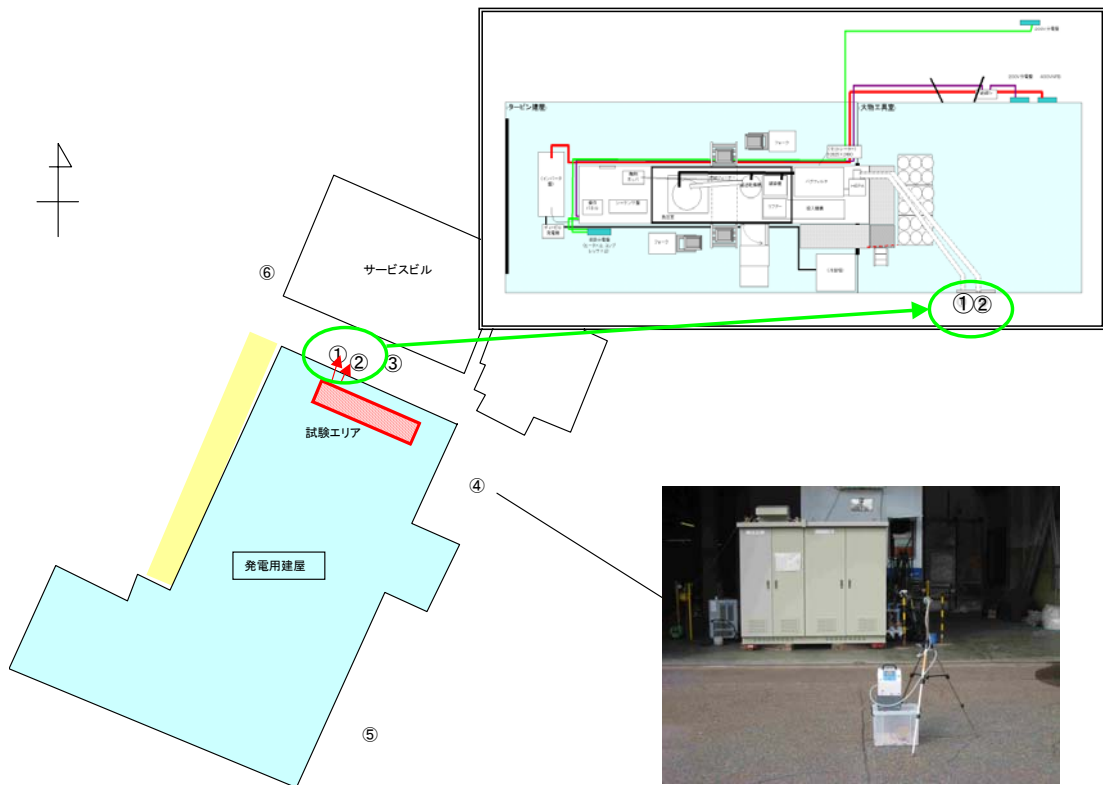


図 55 装置排気および周辺大気のアスベスト濃度測定位置

表 22 装置排気および周辺大気のアスベスト濃度測定結果

(装置排気)

分析項目	採取場所		分析方法	分析結果	定量下限
石綿濃度 (単位：本/L)	①	集塵装置排気口 (HEPA 出口)	石綿を含む廃棄物における 無害化処理認定制度申請の 手引き(第1版) 別添1 廃棄物処理施設に係る石綿 のサンプリング・分析方法 の概要[暫定版]	不検出	0.3
	②	トレーラ負圧室排気口 (HEPA 出口)		不検出	

(周辺大気)

分析項目	採取場所		分析方法	分析結果	定量下限
石綿濃度 (単位：本/L)	③	測定点 1	石綿に係る特定粉じんの濃 度の測定方法(平成元年環 境庁告示第93号)	不検出	0.3
	④	測定点 2		不検出	
	⑤	測定点 3		不検出	
	⑥	測定点 4		不検出	

## ② 生活環境影響評価

国の無害化処理認定を取得するためには、生活環境影響評価の実施が不可欠であることから、発電所敷地周辺大気中のアスベスト濃度や騒音・振動を評価項目として選定し、現況調査や拡散シミュレーションを行った。

なお、大気質予測は、廃棄物処理施設生活環境影響調査指針(環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部平成18年9月)の資料2-2大気質関連の小規模施設の簡易的長期平均濃度(年平均値)予測手法に基づき、表23の排ガス条件を用いて行った。また、騒音・振動については表24の条件を用いて距離減衰の計算を行った。

表 23 予測に用いた排出ガスの条件

項目	単位	集塵装置出口	負圧集塵機出口
排ガス量	$m^3_N/h$	1,200	2,700
排ガス温度	°C	100	50
排気口高さ	m	4	4
石綿濃度	本/ℓ	0.3	0.3

表 24 予測に用いた騒音・振動の条件

項目	単位	条件
基準点での騒音レベル ( $L_{Aeq}$ )測定値 $L_0$ ※	dB	72
基準点での振動レベル ( $L_{10}$ )測定値 $VL_0$ ※	dB	50
音源から基準点までの距離 $r_0$	m	1.0
計画地から敷地境界地点までの距離 $r$		250

※ 実証試験結果に基づく実測値

表 24 に発電所敷地周辺での現況把握と影響評価結果を示すが、いずれの項目も現況と変わらず、オンサイトシステムによる環境への影響はないと考えられる。

表 24 発電所敷地周辺での影響評価結果

環境要素	現況の把握	予測結果																																										
大気質／石綿	<p>(単位：本/ℓ)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>季節</th> <th>結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>春季</td> <td>不検出</td> </tr> <tr> <td>夏季</td> <td>不検出</td> </tr> <tr> <td>秋季</td> <td>不検出</td> </tr> <tr> <td>冬季</td> <td>不検出</td> </tr> </tbody> </table> <p>注) 不検出とは、定量下限値の0.3本/ℓ未満をいう。</p>	季節	結果	春季	不検出	夏季	不検出	秋季	不検出	冬季	不検出	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">最大着地位置</th> <th rowspan="2">単位</th> <th colspan="2">発電所の設置予定での最大影響濃度</th> </tr> <tr> <th>設置予定地 北北西 35m</th> <th>設置予定地 南西 35m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>付加される影響濃度</td> <td>本/ℓ</td> <td>0.00000136</td> <td>0.00000063</td> </tr> <tr> <td>現況濃度</td> <td>本/ℓ</td> <td>不検出 (0.3 未満)</td> <td>不検出 (0.3 未満)</td> </tr> <tr> <td>将来予測濃度</td> <td>本/ℓ</td> <td>不検出 (0.3 未満)</td> <td>不検出 (0.3 未満)</td> </tr> <tr> <td>敷地境界許容限度</td> <td>本/ℓ</td> <td colspan="2">10</td> </tr> </tbody> </table>	最大着地位置	単位	発電所の設置予定での最大影響濃度		設置予定地 北北西 35m	設置予定地 南西 35m	付加される影響濃度	本/ℓ	0.00000136	0.00000063	現況濃度	本/ℓ	不検出 (0.3 未満)	不検出 (0.3 未満)	将来予測濃度	本/ℓ	不検出 (0.3 未満)	不検出 (0.3 未満)	敷地境界許容限度	本/ℓ	10											
季節	結果																																											
春季	不検出																																											
夏季	不検出																																											
秋季	不検出																																											
冬季	不検出																																											
最大着地位置	単位	発電所の設置予定での最大影響濃度																																										
		設置予定地 北北西 35m	設置予定地 南西 35m																																									
付加される影響濃度	本/ℓ	0.00000136	0.00000063																																									
現況濃度	本/ℓ	不検出 (0.3 未満)	不検出 (0.3 未満)																																									
将来予測濃度	本/ℓ	不検出 (0.3 未満)	不検出 (0.3 未満)																																									
敷地境界許容限度	本/ℓ	10																																										
騒音	<p>(単位：dB)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">区分</th> <th rowspan="2">時間帯</th> <th colspan="2">調査地点</th> </tr> <tr> <th>①</th> <th>②</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">平日</td> <td>昼間</td> <td>44</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>39</td> <td>37</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">休日</td> <td>昼間</td> <td>41</td> <td>42</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>36</td> <td>37</td> </tr> </tbody> </table>	区分	時間帯	調査地点		①	②	平日	昼間	44	45	夜間	39	37	休日	昼間	41	42	夜間	36	37	<p>(単位：dB)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">区分</th> <th rowspan="2">時間帯</th> <th colspan="2">予測地点</th> <th rowspan="2">協定値</th> </tr> <tr> <th>①</th> <th>②</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">平日</td> <td>昼間</td> <td>44</td> <td>45</td> <td rowspan="4">55</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>39</td> <td>37</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">休日</td> <td>昼間</td> <td>41</td> <td>42</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>36</td> <td>37</td> </tr> </tbody> </table>	区分	時間帯	予測地点		協定値	①	②	平日	昼間	44	45	55	夜間	39	37	休日	昼間	41	42	夜間	36	37
区分	時間帯			調査地点																																								
		①	②																																									
平日	昼間	44	45																																									
	夜間	39	37																																									
休日	昼間	41	42																																									
	夜間	36	37																																									
区分	時間帯	予測地点		協定値																																								
		①	②																																									
平日	昼間	44	45	55																																								
	夜間	39	37																																									
休日	昼間	41	42																																									
	夜間	36	37																																									
振動	<p>(単位：dB)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">区分</th> <th rowspan="2">時間帯</th> <th colspan="2">調査地点</th> </tr> <tr> <th>①</th> <th>②</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">平日</td> <td>昼間</td> <td>31</td> <td>&lt;30</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>&lt;30</td> <td>&lt;30</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">休日</td> <td>昼間</td> <td>&lt;30</td> <td>&lt;30</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>&lt;30</td> <td>&lt;30</td> </tr> </tbody> </table>	区分	時間帯	調査地点		①	②	平日	昼間	31	<30	夜間	<30	<30	休日	昼間	<30	<30	夜間	<30	<30	<p>(単位：dB)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">区分</th> <th rowspan="2">時間帯</th> <th colspan="2">予測地点</th> </tr> <tr> <th>①</th> <th>②</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">平日</td> <td>昼間</td> <td>31</td> <td>&lt;30</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>&lt;30</td> <td>&lt;30</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">休日</td> <td>昼間</td> <td>&lt;30</td> <td>&lt;30</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>&lt;30</td> <td>&lt;30</td> </tr> </tbody> </table>	区分	時間帯	予測地点		①	②	平日	昼間	31	<30	夜間	<30	<30	休日	昼間	<30	<30	夜間	<30	<30		
区分	時間帯			調査地点																																								
		①	②																																									
平日	昼間	31	<30																																									
	夜間	<30	<30																																									
休日	昼間	<30	<30																																									
	夜間	<30	<30																																									
区分	時間帯	予測地点																																										
		①	②																																									
平日	昼間	31	<30																																									
	夜間	<30	<30																																									
休日	昼間	<30	<30																																									
	夜間	<30	<30																																									

### ③ 処理能力確認試験

解体・除去されたアスベスト含有保温材は、使用上の制約が多いうえ、含水率のバラツキが大きく安定状態における処理能力を把握できないことから、製品のノンアスベストのケイ酸カルシウム保温材を一定含水率に調整したサンプルを用いて処理能力確認試験を行った。なお、保温材の含水率は、本オンサイトシステムの想定範囲の上限値で蒸発潜熱によるロスも大きい50%に調整した。

溶融処理試験時の各種データを図 56 に示すが、1 バッチ処理でトータル 96kg の保温材を投入し、溶融完了後に溶融物を金属製鋳型に排出して投入を再開するまでの一連の操作を 26 分間で終了した。この結果を基に 1 時間当たりの処理量を計算すると 222kg/h となり、要求される 208kg/h 以上の処理能力を有していることが検証された。

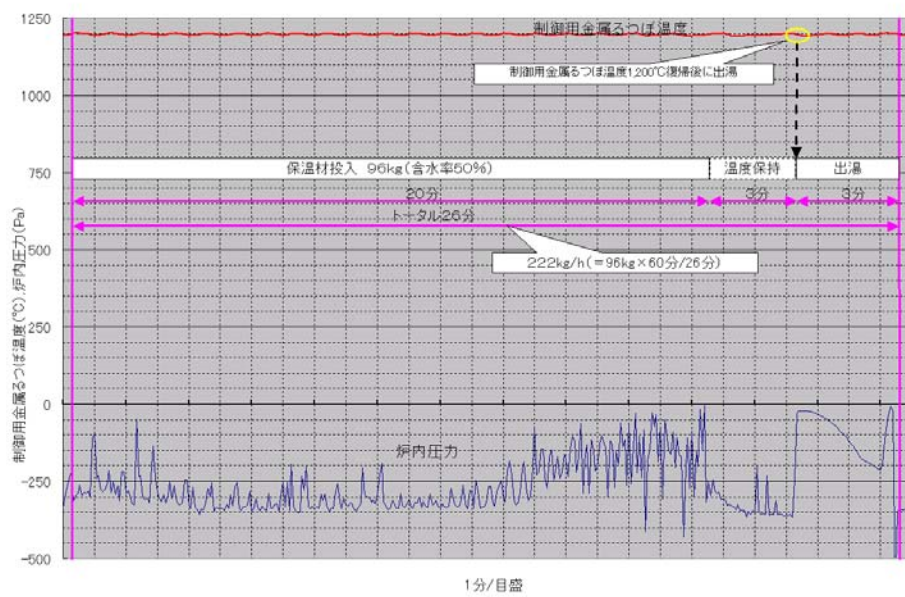


図 56 処理能力確認試験各種データ



#### (4) 緊急時対応システムの構築と作動確認試験

トレーラの実用化には、地震や停電などの緊急時、トラブル時のアスベスト飛散や機器損傷などのリスクを回避し、自動的に安全停止するシステムの構築が不可欠である。図 57 に示す不安全事故に対する対応策について、システム構築に必要な仕様・諸元を検討し、緊急時対応システムを構築した。

	緊急事態	不安全事故	対応策
停電時	制御・監視機能喪失	・シーケンサおよびセンサ機能喪失 ⇒ 装置の状態把握不能	(停電時) ・保安用電源バックアップシステム開発 ・保安上重要な電源系統の集合化及び電源供給 (シーケンサ、集塵系、冷却水装置等) (地震時) ・炉、搬送系自動停止のインターロック化
	負圧維持機能喪失	・集塵系(集塵装置および負圧集塵機)ファン停止 ⇒ トレーラから大気へのアスベスト飛散の恐れ	
	冷却水喪失	・誘導加熱炉冷却水ポンプ停止 ⇒ 誘導コイルの破損の恐れ	
地震発生時		・機器の干渉による密閉性破壊 ⇒ トレーラから大気へのアスベスト飛散の恐れ	

緊急時にもアスベストを外部に漏洩させない保安機能が必要

緊急時対応システムの開発

図 57 緊急事態発生時の不安全事故と対応策

図 58 に示す電源バックアップシステムは、シーケンサ用と動力用の 2 系統の UPS を一体化したシステムと長時間の停電補償を行うディーゼル発電機から構成されている。

UPS システムは、オンサイトシステム専用に回路を見直すことで、市販の UPS より小型でコンパクトに仕上がったことから、トレーラ室内への設置も実現できた。さらに、UPS システムを可搬式とすることで、処理装置本体が長期スタンバイ状態となった場合でも、UPS システムだけを充電しておくことが可能となった。

また、発電所構内での実証試験期間中、構築した緊急時対応システムの作動確認試験を行った。図 59 に示すとおり、地震状態や停電状態を模擬し、装置の自動的な安全停止状況や、周囲へのアスベスト粉塵飛散防止するためのブロウ運転継続状況などの作動確認を行い、システム構築によるトラブル時の安全性向上策の有効性を確認した。

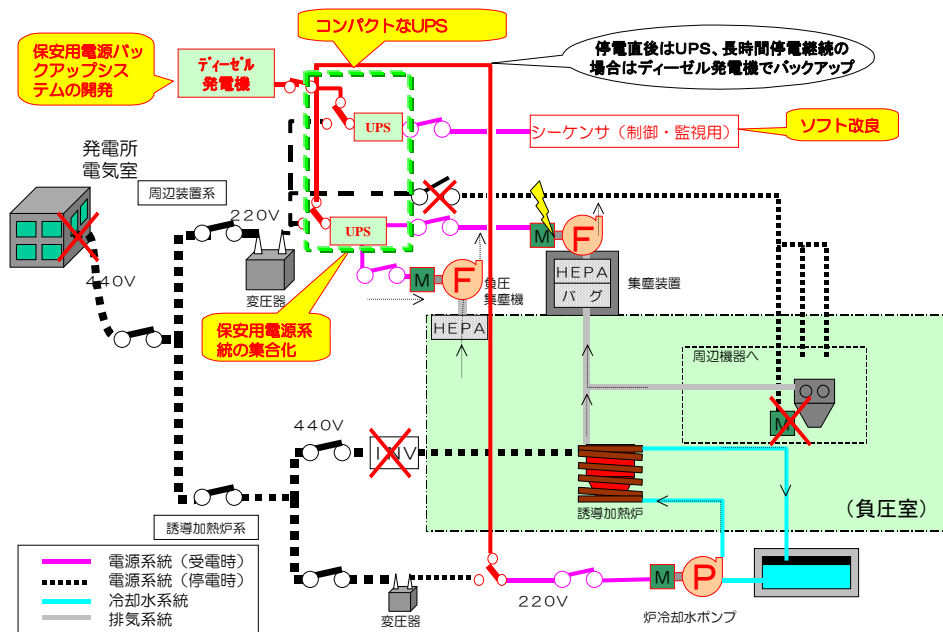


図 58 緊急時対応システム（電源バックアップシステム）



試験	結果	備考
電源バックアップ作動試験	作動良好	<ul style="list-style-type: none"> <li>・排気系運転継続</li> <li>・機器停止異常なし</li> <li>・1分50秒でディーゼル負荷移行</li> </ul>
地震時停止インターロック作動試験	作動良好	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機器停止異常なし</li> <li>・排気系運転継続</li> </ul>

図 59 緊急時対応システム作動試験結果



#### 4. 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

##### (1) ビジネスモデルの検討

###### ① オンサイト式溶融・無害化処理システム

本プロジェクトが目指すビジネスモデルは、これまで開発したオンサイトシステムを活用したアスベスト処理の事業化であるが、これは以下の背景や課題を踏まえたものである。

- ・ 健康被害に対する住民不安から、今後、溶融処理施設の新規建設が難航すると予想されること
- ・ 安全かつ低コストの無害化技術の早期開発が期待される中、当社で誘導加熱とアルカリ融剤を併用した溶融・無害化( $< 1,100^{\circ}\text{C}$ )技術を確立したこと
- ・ アスベストの高度な無害化処理技術を環境大臣が認定する制度が創設されたこと（平成 18 年 10 月施行）

具体的には、オンサイトシステムをアスベスト建材等の解体現場に搬入・設置して、解体・除去から無害化までを一貫して安全かつ短期間に完結する事業を目指している。

本事業が実現すれば、アスベスト処理に関する住民不安が軽減し、アスベスト無害化処理の進展が図られることが期待される。

###### ② 国内への水平展開とネットワーク化

###### a. 国内ネットワークの構築

トレーラに搭載したオンサイトシステム 1 台の処理能力は限られていることから、オンサイト式の特徴を活かして図 60 に示すような全国的なネットワークを構築すれば、ピーク時に相互応援することが可能となり、設備稼働率の向上については経営環境の安定化が期待できる。

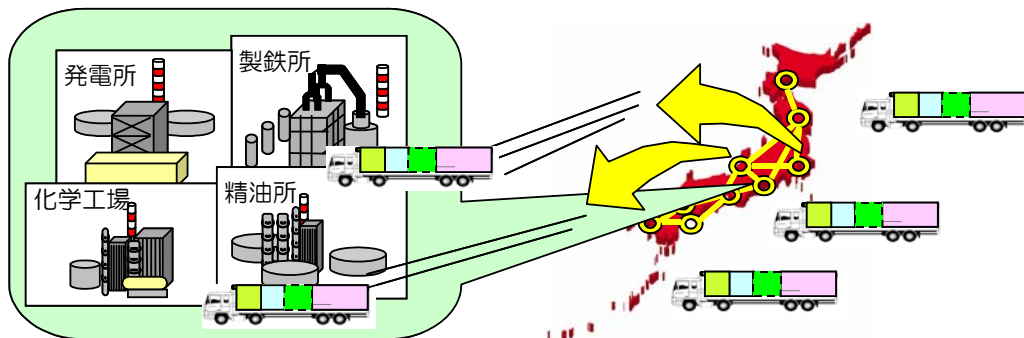


図 60 国内ネットワークのイメージ図

## b. ネットワークの規模と参入対象

ネットワーク構築にあたっては、処理の対象となるアスベスト含有保温材の発生箇所や発生量についての事前調査が重要である。

今回、ネットワーク構築の参入対象として想定している電力会社の他、鉄鋼会社、石油会社、化学会社の各1社に対してアンケート調査を行い、アスベスト含有保温材の排出実態について調査した。表22に各業界4社のアスベスト含有保温材排出実態調査結果を示す。

表 22 各種業界 4 社のアスベスト含有保温材排出実態調査結果

	A社	B社	C社	D社
使用用途	配管保温材	配管保温材	蒸気配管保温材 タンク保温材	配管保温材
廃棄される タイミング	定期修理時	定期修理時	保温ラッキング 補修時 解体撤去作業時	定期検査時
発生頻度	未回答	1回/年	1回/2年程度	1回/年 (プラント当り)
発生量	未回答	約60t/回	10~20t/ 回	約100m <sup>3</sup> /回

表 22 に示すとおり、4 業界いずれもアスベスト含有保温材の排出実態は似通っており、ネットワーク構築の際には、参入対象候補として有望であることがわかった。

また、アスベスト含有保温材の発生予想箇所は、火力・原子力発電所、自家用発電プラントだけでも大小合わせ全国に約3,200あり、発生量は当社だけでも数千m<sup>3</sup>、一般電気事業者全体に拡大すると20~30万m<sup>3</sup>、さらに製鉄所、化学工場および石油精製工場が加わるとより膨大な量が解体・廃棄されると推計される。

## c. 吹付け材処理への適用について

これまで、オンサイトシステムの開発は、アスベスト含有保温材の処理に特化してきた。特化した理由としては、①開発者自らが大量に保温材を保有する排出事業者であること以外に、②保温材の大量廃棄が期待できるのは大規模工場であり、トレーラに搭載したオンサイトシステムの搬入・設置が容易である、③廃棄保温材は比較的均一な素性であり、過剰な設備増強を省いたコンパクトなシステム作りが可能である、といった保温材の廃棄実態とオンサイトシステムの技術的特徴がうまく合致していることがあげられる。

一方、もうひとつの飛散性アスベスト廃棄物である吹付け材についても、無害化処理の推進が大きな課題となっており、本オンサイトシステムのビジネスモデルを適用する際の課題について検討を行うこととした。なお、「3. 吹付けアスベスト無害化・資源化処理の研究」でも述べたが、開発したオンサイトシステムを吹付け材にも適用する際には、さらなる技術的検討が重要である。従って今回のこの検討は、これら技術的課題がクリアされ

たことを前提としていることに注意されたい。

吹付け材の排出実態の特徴として、処理箇所（＝解体現場）として工場の他あらゆる建物が対象となることや、廃棄される吹付け材の物性も多種多様となることが想定される。オンサイトシステムを用いたビジネスモデルを適用する際には、まず処理箇所および廃棄される吹付け材種類の限定が重要となる。

処理箇所については、処理のための十分なスペース（設置場所、廃棄物仮置き場等）とユーティリティ（電気、水等）確保が可能な場所に限定される。また、排出される頻度は、大規模工場のような定期検査に伴う定期的な排出と異なり、大半が解体を行う1度に限られることから、処理箇所ごとに行う必要がある認定申請など手続きの煩雑さなども大きな課題になると考えられる。

また、吹付け材の物性については、多量の有機物を含む加工がなされているような場合、排ガス処理設備増強など追加の対応が必要でオンサイトシステムへの適用が困難となるため、事前に廃棄される吹付け材の十分な調査を行い無害化処理の可否を判断すべきである。

また、スクラップアンドビルトを行う建物の解体工事の場合は、工期の関係上、特に短時間で解体を終了する必要があることから、解体業者との綿密な工程管理や調整も重要となる。

## (2) 導入シナリオ

前述したとおり、オンサイトシステムによるビジネスモデルの最終形は、国内ネットワークの構築にある。オンサイトシステムの国内ネットワーク化に向け、課題を整理したうえで、導入シナリオを検討することとした。

### ① 課題の整理

#### a. ハード面の課題

##### (a) 装置の信頼性向上

これまでのプロジェクトでは、試験に伴い必要となる最低限のアスベスト含有保温材で実証試験を行い、アスベスト飛散防止や無害化の確実性を主眼にオンサイトシステムの開発を行ってきた。

従って、開発したオンサイトシステムの商用化には、長期間にわたって数多くのアスベスト含有保温材処理の実績を重ねながら、装置の信頼性を向上させていく必要がある。特に設備面およびコスト面で鍵となる誘導加熱溶融炉の消耗部材の信頼度向上と修繕コスト低減に向けた検討は重要である。

##### (b) 処理箇所の拡大

これまで処理箇所としては、発電所構内を想定してきたが、ビジネス化にあたっては他業種工場へも適用を拡大する必要がある。しかし、他業種工場でオンサイトシステムを搬入・設置する場合の課題についてアンケート調査したところ、発電設備以外の工場には、オンサイトシステムの受電電圧である 400V の電源供給設備がないことが判明した。従って、商用電源を利用するための変圧器など新たな設備の設置が必要である。

##### (c) 溶融物の再資源化

平成 18 年度に行った研究開発では、溶融物を路盤材として再利用できることを確認した。しかし、路盤材製造会社側は、溶融物の「一定量以上の安定供給」と「仕様の満足」を購入の条件としており、少量の溶融物が分散して発生するオンサイトシステムには不利な条件となる。また、元々アスベストを含有していたことに対する再資源化物の風評被害の懸念や、無害化された溶融物の利用先までのトレーサビリティが困難であるといった理由から、現状、溶融物を埋立処分せざるを得ない状況にある。埋立処分費は処理コストアップの要因にもつながることから、今後も利用先および方法について、検討していく必要がある。

#### b. ソフト面の課題

##### (a) リスクマネジメント整備

本ビジネスモデルの特徴は、オンサイトによる解体・除去から無害化までの一貫処理することにあるが、根本的な大前提として安全性は欠かせない。人的、設備的なミスで住民不安を招くような事態に陥れば、マスコミや口コミで一気に事業の存続を揺るがすことにも成りかねな

い。そのため、以下のリスク対策の整備を処理事業開始までに講じておくことが重要である。

- ・ リスク管理体制の整備
- ・ 利害関係者への情報開示方法の決定
- ・ 作業者の質を確保するための選定基準や資格審査基準の決定
- ・ 通常運転時の運転操作マニュアルの整備
- ・ 事故／災害発生時の緊急対応・操作マニュアルの整備
- ・ 処理作業員および監督者への安全教育プログラムの整備
- ・ 排出事業者および解体業者に対する安全対策依頼書の準備

なお、まずは必要最低限の項目を盛り込んだものを作成し、処理事業開始後よりP D C Aサイクルを回して順次改善しながら完成度を上げていくことが望ましい。

**(b) 準備・片付け期間および作業量の削減**

発電所でのオンサイトシステムによる処理試験結果を踏まえ、1サイトでのアスベスト処理の標準処理工程について検討を行った。標準処理工程例を図61に示すが、現状、オンサイトシステムで処理を行う場合、処理前後にそれぞれ2日程度の準備・片付け期間が必要となると考えられる。特に、処理運転前後の作業期間短縮あるいは作業量削減に向けた対応が重要である。

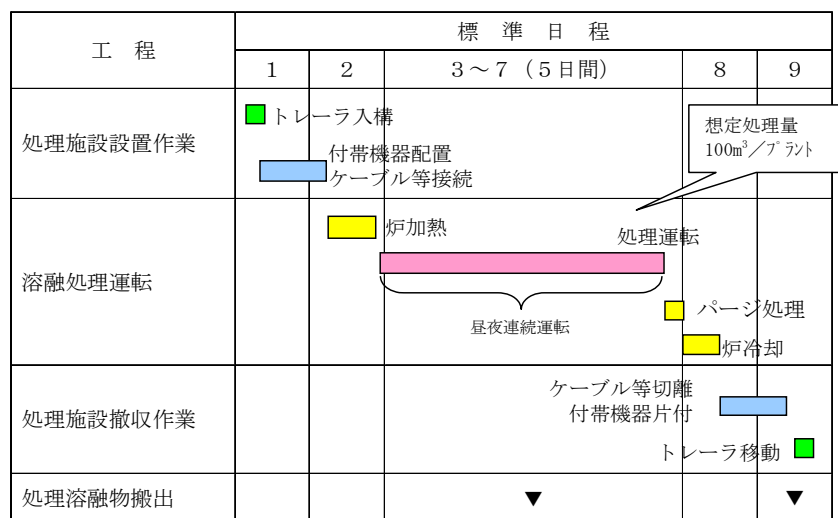


図 61 処理の標準工程例

**(c) 処理コストの低減**

1事業所での処理数量を100m<sup>3</sup>とした場合、目標としている処理コスト6万円/m<sup>3</sup>以下での処理が可能であるとの見通しが得られたが、事業収益を向上させるためには、排出量が100m<sup>3</sup>規模以上となるような解体工事の受注と工事の計画的な処理実施が重要である。

**(d) 手続きの合理化**

アスベストの無害化処理を行う場合には、事業者による環境大臣認定申請が必要となるが、

現状では処理箇所毎の申請が必要で、かつ認定取得までには時間もかかることから、手続きに係る規制緩和も必要である。

#### (e) 無害化処理に対するインセンティブ

アスベストの無害化処理は、事業として埋立処分と競合できる処理コストを目指すのは当然のことではあるが、一方で、排出事業者側のアスベスト処理に対する基本的な考え方も重要な要素となる。他業種の会社に対してアスベスト処理の方針に関するアンケートを取ったところ、「危険度の高い箇所から早急に除去」という回答が最も多く、一部の会社では、「アスベスト含有保温材については、溶融処理を基本とする」との回答もあった。今後、排出事業者側に対して、アスベスト無害化処理へのインセンティブが強く働く仕組みが形成されることも重要である。

## ② 導入シナリオの策定

先の課題を整理し、以下のような導入シナリオを策定した。

### a. 自社処理の推進

様々な性状のアスベスト廃棄物を処理するとなると、それぞれの性状に合わせた追加施設の設置など過剰な設備が必要となり、オンサイト式の優位性が損なわれるため、まずは事前の調査により素性がはっきりした自社のアスベスト含有保温材を対象として処理実績を積み、システム信頼性向上と、コスト低減策の検討を進めていくことが先決である。

### b. 処理の国内展開

自社処理により実績を積み重ねると同時に、他社を対象とする国内展開に関するビジネスモデルについてブラシアップを行ったうえで、最終的な事業性評価を行い、国内展開事業の可否について判断する。

### c. 国内ネットワーク化

処理の国内展開により、様々な業種工場での処理実績を積み重ねるとともに、事業として更なる拡大が見込まれると判断される場合は、複数の業者間で国内ネットワークに係るビジネスモデルについて調整を図り、国内ネットワーク拡充を図っていくこととする。

### d. その他事業性評価に係る各種調査

#### (a) アスベスト処理費用

アスベストを含有する特別管理産業廃棄物の処理コストは、排出事業者と処理業者との相対取引により決定され相場が明確になっていないが、他社を対象とする処理の国内展開を評価する際には、埋立処分や溶融処理に係る既存業者の処理コストの把握は大変重要となる。

これまでの調査から、埋立処分費用は単位容積当たりで計算し、運搬費込み4~7万円/m<sup>3</sup>が相場と考えられ、開発目標である処理費用設定の根拠とした。容積の測量は、フレコンバック

1袋単位（約1 m<sup>3</sup>）、あるいは詰め込みにより生ずる空隙を含めた車両の詰め込み容積で評価されるのが一般的である。一方、熔融処理の場合は単位重量当たりの費用となっており、埋立処分費用との単純比較はできない。

今後、競合他社の処理費用把握と合わせて、国内展開を想定した処理費用の単位（容積 or 重量）設定についても検討していく必要がある。

#### （b）受注見込量

受注見込量をなるべく正確に把握することは、競合する方式の処理費用把握と同様に投資リスクの評価に大きな影響を与える。

大量にアスベスト含有保温材を保有する電気事業については、潜在量は概ね把握されているものの、定期点検、改良・修繕工事の計画に基づく年間排出量や季節による排出量の変動は把握されておらず、今後、事業化までの間に速やかに調査する必要がある。

具体的な把握方法としては、電力会社はもちろんオンサイト処理の対象と考えられる他業種企業へのヒアリングが最適だが、事業化の仮定段階で企業の内部情報、特に社会問題化したアスベスト廃棄物に関して、多くの事業所から個別に排出量を聞き出すことは容易ではないと考えられる。

そのため、P R T R法（特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善に関する法律）に基づく事業所単位の移動量報告や、産業廃棄物処理事業者が公表している埋立処分量など、公開されている情報を入手・推計し、調査対象をスクリーニングしておくことが有効と考えられる。

参考として、過去のP R T R法に基づく移動量報告データからピックアップした石綿排出量データを表23に示す。H17年度データで業種別移動量を見ると、窯業・土石製造業が53%、鉄鋼業が16%、化学工業が13%、電気業(電力)が11%の順となっており、15年度からの傾向を見れば窯業・土石製造業からの排出量がH15年度で全体の約90%、16年度で約70%、17年度で50%強と相対的割合は低下してきているものの依然最大の排出源となっている。その他業種を見ると、電気業(電力)では16年度から、鉄鋼業・化学工業では17年度から排出量が急増しており、これら業界における近年の積極的な石綿への対応がうかがえる。

表 23 業種別アスベスト排出量データ

石綿排出量 (単位：t/年)

業種	H17年度	H16年度	H15年度
窯業・土石製造業	299.5	409.3	1674.8
鉄鋼業	90.1	1.3	0
化学工業	74.3	8.4	1.2
電気業(電力)	60.7	123.4	7.4
石油・石炭	6.6	3	0
鉄道	6.1	2.7	7.7
その他	27.1	16.7	174.1
合計	564.4	564.8	1865.2

(出典:(社)日本石綿協会 石綿にかかるPRTR集計結果より)



### 第3章 目的に照らした達成状況

#### 1. 飛散抑制ユニットの設計・製作

##### (1) 実用化飛散抑制ユニットの設計

【開発目標値】 処理能力 208kg/時(5ト/日)以上、装置周辺アスベスト濃度 10 本/L以下、負圧室空間容積 100m<sup>3</sup>以下

##### (2) 実用化飛散抑制ユニットの製作

【開発目標値】 処理能力 208kg/時(5ト/日)以上、装置周辺アスベスト濃度 10 本/L以下

飛散抑制ユニットの予備試験や各ユニットの方式選定調査を行い、実用ユニットの仕様を決定して製作するとともに、トレーラへの搭載を想定したレイアウトで実用化飛散抑制ユニットを配置してアスベスト含有保温材の溶融処理試験を実施した。溶融処理により得られた溶融物及び集塵装置排ガス、装置周辺大気のアスベスト濃度を公定法により測定したが、アスベストは検出されなかった。

また、同試験では、試験場所の制約から負圧室空間容積は約 140m<sup>3</sup>となったが、余分な空間を除くと 100 m<sup>3</sup>以下となり、想定するトレーラ内に収納できる見通しを得た。

一方、処理能力については、最終的なオンサイトシステムにおいて確認することとした。

#### 2. 「吹付けアスベスト無害化・資源化処理の研究開発」

##### (1) 溶融ラボ試験

【開発目標値】 アルカリ融剤の選定及び最適混合比率の決定

アスベスト含有保温材と同様のアルカリ融剤を用いて 3kW 誘導加熱溶融炉によるアスベスト含有吹付け材の溶融ラボ試験を行った。その結果、アスベスト含有保温材と同様、加熱温度は 1,100℃以下、融剤添加量は処理対象量に対し重量比 0.5 の溶融条件で溶融できるとの結論を得た。クロシドライト 35%、クリソタイル 24%の吹付け材を先の溶融条件で溶融処理し、公定法により溶融物のアスベスト濃度を測定したが、いずれの溶融物からもアスベストは検出されず、無害化されていることを確認した。

##### (2) 実用規模での溶融・無害化試験

【開発目標値】 無害化処理の最適化、処理能力 208kg/時(5ト/日)以上

150kW 誘導加熱溶融炉を用いて先の最適混合比率によるアスベスト含有吹付け材の溶融処理を行ったところ、アスベスト含有保温材と同様、1,100℃以下の加熱温度で溶融処理することができた。また、公定法により溶融物のアスベスト濃度を測定したが、溶融物からアスベストは検出されず、無害化されていることを確認した。

また、今回、飛散抑制ユニットを通したトータルのシステムでの処理は実施できなかった

め、処理能力の確認はできなかったが、保温材を対象としたこれまでの実用化飛散抑制ユニット開発の際と同様、入念な事前調査と予備試験を行い最適な飛散抑制ユニットの仕様を決定すれば目標とする処理能力の達成は可能と考えられる。

### 3. オンサイト式溶融・無害化処理システムを用いた実証試験

#### (1) 実用化飛散抑制ユニットの改良とトレーラの設計

**【開発目標値】** 実用化規模(5 トン/日)処理できる移動用トレーラのスペック決定

高水分保温材からの水蒸気や炉ダクトへのアルカリ融剤付着に伴う炉内圧力変動による不具合を改良した実用化飛散抑制ユニットと 150kW 誘導加熱溶融炉を一体化したシステムにて実証試験を行い、炉内圧力変動抑制効果を確認するとともに、安定的な連続運転を行うための運転条件の見極めを行った。また、アスベスト含有保温材の溶融試験では、溶融物および集塵装置排ガス、装置周辺大気のアスベスト濃度測定を行ったが、アスベストは検出されず確実な無害化と装置の安全性を確認した。

さらに、これまで開発した機器をトレーラに架装するにあたり、車両保安基準（総重量 28t 以下、車高 3.8m 以下、車幅 2.5m 以下、転倒防止角 30 度以上）を満足する機器配置となるよう詳細設計を行った。

なお、負圧室空間容積は目標値である 100m<sup>3</sup> を十分下回る 49m<sup>3</sup> (6.13×2.48×3.19) となり、コンパクトに装置を搭載することができた。

#### (2) トレーラへの架装および商用運転を想定した長時間連続運転

**【開発目標値】** 連続安定運転 5 日間以上、溶融物 TEM 分析不検出、受電システムの構築

#### (3) 実証試験による安全性および実用化評価

**【開発目標値】** 処理能力 208kg/時(5 トン/日)以上、装置周辺アスベスト濃度 10 本/L 以下、同システムによるアスベスト廃棄物処理コスト 40,000～60,000 円/ m<sup>3</sup>

開発したオンサイトシステムにより、発電所構内で 6 日間、昼夜の連続運転試験を行い、各装置の機能に問題がないことを確認した。

長時間連続運転および最終的な実証試験では、処理後の溶融物及び集塵装置出口排ガスや周辺大気について、公定法および TEM 法（溶融物分析）による分析を行ったが、アスベストは検出されず、本システムの確実な無害化と安全性を確認した。

また、最終的な実証試験において処理能力確認試験を行い、208kg/時(5 トン/日)以上の処理能力を検証した。

さらに 440V での一括受電と高調波発生を抑制する受電システムを構築し、連続運転試験において性能を満足することを確認した。

ビジネスモデルの検討における処理コスト試算結果から、一定量以上の処理を受注できた場合は、処理コストは目標値である 60,000 円/ m<sup>3</sup> 以下を達成できる見通しを得た。今後、処

理コストについては、さらに自社での処理実績を積み重ねながら、精査していくこととしている。

#### **(4) 緊急時対応システムの構築と作動確認試験**

##### **【開発目標値】 緊急時対応システムの構築とその有効性確認**

地震や停電等の緊急時のアスベスト飛散や機器損傷などのリスクを回避し、自動的に安全停止できる緊急時対応システムを構築した。実証試験に合わせて地震や停電状態を模擬した作動確認試験を行い、装置の安全な自動停止や電力・冷却水喪失時のバックアップ状況などシステムの有効性を確認した。

## 第4章 まとめおよび今後の検討課題

アスベスト廃棄物による環境リスク低減に資するため、アスベスト含有保温材を解体現場で速やかに溶融・無害化まで完結させる「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システム」の実用化を目指し研究開発を行った。主な成果として、従来の溶融処理（1,500℃以上）に比べ低い温度でアスベストを溶融・無害化できる処理システムを開発するとともに、処理システムをトレーラに搭載した移動処理車を開発し実用レベルにあることを確認した。以下に、取り組んだ研究課題とその成果について概要を示す。

### 1. 飛散抑制ユニットの設計・製作

#### (1) 実用化飛散抑制ユニットの設計

平成18年度に開発した150kW誘導加熱溶融炉によるアスベスト溶融・無害化処理試験で判明した技術的課題を解決するため、①処理速度の向上、②保温材水分削減、③熱損失抑制を目指し、構成要素である破碎、予備乾燥、放熱抑制、攪拌、熱回収及び前置型集塵の各ユニットについて、予備試験及び方式選定調査を行った。その結果をもとに最適な機能・構造を決定し、実用規模の150kW誘導加熱溶融炉に対応した実用化飛散抑制ユニットを設計した。

#### (2) 実用化飛散抑制ユニットの製作

1. (1)の設計に基づいて各ユニットの仕様を決定し、トレーラへの搭載を想定したレイアウトで実用化飛散抑制ユニットを製作するとともに、実際の処理を模擬したノンアス保温材による溶融試験を実施し、不具合の洗い出しを行った。不具合を解消した後、アスベスト含有保温材による溶融処理試験を実施し、安定的な連続運転を行うための運転条件の見極めを行った。また、溶融物及び集塵装置排ガス、装置周辺大気いずれからもアスベストは検出されず、実用化飛散抑制ユニットが実用レベルにあることを確認した。

### 2. 「吹付けアスベスト無害化・資源化処理の研究開発」

#### (1) 溶融ラボ試験

3kW誘導加熱溶融炉を用いて、クロシドライト、クリソタイルを含有する2種類のアスベスト含有吹付け材の溶融ラボ試験を行った。アスベスト含有保温材処理と同じアルカリ融剤を用いて、溶融温度1,100℃以下、融剤混合比（融剤添加重量／処理対象物重量）0.5の溶融条件で処理したところ、いずれの溶融物からもアスベストは検出されず、無害化されていることを確認した。

#### (2) 実用規模での溶融・無害化試験

150kW誘導加熱溶融炉を用いてクリソタイルを含有するアスベスト含有吹付け材の溶融処理を行ったところ、2.(1)と同様の条件で溶融処理することができた。また、溶融物からアスベストは検出されず、無害化されていることを確認した。

### 3. オンサイト式溶融・無害化処理システムを用いた実証試験

#### (1) 実用化飛散抑制ユニットの改良とトレーラの設計

開発の最終形態であるトレーラ搭載型のオンサイト式溶融・無害化処理システム（以下、「オンサイトシステム」という。）には、アスベストを飛散させることなく安全に保温材を投入できる自動投入機構や、溶融物の熱回収と取出しを容易にするユニットが必要なため、実用化飛散抑制ユニットを改良するとともに、道路運送車両法に則り公道を安全に走行できるトレーラの設計を行った。

#### (2) トレーラへの架装および商用運転を想定した長時間連続運転

150kW 誘導加熱溶融炉と飛散抑制ユニット、自動投入機構を製作したトレーラに架装するとともにアルミパネルの外壁で覆い、前室、中室、後室の3室構造とした。なお、アスベスト飛散の可能性のある主要機器は全て負圧室となる中室に配置した。

開発したオンサイトシステムを移動させて屋外に設置し、発電所構内で6昼夜（うちアスベスト含有保温材は1昼夜）の連続運転試験を行い、各装置の機能に問題がないことを確認した。また、溶融物および周辺大気からアスベストは検出されず、本システムの確実な無害化と安全性を確認した。

#### (3) 実証試験による安全性及び実用化評価

長時間連続運転後に若干の改良を加えたうえで、オンサイトシステムによる最終的な実証試験を実施し、目標とする処理能力（208kg/時(5ト/日)以上）を確認した。また、溶融物および集塵装置排ガス、周辺大気からアスベストは検出されず、オンサイトシステムの確実な無害化と安全性を改めて確認した。

#### (4) 緊急時対応システムの構築と作動確認試験

地震や停電等の緊急事態が発生してもアスベスト飛散や機器損傷などのリスクを回避し、自動的に安全停止できる緊急時対応システムを構築した。実証試験に合わせて地震や停電状態を模擬した作動確認試験を行い、装置の安全な自動停止や電力・冷却水喪失時のバックアップ状況などシステムの有効性を確認した。

### 4. 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

本プロジェクトで開発したシステムの実用化に関するビジネスモデルを検討するため、アスベスト含有保温材処理の市場規模や適用先業種とオンサイト処理にあたっての技術的制約事項等を調査した。また、アスベスト含有吹付け材の処理については、オンサイト処理にあたっての技術的制約事項等を調査した。また、アスベスト削減効果、事業化、コスト、波及効果についての検討を行った。

## 5. 今後の検討課題

これまでのプロジェクトでは、試験に伴い必要となる最低限のアスベスト含有保温材で実証試験を行い、アスベスト飛散防止や無害化の確実性を主眼に処理システムの開発を行ってきた。

一方、最終目標となる商用化に当たっては、他社事業所での大量処理をトラブルなく、かつ市場で競争力のある処理コストで実現することが不可欠である。

国による無害化処理認定を取得し、本システムによる実処理が可能となった暁には、自社発電所での長期実処理運転を行い実績を積み上げるとともに、特に設備面およびコスト面での鍵となる誘導加熱熔融炉の消耗部材の信頼度向上と修繕コスト低減に向けた検討を行っていくこととしている。

## 第5章.研究発表・講演、文献、特許等の状況

### 1. 研究発表・講演（口頭発表も含む）

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
平成19年11月29日	第2回エレクトヒートシンポジウム論文発表会	「高周波誘導加熱炉を用いたアスベスト無害化・資源化装置の開発」	北陸電力株式会社 山田 真一
平成20年10月23日	平成20年度 火力原子力発電大会	「アスベスト含有保温材の溶融・無害化処理システムの開発」	同 上
平成21年10月8日	平成21年度 火力原子力発電大会	「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システムの開発」	同 上

### 2. 文献

年月日	出典先	タイトル	著 者
平成20年1月10日	月刊誌「電気評論」	「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システムの研究開発」	北陸電力株式会社 久和 進
平成20年7月15日	月刊誌「エレクトヒート」	「高周波誘導加熱炉を用いたアスベスト無害化・資源化装置の開発」	北陸電力株式会社 山田 真一、別森 敬一、綿貫 撰 富士電機サーモシステムズ株式会社 岡山 栄、古城 靖彦、藤田 満、加納 利行 国立大学法人 東北大学 谷口 尚司
平成21年3月10日	平成20年度 火力原子力発電大会 論文集	「アスベスト含有保温材の溶融・無害化処理システムの開発」	北陸電力株式会社 山田 真一、別森 敬一 富士電機サーモシステムズ株式会社 岡山 栄、山本 勝也 国立大学法人 東北大学 谷口 尚司
平成21年1月10日	月刊誌「電気評論」	「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システムの研究開発」	北陸電力株式会社 久和 進
平成22年3月3日	平成21年度 火力原子力発電大会 論文集	「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システムの開発」	北陸電力株式会社 山田 真一、別森 敬一 富士電機サーモシステムズ株式会社 岡山 栄、山本 勝也
平成22年12月10日	月刊誌「電気現場技術」	「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システムの開発」	北陸電力株式会社 山田 真一
平成22年1月10日	月刊誌「電気評論」	「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システムの開発と連続運転試験」	北陸電力株式会社 久和 進

### 3. 特許等

発明等の名称	「廃アスベスト無害化装置」
出願日	2009年7月7日
出願番号	特願 2009-161257 特願 2009-161258 特願 2009-161259 特願 2009-161260

### 4. その他公表（プレス発表等）

掲載年月日	発表媒体
平成 20 年 1 月 23 日	電気新聞
平成 20 年 1 月 31 日	電気新聞
平成 20 年 6 月 17 日	電気新聞
平成 21 年 2 月 21 日	北日本新聞
平成 22 年 7 月 9、10 日	日経新聞、日経産業新聞、朝日新聞、読売新聞、北陸中日新聞、北日本新聞、電気新聞



## 2. 2. 2 低温過熱蒸気によるアスベスト無害化・資源化装置の開発

### 開発概要

アスベスト含有建材のストックは4,000万トン以上あり、今後、建築物の解体に伴って、大量に廃棄されることが予想されている。

本開発では、低温過熱蒸気を利用して、アスベスト含有建材を大量に無害化・資源化できる新技術を開発し、実用化を図った。以下、本開発で得られた成果の概要を示す。

#### (1) 無害化処理条件の決定

アスベスト含有建材の無害化処理に最適な処理温度、処理時間を基礎実験により決定した。また、過熱蒸気によるアスベストの無害化機構を科学的に立証した。

#### (2) アスベスト含有建材の大量無害化処理技術の開発

アスベスト含有建材を大量処理するために開発した大型装置を用いて、上記の最適条件に基づいた無害化処理を実施し、アスベスト含有建材を大量に処理できることを確認した。8時間連続実験により、大型装置の安全性及び実用性を確認した。

#### (3) アスベスト無害化処理物の資源化に関する検討

アスベスト無害化処理物の成分分析を行い、ポルトランドセメントの品質・性能要件を満足することを確認した。また、アスベスト無害化物を用いたセメントを製造し、JISに基づいた強度試験等を実施し、セメント材料として問題がないことを確認した。

#### (4) 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

アスベスト含有建材の廃棄処分に関する市場調査を実施し、実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルを策定した。

## 開発内容

### 1. 研究開発の概要

#### (1) 事業目的

本研究開発では、平成22年頃までにアスベスト全廃を実現するために必要となる実用化基盤技術を確立する。これまでのアスベスト対策では未着手な技術あるいは大きな波及効果が見込まれる技術として、以下の3項目が上げられている。

- 1) 0.1%以上のアスベスト含有製品や解体・回収・廃棄時における浮遊アスベストを簡易に探知・計測できる技術
- 2) アスベストを含む建材等の廃棄・除去、及び回収・処分段階において安全、効率的に処理できる技術
- 3) 大量に排出されるアスベスト製品を安価で無害化、資源化できる革新的な技術

本研究開発では、このうち3)に資する技術を用いた無害化・資源化装置の開発を目指す。ここでの「無害化」とは、JIS A 1481;2006 およびその解説に則りアスベスト6種が0.1%以下と判定される状態を示す。また、JIS A 1481;2006 が改定された場合、改定版により改めて確認するとともに、判定基準の変化については JIS 改訂のみに依拠せず、日本作業環境測定協会のプロトコルなども取り入れて、世の中の状況変化に柔軟に対応する。

図-1 にアスベスト含有建材の処理ルートを示す。赤矢印が、本研究開発での目指す処理ルートとなる。

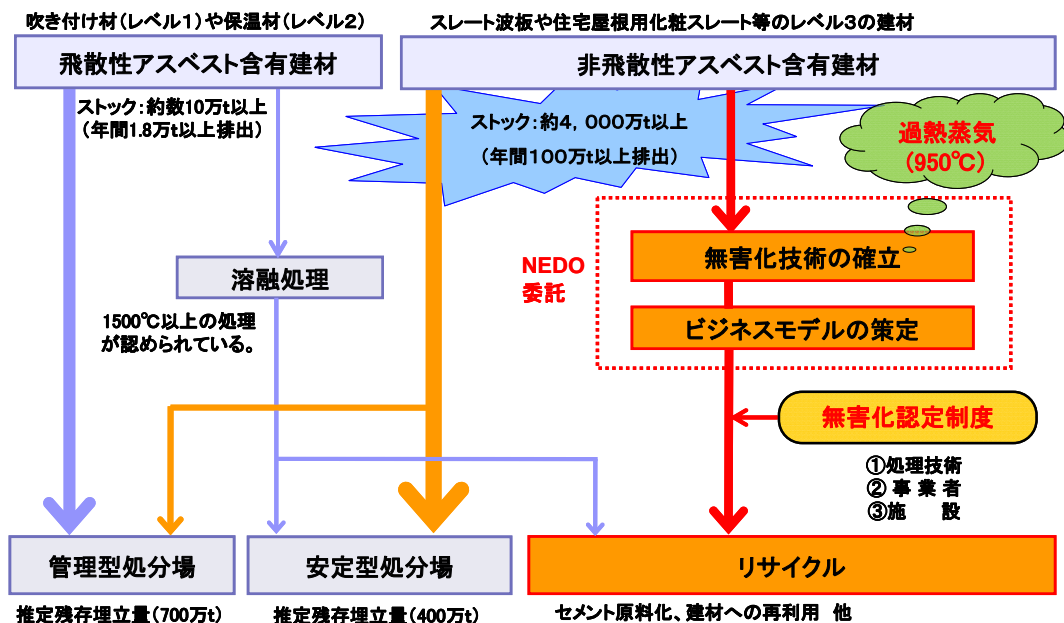


図-1 アスベスト含有建材の処理ルート

## (2) 事業概要

アスベスト含有建材の無害化処理において、過熱蒸気を用いて無害化を可能にする装置を開発する。また、この処理によって発生した無害化処理物は、セメント原料に転換する。無害化処理物は、無害化工場で破砕し、それをセメント工場に受け入れてもらうことで、セメント化が可能である。

基礎試験装置（500kg/日）における試験（以下、「基礎試験」）を実施し、その結果を踏まえ、バッチ式パイロット規模装置（処理能力5t/日）を製作、試験を実施する。その後、バッチ式パイロット規模装置を連続的に改造し、8時間の連続試験を実施、無害化・資源化を確認する。将来の事業化に際しては処理量30t/日が可能な無害化処理システム（以下、「実機」）の実現を目指しており、その1/6スケールとなる連続式パイロット規模装置を確立することで早期の実用化が可能となる。

無害化された材料は、位相差顕微鏡、X線回折、電子顕微鏡での無害化の確認に加えて、動物試験を中心とした有害性評価システムを用いて、自然界に存在する他の物質と比較して評価する。

本研究開発の検討項目を以下に示す。

- ・ 低温過熱蒸気によるアスベストの無害化処理技術の開発
- ・ アスベストの大量・無害化処理技術と資源化に関する研究
- ・ 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

図-2に本研究開発でのアスベスト無害化・再資源化のサイクルを示す。

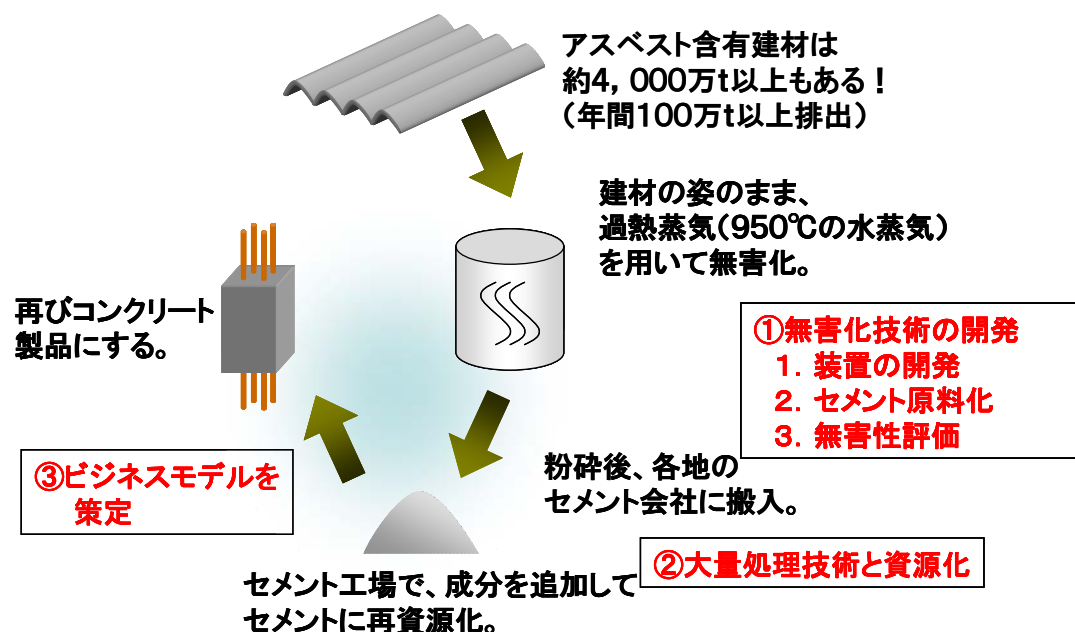


図-2 アスベスト無害化・再資源化のサイクル

### (3) 研究開発内容

#### テーマ①「低温過熱蒸気によるアスベストの無害化処理技術の開発」

##### ①-a) パイロット規模装置による無害化処理条件の決定 (大旺新洋株式会社-共同実施先：高知大学)

以下の4点の特徴を基に、連続式パイロット装置の開発を目指す。

- ・ アスベスト含有建材の破砕を必要とせずに無害化する。
- ・ 熔融処理よりも低温でアスベスト含有建材を無害化する。
- ・ アスベストの脱結晶水に必要な温度雰囲気以上に昇温後、過熱蒸気を用いることにより、短時間で無害化する。
- ・ アスベスト含有建材中に含まれる結晶水、水和物等を高温加熱により脱水させ、それを過熱蒸気として利用してアスベストを無害化する。

##### ①-b) アスベスト無害化物のセメント材料としての有効性確認 (大旺新洋株式会社)

アスベスト無害化物にある品質のバラツキを建材ごとに調査し、普通ポルトランドセメントの品質・性能要件として適切な材料か否かを検討し、アスベスト無害化物がセメント原材料として有効利用が可能であることを検討する。

##### ①-c) アスベスト無害化物のセメント原料への転換技術 (大旺新洋株式会社)

①-b)で得られる建材ごとの化学成分のバラツキを踏まえ、処理物をセメント原料とするために必要な処理前の分別方法等を検討する。

##### ①-d) アスベスト無害化物の無害性評価 (大旺新洋株式会社—再委託：産業医科大学)

過熱蒸気によって無害化処理されたアスベスト含有建材の安全性について、動物試験を中心とした評価システムに基づき評価試験を実施する。対象物質に対して物理化学的特性試験、試験管内試験、気管内注入試験を行って総合的に評価する。

## テーマ②「アスベストの大量・無害化処理技術と資源化に関する研究」

### ②-a) 連続運転による装置の最適化および実機の検討 (戸田建設株式会社)

バッチ式パイロット規模装置での無害化処理試験結果をもとに、最適な連続式パイロット規模装置の運転システムを検討し、設計・製造する。連続式パイロット規模装置の試験結果から、材料投入、加熱及び過熱蒸気の供給、排気ガスの処理工程等、抽出した問題を検討し、実機の設計に反映する。

### ②-b) アスベスト無害化物による大量セメント生産プロセスの開発 (戸田建設株式会社－再委託：西松建設株式会社)

アスベスト含有建材の無害化後の連続大量粉砕処理技術の検討を行い、実機の設計への適用を検討する。アスベスト無害化物をセメント原料に調合し、セメント材料に関する検討を JIS R 5201 及び JIS R 5202 に基づく試験により検証する。

## テーマ③「実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定」

(戸田建設株式会社)

装置の適用先業種や市場規模などを調査し、アスベスト削減効果、事業化、コスト、波及効果を検討し、実用化に関するビジネスモデルを策定する。また、事業化のための処理能力向上とコスト低減に関するモデルを提案し、導入シナリオとビジネスモデルを策定する。

## 2. 研究開発の成果

### (1) 「低温過熱蒸気によるアスベストの無害化処理技術の開発」

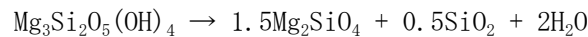
#### ①-a) パイロット規模装置による無害化処理条件の決定

以下の4点の特徴をもとに、連続式パイロット規模装置の開発を行った。

- ・ アスベスト含有建材の破碎を必要とせずに無害化する。
- ・ 熔融処理よりも低温でアスベスト含有建材を無害化する。
- ・ アスベストの脱結晶水に必要な温度雰囲気以上に昇温後、過熱蒸気を用いることにより、短時間で無害化する。
- ・ アスベスト含有建材中に含まれる結晶水、水和物等を高温加熱により脱水させ、それを過熱蒸気として利用してアスベストを無害化する。

#### 1) 無害化処理条件の最適化

本処理方法は、アスベスト中の結晶水を脱水して非アスベスト化して無害化する。その反応式は、以下のとおりである。



##### i) 脱水温度について

###### ア) アスベスト純品の場合

以前より、アスベストは 1,500°C以上で熔融しなくとも、700°C程度の比較的低温で脱水し、他の物質へと変質することが知られていた。このアスベストの脱水温度については様々な資料がある。アスベストとは、天然に産出する繊維状ケイ酸塩鉱物の総称であり、過去に製品材料に用いられたアスベストの多くは、クリソタイルである。このクリソタイルの脱水温度は、一般的に 450~700°Cとされている。一方で、JIS A 1481 に基づく分析により検出されなくなるには、1,000°Cで3時間を要するという発表もある。

以上より、最適な脱水温度は 700°C~1,000°Cの間にあることが推察できる。今回、この温度帯から最適な処理温度を選択するため、以下の確認試験を行った。

クリソタイルを大気雰囲気にて TG-DTA 分析にかけた TG の結果を図-1.1 に示す。対象重量は約 5mg とし、分析条件は 10°C/min で昇温で、その後所定の温度で 1 時間保持した。その温度で 1 時間保持している間に重量減が無い場合、脱水が完了しているといえる。所定の温度は 700°C、800°C、900°C の 3 条件とした。

結果として、700°Cでは 1 時間の重量減が 4.1%であった。これに比べ 800°Cでは、重量減が 0.3%とほぼ完了しており、更に 900°Cでは重量減は起こらなかった。

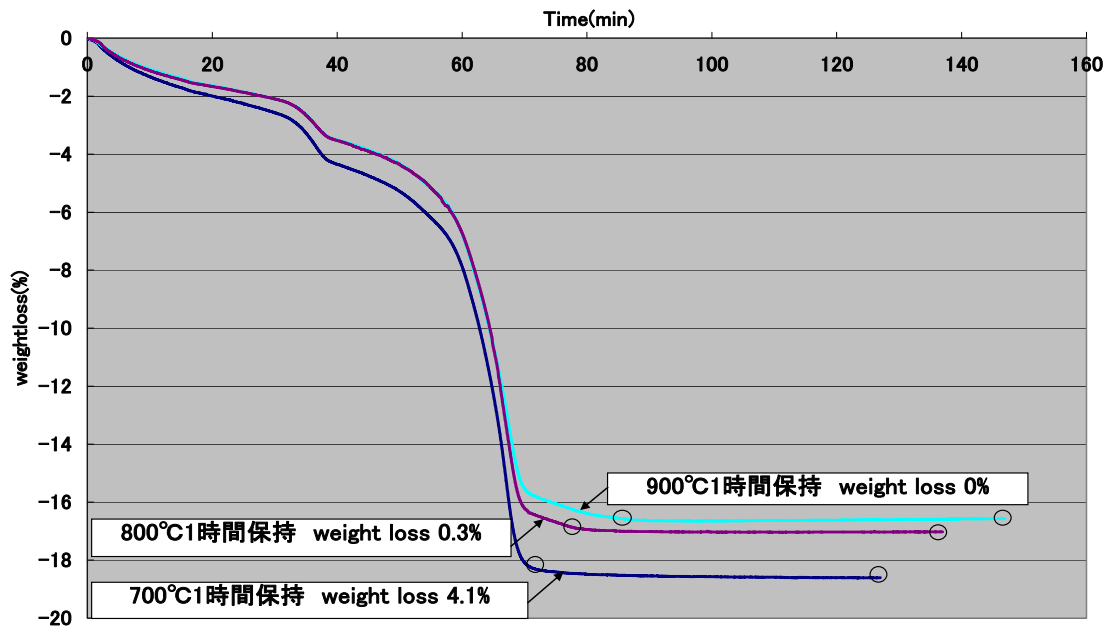


図-1.1 各温度における TG グラフ

以上の結果から 900°Cに達することで脱水は完了するといえる。なお、クリソタイルは理論上 13%の重量減となる。各温度における重量減に、理論値から最大で 6%程度の差がみられた。理由は、2つに大別できる。

ひとつは、昇温開始当初から差として見られ、表面に付着した水分などの影響を受けたためと考えられる。

もう一つの理由は、70分(700°C)でひらいた差は、元々が天然鉱物であるため、 $Mg(OH)_2$ を主とする不純物が混入していることが原因と考えられる。

また、TG-DTA にかけたサンプルを X 線回折装置で分析した結果を図-1.2 に示す。

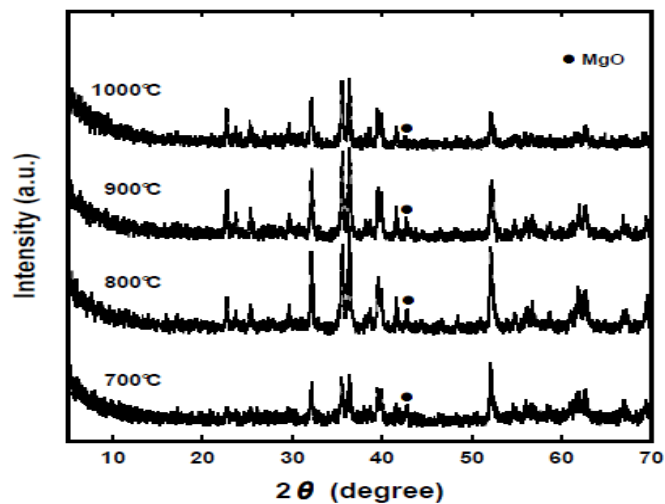


図-1.2 各温度における X 線回折結果

クリソタイルのピークは全てのサンプルで見られない。今回測定に利用した X 線回折装置では判別できない量(0.1%)以下になったといえる。また、MgO 以外のピークは、クリソタイルの熱分解生成物として知られているフォルステライト ( $Mg_2SiO_4$ ) である。特に 35 度付近の高いピークに注目すると、900°Cで最大、1,000°Cにおいては更に別の物質へ変質していく為、ピークが小さくなっていることがわかる。なお、クリソタイルのもうひとつの熱分解生成物である  $SiO_2$  は、ピークが見えないことから非晶質になっていると推定できる。

#### イ) アスベスト含有建材

スレート波板と住宅屋根用化粧スレートというアスベスト含有建材を代表する 2 種類を TG-DTA 分析にかけた。その TG 結果を図-1.3 に示す。分析条件は、10°C/min で昇温し、900°C で 30 分保持とした。

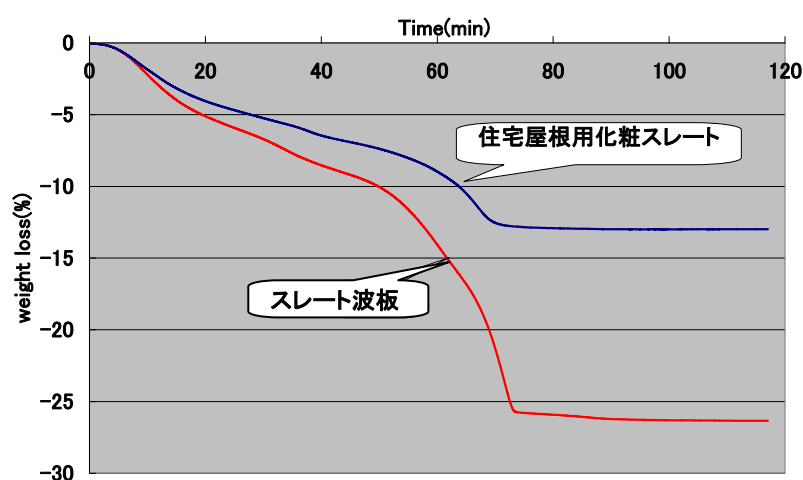


図-1.3 アスベスト含有建材の TG グラフ

アスベスト含有建材の主成分はセメントである。60~70 分 (600~700°C) 台の大きな重量減は、セメント成分に由来する。図-1.1 よりアスベストの重量減も同じ温度帯で大きな重量減を生じているといえる。さらに、900°Cで 30 分保持しても重量減が見られないことから、建材を 900°Cとすることで脱水は完了するといえる。

なお、アスベスト含有建材のアスベスト含有量は、多くは 10%以内である。図-1.1 からわかるように、そのアスベストが脱水により仮に 13%減量しても、建材重量中では 1.3%程度の減量しか示さない。なお、セメントは経年劣化するに伴い、一部が炭酸カルシウム ( $CaCO_3$ ) に変質することが知られている。この炭酸カルシウムの熱分解 ( $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ ) 温度が 894°Cである。サンプルによっては、これに起因する重量減が生じることも考えられるが、今回のサンプルでは確認されなかったことから、 $CaCO_3$  の含有量も僅かであったと推測できる。

#### ウ) 酸素の影響について

大気雰囲気での試験の場合、酸化による発熱反応により脱水反応が促進されている可能性も考えられる。その影響を確認する為に TG-DTA 分析を窒素雰囲気中でも行った。結果、雰囲気による差異は見られなかった。このことから酸素の影響は無視できるといえる。

以上より、非アスベスト化する温度は 900°Cといえる。一方で、本委託事業と時期を同じくして、環境省から公表された無害化基準は、残存する繊維数から判断されることとなった。よって、本報告書においての無害化とは、主に JIS A 1481 に基づき判定している。



ii) 基礎試験装置(500kg/日)による無害化処理試験の実施

ア) 建材の種類への対応

アスベスト含有建材として広く市販、利用されている6種類の建材に対して図-1.4に示す基礎試験装置で試験を実施し、「建材製品中のアスベスト含有率測定方法」(JIS A 1481;2006)に則り、位相差顕微鏡、X線回折によりアスベスト含有の有無の判定を行った。また、一部のサンプルについては、平成21年12月環境省通知「石綿含有一般廃棄物等の無害化処理等に係る石綿の検定方法」に準じての判定も行った。建材は種類ごとに写真-1.1に示すように約10cmに束ねて試料とした。表-1.1は基礎実験に用いたサンプルである。

表-1.1 基礎実験に用いた建材

対象物	寸法 (mm)		厚さ (mm/ 枚)	枚数 (枚)	使用量 (kg)
	横	縦			
A. スレート波板	200	200	5.5	18	5.9
B. 住宅屋根用化粧スレート	200	200	5.4	18	7.8
C. スレートボード	150	90	3.2	※60	5.1
D. けい酸カルシウム板(2種)	200	200	25.7	4	2.9
E. スラグせつこう板	200	200	6.2	16	5.0
G. 押出セメント板	150	150	50	2	2.6

※スレートボードは30枚の2列置き。

結果、試料を設置して、過熱蒸気を供給しながら、基礎試験装置の雰囲気温度を1000℃まで上昇させ、試料の中心温度が950℃に達してから5分保持することで無害化を確認した。

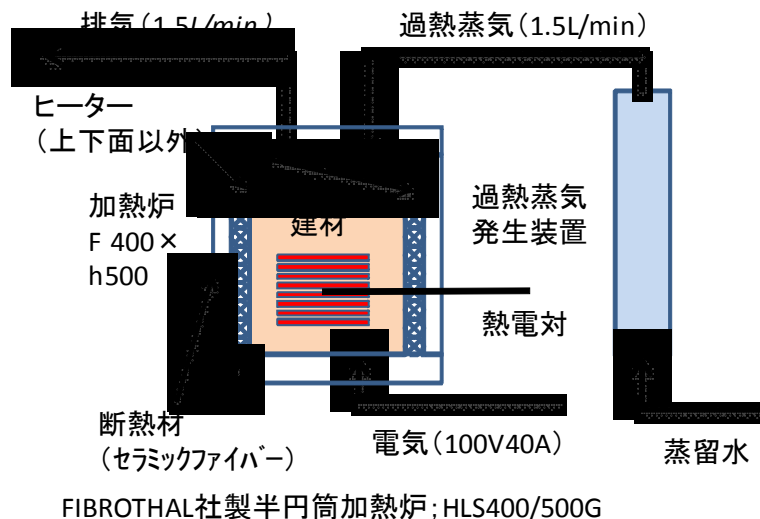


図-1.4 基礎試験装置の概要

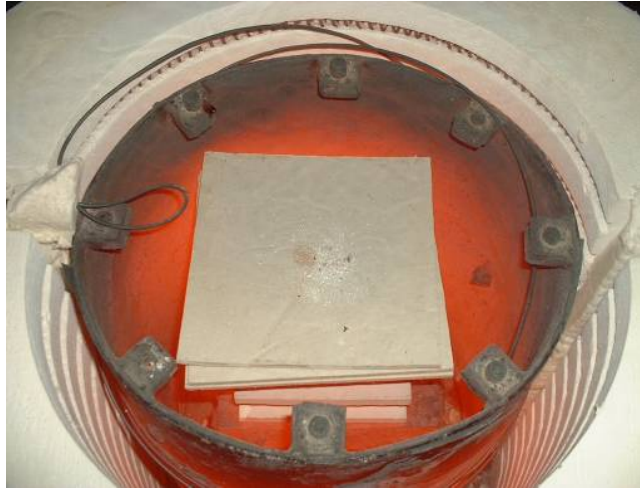


写真-1.1 基礎試験終了直後炉内状況

## イ) 処理条件の抽出

パイロット規模試験における処理条件を決定するため、荷姿から試料採取位置まで表-1.2の9種類の因子、各因子3水準を設定、実験計画法によるL27で割付、実験に供した。対象アスベストはクリソタイル、クロシドライト、トレモナイトの3種類、これらのうち1種類を含んだ試験体を作成し、住宅屋根用化粧スレート（厚さ 4.0mm；20cm 角）の束の真ん中に挟みこんだ。（各 13 枚重ね・上、中、下、図-1.6）。

表-1.2 実験の因子と水準

因子		水準1		水準2		水準3	
A	荷姿	A-1	袋なし	A-2	袋あり	A-3	袋なし
B	アスベスト含有量	B-1	1%	B-2	5%	B-3	10%
C	アスベストの種類	C-1	クリソタイル	C-2	クロシドライト	C-3	トレモナイト
D	雰囲気	D-1	空気一定量	D-2	密閉雰囲気	D-3	蒸気一定量
E	建材の厚み	E-1	5cm	E-2	10cm	E-3	5cm
F	建材の大きさ	F-1	10cm角	F-2	20cm角	F-3	10cm角
G	保持温度	G-1	950℃	G-2	1000℃	G-3	1050℃
H	保持時間	H-1	5分	H-2	30分	H-3	60分
R	試料採取位置	R-1	上側	R-2	中央	R-3	下側

実験装置は、図-1.4 に示す基礎試験装置を用いた。この加熱炉は 1,050℃まで加熱できる。電気容量は 4KW である。過熱蒸気量は 1.5L/min で排気は過熱蒸気を送った量に合わせてある。今回の判断基準は、無害化処理条件を決定するための「相対的」な評価のため、分散位相差顕微鏡で観察できる繊維数とした。処理したサンプルは図-1.5 の建材の真ん中の位置でサンプリングした。

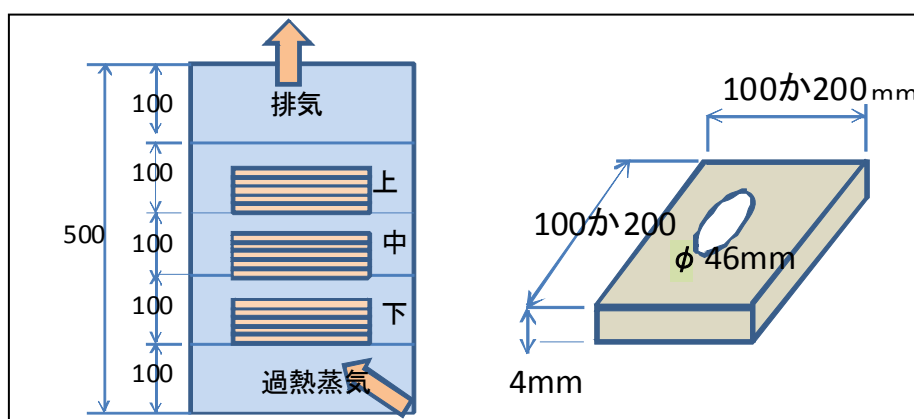


図-1.5 加熱炉と試験体設置位置

表-1.3 に分散位相差顕微鏡で観察された繊維数を示す。繊維は、 $0.5\mu\text{m}$  以上であり、アスペクト比 3 以上のものであるが同繊維数が 4 本以上の結果は、実験 No. 3 と No. 10 であった。No. 3 は温度が低いのが原因であり、No. 10 は空気条件下が原因と考えられる。また、トレモナイト（脱結晶水温度が最も高い 1040℃）の処理温度と処理時間は、950℃、30 分の条件下では過熱蒸気雰囲気下であっても無害化はできなかった。しかし、1000℃では無害化が可能であることがわかる。処理温度 1,050℃以上（保持時間は 5 分以上）か 1000℃以上、保持時間 30 分以上であれば無害化は可能である。

一方、寄与率を計算すると、寄与率が高いのは、①アスベストの種類×保持時間；18.1%、

②保持時間；12.6%、③雰囲気×保持時間；8.7%、④試験体設置位置5.5%、であった。即ち、アスベストの種類、保持時間、雰囲気の寄与率が高いことが判明した。

表-1.3 分散位相差顕微鏡で観察された繊維数

実験 No.	保持温度(°C)	保持時間(分)	厚さ(cm)	幅(cm)	雰囲気	アスベスト	アスベスト濃度	袋	試料位置	繊維本数(本)
1	950	5	5	10	空気	クリソ	1	袋無	上	0
2					密閉	クロシ	5	袋有	中	0
3					蒸気	トレモ	10	袋無	下	10
4	950	30	10	20	空気	クロシ	10	袋無	下	0
5					密閉	トレモ	1	袋無	上	1
6					蒸気	クリソ	5	袋有	中	1
7	950	60	5	10	空気	トレモ	5	袋有	中	2
8					密閉	クリソ	10	袋無	下	0
9					蒸気	クロシ	1	袋無	上	0
10	1000	5	10	10	空気	クリソ	1	袋有	下	8
11					密閉	クロシ	5	袋無	上	0
12					蒸気	トレモ	10	袋無	中	0
13	1000	30	5	10	空気	クロシ	10	袋無	中	0
14					密閉	トレモ	1	袋有	下	0
15					蒸気	クリソ	5	袋無	上	0
16	1000	60	5	20	空気	トレモ	5	袋無	上	0
17					密閉	クリソ	10	袋無	中	1
18					蒸気	クロシ	1	袋有	下	0
19	1050	5	5	20	空気	クリソ	1	袋無	中	1
20					密閉	クロシ	5	袋無	下	0
21					蒸気	トレモ	10	袋有	上	2
22	1050	30	5	10	空気	クロシ	10	袋有	上	0
23					密閉	トレモ	1	袋無	中	0
24					蒸気	クリソ	5	袋無	下	0
25	1050	60	10	10	空気	トレモ	5	袋無	下	0
26					密閉	クリソ	10	袋有	上	0
27					蒸気	クロシ	1	袋無	中	0

以上の結果を踏まえ、最適な処理条件を構成する因子として処理温度と雰囲気および保持時間の3因子を選択し、それぞれ3水準を表-1.4のように設定し、図-1.5に示す基礎試験装置を用いて試験を行った。なお、対象アスベストは、クリソタイルとし、化粧スレートを10cm角にし、13枚重ねを加熱炉に束ねて投入した。投入位置は加熱炉の中央とした。

表-1.4 実験の因子と水準

因子		水準1		水準2		水準3	
A	保持温度	A-1	700°C	A-2	800°C	A-3	900°C
B	雰囲気	B-1	空気一定量	B-2	密閉雰囲気	B-3	蒸気一定量
C	保持時間	C-1	5分	C-2	30分	C-3	60分

分散位相差顕微鏡による観察の結果を表-1.5に示す。

繊維本数の減少に対する寄与率は、雰囲気の寄与率が45.8%もあり、温度が28.3%であった。処理温度および雰囲気の影響が顕著である。この場合、注意が必要なのは「密閉条件」と「蒸気流通条件」は同じ「過熱蒸気下」の雰囲気と判断できる。その場合、「蒸気流通条件」では、常時高い熱量を保有する過熱蒸気を炉外へ排出することとなり、その分、熱量をロスすることになる。よって、過熱蒸気雰囲気に保たれた「密閉条件」が経済性の面から適している。ただし、安全性の担保として、処理物からの熱分解ガスの置換できる程度の過熱蒸気の供給が最適といえる。

表-1.5 分散位相差顕微鏡で観察された繊維数

実験 No.	保持温度 (°C)	保持時間 (分)	雰囲気		
			空気	密閉	蒸気
1	700	5	8	1	1
2		30	3	0	5
3		60	2	3	0
4	800	5	4	1	0
5		30	2	1	2
6		60	0	0	0
7	900	5	1	0	0
8		30	1	0	0
9		60	1	1	0

### ウ) 過熱蒸気の触媒効果

高知大学では、ケイ酸塩の固相反応合成において過熱蒸気の効果を確認していた。同様にアスベスト含有建材においても、フォルステライトの生成が抑制され、アケルマナイトが生成されることを確認した。アケルマナイトはセメント成分のひとつである。具体的には、セメント中の酸化カルシウムとアスベストの反応が促進された。ポルトランドセメントの成分は、エーライト ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )、ビーライト ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )、アルミネート ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )、フェライト ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) および硫酸カルシウム ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) である。これらの成分は水和反応により硬化物に化学変化する。硬化物が高熱にさらされると、一部に酸化カルシウム  $\text{CaO}$  が生じる。

図-1.6 に示すラボ装置において過熱蒸気雰囲気および空気雰囲気で任意のサンプルを対象に、温度を変えて処理 ( $600^\circ\text{C} \sim 1,000^\circ\text{C}$ ) し、X線回折においてアスベストおよびフォルステライトのピークが検出されない温度を確認した。

蒸気発生装置で蒸留水を加熱して所定の温度に上げて、電气管状炉に蒸気を送り込む。過熱蒸気量は  $2.2\text{L}/\text{min}$  である。試料は、乳鉢で  $100\ \mu\text{m}$  以下に粉碎した試料をあらかじめアルミナボートに  $0.5\text{g}/\text{回}$  載せて使用した。その他装置仕様は表-1.6 に示す。

表-1.6 装置仕様

■電气管状炉：ADVANTEC 社製 [FUT542FB]
■炉外形寸法：W560×D360×H380
■炉心管寸法：D1000×φ42
■熱電対：白金-ロジウム製 (D950)、■ボート：アルミナ製

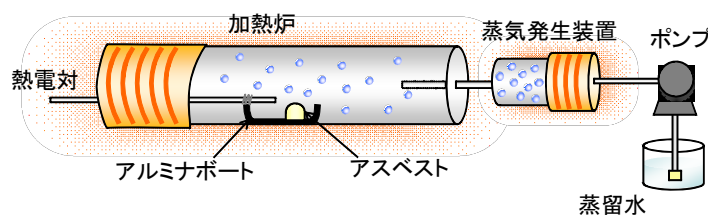


図-1.6 装置概略図

図-1.7は、クリソタイルを過熱蒸気雰囲気下で700°C、800°C、1,000°Cで30分間、処理した結果である。クリソタイルのピークは全ての温度において見つからない。一方で、フォルステライトのピークは、1,000°Cで処理しても消えていない。つぎに、アスベスト含有建材を模擬した図-1.8では、700°Cでクリソタイルのピークが消えて、800°Cからアケルマナイトのピークが出現している。

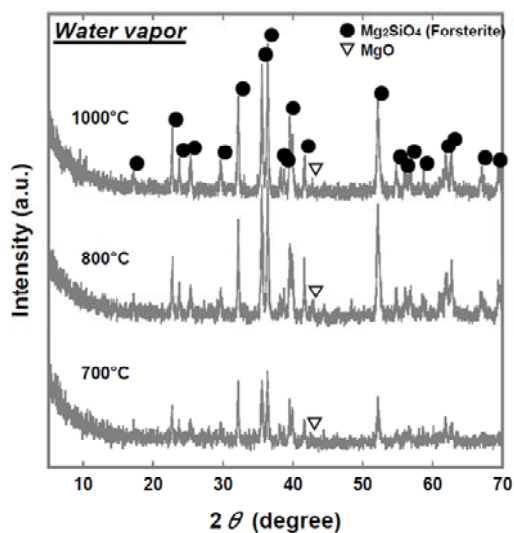


図-1.7 クリソタイル処理物のX線回折

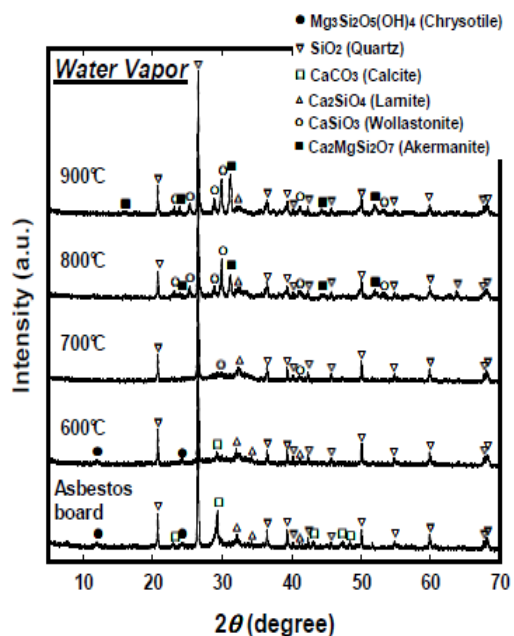
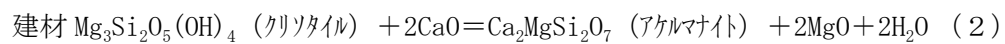
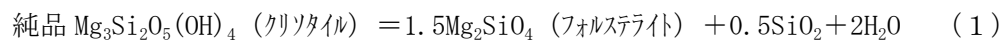


図-1.8 アスベスト含有建材処理物のX線回折

アスベスト含有建材を過熱蒸気雰囲気下で無害化处理すると、(2)式のようにクリソ  
タイルとセメント中のカルシウム分との反応が低温で促進されるため、フォルステライト  
の生成が抑制されると考えられる。



## エ) 過熱蒸気の電磁波効果

放射熱は電磁波に形を換えて伝わるため、熱の伝わる媒質を必要としない。熱エネルギーを放射する波長域は大部分が赤外線領域にあり、 $\gamma$ 線や電波は熱エネルギーには変換されない。この電磁波の波長による分類を図-1.9に示す。

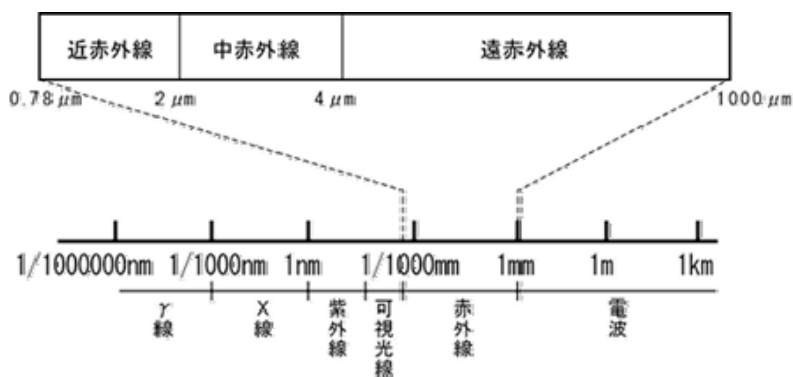


図-1.9 電磁波の波長による分類

赤外線領域を主とする放射熱は、すべての物質に備わっているが、気体では物質により差が大きく、水蒸気やCO<sub>2</sub>など吸収の大きい物質を除いて無視することができる。熱放射線の吸収、放射、散乱の機構は、対象とする物質が気体、液体、固体のいずれであるかによってその様子が異なってくる。水蒸気、CO<sub>2</sub>などの気体の場合には、それらの気体が存在する空間内を連続的な赤外線が通過すると、それぞれの気体によって定まるいくつかの波長領域において吸収を受ける。これらの気体が高温になると逆にその波長領域の赤外線を放射し、その放射エネルギーはかなり大きくなる。この波長領域を吸収バンドあるいは熱放射バンドと呼ぶ。熱放射バンドの位置は、気体分子内での振動の特定の基準振動数によって決まる。

代表的な気体の持つ熱放射バンドを表-1.7に示す。

表-1.7 代表的な気体が持つ熱放射バンド

気体	代表波長(μm)				
	CO <sub>2</sub>	2.0	2.7	4.3	15
H <sub>2</sub> O	1.4	1.9	2.7	6.3	20
CO	2.35	4.7			
NO	2.7	5.3			

ガス種および温度による放射エネルギーの違いを確認するため、空気と蒸気をそれぞれ所定の温度まで加熱し、大気中に放出させ、その放出直後のガス体の放射エネルギーを分光放射計により測定した。2つのガス体は、同温度における供給熱量が等しくなるよう流量を調節した。結果を図-1.10に示す。

温度が高くなるほど、過熱蒸気を表-1.7に示される波長域に強いピークが現れた。特に波長2.7μmのピークは、OH伸縮振動に由来することが知られている。

一方で、加熱空気には、測定範囲内において、特異なピークは見られなかった。



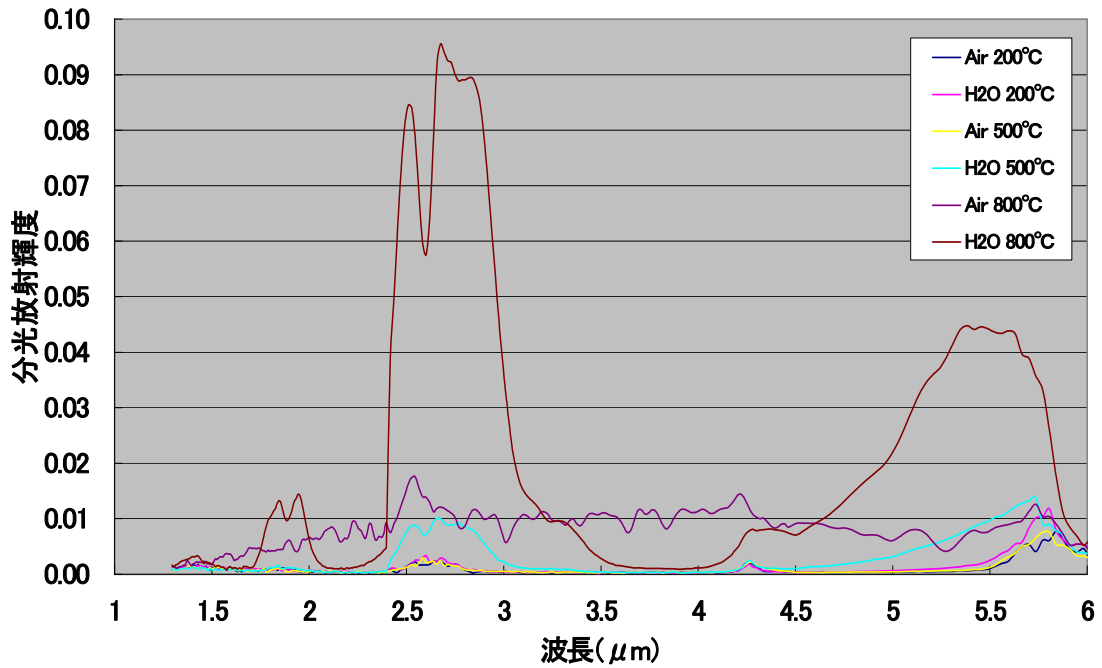


図-1.10 各波長における分光放射輝度

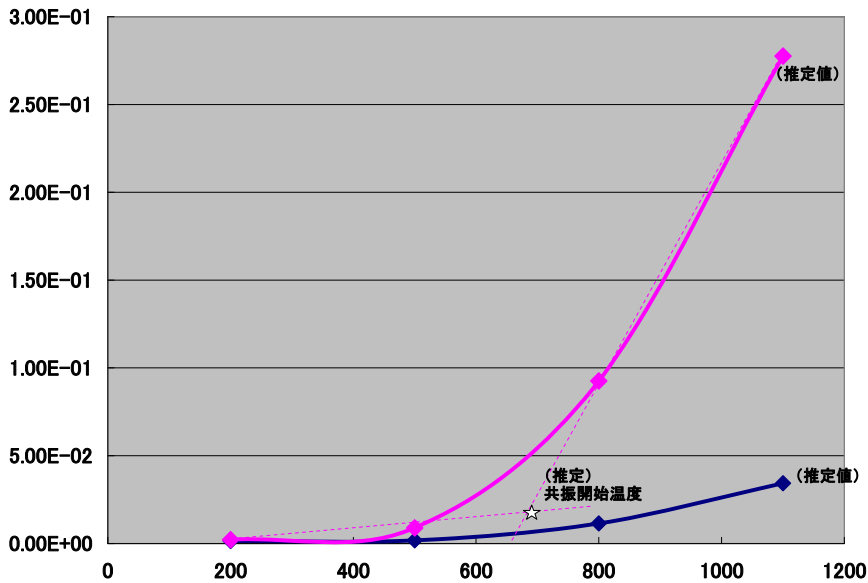


図-1.11 温度別ガス体の分光放射輝度

800°Cの過熱蒸気における 2.7 $\mu$ m 近傍の波長域が突出して高い値を示している。この波長を各温度から抜粋し、プロットしたグラフを図-1.11 に示す。

過熱蒸気の場合のみ、おおよそ 700°Cを境に、2.7 $\mu$ m 近傍の波長域における放射エネルギーが強くなっていることがわかった。

対流伝熱は、アスベストの飛散に繋がるため抑制している中で、期待できない。さらに、アスベスト含有建材という強固な断熱材を対象としており、通常のヒーターのみでは表面にある建材の影や裏になった部分の建材を熱伝導のみによって温度上昇させるには多くの時間を要する。そこで、過熱蒸気が建材束の内部に侵入し、放射熱として建材全体を均一に加熱できる効果は大きいと考えられる。

ところで、電子レンジの加熱周波数は、日本では 2.45GHz である。この周波数のマイクロ波を水に照射すると、水分子が集団で作る分極 P が相互作用、つまり共振する。これが電子レンジによる加熱の原理である。水分子の集団であり、個々の水分子ではない。水分子の分子内振動は、OH 伸縮振動、逆対象伸縮振動、変角振動などがあるが、いずれも赤外線周波数のところであり、マイクロ波よりは 3~4 桁ほど高い。水素結合を介した分子間振動は THz 領域にあるが、それでもマイクロ波より 2 桁高い周波数のところである。従って、電子レンジで使われている電磁波が水分子の分子内振動や分子間振動に直接エネルギーを与えることはない。

ちなみに、周波数  $f$  と波長  $\lambda$  には以下の関係が成り立つ。

$$f = \frac{v}{\lambda} [\text{Hz}]$$

$v$ :電磁波の速度

ここで、過熱蒸気とアスベストが持つ共通項に注目した。ともに OH 基として等しい基準振動数を持ち、過熱蒸気を持つ放射エネルギーを対象物の持つ OH 基が吸収、共振する。さらに、加熱対象物である石綿含有スレートは非金属無機材料であり、放射エネルギーに対して半透明といえる。

この効果について、試験により確認した。試験概略図を図-1.12 に示す。OH 基がある対象建材は、過熱蒸気を持つ放射バンドを吸収すると考えられる。裏面から加熱空気ないし過熱蒸気で 700°C まで熱したサンプルで、表面に発生する電磁波のうち、 $2.7\mu\text{m}$  の波長における分光放射輝度を測定した。また、あわせて赤外線カメラによりサンプルの表面温度を測定した。結果を図-1.13 に示す。なお、OH 基を持たない比較対象物として鉄板を用いて同様の試験を行った結果を図-1.14 に示す。



写真-1.2 分光放射計

#### <分光放射計の測定原理>

SR5000は、集光系にニュートン式反射集光系を採用しています。集光された光はチョッパーにより変調され連続可変フィルターで分光される。分光された光は、楕円ミラーをへて検出器に入射する。またチョッパーの羽根はミラーになっており、内部黒体炉の基準赤外線を反射し被測定物からの放射を透過するので、検出器は両者の差を測定し絶対値を得ることができる。

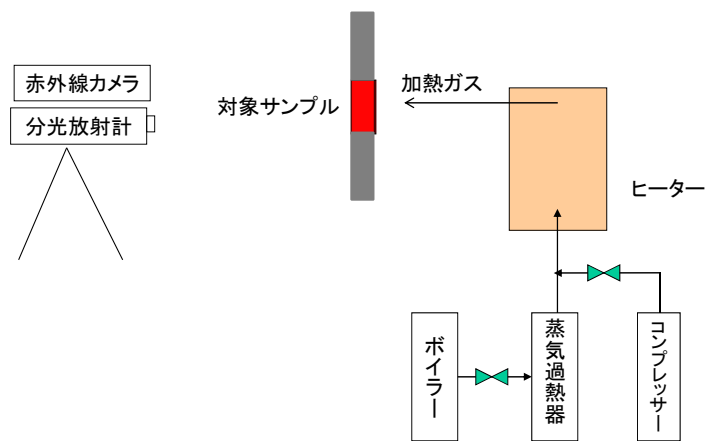


図-1.12 試験概略図

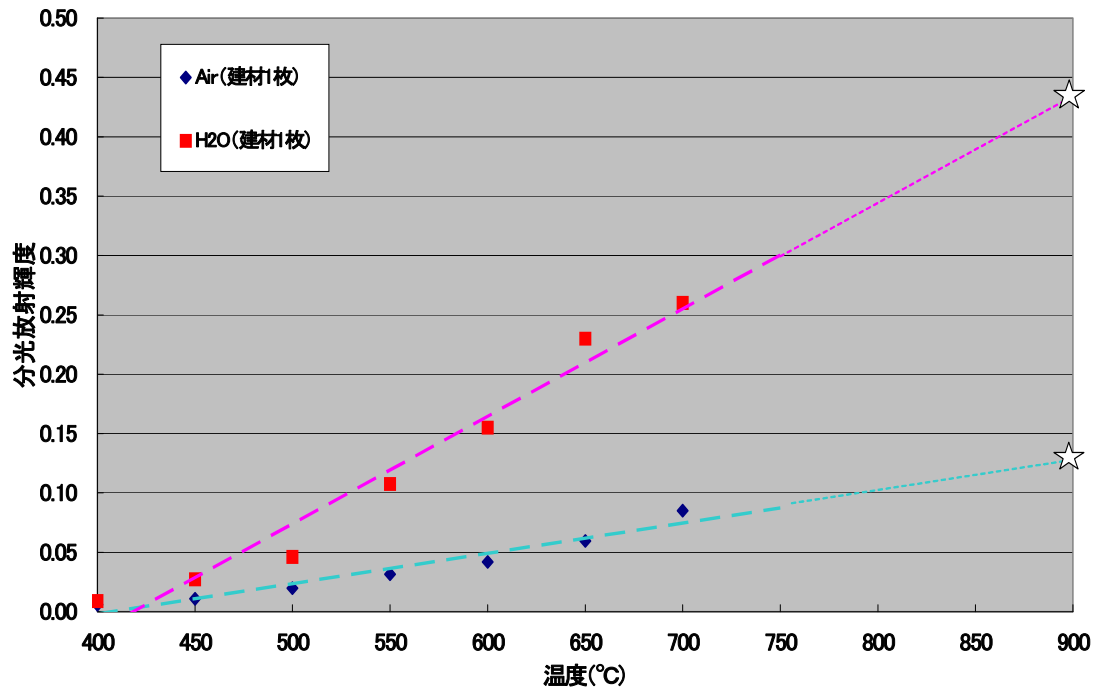


図-1.13 異なるガス体で加熱した建材から発生した  $2.7 \mu\text{m}$  の分光放射輝度

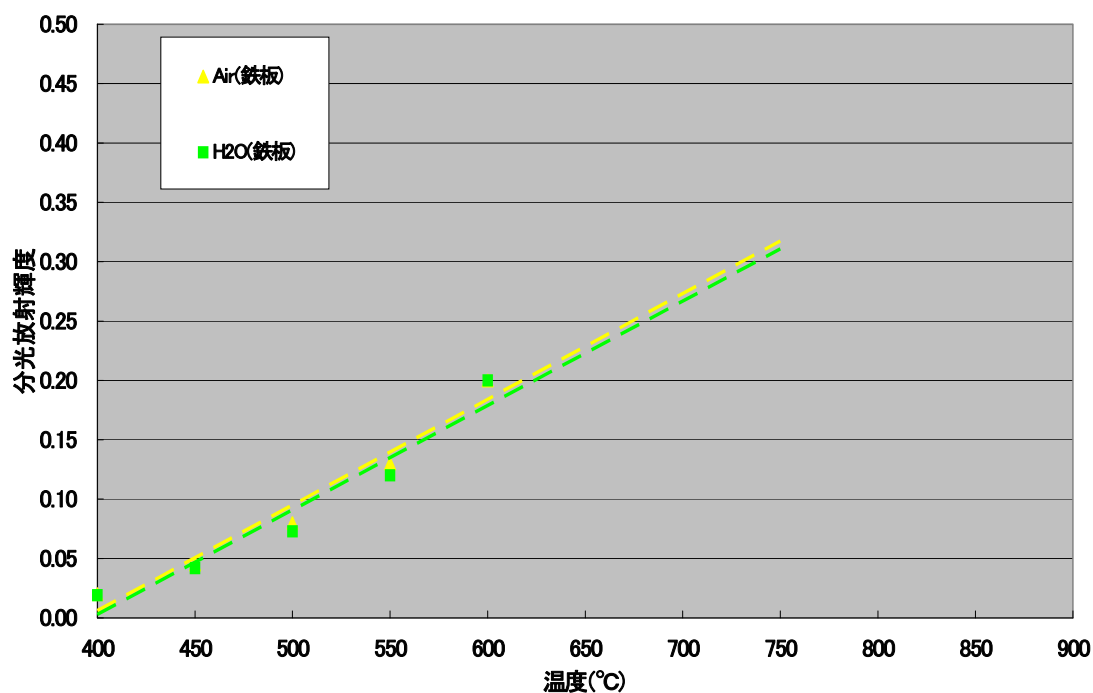


図-1.14 異なるガス体で加熱した鉄板から発生した 2.7 μm の分光放射輝度

鉄板にどちらの加熱ガスを吹き付けても、分光放射輝度に違いは見られなかった。一方で、アスベスト含有建材に過熱蒸気を吹き付けた場合、同じ温度の加熱空気の場合と比べて強くなっていた。これには以下の理由が考えられる。

- ・ 赤外線カメラで測定しているのは建材の表面温度である。建材表面から放射されるスペクトルのうち、特定の波長域を計測し、温度に換算している。測定波長域はガス体からの影響を排除できる範囲であるため、2.7 μm の影響は無視される。
- ・ 分光放射計では建材表面のみならず、建材内部から発生する OH 基由来の 2.7 μm の分光放射輝度を測定している。過熱蒸気を吹きかけられている裏面から測定している表面にかけて温度勾配が発生しており、表面温度から推定される輝度より大きい値になっていると考えられる。結果、同じ温度に達するまでの昇温時間は、過熱蒸気で加熱した場合のほうが早かった。外部からのみの加熱となっている鉄板の加熱に比べ、建材内部の OH 基が共振し、周囲より早く高い温度になることで、建材全体の効率的な熱伝達が行われ、結果的に対象物全体の温度上昇を促進したと考えられる。

#### オ) 無害化処理条件の決定

以上の実験結果から総合的に判断し、処理温度 950°C、保持時間 5 分を、本技術の無害化処理条件とした。

### iii) パイロット規模装置(5t/day)の設計・製作

基礎試験の結果を踏まえ、パイロット規模装置(5t/day)の設計・製作を実施した



写真-1.3-上) パイロット規模処理炉



写真-1.4-右上) 建材設置状況



写真-1.5-右下) 炉内状況

パイロット規模装置の処理炉は写真に示すように、900mm×1,800mmのアスベスト含有建材がそのまま入る面積である。内法で幅1,200mm×奥行き2,000mm×高さ1,200mmで、下面以外は電気のパネルヒータで覆われる構造とした。必要な入熱量を満足するヒーターが限られていたため、できるだけヒーター設置面積を広く確保することを主目的に高さを決定した。加熱方式と、過熱蒸気と電気加熱の併用とした理由としては、大きくは2点ある。ひとつは、一般的な加熱方式である燃焼ガスの吹き込み式では、多量の排ガスの発生、同時に、その中へのアスベストの飛散が懸念される。また、その対応に相当の費用が生じる。もう一点は、過熱蒸気のみを吹き込んだ場合の熱ロスの抑制がある。過熱蒸気を主体とする排ガスを冷却することで、ほぼ水に戻るというクリーンなイメージがある一方で、過熱蒸気みの入熱では、相当量の過熱蒸気の供給が必要となり、排気による熱ロスを避けられないことから、電気ヒーターを併設した。

### iv) バッチ式パイロット装置(5t/day)による試験の実施

実験に供した建材は厚さ5mmの500mm角の住宅屋根用化粧スレート波板を15枚重ねた。ヒーターの容量は168kWである。処理炉下部から950℃の過熱蒸気を1.5kg/hr投入した。内部の圧は一定に保ち、余分な排ガス等は排出した。

200kgの建材を処理した際の、温度トレンドグラフを以下に示す。常温からの昇温であり、予備加熱に時間を要したものの、概ね3時間で一連の処理が完了した。

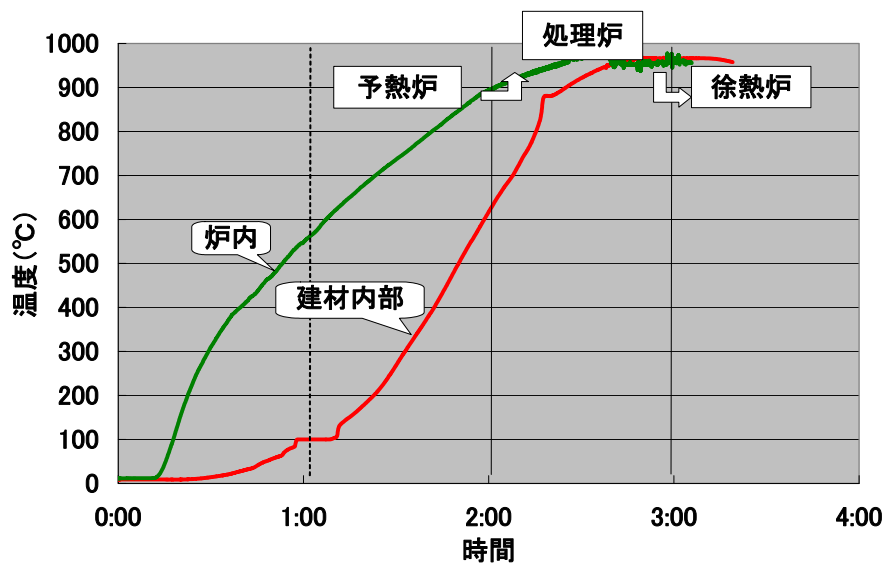


図-1.15 建材内部温度のトレンドグラフ

図-1.15 に示すように加熱開始後、1 時間内に過熱炉内の雰囲気は 500°C を越え、約 2 時間で 900°C を越えた。建材内部の温度は遅れて温度が上昇し、900°C を越えるまでに 2 時間 20 分かかった。2 時間 40 分で 950°C に達した。温度上昇は、建材の投入量とヒーターの容量によって決まるものである。最も昇温速度の遅い建材束の中心からサンプリングし、無害化を確認した。

## 2) 材料投入・排出工程・排気工程の最適化

バッチ式パイロット規模装置での試験結果を踏まえ、図-1.16 に示すように 500°C以上の予備加熱ができ、連続供給・排出ができるパイロット規模装置に改造して、8時間の連続運転を実施した。対象物には、波板および住宅屋根用化粧スレートを用い、ともに JIS A 1481;2008 に則りアスベストの無害化を確認した。なお、サンプリングは、建材束の上・中・下3段から1段あたり9か所、計27か所から採取した。

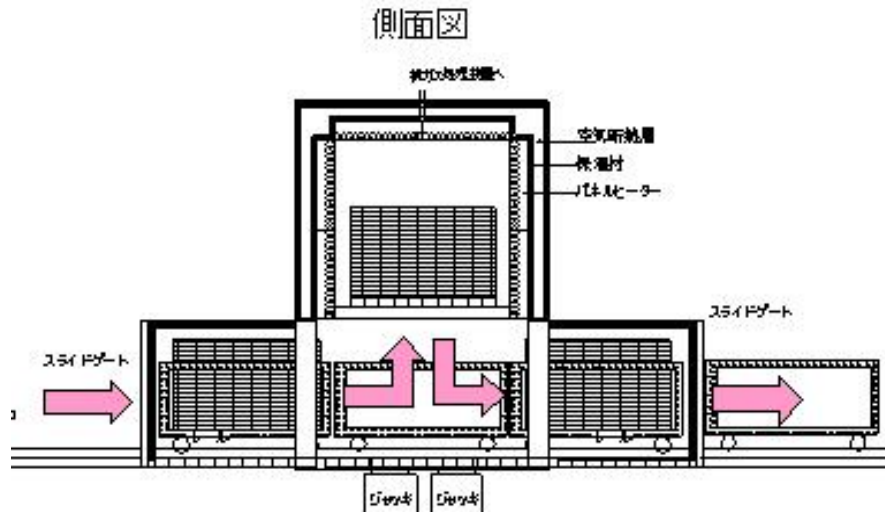


図-1.16 パイロット規模装置



写真-1.6 連続式パイロット規模装置



写真-1.7 連続試験状況

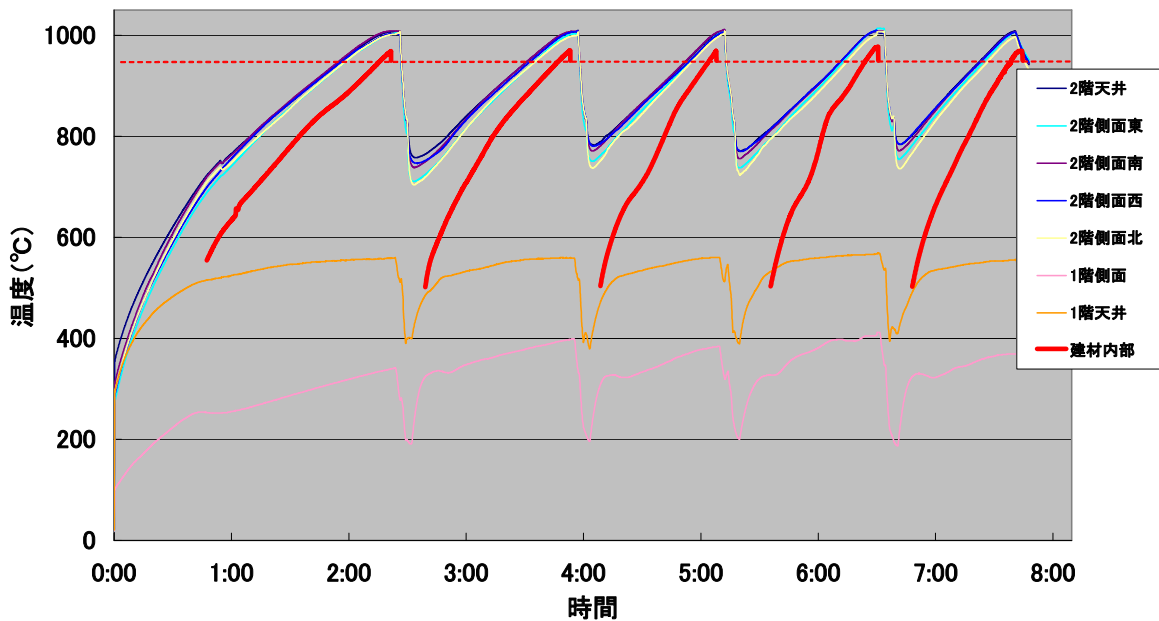


図-1.17 連続試験における温度トレンド

更に、上記連続試験結果から排気工程等での熱損失が大きいことが判明したため、対策として過熱蒸気循環装置の設置および過熱蒸気の供給温度アップを実施した。その上で、8時間連続運転の試験を3回行い、無害化の再現性について確認を行った。図-1.17に連続運転における温度トレンドを示す。赤いラインが、処理炉における建材束の中心温度である。

JIS A 1481:2008に則り無害化の再現性について確認を行った。また、パイロット規模装置の最大処理能力として6t/日を確認した。



①-b) アスベスト無害化物のセメント材料としての有効性確認

アスベスト含有建材を無害化処理した材料がセメント原材料として使用可能であるかどうかを以下の順で調査、検証した。

1) アスベストの化学成分の把握→2) 主な建材のアスベスト含有率→3) 主な建材のアスベスト以外の構成原料→4) セメント原料としてのアスベスト含有建材の可能性  
以下、結果を示す。

1) アスベストの化学成分の把握

アスベストは、産地により化学成分が多少違うが概ね表-1.8のように分類できる。

蛇紋石系のクリソタイルと角閃石系のアモサイト・クロシドライトの化学組成の違いは、クリソタイルが SiO<sub>2</sub> と MgO が主体なのに対し、アモサイト、クロシドライトは SiO<sub>2</sub> と FeO が主体となっている。トレモライトとアクチノライトは、同じ結晶構造を持ち、化学成分の鉄分の多少で区別されている。鉄分の少ないのがトレモライトで多くなるとアクチノライトと呼ばれる。

表-1.8 アスベストの化学成分

	蛇紋石系	角閃石系				
	クリソタイル	アモサイト	クロシド ライト	アンソフィ ライト	トレモライト	アクチノ ライト
SiO <sub>2</sub>	38～42	49～52	49～56	53～60	55～60	51～56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0～2	0～1	0～1	0～3	0～3	0～3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0～5	0～5	13～18	0～5	0～5	0～5
FeO	0～3	35～40	3～21	3～20	0～5	5～15
MgO	38～42	5～7	0～13	17～31	20～25	12～20
CaO	0～2	0～2	0～2	0～3	10～15	10～13

出典：「アスベストの鉱物学」労働衛生 神山憲彦

2) 主なアスベスト含有建材のアスベスト含有率

主なアスベスト含有建材のアスベスト含有率を表-1.9 に示す。

表-1.9 アスベスト含有建材中のアスベスト含有率

アスベスト含有建材名	アスベスト含有率(重量%)
スレート波板	5～20
住宅屋根用化粧スレート	5～20
スレートボード	10～30
珪酸カルシウム板第一種	5～25
スラグせっこう板	5
窯業系サイディング	5～15
押出成形セメント板	5～25

出典：(社)日本石綿協会

一つの建材で含有率に幅があるのは、“年代による変遷”である。建材中のアスベスト含有率は、おおむね古い年代の物ほど多く、近年は少なくなってきた。 (社) 日本石綿協会の資料は昭和46年(1971年)からあるがその間でも含有率は変化をしている。高価であったため添加量を低減させる為に、解綿技術や代替繊維の研究開発がなされた。一方で、アスベストによる肺がん等の健康被害が問題となり、労働安全衛生法等によるアスベストの使用が規制され、アスベスト含有建材中のアスベスト含有量(含有率)の低下に拍車がかかった。アスベストの使用規制は昭和50年の5%規制、平成7年の1%規制、そして平成16年の製造禁止がある。

### 3) 主なアスベスト含有建材のアスベスト以外の構成原料

アスベスト含有建材ごとの主要構成材料を以下に示す。また、製造各社は法規制以前からパルプ繊維等をアスベストと混合し製造しており、混入されている可能性のある繊維もあわせて示す。

#### A) スレート波板およびC)スレートボード

主要構成材料はセメントと石綿である。硝子繊維(主成分は二酸化珪素( $\text{SiO}_2$ ))やパルプ繊維も混合して使用されている。更にオートクレーブ処理にも耐えられるビニロン繊維(ポリビニールアルコール系合成繊維の総称)やポリプロピレン繊維(プロピレンの重合体)が登場し、使用目的によっては、これらも混入されている。

#### B) 住宅屋根用化粧スレート

主要構成原料は「基材」と「(表面)化粧層」に大別される。基材はセメント、石綿、珪砂、(表面)化粧層はセメント、珪砂、アクリル樹脂。更にパルプ繊維やポリプロピレン繊維も使用された。

#### D) 珪酸カルシウム板

主要構成材料は、珪酸カルシウム、石綿、有機繊維。アスベストの代替として、パルプ繊維が使用されたものもある。

#### E) スラグ石膏板

主要構成材料は、二水石膏、スラグ、石綿。基本的には、石綿(1~5%)の他に硝子繊維等を併用して使用してきた。その他パルプ繊維等有機質繊維も使用された。

#### F) セメント押出成形板

主要構成材料はセメント、石綿、珪砂。パルプ繊維やポリプロピレン繊維も使用された。

#### 4) セメント原料としてのアスベスト含有建材の可能性

上記で判明した材料がセメント原料として利用した場合に考えられる影響を以下の表-1.10 に示す。

表-1.10 セメント原料としての影響

材料名	問題点
セメント	セメント製造原料の一部としても化学成分として問題は無いと考える。
珪酸カルシウム	SiO <sub>2</sub> と CaO の化合物であり、セメント製造原料の一部としても化学成分として問題は無いと考える。
二水石膏	化学組成は CaSO <sub>4</sub> ・2H <sub>2</sub> O で、セメント原料として悪影響が懸念される化学成分の「三酸化硫黄」に関わる物質と考える。
アスベスト	アスベスト含有建材中の MgO 等の量も建材の種類、年代及び用途によりバラツキがあることを考慮しなくてはならないと考える。
珪砂	主として SiO <sub>2</sub> 。セメント製造原料の一部として化学成分として問題は無いと考える。
スラグ	炉で金属を融解するときに生成される人工的な混合物で、化学成分は主として SiO <sub>2</sub> であり、セメント製造原料の一部としても化学成分として問題は無いと考える。
有機繊維	アクリル樹脂、パルプ繊維、ビニロン繊維、ポリプロピレン繊維等有機質は、アスベスト含有建材の無害化時の加熱処理によりガス化するものと考える。
硝子繊維	SiO <sub>2</sub> が主成分であり、セメント製造原料の一部としても化学成分として問題は無いと考える。

### ①-c) アスベスト無害化物のセメント原料への転換技術

処理物は、以下の2パターンでの資源化を想定した。

- ・ 処理物を粉砕し、そのまま成分を調合することでセメントもしくはフィラーとする。
- ・ 処理物をセメント工場に搬入し、セメント原料とする。

前者では、セメント化は不可能であることがわかった。含まれる化学成分としては、非常にセメントに近い成分であるが、セメントとして利用するには1,450℃で焼結体を作る必要がある為である。また、フィラーとするには、現状、例えば「コンクリート用フライアッシュ；JIS A 6201」などのようなフィラーとしての規格が存在しない。早期事業化の目的にそぐわない。

後者では、処理物に含有される成分の組成比が判明すれば、セメント工場に受け入れてもらえることがわかった。この場合、処理物はその他原料と一緒にセメントキルンにて焼成され、クリンカーとなる。これを用いたセメントが、例えば「ポルトランドセメント；JIS R 5210」の品質に適合すれば良い。

セメントの主な原料は、石灰石、粘土、珪石、酸化鉄原料である。最近では、多くの廃棄物・副産物（高炉スラグ、石炭灰、汚泥、建設発生土、非鉄鉱滓等）を熱エネルギーや原料の代替として活用している。原料代替として使用するものは、その成分を有効活用できるように混合している。アスベスト無害化物は、この原料・粉砕工程で現在使用されている各種廃棄物・副産物と同様、もしくはそれ以上に有効利用できる可能性が高い。セメント原料として利用するにあたり、アスベスト含有建材6種を無害化処理したサンプルの化学成分含有率を分析した。結果を表-1.11に示す。

表-1.11 無害化物の化学成分分析結果

建材の種類	化学成分(%)								R <sub>2</sub> O %	Cl %
	ig-los s	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TS	total		
スレート波板	6.9	24.9	6.0	4.0	49.9	4.9	2.2	99.8	0.45	0.078
住宅屋根用化粧スレート	1.0	55.5	5.7	3.7	23.7	7.5	0.9	99.7	0.99	0.026
スレートボード	4.2	26.1	5.4	2.9	47.5	8.3	4.0	99.8	0.46	0.145
珪酸カルシウム板	1.0	49.8	3.7	3.6	38.9	1.7	0.4	99.8	0.24	0.010
スラグ石膏板	3.5	24.7	8.1	2.2	37.1	5.8	16.8	99.9	0.63	0.042
押出成形セメント板	2.2	47.0	4.8	2.7	35.0	6.8	0.4	99.9	0.47	0.024
比較:普通ポルトランドセメント	-	20 ~ 23	3.8 ~ 5.8	2.5 ~ 3.6	63 ~ 65	<5	<3.5	-	<0.75	<0.035

黄色抜きした MgO と TS、Cl が普通ポルトランドセメントに比べて含有率が高い傾向にある。

青抜きした SiO<sub>2</sub> は建材によってばらつきが大きい。特に市場占有率の高いスレート波板と住宅屋根用化粧スレートにおける含有量の差は、調整する必要がある。均一な成分を求めるセメント工場に日々、成分が変動してしまっは受け入れてもらえない。

スラグ石膏板にふくまれる「石膏」は、セメント材料として添加するものではあるが、キルンの後で添加するのが一般的なプロセスである。よって、石膏含有建材は、別途取り扱う必要がある。

以上より、アスベスト含有建材は 11 種類存在し、そのどれもが原料として問題はないが、建材の種類により成分にバラつきがある為、受け入れ時、もしくはそれ以前において、ある程度の分別が必要であることがわかった。

仮にアスベスト含有建材全てを供給した場合におけるアスベスト含有建材ごとのセメント原料 1t 当たり混ぜることのできる量を計算した結果を表-1.12 に示す。ただし、アスベスト含有建材を 1 種類ごとに特定して供給した場合、供給できる量は大きく変化する。特に、スラグ石膏板にふくまれる「石膏」は、セメント材料として添加するものではあるが、キルンの後で添加するのが一般的なプロセスである。よって、石膏入りアスベスト含有建材は、別途取り扱う必要がある。

表-1.12 各アスベスト含有建材の供給量

建材の種類	各建材原単位 (kg/t)
A スレート波板	20
B 住宅屋根用化粧スレート	30
C スレートボード	10
D 珪酸カルシウム板	100
E スラグ石膏板	1
F 押出成形セメント板	30

ビジネス化において対象とするアスベスト含有建材の出所は大きく 2 種類に大別される。一戸建ての解体ないしリフォームか、主に工場などからである。まずは、その出所に応じて分別回収し、かつその中でも市場占有率の高い住宅屋根用化粧スレートおよびスレート波板とそれ以外のアスベスト含有建材に大別して受入れる。ただし、受入品目としてスラグ石膏板は除外する。そうすることで、万が一に石膏が混入した際にも、石膏含有率をセメントキルン前で許容されている割合に抑えることが可能である。これらは目視でも識別しやすいというメリットもある。

無害化処理工場におけるアスベスト含有建材の受入においては、ストックヤードを上記種類ごとに設け、分別して受入れる。

無害化されたアスベスト含有建材をセメントメーカーに引き渡すまでは、SiO<sub>2</sub>の含有量および市場占有率の大きい住宅屋根用化粧スレートと、それ以外の建材にストックヤードを分け、保管する。こうすることで、市場占有率の高い 2 種類のアスベスト含有建材に関しては、セメント原料として求められる均一な成分比を許容誤差の範囲内に担保する。

#### ①-d) アスベスト無害化物の無害性評価

アスベストがアスベストで無くなる温度は、例えばクリソタイルであれば最大でも 850°C といわれていた。今回、過熱蒸気を用いた処理物も、この熱処理物に該当する。事業化にあたって必要な安全面での確認事項として、無害性評価を実施した。

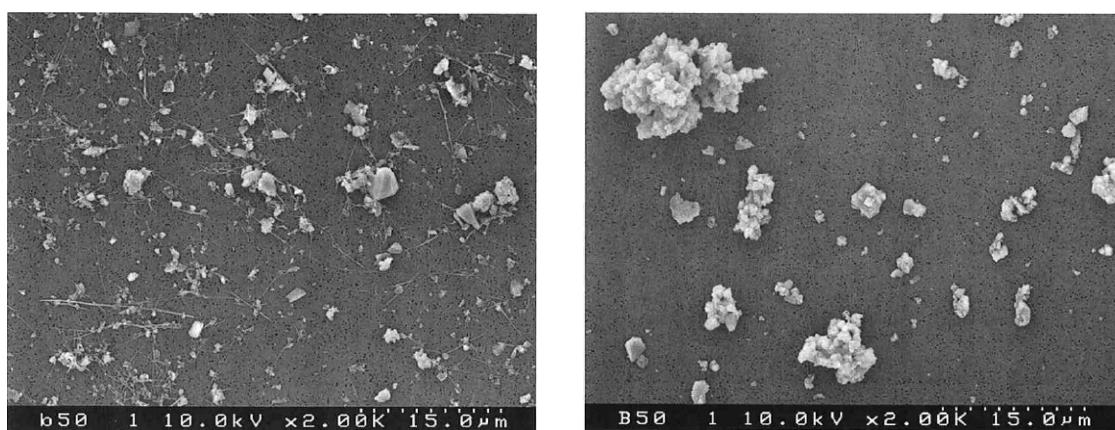
##### 1) 物理化学的特性試験の実施

無害化処理したアスベスト含有建材の粒子の凝集性を確認するために、蒸留水に懸濁させたアスベスト無害化処理物質を、走査型電子顕微鏡で観察した。

対象サンプルは、スレート波板、住宅屋根用化粧スレート、珪酸カルシウム板、スラグ石膏板の未処理物、処理物の 8 種類とした。対象サンプルの蒸留水懸濁液をメンブランフィルター上に回収し、白金コーティングして走査型電子顕微鏡で観察した。

スレート波板、住宅屋根用化粧スレート、珪酸カルシウム板、スラグ石膏板の処理物に関しては、10  $\mu\text{m}$  以上の凝集体は、ほとんどなく、吸入に可能なレベルであると思われた。また、スレート波板、住宅屋根用化粧スレート、珪酸カルシウム板、スラグ石膏板の未処理物に関しては、繊維状物質が認められたが、各々の処理物において、繊維状物質の存在は認められなかった。

図-1.18 に住宅屋根化粧スレートの処理前後の走査型電子顕微鏡の画像を示す。



住宅屋根化粧スレート 未処理物

住宅屋根化粧スレート 処理物

図-1.18 走査型電子顕微鏡画像

##### 2) 試験管内試験

無害化試験を実施する 4 種類の建材を選択して、無害化する前のアスベスト含有建材と無害化後のアスベスト含有建材について、培養した細胞を用いて細胞毒性解析を行った。使用した細胞は、II 型肺胞上皮細胞のセルラインである A549 細胞を用いた。フラスコ (75cm<sup>2</sup>) で培養した A549 細胞をトリプシン処理にて回収し、0.5% fetal calf serum (FCS) (牛胎児血清) を含む Dulbecco's Modified Eagle Medium (D-MEM) 溶液に  $2.5 \times 10^5$ /ml になるように調整した。この A549 細胞浮遊液を、2ml ずつ 6 穴の細胞培養プレートに加え、 $5.0 \times 10^5$ /well に調整し、CO<sub>2</sub> インキュベーターにて一晩培養した。翌日、上清を取り除き、無害化対象建材である 4 試料を、0.5%FCS を含む D-MEM 溶液に懸濁させ、最終濃度 25  $\mu\text{g}$ 、50  $\mu\text{g}$ 、100  $\mu\text{g}$ /well として A549 細胞に曝露した。また、4 試料の各々未処理サンプルも、最終濃度 50  $\mu\text{g}$ /well にて曝露した。CO<sub>2</sub> インキュベーターにて 18 時間培養した後、上清を回収し、-40°C で凍結保存した。培養上清中の TNF 濃度の測定には、Human TNF- $\alpha$  用の ELISA を用いた。

スレート波板、住宅屋根用化粧スレート、珪酸カルシウム板、スラグ石膏板の処理物、未処理物及びクリソタイルは、A549細胞における明かなTNF産生亢進作用は示していなかった。肺上皮細胞は、様々な炎症に係わるサイトカインなどを産生しているため、TNF以外のサイトカインなどに刺激をしていることが考えられる。そこで、無害化試験を実施する4種類の建材を選択して、無害化処理前後について培養した細胞を用いて細胞毒性解析を行うことを目的に、IL-8とH0-1濃度等を測定した。

IL-8とH0-1は陽性対照と陰性対照で産生に差があり細胞毒性を評価するに適していると思われる。アスベスト無害化処理物質は、いずれのマーカーにおいても陰性対照と同じようなレベルであり、細胞毒性を示していなかった。しかし、IL-8が試験管内試験で有害性の有用なスクリーニングとして使用されており、この産生量が、4種類の建材において一番高い値を示したスラグ石膏板を気管内注入の候補サンプルとして決定した。

### 3) 気管内注入試験

アスベスト無害化処理物をラットに気管内注入し、3日、1週間、1ヵ月、3ヵ月後に肺の病理、肺障害マーカーの発現検討を行った。

- i) 肺炎症におけるアスベスト無害化処理物質と処理前物質の比較では、試験の急性期において処理前物質は、アスベストと同様な炎症を示した。一方、処理後物質は、陰性対照物質よりは炎症を亢進していたが、処理前物質より低下していた。試験の慢性期においては、両者とも徐々に低下していき、陰性対照と同等のレベルまで低下した。
- ii) 肺の線維化に関しては、本試験期間においてアスベスト処理前後物質で有意な線維化形成を認めなかった。
- iii) 肺障害のマーカーであるH0-1遺伝子発現に関しては、アスベスト処理前後物質とも持続的発現を認め、程度は不明であるが、有害性を有することが示唆された。ただし、アスベスト含有建材に含有されるアスベスト以外の成分が関与していたとしても、このマーカーでは判断できない。

図-1.19に注入後の観察期間別肺炎症スコアを示す。今回の反応はあくまで急性期の反応であり、中皮腫のようなアスベストの健康影響を評価する場合、1年や2年後などの慢性期の影響を検討する必要がある。

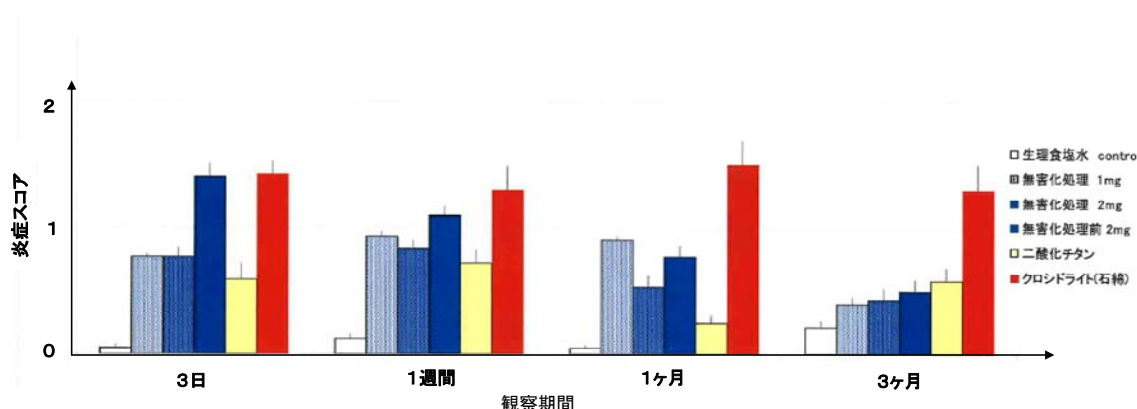


図-1.19 注入後観察期間別肺炎症スコア

(2) アスベストの大量・無害化処理技術と資源化に関する研究

②-a) 連続運転による装置の最適化および実機の検討

1) 連続式パイロット装置の検討

バッチ式パイロット装置での実験結果を踏まえ、図-2.1 に示す連続式パイロット装置を設計した。装置は、予熱エリア、無害化処理エリア、徐熱エリアに分かれている。アスベスト含有建材は専用容器に投入し、台車に乗せて移動する。エリア間の移動は油圧シリンダーでの押し込み形式とした。無害化処理炉は 2 階部分にあり、ジャッキアップし炉内に専用容器を投入する方式とした。

予熱エリアで 600℃まで加熱されたアスベスト含有建材は、無害化処理エリアで過熱蒸気雰囲気内でさらに加熱する。所定の温度に達したのち、降下し徐熱炉で自然冷却される。

本装置にて、8 時間連続実験を実施し、1 バッチあたり約 1 時間で無害化処理できることを確認した。

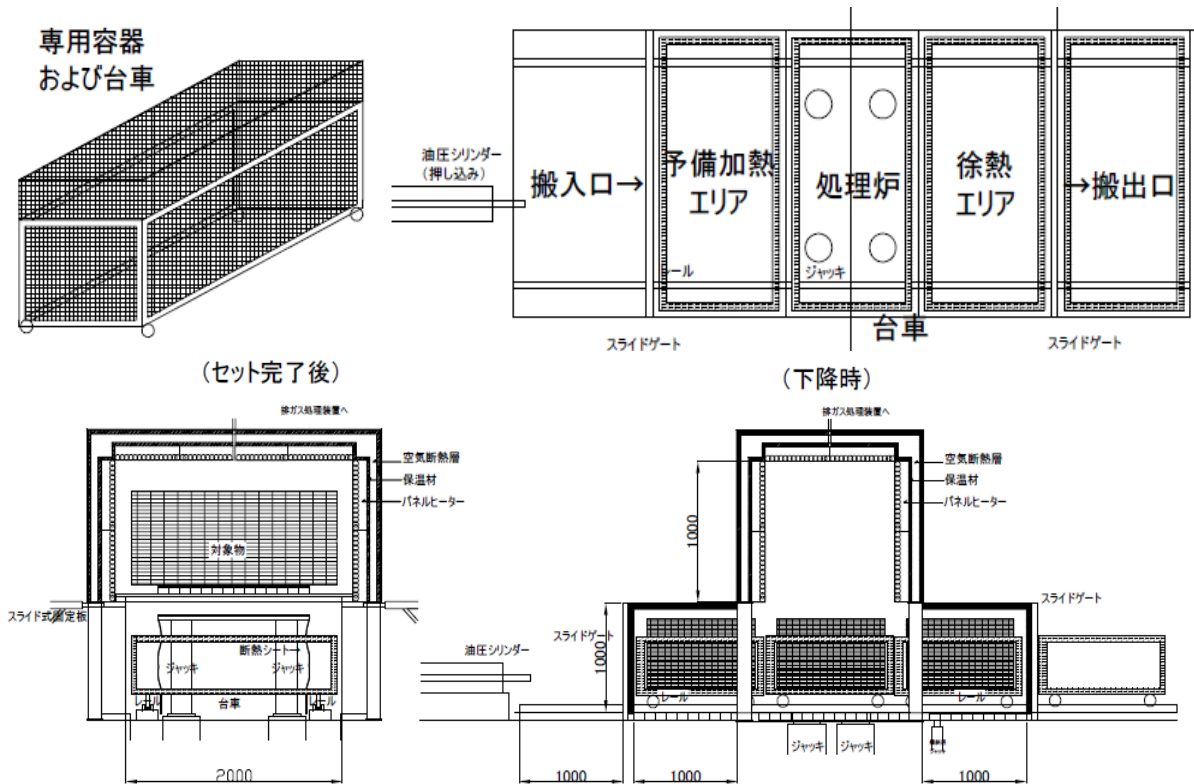


図-2.1 連続式パイロット装置



## 2) 材料投入方法の検討

### i) アスベスト含有建材の解体回収方法の検討

実機を検討するにあたり、建設現場、解体業者等からヒアリングを行い、解体材の搬入荷姿についての確認をおこなった。現状では、外壁の解体は手ばらしで行い、ボードの形状のままトラックに積み込み、全体をシートで覆って搬出している。一方、天井ボード、住宅屋根化粧スレートは機械等で細かく解体され二重ビニール袋に入れて搬出されている。そのため、この2タイプの荷姿に対応できる材料投入方式を検討する必要があることがわかった。当初、環境省の指導にしたがって、「可能な限り破砕しないで」解体した場合、25kg/枚のアスベスト含有建材を2～3枚毎にシートに包んで回収する方法が適切と思われた。そのため、シート毎、ラインに乗せる前提で検討を進めた。しかし、実験のためにアスベスト含有建材を回収したところ、「可能な限り破砕しないで」解体しても一般的に建材は荒破砕されることが判明した。



写真-2.1 建材の回収の状況（出典：関東建廃協）

### ii) 1バッチ分の収納容器の検討

これに関しては、解体現場からいかに効率的に無害化工場に運搬し、無害化ラインに載せるかの検討をする目的であった。しかしながら、i)と同様に、丁寧に解体しても荒破砕されることがわかったので、そのままトラックに現場に混合搭載し、無害化工場でストックして、処理量ごとにバケットに載せる方法が適切と考えられる。そのために、エキスパンドメタル等で作成したバケットに投入して、ラインに載せる方法が適切と考えられる。

### iii) 収納容器ごとに冷却する方法の検討

バケット毎に処理ラインに乗せ、950℃までの昇温に1時間、無害化処理に1時間、冷却に1時間を考えている。冷却後300℃程度まで冷却されてから、破砕して(40mmアンダー)ストックすると計画していた。連続実験の結果、下記2点が観察された。

- ・ 無害化後1時間経過すると約300℃程度までアスベスト無害化建材の温度が低下している。
- ・ 無害化し、冷却後のアスベスト無害化建材は、多少力を加えるだけで小破砕できる。

以上により、無害化ラインで無害化された後に、バルコン(搬送機)のまま水冷の筒状冷却機を通過すれば300℃程度まで温度を下げる事が可能である。

### 3) 実機の構成の検討

#### i) 加熱炉に用いる電源の検討及び経済性、耐久性の検討

現在試験で用いている電気パネルヒーターは、高温でかつ過熱蒸気雰囲気耐えるものを選定した。しかし、過熱蒸気雰囲気での長期運転における実績がなく、保守維持費用にかかる費用が想定の域を超えない。一方、適当な加熱源の調査検討を進めた結果、ラジアントチューブバーナーによる加熱が経済的に効果を得られる可能性が高く、また実績が多いことが判明した。ラジアントチューブ方式とは、炉内に直接バーナーを吹き込んで加熱するのではなく、特殊な鋼管の内部をバーナー等で加熱することによる間接過熱方式である。そのため、メンテナンス方法は鋼管を交換するだけで良いため、保守維持費用も安く抑えることができる。この熱源は、中圧の都市ガスを検討している。

#### ii) 実機の検討

連続式パイロット規模装置での試験結果から、実機が連続式パイロット規模装置を6台並べて30t/日処理するシステムか、更に6倍にスケールアップした加熱炉一つでの処理、または連続炉が適当かを検討した。

本開発の検討結果として、図-2.2 に示すバッチ式加熱炉を計画した。実機をバッチ式とした理由は、アスベストは6種類あり、処理温度が変わる可能性がある事、装置の故障の際に大型の加熱炉ではラインがすべて止まってしまう可能性があるからである。30t/日の処理のために、連続実験の結果から可能な設計として、5t/日の加熱炉を6基設置する必要がある。実施段階においては、連続処理とバッチ式処理のどちらが有利か、コスト及び処理能力の観点を含めて再度、検討する必要がある。

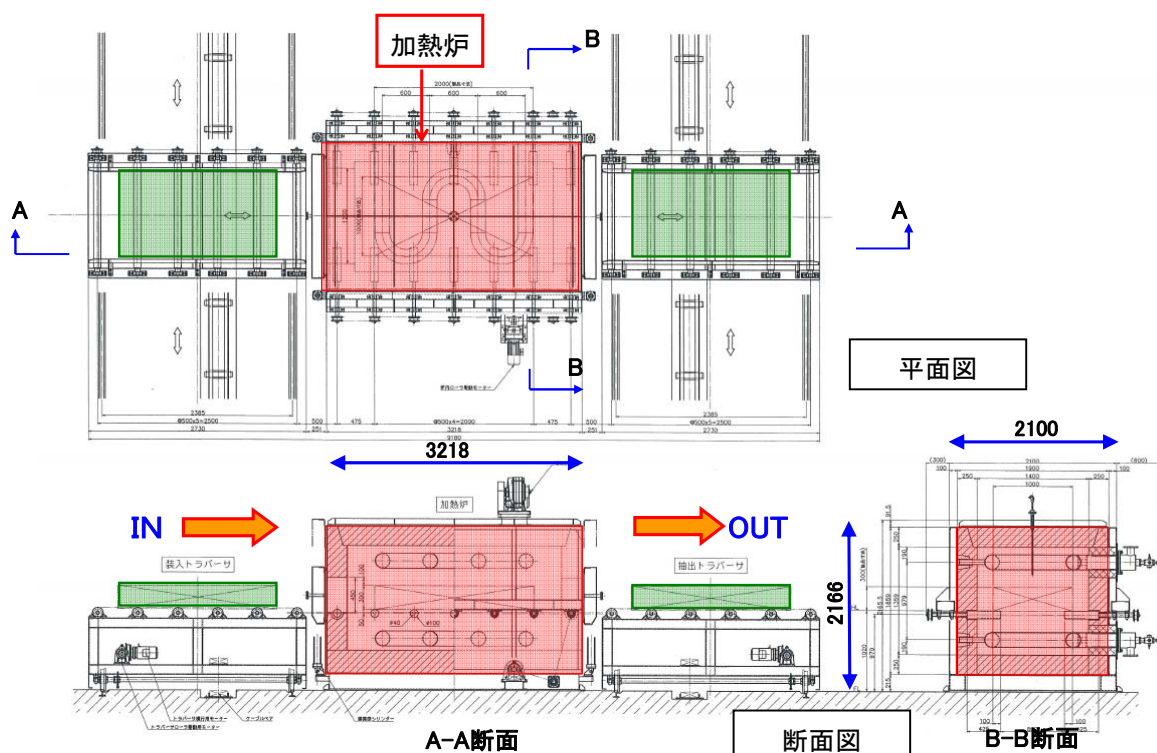


図-2.2 バッチ式加熱炉

## ②-b) アスベスト無害化物による大量セメント生産プロセスの開発

### 1) 破砕装置の検討

セメントメーカーとの検討の結果、無害化されたアスベスト含有建材を、全国どこのセメント工場でも、搬入してセメント生産プロセスにのせるためには40mmアンダーの大きさまで粉砕することが望ましいことがわかった。また、粉砕は無害化後を想定しているためアスベストの飛散に関しては問題ないが、破砕時に発生する粉塵、運搬時の粉塵の飛散対策が必要である。

アスベスト含有建材は、一度950℃まで加熱され、その後常温まで冷却されてセメントメーカーに運ばれる。その運搬前に、破砕する必要があるが、加熱された後のアスベスト無害化処理物は非常に脆く、高温状態で急速冷却すると簡易に粗粉砕される可能性があることがわかった。

写真-2.2が破砕装置による実験状況で、図-2.3が破砕粒度分布である。本実験により15枚束の同時破砕を行い、40mmアンダーに破砕できることを確認した。



写真-2.2 破砕装置による実験状況

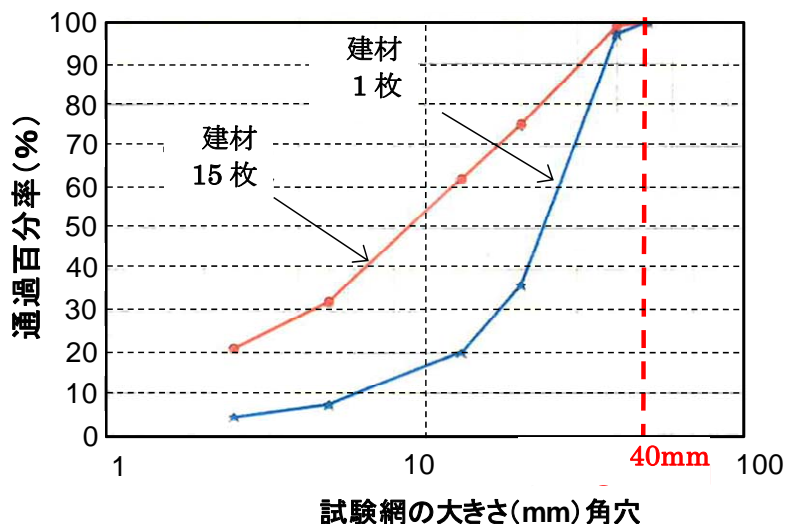


図-2.3 破砕粒度分布

## 2) 加熱炉から出た建材の冷却方法、貯蔵方法と運搬方法

### i) 冷却方法について

加熱炉から外に出た直後のアスベスト含有建材は、900℃近い高温であり自然冷却に任せると、次のサイクルの1時間では自然冷却では400～500℃までしか温度低下が見込めない。したがって、平成20年度の課題であった冷却方式は以下のように検討した。水冷を採用すると、加熱で生じたCaOとH<sub>2</sub>Oの反応が生じると排水の処理が必要になるので、これを防ぐために水冷は採用しない。加熱炉からゲートを開けて外のトラバーサに出した。

無害化されたアスベスト含有建材は下部から冷却空気を当てて冷却する。この方法で、次のサイクルの間に、建材の温度は約300℃まで低下すると考えられる。したがって、貯蔵庫の前に設置する破碎装置における冷冷却は考慮しない。

破碎装置については処理量200kg/hの加熱炉が20基設置された場合でも、全体の処理量は4,000kg/hなので、破碎器は1台で能力的に充分である。写真2-2に示すタイプの破碎器を据え付ける。

### ii) 分別貯蔵について

アスベスト含有建材は11種類存在するが、その内、スラグ石膏板は成分に含まれる石膏の存在がセメント化に悪影響があるのと、建材全体に占めるシェアも少ないので、本研究開発では除外している。残りの、住宅屋根用化粧スレート（成分CaOが25%）、スレート波板（成分CaOが50%）、それ以外のスレート系の建材（成分CaOが約50%）の大きく3種類に分けて貯蔵することが望ましいと考える。これは、セメント化とセメント化以外の再利用方法を考えた場合に、成分比で近いものをまとめた方が良いからである。

### iii) セメント化を考えた場合の運搬方法について

ここで述べる運搬とは、「無害化工場」から、セメントメーカーの工場までの無害化建材への運搬方法についてである。先に述べたように、加熱して無害化したアスベスト含有建材に、水噴霧して冷却すると建材が発熱して固化するおそれがあるので、水噴霧すべきでない。したがって、破碎器で40mm以下に破碎された無害化建材は、密閉式の運搬車でセメントメーカーの工場に運搬する。この運搬される建材は、環境省の規定する「無害化物」であって、アスベスト含有物ではないので、粉じんが飛散しない対策を取れば良い。

### 3) セメント原料化

平成 21 年の 12 月の 8 時間連続実験で無害化処理した「住宅屋根用化粧スレート」、「スレート波板」を原料の一部として利用したセメントを実験室で製造し、JIS R 5201 及び JIS R 5202 に基づく試験を実施した。作業工程と使用した装置を表-2.1 に示す。セメントの製造は高知県工業試験センターの装置を使用した。JIS に準拠した試験を実施するために約 10kg のセメントを必要としたので、材料の原料の減損を考慮して試薬、建材は合計で 15kg 分準備した。セメント原料への建材混合量は混合比率 10%とした。建材以外の原料は、試薬を使用した。Ca(OH)<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Ca<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O である。写真-2.3 にセメント製造の状況写真を示す。

表-2.1 作業工程と装置

No.	作業名	作業内容	装置名
①	粗粉碎	アスベスト無害化物を 2mm 以下に粗粉碎する	ジョークラッシャー
②	混合・微粉碎	材料を計量・混合し 90 μm 以下に粉碎する	遊星型ボールミル (250rpm で 30 分間)
③	造粒 乾燥	焼成し易いように造粒し、乾燥炉で乾燥する	パン型造粒機 乾燥炉 (110°C、24 時間)
④	焼成	加熱炉で 1400°Cまで加熱する	電気加熱炉 (1400°Cで 60 分保持)
⑤	粗粉碎	クリンカーを 2mm 以下に粗粉碎する	ジョークラッシャー
⑥	混合・微粉碎	石膏を加えて混合し、微粉碎する	遊星型ボールミル (250rpm で 30 分間)

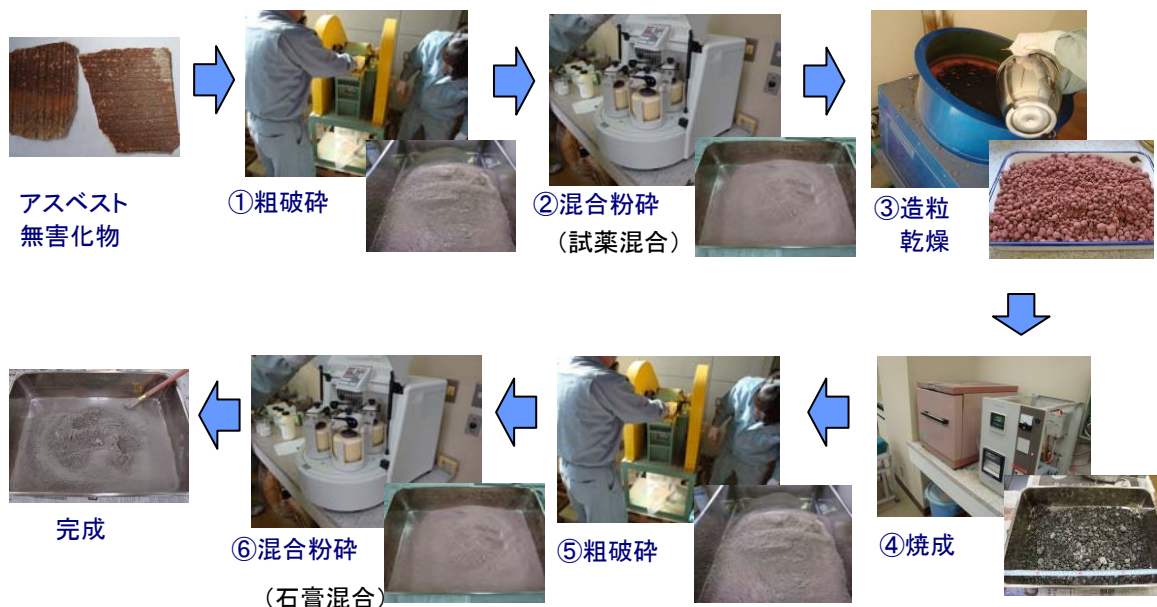


写真-2.3 作業状況写真



焼成したクリンカーのX線回折解析を行い組成鉱物の確認を行った（図-2.4 参照）。同解析は、高知県工業技術センターで実施した。また、製造した「住宅屋根化粧スレート」と「スレート波板」の化学成分分析を行った（表-2.2 参照）。結果として、製造されたセメントは、JIS 基準と比較して規格値内であることがわかる。さらに、「スレート波板」含有セメントについては、物理試験を実施した（表-2.3 参照）。比表面積、凝結、安定性、圧縮強度に関して、いずれも JIS 基準を満たす値となっていることがわかった。この JIS に基づく試験は、（財）建材試験センターに依頼した。

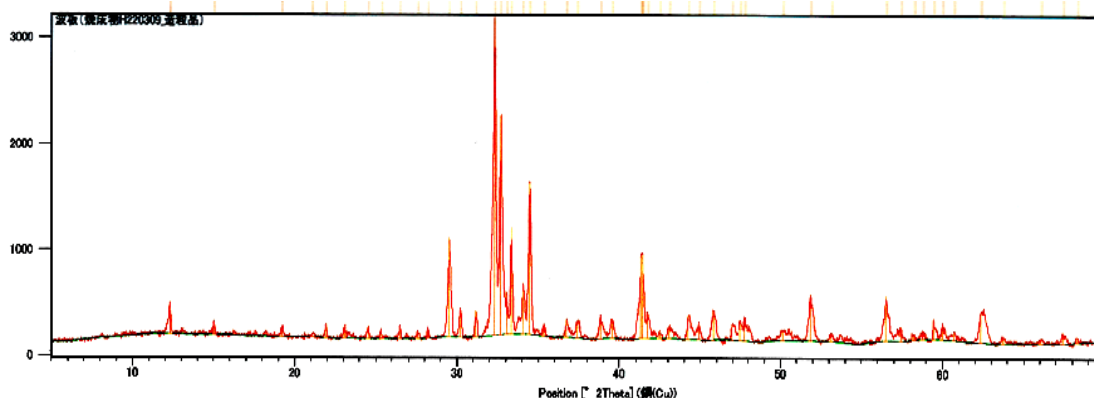


図-2.4 焼成物のX線回折測定

表-2.2 化学成分分析結果

セメントの種類	強熱減量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl
スレート波板含有セメント	0.92	21.9	5.56	2.88	65.2	2.05	1.82	0.021
住宅屋根化粧スレート含有セメント	0.93	21.8	5.49	2.67	65.5	1.99	1.64	0.021
JIS基準	<3	20 ~ 23	3.8~5.8	2.5~3.6	63~65	<5	<3.5	<0.035

表-2.3 物理試験結果

セメントの種類	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	安定性 試験	凝結		圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>		
				始発 min	終結 h	3日	7日	28日
スレート波板含有セメント	3.19	4000	良	146	3.1	37.7	48.8	66.2
JIS基準	—	2500 以上	良	60 以上	10 以下	12.5 以上	22.5 以上	42.5 以上

#### 4) 大量生産プロセス

セメント原料の大量生産プロセスにおいて、以下のような課題が明らかになった。

- ・ 無害化工場に搬入されたアスベスト含有建材の種類、成分を明らかにしてストックしておくこと。  
セメント工場における必要成分から、処理工場に受け入れた建材を種類ごとに仕分けして時系列で処理できる仕組みとする。
- ・ ストックされているアスベスト含有建材を無害化装置に連続的に投入する方法。  
ストックヤードから10~15枚単位で、処理炉への搬送装置に載せられるよう分別する。また、回収時点からそのような仕分けができる仕組みの検討が必要。
- ・ 無害化が完了した無害化建材を冷却する方法。  
空冷で300℃まで一気に冷却する。
- ・ 冷却された無害化建材を破砕し、種類ごとに分別し、搬出するために分別すること。  
破砕後、建材の種類ごとに材料ビンにベルコンで投入し、時系列でストック、搬出する。

図-2.5 に実機でのアスベスト無害化施設の処理プロセス検討図を示す。

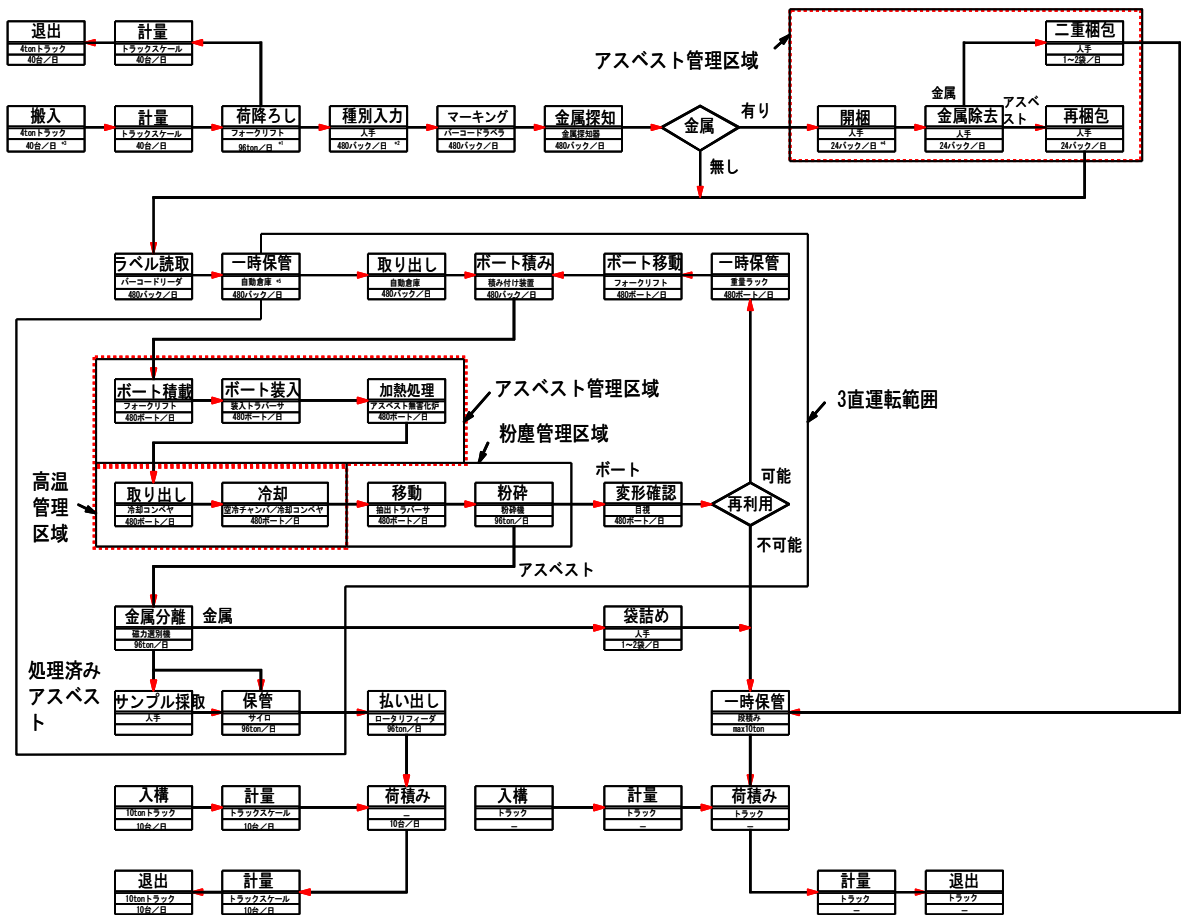


図-2.5 処理プロセス

### (3) 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

#### 1) コスト低減の検討

アスベスト含有建材（レベル3）は、通常の廃棄物と同様に、安定型処分場に埋め立てることが許可されているため、産廃処理会社等にヒアリングするなど、アスベスト含有建材の保存先、保存量等を調査した。

##### i) 埋め立て処理コストの調査

研究開発当初に調査した際は、アスベスト含有建材の収集運搬費は平均的に1万円/t程度、最終処分場に持ち込む費用で4~5万円/t程度であった。しかし、昨今の不況の影響により建物の解体処分が減少し、処分費用は減少傾向にある。地域によっても差があるが、特に、準公共的埋立処分場がある地域は費用が安い傾向がある。

無害化処理事業では、処理単価5~8万円/t程度での事業化を検討しているが、事業化のスタートに当たって競争力を失わないように、工場の規模、アスベスト含有建材の収集方法等コスト削減を検討する必要がある。

##### ii) 建材量の調査

アスベスト含有建材の年間排出量について、レベル3の建材はストックが4,000万トンで、年間100万トン排出されると言われているが、実態調査は行われておらず、実際の排出量は明確になっていない。日本石綿協会の調査では、地方自治体で1年間の排出量を把握している地域は3地域のみで合計排出量は3,754t/年であった。一般戸建て住宅のような小規模な建物では分別解体が進んでいない場合が多いと想定される。

尚、解体数量はある程度明確なレベル1の吹付けアスベストに関しては、レベル3と同様の扱いが可能であるが、加熱炉のラインをレベル3と別にすることが必要であり、初期コスト増加の要因になるわりに、利益増大の要因にはならないことが判明したので、ビジネススタート時には取り扱わないこととした。レベル1の場合、加熱炉中で飛散する可能性が大きく、作業員、工場の安全性担保の観点からも当面、問題があると判断した。

##### iii) 工場用地の検討

無害化した建材を搬入する予定のセメントメーカーのある川崎市、神奈川県、埼玉県、千葉県等において工場用地を探した。

第一工場として処理能力が年間22,500tの工場を計画しているが、それに適合する工場の用地は以下の条件が必要である。

- ・ 工業専用地域であること。
- ・ 工業用地を管理する自治体（あるいは民間）の条件に合うこと。
- ・ 高速道路のインターに近いことが望ましい。
- ・ 1,500坪程度の広さであること。

以上の条件で工場用地を探すと、まず管理者から「製造業であること」という条件を提示されるのが一般的であった。契約としては長期の契約が前提であった。候補地を決定する際には、この二つの条件がネックとなる。



#### iv) 環境アセスメントの検討

環境省の「個別認定」を取得するには、申請を提出するまでに 4 シーズンの環境アセスメントを終えている必要がある。環境アセスメントを実施するには約 2,000 万円の費用を必要とする。環境アセスメント実施するには、工場用地の取得あるいは特定が必須である。これらの費用を支出するには経営母体として、「ビジネス化可能である」との企業判断が必要である。

環境省の「個別認定」を得るために前提条件を明らかにし、来年度以降、土地の特定→環境アセスメントの実施→個別認定の申請、という手順を進める予定である。

#### v) セメントメーカーとの無害化物引き取りの検討

セメントメーカーなどと検討会を持ち、無害化物の引き取りに関して意見交換を行った。その結果、各メーカーとも現在引取っている汚染土壌の引き取り価格と同等で受け取ることが可能であるとの見解であった。ただし、引き取るには、アスベストが確実に無害化されていることが証明されることが必要であるとのことである。また、一部のメーカーで当面は引き取れないとの見解もあった。

昨今の建設需要低迷によるセメント使用量の減少により、引き取り価格は値上がり傾向にあり、今後の無害化処理のコスト低減を考えると、セメント原料以外に建材を再利用する（有償譲渡）等の用途開発が必要である。

## 2) アスベストの削減効果と波及効果の検討

環境省、東京都、神奈川県、川崎市、埼玉県等の関連団体、熔融無害化工場、最終処分場等にヒアリング調査をするなど、アスベスト含有建材の保存先、保存量の把握、今後の動向等を調査した。これにより、以下のことがわかった。

- ・ 非飛散性アスベスト含有建材は現在、安定型処分場で処分されているが、処分場の不足（産業廃棄物の最終処分場の残余年数は平成 16 年度予測では全国であと 7.4 年、首都圏に至ってはあと 3.4 年。出所；環境省発表資料）予測もあり、また、安定型、管理型ともに今後の建設が危ぶまれている。そのため、将来的に無害化が望まれている。
- ・ 飛散性アスベストは減っていく方向にあるが、まだ民間も含めた市場には多く残されており、その処分も含めた無害化処理がのぞまれている。
- ・ 現在、アスベスト含有建材のストックは 4,000 万 t 以上とされているが、昨年の法律改正でこのストック量は倍以上に増えると予想されている。
- ・ 熔融による無害化処理は、高温であるがゆえに装置の耐久性に問題があり、効率が悪い。その為、20 万円／t 近い処理費用がかかると言われている。
- ・ 現状では、高効率、低コストのアスベスト含有建材の無害化処理技術は開発されていない。

### 3) 実機の実用化検討

#### i) 適用建材の検討

わが国に普及していたアスベスト含有建材の 11 種類の内、入手可能なものは 7 種類であるが、それだけでマーケットシェアは 97% 程度になる。さらにその中で、スラグ石膏板は、硫黄分が多いので無害化工場には回収しない方針とした。さらに、残り 6 種類の内、ビジネス化における採算性を重視して、シェアの大きな 4 種類、スレート波板、住宅屋根用化粧スレート、スレートボード、珪酸カルシウム板を対象とすることとした。

#### ii) 建材の回収の検討

回収現場から、どのようにアスベスト含有建材を回収し、安全に運搬し、無害化処理し、再資源化処理するのか、運搬コストも含め検討した。アスベスト含有建材の荷姿は、「破碎されない状態」が前提ではなく、荒く破碎された状態を前提とする。実験の結果は、たとえば、住宅屋根用化粧スレートの場合、破碎されたものを積み上げた状態の建材より、破碎されない住宅屋根用化粧スレートをきれいに積んだものの方が無害化の処理は早かった。

解体現場から回収されたもので、まったく破碎されないアスベスト含有建材ではなく、荒く破碎されたアスベスト含有建材を前提とする。したがって、運搬のトラックの荒く破碎されたアスベスト含有建材を搭載し、飛散防止の措置をとって、工場まで運搬する。

#### iii) 法規制等の検討

法規制動向を調査し、環境アセスメント、住民へのアセスメントを検討し、どのようにして環境省の認定を取得し、実機を実用化するのか、実用化時期も含めて検討した。ビジネスを実施するには環境省の行政判断が大きな鍵を握っているのが現状である。

図-3.1 に、本開発で検討した無害化処理施設の配置計画図を示す。

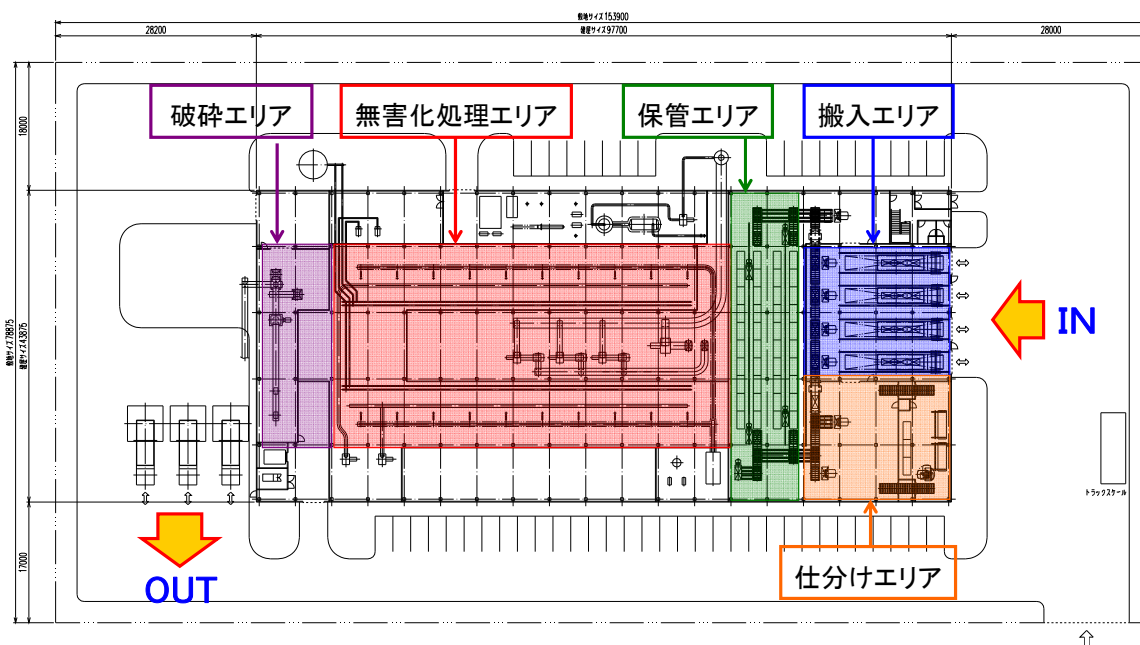


図-3.1 無害化処理施設配置

#### 4) 事業化の枠組み、導入シナリオの検討

##### i) SPC（特別目的会社）設立を中心とする事業の枠組み

実際にビジネス化するに当たって、SPC 設立を含めた事業の枠組みを検討した。当初は、プロジェクトメンバー会社で合同会社を設立し、資金調達を行って、工場設立との構想を検討した。しかしながら、個別認定の見通しの問題から時期尚早との結論に至った。

##### ii) 幅広い業界・業種と連携し、早期に市場占有率を上げられる枠組み

本研究開発では、幅広い業界・業種と連携し、可能な限り早期に市場占有率を上げられる枠組みについて以下の検討をした。

##### ア) アスベスト含有建材回収（IN）の検討

アスベスト含有建材を回収する枠組みを、廃棄物収集運搬会社および中間処理会社の数社と検討した。

アスベスト含有建材の出所は大きく分けて、工場と住宅に大別される。

工場から搬出されるアスベスト含有建材の確保に関しては、工場を解体する解体業者との連携が有効である。工場解体の後、不動産の売買を得て、新たな建物の建設に入るが、解体工事までは売主が責任を持つ場合が多いからである。地域の産業廃棄物共同組合等との連携が不可欠である。

住宅から搬出されるアスベスト含有建材の確保に関しては、ハウスメーカーや建材メーカーとの連携が有効である。住宅解体の場合、大家や不動産屋による建て替え需要に因り、メーカーが解体まで面倒をみる場合が多いからである。

##### イ) 無害化処理物の資源化（OUT）の検討

無害化した建材を引き取るメーカーとの枠組みについて、セメントメーカー等と検討した。

大量に発生する無害化建材を一手に引き受けられるのはセメント工場だけである。セメント原料としては、質・量ともに受入条件を満たしていること確認した。早期の事業化の為には、本成果をもとにセメント原料を前提に事業化を進める必要がある。セメント工場への受入は有償である。

将来的には、更なる処理費低減を目指しており、そのためのセメント原料以外の用途開発が重要となる。

##### ウ) 事業場所の検討

アスベスト含有建材の出所は地域性が強い。特に都市部およびその近郊の工業地域に多い。出所にできるだけ近いほうが、IN 側の運搬コストを抑えることができ、施主の処理費低減に繋がる。しかし、都市部は産業廃棄物処理施設の設置に関して近隣住民の抵抗が強い。

一方、資源化用途に近い場所であることで、OUT 側の運搬コストを抑えることができる。既存事業でアセスメントの終わっている土地が確保できると、早期事業化に繋がる。

全体としてのサイクルは、大量に排出される地域内でできるだけ小さく回すことが理想である。

### iii) 地方自治体、中央官庁を巻き込んだより大きな連携

事業主である企業にとって、初期投資の緩和は大きなメリットがある。2009年度から3年間の期間である地域グリーンニューディール基金の延長、増強が望まれる。また、認可が取れた場合、享受できる利益を適正化するには、競合となる埋め立て、および不適正処理への規制強化を必要と思われる。(認可取得)

今後、排出責任者である施主にとって、処理費用が負担となることは明らかであり、これを緩和するには、国の新たな施策が必要である。現状、アスベスト含有建材の回収が、推定量である100万t/年に達していないと推測できる集計結果が出始めている。今後、本廃棄物の適正処理について議論する必要性は多いにある。(広域処理)

例えば、PCBの広域処理のようなシステムがあると、適切な処理が推進される。アスベスト含有建材は、PCBと比較しても処理量が大きく、多額の税金投入が必要とされることなどを懸念し、積極的なコメントは得られていない。つまり、経済性の伴う無害化処理技術であることが必須である。その上で、アスベスト含有建材の危険性の周知および、それを処理できる新たな安心・安全な技術として本技術が世間一般に広く認められると、広域処理システムの実現可能性が出てくる。

図-3.2に現段階での事業化にむけた導入シナリオの案を示す。

	2009年度		2010年度		2011年度		2012年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
研究開発	パイロット試験 科学的立証実験 TEM確認		装置の安定性・再現性の検討 無害化処理物の再資源化の検討					
			▼ NEDO委託終了					
含有建材の回収 (IN)		回収業者ヒアリング選定			建設会社(排出元)への営業			
処理物の資源化 (OUT)		セメント会社ヒアリング選定			セメント会社との契約交渉		契約	
事業	事業スキーム・ビジネスモデル						一号工場立上げ●	
			事前技術評価				本申請	
			場所の選定	生活環境影響調査	設計	建設		
国内の施策動向					安定型埋立処分場の逼迫			
	飛散性(レベル1・2)の対策				レベル3の対策			
	地域グリーンニューディール基金(3年間)							

図-3.2 導入シナリオ (案)

### 3. 目的に照らした達成状況

#### ①-a) パイロット規模装置による無害化処理条件の決定

##### (1) 無害化処理条件の最適化

- ・ 開発目標：無害化できる処理温度、最適処理時間の決定
- ・ 達成度：処理温度 950℃、最適処理時間 5 分を決定

##### (2) 材料投入・搬出工程・排気工程の最適化

- ・ 開発目標：パイロット規模装置により 8 時間程度の連続運転を 3 回以上行い、最適なトータルシステムを決定
- ・ 達成度：3 回の連続運転により 6 t / 日の処理能力を確認した。

#### ①-b) アスベスト無害化物のセメント材料としての有効性確認

- ・ 開発目標：アスベスト無害化物の品質バラツキを調査し、アスベスト含有建材ごとのセメント材料としての有効性を確認
- ・ 達成度：主なアスベスト含有建材の主要構成材料を調査し、セメント原料に利用した場合の影響を検討し問題ないことを確認した。

#### ①-c) アスベスト無害化物のセメント原料への転換技術

- ・ 開発目標：ポルトランドセメントとしての品質を確保するための要件決定
- ・ 達成度：6 種類のアスベスト無害化物の化学成分を分析し、セメント 1 トン当たりに混入可能な数量を算出した。

#### ①-d) アスベスト無害化物の無害性評価

- ・ 開発目標：無害化判断基準及びその試験評価法の提示と無害化処理物が無害であることの検証
- ・ 達成度：気管内注入試験において、試験の急性期における処理後物質は処理前物質に比べて炎症が低下したことを確認した。

#### ②-a) 連続運転による装置の最適化および実機の検討

- ・ 開発目標：パイロット規模装置により 8 時間程度の連続運転を実施し、その性能の実証確認
- ・ 達成度：8 時間連続運転を実施し、所定の温度に達することを確認し、アスベスト含有建材の無害化についても確認した。

#### ②-b) アスベスト無害化物による大量セメント生産プロセスの開発

- ・ 開発目標：建築基準法 37 条に定める「レディミクストコンクリート」の品質・性能要件の決定
- ・ 達成度：アスベスト無害化物を 10% 混入したセメントを製造し、JIS R 5201 及び JIS R 5202 の試験に適合することを確認した。

#### ③ 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

- ・ 開発目標：導入シナリオとビジネスモデルの策定
- ・ 達成度：アスベスト含有建材の廃棄処分に関する市場調査を実施し、実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルを策定した。

#### 4. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

##### (1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

発表月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007/10/17 ～19	アスベスト対策 環境展 2007	低温過熱蒸気によるアスベスト無害化・ 資源化装置の開発	パネル展 示
2007/11/14	アスベスト対策 ビジネス研究会	低温過熱蒸気によるアスベスト無害化・ 資源化装置の開発	百代 淳一
2008/7/31	京大環境工学シン ポジウム	過熱蒸気によるアスベスト含有建材の無 害化と再資源化	高浪 哲郎
2008/9/10	土木学会第 63 回 年次学術講演会	過熱蒸気を用いたアスベスト 6 種類の非 石綿化実験	稲葉 力
2008/9/19	日本建築学会大会 2008	低温過熱蒸気によるアスベスト無害化・ 再資源化に関する研究開発 その 1, 2	三浦 勇雄 高浪 哲郎
2008/10/8 ～10	アスベスト対策 環境展 2008	過熱蒸気によるアスベスト含有建材の無 害化と再資源化	稲葉 力 三浦 勇雄
2008/11/19	廃棄物学会大会 2008	過熱蒸気を用いたアスベスト無害化技術 の開発	稲葉 力
2009/2/4	第 4 回エコケミカ ルシンポジウム	低温過熱蒸気によるアスベスト無害化と 再資源化装置の開発 パネルディスカッション	高浪 哲郎 千葉 脩
2009/7/31	京大環境工学シン ポジウム	過熱蒸気を用いたアスベスト含有建材無 害化技術の連続実験	稲葉 力
2009/8/26 ～29	日本建築学会大会 2009	低温過熱蒸気によるアスベスト無害化・ 再資源化に関する研究開発 その 3	三浦 勇雄
2009/9/2 ～4	土木学会第 63 回 年次学術講演会	過熱蒸気を用いてアスベスト含有建材を 非石綿化できる境界温度に関する実験 過熱蒸気を用いたアスベスト含有建材の 無害化基礎実験 (2)	稲葉 力 百代淳一
2009/9/17 ～19	廃棄物学会大会 2009	過熱蒸気によるアスベスト含有建材無害 化物の無害性評価	稲葉 力
2009/10/21 ～23	アスベスト対策 環境展 2009	低温過熱蒸気によるアスベスト無害化・ 再資源化技術の開発	稲葉 力 三浦 勇雄 澤田 晃也 高浪 哲郎
2009/11/4	アスベストロード マップ委員会	過熱蒸気によるアスベスト無害化・再資 源化技術の開発	澤田 晃也
2010/9/1 ～3	土木学会第 64 回 年次学術講演会	アスベスト含有建材の無害化とセメント 原料化実験	稲葉 力
2010/9/9 ～11	日本建築学会大会 2010	低温過熱蒸気によるアスベスト無害化・ 再資源化に関する研究開発 その 4, 5	三浦 勇雄 澤田 晃也

## (2) 特許等

出願日	受付番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2007/ 9/21	2007-244797	アスベスト含有廃棄物の再生処理方法	戸田建設株式会社、 西松建設株式会社、 大旺新洋株式会社
2007/11/12	2007-293061	アスベスト含有廃棄物の加熱処理システム	戸田建設株式会社、 西松建設株式会社、 大旺新洋株式会社
2008/ 9/10	2008-231929	アスベスト含有建材の無害化装置	戸田建設株式会社、 西松建設株式会社、 大旺新洋株式会社
2010/ 3/26	2010-72519	アスベスト含有建材の加熱処理システム	戸田建設株式会社、 西松建設株式会社、 大旺新洋株式会社

## (3) 成果普及の努力（プレス発表等）

掲載日	媒体
2007/11/21	日経新聞四国版、日経産業新聞、高知新聞
2007/12/11	日刊工業新聞、建設産業新聞、建設工業新聞、建設通信新聞、KEN-Plats、セメント新聞
2009/ 1/14	環境新聞
2009/ 2/24	日経産業新聞
2010/ 3/ 3	建設産業新聞、建設工業新聞、建設通信新聞
2010/ 3/13	日経新聞四国版、高知新聞
2010/ 3/15	日経産業新聞

## (4) その他

- 2008/11/25 (資源環境対策 vol. 44 No. 14(2008))
- 2010/ 2/19 (日経コンストラクションアンケート提出)
- 2010/ 3/ 1 (環境浄化技術 2010.6 Vol.9 No.6)
- 2010/ 4/ 8 (エンジニアリング振興協会奨励特別賞推薦)

## 5. 問題点と今後の課題

### 1. 技術的な問題点

#### (1) 無害化の確認

現在認められている溶融処理の場合、アスベスト無害化物がガラス化されることで、無害化の証明（日常管理指標）となる。熱処理の場合は、処理後は目視だけでは無害化の確認ができないので、処理直後に安心感を与えることはできない。無害化の証明および日常管理をどうするのか、維持管理時に分析の頻度を増やす等の検討が必要となる。

#### (2) 無害化の基準

無害化処理認定制度における認定条件は、「位相差顕微鏡を用いた分散染色法及び X 線回折分析法によるものとし、同定が困難な場合は、電子顕微鏡を用いた検定を行うこと。」になっている。

これまで、主に位相差顕微鏡で無害化の確認を実施してきたが、昨年度に透過型電子顕微鏡にて無害化の確認の指針が環境省から提示されたが、その基準は非常に厳しいものであった。今後もパイロット規模装置で実験を継続し、再現性の確認が必要である。

900℃と想定していた処理温度が 50℃上がったのは、「石綿含有一般廃棄物等の無害化処理等に係る石綿の検定方法」の厳しい基準値を満足するためである。一方で、低濃度のクリソタイルは地殻環境(空気、水、氷冠および土壌)でも検出されるという事実がある。それと比較して、現実的な基準値といえるか検討された資料は見あたらない。現状、埋立処分と競合しなければならない無害化処理技術は、処理コストの低減が市場原理において当然の課題となる。その処理温度が 50℃でも低くなれば、消耗品の長期使用が可能になるなど、さらに経済的な処理方法になる可能性がある。

### 2. 事業化に向けた問題点

#### (1) 含有建材の回収について

レベル3のアスベスト含有建材のストックは全国で 4,000 万トン以上あり、年間 100 万トン以上排出されると言われているが、排出量の実態調査は行われておらず、実際のアスベスト含有建材の排出量は不透明である。小規模な建物の解体では分別解体が進んでいない。特に一般戸建て住宅では分別が進んでいないと推定される。

埋め立て処分費用は、処分量の減少により値下がり傾向にある。特に、近畿・中国地方は、準公共的な廃棄物処分場でアスベスト含有建材を受け入れている準公共的な施設があり、費用が安い。

#### (2) 再資源化について

セメント生産量の 5% にアスベスト無害化物を混入させると、アスベスト無害化物のすべてが資源化できる。セメントメーカーがアスベスト無害化物を受け入れるには、明確に無害化されていることが証明する必要がある。現状では、セメントメーカーは慎重な姿勢を崩していない。

#### (3) その他

アスベスト無害化処理施設は、近隣住民にとって迷惑施設であり、近隣住民が納得するような、アスベストが漏洩しない施設設計と維持管理が必要である。

アスベスト含有建材の処理量を増やす為には、大型連続式の装置が有力であるが、装置の故障時の事業の継続性を考慮すると小型バッチ式になる可能性も有る。

以上



## 2. 2. 3 マイクロ波加熱によるアスベスト建材無害化装置の開発

### 開発概要

#### 1 事業目的

スレート製品等の非飛散性のアスベスト成形板の国内における累積出荷量は4,300万トンとされる。(更に、アスベスト含有率が1wt%から0.1wt%に引き下げられたことからその量は格段に増大することになった。)非飛散性廃棄物はセメントで固化されており直接人体に健康被害を及ぼすことはなく、解体・改修時には石綿障害予防規則により、割らずに手ばらしするなどのレベル3としての対策を講じることとされており、現在は殆どが最終処分場に埋め立てられている。

しかしながら、量的に年間およそ100万トンの廃棄物が発生するため最終処分場が一層の不足を来すという問題がある。更に最終処分場がアスベスト含有品の受け入れを拒んだり、処理費が高騰したりなどして廃棄・処分に困るという状態が発生している。将来何らかのきっかけで地上への露出を懸念する声もある。そのため、スレート製品等の大量の非飛散性アスベスト含有廃棄物を確実に無害化処理できる安全かつ効率的な処理技術の開発が強く求められている。

「マイクロ波加熱によるアスベスト建材無害化装置の開発」(以下、本研究テーマ)ではこのような社会的要求に応えるため、マイクロ波を活用し、アスベストの結晶構造を破壊し、低コストで安全に、大量処理が可能な無害化装置の開発を行うことが目的である。

マイクロ波を使うことで、アスベスト含有建材を破碎によって二次飛散させることなく、そのままの大きさで均一・迅速に高効率で加熱し無害化することを可能とし、更に無害化したものは建材などに再資源化する技術を開発する。

#### 2 事業概要

電子レンジに使われているマイクロ波は食品を温めるときに、食器は加熱せず、食品に含まれる水分だけを温めるので、エネルギーのムダがなく高速で加熱される特徴を持っている。マイクロ波は周波数が300MHzから30GHzの電波であり、国内では電波法の規制もあり2.45GHzが多く使用される。水などの誘電体損失の大きい物質にあたると、分子摩擦によって熱エネルギーに変わる。建材の主成分であるセメントには65%前後の酸化カルシウムが含まれ、これが水と同じようにマイクロ波を吸収して局所加熱される。

アスベストはマイクロ波を吸収しないが、カルシウム成分と隣接して加熱される。また、そのとき材料内に微視的に発生する非熱平衡により結晶転移が加速されることも期待される。

図1に、処理試験対象としたアスベスト含有スレート瓦(住宅屋根用化粧スレート、以下スレート瓦という)のマイクロ波による加熱特性を示す。マイクロ波を照射することで、SiC系やジルコニア系材料は短時間に1,000℃にも達するが、マイクロ波を吸収しないアルミナ系では発熱しない。スレート瓦はSiC系とジルコニア系の間の発熱特性を有しておりマイクロ波をよく吸収する材料であることがわかる。

本研究テーマでは、アスベスト含有建材にマイクロ波を照射し建材中のアスベストを無害化し、建材を再資源化する実用化技術の開発を行った。

M波発熱試験結果(出力2.4kw)

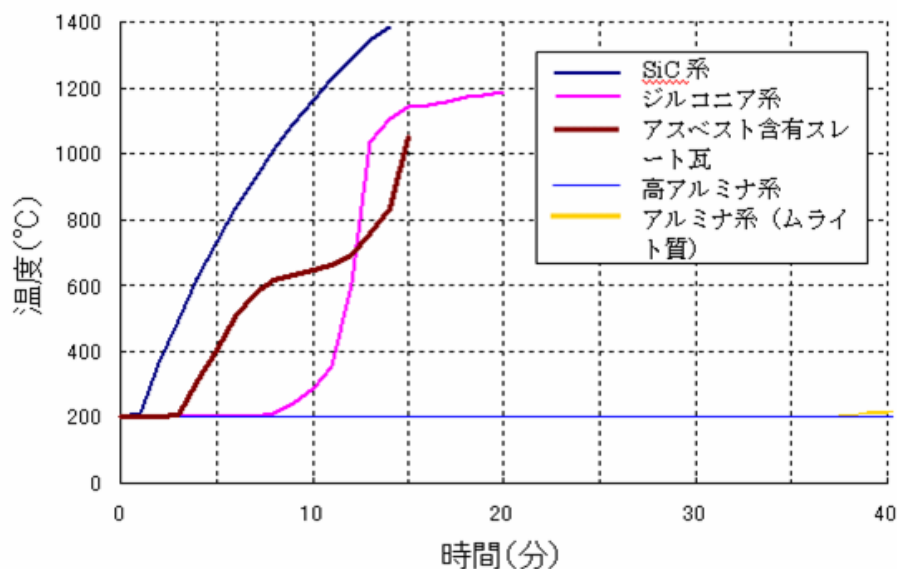


図1 マイクロ波発熱特性

### 3 研究開発の成果

本研究テーマでは、平成19～20年度に、アスベスト含有建材にマイクロ波を照射してアスベストの結晶構造を破壊・無害化し、建材を再資源化する実用化技術を開発した。

既設の試験炉にマイクロ波発振器を12台から20台に増設し、マイクロ波加熱の最適化条件を検討した。マイクロ波の出力、照射する位置、搬送速度、昇温速度や保持時間などの温度プロファイル、積重ねるアスベスト含有建材の枚数を検証パラメーターとして、最も効率的な処理条件を検討した。結果、50kW(20台)照射で下記処理条件と合わせ、処理能力1.5倍(2→3トン/日)を達成でき、実用化装置の基本設計の構想ができた。平成20年度は、平成19年度に基本設計を行った実用化装置の設計完成度を高めるための試験検討を行い、マイクロ波の照射位置については、高温部に集中させることが有効で、350℃程度まではゆっくり昇温し、爆裂を発生させないこと、850℃までに約30分で昇温できること、マイクロ波の出力は大きくするほど処理できる量、すなわち積載枚数は増えるが、トン当たり消費電力コストにすると実証試験機のスケールでは30kW(12台)が最も高効率という結論が得られた。電気ヒーターは雰囲気温度を作るのに加熱ゾーン全体に渡り使うが、マイクロ波で加熱するゾーンは、電気ヒーターの消費電力がかなり小さくなる。積載枚数は投入するセットあたり7枚が最大。これはマイクロ波の浸透深さ、処理物の誘電損失係数から計算される電力半減深度が数十mmであることも整合する。マイクロ波のインピーダンスチューニング装置を設備に付加して検討を行ったが、本炉方式では効果が少なく、実用機設計に織り込む必要が

ないことが判った。

無害化するアスベスト含有建材はセッターと呼ぶ搬送用の受け板に載せて処理するが、その材質（SiC、ムライト等）、形状、大きさの仕様を比較検討し、最適な仕様をつかんだ。セッターは処理物が加熱による反りや割れでローラーの間から落ちないためのものであるが、エネルギーを奪うため、いかにこれを少なくするかもひとつのポイントである。種々検討の結果、マイクロ波をよく吸収し、アスベスト含有建材と共に自己発熱する材質がよく、耐久性とも合わせ酸化珪素結合SiC炭化珪素製で厚さ10mm程度のものが適当である。

処理物のラッキング（横積み又は縦積み）の検討を行い、マイクロ波の浸透深さ（電力半減深度）データから横積み方式に決定した。また、スレート瓦の形状が三角形に欠けている部分にも処理物を置くことで、現状の1.5倍量まで無害化範囲を拡張でき、4.5トン/日まで処理能力が大きくなることを把握できた。

実証試験機の規模で消費電力が110kW、処理コストにするとトン当たり1万円程度であることが8時間程度の長時間安定運転で確認できた。人件費や償却費などを合計すると処理コストは2万円/トン程度になると予測できる。

その他のアスベスト製品の無害化処理開発、無害化アスベストの再資源化技術開発として、波板とサイディングについて、ラボレベル（マイクロ波ラボ実験炉）で無害化処理条件の試験を行った。処理後の建材を用いて、再資源化（外装材などへの添加）試験、品質評価試験を実施し数%添加できることを把握できた。

事業化に向けてのビジネスモデル・事業展開へのシナリオの策定を実施した。

開発目標値に対する到達度は、処理能力、環境安全性、非アスベスト化、処理費の各項目について概ね達成することができた。

## 研究開発内容

### (1) マイクロ波加熱によるアスベスト建材無害化装置の開発

本報告書において、「石綿が検出されないこと」（無害化）の判定基準は、平成20年公示のJIS A 1481に定められた位相差顕微鏡を用いた分散染色法とエックス線回折分析法により判定した。分析は、積み重ねて加熱処理した全ての枚数について実施して、中央部まで無害化されたことを確認した。

### (1) - 1 マイクロ波加熱小型試験装置による無害化処理の最適化

無害化処理を最適化するにあたり、下記の3つの事柄に関して検討を行った。

#### a. マイクロ波の出力と処理能力のバランス

マイクロ波の出力を増やすと、処理量がどうなるか ⇒ 出力対効果の最適点

#### b. 適当なセッターの選択（搬送用）

マイクロ波エネルギー損失の少ない材質、厚さ、形状などの選択

#### c. ラッキング（処理物の投入方法）

マイクロ波が処理物中を減衰せずに加熱できるラッキング方式の決定

#### a. マイクロ波の出力と処理能力のバランス

既設の試験炉にマイクロ波発振器を増設し（12台→20台）マイクロ波加熱の最適化条を検討した。マイクロ波の出力、照射する位置、搬送速度、昇温速度や保持時間などの温度プロファイル、積み重ねるアスベスト含有建材の枚数を検証パラメーターとして、表1に示した様々な処理条件を検討し、その結果を図2、表2に示した。図2から、マイクロ波出力を増加させる（30kW→50kW）と石綿含有率は、比例して減少していることがわかった。また、表2から、搬送速度を4.2（m/h）から6.3（m/h）にあげても無害化積載枚数は7枚が可能になったので、処理能力が1.5倍（1日あたりの処理量：2トンから3トン）を達成した。このことを基に実用化装置の基本設計の構想をたてた（詳細は（1）-2で説明）。

表1 試験検討組み合わせ

パラメーター	試験水準
マイクロ波出力	0,30,50kW
処理単位置 (積み重ね枚数)	5~10枚
搬送速度	4.2~10.2m/h
(マイクロ波照射時間)	50~20分
(炉内滞留時間)	加熱ゾーン75~30分
(最高温度保持時間)	25~10分

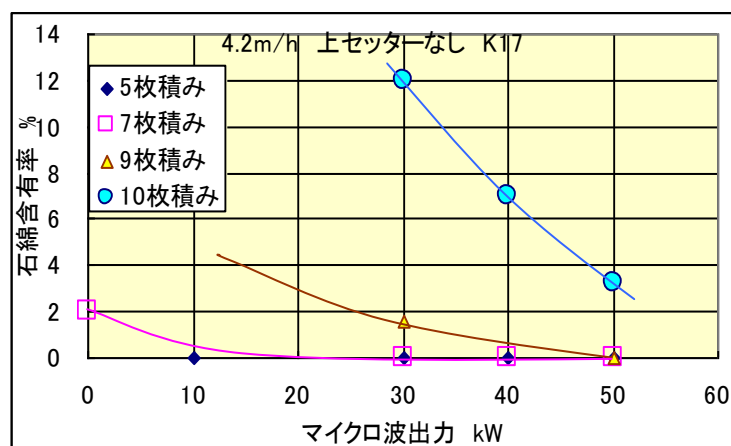


図2 マイクロ波出力に対する石綿含有率の変化

表2 試験結果

マイクロ波出力	搬送速度	最大無害化積載枚数	1日あたりの処理量	マイクロ波照射時間	最高温度保持時間	加熱ゾーン内時間
0 kW	4.2m/h	6枚	1.7トン	50分	25分	75分
30kW	4.2m/h	7枚	2.0トン			
50kW	4.2m/h	9枚	2.6トン			
30kW	6.3m/h	6枚	2.6トン	33分	17分	50分
50kW	6.3m/h	7枚	3.0トン			

### b. 適当なセッターの選択 (搬送用)

アスベスト含有建材は、搬送用の受け板 (セッター) に載せて処理を行う。これは、処理物が加熱による反りや割れ等で、ローラーの間から落ちないようにするために必要不可欠である。そこで、最適なセッターを検討するため、セッターの材質、形状、大きさの仕様を変え、様々な試験を行った (表3)。この試験は、無害化に対して有効性が高いセッターを選択するため、積載枚数10枚中の芯部の石綿残存率で評価することにした。まず、材質について、マイクロ波の使用、高温 (850°C以上) 処理である事を考慮すると、マイクロ波を吸収し、高温耐火物であるという条件を満たす必要がある。その観点から、SiCまたはムライトを選択した。また、SiCについては、表4に示したように様々な種類があるが、市販品のD (酸化物結合SiC) を選択して1通り実験を行った。

図3に、セッターの材質、配置をかえたときの結果を示した。まず、材質について検討する。図3のSiC (No. 3)、ムライト (No. 6) の石綿残存率を比較すると、SiCの方がムライトよりも少ないため、無害化に対して効果があり適しているといえる。次に、セッターの置き方について検討する。図3のNo. 1~No. 5を比較すると、セッターの量を少なくするほうが効率よく無害化している傾向がみられた。このことは、セッターに熱を奪われている事を示唆している。また、無害化処理を行っている炉内において、アスベスト含有建材 (屋根板) が反

る事が確認できているので、反りを防止するために、おもしろを載せておく必要がある。そこで、図3のNo. 3、No. 4をみると、石綿残存率にほとんど差が無い結果が得られたので、No. 3の置き方が最適であるといえる。同様に、これら以外の材料及び10mm厚で試験を行った結果、耐久性については材料Fについては問題があった（割れが発生）が、その他の材料では問題が無かった。また、石綿無害化に有効なのは、材料E（酸化物結合SiC）の10mm厚が最適であることを確認した。したがって、セッターとして最適なのは、置き方はNo. 3、材質として酸化物結合SiC、10mm厚である。

表3 セッター配置の一覧表

	セッター情報					サンプル		
	簡易図	材質	上	下	1枚あたりのサイズ	石綿含有率	積載枚数	評価(芯部)
No. 1		SiC	7.5kg×2枚	7.5kg×2枚	上 : 500 × 500 × 12 下 : 500 × 500 × 12	14%	10枚	6枚目
No. 2		SiC	7.5kg×1枚	7.5kg×2枚	上 : 500 × 500 × 12 下 : 500 × 500 × 12	14%	10枚	6枚目
No. 3		SiC	0.65kg×2枚	7.5kg×2枚	上 : 破片 下 : 500 × 500 × 12	14%	10枚	6枚目
No. 4		SiC	なし	7.5kg×2枚	上 : なし 下 : 500 × 500 × 12	14%	10枚	6枚目
No. 5		SiC	なし	一部欠損	上 : なし 下 : 500 × 500 × 12	14%	10枚	6枚目
No. 6		ムライト	なし	3.5kg×2枚		14%	10枚	6枚目

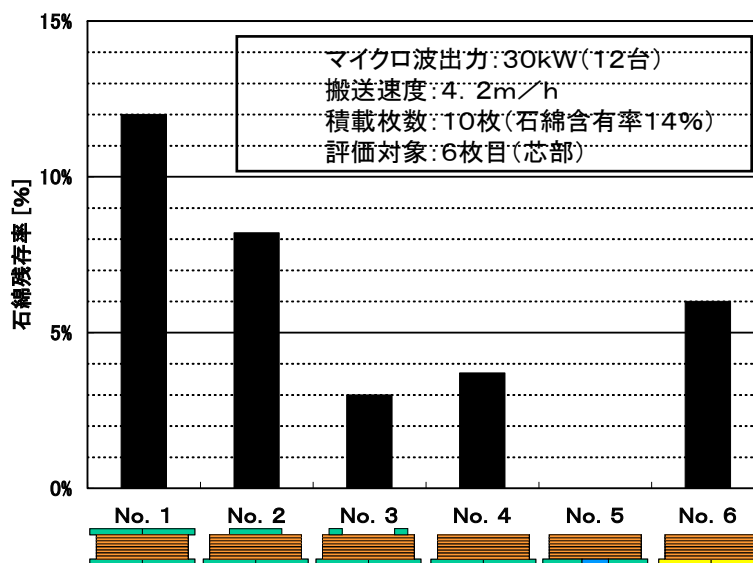


図3 セッター種類、配置による比較（SiCは、表4のDのデータ）

表4 SiCの詳細なデータ

材料(系統)		反応焼結品		酸化物結合品			窒化物結合品	
		Si-SiC		SiO <sub>2</sub> bond SiC			N-SiC	
材料名		A	B	C	D	E	F	G
化学組成 wt %	SiC	80	88	90	82	89.9	66	80
	Si	20	12					
	SiO <sub>2</sub>			10	10.5	8.9		5
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>						25	15
密度	嵩比重	3.00	3.05	2.80	2.50	2.80	2.80	2.70
	気孔率 %	0.0	0.0	7.0	17.0	6.5	1.0	7.0
曲げ強度 MPa		250	250	50	8		160	60
熱膨張係数 × 10 <sup>-6</sup>		4.5	4.1	4.5	4.8	4.8	4.4	4.5
最高使用温度 °C		1350	1380	1500	1500	1500	1550	1550
熱伝導率		180	35	20		16	20	20
マイクロ波吸収特性 損失係数 ε tanδ			500°C 0.04		500°C 1.71 1000°C 0.98		500°C 0.72 1000°C 0.47	
備考		600×360×9mm 5.9 kg/枚			標準品 500×500×12mm 7.5 kg/枚	500×500×12mm 8.3 kg/枚	メッシュプレート 640×535×8mm 3.8 kg/枚	

### c. 処理物のラッキング

処理物を一度に、経済的に効率よく処理するための積載方法（ラッキング）の検討を行った。処理物のラッキング（図4）について、処理物の量を30kg（10枚相当）にし、5cm、9cmと高さを変えて試験を行い、その結果を表5に示した。まず、縦積みについては、5cmについては無害化できたが、9cmについては、上部は無害化できたが、下部は無害化されずにのこった。この結果をマイクロ波の電力半減深度から考察する。マイクロ波の電力半減深度は、式（1）のように表される。式（1）に、マイクロ波の周波数をf、建材の比誘電率をε、誘電正接をtanδとして値を代入して計算を行った結果、8.3cmという結果が得られる。よって、試験結果がマイクロ波の電力半減深度が数十mmの範囲であることと整合する。



図4 縦積み検討



$$D_{1/2} = \frac{3.32 \times 10^9}{f \sqrt{\epsilon \tan \delta}} \quad (1)$$

電力半減深度： $D_{1/2}$  [cm]

周波数： $f = 2.45 \times 10^9$  [Hz]

比誘電率： $\epsilon = 6.06$

誘電正接： $\tan \delta = 0.066$

表5 縦積み方式での結果

ラッキング	高さ	重量	マイクロ波出力	搬送速度	無害化
縦積み	5cm	30kg(10枚分)	50kW (30kW)	4.2m/h	○
	9cm	30kg(10枚分)	50kW	4.2m/h	上部は無害化されるが、 下部は無害化されずにのこる

次に、横積みにおいて高効率化(処理量増加)可能かどうかを検証した。図5に示したように、従来、処理物は五角形で空き部分がある。そこで、この部分に5枚相当分(重量)をのせて、幅方向拡張について検証した。その結果、この空き部分に5枚相当分を載せることで、従来の1.5倍程度処理できることを確認した。

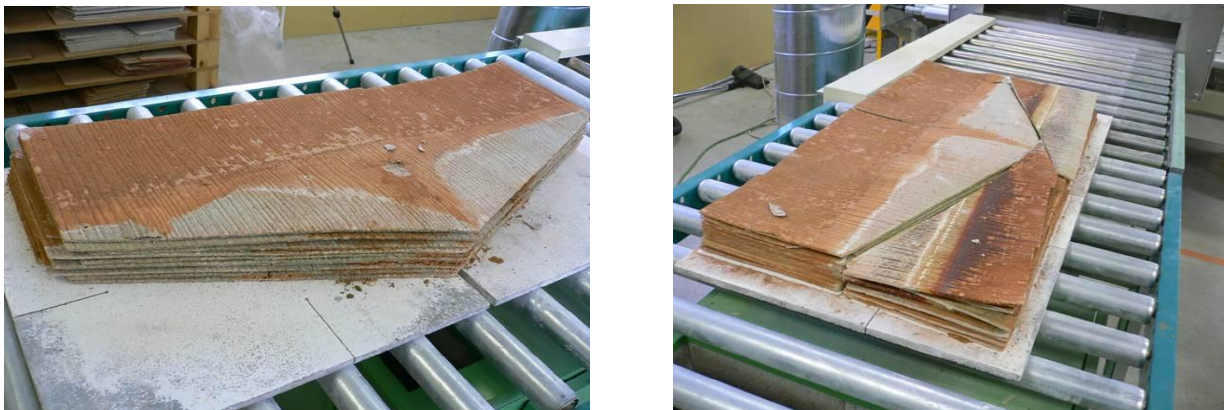


図5 ラッキングの様子。左：従来の積載、右：従来の積載に処理物追加した状態。

### (1) - 2 実用化装置の製作及び実証試験

平成19年度に実施した実証試験のデータを基に、10(トン/日)規模の処理能力を有する実用化装置の基本設計を行った(図6、表6)。平成20年度は、平成19年度に基本設計を行った実用化装置の設計完成度を高めるための試験を行った。マイクロ波の照射位置については高温部に集中させることが有効、温度プロファイル(図7)は、爆裂を発生させないように350℃程度まではゆっくり昇温し、850℃までに約30分で昇温することが重要であることがわかつ



た。また、マイクロ波の出力を大きくするほど処理量（積載枚数）は増加するが、1トン当たりの消費電力コストに換算すると、実証試験機のスケールでは30kW（12台）が最も高効率という結論が得られた（この時の積載枚数は7枚）。これは、電気ヒーターは雰囲気温度を作るのに加熱ゾーン全体に影響するが、マイクロ波を照射するゾーンは、電気ヒーターの消費電力がかなり小さくなるためだと考えられる。また、8時間程度の長時間安定運転を行い、消費電力が110kW、処理コストは1トン当たり1万円程度であることを確認した。人件費や償却費などを合計すると処理コストは2万円/トン程度になると予想される。

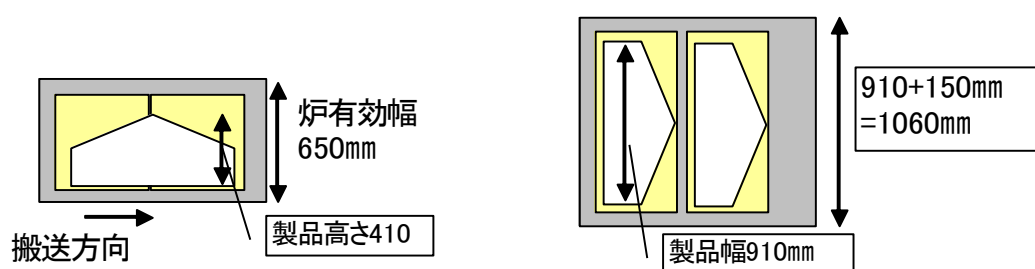


図6 投入方法（左：実証試験、右：実用機）

表6 実証試験炉から実用機へ

		実証試験炉		実用化炉
		μ波2列	μ波1列	μ波2列
処理量	トン/日	3(4.5)トン/日		10トン/日
搬送速度	m/h	6.3		10
処理物	kg/台板	21(7枚積み)		21(7枚積み)
投入ピッチ	min	9.5		3
処理量	kg/h	132		420
	トン/日	3.2		10.1
炉有効幅	mm	650		1060
炉全長	m	12.6		20
加熱ゾーン長さ	m	5.25		8
マイクロ波出力	kW	50	25	90
マイクロ波設備電力	kW	84	42	(152)
設備電気容量	kW	210	168	
ヒーター電気容量	kW	130		
μ波照射ゾーン長さ	m	3.2		6
μ波発振器取付ピッチ	mm	320		320
μ波発振器台数	台	20	10	36

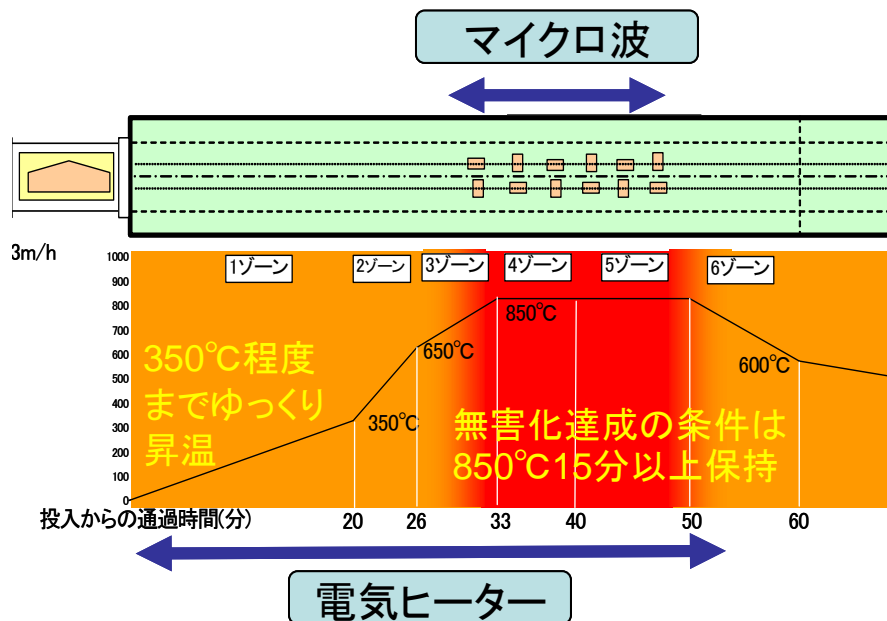


図7 温度プロファイル

マイクロ波加熱装置では、導波管を介してマイクロ波を照射し誘電加熱している。マイクロ波の吸収の度合は、被加熱物の減量等の経時変化によって変動する。負荷インピーダンスが変わると、導波管における電圧定在波比（V SWR 値）が変化して、マイクロ波エネルギーを効率よく吸収させることができなくなる。そこで、V SWR 値の変化による効率低下を防止するため、導波管内におけるマイクロ波の入射電力及び反射電力のデータを見ながらスタブチューナーを調整し、インピーダンス整合することでV SWR 値を整合良好範囲内に収めることを試みた。表7に、マイクロ波のインピーダンスチューニング装置を設備に付加して検討を行った結果を示した。また、図8にはインピーダンスチューニング前後の反射率、V SWR 値をグラフ化し、分散分析を行うと5%有意という結果が得られた。インピーダンスチューニングにより、V SWR 値は有意差があるが、実証試験で石綿無害化の度合いを検討すると若干の効果はみられるが、処理枚数が増加する程の効果は得られなかった。これらの結果から、本炉方式では効果が少なく、実用機設計に織り込む必要がないことが判った。

表7 スタブチューナー調整前後での結果 (VSWR)

		$VSWR = \frac{1+S}{1-S}$ $S = \sqrt{\frac{Pr(\text{反射})}{Pi(\text{入射})}}$								20台同時稼動(1ゾーンのみヒーターON)							
発振器NO	パワーモニタNO	チューニング前					チューニング後					パワーモニタNO	入射 mA	反射 mA	VSWR		
		入射 mA	反射 mA	入射(Pi) kW	反射(Pr) kW	VSWR	入射 mA	反射 mA	入射(Pi) kW	反射(Pr) kW	VSWR						
1	2	0.93	0.20	3.214	0.304	1.89	0.84	0.11	2.698	0.142	1.59						
2	4	0.90	0.20	3.037	0.304	1.93	0.90	0.17	3.037	0.245	1.79						
3	3	0.92	0.27	3.154	0.460	2.24	0.85	0.20	2.753	0.304	2.00						
4	5	0.88	0.15	2.922	0.209	1.73	0.85	0.10	2.753	0.126	1.54						
5	4	0.95	0.24	3.334	0.390	2.04	0.91	0.18	3.095	0.264	1.83	4	0.90~0.92	0.19~0.20	1.88~1.90		
6	2	0.95	0.30	3.334	0.535	2.34	0.86	0.20	2.809	0.304	1.98						
7	3	0.85	0.26	2.753	0.436	2.32	0.82	0.23	2.590	0.368	2.21						
8	5	0.90	0.20	3.037	0.304	1.93	0.85	0.09	2.753	0.111	1.50	5	0.83~0.83	0.08~0.13	1.47~1.69		
9	3	0.90	0.25	3.037	0.413	2.17	0.85	0.17	2.753	0.245	1.85						
10	2	0.90	0.20	3.037	0.304	1.93	0.89	0.12	2.979	0.158	1.60						
11	5	0.85	0.15	2.753	0.209	1.76	0.83	0.12	2.644	0.158	1.65	2	0.84~0.85	0.10~0.15	1.55~1.76		
12	4	0.89	0.20	2.979	0.304	1.94	0.84	0.10	2.698	0.126	1.55						
13	3	0.79	0.22	2.431	0.346	2.21	0.75	0.22	2.227	0.346	2.30						
14	2	0.90	0.21	3.037	0.325	1.97	0.85	0.10	2.753	0.126	1.54						
15	5	0.84	0.12	2.698	0.158	1.64	0.78	0.04	2.379	0.044	1.32						
16	4	0.92	0.23	3.154	0.368	2.04	0.85	0.20	2.753	0.304	2.00						
17	3	0.96	0.34	3.395	0.641	2.54	0.88	0.29	2.922	0.509	2.43	3	0.80~0.83	0.16~0.23	1.87~2.19		
18	4	0.91	0.15	3.095	0.209	1.70	0.89	0.14	2.979	0.191	1.68						
19	5	0.88	0.14	2.922	0.191	1.69	0.86	0.13	2.809	0.174	1.66						
20	2	0.95	0.24	3.334	0.390	2.04	0.92	0.16	3.154	0.227	1.73						
		平均					2.00						1.79				
		σ					0.24						0.29				

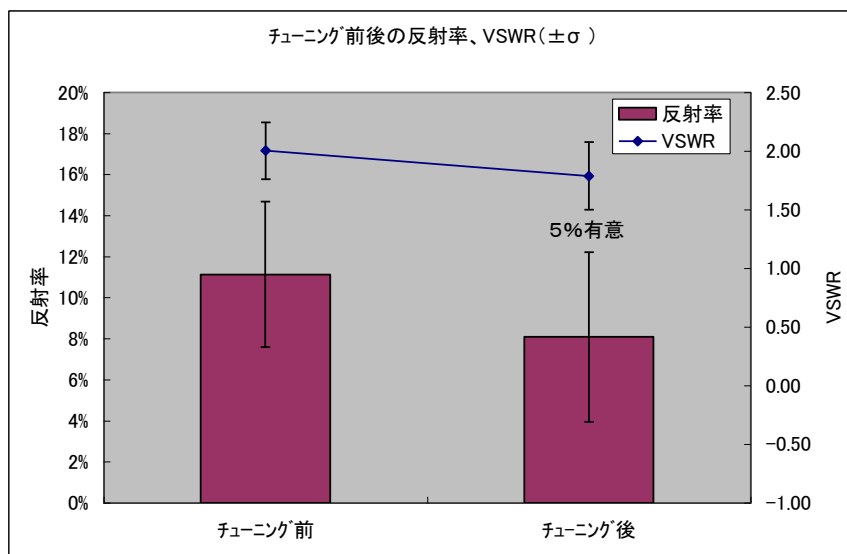


図8 インピーダンスチューニング前後の反射率、VSWRへの影響

(1) - 3 その他のアスベスト製品の無害化処理開発

波型スレートとサイディングについて、ラボレベル(マイクロ波ラボ実験炉)で無害化処理条件の試験を行った。波型スレートとサイディングも、スレート瓦と同様の条件(850℃)でクリソタイルを無害化できることを検証した。(図9、図10)ビジネスモデル検討結果から本テーマではクリソタイルのみを含有するスレート瓦を処理対象とすべきであると結論を得たが、その他のアスベスト製品については万一少量の混入があることを想定し、確認試験を実施した。

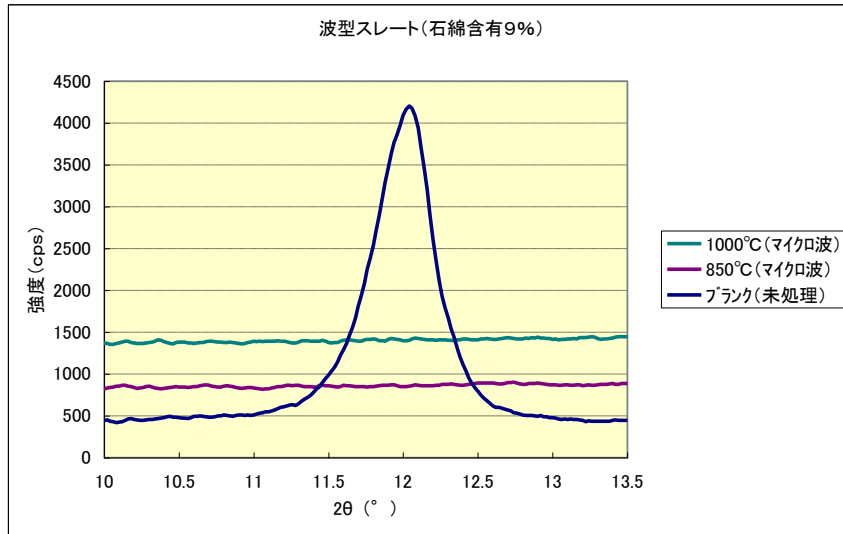


図9 マイクロ波ラボテスト品(波型スレート)のクリスタル第1ピークX線回折チャート

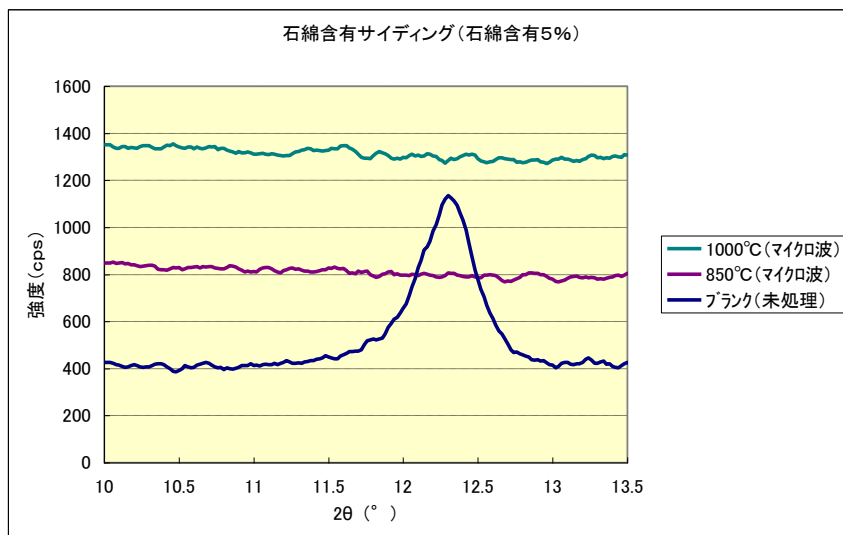


図10 マイクロ波ラボテスト品(サイディング)のクリスタル第1ピークX線回折チャート

#### (1) - 4 無害化アスベストの再資源化技術開発

無害化したものを粉砕し、粉砕のしやすさと反応性の評価を行った。粉砕は現行の屋根材と無害化したものを同粉砕条件で行うと無害化したものが粉砕粒度は小さくなり、比較して容易であることがわかる。(図11)

反応性の評価(活性度)は粉砕したものを水で練り固めてオートクレーブ養生したときの硬化体の曲げ強度で表した。無害化品はセメントの3分の1程度の強度が発現し、珪石粉は単独では硬化しないので、珪酸カルシウムの水熱反応性があることを示している。また、粗粉砕(270 μm程度)より、微粉砕(18 μm程度)の方が25%程度活性度は高い。特に粉砕粒度が20 μm程度になるとオートクレーブ養生で反応・硬化する性質があることが把握できた。(表8)

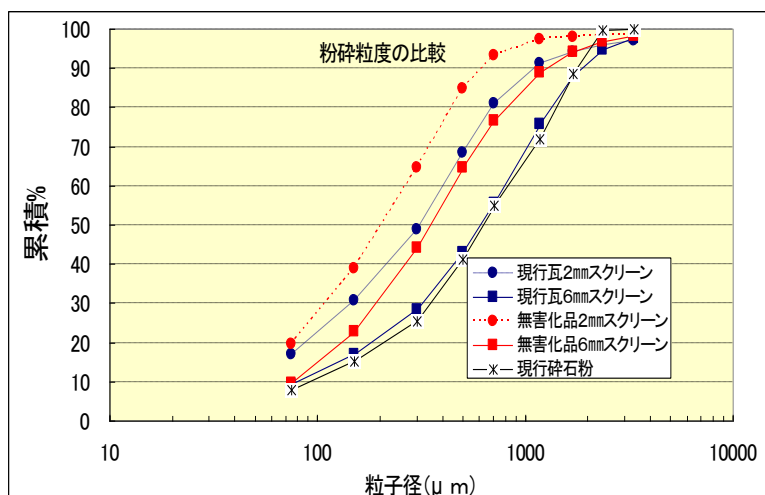


図 1 1 ハンマーミル粉砕による現行スレート瓦（無石棉品）との比較

評価項目		石棉無害化品		珪石粉	備考
		粗粉砕 ハンマーミル	微粉砕 ボールミル		
粒度	メジアン径 $\mu\text{m}$	272.3	17.7	49.9	
成分	$\text{SiO}_2$ %	60.2	62.7	89.0	
	$\text{CaO}$ %	24.9	21.9	0.05	
活性度	曲げ強度 MPa	5.3*	6.6*	0	セメント:17.7

表 8 無害化品のオートクレーブ養生生活活性度確認

無害化処理後の建材を用いて、再資源化（外装材などへの添加）する基礎的なラボレベル試験、品質評価試験を実施した。無害化したものを  $20\ \mu\text{m}$  程度の平均粒径に粉砕し、外壁材の原材料の一種である珪石粉に、5%代替し添加したものは、現行の品質（曲げ強度や吸水率、収縮率、耐凍害性など）同等であることを確認できた。（図 1 2）

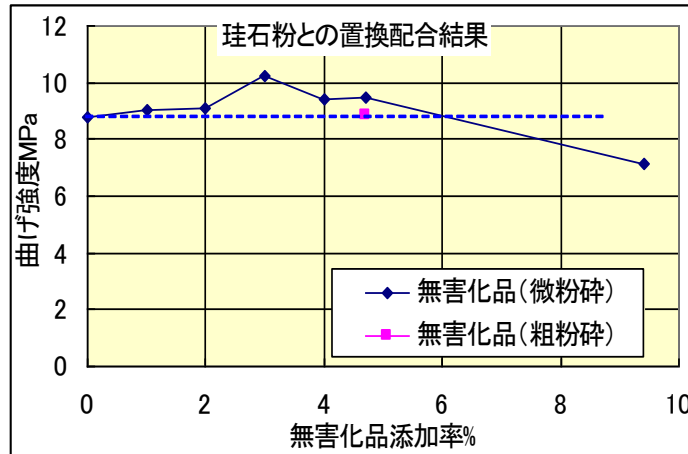


図 1 2 再資源化試験曲げ強度（珪石粉との置換配合）

(2) 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

事業化を実現するために、アスベスト建材廃材の分別回収システム、排出から回収～運搬～無害化処理の事業実施体制、妥当な処理コストを見極めるため、処理実態把握と今後の動向予測などを行った。

事業化に向けてのビジネスモデル・事業展開へのシナリオの策定を実施した。環境省の無害化認定を取得して事業を開始するに当たり、必要な要件を調査抽出し、具体的な、回収システム、事業実施体制、施設立地などの検討を開始した。処理対象物については、分別回収の容易性、クリソタイルのみを含有しており処理条件が一元化でき、事業立上げが比較的シンプルにできると思われることより、国内累積量の3分の1を占めるスレート瓦（住宅屋根用化粧スレート）（図13）に絞り込むこととした。

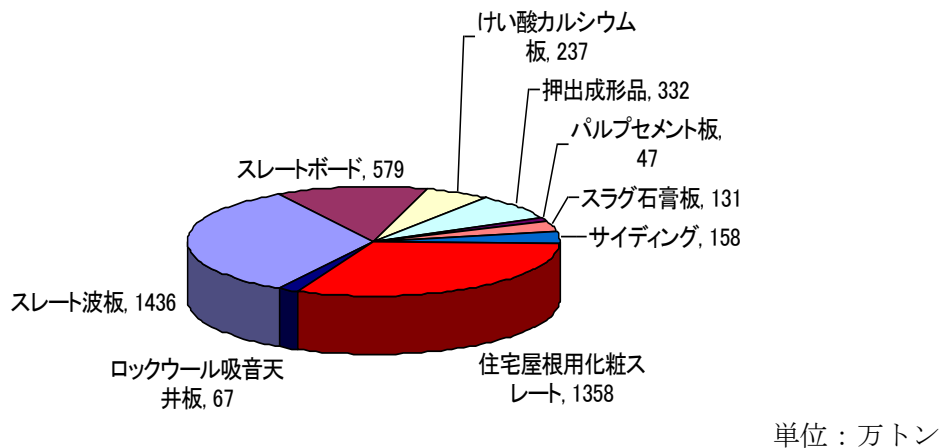


図 1 3 石綿含有建材の累積出荷量（※（社）日本石綿協会資料より）

また現状では、健康被害リスクについて科学的な検証はなされていないが、フォーステライト等の副生成物に対する技術的な対応が確立できないと、実際の無害化処理事業は実施できない危険が大きいことが明らかとなり、将来のビジネス展開のためにも、対応技術の検討を開始することとした。

(3) 目的に照らした達成状況

以上の研究開発により、次の能力・仕様を有する装置を開発し、10トン/日規模の処理能力の実用化装置の製作が可能であることを見極めた。

開発目標値に対する達成度

項目	目標	実績	備考
処理能力	5～6トン/日	4.5トン/日	小型実用化装置
	30トン/日	30トン/日（但し、10～15トン/日・機を2～3機設置する方が効率的）	事業規模実用化装置の設計上の仕様
環境安全性	2次飛散させず処理できること（事前粉碎処理ゼロ）	可能	
非アスベスト化	残存石綿量ゼロ	認められない	JIS A 1481の分析方法でアスベストが認められないこと
処理費	2万円/トン	2万円/トン程度の見込み	

(4) 研究発表・講演、文献、特許等の状況

(4) - 1 研究発表・講演

平成19年度アスベスト処理技術研究セミナー 財団法人 廃棄物研究財団主催

平成19年9月20日 札幌

平成19年10月23日 仙台

平成19年11月27日 福岡

(4) - 2 文献

小泉昌士、守田孝士、松井健一：マイクロ波によるアスベスト含有建材の無害化、環境  
浄化技術 Vol. 7 No. 7 (2008) pp. 57-60

小泉昌士：マイクロ波加熱によるアスベスト建材無害化技術、資源環境対策、Vol.  
44 No. 14 (2008) pp. 68-69

(4) - 3 特許等

PCT/JP2006/318602 (特願2007-536513) アスベストの変  
成方法

特願2008-332230 アスベストの無害化処理方法

特願2009-9893 アスベストの無害化処理法



## 2.2.4 アスベスト低温溶融無害化・再資源化処理システムの開発

### 開発概要

#### (1) 事業目的

アスベストに関する健康被害は深刻な社会問題となっている。これまでに建材等日本国内で使われたアスベストの回収は行われているものの、まだそのほとんどは生活している周辺地域に存在する。特に危険度レベル1とされる飛散性アスベストの現場から除去回収されたアスベストは、非飛散対策もせずにポリエチレン製回収用二重袋にそのまま詰め込まれ、その約98%以上を管理型最終処分場に埋立てにて処分されているが、何年たっても土に返ることがないことと、その袋が破ければ飛散してしまう危険な状況である。そのため後世・次世代に有害となる原因そして被害を大量に残してしまっていることとなっている。

有害な形状をしたアスベスト繊維を人体に影響のない形状へ、そして公定法にて分析後の結果がアスベストとして検出されないとなる無害化処理するには、1,500℃の高温で溶融する必要があるため、そのためには1,500℃溶融設備を設置し無害化処理しなければならず、設備コスト面、事業採算面等様々な問題から無害化処理が進まない現状がある。1,500℃での溶融無害化処理受入れコストは、埋立て処理と比較すると約4倍ものコストになっている。大量に排出され、今後さらに増加傾向にある排出されるアスベスト含有建材を埋立てコスト同等あるいは低コストで溶融して無害化処理する技術及び設備を早急に確立し事業化されることが望まれている現状がある。

本研究テーマでは、アスベスト含有特別管理産業廃棄物の低温溶融無害化・再資源化処理システムの実用化に向けた技術開発を目指し目的とした。

#### (2) 事業概要

その様な背景の中、弊社は独自のアスベスト低温溶融無害化および熱分解によるガス化・油化再資源化技術を開発し、低温(700℃台)で処理できる化学的分解メカニズムを駆使した無害化を実現させた。この技術は、アスベスト含有建材廃棄物そのものと、アスベスト付着可能性のある回収工事時に発生する多量の養生材や副資材等のプラスチック系廃棄物に付着したアスベスト繊維も無害化処理し、そのプラスチック系廃棄物を熱分解によりガス化・油化することで再資源化リサイクルを可能にした。ガス化された再生資源をこのアスベスト低温無害化装置と熱分解装置自体を稼働させる燃料として約15%再利用することでリユースし、リサイクルされた残りのガス・油資源は、収集運搬の車の燃料や発電などに利用した、特別管理産業廃棄物の低コスト循環型無害化処理技術である。

この基礎技術に対し、低温溶融高効率無害化処理および再資源化処理システムの実用化に向けた技術開発を行い事業化することは、今後のアスベストによる被害を食い止め、次世代に負の遺産を残すことなく処理し、資源の有効利用3R(リデュース・リユース・リサイクル)にも貢献することは、社会的に大きな意義がある。

この目標を達成するために、飛散性アスベスト除去回収現場より発生するアスベスト含有吹付け材をアルカリ系融解剤との化学反応により減容固化し飛散しない安全な形態へととして収集運搬し、そのアルカリ系融解剤を用いて低温溶融処理によるアスベスト無害化技術、飛散性アスベスト除去現場から発生する特別管理産業廃棄物中のプラスチック成分から燃料成分回収技術、回収した炭化水素ガス分、炭化水素油分及び排ガス中へのアスベスト繊維やPCB等の混入を防止する技術及び無害化処理生成物の再資源化技術を開発し実用化するために必要な研究開発項目を実施した。

#### (3) 研究開発成果

本委託研究テーマにおいて平成21年単年度で、飛散性アスベストを除去回収現場で後の工程で必要とするアルカリ系融解剤と硬化剤を用いて化学反応により減容固化し、飛散しない安全な形で回収・収集運搬、その減容固化されたアスベスト含有物を低温(700℃台)溶融炉に投入しアスベストを分解無害化、さらに生成され

た残渣、ガス、油を再資源化有効利用し安全に低コストで無害化・再資源化する実用化技術を開発した。

ラボ実験、ベンチプラントによる諸条件最適化のデータを基に、環境省の無害化認定取得を視野に入れ、実用化した際の1日のアスベスト無害化処理量の1/10サイズ(1t/d)の実証機でアスベスト低温熔融無害化・再資源化の実証試験を行った。

飛散性アスベスト除去回収現場において、減容固化する際には、関係する法的制約条件、後工程への影響のない無害化条件、作業工数条件、コスト的条件など現状の工程と比較してデメリットの少ないものにする必要があったため、後工程で必要とするアルカリ系融解剤と硬化剤で化学反応を利用した無機ポリマー化を開発し飛散しない形態でのアスベスト安全回収・安全収集運搬、安全貯留を実現させた。

アスベスト無害化実証試験においては、ラボ実験・ベンチプラント試験のデータに基づき、炉内温度平均753℃、滞留時間min30分の条件で連続投入による24h連続運転を行い、無害化され排出された残渣については、

- ・ 熔融残渣体積比：投入廃棄物 50%アスベスト×原料嵩密度 0.46 (実測値) / 残渣嵩密度 1.6 (実測値) = 0.15 (85%減)、
- ・ 熔融残渣重量比：投入廃棄物 460.5kg×50%アスベスト排出残渣重量 150.4kg 重量比=0.653 (約 35%減) 但し、キルン炉内にある残渣は計測に含まれていない。460.5kg×50%プラスチック分×35%=80.59kg (計算上キルン内)、約 85%の減容と約 35%の軽量化
- ・ 投入された特別管理産業廃棄物のプラスチック系廃棄物より熱分解によって生成されたガス生成量については、700℃のガス化率 75wt%、比重 0.901kg/m<sup>3</sup> 42kg/h 投入×50%プラ×75wt%/0.901=14.19 m<sup>3</sup>/kg、実測ガス生成量 194.2 m<sup>3</sup>/18h 投入量 460.5kg×50%プラ×収率 wt%/0.901=194.2 m<sup>3</sup> 実測収率 75.99%

というガス化を実証することができた。

肝心な無害化についてであるが、石綿分析(排ガス、生成ガス JIS K3850-1:2006-6.2)、石綿粉塵試験(平成元年12月27日環境庁告示第93号)、生成物石綿測定(JIS A 1481-7.1,7.2)にて確認した。その結果、排出された残渣、プラスチック分を熱分解によって生成されたガス・油は、環境省無害化判定基準より判断し、無害化が実証された結果を得ることができた。

無害化処理生成物の再資源化技術開発については、それぞれの生成物、残渣、ガス、油について、生成物成分分析(TEM、SEM、ICP 定性)、XRD:結晶構造分析、EXD:半定量分析、ICP:元素判定定性分析、土壤環境溶出試験(カドミウム、鉛、六価クロム、水銀、砒素、セレン、シアン)を行った。残渣については、危険な成分は検出されず、元素判定では、Al 2.3%、Ca 6.9%、Cu 0.2%、Fe 0.4%、K 0.2%、Mg 1.9%、Mn 0.2%、Na 2.1%、S 0.3%、Si 10.1%、Ti 0.4%と Si, Ca,などが多く含まれており、建材や精錬時に使用される低融点化添加材などとして再利用(再資源化)可能であった。

油については、炭化水素油(沸点範囲300℃以下灯油・軽油相当)であり、そのまま再生資源として発電機等への使用が可能であった。

ガスについては、組成 H<sub>2</sub> 26.0%、CH<sub>4</sub> 25.4%、CO 5.70%、CO<sub>2</sub> 4.71%、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 21.4%、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 3.3%、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 0.3%、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 3.13%、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 0.17%、(i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) 0.02%、C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> 1.2%、C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> 1.82%、C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> 0.14%、N<sub>2</sub> 0.36%、(O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、C<sub>5</sub>炭化水素)等 6.4%、熱量は、総発熱量 40,640kJ/m<sup>3</sup>、真発熱量 37,390kJ/m<sup>3</sup> というガス成分で、LPG 代替品として充分使用可能な再生ガスであった。実証試験機では、その実証炉において熱分解し生成したガスをエネルギーとして使用し、熱源とする熱風炉で24h稼働させ実証試験を行った。再資源ガスとして使用可能なことと、実用機においても供給エネルギーコストは、“0”(点火時エネルギーを除く)で稼働できることを実証した。

実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定を実施した。開発目標に対する到達度は、環境安全性、アスベスト無害化、再資源化、実用化(環境省無害化認定実証試験)、事業化(収益事業性)各項目について

充分達成することができた。

## 開発内容

### I. 研究開発成果及び達成状況

- i 低温溶融処理によるアスベスト無害化技術の開発

#### ① 無害化装置の処理条件（低温溶融）最適化

a. 循環型熱分解プラントによるアスベスト無害化実証実験

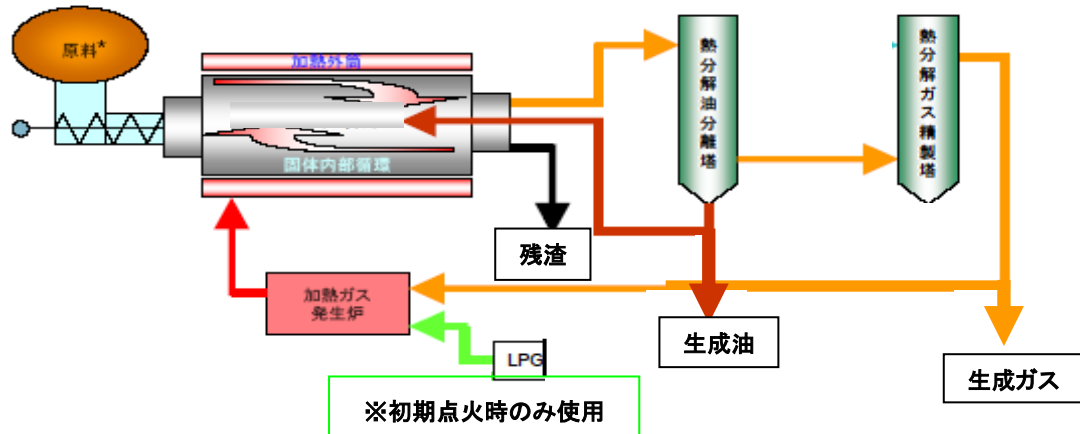


図1 実証試験機構成・フロー

### 1. 滞留時間設定試験

アスベスト無害化及び熱分解再資源化において上記構成実証試験機設備面で必要となる条件は、炉内温度とその温度下における滞留時間である。炉内温度は、熱風炉により熱供給調整可能なので炉内温度計にて平均750℃を狙い調整した。滞留時間は、無害化に大きく影響するので、30分以上滞留を確保するための投入に対するロータリーキルン炉回転数を求めた。

#### 試験条件

原料 名称 : ポリプロピレン (PP) ペレット  
総量 : 20 kg<sup>※1</sup>  
嵩密度 : 0.355 kg/ℓ  
供給速度 : 53.6 ℓ/h (19.0kg/h)

ロータリーキルン炉<sup>※2</sup> : 5 rpm (暫定)

※1 : 投入したすべての原料 (PP) を供給後に押し出すため、原料供給終了後に珪砂を連続的に投入。

※2 : ロータリーキルン炉は、加熱せずに回転させ滞留時間設定回転数試験を行った。



滞留時間確認用ポリプロピレン (PP) ペレット

## 試験結果

結果を、表 1 および図 1 に示す。最短滞留時間 25 分であった。残渣排出のピークは 120min~180min であった。

表 1 滞留時間測定データ

測定時間 [min]	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
排出原料(PP)重量 [kg]	0	0	0.001	0.003	0.005	0.013	0.045	0.26
滞留時間 [min]	5	15	25	35	45	55	65	75
残渣排出割合 [%]	0	0	0.01	0.02	0.03	0.07	0.23	1.3
原料供給速度 [ℓ/h]	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	0	0

測定時間 [min]	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160
排出原料(PP)重量 [kg]	0.65	0.97	1.05	1.47	1.36	1.47	1.3	1.33
滞留時間 [min]	85	95	105	115	125	135	145	155
残渣排出割合 [%]	3.25	4.85	5.25	7.33	6.8	7.35	6.5	6.65
原料供給速度 [ℓ/h]	0	0	0	0	0	0	0	0

測定時間 [min]	160-170	170-180	180-200	200-230	230-260	260-290	290-350
排出原料(PP)重量 [kg]	1.25	1.25	1.55	1.53	0.97	0.96	1.6
滞留時間 [min]	165	175	190	215	245	275	320
残渣排出割合 [%]	6.25	6.25	3.88	2.55	1.62	1.6	1.33
原料供給速度 [ℓ/h]	0	0	0	0	0	0	0

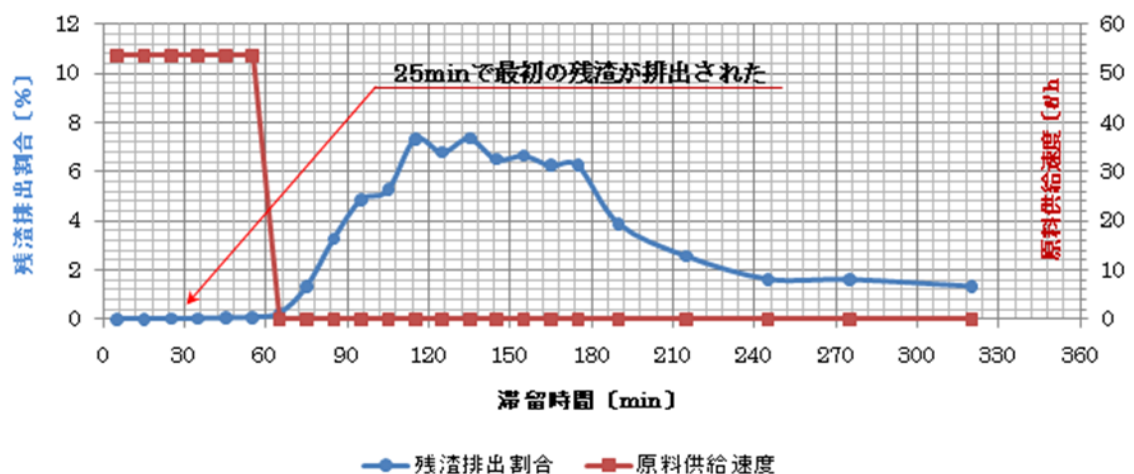


図 1 ロータリーキルン内での原料投入速度・滞留時間と残渣排出割合の関係

## 考察

今回の実証試験で使用したロータリーキルンは、その内部構造に特殊構造配列の壁を複数設け、原料が炉内で循環され滞留時間を確保できることと、炉内保有率をアップできる構造にしている。そのため、上記のような投入と排出の関係分布のようになったものと考えられる。

この実験結果では原料の滞留時間は最短で 25 分であったが、投入した原料は、アスベスト含有廃棄物ではなく代替物としての PP を用いている。この実験では、熱をかけずに常温で残渣排出割合を見ている為、(原料) = (残渣) となっているが、実際のアスベスト含有廃棄物の場合は、投入原料の内、約 50wt% がアスベスト含有無機物で残渣として排出されるので、排出する重量は、投入原料の約半分と考えられる。排出される残渣の嵩密度は、実測値で約 1.6 kg/ℓ、実際に投入されるアスベスト含有廃棄物の嵩密度は、実測値で約 0.46 kg/ℓ であるため、排出される残渣の体積は投入される原料の体積に対して、 $50\% \times 0.46 / 1.6 \approx 0.15$  となる。今回使用したロータリーキルン内の滞留時間は炉内の体積と反比例するため、同じ速度で原料を供給した場合、この実験結果の  $1/0.15 = 6.6$  倍滞留時間は長くなると考えられる。

このことから単純に計算すると、この設備設定条件下では、供給速度 53.6 ℓ/h でアスベスト含有廃棄物を供給した時の最短の滞留時間は、25 分 $\times$ 6.6=165 分になると考えられる。なお、10 t/d の処理の 1/10 サイズの実証試験機なので処理量が 42kg/h (重量換算)、91.3ℓ/h (体積換算) となり、滞留時間は、102 分となる。

## 結論

無害化・熱分解ロータリーキルンの回転数が 5rpm の際、アスベスト含有特別管理産業廃棄物原料を 42kg/h で供給速度としたときには、滞留時間 (min) を 30 分以上確保できると考える。

## 2. 無害化処理実証実験 1

アスベスト含有廃棄物の低温溶融無害化が、ベンチプラント及びラボ実験での条件で実証機実機の 1/10 サイズで無害化できることを、処理によって排出される大気放出排気ガス、生成ガス、生成油、生成残渣について分析し、確認した。また、連続投入による安定的な連続運転の可否を判断した。

### 試験条件

原料 名称 : アスベスト含有特別管理産業廃棄物 (現場より採取) + 現場使用済プラスチック系アスベスト付着廃棄物 (PE) (現場より採取) + 無害化融解剤 (20wt%)  
→ 減容固化したワーク

投入アスベスト含有吹付け材アスベスト含有率及び成分

クリソタイル : 5.2%      アモサイト : 14.5%      クロシドライト : 15.5%  
トレモライト/アクチノライト : 1.4%

アスベスト含有投入サンプル I C P 成分 (定性)

A L 2.3%、C a 6.7%、F e 1.0%、k 0.2%、M g 2.4%、M n 0.2%、N a 0.4%、  
S 0.3%、S i 1.0%、T i 0.3%

嵩密度 : 0.46 kg/ℓ

供給速度 : 21.0 kg/h ~ 44.0 kg/h 連続投入

総実験量 : 240 kg

無害化ロータリーキルン回転数 : 5rpm

無害化処理滞留時間 : 30min 以上

炉内無害化処理温度 : 炉内中心部気中温度 750°C 平均 (700°Cmin~800°Cmax)

設備能力 : 1 t / 24 h 処理 (42kg/h) 連続投入式外熱ロータリーキルン無害化・熱分解化炉



投入原料



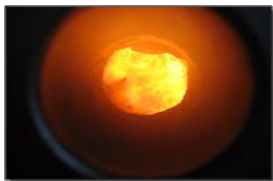
無害化・熱分解炉

### 試験結果

結果無害化ロータリーキルン内部温度御平均は、743°Cであった。無害化ロータリーキルン内部気中温度は、697°C～785°Cとばらつきがあった。

表 2 無害化分析結果

測定内容	項目	分析判定結果	備考
大気放出 排気ガス	流速	19.0 m/s	
	温度	174°C	
	水分	2.0 %	
	SOx	0.2 ppm	
	NOx	2.0 ppm	
	ダスト	<0.01mg/m <sup>3</sup> N	
	O <sub>2</sub>	20 %	
	石綿粉塵	不検出	アモサイト繊維 1 本確認
生成ガス	石綿粉塵	不検出	石綿繊維なし
生成油	石綿	不検出	X線回折でトレモライト/アクチノライトピーク確認、石綿繊維なし
溶融残渣	石綿	不検出	X線回折でクロシドライト・トレモライト/アクチノライトピーク確認、石綿繊維なし



生成ガスを燃焼し加熱熱源



溶融無害化後残渣

### 考察

#### -1). 無害化炉・熱分解ロータリーキルン炉内部温度について

内部温度がばらついているのは、温度測定部（熱電対先端）が、温度変化をしやすい炉内部中心の気体温度を測定している為である。経過時間 390 分のところで、一時その内部気中温度が 700°Cを下回り 697°Cとなった。これは、内部気中温度が 750°Cよりも低くなったため、原料の投入を一旦停止した時、それに伴い生成ガスの生成量・燃焼量が少なくなったためである。この時、内部温度が一時 700°Cを下回り 697°Cとなったが、ロータリーキルン内部の構造上、炉内には一定量の残渣が常に存在していることと、外側より加熱している外部加熱構造の為、投入されたアスベスト含有特別管理産業廃棄物原料の温度は、700°C以上になっていたと推測できる。

## 結論

ラボ実験・ベンチプラントでの結果を実証機稼働条件とし実証試験を行った結果、アスベストの無害化を確認することができ、処理条件の最適化、熱分解条件の最適化、各生成物へのアスベスト混入防止、大気放出排気ガスのアスベスト及び PCB 等有害ガスの混入防止も確認することができた。21 kg/h で連続投入し、12h 連続運転を生成ガスによる稼働を安定的に運転することができた。

### b. アスベスト無害化最適化条件の検討：ラボ実験

ここでは、アスベスト無害化処理の最適条件を検討するため、実験室において電気炉や熱重量分析装置(TG)を利用して各種アスベストと薬剤を加えたサンプルを熱処理し、その状態を調べた。アスベストには純粋な繊維のみの3種類のアスベスト(クリソタイル、アモサイト、クロシドライト)を用いた。一方、薬剤には実証試験で利用している珪酸ソーダ(3号： $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ +等量の水)に水酸化カルシウムや炭酸カルシウムを加えたものである。重量比でアスベスト：珪酸ソーダ：水酸化カルシウム=1:2:1の混合物を電気炉にて700℃、60分加熱したものは、クリソタイルでは多少の熔融が観測されるものの、拡大すると繊維が確認され、一方、アモサイトやクロシドライトではほとんど処理が行われていない結果が得られた。また、処理後のX線回折結果からも、クリソタイルでは、クリソタイルを示すピークが検出されなかったが、アモサイトやクロシドライトでは、ピークが検出された。これらの結果より、クリソタイル以外では700℃の処理では不十分であると考えられた。処理温度を750℃、処理時間を90分とした場合には、熔融状態が少し進む様子がうかがわれた。特にクリソタイルでは繊維が見られなくなっているが、アモサイト、クロシドライトではまだ一部、繊維状のものが観測された。

この様に温度の上昇によりアスベスト処理の進行を確認したものの、アモサイト、クロシドライトでは未だ十分とは言えず、その一方で、電気炉実験の場合の問題点として、正確な炉温度の管理やつぼ内の薬剤とアスベストとの混合状態が挙げられた。そこで、前者の解決としてTGによる精密な温度管理による処理を、後者に関しては薬剤を過剰(アスベスト：薬剤 1:20)に加えた状態で処理を行った。900℃、60minでのアモサイトとクロシドライトの結果から、水酸化カルシウムを加えずともアモサイトでは熔融が進み、繊維が無くなった。また、クロシドライトも繊維が見られているものの熔融物に埋もれている様子がうかがわれた。水酸化カルシウムを加えて750℃、60minで行った結果を以下に示す。クリソタイルだけは薬剤過剰で実験をせず、処理時間も1minである。結果を見ると、どのアスベストも比較的熔融が進み、繊維が独立して存在していないことがわかる。

これらのことより、アスベストは900℃程度であれば、珪酸ソーダとの混合で熔融が可能であること、カルシウムの存在下ではさらに低温熔融化が図られることが示唆された。これらはこれまでのアスベスト等の処理においても経験的に観測されていることであり、また $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$ 系や $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-CaO}$ 系の相図から推測された。また、当然のことであるが、混合状態は熔融条件に大きく依存することもわかる。

以上を総括すると、アスベストの低温熔融処理には、珪酸ソーダにカルシウム成分を加えることは効果があり、また処理前には十分に薬剤との混合を行うことにより、725℃以上で熔融処理が可能と考えられるが、安全サイドに寄ることを考えると、処理温度は750℃程度以上であることが好ましいと言える。



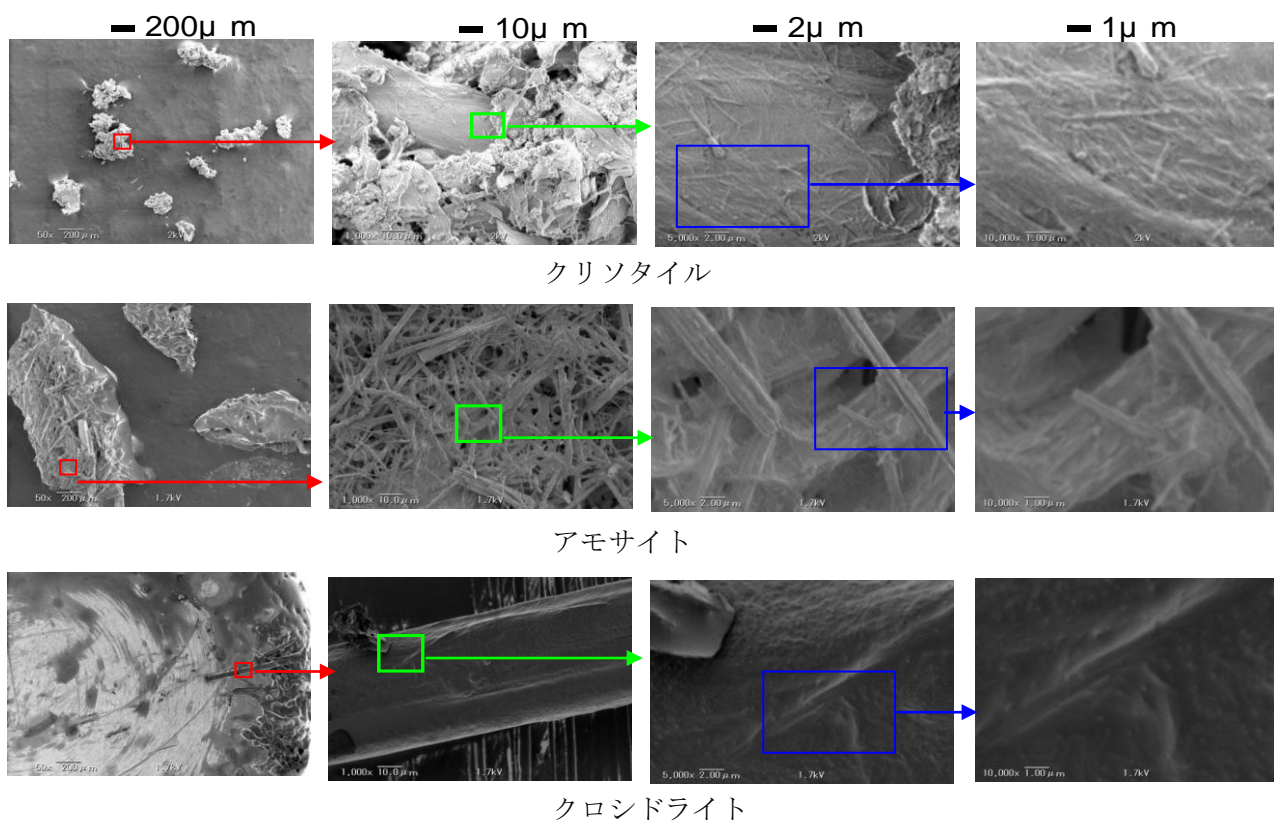


図 TG での処理後の SEM 観察結果 (750°C,60min)

## - ii 熱分解条件の最適化

### ① 熱分解条件の最適化：アスベスト系廃プラ燃料ガス化実験

本プロジェクトでは、溶融促進剤を利用し、温度を 700°C 程度に下げ、滞留時間を 20 分程度にすることでアスベスト繊維の溶融・無害化できることが別途明らかになっている。ポリエチレンを主体とする廃プラスチックを燃料化する際に、アスベスト繊維の溶融・無害化を行うのと同じ加熱装置で熱分解し燃料を製造するのか、アスベスト無害化加熱装置とは別の加熱装置で廃プラスチックからの燃料製造を行い、得られた燃料をアスベスト無害化加熱装置に供給するのがシステム構築上の課題となった。設備コスト削減、エネルギー消費低減を考えると、アスベスト加熱無害化と廃プラスチック加熱燃料化を同一の装置で共用できることが望ましい上、廃プラスチックに付着している可能性のあるアスベスト繊維を無害化することを考えても十分な加熱処理が必要となると考えた。

廃プラスチックを燃料化する場合、固形燃料、液体燃料、ガス燃料の 3 種が候補となる。アスベストがわずかでも付着していることを念頭に置くと、700~800°C 程度でアスベストの無害化処理をしながら、廃プラスチックも同じ条件で処理することで、それに含まれる微量のアスベストをも無害化することが望まれる。

廃プラスチックからの固形燃料の製造は 200°C 程度の温度域の固化成形で行われる。アスベスト繊維は残留したままとなる。これを燃料として、アスベスト無害化熱処理装置に供給すると、固形燃料は溶融・油化しながら燃焼するが、アスベスト繊維が熱履歴を十分受けずに燃焼排ガスに混入し、アスベスト繊維が排ガスとして施設外に排出される恐れがある。また、固形燃料を用いた連続燃焼と温度制御が可能な実用装置が国内メーカーを調査した範囲では見当たらず、廃プラスチックから固形燃料を製造し、これをアスベスト無害化熱処理装置に供給し、温度制御するシステムは実用化できないと判断した。



液体燃料の製造は、一般的にはタンク式反応器を用いてタンク内表面温度 500~600℃で実施される。熱可塑性樹脂の熱分解自体は容易であるものの、その主体がポリエチレンである場合、ワックス状に固化しやすい生成物が得られることがよく知られている。特に冬期には、燃料油の貯蔵やバーナーへの供給に加温が必要となる。さらに加熱温度が 500~600℃であることから、含有されうるアスベスト繊維は無害化できない。これを 700℃以上に加熱した場合でも、プラスチック自身の熱分解は 400℃前後でおき、炭化水素油に変化した場合、炭化水素油の沸点は高々 400℃なので炭化水素油が揮発するときに、アスベスト繊維は炭化水素油やより高分子量のオリゴマーに随伴して気相に留出されることが懸念される。

廃プラスチックを熱分解してガス化する手法は、これまで流動床や噴流床反応器といった秒単位の短い滞留時間と 1000℃を超える高温で実施される例が一般的であった。容器包装リサイクル法のもと、酸素や水蒸気をプラスチックと反応させ、水素と一酸化炭素を発生させ、アンモニアやメタノールの合成原料を製造した例がある。これは、装置が大型で流動化ガスを用いるなど高コスト施設となるのが避けられず、運転も容易とはいえない。さらに、短い滞留時間は、廃プラスチックとアスベストの性状、熱的挙動が異なるなど、装置内の気流の状況によっては、アスベスト無害化が不十分となることも考えられる。一方、スクリー搬送機を用いた水平移動床方式の廃プラスチック熱分解が発表されている。文献 (Y. Kodera, et al., Energy Fuels, 20, 155-158, 2006) によれば、装置温度 700℃、滞留時間 20 分の条件で、ポリプロピレンが 80 重量%以上の収率で炭化水素ガスへとガス化された例がある。装置は硅砂を熱媒体として用いた移動床方式である。本プロジェクトで使用可能な実証プラントは水平移動床方式については存在しないが、バイオマスガス化に実証例のある循環移動床方式外熱キルンが原理的に共通している。すなわち、熱媒体として硅砂を含む固形物を使用していること、内部のフィンが固形物を装置内で移動させ、一様な加熱処理を実現していること、この加熱固形物中にある廃プラスチックが徐々に溶解、分解、気化し、かつ気化物がフィンの作用でタンク式反応器とは異なり、気化して直ちに加熱装置外へ留出することなく、反応を継続しガス化にいたること、などアスベスト無害化と同じ反応器内で、同様な加熱温度域でガス化反応が進行すると期待される。

以上の検討から、アスベスト無害化および廃プラスチックガス化を同一の装置内で行うことをシステムとして構成した。実証には、実証プラントとして循環移動床方式外熱キルンを採用することを念頭に、アスベスト繊維が廃プラスチックの分解生成物にどのように分配されるかについて、水平移動床方式熱分解ベンチプラントを用いて検討することとした。アスベスト繊維の行方については、(株) ストリートデザインで実施することとし、アスベスト繊維の模擬試料として、無害のロックウールを使った廃プラスチックガス化を (独) 産業技術総合研究所で実施した。

スクリー搬送機と管状反応器からなる水平移動床熱分解ベンチプラント (図 1 2) を使用し、ロックウール廃プラスチック混合試料の熱分解を行った。反応管は全長 1200mm、内径 70mm で、電気ヒーターで加熱されている。均熱体の長さは 600mm である。スクリー搬送機はインバーターモーターを使用して、試料の搬送の速さを変えることで、熱媒体として加える硅砂と随伴して移動する固形試料や溶解プラスチックおよび高沸点の熱分解油が均熱帯で滞留する時間を制御することができる。プラスチックの滞留時間は硅砂 5 号が均熱帯を通過するに要する時間を測定し、プラスチックの滞留時間とした。また、本反応器では、揮発した低沸点の熱分解油もスクリー歯と硅砂のため、反応管から容易には留去することなく、伝熱が行われ、低分子化が促される特徴がある。

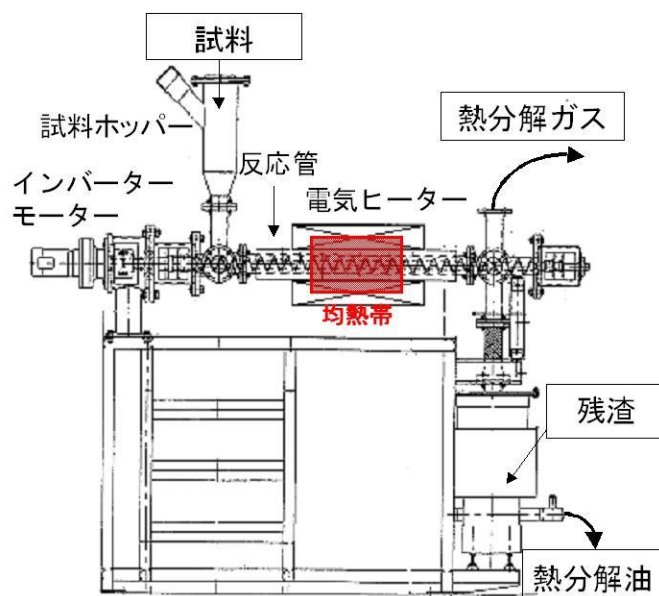


図 1 2 水平移動床方式熱分解ベンチプラント

プラスチック試料として、(株) ストリートデザインから提供されたポリエチレンを主成分としたプラスチック粉碎品を用いた。試料組成や特徴を表 4 にまとめた。熱媒体として用いた珪砂 5 号 (粒径 0.3-0.8 mm) である。アスベスト模擬物質としてロックウールを使用した。イビデン (株) 製のイビウール綿状品を破碎し、プラスチック粉碎品、珪砂と混合して熱分解試料とした。熱分解試料はあらかじめ試料ホッパーに充填し、ベンチプラント内部を窒素で置換し反応器外表面温度を 700°C に加熱した。窒素気流を止め、インバーターモーターでスクリー搬送機を作動させ、試料を均熱帯に搬送した。試料が加熱帯に移動し、熱分解ガスが生成した。珪砂が均熱帯を通過する時間は 20 分とした。熱分解ガスは冷却管を経て、ガスメーターで体積が計量され、水封器を通過して排気された。熱分解残渣と熱分解油は残渣受器で貯えられた。受器には、パンチングメタル製の容器があり、残渣は容器内に、熱分解油は容器の下に流下し、貯えられる。表 5 に実験条件と発生ガス量をまとめた。

表 4 ロックウール含有混合試料の特徴

組成：珪砂 5 号 3.60 kg
ポリエチレングラッシュ加工品 0.40 kg
ロックウール破碎物 0.02 kg
ポリエチレングラッシュ加工品の内容：養生材、防護服等の PE t=0.15mm シートを破碎機にて破碎した試料
ロックウールの特徴：イビウール繊維 (イビデン社製セラミック繊維) 融点 1260°C

表5 ロックウール含有混合試料の代表的な熱分解結果\*

番号	反応条件	生成物
S14A	反応管外表面温度 700°C 滞留時間 5分 (モーター制御 14Hz)	熱分解ガス 121.7 L
S14B	反応管外表面温度 700°C 滞留時間 5分 (モーター制御 14Hz)	熱分解ガスの採取のため、ガス量は未測定。熱分解油 336.3 g (残渣からの分離回収分)
S15A	反応管外表面温度 700°C 滞留時間 20分 (モーター制御 4Hz)	熱分解ガス 229.8 L (ガス温 24.1°C)。 熱分解油 31.77 g。 残渣 (付着油を含む) 3.724 kg
S18	反応管外表面温度 500°C 滞留時間 20分 (モーター制御 4Hz)	熱分解ガス 20.8 L (ガス温約 24°C)。 熱分解油 26.20 g。残渣 (付着油を含む) 3.801 kg
S25	反応管外表面温度 600°C 滞留時間 20分 (モーター制御 4Hz)	熱分解ガス 208.5 L (ガス温約 24°C)。 熱分解油 71.11 g。残渣 (付着油を含む) 3.841 kg

\*試料は表4に示したロックウール含有試料 4.02 kg を用いた。

反応温度は、反応管の外表面温度でモニター、制御される。4mm厚の SUS316 の反応管を用いており、入熱 52.0 W、SUS316 の熱伝導度を 22.4 W/m・K、外表面温度を 700°C とすると、反応管内表面温度の計算値は 596°C であった。

熱分解過程で生成したロックウールの粉砕物やその繊維を、熱分解ガス、熱分解油、熱分解残渣それぞれの分画についての分析結果を表6にまとめた。

表6 ロックウール含有混合試料の熱分解生成物でのロックウール検出結果\*

番号	温度,滞留時間	試料, 検出数 (Mf/g)	各試料の回収量	各試料への分配量 (計算値) (Mf)
S14B	700°C, 5分	ガス、— 液体、0.069 残さ、66	ガス、121.7 L 液体、336.3 g 残さ、—	— 23 —
S15A	700°C, 20分	ガス、0.00030 Mf/L 液体、0.033 残さ、530	ガス、229.8 L 液体、31.77 g 残さ、3.724 kg	0.069 1.0 1970000
S25	600°C, 20分	ガス、— 液体、0.0081 残さ、58	ガス、208.5 L 液体、71.1 g 残さ、3.841 kg	— 0.58 220000
S18	500°C, 20分	ガス、— 液体、0.0020 残さ、8.1	ガス、20.8 L 液体、26.20 g 残さ、3.801 kg	— 0.052 31000

\*試料は表4に示したロックウール含有試料 4.02 kg を用いた。

熱分解ガスの平均分子量は推算をもとに、30 g/mol とすると、229.8 L (24℃) から 283 g が与えられ、原料中のポリエチレン重量 400 g から収率 71% が得られた。生成物分布については、ベンチプラントによる実験であるので、前実験からの残渣の残存や装置内や残渣への油の付着などのため、物質収支はある程度不正確にならざるをえない。しかしながら、ガス、液体、残さでのイビウル繊維の検出結果から、繊維は大部分が残渣に分配しており、ガス生成物への分配は残渣中の繊維本数の  $10^8$  分の 3 程度であることがわかった。このことから、実証研究で残さ中のアスベストが十分に少ないことが確認できれば、アスベスト繊維の熱分解ガス中の繊維数は無視できる量であると結論できる。

ポリエチレンペレットを反応管外表面温度 700℃、滞留時間 20 分の条件でガス化したときの反応結果を表 7 にまとめた。ポリエチレンペレット ((株) プライムポリマー製 Hizex6300M) を用いた。C1 はメタン、C2 はエチレン、C3 は主にプロピレン、C4 はブタンおよびブテンの異性体混合物である。また、C5, C6 に相当する炭化水素化合物もガスクロマトグラム上に観察された。ガス発生量から算出された収率は 75 重量% であった。

表 7 ポリエチレンペレットガス化の結果 (700℃、20 分)

発生ガス量	421 L, 収率 75.0 重量%
生成油	78.4 g, 収率 19.6 重量%
ガス組成 (単位、重量%)	C <sub>1</sub> 12.7, C <sub>2</sub> 34.3, C <sub>3</sub> 21.1, C <sub>4</sub> 17.6, C <sub>5</sub> 12.4, C <sub>6</sub> 1.9
平均分子量	33.0 g/mol

## ②アスベスト含有廃プラスチックの熱分解実験：繊維行き先確認実験

アスベスト繊維含有廃プラスチックの熱分解ガス化実験を水平移動床方式熱分解ベンチプラントを用いて、(株) ストリートデザインの実験場で実施した。廃プラスチックガス化はアスベスト繊維が溶融促進剤存在下で溶融する温度よりも低い温度で進行する。反応管外壁温度 700℃ であれば内表面は約 600℃ となると推算される。このとき、炭化水素ガスが 75% 収率で得られた。そこで、アスベスト繊維の溶融無害化が完結しない反応管外壁温度 700℃ (内壁推算温度 600℃)、滞留時間 20 分でポリエチレンガス化を行う際に、熱分解ガス、熱分解油、残渣にどのように分配されるかを確かめるために実験を行った。用いた試料の組成と性状を表 8 に、また、無害化と熱分解ガス化の結果を表 9 にまとめた。得られた各種生成物中のクリソタイルおよび疑フォルステライト (以下、これらをアスベスト繊維と総称する) を分析し、表 10 に分析結果をまとめた。

表 9 で、溶融促進剤が添加された試料の熱分解では、ガス化収率が 10% 低下した。これが有意な差であるとする、溶融促進剤添加のため、投入した熱量の一部が溶融促進剤の加熱や溶融反応に利用されたため、熱量不足でガス化やそれに先立って起きるプラスチックの溶融、熱分解油化に時間を要し、収率低下につながった可能性がある。

反応管内壁の温度は約 600℃ と推算され、この温度で残留するアスベスト繊維の量 (表 9) は、溶融促進剤を添加した場合、添加しない場合に比べて、残渣における量比は分析検体同士の比較で、 $66/360 = 0.18$  であった。分析検体の繊維量 (Mf/g) と残渣量 (kg) から総量を推算した場合、 $(66 \times 6730) / (360 \times 6609) = 0.19$  であった。いずれの場合もおよそ 5 分の 1 以下となったことがわかった。

ガスおよび残渣中の繊維数の比は、溶融促進剤を添加した場合で、 $1.7 \times 10^{-8}$  : 添加しない場合で、 $1 : 9.6 \times 10^{-6}$  : 1 であった。アスベスト繊維が溶融せず、試料中に存在する反応条件で、繊維はガスよりも残渣に百万倍以上の本数が観察された。

試料として組成 A の固形化物を使用した場合（番号 D21）、ガス、液体、残渣中のアスベスト繊維はそれぞれ、0.00059 Mf/L、0.029 Mf/g、63 Mf/g であった。ガスおよび残渣中の繊維数の比は、 $9.4 \times 10^{-6} : 1$  となった。破砕品（番号 OC30A）を試料として使用した場合とその固形化物（番号 D21）を使用した場合には、残渣中のアスベスト繊維の検出量は 66 および 63 Mf/g と近く、いずれも溶融剤の効果が現れていると考えられる。一方、熱分解ガスから検出された繊維数は、破砕品においては 37 f/L、固形化物においては、590 f/L と 10 倍以上の濃度で検出された。有意な差であるか否かはさらに検討を要するが、固形化物の場合、伝熱速度が遅いため、繊維溶融が進行する前に、プラスチックガス化に伴い繊維が気相に揮散した可能性もある。

表 8 アスベスト繊維含有混合試料の特徴

組成 A : 珪砂 5 号 7.20 kg
ポリエチレングラッシュ加工品 0.40 kg
クリソタイル 6%含有吹付け材 0.40 kg
溶融促進剤 0.08 kg
組成 B : 珪砂 5 号 7.20 kg
ポリエチレングラッシュ加工品 0.40 kg
クリソタイル 6%含有吹付け材 0.40 kg
ポリエチレングラッシュ加工品の内容 : 養生材、防護服等の PE t=0.15mmシートを破砕機にて破砕した試料

表 9 アスベスト繊維含有混合試料の代表的な熱分解結果\*

番号	試料、反応条件	生成物
OC30A	試料 : 組成 A (表 3) 反応管外表面温度 700°C 滞留時間 5 分 (モーター制御 14Hz)	熱分解ガス 206.6 L (収率 70.0 重量%) 熱分解油 141.0 g (残渣からの分離回収分*) 残渣 6.73 kg
OC30B	試料 : 組成 B (表 3) 反応管外表面温度 700°C 滞留時間 20 分 (モーター制御 4Hz)	熱分解ガス 238.5 L (収率 80.8 重量%) 熱分解油 87.14 g (残渣からの分離回収分*) 残渣 6.61 kg

\*使用した珪砂の湿分由来の水分を含む。

表 10 アスベスト含有混合試料の熱分解生成物でアスベスト繊維の検出結果

番号	試料、検出数 (Mf/g)	各試料の回収量	各試料への分配量 (総量の計算値) (Mf)
OC30A	ガス、0.000037 Mf/L 液体、<0.01 残さ、66	ガス、206.6 L 液体、141.0 g 残さ、6.732 kg	0.0076 <1 440000
OC30B	ガス、0.095 Mf/L 液体、0.02 残さ、360	ガス、238.5 L 液体、87.14 g 残さ、6.609 kg	23 2 2400000

### - iii 排ガス中への飛散アスベストやPCB等ハロゲン系有害物質の混入防止

#### ①大気プラズマによる疑似アスベスト繊維の処理

飛散性アスベストは空中に浮遊しているアスベストであり、環境や人体への影響が大きい。特に本処理施設から排出される可能性を想定し、ここでは、排気ガスに含まれる飛散性アスベストをマイクロ波空気プラズマによって処理する方法を検討した。用いるマイクロ波空気プラズマは、マイクロ波をエネルギーとする無電極放電で生成され、高温ガスを持つ他、小型装置のため、実施される処理施設に簡単に取り付けられる特徴を持つ。更に数百Wから空気を安定にプラズマ化することが可能で、また排ガスを同時に処理することもできる。ここでは、アスベスト疑似物質として市販のセラミックウールとステンレス繊維を実際にプラズマ処理し、その処理状態の解析を行った。

実験装置図を以下に示す。粒子はプラズマ上部より粒子供給装置とキャリアガス（空気）で定常に導入し、水中に張ったろ紙によってプラズマ処理された後の粒子を回収し、その後、SEMによって変形や熔融状態を観察するとともに、X線回折で相変化を調べた。試料としてセラミックス繊維（IBI Wool）、ステンレス繊維（SMF300UE）、ムライト繊維（Fiber max）の3種を使用した。実験パラメータは粒子供給速度、投入電力である。

プラズマ処理前後の繊維粒子のSEM画像解析により実験前では針状粒子が含まれ、球状の粒子はほとんど見あたらないが、実験後ではIBI WoolとSMFについて球状粒子が現れ、また粒子も大きくなるなどプラズマ処理の効果が見られた。しかしながら、Fiber maxではあまり処理効果が見られなかった。

SEM画像の結果からアスペクト比（AR）や針状消失率（V）を以下の（1）と（2）式を用いて計算した。ここで、WHOによって定められた危険なアスベストはアスペクト比が0.33以下のものなので、針状含有率を0.33以下の投影面積の粒子の割合とした。

$$AR = \frac{W}{L} \quad (1)$$

$$V = \frac{\sum AR \leq 0.33 \text{を持つ粒子の投影面積}}{\sum \text{粒子の投影面積}} \times 100\% \quad (2)$$

解析の結果、個数平均アスペクト比の変化はすべてのファイバーで大きくなったことより、プラズマにより細長い粒子が消失していることが示唆された。針状含有率については、IBI Woolは減少し、ステンレス繊維では減少した後上昇、ムライト繊維ではあまり変化しない結果となった。これらはそれぞれの繊維の融点や繊維同士の融合状態に起因すると考えられた。本実験条件の粒子濃度は実際の排出条件と比較すると相当大きいものと思われるが、IBI Woolの融点が約1600℃、アスベスト類はクリソタイルで同程度、アモサイトやクロシドライトはこれより数百℃低いことから、マイクロ波プラズマ処理法は飛散性アスベスト処理に十分、効果があるものと考えられた。

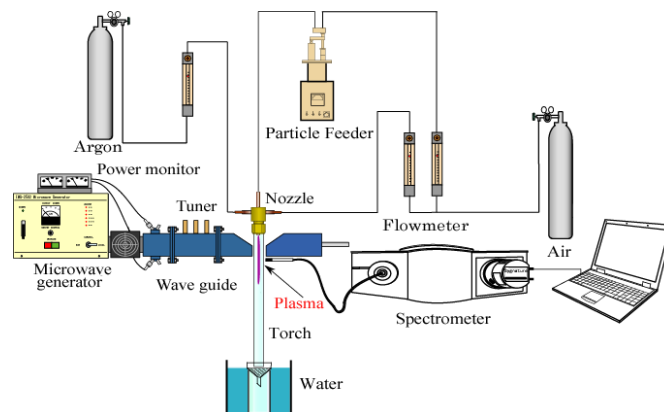


図 プラズマ処理実験装置図

- iv 無害化処理物の再資源化および CO<sub>2</sub>排出削減効果

無害化処理物の再資源化および CO<sub>2</sub>排出削減効果について検討した。結果を表 1 2, 1 3, 1 4 に示す。残差は Si 10.1%、Ca 6.9%、Al 2.3%、Mg 1.9%等が主成分となる再生資源なので、精錬融解剤、土壌改良剤、路盤材等再生製品原料として検討可能である。生成ガスについては、実験時、実証試験時に実際熱風炉燃焼ガスとして連続使用し十分な熱量を確保できた。再生ガスとしての再生エネルギーとして利用可能である。

表 1 2 生成残渣成分分析データ表

元素	成分分析結果	
	イニシャル(%)	無害化後残渣(%)
Al	2.3	2.3
Ca	6.7	6.9
Cu	N. D.	0.2
Fe	1.0	0.4
K	0.2	0.2
Mg	2.4	1.9
Mn	0.2	0.2
Na	0.4	2.1
S	0.3	0.3
Si	1.0	10.1
Ti	0.3	0.4

表 1 3 生成ガス成分分析データ表 (濃度 %)

水素	H <sub>2</sub>	26.0
メタン	CH <sub>4</sub>	25.4
CO	CO	5.70
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	4.71
エチレン	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	21.4
エタン	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.30
アセチレン	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.30
プロピレン	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	3.13
プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.17
イソブタン	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.00
ノルマルブタン	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.02
ブテン+ブタジエン	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1.20
ベンゼン	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1.82
トルエン	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub>	0.14
窒素	N <sub>2</sub>	0.36
他	O <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O、C <sub>5</sub> 炭化水素 等	6.40
総発熱量	40,640 kJ/m <sup>3</sup>	
真発熱量	37,390 kJ/m <sup>3</sup>	

### 10t/dのアスベスト処理のCO<sub>2</sub>排出量の比較（理論値）

原料：10t/d（アスベスト含有特別管理産業廃棄物 5t/d、プラスチック（PE）系アスベスト付着特別管理産業廃棄物 5t/d）を処理する場合、原料あたりのCO<sub>2</sub>発生量は、下記ようになる。

但し、この理論値計算は、処理する原料のプラスチック（PE）系アスベスト付着特別管理産業廃棄物を熱源として使い発生するCO<sub>2</sub>とガス化した生成ガスを燃料としたときのCO<sub>2</sub>発生量の比較であり、高温熔融炉でメインとして使われるガスまたは油などの新たな化石燃料から発生するCO<sub>2</sub>については、不明なため含まれていない。

#### ①焼却の場合

原料中の炭素は、ポリエチレンの分子が(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>なので

$$5\text{t/d} \times (12 \times 2) / (12 \times 2 + 4) = 4.286 \text{ t/d}$$

炭素 1g でのCO<sub>2</sub>は、(12+16×2) / 12 = 3.667g 発生することになるので

$$4.286 \text{ t/d} \times 3.667\text{g} = 15.72\text{t/d}$$

よって、原料あたりのCO<sub>2</sub>発生量は、

$$15.72\text{t/d} / 10\text{t/d} = \underline{1.572 \text{ t-CO}_2/\text{t-f}}$$

#### ②ガス化（油）させた場合

原料の炭素分はすべてガス、油または残渣に付着して排出されるためCO<sub>2</sub>発生はないものと考えられる。（原料のガス化に必要な熱量は考慮しない）

#### ③プラスチック系（PE）を熱分解しガス化させた生成ガスを燃料として使用した場合

燃料の使用量：2.708 t/d（10t/dの設計データより）

このうち炭素 C 成分は、128.79N m<sup>3</sup>/d（実証試験生成ガスデータより）

CO<sub>2</sub>は、5.85N m<sup>3</sup>/h であるので、プラスすると合計 134.64N m<sup>3</sup>/h となる。

よって、原料あたりのCO<sub>2</sub>発生量は、

$$(134.64\text{N m}^3/\text{h} \times 44 / 22.4 + 24) / (10\text{t/d}) = \underline{0.635 \text{ t-CO}_2/\text{t-f}}$$

表 1 4 CO<sub>2</sub>発生量比較表

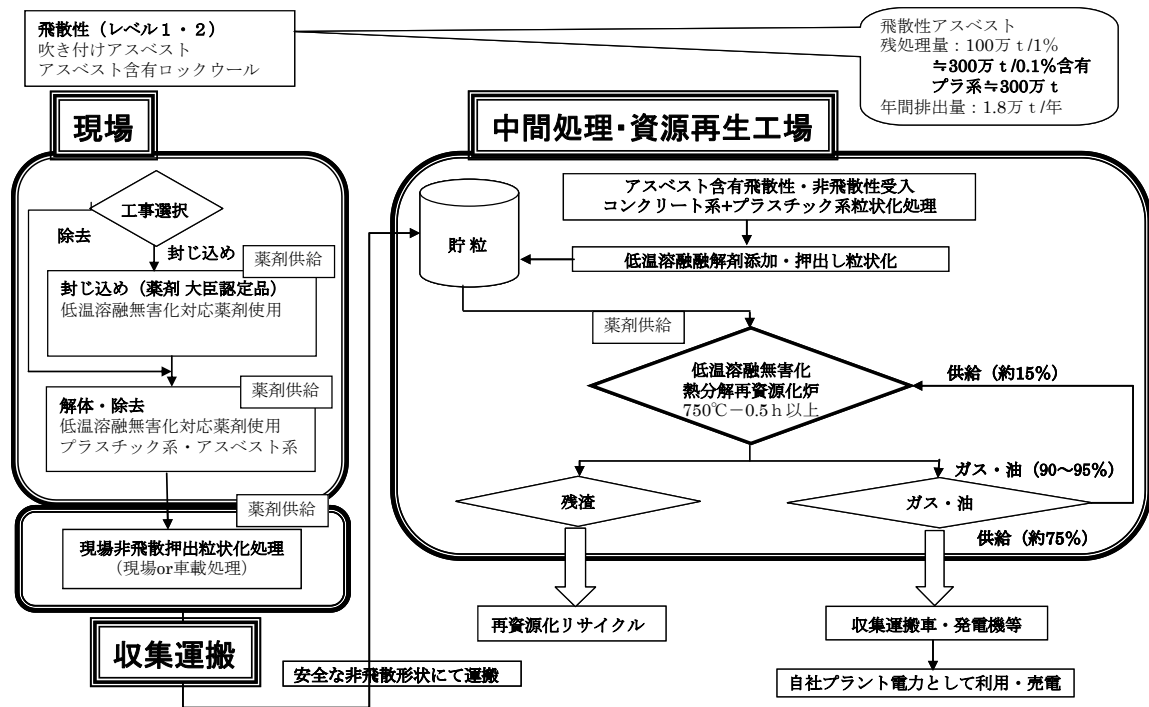
CO <sub>2</sub> 削減量試算	高温熔融炉	無害化・熱分解炉 (発生ガスを燃料として利用)
無害化処理温度	1500°C	700°C
原料処理量	10,000kg/d	10,000 kg/d
プラ系(PE)含有量	5,000kg/d	5,000 kg/d
アスベスト系含有量	5,000kg/d	5,000 kg/d
熱源	原料 PE+ガス or 油	生成ガス
熱源使用量		2,980N m <sup>3</sup> /d(実績値)
		2,708 kg/d(比重 0.908)
CO <sub>2</sub> 発生量(原料由来)	15,720kg/d	0 kg/d
CO <sub>2</sub> 発生量(熱源由来)	不明	6,347 kg/d
CO <sub>2</sub> 発生量(合計)	15,720 kg/d+α	6,347 kg/d
原料当りのCO <sub>2</sub> 生成量	1,572+α t <sub>CO2</sub> /t	0.635t <sub>CO2</sub> /t

化石燃料燃焼より発生するCO<sub>2</sub>発生量を除き原料あたりのCO<sub>2</sub>発生量だけ見てもCO<sub>2</sub>発生量削減には、大きく貢献することができる。



- v 実用化に資する導入シナリオとビジネスモデルの策定

結果から得られるビジネスモデルと試算



ビジネスモデルフロー図

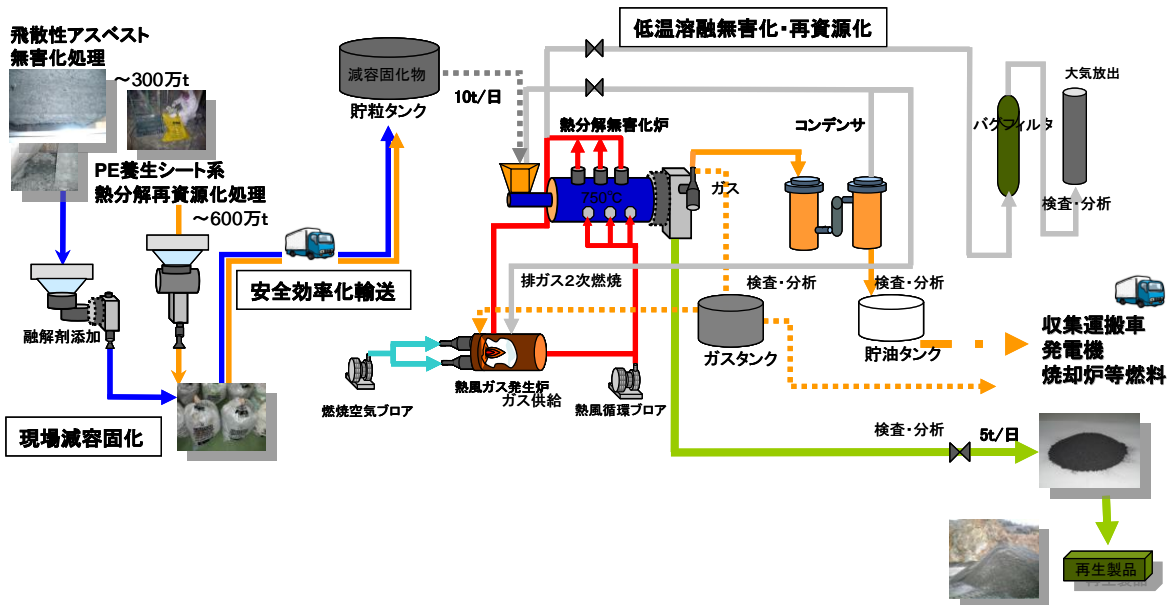
上記、ビジネスモデルフローにおいて現場、収集運搬工程では、現状工程と比較した場合、

減容化率  $1 - (6.6 \text{ m}^3 / 57.6 \text{ m}^3 \times 100) = 88.55\%$

コスト削減率  $1 - (1,735,300 / 3,476,160 \times 100) = 50.11\%$  (差異発生部のみ)

の効果があることになり、アスベスト処理工程における除去回収現場、収集運搬工程より安全性を確保し、事業性のあるビジネスモデルを確立できる。

アスベスト除去回収現場から無害化処理・再資源化までの概要構成図



一方、ビジネスモデルフローにおいて、中間処理・資源再生工場側での経済性試算は、10t/d 処理した際の収支（10t/d 処理機 1 台を稼動）を検討した。

10t/d 処理機 1 台あたりの事業初期投資から回収までの試算

必要資金		収支計算	
土地購入費用	100百万円	溶融売上	420百万円
環境アセスメント	15百万円	(+再資源収入	299百万円)
造成・建築費用	100百万円	売上合計	420百万円
設備製造費用 (製造原価)	600百万円	原価	84百万円
運転資金等	50百万円	人件費	36百万円
合計	865百万円	減価償却費	37百万円
		その他費用	39百万円
		費用合計	196百万円
		営業利益	223百万円
		キャッシュ・フロー (税引後)	149百万円

キャッシュ・フローベースで約17%の収益性  
投下資金は約4.5年で回収可能

実用化した際の経済性は、十分に魅力あるものとして事業化は可能である。

## - vi 実用化（1/10 スケール）装置による実証試験（環境省無害化認定実証試験）

これまでの試験の結果を踏まえ技術的検討を重ね、事業として実用化を図るため環境省無害化認定実証試験内容に則り実証試験を行った。

### 1. 実証試験概要

ここでは、環境省無害化認定制度申請基準に則った、石綿を含有する一般廃棄物（及び産業廃棄物）を低温溶融無害化・再資源化処理（以下、本処理、という）により「廃棄物の処理及び清掃に関する法律第 9 条の 10 第 1 項（及び法第 15 条の 4 の 4 第 1 項）」で定める基準に適合する無害化処理が行え、かつ同時に再資源化処理が行えることを実証するために行った試験に関し、その結果について以下にその内容を述べる。

### 2. 試験の目的

#### （1）無害化の確認

- ①本処理により回収された固体残渣中の石綿濃度が、規制値以内であること。
- ②本処理により回収された生成ガス中の石綿濃度が、規制値以内であること。
- ③本処理により回収された生成油中の石綿濃度が、規制値以内であること。
- ④本処理における排ガス中の石綿濃度が、規制値以内であること。
- ⑤本処理中の施設内外の大気中の石綿濃度が、規制値以下であること。

#### （2）再資源化の確認

- ①本処理により回収された生成ガスあるいは生成油を、熱風ガス発生炉用の燃料として正常に利用できること。

②本処理により回収された固体残渣がスラグのような塊状ではなく、更々とした粒状であり建材用骨材等として再利用が容易な形態であること。

3. 試験実施場所

岐阜県飛騨市神岡町1-1 三井金属エンジニアリング株式会社 神岡支店内

4. 試験実施体制

実施責任者 : 株式会社ストリートデザイン

5. 実証試験施設

(1) 実証機器設計製作

三井金属エンジニアリング株式会社

(2) 実証炉性能緒元

- ①方式 : 外熱式資源循環型ロータリーキルン炉
- ②処理能力 : 42kg / 時間 → 1ton/日 (24 時間連続運転として)
- ③滞留時間 : 30 分以上
- ④処理温度 : 炉内中心ガス温度として 700~800°C (750°C±50°C)
- ⑤熱風ガス発生炉燃料 : アスベスト無害化時に生成したガス (点火時のみ LP ガス)

(3) 実証炉の設計

①設計条件

運転時間	24 hr/日		
原料	1 ton/日	-	42 kg/hr
	重量比	重量 kg/hr	比熱 kcal/(kg·°C)
	廃石綿	20	0.19
	PE	21	0.55
	薬剤	1	0.19
	平均		0.31
	合計	42	-
生成物	重量 kg/hr		
	生成残渣	22	← 廃石綿+薬剤+(PEの
	生成ガス	18	←(生成ガス+生成油)の
	生成油	2	
	合計	42	

②熱収支計算

室温	20	°C	
ガス化温度	700	°C	
PE熱分解温度	500	°C	←400~500°Cで分解安全側で500°C

a) 設計データ

原料廃石綿比熱	0.19	kcal/(kg·°C)	←石綿比熱より
原料PE比熱	0.55	kcal/(kg·°C)	←PE比熱より
原料薬剤比熱	0.19	kcal/(kg·°C)	←石綿とみなす
PE分解熱	455	kcal/kg	←実験データより
生成残渣比熱	0.19	kcal/(kg·°C)	←石綿比熱より
生成ガス比熱	0.82	kcal/(kg·°C)	←実験データより
生成油比熱	0.82	kcal/(kg·°C)	←実験データより

b) 必要熱量

入	原料石綿	$0.19 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \times 20 \text{ kg} \times 20^\circ\text{C} =$	76 kcal/hr
	原料PE	$0.55 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \times 21 \text{ kg} \times 20^\circ\text{C} =$	231 kcal/hr
	原料薬剤	$0.19 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \times 1 \text{ kg} \times 20^\circ\text{C} =$	4 kcal/hr
	小計		311 kcal/hr
出	原料昇温熱量(～500℃)	$0.37 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \times 42 \text{ kg} \times 500^\circ\text{C} =$	7,770 kcal/hr
	PE分解熱量	$455 \text{ kcal}/\text{kg} \times 21 \text{ kg} =$	9,555 kcal/hr
	生成残渣持出熱量	$0.21 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \times 22 \text{ kg} \times 200^\circ\text{C} =$	924 kcal/hr
	生成ガスタール持出熱	$0.82 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \times 20 \text{ kg} \times 200^\circ\text{C} =$	3,280 kcal/hr
	キルン炉からの熱ロス	$10 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \times 4.1 \text{ m}^2 \times 30^\circ\text{C} =$	1,230 kcal/hr
小計		22,759 kcal/hr	
必要熱量			22,448 kcal/hr

c) ガス化実証炉供給熱量

ガス化炉の熱伝達計数	41 kcal/(h・m <sup>2</sup> ・℃) [実験値]
安全率	0.8 とすると
設計熱伝達係数	32.8 kcal/(h・m <sup>2</sup> ・℃)
キルン炉内面積	2.3 m <sup>2</sup>

	ガス化炉入口部	ガス化炉出口部
熱風温度	700 °C ←	1100 °C
残渣温度	450 °C →	700 °C
温度差	250 °C	400 °C
平均温度差	325 °C	

よって、供給熱量は 24,518 kcal/hr ≥ 22,448 kcal/hr  
したがって、原料 42 kg/hr の処理は可能である。

6. 実証試験試料

(1) 試料の作製

- ①石綿含有吹き付け材を石綿除去工事現場より採集、工事に用いた養生シート・防護服・マスク等のプラスチック系廃棄物と共に二重プラスチック袋に梱包保管。
- ②破砕機にてプラスチック系廃棄物を破砕。
- ③石綿含有吹き付け材と破砕プラスチック系廃棄物の混合物に薬剤を配合・混練。
- ④加熱押出機に投入し、プラスチック系廃棄物を溶融させペレット化。
- ⑤破砕機にかけ、フレーク状の試料とし、二重プラスチック袋に梱包保管。

(2) 組成 : 石綿含有吹き付け材 47.5%・廃プラスチック (PE) 材 50.0%・薬剤 2.5%

(3) 石綿含有量 : 実証試験に用いた吹き付け材中の石綿含有量は、以下の通り。

クリソタイル	アモサイト	クロンドライト	トレモライト/ アクチノライト
5.2 %	14.5 %	15.5 %	1.4 %

## 7. 実証試験状況

①実施月日：平成 21 年 12 月 18 日

②試験条件：

- a) 試料名称 : 石綿含有フレーク状廃棄物（現場減容固化処理品）
- b) 試料かさ密度 : 0.46 kg/L
- c) 処理温度 : 725～800℃（炉内中心気中温度 750℃－25℃）
- d) 処理速度 : 17.9～35.7 kg/hr
- e) キルン回転速度 : 5rpm（滞留時間 30min 以上確保）

③試験結果：

- a) 炉の連続運転時間は 28 時間以上におよび、試料の総処理量は 660kg に達した。
- b) 処理温度の平均値は 763℃であり、725～800℃内で無害化処理連続運転ができた。
- c) 試料中のプラスチック系成分は熱分解・ガス化され、計画通り熱風ガス発生炉の燃料として正常に使用することができ、LP ガスの使用は点火時のみ使用することで新たな化石燃料使用量を大幅に削減することができた。
- d) 処理速度を 30kg/hr とした場合でも、安定して連続運転をすることができた。
- e) 処理速度を 35kg/hr 以上とすると、ガス生成量が多くなりすぎ、設備上のガス送気容量を越えてしまい、安定した運転ができなかった。
- f) 熱分解後に排出される固体残渣は塊状ではなく、更々とした粒状であることを確認した。ただし、生成油（タール成分）と炭化物が多量に付着しており、精錬等の添加剤として使用する際には高カロリー熱源とした利用ができる。また、建材の骨材等として再利用するのであれば、適切な前処理が必要。

## 8. 無害化試験分析結果

本試験により、本処理にて石綿含有廃棄物は無害化されたことを確認した。

### (1) 固体残渣

- ①位相差顕微鏡・分散染色法による定性分析の結果、計数した 3,000 粒子中石綿は 4 繊維状粒子未満であった。
- ②X 線回折による定性分析の結果は、いずれの石綿のピークは確認されなかった。
- ③透過型電子顕微鏡（TEM）による観察の結果、クリソタイルが検出されたが、その繊維数濃度は 1.7Mf/g であり、定量下限値(=4.9Mf/g)未満であった。他の石綿は検出されなかった。

### (2) 生成ガス

- ①位相差顕微鏡・分散染色法による定性分析の結果、石綿濃度は定量下限値（=0.3f/L）未満であり、石綿は検出されなかった。
- ②X 線回折による定性分析の結果、いずれの石綿のピークも確認されなかった。
- ③透過型電子顕微鏡（TEM）による観察の結果、石綿は検出されなかった。

### (3) 生成油

- ①位相差顕微鏡・分散染色法による定性分析の結果、計数した 3,000 粒子中、石綿は 4 繊維状粒子未満であった。
- ②X 線回折による定性分析の結果、トレモライト/アクチノライトのピークが確認された。石綿繊維は確認されなかった。
- ③透過型電子顕微鏡（TEM）による観察の結果、石綿は検出されなかった。

## 9. 環境関連試験結果

本処理施設の対環境性能を確認するため、排ガスの組成、排ガス中の石綿濃度と規制物質濃度、並びに作業環境中の石綿濃度を測定した。その結果を以下に示す。

### (1) 排ガス

#### ①組成

	$CO_2$ (%)	$O_2$ (%)	$N_2$ (%)	CO (ppm)
1回目	0.5	20.3	79.3	9.7
2回目	1.9	18.4	79.7	7.8

#### ②石綿濃度

- a)位相差顕微鏡・分散染色法による定性分析の結果、石綿濃度は定量下限値(=0.3f/L)未満であり、石綿は検出されなかった。
- b)X線回折による定性分析の結果、いずれの石綿のピークも確認されなかった。
- c)透過型電子顕微鏡(TEM)による観察の結果、石綿は検出されなかった。

#### ③規制物質濃度

	ダスト ( $g/m^3N$ )	Sox (volppm)	NOx (volppm)	$O_2$ (%)
1回目	不検出	不検出	2.0	20.3
2回目	不検出	0.5	10.5	18.4

### (2) 作業環境

試験開始前・試験中の本処理施設が設置されている建屋の敷地境界における大気中の石綿粉じん濃度、並びに試験中の施設内作業場、施設外のセキュリティールーム出入口、及び負圧集塵機出口の大気中の石綿粉じん濃度を測定した。その結果を以下に示す。

#### ①敷地境界

試験開始前、及び試験中の石綿粉じん濃度は、いずれも定量下限値(=0.3f/L)を下回り、石綿は検出されなかった。

#### ②施設内作業場

試験中の石綿粉じん濃度は、定量下限値(=50f/L)未満であり、石綿は検出されなかった。

#### ③施設外セキュリティールーム・負圧集塵機出口

試験中の石綿粉じん濃度は、定量下限値(=0.5f/L)未満であり、石綿は検出されなかった。

### (3) ダイオキシン濃度の測定に関して

以下の理由により本処理ではダイオキシンが発生しないため、その濃度の測定は行っていない。

- ①処理に用いるプラスチック系廃棄物としては、養生シート・防護服・梱包袋等の基材であるポリエチレンのみであり、ダイオキシン発生の原因である塩素を含んだ材料は混入されない。
- ②本処理では、外熱式ロータリーキルン炉を用いるため、プラスチック系廃棄物を酸素と共に直接燃焼させることはない。

## 10. 生成物成分分析結果

### (1) 生成ガス

①組成  $H_2:26.0\%$  /  $CH_4:25.4\%$  /  $CO:5.7\%$  /  $CO_2:4.71\%$  /  $C_2H_2:0.3\%$  /  $C_2H_4:21.4\%$   
/  $C_2H_6:3.3\%$  /  $C_3H_6:3.13\%$  /  $C_3H_8:0.17\%$  /  $C_4H_8:1.2\%$  /

(i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>):0.02% /  $C_6H_6:1.82\%$  /  $C_7H_8:0.14\%$  /  $N_2:0.36\%$  /

(O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, C<sub>5</sub>炭化水素等):6.4%

②熱量 総発熱量 = 40,640 kJ/m<sup>3</sup> 真発熱量 = 37,390 kJ/m<sup>3</sup>

③生成速度 平均 19.22m<sup>3</sup>/hr

### (2) ICP 発光分光分析法による元素定量分析

#### ①溶融処理前試料 (%)

AL	Ca	Fe	K	Mg	Mn
2.3	6.7	1.0	0.2	2.4	0.2
Na	S	Si	Ti		
0.4	0.3	1.0	0.3		

#### ②溶融処理後固体残渣 (%)

AL	Ca	Fe	K	Mg	Mn
2.3	6.9	0.4	0.2	1.9	0.2
Na	S	Si	Ti	Cu	
2.1	0.3	10.1	0.4	0.2	

## II. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

### - 1 研究発表・講演

関口 秀俊, Aulia Averroes, 坂本 佳次郎, “大気圧マイクロ波空気プラズマを用いた繊維状微粒子の処理”,  
化学学会第 75 回年会研究発表講演要旨集(CD-ROM), O106, 2010.3.18, 鹿児島大学

### - 2 文献

内野 英宏, 坂本 佳次郎, 府内 洋一, 中村 秀明, 宮本 文穂 “アスベスト含有廃棄物の低温加熱溶融処理  
に関する基礎的研究” 土木学会論文集 : Vol163No.4、263-277

### - 3 特許等

特願 2006-025057、特願 2006-134554、特願 2007-061291、特願 2009-82864、特願 2009-255215  
特願 2010-45835、WO02008/111512A1(PCT)

## IV. 実用化、事業化の見通しについて

### 1. 実用化、事業化の見通し

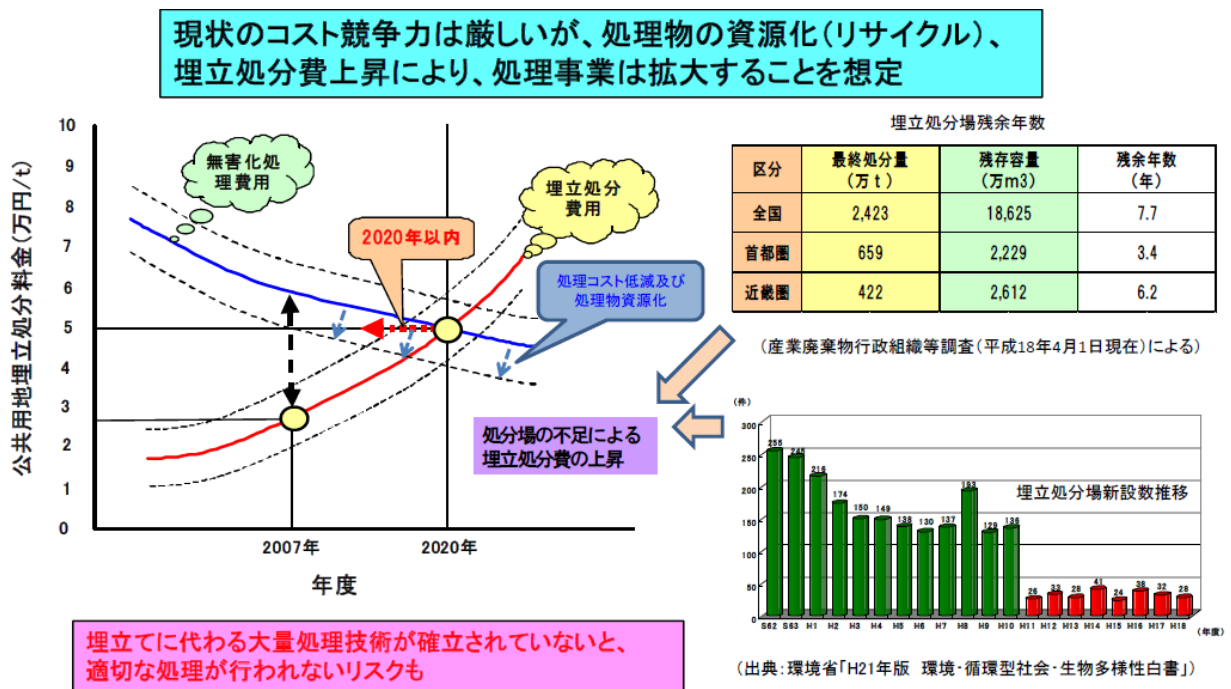
#### (1) 成果の実用化可能性

Ⅲ. 研究開発の成果でも記載した通り、アスベストの安全回収・除去並びにアスベストの無害化・資源化の技術開発については、何れも基本技術は確立されている。

回収・除去技術に関しては、実用化、事業化に関して特別な法規制等はなく、基本的には既存工法に対するコスト面での優位性が鍵となる。今後も、現場実証試験により、多彩な除去現場に対応したロボット操作のチューニング等を進め、信頼性向上及びコスト改善を図ることで、実用化が進むものとする。

無害化・資源化技術に関しては、既に環境省の無害化認定を取得した事業もあるが、その他の事業についても、実用化、事業化を進めるためには同制度による認定が必須である。認定取得のためには、技術面のみではなく事業計画等も必要であり、各事業者とも事業としての採算性も考慮して検討を進めている。採算性には、現状で競合する埋立て処分費等の外部要因の影響も大きいですが、近い将来には埋立て処分場の逼迫が予想されるため、本事業の実用化は大きな社会的意義を有するものと思われる。

参考として、埋立て処分費用(安定型処分場)と無害化処理費用の推移イメージを示す。



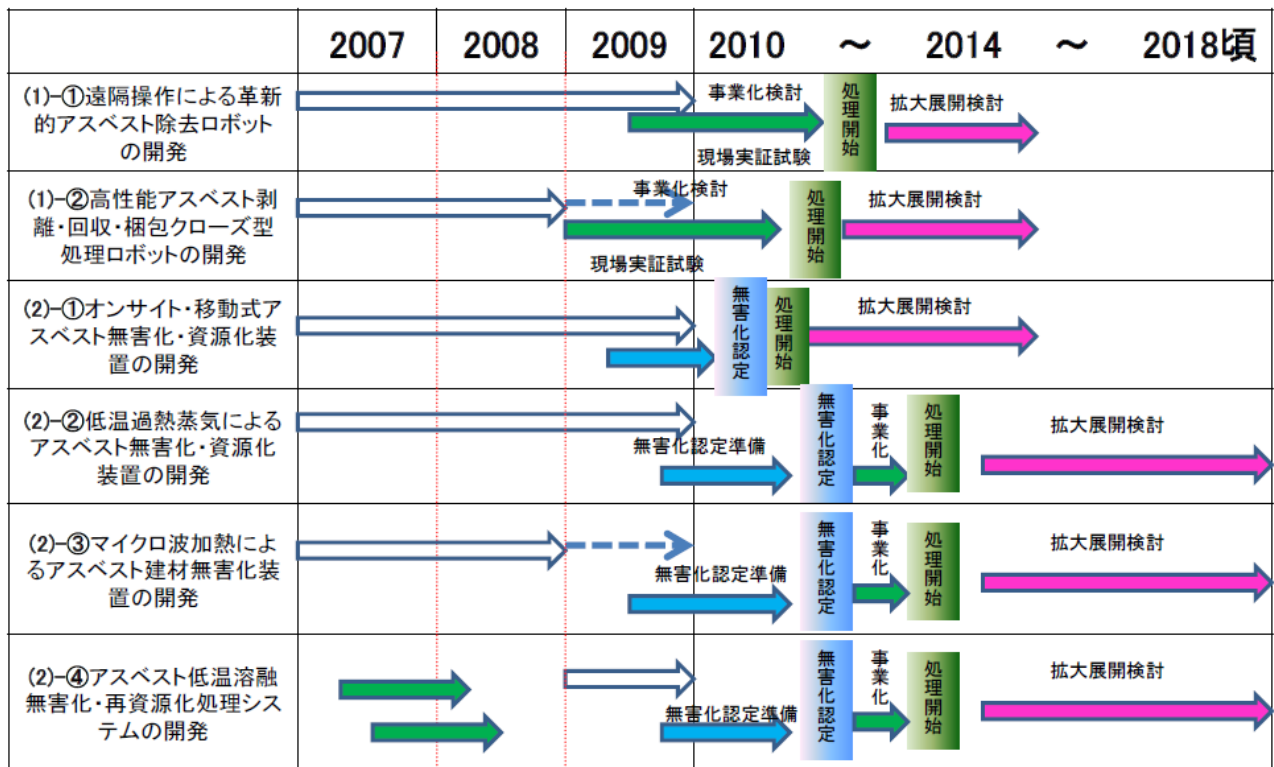
#### (2) 事業化までのシナリオ

本事業の全委託先とも実用化、事業化を目指しており、事業委託期間終了後も開発、事業化検討を進めている。NEDO としても、5件については継続研究事業として、1件は実用化助成事業として、事業化に向けて引き続き支援を行ない、また、各事業者間及び官公庁、有識者との連携にも努めている。

想定する事業化のスケジュールを次に示す。

市場規模としても、I. 事業の位置付け・必要性で触れた通り、回収・除去で数千億円、無害化・資源化で数兆円の潜在市場も見込まれる。





### (3)波及効果

本事業の実用化により、安全性の高いアスベストの処理が促進されることが期待される。

#### ○アスベストの安全回収・除去技術開発

・過酷で危険である吹付け材の除去作業の一部をロボット化することによる暴露リスク低減効果に加え、低コスト化を進めることにより、アスベストの処理が加速されることが期待される。

#### ○アスベストの無害化・資源化技術開発

・レベル1～3全てに対応した、従来の熔融法より低温での無害化技術を開発。熔融以外の無害化処理は先例が無く、資源としての再利用化は世の中の流れに合致している。

・埋立て処分場の逼迫前に大量処理法を確立することは不法投棄等の防止に繋がる。

・無害化認定の取得により、熔融、埋立てに代わる今後のアスベスト処理の指針となり、NEDO 以外の技術開発含めて広く検討が進むことも期待される。

また、アスベストの処理を進めるには以下の点も考慮する必要があると思われる

・負の遺産である残存アスベストの処理を速やかに進めるため、分別・回収ルートの確立、処理物の資源化・再利用ルートの確立を含めた全体コスト最適化を目指したネットワークの構築。

・アスベストに対する住民不安への対応、及び処理ネットワークの構築には、正確でタイムリーな情報の発信を行い、また、適切な処理が行われるよう監視・指導を行う「官」の関与も重要。