

研究結果と考察：上記より抜粋して説明する。

(8) スキャンロボットの設計、製作及び動作試験

吹き付けの飛散性アスベストに対する集光加熱のための反射鏡移動機構は精密な位置決めのためには3軸可動が必要であり、赤外線照射加熱部との距離を制御するため、厳密には温度測定、位置測定プローブとの連携も必要である。本研究開発においては、予算の制限もあるため、2軸可動で速度制御まで可能とする仕様とし、位置制御は行わないことにした(図1～図2)。供給電源は可動ロボット用として単相200V、2kW、ランプ用として単相100V、1kW、出力電圧範囲0～130V、出力電流定格10A、可動範囲は550mm×550mmであり、可動速度は可変(0.5mm/s～300mm/s)、反射鏡の重量5kgまで装着可能とした。図3, 図4に示すように1kWランプ電力、移動速度0.5mm/秒による熱処理スキャンによって表面処理が現実的に行えることを確認した。その結果スキャン速度よりはランプ電力によって加熱対象物の温度が律速されることが明らかとなった。

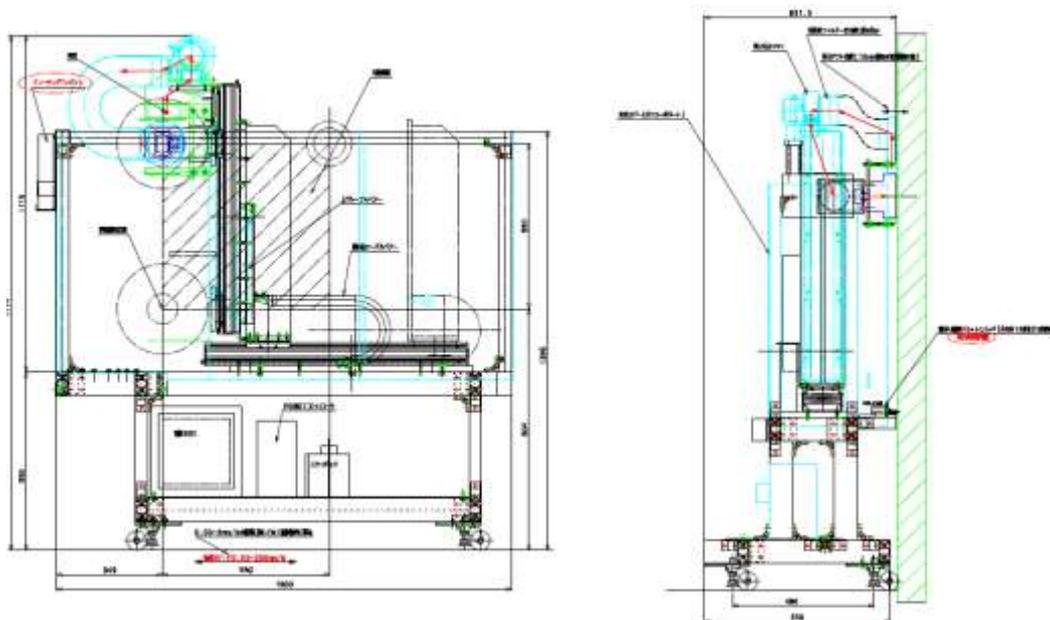


図1 スキャンロボット正面図と側面図



図2 スキャンロボット外観、反射鏡取り付け口、操作パネル

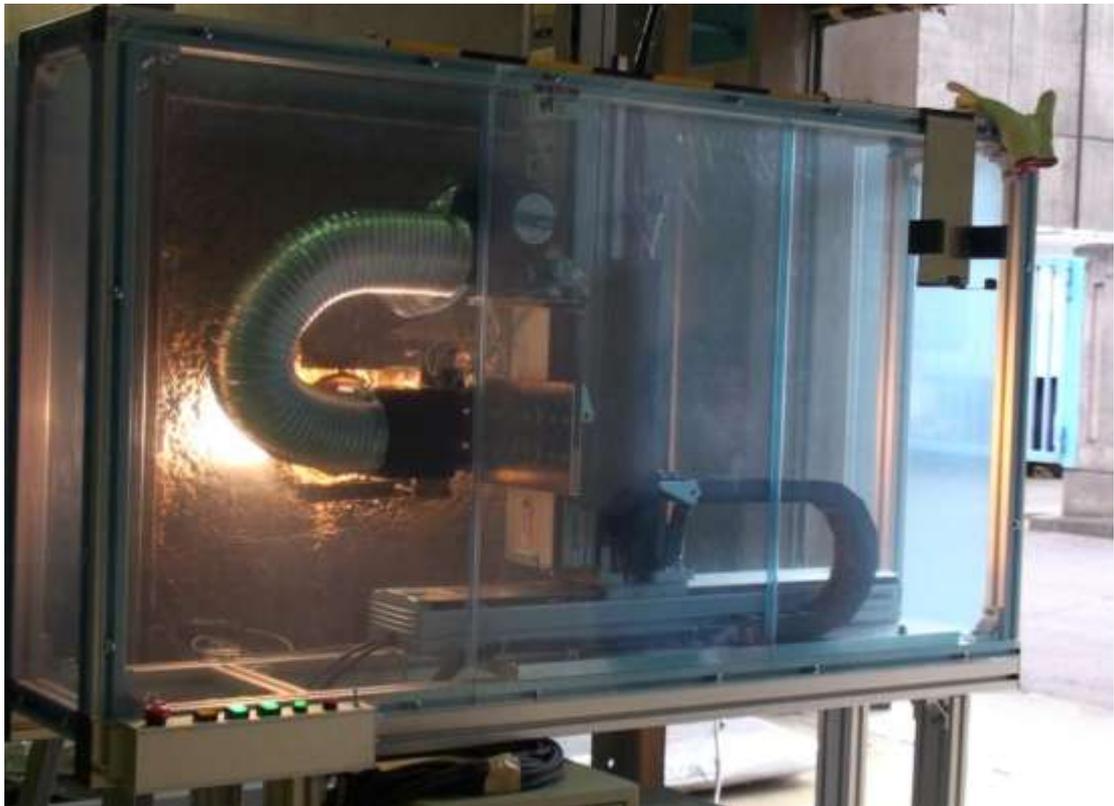


図3 スキャンロボットランプの点灯でロックウール模擬壁に照射する様子

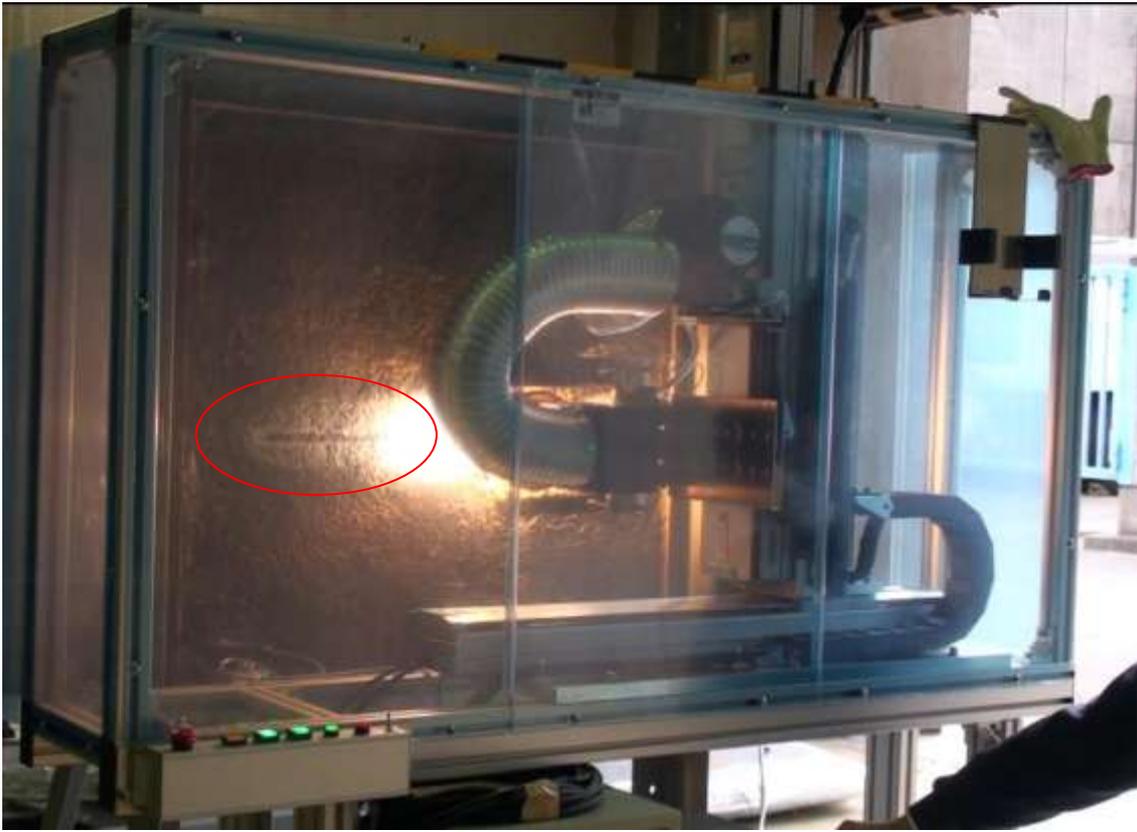


図4 1 kWランプ電力、移動速度0.5mm/秒による熱処理スキャン。

(4) 幾何学的に高効率の反射面を持つ反射鏡設計手法の開発、

平成20年度に着手した、数学的に線状加熱が期待される反射鏡の基本概念設計を経て、それをより発展させるアルゴリズムで、線状集光を得られる反射面を決定するシミュレーションプログラムを開発することができた。図5に例を示す。最初に2次形式の数式で規定される凹面と、任意の長さの加熱対象線状領域を数値で指定すれば、最適化された反射面が3次元の数値データとして得られる。この様にして得られた数値データに基づいて、反射鏡の加工を行うことは未達である。切削加工の後に鏡面研磨等の作業を行う必要があるため(図6参照)、極めて困難であり、引き続いて他の方法で簡便に低コスト作成することを試みる。

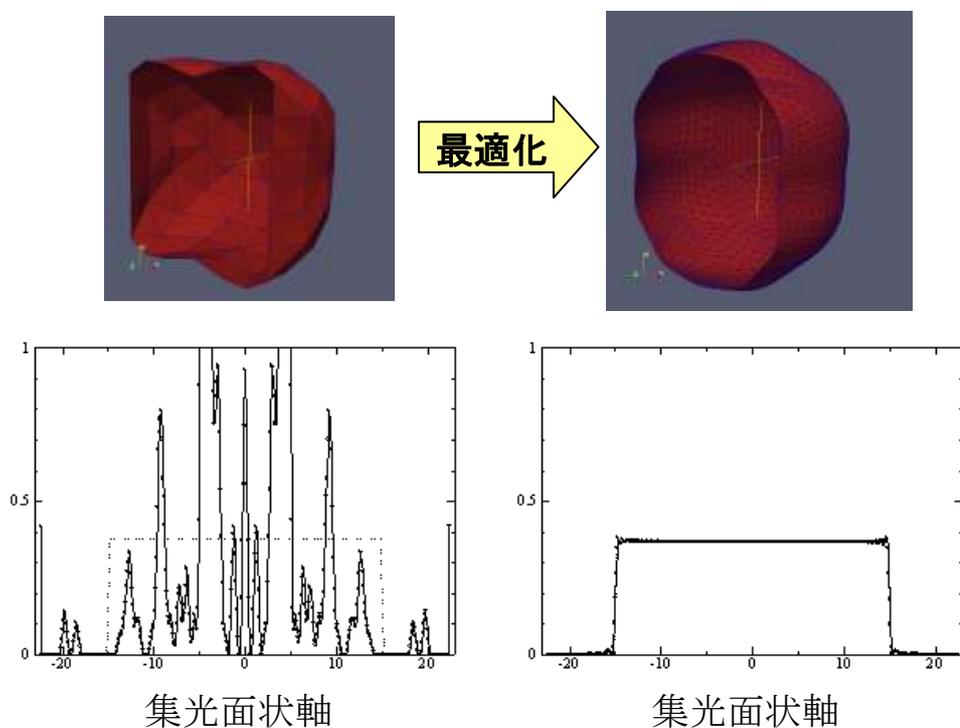


図5 最適化シミュレーションの1例

図6 金属加工と金メッキによって作成した反射鏡の一つ



- (5) 鉄板における高温ダメージの定量評価、
- (6) 2次元平面における集光加熱温度分布測定、
- (10) 2次元平面における集光加熱温度分布の材料依存性測定

2次元放射温度計（サーモレーサー）を用いて、反射鏡とハロゲンランプからなる集光炉を、金属薄板やセラミックス薄板に対向させ、光照射し、その温度分布を薄板の反対側より放射温度計で温度分布を測定する。使用したシステムを図7に示す。板状試料材料は、300mm × 400mmの板状であり、ニッケル、鉄、ステンレスは1mm厚と5mm厚、アルミナは1mm厚と3mm厚を用いた。被加熱試料をホルダに取り付け、光加熱装置でカメラの反対側より加熱し赤外線放射温度計で表面温度を測定する。放射率は1とした。加熱条件は加電圧90V、30Vの2条件で温度測定を行う。点状ランプ及び回転楕円型の反射鏡（点状集光型）を用いた、アルミナ板とステンレス板の温度分布2例を図8に示す。このときの光照射条件は、粉末の酸化鉄が十分溶融できる条件であり、光を吸収できる材料ならば1600℃程度の温度まで上昇可能なものである。光照射開始後210秒経った場合、興味深いことに、アルミナの場合は最高温度が100℃近くまで上昇したのに対し、ステンレス板は50℃近くまでしか昇温しなかった。

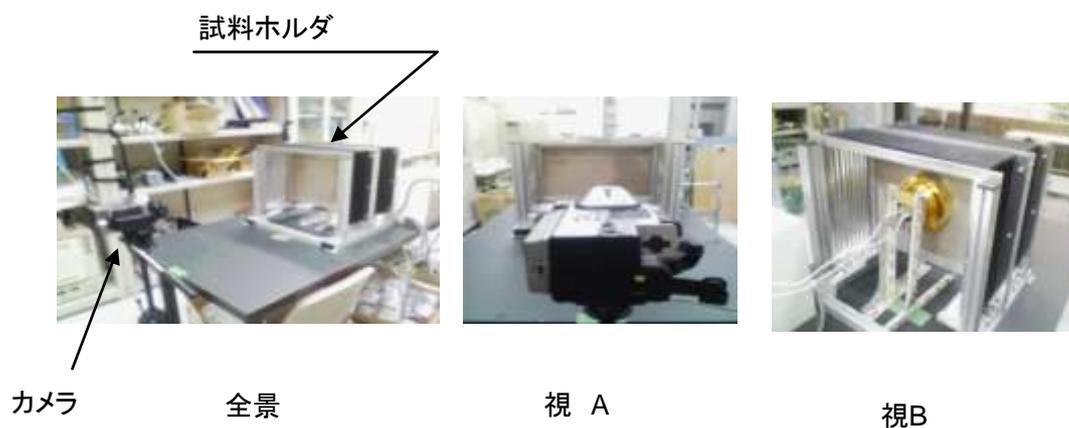


図7 2次元平面温度分布測定システム

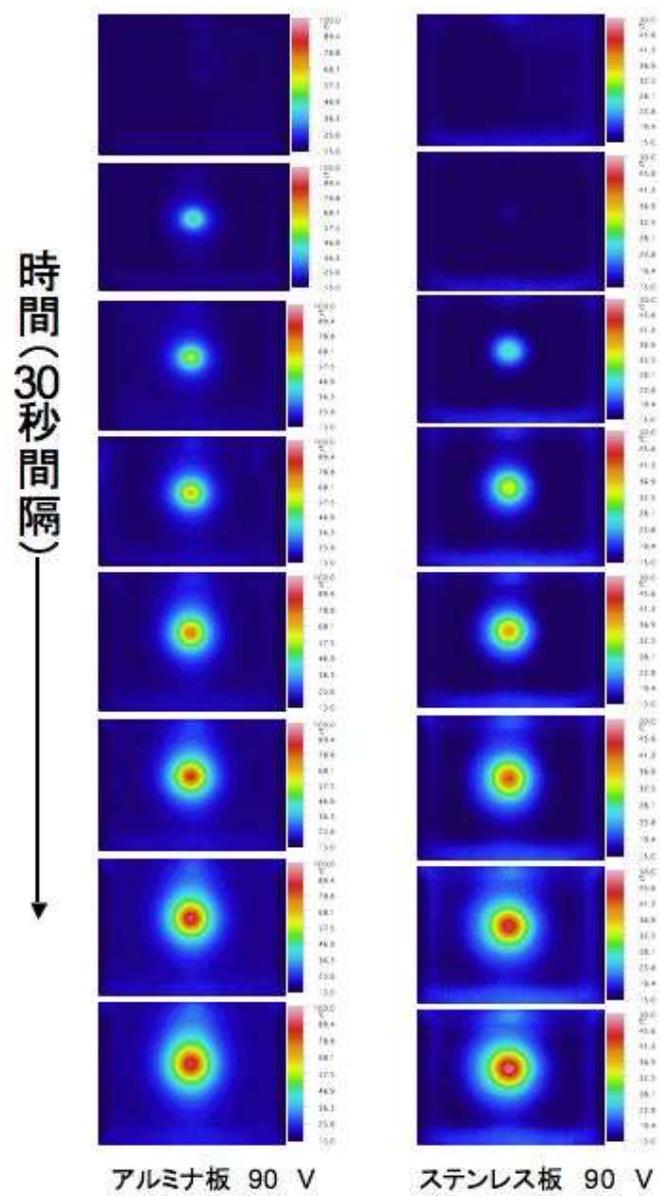
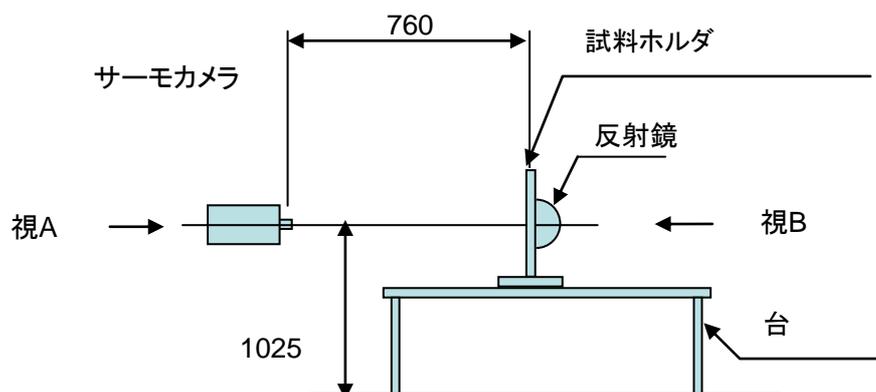


図8 2次元放射温度計を用いた測定温度分布の照射時間依存性

上記実験を行った、点集光型反射鏡と650Wのハロゲンランプを用いた2次元温度分布測定システムの概念図は図9のようになっている。

図9 2次元温度分布測定システムの概念図



加熱条件は加電圧90V、30Vの2条件で温度測定を行う。手順を以下に示す。

- 0～30Vまで一気に電圧をあげ3分間30Vを維持する。
- 3分経過後一気に0Vへ電圧を下げ10分間維持する。
- 合計13分間の表面温度を計測する。
- 40～90Vまで一気に電圧をあげ3分間90Vを維持する。
- 3分経過後一気に0Vへ電圧を下げ10分間維持する。
- 合計13分間の表面温度を計測する。

また、図10に各種材料における2次元温度分布の動径成分をプロットしたものを示す。光照射開始後3分後の結果である。興味深いことに、材料や厚さによる違いは半径70mm程度以内の領域では、最大1桁の違いが観測されたが、半径70mm以上の領域ではほとんど観測されなかった。つまり、熱伝導率の違いによって温度分布が決まるのは、集光されている領域の近傍に限られることを示している。また、それぞれの材料の厚さと時間による温度分布の変化は、平成22年度研究報告書の付録に記載してある。

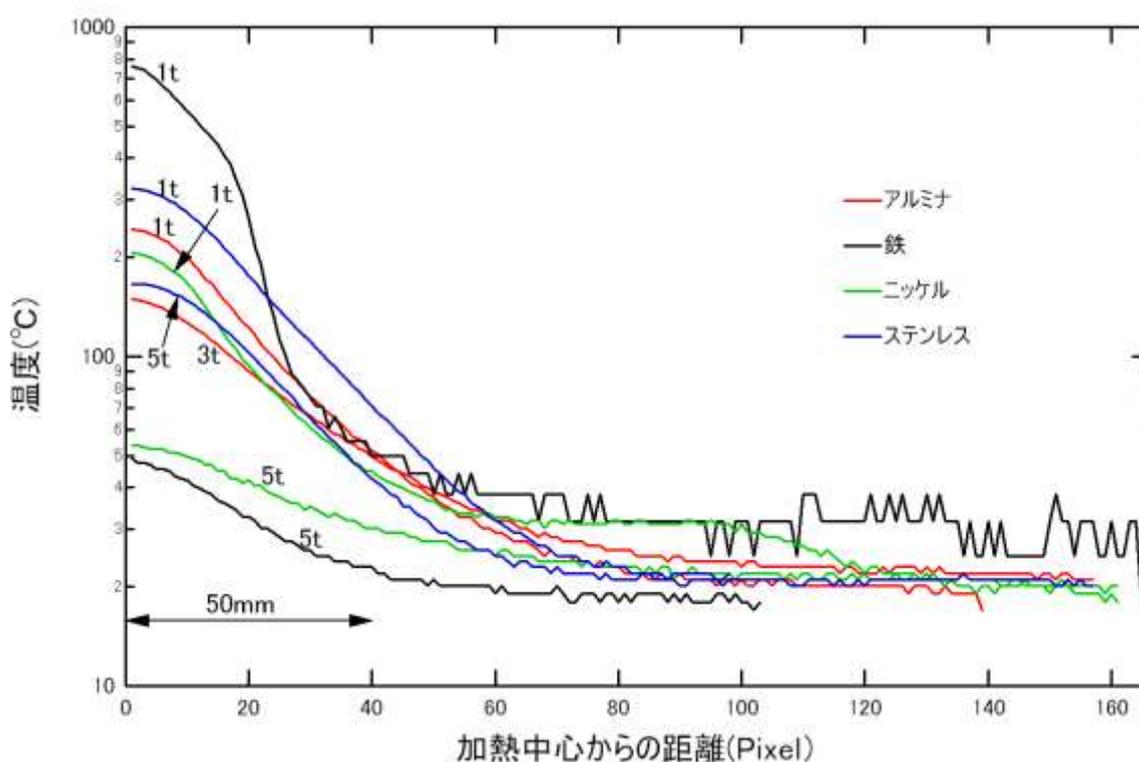


図10 各材料板の加熱中心から動径方向の温度分布

(2) アスベスト典型3種以外のトレモライト、アンソフィライトのアスベスト単体及び実際の吹きつけアスベスト含有廃棄物試料の赤外線加熱溶融実験を行い、非アスベスト化が可能であることを確認、

上記内容の範疇に入るが、集光加熱法によるアスベスト溶融処理試料のTEM観察を行った。位相差顕微鏡観察と粉末X線回折によって、あらゆるアスベスト含有廃棄物或いはアスベストの、集光加熱溶融処理法を用いた非アスベスト化の検証は本研究開発の前半に行っている。しかし、その2つの方法に加えてTEM（透過電子顕微鏡）観察による検証が一般的になりつつある。そこで、本研究でもTEM観察によっての確認を行った。集光加熱装置を用いて3種類のアスベスト（クリソタイル、クロシドライト、アモサイト）を溶融しTEM観察用溶融物試料を作成する。具体的には、図11のような装置を用意し、最大電圧100V、最大電力1kWとして、以下の手順で行った。SUS板上にアスベストを置く。標準クリソタイル（95%）、標準アモサイト（99%）、標準クロシドライト（99%）をそれぞれ用意しアスベストを反射鏡の焦点にあわせる。制御装置にて加熱ランプの出力を上げ、溶融を確認した時点で出力をゼロにし、溶融試料を回収する（図12参照）。

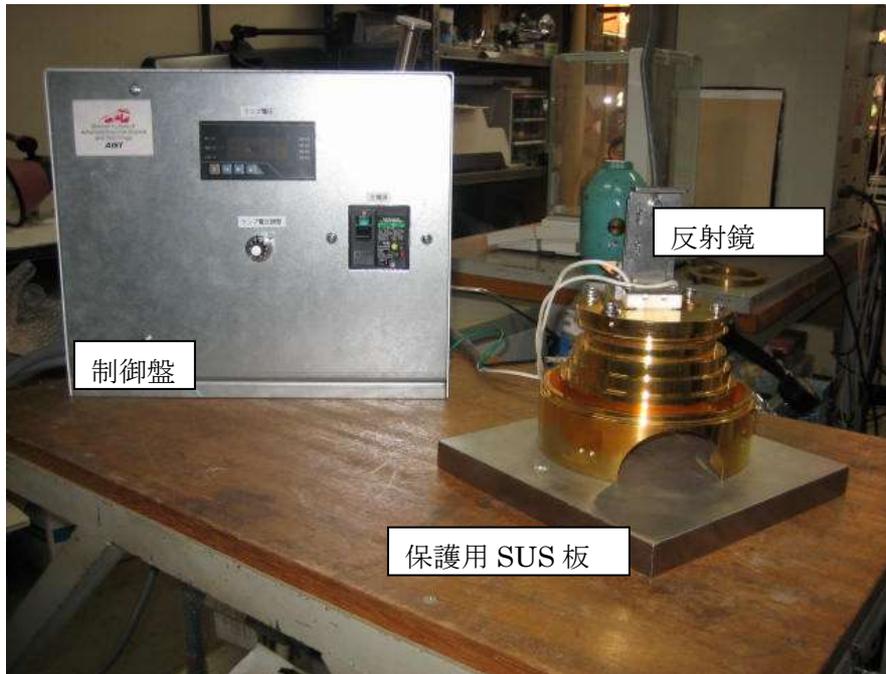


図 1 1 TEM用試料作成用小型集光加熱装置

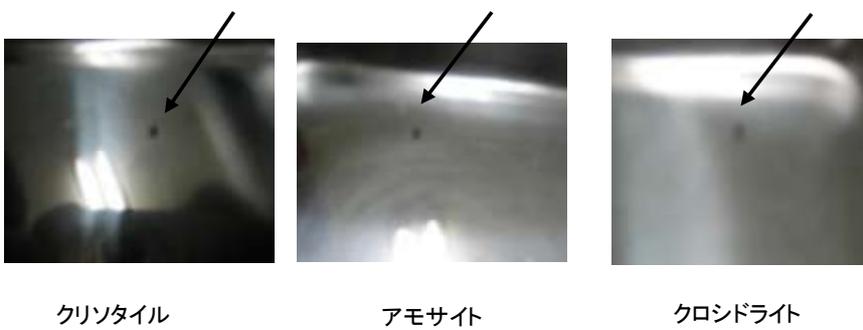
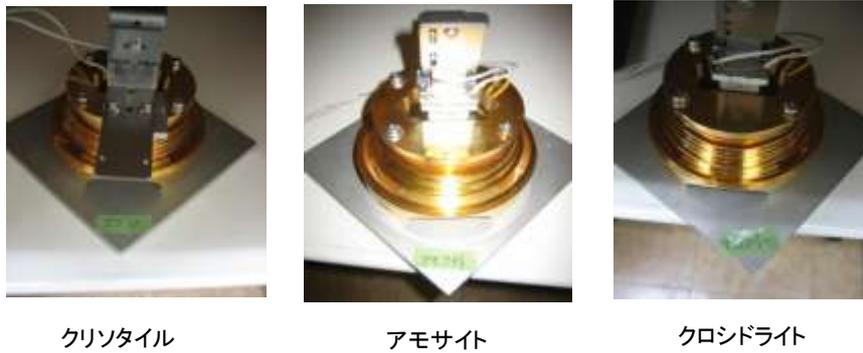


図 1 2 TEM用熔融試料作成の様子

TEM, によるアスベストの繊維状形態観察は以下のように行った。溶融処理したアスベスト試料をメノウ乳鉢で粉碎する。エタノールで粉碎した資料の懸濁液を作製。エタノール懸濁液をマイクログリッドに1滴たらし乾燥させ観察資料とする。分析装置はトプコン高分解能透過型分析電子顕微鏡EM-002BF/P-20を用い、観察・撮影条件としては、加速電圧200kVでTEM観察及び撮影を行った。撮影はアスベストの繊維状形態が残っている個所を探し3視野撮影とした。撮影倍率は1つのアスベストの繊維の大きさと形状が確認できるx59,000、x98,000で行った。

その結果を図13～図15に示す。いずれも繊維状形態の存在が確認されたが、アスベストであるのかどうかは現在不明であり、元素と構造の分析が必要である。位相差顕微鏡写真と粉末X線回折実験では、アスベストの存在を示す結果は得られていないので、アスベストが変質した他の材料ではないかと考えている。



図 1 3 溶融後クリソタイルで撮影された繊維状形態

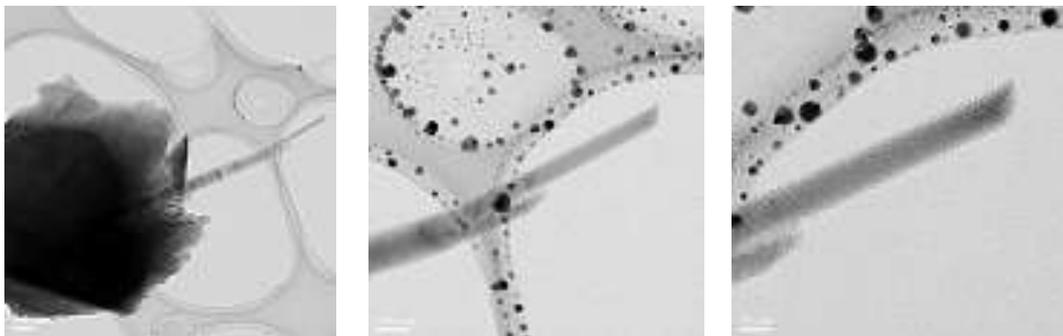


図 1 4 溶融後アモサイトで撮影された繊維状形態



図 1 5 溶融後クロシドライトで撮影された繊維状形態

(7) 集光加熱によるロックウールなどの吹き付け材から発生するガス分析

硬質塩化ビニル製の簡易チャンバー内に設置した、650W点状ハロゲンランプを備えた回転楕円形状の集光反射炉を用いて、上記3種の吹き付け材試料を集光加熱し発生するガスを簡易チャンバー上部から採取した。ランプ電圧は90Vまで上昇させ、いずれの試料も表面が完全に熔融することを確認したうえでガスを採取した。

想定した発生ガスはVOC類、アルデヒド類、無機ガス・低級炭化水素類とした。VOC類はTenax-TAに吸着捕集し加熱脱着し、ガスクロマトグラフ質量分析法(ATD-GC/MS)により分析した。アルデヒド類はDNPHカートリッジに捕集し、生成したDNPH誘導体を溶媒抽出、高速液体クロマトグラフ(HPLC)法により分析した。無機ガス類はテドラーバッグに捕集し、検知管法により分析した。測定対象成分は、シアン化水素、一酸化炭素、全窒素酸化物、二酸化窒素、塩化水素、硫化水素、フッ化水素である。低級炭化水素類はテドラーバッグに捕集し、直接導入によるガスクロマトグラフ法によって分析した。

ロックウールについては、熔融時の有機化合物生成量は他の試料と比較して少なく、ホルムアルデヒドおよびアセトアルデヒドは0.1~0.2 volppm、ベンゼン、トルエンおよびスチレンは0.01 volppm程度、一酸化炭素も5 volppm程度であり、他の試料に比べてバインダー等の有機化合物の含有量が元々少ない材料と思われる。それに対して、パーライトについてはホルムアルデヒドが約5 volppm、アセトアルデヒドについては28 volppmと多く、ベンゼン、トルエンおよびスチレンについては数 volppm、その他のVOC成分(芳香族化合物が主体)も数 volppmを検出した。また、一酸化炭素については約100 volppm程度を検出した。ロックウールに比べて有機物が多く配合されている材料と考えられ、生成物が芳香族炭化水素に偏っているため、配合されている有機物も芳香族系の化合物と考えられる。バーミキュライトについては、ホルムアルデヒドとアセトアルデヒドが、約3 volppm、ベンゼン、トルエンおよびその他のVOC成分(芳香族化合物が主体)を数 volppm程度検出しているが、スチレンについては約30 volppmもの濃度で検出しており、一酸化炭素についても約200 volppmを検出した。パーライトとは若干異なり、配合されている有機物はスチレン系のものと推測する事が出来る。

- (1 1) 単体のアスベストではなく、実際のアスベストを含むスレート材、ボード材などの廃棄物が赤外線加熱によって繊維状形態が破壊されることを確認
- (1 2) 実際に廃棄された複数のアスベスト含有材料に関して、その相及び含有元素の分析

テーマBについては、実際のアスベスト廃棄物試料を使って溶融実験を行い、光加熱処理能力を調べることが必須である。選択した廃棄物材料は、ロックウール吹きつけ材(クロシドライト 46%)、大平板(アモサイト 13%)、配管保温材(トレモライト 6%)、ロックウール吹きつけ材(クリソタイル 12%)、バーミキュライト吹きつけ材(クリソタイル 0.1%以上)、スレート材(クリソタイル 11%)、フレキシブルボード(クリソタイル 12%)、石綿吸音板(クリソタイル 4%)の粉末状試料、及び、無粉砕のロックウール吹きつけ材(クリソタイル 7%)である。図1 6にクリソタイル 11%含有のスレート材溶融の様子を示す。

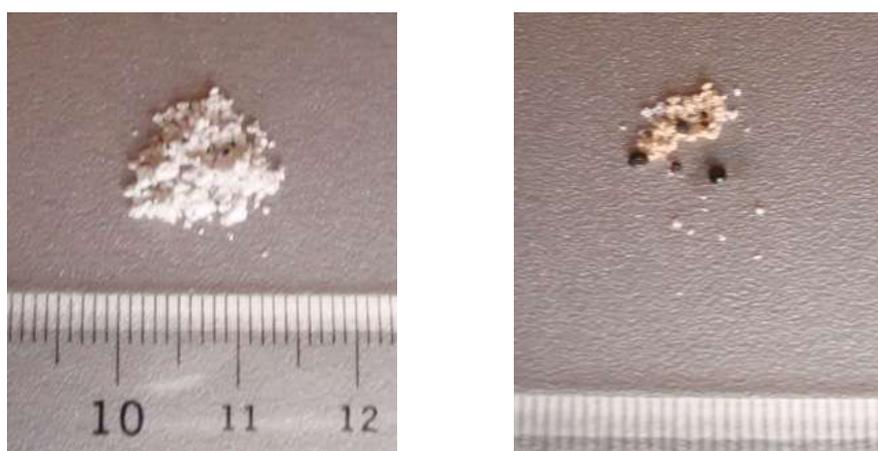


図 1 6 溶融前後のクリソタイル 11%含有の粉末状スレート材

全ての試料について、粉末X線回折による含有相の推定、及びEDX測定による含有元素の推定を行った。元素分析の結果を以下に示す。建材廃材には例外なくアルミニウムが検出されたのは興味深い。チタンもアスベストそのものには含まれないが、建材中になんかなり含まれていることが分かった。

アンソフィライト	Mg, Si, Ca, Mn, Fe, Ni
トレモライト	Mg, Si, Ca, Mn, Fe
クリソタイル	Mg, Si, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni
アモサイト	Mg, Si, K, Ca, Mn, Fe
クロシドライト	Mg, Si, K, Ca, Fe
ロックウール吹きつけ材 (クロシドライト46%)	Mg, Al, Si, S, K, Ca, Fe, Zn
大平板 (アモサイト13%)	Mg, Al, Si, S, K, Ca, Mn, Fe
配管保温材 (トレモライト6%)	Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni
ロックウール吹きつけ材 (クリソタイル12%)	Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe
バーミキュライト吹きつけ材 (クリソタイル0.1%以上)	Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe
スレート材 (クリソタイル11%)	Mg, Al, Si, S, Ca, Ti, Mn, Fe
フレキシブルボード (クリソタイル12%)	Mg, Al, Si, S, Ca, Fe, Zn
石綿吸音板 (クリソタイル4%)	Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Sr
無粉砕ロックウール吹きつけ材 (クリソタイル7%)	Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Sr

粉末X線回折による相同定の結果、ほぼ全ての建材廃棄物に炭酸カルシウムが主成分として含まれていることがわかった。また、アスベスト単体の熔融実験と同様に、JIS A 1481:2008「建材製品中のアスベスト含有率測定方法」に準拠し、位相差顕微鏡観察と粉末X線回折により、全ての試料について繊維状形態が無いことを確認した。

(13) 新しい加熱手法（パイプ法）の開発（発明）

金属製パイプを用いて、アスベストの代わりに融点1,300～1,500℃程度のロックウールを被加熱対象物として、これを効率的に熔融する方法を見出すことを目標に実験を行った。被加熱対象物や金属パイプ、その設置方法や熔融方法について以下説明する。

被加熱対象物としては、太平洋マテリアル社製ロックウール（太平洋CMF No. 3000）を用いた（図17）。金属パイプとしては、アルミニウム、鉄、ステンレスを用いた。



図17 使用したロックウール

使用したパイプを図18に示す。パイプのみと、ロックウールを手で詰めたものと、ロックウールをプレス機で詰めたものの3種類を用意し、熔融実験を行った。双楕円の鏡を持つ赤外線集光型熔融装置を用い、光源にはハロゲンランプを用いた（図19）。



図18 使用したパイプの1例

溶融テストの方法は幾つか想定されるが、我々は温度上昇時（ハロゲンランプ電圧上昇時）には、焦点より十分上方に金属パイプを置いて、ランプ加熱の影響を極力排除し、ランプが一定電圧になった後にテストを始めることとして、焦点から上方に50mmの位置へ金属パイプを移動させ、これを初期位置とした。そこから一定速度で金属パイプを下方へ移動させながら溶融させる方法を採用した。装置の駆動システムの制約上、自由に速度を設定できない為、高速下降モードにおいて、2秒動かし、6秒止める操作を繰り返すことで、約0.5mm/secの速度を実現できるので、この速度を、ほぼ一定速度での下降、とみなしてテストを実施した。また条件によっては、高速下降モードを維持させた速度（約1.7mm/sec）を用いた。溶融テスト時に共通な条件や手順は、下記の通りである。

- ・ハロゲンランプの電力は2.4 kW（1.2 kW×2灯）。

- ・溶融動作：焦点上方50mm（初期位置）から所定の速度で下降させ、金属パイプ上端が焦点を通過するか、落下するまで実施。

- ・石英管の内部には、防汚の為に空気を流しているが、その空気の流量は、約20 L/minに固定。なお、石英管は、鏡等への蒸発物等飛散防止と雰囲気制御の為に設けられ、赤外線をほぼ透過するので、失透しない限り、光加熱には殆ど影響しない。

- ・下降時の回転は、5 rpm で行う。

- ・基本的な溶融テストの手順は、パイプを吊した後、十分に上方に逃がし、ランプ電力2.4kWまで上昇させ、その後、初期に記録しておいた位置（焦点より50mmの位置）まで降ろして、回転可能なように主軸と回転用モータの接続を有効にする。その後、高速下降モードを用いて、0.5mm/sec狙いか、1.7mm/sec狙いの速度を実現させ、モニターで溶融状態を確認しながら、金属パイプ上端付近までの溶融を行う手順となる。

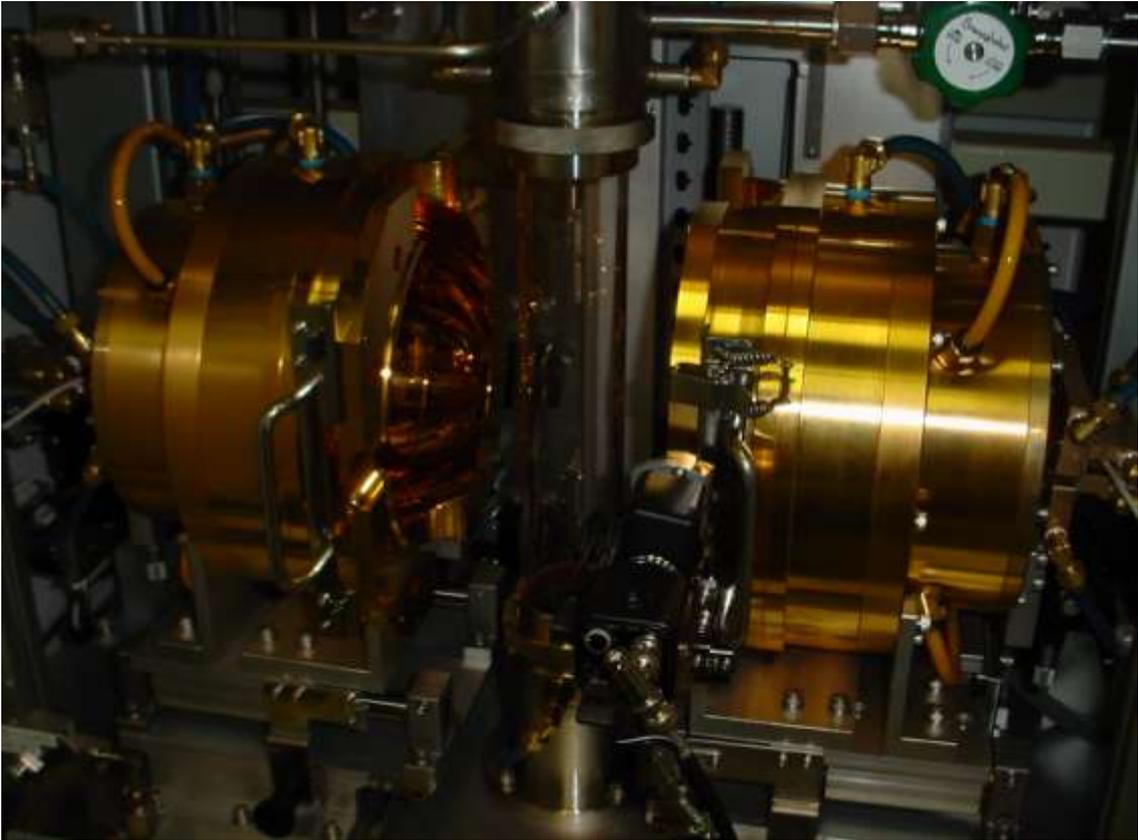


図19 使用した赤外線集光型溶融炉

まずは、アルミニウム製のパイプを用いた溶融テスト結果について述べる。アルミニウム製パイプのみの溶融状況は、途中で状態変化している様子があり、十分な溶融が見られなかった。冷却後の溶融物表面には、白い斑点状の溶融物が点在し、これはアルミニウム金属が融点約2000℃のアルミナに変化して溶けなくなったものであると推定される。アルミニウム製パイプにロックウール16g入れたものでも、同様な形態が見受けられた。

次に、ステンレス製のパイプを用いた溶融テスト結果について述べる。これについては、ステンレス製パイプのみと、ロックウール8g入り、16g入りと、実施した。密度の最も高い16g入りでも良好な溶融状態を示した。

最後に、鉄製のパイプを用いた溶融テスト結果について述べる。鉄製パイプのみの溶融状況は、良好であった。次にロックウールを16g入りにして、下降速度を、0.5mm/sec狙いと1.7mm/sec狙いに変えて、実施した。実際の速度は、タイマーでの計測と装置に表示される移動距離から計算したところ、それぞれ0.51 mm/sec、1.88 mm/secであったが、1.88 mm/secでもある程度の溶融が可能であった。

以上によって、ボード材やスレート材などからなる非飛散性アスベスト廃棄物の集光加熱による溶融処理速度向上が確実に見込める実験結果が、実験室設置の赤外線集光型溶融炉において得られたと考えている。その詳細をまとめ、平成23年5月に特許出願（特願2011-104217）を行った。今後は、これらの溶融メカニズムを解明する為、図20のようなステンレス製や鉄製の大口径のパイプを用いて、大型の反射鏡を用いた実証試験を行い、パイプを用いた溶融処理技術の確立を行っていく。



図20 実用的な使用を想定した溶融実験のための金属製パイプの例

(14) 環境省大臣認定を取得したツネイシカムテックス株式会社への聞き取り調査

採用されている溶融方法は酸素バーナ式表面溶融法である。技術的な特徴を以下にまとめた。

- ・バーナという馴染み易い加熱原理の溶融方式であり、他の溶融方式と比べて装置の構造が単純である。
- ・炉床傾斜と灰安息角により、灰押し出し装置で炉内に均一な溶融面を形成することができ、他の装置を必要とせず炉体構造がコンパクトである。
- ・高温雰囲気での溶融炉耐火物は、被処理物に合わせた高温・耐久性に最適な材質を選定し、必要に応じて外壁を水冷却構造とすることで耐火物の耐久性を向上させている。
- ・輝度が高く、溶融炉内の灰分布に合わせた火炎フレームと複数のバーナ配置により雰囲気温度の均一性と溶融効率の向上を図っている。バーナノズル部の保守点検が容易なバーナ構造。
- ・特殊バーナの採用と燃焼空気の予熱や必要に応じて酸素富化を行うことで排ガス量と燃料消費量の低減を図っている。
- ・溶融スラグは出滓口部の湯溜まりから自然流出で流れ出る為、熟練者による特別な作業は必要としない。また、シンプルな構造である為、高度な運転技術は必要とせず、自動運転・管理により炉の立上・運転・立下が容易なオペレーションが可能。処理能力は処理装置2基で24トン/24時間。

プラント建設までのコストとしては、ツネイシカムテックス株式会社の場合、元々の熱処理による廃棄物処理を経営の柱としていたため、新たなプラント建設という方向性ではなく、増築という形を取れたことで新規プラント作成と比べると大幅にコストが削減された。環境アセスメントも新しい地域ではなく、

既に建設されている廃棄物処理施設の場所での環境アセスメントとなるため、こちらも新規よりコストが低かった。しかし、廃棄物の（コンクリートと混ぜての）固体化に関しては当初想定していなかった処理施設を追加する必要が生じ、比較的大きなコストがかかった。ランニングコストとしては、既設の熱処理による廃棄物処理施設を経営の柱としていたため、毎日のように熱処理施設が稼働している。そのため、アスベスト廃棄物のみを処理するために炉を立ち上げたり落としたりすることで発生するコストがほとんどかからない。

以下に、調査したプラントの処理の概要を説明する。

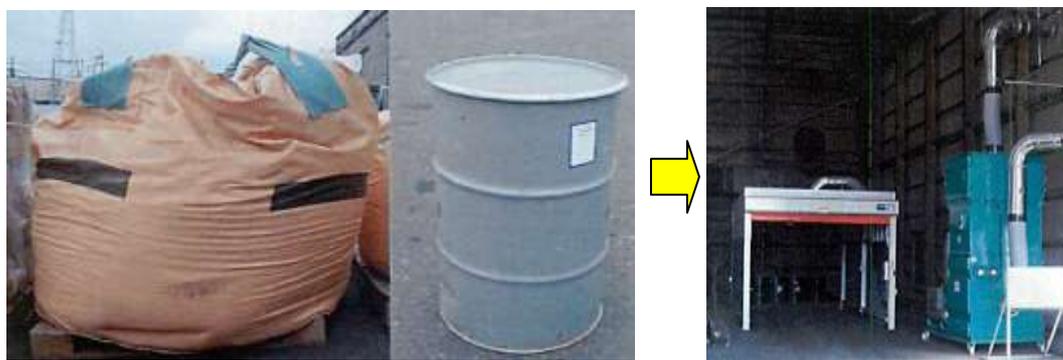


図2 1 廃石綿入りの2重袋はフレコンバック又はドラム缶で受け入れ。受け入れた廃石綿等は負圧に管理されたブース内で容器の破損や異物有無等を確認。



図2 2 負圧に維持された中で投入作業を行う投入管理室（左）と装置内が負圧に維持されている自動投入装置（右）。投入された廃棄物の重量管理。

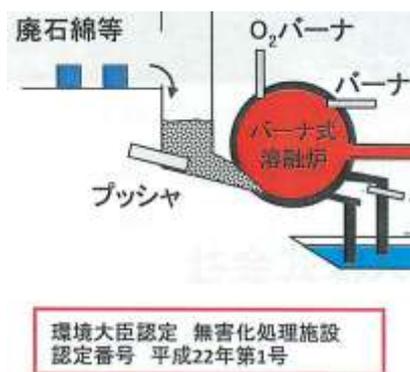


図2 3 他の焼却灰と混ぜてバーナ式の溶融炉に送り込み完全無害化する方式。廃石綿の処理に伴って生じるばいじんは、薬剤処理後セメントで固化し処分される。