

## 循環型社会形成推進科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

- ・研究課題名=赤外線を用いた安全なアスベスト廃棄物溶融処理に関する研究
- ・研究番号 =K 2 0 2 0, K 2 1 5 4, K 2 2 0 9 8

・国庫補助金精算所要額 (円) =36,061,000 (複数年度の総計)

・研究期間 (西暦) =2008~2010

・代表研究者名=池田伸一 (独立行政法人産業技術総合研究所)

・共同研究者名= 該当無し

・研究目的 =緊急の課題となっている、アスベスト含有廃棄物の処理について、本申請研究ではこれまで試みられていなかった赤外線集光による加熱方法を用いて1500℃以上の高温環境で完全溶融することによって、安全でエネルギー効率の高いアスベスト処理方法と装置を3年の研究期間内に提案するものである。アスベスト含有廃棄物のうち、飛散性アスベストとして早急の処理が必要な、建築物内の壁・天井の吹付材の処理に関しては、ロボットを利用した位置制御による赤外線加熱装置を試作し、現場でのその場溶融処理を実現することを目指す。非飛散性アスベストとして、大量の溶融処理が必要なスレート材等の処理については、赤外線加熱法を利用した溶融炉を用いた実証実験を踏まえて、要求される処理能力(5トン/日:環境大臣認定基準)を達成できるような溶融炉設計を行う。

・研究方法 =本申請研究は、吹付材などの飛散性アスベスト廃棄物処理に関するA. その場溶融処理技術確立と、スレート材などの非飛散性アスベスト廃棄物処理に関するB. 溶融炉設計の2つのテーマからなる。本研究開始以前に、典型3種アスベストを赤外線で融点以上の高温場を形成することで溶融無害化できること、吹付材のその場処理が原理的に実現可能であることを確認している。

テーマAについては、線状赤外線加熱反射鏡の試作を行い、1600℃以上の温度を得られるように設計を調整・最適化することが目標であり、その設計に必要な基盤技術開発を行うことが必須となる。本研究開発では具体的には以下の内容を遂行した。

- (1) 高温ダメージの定量評価のための、正確に鉄板及びコンクリートの温度分布を熱電対で測定するシステムの構築、
- (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、
- (3) 新しい反射鏡加工プロセスの確立、
- (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、
- (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、
- (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
- (8) スキャンロボットの設計、製作及び動作試験、
- (9) 集光加熱法によるアスベスト溶融処理試料のTEM観察、
- (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

テーマBについては、既存の赤外線集中加熱炉を使用して、モデル廃棄物を用いた溶融速度の測定などを行い、大型炉の基本設計指針を得るのが目標である。具体的には以下の内容を遂行した。

- (11) 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
- (12) 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
- (13) 新しい加熱手法（パイプ法）の開発（発明）

2年目の21年度は、当所契約職員3人、客員研究員1人を研究協力者とした。3年目の22年度は、当所契約職員3人、客員研究員のべ3人を研究協力者とした。

- ・ 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 に示すように 1 kW 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。

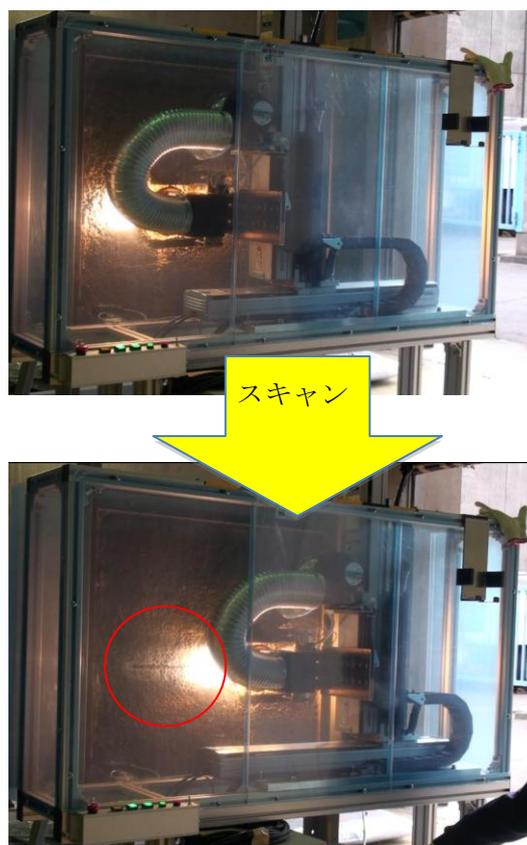
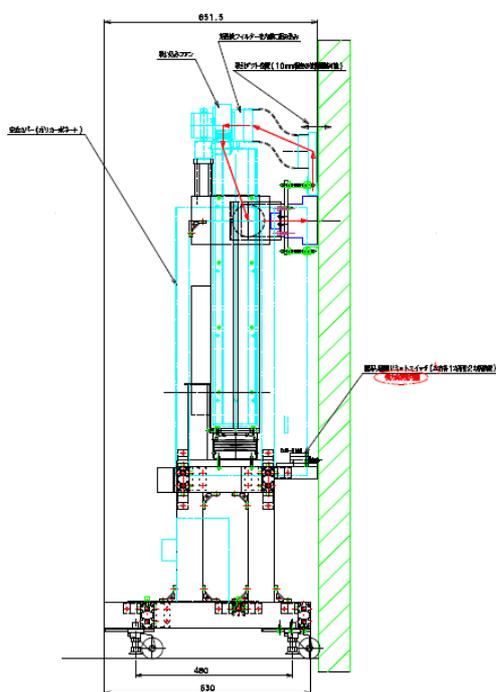


図 1 スキャンロボット断面図

図 2 スキャンロボットによる加熱処理

(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3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4参照)、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。

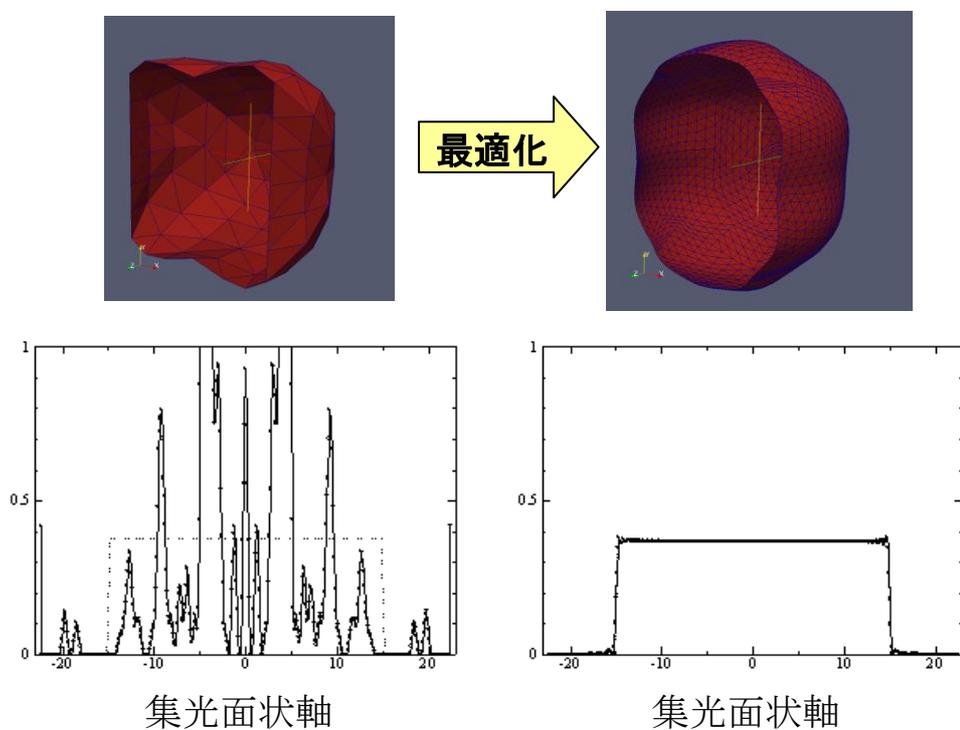
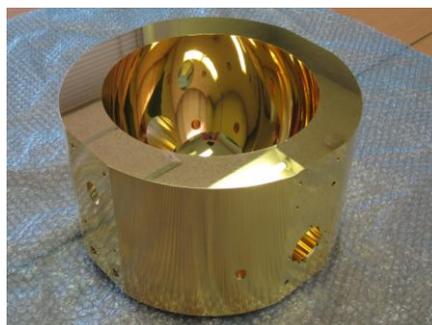


図3 最適化シミュレーションの1例

図4 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5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6に示す。このときの光照射条件は、粉末の酸化鉄が十分熔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。

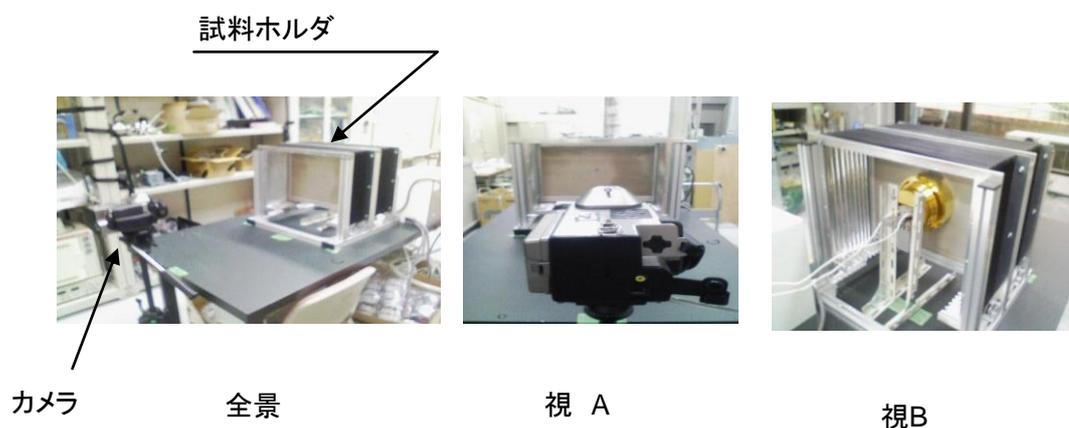


図5 2次元平面温度分布測定システム

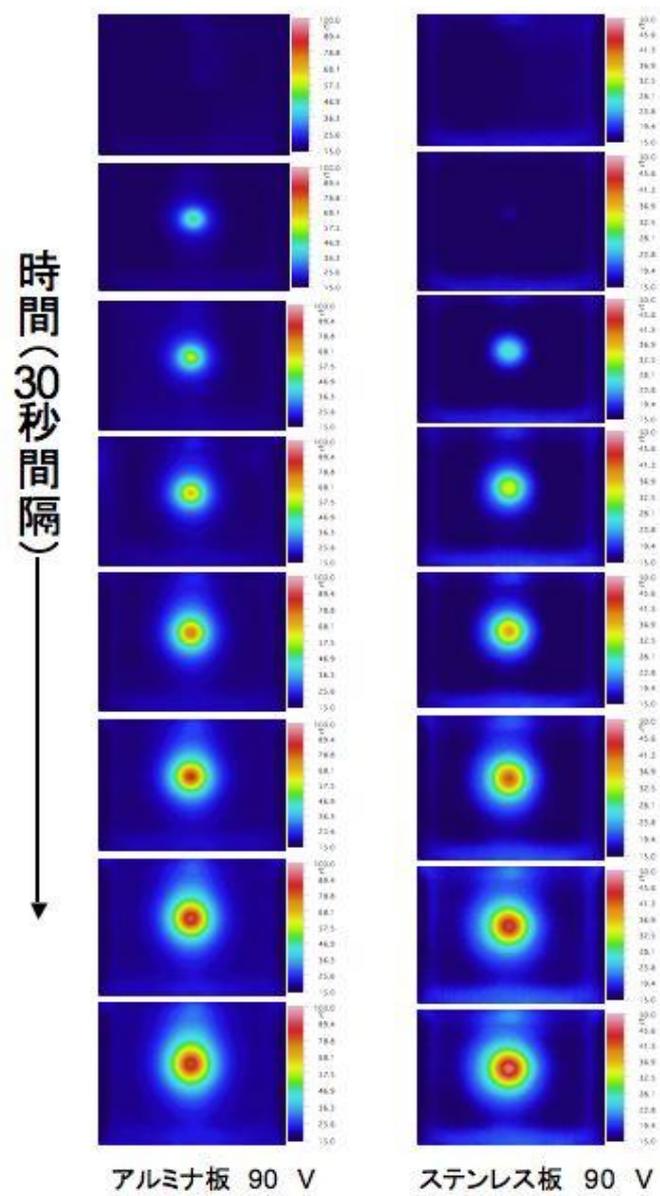


図6 2次元放射温度計を用いた測定温度分布の照射時間依存性

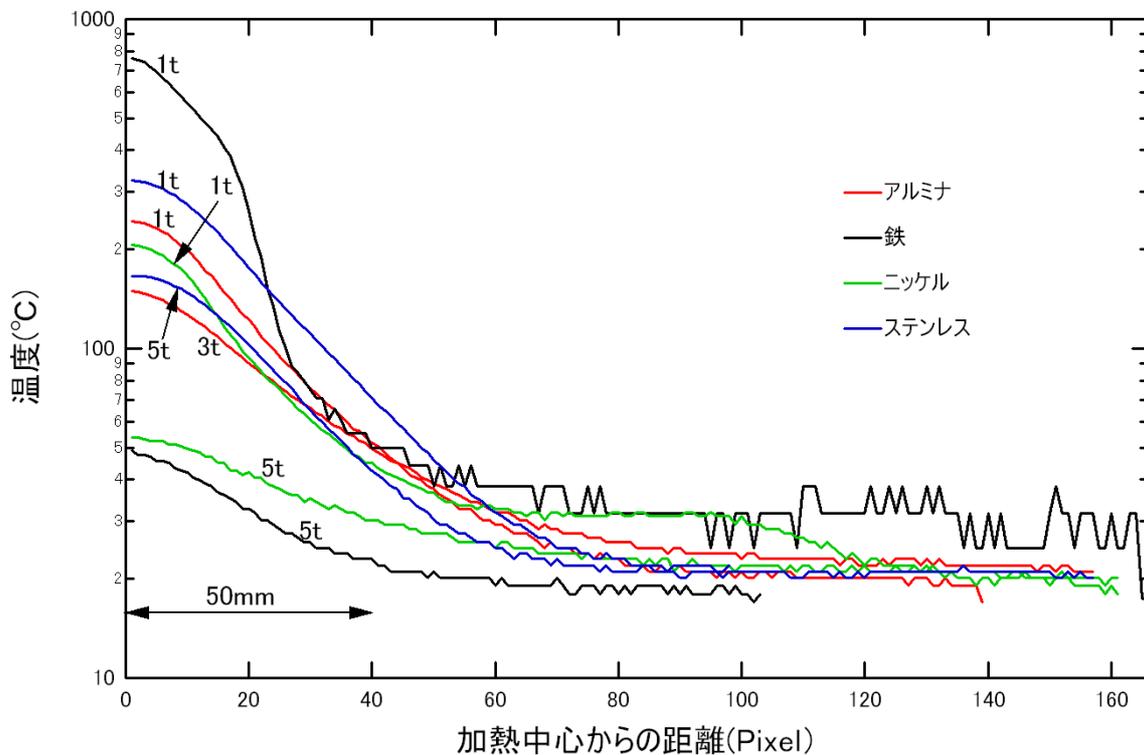


図7 各材料板の加熱中心から動径方向の温度分布

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。放射率は1と仮定した。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。また当然のことながら、板厚が薄いほど局所的に加熱される様子がはっきりと確認できた。例えば鉄板に限って言えば、今回の実験の加熱条件では厚さ5mm以上となると最高温度は高々40°C程度だと考えてよいということになる。

## (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。

- (11) 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
- (12) 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8にクリソタイル 11%含有のスレート材溶融の様子を示す。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。その結果、炭酸カルシウムが主成分であることがわかった。また、アスベスト単体の溶融実験と同様に、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。

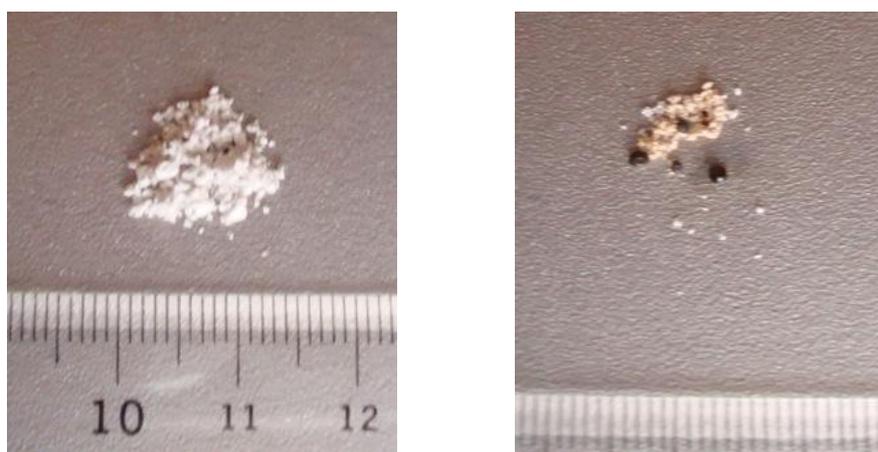


図8 溶融前後のクリソタイル 11%含有の粉末状スレート材

・結論 =集光加熱技術は、既に成熟した技術として近年着目されていなかったが、本研究開発によって、特にアスベストなどの廃棄物の 1500 度程度の高温処理を目標とした基盤技術が確立できたと考えている。一方、実用化を想定した際には、解決しなければならない具体的な課題を顕わにすることができた。

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を行い、最適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した。当該プログラムを用いた形状最適化反射鏡については、初年度に確立した新しい反射鏡加工・製造プロセスを使っても、現状の金属切削法では現実的に製作することはコスト的に困難であり、金属に金メッキを行う方法以外の技術を検討する必要があることが分かった。既に、金属加工以外の方法に関する開発を着手しており、本研究開発で得られた最適形状化プログラムによる新しい低コスト反射鏡の実用化を、1~2年の間に達成できると考えている。

また、スキャンロボットを用いた実際のアスベスト吹き付け被覆材の熔融実験は行うことが出来なかったが、本研究開発でその素性を明らかにした集光加熱の際に発生する吹き付け材料からのガスの無害化に興味を持つ企業との共同研究を行うことが決定している。早ければ1年以内に、当該スキャンロボットを用いたアスベスト熔融実験を行い、実用化を急ぎたい。

アスベスト100%試料を集光加熱によって熔融した試料を TEM 観察し、繊維状形態がほぼ破壊されたことを確認したが、1部繊維状形態が見いだされたため、より詳細な分析を行う必要がある。

パイプを用いることにより、現状の集光加熱による熔融処理速度を著しく改善する発明を行った。平成23年4月中に特許出願の予定をしており、詳細は記載できないが、低コストであり、困難な技術的課題もないため、1日に1トン程度の1500度以上の熔融処理は、現在知られている集光加熱装置をそのままスケールアップすれば、可能であるという目処をつけた。

上記で得られた各課題に対しては、学会での講演や広報活動によって、具体的な共同研究をいくつかの企業と開始する予定であり、当該研究開発の当初の目標を確実に達成できるような準備ができたと確信している。

## 英語概要

・研究課題名 = 「Development of secure melting treatment technique for asbestos wastes using infrared radiation」

・研究代表者名及び所属 = Shinichi Ikeda, NeRI, AIST Tsukuba, Japan  
(共同研究者も同様に記入すること)

・要旨 (200 語以内程度) = We are developing a new on-site method to melt noxious industrial wastes including asbestos easily using infrared radiation from halogen lamps. The harmful property of asbestos originates from its long and thin fiber shape. So far, it has been very difficult to make the waste innocuous by perfect melting since the highest melting temperature of asbestos is around 1500 °C. We have tried to melt almost all of the asbestos minerals and several forms of wastes containing asbestos by this newly developed method. It is shown that all the molten samples do not contain any asbestos by means of powder x-ray diffraction measurement and phase-contrast microscopy, whose methods are authorized by JIS A 1481:2008. After improving the manufacturing process, especially for gold galvanizing, a new prototype has been built to make the mirror. In addition, simulating the optimum shape of reflecting surface has become possible by means of newly produced algorithm to achieve line-shaped radiation focusing. Mapping the high temperature region on the square substrate has been examined using two-dimensional pyrometer for designed metal or ceramics thin panel, leading to the conclusion that thermal conductivity is not essential. For the large-scale melting procedure of asbestos wastes by infra-red radiation, another new technique has been invented in this research scheme. This will enable us to make more efficient image furnace.

・キーワード (5 語程度) = asbestos、infrared radiation、melting technique、reflector