

課題名 1ZF-1203 マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理
—アスベスト飛散とダイオキシン発生防止—

課題代表者名 篠原 真毅（京都大学 生存圏研究所 生存圏電波応用分野 篠原研究室）

研究実施期間 平成23～25年度

累計予算額 58,644千円(うち25年度14,630千円)

本研究のキーワード アスベスト、無害化、マイクロ波加熱、スレート瓦、クリソタイル、アモーサイト、東日本大震災

研究体制

- (1)処理設備システム構築 ((a) 京都大学 生存圏研究所、(b) 中部大学)
- (2)瓦礫中有害物質処理の実験的研究 (東北大学)
- (3)生体毒性物質および環境汚染物質の評価・解析(上智大学)

研究協力機関

京都大学 生存圏研究所、中部大学、東北大学、上智大学

研究概要

1.はじめに(研究背景等)

東日本大震災における津波によって倒壊し流された瓦礫には、法令で規定された有害物質が、混入していることは各種の調査で判明している(図1)。アスベスト粉塵による健康被害は遅発性であり、吸引後、10年以上経過して、発症することが多い。阪神淡路大震災から13年後、倒壊した建物の解体作業に従事した労働者が、2008年にアスベスト(石綿)が原因の中皮腫を発症し、労災認定を受けている。さらに2012年には、救援に従事したボランティアから、中皮腫を発症された方が出てきている。長期の復興体制に移行している現時点では、作業者が大量のアスベスト粉塵を吸引する危険は無いと考えられるが、大量の瓦礫は地盤の埋め立て嵩上げに使用される。その中にアスベスト含有のスレート等が混入していると、後世まで汚染土壤の不安を残すことになる。埋め立てに先立ち、アスベスト含有スレートを選別し、無害化処理を施すことは、必要不可欠である。

このアスベスト無害化には、高温加熱して組織構造を変える必要があるが、アスベストを含むスレート瓦は断熱性、耐熱性が高く熱伝導率が小さいため、外部からの加熱では、塊を均一に加熱処理するには長い時間が必要であった。そのため、従来法では震災起因のコンクリート材(想定値: 200万トン)に含まれる有害物質無害化は困難であり、これを埋め立てし、封じ込める事をもってその処理としている。これは非飛散性アスベスト処理手法としては、現状では、最も現実的で効率的な手続きではあるが、可能であれば、これらを無害化した後、埋め立て用資材に用いることが望まれる。

マイクロ波加熱炉を用いることで、この瓦礫中のアスベスト含有セメント無害化処理、再利用不可能な高濃度塩分含有木質系廃材の無害燃焼による迅速減容処理を提案する。この工程で、セメントが1050°C以上に加熱され、アスベストが無害化すると共に、マイクロ波の電磁界および高温のセメントとの接触によって、ダイオキシンが分解される。この分解方法は日本スピンドルによって開発・完成された技術である。さらに、排ガスに高性能集塵機・2次燃焼器を接続し、有害成分を大気中に排出しない二重の安全対策を施した無害化システムを構築する。

図1 東日本大震災により生じた大量の瓦礫には、非飛散性アスベストを中心とした多くの有害物質の混入が想定される。また、津波によりさらされた木質瓦礫は、塩分を含むことが想定され、これら瓦礫の高速・高効率な処理法が望まれている。



2. 研究開発目的

東日本大震災で発生した瓦礫は、セメント、木材、およびプラスチック、有機物・金属などに、大量の塩分(海水由来)が含まれおり、これらの混在物をマイクロ波で1050°Cにまで加熱することで以下の効果を期待する。

- (1) 無害化を促進、コンクリート廃材再生可能なセメント原料および安全な埋め立て用資材化する。コンクリート廃棄物に含まれるアスベスト類を加熱処理することで、再生セメント原料や二次汚染を気にすることのない埋め立て用の資材にする
- (2) 利用不可能な木材・燃料、即ちハイブリッド加熱処理の燃焼炉熱源として活用する。
- (3) 非飛散性アスベストの無害化・塩分含有有機物の燃焼によって生じるダイオキシンを迅速に無害化する。

本計画では、これまでに申請者や協力者らが実証してきた新技術を結集し、高効率で迅速に廃棄物を無害化・減容できる設備を構築運用する。

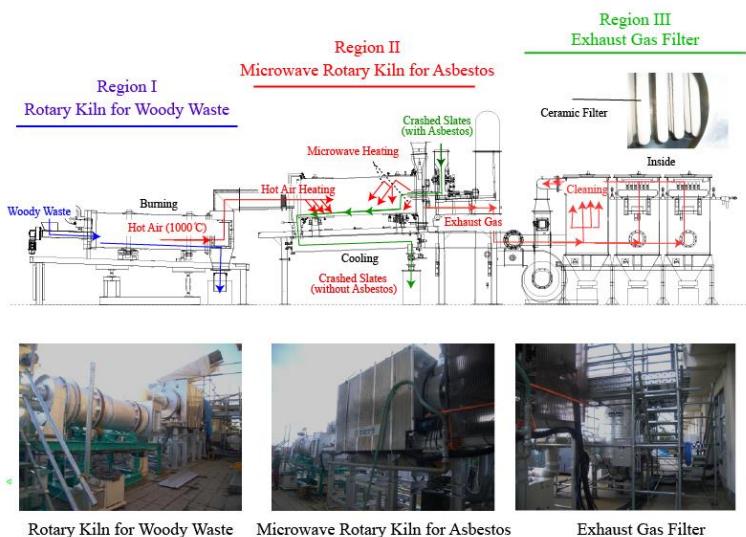
3. 研究開発の方法

(1) 処理システム構築：篠原真毅、京都大学 (a)、佐藤元泰、中部大学 (b)

平成24年度では、マイクロ波による瓦礫へのエネルギー供給系の強化・増強を行った。数トンの無害化、火力半量をマイクロ波依存と想定すると、提案したロータリーキルンに要求されるエネルギー伝送能は35 - 70 kWとなる。既存のロータリーキルンの出力は10kWであるので、これを必要とする入力まで増強し、伝送系の構築を行った。このシステム構築はエクセルギーを重視し、ハイブリッド加熱とした。マイクロ波の吸収は、おおむね物質温度の2乗に比例して増加する。一方、燃焼熱を利用した加熱では、火炎・高温ガス温度と加熱物の温度差が小さくなると、つまり、加熱物の温度が上がると有効に使われる熱量が、加熱物の温度に比例して減少する。この物性学・熱学上の特徴を上手に使うには、室温から600°C程度まで木質系廃材・廃プラスチックの燃焼熱で加熱物(アスベスト含有セメント類)を予熱する前段とマイクロ波で600~1050°Cに加熱する後段をカスケードに接続する方法があり、これに適したシステムを構築した。この工夫により、廃木材により生じた熱エネルギーを効率的に運用することができた(図2)。

平成25年度では、昨年度に得られた無害化システムによりアスベスト含有スレートが完全に無害化されることを実証した。また、東日本大震災被災地に配置された実証試験の撤退・撤収を行い、得られた成果を学会、社会へと還元した。

図2 アスベスト含有瓦礫と塩分含有木質系廃材のマイクロ波無害化処理の概念図と建造された処理設備。本試験設備は、前段燃焼炉(木質瓦礫処理設備)、アスベスト処理装置および排ガス処理装置(高温集塵機)を直列(カスケード)に接続している。前段燃焼炉では、木質系瓦礫を燃焼させて減量を図ると共に、その高温燃焼ガスをアスベスト処理装置の雰囲気温度制御と炉壁加熱の熱源として使用する。マイクロ波と高温燃焼ガスの複合的加熱によってアスベストの結晶を変性させて無害化する。



(2) 瓦礫中有害物質処理の実験的研究: 吉川昇・東北大学

平成24年度では、現場における処理設備の管理及びその運用性評価を行った。この炉システムは、有害物質を含んだ瓦礫の破碎・炉へ搬入、マイクロ波迅速処理炉にて無害化を行うためのものである。本テーマでは、この操業条件を検討することによって、瓦礫が無害化・減容化する最適熱処理条件を抽出・確定した。また、瓦礫を形成する物質の多くは、高温においてスラグと呼ばれるガラスや飛灰へ変わり、劇的にその電気的性質を変える。本テーマでは処理により生じたスラグ・飛灰へのプロセス効率性への影響とその改善の検討を行った。

平成25年度では、工学的にはアスベストの完全な無害化という成果を得ることができたが、この無害化メカニズムは不充分であると思われた。今年度はこの学術的解を得ることを目的とし、アスベスト無害化メカニズムを明らかにするための基礎データの取得を行った。また、学会・社会への還元を行った。

(3) 体毒性物質および環境汚染物質の評価・解析: 堀越智・上智大学

阪神淡路大震災と異なり、本震災における瓦礫成分の詳細は依然未知であった。昨年度では、その処理に生じる化学成分の解析及び有害性の評価は速やかに行い、本装置により生じる瓦礫に残留する汚染物質の濃度低下を分析し、これらの分析結果を基に装置最適化の情報をシステム構築班へフィードバックした。また、この解析から、本研究システムは有機系毒性物質についてのリスクは規制値以下であることが明らかとなった。この結果を受けて、今年度では電磁波とアスベスト形状相互作用に焦点を絞った学術研究を行い、アスベスト無害化メカニズムを明らかにするための加熱データの取得を行った。また、得られた学理の学会・社会への還元を行った。

4. 結果及び考察

(1) 処理システム構築: 篠原真毅、京都大学 (a)、佐藤元泰、中部大学 (b)

平成24年度における処理システム構築班の研究活動について述べる。震災瓦礫の他府県への輸送には、行政上、おおきな制約がある。そこで、マイクロ波を用いた加熱系が、従来系と比してコンパクトになる特徴を生かし、現地に速やかに有害物質無害化システムを構築する方法を提案し、これを実行した。設置場所は、宮城県名取市にある市立閑上中学校の校舎およびその前庭を提供して戴いた。同校舎は、閑上地区震災被害により、使用されていないが、ここに行政財産目的外使用許可を戴いた名取市に深甚なる謝意を表するものである。図3に設置レイアウト図を、図4に据え付け工事中の写真を示す。

本委託研究は、急速に変化する被災地現状を踏まえ弾性的な研究計画の変遷が要求されているため、試作機運用と装置改造を交互に実施した。自H12年12月2日より至H25年3月29日に、合計50日、述べ約250人の現地作業および実験を行った。

操業試験1では、H24.12.03-12.17に行われ、現地(名取市閑上中学校)搬入・据え付けを行った。この調整後に、H12.12.18-12.20において第一回処理実験マイクロ波入力No1, No2合計14.5kWを行い、これにより無害化された震災瓦礫中アスベスト含有量を調査した(H12.12.22-25.01.14)。操業試験2は、H25.01.24~01.25において装置改良が行われた後に実行された。この改良では、木質系燃焼炉-マイクロ波炉接続部の煙道に設置したマイクロ波フィルターを改良型に交換し、No2マイクロ波入射系統分解検査、ガス流速測定・酸素分圧測定などのデータ取得を行った(H25.01.26-01.27)。操業試験3は、H25.02.21~02.26において実行され、定格2トン相当処理700°C実証を目的とした。操業試験4はH25.02.21~02.26において実行され、定格2トン相当処理・900°C以上の条件で運用された。これらの実証試験はサブテーマ2-3を担当する東北大大学、上智大学も参画したが、本操業の性質上、本テーマに記載した。

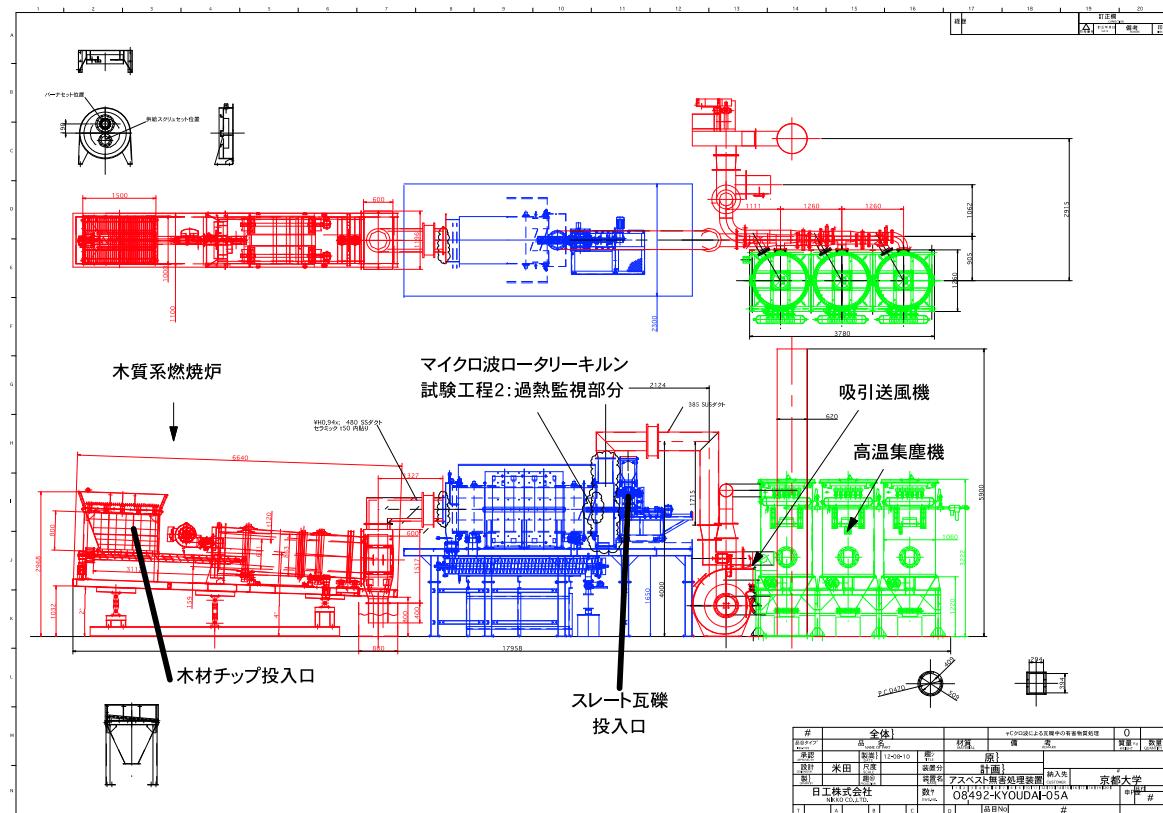


図3 現地アスベスト無害化システムの設置レイアウト。本試験設備は、前段燃焼炉(木質瓦礫処理設備)、アスベスト処理装置および排ガス処理装置(高温集塵機)を直列(カスケード)に接続している。アスベスト処理装置にスクリュー式現両羽供給機を通して、強化スレート瓦礫を投入する。マイクロ波と高温燃焼ガスの複合的加熱によってアスベストの結晶を変性させて無害化する。高温集塵機は、排ガス中に含まれる粉塵取り除くために設けられている。右端に示す煙突の直前に設置した吸引送風機によって、炉内を負圧に保ち、燃焼ガス、瓦礫からの粉塵が外部に漏れ出さない設計になっている。

図4 H24.12.03-12.13に現地(名取市閑上中学校)搬入・据え付け、配管・配線、試験調整を無事完了した。引き続き、マイクロ波3台入射調整を行った。各系統、7.5kWまで、マイクロ波を入射し、据え付け調整運転試験を完了した。

現地据付けが凡そ10日程度で完了したことからも、本アスベスト処理設備が震災時における緊急対応性を有していることがわかる。なお、H25年度において、本試験設備はプロジェクト終了後に速やかに解体された。



(2) 瓦礫中有害物質処理の実験的研究: 吉川昇・東北大学

サブテーマ2で導出された実験操業条件の最適化について述べる。1-3回の実験結果を詳細に分析した結果、アスベスト纖維を3/3000粒子以下にするには、900°C以上の雰囲気温度が必要であると判断された(表1)。これまでの実験では、前段燃焼炉(キルン)900°C-高温煙道-アスベスト処理装置-排気煙道-高温集塵機-吸引送風機-煙突を流れる燃焼ガス量・流速・圧力・温度・酸素分圧測のデータを分析したところ、各部の温度、圧力、ガス流束は、計画値と良く一致しており、熱設計が正しく行われたことが確認されている。設計ではアスベスト処理炉を1000°C以上の雰囲気にするためには、前段燃焼炉で1300°C以上の燃焼ガスを発生させる必要がある。使用している前段燃焼炉では、1000°Cが上限であった。高温煙道に設けられているマイクロ波フィルタからの熱損失(抜熱)を節約する必要がある。そこで、助燃バーナーをアスベスト処理炉に直接取り付けて、1500°Cの燃焼ガスを炉内に直噴するように、レイアウトを変更した。1500°Cの火炎直噴ガスと、逆側のフード部から吸引される冷却空気が乱流状態で混合し、炉内の温度を最高900°C程度に調整する手法をとった。この改造によって、炉内温度を1000°Cまで、任意に調整できるようになった。

第4回の試験では、当初の計画値であるアスベスト含有瓦礫日処理量2トンで無害化を実証するため、雰囲気温度900°C、処理量40kg(日量1トン相当)および80kg(日量2トン相当)のアスベスト含有瓦礫を処理する連続操業試験を行った。

表1: 雰囲気温度900°C、処理量40kg/h および 80kg/hにおける雰囲気温度とアスベストの処理比較

マイクロ波照射の有無		アスベスト処理装置雰囲気ガス温度	残存アスベスト粒子数 (定性分析 本 / 3000粒子)	残存アスベスト重量比 (XRD定量分析)
マイクロ波 19kW照射 (80kg/h)	粗粒度	900°C	0	-
	中粒度	900°C	0	-
	微粒度	900°C	0	-
マイクロ波無し、中粒度 (40kg/h)		900°C	0	0.1未満(0.08)

この結果は、表2に示す700°Cの場合の結果に比較し、無害化の効果が顕著に現れている事が示されている。すなわちマイクロ波印加が無い場合、40kg/hの少量投入においてアスベストが検出されたのにも拘わらず、マイクロ波印加に依れば80kg/hの投入量でも、全ての粒度で無害化が達成された事が分かる。表2はスレート片の粒径に依る無害化への影響を示している。

表2:マイクロ波印加、700°C無害化処理に及ぼすスレート片粒径の影響

項目(試料)	Chr含有率	Chr纖維数/3000	備考
スレート片(粗粒)	0.82	5	700°C18-19kW
スレート片(中粒)	1.20	8	700°C19kW
スレート片(微粒)	1.10	15	700°C19kW

平成25年度に行った実験室的な基礎研究について述べる。同年度は、昨年行った実証試験の結果を解釈す

る上でアスベスト含有スレート瓦のマイクロ波加熱特性を知るために実験室的な基礎研究を行った。その概要を以下に述べる。

- 1) 大学の実験室にアスベスト含有物を持ち込みマイクロ波印加基礎実験を行う事は、安全管理の面から実験を準備するのに時間を要し、今年度中に成果を得る事が困難であると判断した。このためアスベスト模擬物質を選択し、そのマイクロ波加熱特性に関して調べた。
 - 2) この目的で、アスベスト疑似物質としてタルク、母相スレートとしてCaOを選択し、その高温誘電率測定を行った。
 - 3) 次に、この測定値を用いて、マイクロ波加熱に関する計算機シミュレーションを行った。この結果を用いて、マイクロ波印加に依るアスベストファイバーの無害化実証試験結果に関する考察を行った。
- これらの詳細は別紙にて述べるが、本テーマの大筋としては、大型実証試験におけるアスベストの完全無害化条件を導きだし、このメカニズムについて報告を行った。

(3) 体毒性物質および環境汚染物質の評価・解析: 堀越智・上智大学

本担当では、アスベスト含有スレート瓦のマイクロ波無害化に対するダイオキシン類の生成確認を行った。本装置では、復興瓦礫の中でも木材の燃焼処理も併用しているため、ここからのアスベストの生成も予想された。ダイオキシン類のサンプルは図5に示す装置内の各位置で固体サンプルを採取し、(株)環境ソルテックおよび(株)日吉に分析を依頼した。サンプル0では、未処理の木材瓦礫をサンプルとした。サンプル1では燃焼後に発生した飛灰をサンプルとした。サンプル2では木材燃焼およびアスベストの無害化により発生した高温ガスおよび飛灰をろ過するための高温フィルターに付着した粉末をサンプルとした。サンプルは11月および12月に行った実験終了後、装置が完全に冷却されたことを確認して採取した。また、12月のサンプリングではフィルターの交換等は行わず、実験期間の蓄積した灰の測定を行った。

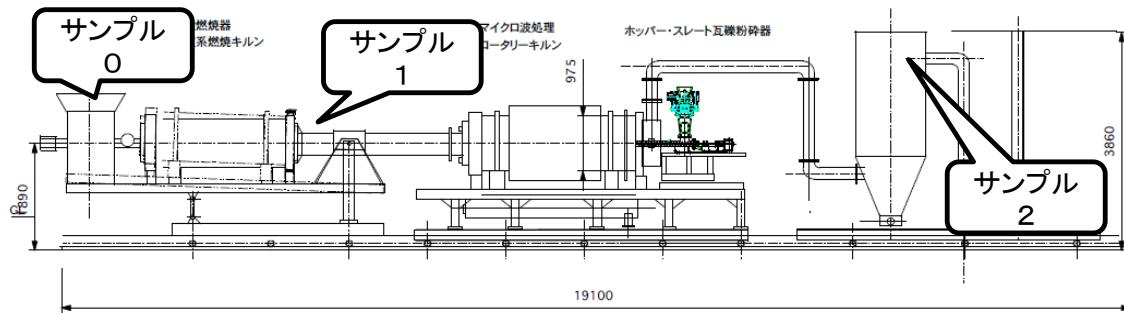


図5 ダイオキシン類の測定に対するサンプリングポイント

分析結果からサンプル0およびサンプル1付近のダイオキシン類の生成は認められなかった。一方、サンプル2付近の最も高濃度に蓄積していると思われるダイオキシン測定より、ダイオキシン類(毒性等量)がガスから0.70 ng-TEQ m⁻³N、灰から0.15 ng-TEQ g⁻¹検出された(図6)。

試料名		2次燃焼炉出口 排ガス	計量方法
項目			
ダイオキシン類(毒性等量)	ng-TEQ/m ³ N	0.70	JIS K 0511(2008)

試料		サイクロン灰	キルン灰 堆積物	計量方法
項目				
ダイオキシン類(毒性等量)	ng-TEQ/g	0.15	0.00000066	JIS K 0511(2008)

図6 サンプル2より採取したガスおよび灰の中のダイオキシン量((株)環境ソルテックによる分析)

環境省のホームページより、廃棄物焼却炉として2トン/時間未満の場合、排ガスでは2 ng-TEQ m⁻³Nで灰からは3 ng-TEQ g⁻¹に定められている(図7)。したがって、本装置の運転により、発生するダイオキシン類は基準値を

下回った。

① 排出ガスの基準値（規制対象となる廃棄物焼却炉に係る廃ガス）（法第8条第2項第1号、法施行規則第1条別表第1）

焼却能力	新設施設の 排出基準 平成12年1月15日～	既設施設の排出基準		ナノグラム (ng) =10億分の1グラム m³N (ノルマル立方メートル) =標準状態のガス量 ※新設施設:H12.1.15 以降に新設された 施設 ※既存施設:H12.1.15 時点で既に設置さ れている施設
		～平成14年11月30日	平成14年12月1日～	
4 t／時間 以上	0.1 ナノグラム／m³N	80 ナノグラム／m³N	1 ナノグラム／m³N	※新設施設:H12.1.15 以降に新設された 施設 ※既存施設:H12.1.15 時点で既に設置さ れている施設
2 t～4 t／時間	1 ナノグラム／m³N		5 ナノグラム／m³N	
2 t／時間 未満	5 ナノグラム／m³N		10 ナノグラム／m³N	

③ ばいじん等の基準値（廃棄物焼却炉から排出されるばいじん、焼却灰その他の燃え殻、廃ガス洗浄施設汚泥及びこれらの廃棄物を処分するために処理したもの）（法第24条、H12.1.14厚生省令第1号）

新設施設に係る基準	既設施設に係る基準	
平成12年1月15日～	～平成14年11月30日	平成14年12月1日～
3ナノグラム／g	基準の適用猶予	3ナノグラム／g（注）

図7 新設廃棄物焼却炉におけるダイオキシン類の発生規制値(環境省:ダイオキシン類対策特別措置法に基づく規制(B)より抜粋)

その後、アスベスト含有スレート瓦や木材瓦礫の無害化および燃焼処理実験を繰り返した後、12月および1月にサンプル2の位置の灰中に含まれるダイオキシン類の測定を行った。12月の測定結果からは、業者を(株)日吉に変え分析を依頼した。サンプル2付近の最も高濃度に蓄積していると思われるサンプルより、灰の中のダイオキシン類(毒性等量)は0.78 ng-TEQ m⁻³Nであり、この実験からも基準値を下回る値しか観測されなかった(図8)。

項目	実測濃度 ng/g	試料における 定量下限値 ng/g	試料における 検出下限値 ng/g	測定量 (毒性等量) ng-TEQ/g
Total ダイオキシン類 (PCDDs + PCDFs + ペンタ-PCBs)	2.4	0.0030	0.0015	0.78

図8 サンプル2より採取したガスおよび灰の中のダイオキシン量((株) 日吉による分析)

本実験結果より、本装置でのアスベスト含有スレート瓦や木材瓦礫の処理によってダイオキシン類の発生量は基準値以下であることが示された。なお、本テーマではその他有機系有害物質の評価・解析やアスベスト吸収特性の周波数依存性などを行った。これらについては、その詳細を別紙に譲る。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

アスベスト無害化、排ガスの安全性の観点より、昨年度に建造された試験設備の評価を行った。本設備は、前段燃焼炉(木質瓦礫処理設備)、アスベスト処理装置および排ガス処理装置(高温集塵機)より構成されており、それぞれ東日本大震災で生じた木質瓦礫燃焼、アスベスト含有スレート瓦無害化及び全プロセスの排ガスを制御する。これら全く異なる設備を要素とし、震災瓦礫処理を目的としたひとつのシステムとして設計された本設備は、その温度分布、ガス流量、常温空気の流入量等において、設計目標値と非常によい一致を示し、アスベストの完全無害化、ダイオキシン排出量規制値以下を達成している。これは、環境プロセス・科学プロセス工学における重要な知見となる。

また、物性論においては、マイクロ波によるアスベスト無害化のメカニズムを実験及び理論の両面より調査した。一般に、アスベストを含むスレート瓦の無害化には1500°Cもの高温での処理を必要とするが、本設備では900°Cで完全な無害化が観測されている。これは、マイクロ波は従来の伝熱とは異なる伝達経路により物材へエネルギーを与えるために生じる長所である。このメカニズムはラボにおける基礎実験及び数値計算によりそのメカニズムを詳細に吟味され、観測された新しい現象は速やかに学会・社会へ還元された(1-3)。今後、様々な工学への応用が期待される。

(2) 環境政策への貢献

本試験機は、現状木質瓦礫 2 - 10 トン/日、アスベスト1 - 2 トン/日の処理速度を有しており、操業4においてアスベストの完全無害化に成功している。この無害化温度は凡そ900°Cで観測されており、従来の1500°Cに比して、プロセス設計上で大きく有利である。また、日産5-10 トン/日処理能(木質+スレート瓦)を有する本試験機は、着工より10日程度にて運用可能なほどコンパクトである。これは次に述べるような環境政策への寄与を有する。

第一に、我が国的重要な政策課題である震災復興への貢献である。本プロジェクトは環境総合研究費(復興枠)における委託研究を受け、その上で、災害廃棄物の処理を迅速・円滑に進めるための研究として実施した。被災地における有害物質を含んだ瓦礫は法令によりそのリサイクルが制限され、特にアスベスト類を含む無害化処理が困難な物質はその輸送も厳しく制限されている。既存技術では、東日本大震災の被害は広範囲に及び、災害廃棄物の発生量も膨大であることから、本震災で生じた瓦礫中のアスベスト類の無害化は困難である。本プロジェクトで得られた高速・低価格なアスベスト無害化処理法が実証、迅速な廃棄物処理を取り扱う施設(中間処理・最終処分)の維持管理・解体手法・管理手法を確立は、東日本大震災からの復興迅速化への障害となる多くの法令上の困難が回避するだけでなく今後生じ得るこれら有害物質の処理および輸送における法令上の困難を技術的なアプローチにより解消する。第二に、これまで処理が困難とされていた非飛散性アスベストの新しい処理アプローチの開発として環境政策に寄与できる。我々の測定においても、現地には非飛散性アスベストは多く存在することが確認されており、これは被災地のみならず我が国の至る所に存在する。これは埋め立てにて処理される予定である。これら瓦礫処理の行政的手続きを、現状の瓦礫量が甚大であること、現地での瓦礫分類状況が良好であることを考慮すると妥当な処理である。しかし、埋め立て処理されたアスベスト類が露出した場合、これらは有毒な飛散性として観測される。本処理法を用いることでこれらの大量の非飛散性アスベストを含有する建材を「迅速」に無害化することができる。

最後に、我々は「後世に負の遺産を残すべきではない」との立場をとってきたが、本試験機運用の情報媒体における注目度を考慮すると、これは我が国の民意に則していると言える(「行政が活用する事が見込まれる成果」参照)。このことからも、本実証試験の成功は我が国環境政策へ大きく寄与し得ると考える。

<行政が既に活用した成果>

「新仕分け」(2013/11/16) 分資料2/3における行政刷新会議ワーキンググループにおいて本プロジェクトの成果が参考された。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

- 1) 週刊環境循環新聞:「震災廃棄物をマイクロ波処理」(平成25年 3月11日)
- 2) 日本テレビ:「震災から2年、がれき処理の現状(ズームイン！！サタデー)」,(平成25年3月1日)
- 3) 日刊工業新聞:「震災がれき処理にマイクロ波が一役－非飛散性アスベストの無害化コスト半減」(平成25年2月14日掲載)
- *朝日新聞デジタル: 同研究にて同日掲載
- 4) NHK サイエンスゼロ: 「電子レンジで鉄が作れる！？ 未知のマイクロ波効果を活用せよ」(平成25年1月23日放送)
- 5) FNS 仙台:「がれきのアスベストを無害化 研究進む」, ニュース (平成25年12月20日)

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

＜査読付き論文＞

- 1) N. Yoshikawa, K. Kashimura, M. Hashiguchi, M. Sato, S. Horikoshi, T. Mitani and N. Shinohara: Detoxification Mechanism of Asbestos Materials by Microwave Treatment, Green Chemistry (Submit)
- 2) K. Kashimura, T. Yamaguchi, M. Sato, Y. Saori, K. Kishima, S. Horikoshi, N. Yoshikawa , T. Mitani, and N. Shinohara, Journal of Environmental and Technology (Submit)
- 3) S. Horikoshi, T. Sumi, S. Ito, R. Dillert, K. Kashimura, N. Yoshikawa, M. Sato: Microwave-driven asbestos treatment and its scale-up for use after natural disasters, Environmental Science & Technology (Submit)
- 4) K. Kashimura*, N. Sabelstrom, K. Imazeki, K. Takeda, M. Hayashi, T. Mitani, N. Shinohara and K. Nagata: Quasi-Stable Temperature of Steady State of Hematite by Microwave Heating, Chemical Engineering & Processing, 76 (2014) 1 – 5
- 5) M. Yanagawa, K. Kashimura*, M. Hayashi, M. Sato, T. Mitani, N. Shinohara and K. Nagata: Control of Hot Spots for Continuous Microwave Iron Making – Effects of Ore–Carbon Mixture Rotations on Refractory and Pig Iron Production –, International Journal of Materials Engineering and Technology, Vol. 9, 2 (2013) 119 – 134
- 6) M. Hayashi*, K. Takeda, K. Kashimura T. Watanabe and K. Nagata: Carbothermic reduction of hematite powders by microwave heating, ISIJ International, Vol. 53, 7 (2013) 1125–1130
- 7) K. Kashimura, N. Hasegawa, S. Suzuki, M. Hayashi, T. Mitani, K. Nagata and N. Shinohara: Microwave Heating Behavior of Conductive Multi-particles using Spatially Separated Electric and Magnetic nodes – Effects of Relative Density on Absorption Properties of Various Carbon Powder Compacts –, Journal of Applied Physics, Vol. 113, 1 (2013) 024902 – 1 – 5
- 8) J. Fukushima, K. Kashimura, S. Takayama, M. Sato, S. Sano, Y. Hayashi and H. Takizawa: In-Situ Kinetic Study on Non-Thermal Reduction Reaction of CuO during Microwave Heating, Materials Letters, 91 (2013) 252–254
- 9) K. Kashimura, J. Fukushima, T. Mitani, M. Sato and N. Shinohara: Metal Ti–Cr Alloy Powders Nitriding under Atmospheric Pressure by Microwave Heating, Journal of alloys and compounds, 550 (2013) 239–244
- 10) K. Kashimura, S. Suzuki, M. Hayashi, T. Mitani, K. Nagata and N. Shinohara: Surface–Plasmon–Like Modes of Graphite Powder Compact in Microwave Heating, Journal of Applied Physics, Vol.112, 3 (2012) 034905 – 1 – 5

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

- 1) 横村京一郎: マイクロ波加熱と材料プロセッシング、金属、アグネ技術センター (2013年8月号 特集)
- 2) 「最新 マイクロ波エネルギーと応用技術」、産業技術サービスセンター
(平成26年出版予定, アスベスト無害化技術に関する解説)
- 3) 堀越智, 篠原真毅, 滝澤鳳、福島潤: マイクロ波化学 -反応、プロセスと工学応用-(三共出版)
- 4) 横村京一郎, 蓬萊秀人: 学振,先導的委員会「電磁波励起非平衡反応場の物理化学と産業応用」
(2013/2/27)
- 5) 篠原真毅、佐藤元泰、堀越智、吉川昇、横村京一郎、木嶋敬昌: マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理研究の現状, 先進素材開発解析システムシンポジウム (講演) 2012/11/13
- 6) N. Shinohara, N. Yoshikawa, S. Horikoshi, T. Mitani, T. Kishima, K. Kashimura and M. Sato: Applications of

Microwave Powers for the Rubble Processing to the Great East Japan Earthquake – Test System for Rendering Asbestos Harmless in the Crashed Slate, proceeding of 2th GCMEA (2012)

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 篠原真毅、樺村京一郎、佐藤元泰、吉川昇、堀越智、米田沙織、木嶋敬昌:アスベストのマイクロ波及び高温集塵による無害化処理技術、粉体工学会秋期研究発表会, 2013/10/8 (インテックス大阪)
- 2) 樺村京一郎、篠原真毅、吉川昇、堀越智、佐藤元泰:震災瓦礫に含まれる有害物質の高速無害化システム実証試験、鉄鋼協会秋季講演大会、金沢大, 2013/9/19
- 3) 佐藤元泰、樺村京一郎、篠原真毅、東北大 吉川昇、堀越智:マイクロ波による東日本震災瓦礫中の有害物質迅速処理－アスベスト飛散とダイオキシン発生防止－, JSEM実験学会, 秋田大, 2013/8/30
- 4) 樺村京一郎: 東日本大震災より生じた震災廃棄物の有機的処理に関する予告フォーラム、鉄鋼協会春季講演大会、電通大, 2013/3/29
- 5) 篠原真毅、佐藤元泰、堀越智、吉川昇、樺村京一郎、木嶋敬昌:マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理研究の現状、先進素材開発解析システム(ADAM)シンポジウム（講演）2012/11/13

7. 研究者略歴

課題代表者: 篠原真毅

京都大学工学部卒業、工学博士、現在、京都大学生存圏研究所 教授

1) 佐藤 元泰

慶應義塾大学工学部卒業、工学博士(京都大学)、核融合科学研究所産学連携センター長、現在、中部大学工学部 教授

2) 吉川 昇

東北大学工学部卒業、工学博士、現在、東北大学 環境科学研究科 環境科学専攻、准教授

3) 堀越 智

明星大学工学部卒業、工学博士、現在、上智大学、物質生命理工学、准教授

8. 引用文献

- 1) 樺村京一郎(分担):「最新 マイクロ波エネルギーと応用技術」:産業技術サービスセンター(第6章「マイクロ波加熱によるアスベスト無害化」、平成26年出版予定。)
- 2) K. Kashimura et al.: Microwave Heating, Chemical Engineering & Processing, 76 (2014) 1– 5
- 3) M. Yanagawa et al.: International Journal of Materials Engineering and Technology, 9, 2 (2013) 119 – 134

1ZF-1203 マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理－アスベスト飛散とダイオキシン発生防止－

(1) 処理システム構築

(独) 京都大学 生存圏研究所

生存圏電波応用分野

篠原真毅

学校法人中部大学

工学部

佐藤元泰

平成24(開始年度)～25年度累計予算額：44,362千円

(うち、平成25年度予算額：12,105千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

クリソライト(代表的なアスベストの一種)はマイクロ波で加熱すると1050°Cで無害化出来る。この現象を利用し、マイクロ波-燃焼ハイブリッド加熱炉による、東日本大震災で生じたアスベスト含有瓦礫の無害化・再資源化処理の試作機を開発した。熱源として利用する木材としては、同じく震災で生じた津波堆積物を用いた。現地には再利用不可能な木質系廃棄物が大量に存在するため、これを燃料としてセメントを600°Cまで予熱した。この予熱炉をマイクロ波炉の前段にカスクードを接続し、一連の工程で、セメントが1050°C以上に加熱され、アスベストが無害化すると共に、マイクロ波の電磁界および高温のセメントとの接触によって、ダイオキシンが分解される。この分解方法は日本スピンドルによって開発され、完成された技術である。さらに、排ガスに高性能集塵機・2次燃焼器を接続し、有害成分を大気中に排出しない二重の安全対策を施すものである。

本テーマでは、アスベスト無害化・再資源化処理の試作機を開発し、これを速やかに現地に据え付ける事で、同装置の有事における緊急対応性を有しているかどうかを吟味した。また、これを実際に現地で運用し、プロセスにより処理されたスレート瓦中のアスベスト粒子数、排ガス成分などの取得を行った。これは開発された本システムが円滑に運用され、その安全性を実証するために必要なサンプルとなる。なお、平成25年度では、本装置の速やかな撤退を行い、得られた成果を学会に還元した。

[キーワード]

マイクロ波加熱、アスベスト無害化、ダイオキシン防止、東日本大震災

1. はじめに

東日本大震災における津波によって倒壊し流された瓦礫には、法令で規定された有害物質が、混入していることは各種の調査で判明している。アスベスト粉塵による健康被害は遅発性であり、吸引後、10年以上経過して、発症することが多い。阪神淡路大震災から13年後、倒壊した建物の解体作業に従事した労働者が、2008年にアスベスト（石綿）が原因の中皮腫を発症し、労災認定を受けている。さらに2012年には、救援に従事したボランティアから、中皮腫を発症された方が出てきている。長期の復興体制に移行している現時点では、作業者が大量のアスベスト粉塵を吸引する危険は無いと考えられるが、大量の瓦礫は地盤の埋め立て嵩上げに使用される。その中にアスベスト含有のスレート等が混入していると、後世まで汚染土壤の不安を残すことになる。埋め立てに先立ち、アスベスト含有スレートを選別し、無害化処理を施すことは、必要不可欠である。

このアスベスト無害化には、高温加熱して組織構造を変える必要があるが、アスベストを含むスレート瓦は断熱性、耐熱性が高く熱伝導率が小さいため、外部からの加熱では、塊を均一に加熱処理するには長い時間が必要であった。そのため、従来法では震災起因のコンクリート材（想定値：200万トン）に含まれる有害物質無害化は困難であり、これを埋め立てし、封じ込める事もってその処理としている（図(1)-1）。これは非飛散性アスベスト処理手法としては、現状では、最も現実的で効率的な手続きではあるが、可能であれば、これらを無害化した後、埋め立て用資材に用いることが望まれる。

マイクロ波加熱炉を用いることで、この瓦礫中のアスベスト含有セメント無害化処理、再利用不可能な高濃度塩分含有木質系廃材の無害燃焼による迅速減容処理を提案する。この工程で、セメントが1050°C以上に加熱され、アスベストが無害化すると共に、マイクロ波の電磁界および高温のセメントとの接触によって、ダイオキシンが分解される。この分解方法は日本スピンドルによって開発・完成された技術である。さらに、排ガスに高性能集塵機・2次燃焼器を接続し、有害成分を大気中に排出しない二重の安全対策を施した無害化システムを構築する。

図(1)-1 東日本大震災により生じた大量の瓦礫には、非飛散性アスベストを始めとした多くの有害物質の混入が想定される。また、津波によりさらされた木質瓦礫は、塩分を含むことが想定され、これら瓦礫の高速・高効率な処理法が望まれている。



2. 研究開発目的

東日本大震災で発生した瓦礫は、セメント、木材、およびプラスチック、有機物・金属などに、大量の塩分（海水由来）が含まれおり、これらの混在物をマイクロ波で1050°Cにまで加熱することで以下の効果を期待する。

- (1) 無害化を促進、コンクリート廃材再生可能なセメント原料および安全な埋め立て用資材化する。コンクリート廃棄物に含まれるアスベスト類を加熱処理することで、再生セメント原料や二次汚染を気にすることのない埋め立て用の資材にする。
- (2) 利用不可能な木材・燃料、即ちハイブリッド加熱処理の燃焼炉熱源として活用する。
- (3) 非飛散性アスベストの無害化・塩分含有有機物の燃焼によって生じるダイオキシンを迅速に無害化する。

本テーマでは、アスベスト無害化・再資源化処理の試作機を開発し、これを速やかに現地に据え付ける事で、同装置の有事における緊急対応性を有しているかどうかを吟味した。また、これを実際に現地で運用し、プロセスにより処理されたスレート瓦中のアスベスト粒子数、排ガス成分などの取得を行った。これは開発された本システムが円滑に運用され、その安全性を実証するために必要なサンプルとなる。なお、平成25年度では、本装置の速やかな撤退を行い、得られた成果を学会に還元した（なお、装置撤退については本研究の項目ではあるが、研究の本質ではないので、送付資料に譲るものとする）。

3. 研究開発方法

(1) 研究開発概要

クリソライト（代表的なアスベストの一種）はマイクロ波で加熱すると1050℃で無害化出来る。この現象を利用し、マイクロ波-燃焼ハイブリッド加熱炉による、瓦礫の無害化・再資源化処理の試作機を開発した。熱源として利用する木材としては、同じく震災で生じた津波堆積物を用いた。現地には再利用不可能な木質系廃棄物が大量に存在するため、これを燃料としてセメントを600℃まで予熱した。この予熱炉をマイクロ波炉の前段にカスケードを接続し、一連の工程で、セメントが1050℃以上に加熱され、アスベストが無害化すると共に、マイクロ波の電磁界および高温のセメントとの接触によって、ダイオキシンが分解される。この分解方法は日本スピンドルによって開発され、完成された技術である。さらに、排ガスに高性能集塵機・2次燃焼器を接続し、有害成分を大気中に排出しない二重の安全対策を施すものである。

(2) 研究組織

本報告書はサブテーマ(1)に関する記述を述べるべきではあるが、本研究の各テーマは有機的に連携して一つの現地大型処理設備を試作・開発している（図(1)-2）。ゆえに、多テーマの協力は本文中に参画班として明記することで、ここに現地大型処理設備を試作・開発について述べる。

本テーマの担当は多成分対応型マイクロ波迅速処理炉、省エネ型マイクロ波照射装置の設計、木質系廃材を燃料とした前段予熱炉を設計することである。この装置は、日処理量を数トンまでの増力した処理施設を実証し、そのデータによって、低炭素を意識した日量100トンの大型の実用機開発への道筋を示す。また、破碎処理、乾燥、高温無害化という一連の工程をサブテーマ(2)によって運用する。有害物質の飛散を最初の集積場所で迅速・確実に除去し、高濃度塩分含有木質系廃棄物を減容する。サブテーマ(3)によって、事前に瓦礫に含む汚染物質の種類の断定をスクリーニング試験する。また、この装置の有用性を、処理後の各種汚染物質の減少濃度から明らかにする。また、分解中間体の分析を行うことで、より高濃度の汚染物質（二次汚染物質）が発生しないことを確認する。



図(1)-2 本委託業務における研究組織図。マイクロ波加熱システム構築として京都大学（篠原真毅）、中部大学（佐藤元泰）、無害化プロセスへのフィードバックとして無機環境科学より東北大学（吉川昇）、有機化学より上智大学（堀越智）が参画した。

1) 処理システム構築単独の仕事：篠原真毅・京都大学、佐藤元泰・中部大学

マイクロ波による瓦礫へのエネルギー供給系の強化・増強を行った。数トンの無害化、火力半量をマイクロ波依存と想定すると、提案したロータリーキルンに要求されるエネルギー伝送能は35 – 70 kWとなる。既存のロータリーキルンの出力は10kWであるので、これを必要とする入力まで増強し、伝送系の構築を行った。

このシステム構築はエクセルギーを重視し、ハイブリッド加熱とした。マイクロ波の吸収は、おおむね物質温度の2乗に比例して増加する。一方、燃焼熱を利用した加熱では、火炎・高温ガス温度と加熱物の温度差が小さくなると、つまり、加熱物の温度が上がると有効に使われる熱量が、加熱物の温度に比例して減少する。この物性学・熱学上の特徴を上手に使うには、室温から600°C程度まで木質系廃材・廃プラスチックの燃焼熱で加熱物（アスベスト含有セメント類）を予熱する前段とマイクロ波で600~1050°Cに加熱する後段をカスケードに接続する方法があり、これに適したシステムを構築した。

2) サブテーマ2：瓦礫中有害物質処理の実験的研究からのフィードバック：(参画班 東北大学)

現場における処理設備の管理及びその運用性評価を行った。この炉システムは、有害物質を含んだ瓦礫の破碎・炉へ搬入、マイクロ波迅速処理炉にて無害化を行うためのものである。本テーマでは、この操業条件を検討することによって、瓦礫が無害化・減容化する最適熱処理条件を抽

出・確定した。また、瓦礫を形成する物質の多くは、高温においてスラグと呼ばれるガラスや飛灰へ変わり、劇的にその電気的性質を変える。本テーマでは処理により生じたスラグ・飛灰へのプロセス効率性への影響とその改善の検討を行う。また、処理後無機物質の解析を行った。

3) サブテーマ 3 生体毒性物質および環境汚染物質の評価・解析からのフィードバック：（参画班 東北大学）

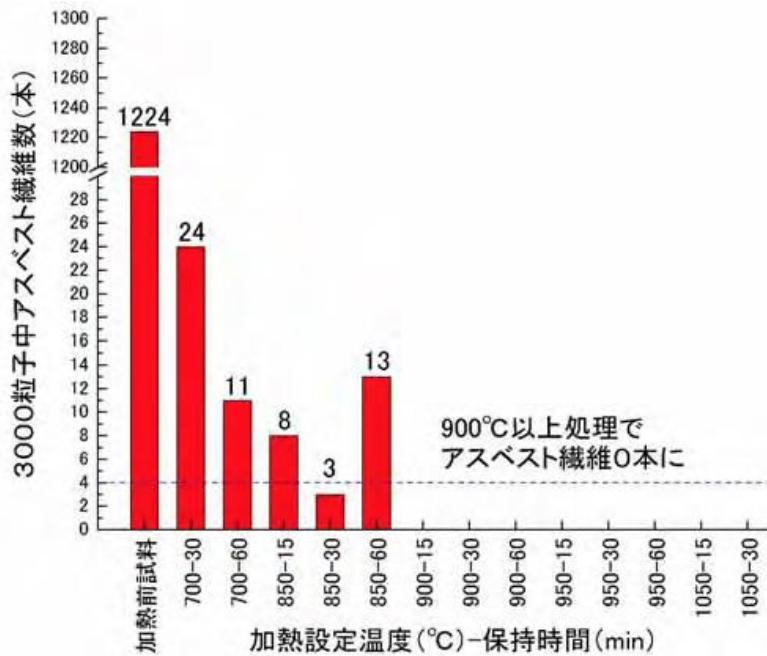
阪神淡路大震災と異なり、本震災における瓦礫成分の詳細は依然未知である。ゆえに、その処理に生じる化学成分の解析及び有害性の評価は速やかに行わなければならない。一方、本装置により生じる瓦礫に残留する汚染物質の濃度低下を分析し、装置最適化のための情報をフィードバックした。

(3) 開発設計概念

1) 目標温度の選定

我々は、平成18~19年度に行った飛散性及び非飛散性アスベスト含有セメント資材の無害化研究開発によって、必要な処理温度に関する基礎データを取得している¹⁾。図(1)-3は、クリソタイル(白石綿)含有セメントを試験体として、その処理温度・保持時間と残存クリソタイルの纖維数を示す。縦軸は、JIS1481に準拠して測定した残存アスベストの纖維数、横軸は保持温度と保持時間を示している²⁾。図(1)-3から分かるように、クリソタイルは、高温下でマイクロ波を照射すると、分解し残存纖維数が温度に対し指数関数的に減少し、900°C以上の温度で、検出できなくなる。これはX線回折法によって、結晶構造の解析を行うと、クリソタイル結晶構造中の結晶水が加熱により、400°C程度から徐々に脱水することにつれてピーク強度が低下し、さらに高温の810~820°C程度からフォルステライト[Mg₂(SiO₄)₂]などに変化するためと考えられる。このように、マイクロ波処理では、通常の火炎や放電のように1500°C以上の高温で溶融させないで、結晶構造を変性して無害化できる。

以上の基礎データから、アスベスト処理装置の雰囲気温度を600°C、700°C、850°Cおよび900°C以上に設定し、システムを構築した。

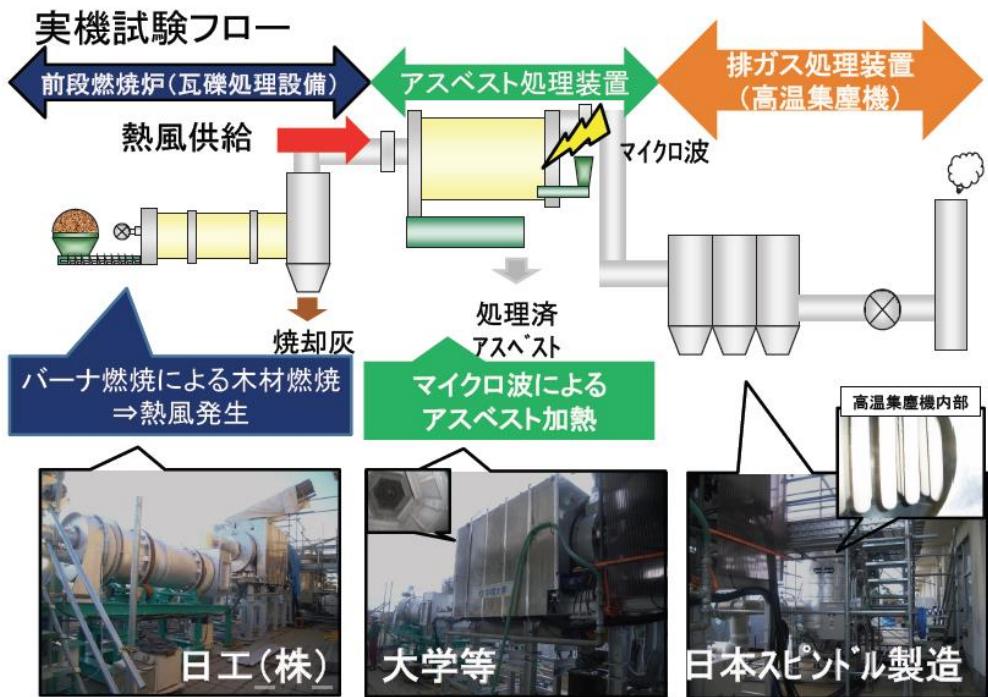


図(1)-3 マイクロ波加熱設定温度と保持時間と残留アスベスト数(H18 年度測定の基礎データ)

2) 各機器の概要

図(1)-4に実験設備のフローを示す。本試験設備は、前段燃焼炉(木質瓦礫処理設備)、アスベスト処理装置および排ガス処理装置(高温集塵機)を直列(カスケード)に接続している。前段燃焼炉では、木質系瓦礫を燃焼させて減量と共に、その高温燃焼ガスをアスベスト処理装置の雰囲気温度制御と炉壁加熱の熱源として使用する。アスベスト処理装置にスクリュー式現両羽供給機を通して、強化スレート瓦礫を投入する。マイクロ波と高温燃焼ガスの複合的加熱によってアスベストの結晶を変性させて無害化する。高温集塵機は、排ガス中に含まれる粉塵取り除くために設けられている。右端に示す煙突の直前に設置した吸引送風機によって、炉内を負圧に保ち、燃焼ガス、瓦礫からの粉塵が外部に漏れ出さない設計になっている。

各機器の仕様については送付資料1に譲り、ここでは各機器の概要を次項に示す。



図(1)-4 試験設備のフロー図

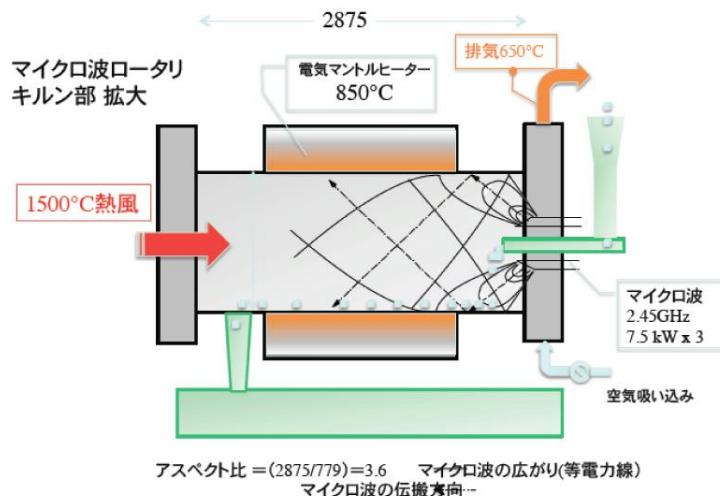
前段燃焼炉

本前段燃焼炉は、格好株式会社の社内試験用ロータリーキルンである。回転部分（以下レトルトという）は外径900mm 全長3000mmの円筒形であり、その内面は厚さ耐火キャスタブル施工され、内径は約600mmである。回転数は0.3~3rpmで可変出来る。炉の左端には、燃焼量10~50リットル/時の灯油助燃バーナーと木材瓦礫の破碎片を送る込むホッパー・スクリューフィーダーが設けられている。この前段燃焼炉は、最大80~1000kg/時の処理能力をもつ。燃えかすと燃焼ガスはキルンの出口で上下に分離される。排ガスの温度および流量は、それぞれ1000°Cおよび70~100 m³/分acである。排ガスは、高耐熱セラミックスファイバーでライニングした煙道を通して、アスベスト処理設備に導かれる。

アスベスト処理設備

アスベスト処理設備は、アスベスト含有セメント瓦礫を無害化する。構造は、図(1)-5に示す様に、長さ2800m、二面幅800mmの正六角柱(レトルト)が、その軸周りに水平面に対し2度の傾斜角で回転、その内部に瓦礫碎片を投入し、マイクロ波と高温ガスを照射して無害化を行うロータリーキルンである。このレトルトは、F C鋼(ネズミ鑄鉄)で内張しており、最高使用温度1050°Cである。マイクロ波の吸収は、おおむね物質温度の2乗に比例して増加する。一方、燃焼熱を利用した加熱では、火炎・高温ガス温度と加熱物の温度差が小さくなると、つまり、加熱物の温度が上がると有効に使われる熱量が温度に比例して減少する。この物性学・熱学上の特徴を上手に使うには、助燃バーナーの1500°Cの火炎により木質系廃材を燃焼させ1000°Cの高温ガスを発生させる前

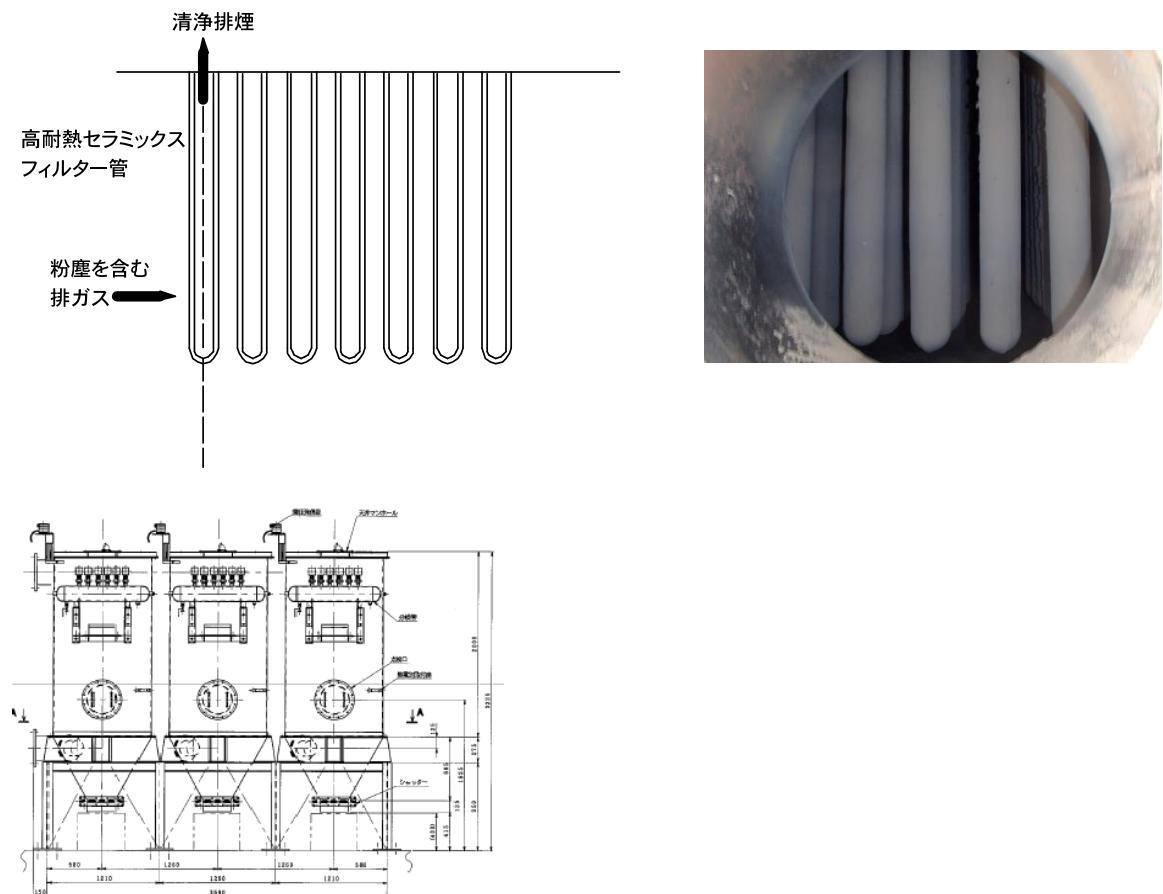
段燃焼炉が設けられている。その高温ガスを雰囲気として、室温から900°C程度まで加熱物（アスベスト含有セメント類）を予熱し、マイクロ波で1000°Cまで加熱する。この動作機序のため、第3図に示した前段燃焼炉とアスベスト処理炉のカスケード接続方式とした。



図(1)-5 マイクロ波ロータリーキルン模式図

高温集塵機

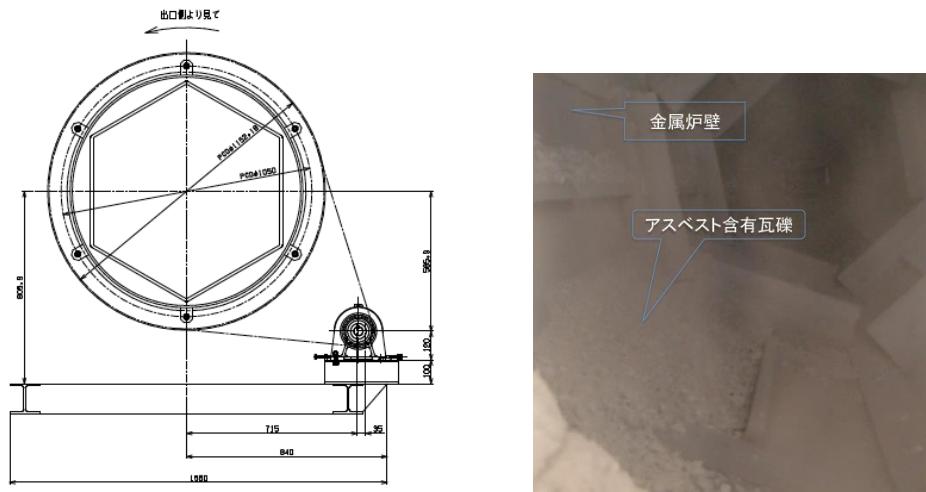
炉内に発生したガスおよびダストは、図(1)-4の右側フードの上部から吸引される。このガス1000~1500°Cあるが、フードの下部および沿道の途中に設けた吸引口から吸引している空気によって希釈冷却される。この温度は最大650°Cである。高温集塵機によって、排ガス中のダストおよび有害物を濾過し、吸引送風機を介して煙突から排気される。高温集塵機の前後に設けたサンプル孔から煙排ガスを採取し分析できる様になっている(図(1)-6)。



図(1)-6 ダストフィルター内部 灰色のダストが付着している

3) アスベスト含有瓦のフロー設計

図1-(5)に示す様に、スレート瓦礫片は右側のホッパーから投入され、スクリュー式の原料供給装置を通って、炉内に落下し小さな山になる。供給機は、最大日量4トンに相当する毎時170 kgの供給能力を持っている。レトルトの回転によって、その山が崩され炉内に広がる。レトルトは水平に対し左側に2度の勾配で設置されているため、投入された原料は、右から左に攪拌されながら、ゆっくり移動してゆく。図(1)-7のデータから、炉内滞留時間は30分以上必要と考えられる。粉体の輸送は、粒径・粒状によって大きく変化し、計算式に乗りにくいと言う問題がある。そこで、炉の左端からビデオを撮影し、その動画観察から、攪拌と送りの状況を実験的の確認し、最適と艦ヶラレル回転速度を設定した。図(1)-7に示す様に、試料は炉内に均一に広がっているのではなく、搔き上げ様のフィンと軸方向の流れを制限する邪魔板によって、炉の片側下部に偏在している、炉壁の5/6は金属壁が露出している。



図(1)-7 レトルトの断面と炉内の試料の流れの観測

次に、マイクロ波照射器について説明する。図(1)-8の赤線は、マイクロ波の立体回路、照射系である。発振器は、工業用マグネットロンCK169（周波数2.45GHz、出力0.6~10kW）を基本モード導波管WR J-2に結合させ、水冷アイソレータ・方向性結合機・3スタブチューナー・石英窓・ガス噴射穴付き直管及び必要なEバンドまたはHバンドを介して、放射アンテナに接続されている。このアンテナは、WR J-2直導波管を管内伝搬角に対応する36.4度で斜め切りしたものである。管軸に対し $90 - 36.4 = 53.6$ 度の角度で放射される。このFirst Rayは広がりながらレトルトに達し、その金属壁で反射される。レトルトには、図(1)-7右側写真に示す様な半波長程度の深さの邪魔板が多数設けられているので、マイクロ波は乱反射して、方向とモードを急速に崩しながら、炉内に広がっていくと考えられる。管壁はレトルトの円周上の1/6には、スレートの碎片があり、そこでマイクロ波が吸収される。その結果、炉内のマイクロ波密度は、平均化されている。

技術的に注意すべきは、導波管、特にアンテナ系へのダストの混入である。WRJ-2のクリーンな導波管では30kWを伝送できる。しかし、本システムのように、原料ダストの多い極めて過酷な条件では、アンテナ先端部にアークを生じる。図(1)-8に青線で示す様に、原料供給系とマイクロ波放射端は、接近して設置せざるを得ない。そこで、投入原料から舞い上がった微粒子が、切り口から導波管の中に混入しないように、導波管の4ミリ系の空気吹き込み穴から0.4M程度の圧力で空気を打ち込んでいる。この対策によって、最大7.5kWを伝送できた。運転は、マージンを見込んで各管6-7 kW、マグネットロン3台で合計18~20kWを運用した。

4. 結果及び考察

(1) 現地据付工事の経過及び結果：処理システム構築：篠原真毅・京都大学、佐藤元泰・中部大学

震災瓦礫の他府県への輸送には、行政上、大きな制約がある。そこで、マイクロ波を用いた加熱系が、従来系と比してコンパクトになる特徴を生かし、現地に速やかに有害物質無害化システムを構築する方法を提案した。設置場所は、宮城県名取市にある市立閑上中学校の校舎および

その前庭を提供して戴いた。同校舎は、閑上地区震災被害により、使用されていないが、ここに行政財産目的外使用許可を戴いた名取市に深甚なる謝意を表するものである。図(1)-8に設置レイアウト図を、図(1)-9に工程表、図(1)-10, 11, 12に据え付け場所、搬入、据え付け工事中の写真を示す。

(2) 現地操業の経過及び結果

参画班の活動分担

処理システム構築：篠原真毅・京都大学、佐藤元泰・中部大学

瓦礫中有害物質処理の実験的研究：吉川昇・東北大学

生体毒性物質および環境汚染物質の評価・解析：堀越智・上智大学

既に述べたように、本試験は現地運用試験を担当する機械班（京大・中部大）と試験結果をフィードバックする物性班（東北大、上智大）で構成されている。また、本委託研究は、急速に変化する被災地現状を踏まえ彈性的な研究計画の変遷が要求されているため、試作機運用と装置改造を交互に実施している。以下に各操業の概要を示す。

事前準備

アスベスト含有スレート破碎片を、名取・亘理地区の震災瓦礫の仮置き場から搬入した。この瓦礫は、工場の外壁及び屋根材として使われていたモノと推定され、30cm程度の破片に碎けて、他の瓦礫と混入して被災地に散乱していたものを、人力で選り分けて、コンパックに入れて山積保管されている。これらの山から、サンプルを採取し、JIS1481に準拠した事前検査を行った。

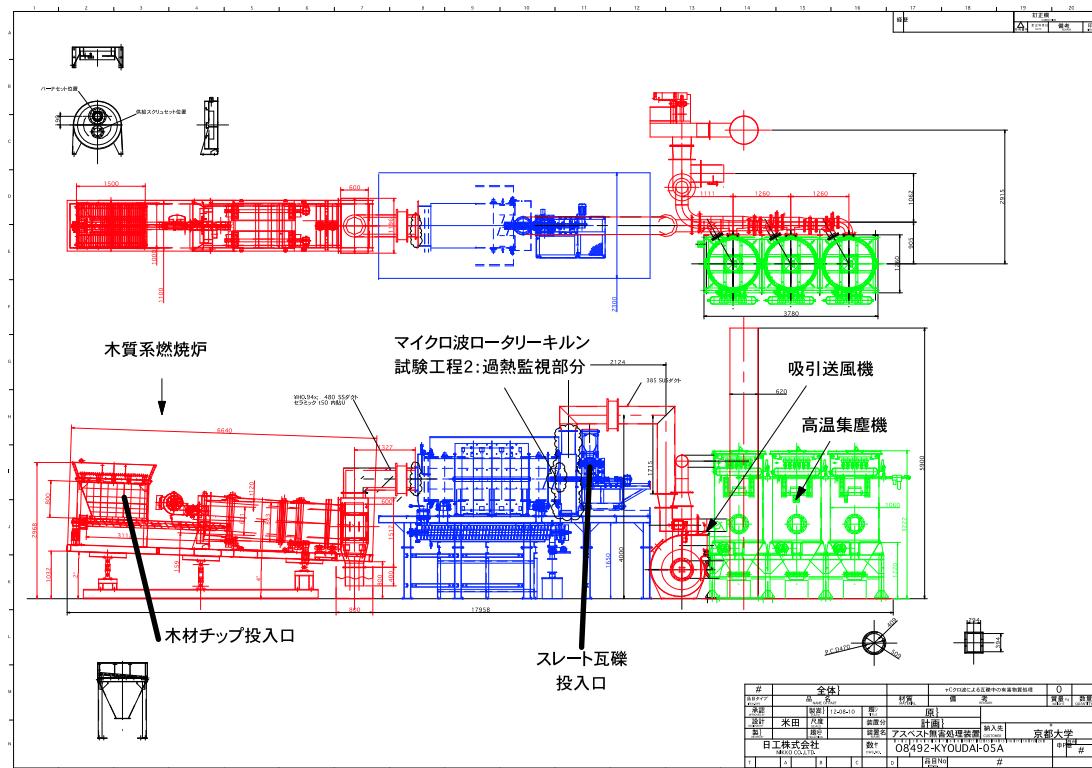
(1) 粉碎前のスレート板瓦礫、事前検査の結果

名取市、災害廃棄物仮置き場、2カ所の採取場所(名取1, 2)

	Chr含有率	Amo含流率	Chr纖維数	Amo纖維数
災害廃棄物仮置き場(名取1)	7.20	2.00	53	7
災害廃棄物仮置き場(名取2)	7.20	-	49	-

表(1)-1: スレート板検査結果

含有アスベストは、主にクリソタイル(Chr)であり、一部にはアモーサイト(Amo)も存在する事が分かった。含有率と纖維数との間には、明らかに正の相関関係がある（表(1)-1）。その他アスベストは含有していない瓦礫を選定した。この測定では、アモサイトを含有している瓦礫も認められた。本実験では、過去のアスベスト使用量の大部分を占めている、クリソライトを試験体とすることに決定し、名取2から採取することにした。



工事工程表	
延日数	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
年・月	2012/12
日	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
曜日	日 月 火 水 木 金 土 日 月 火 水 木 金 土 日 月 火 水 木 金 土 日 月
移動	
敷き鉄板施工	据付部養生(草刈り他) 敷き鉄板設置 墨打ち(レベル測定)
荷卸し、設置	動力盤教室内へ
	ドライヤ(日工) 第一ダクト ドライヤ(高砂工業から)
	第二ダクト 高温集塵機(日本スピンドルから) 第三ダクト 排風機
煙突	クリーリングタワー(高砂工業から) クーラー(高砂工業から)
細部工事	エア配管(ホース) 水配管(ホース)
配線工事	

図(1)-9 据え付け試験の工程表。



図(1)-10 関上中学校 敷地内における設置予定地（写真は設置場所：H24年9月10日撮影）



図(1)-11 関上中学校へ 搬入（平成24年12月7日撮影）



図(1)-12 据え付け工事途中（平成24年12月9日撮影）

H24. 12. 03~12. 13に 現地（名取市閑上中学校）搬入・据え付け、配管・配線、試験調整を無事完了した。

引き続き、マイクロ波3台入射調整を行った。各系統、7.5kWまで、マイクロ波を入射し、据え付け調整運転試験を完了した。

操業1 H12. 12. 18~12. 20 : 第一回 处理実験

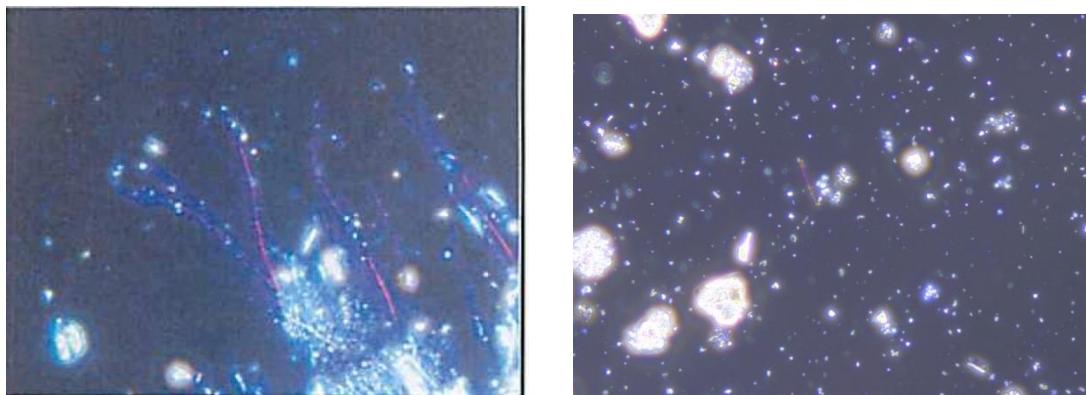
マイクロ波入力 No1, No2合計14.5kW、アスベスト処理炉の雰囲気温度 700°C

H12. 12. 22~25. 01. 14: この試験結果をアスベスト分析指定業者であるN S環境サービス（株）仙台支店に依頼して分析した。試料分析の結果は、以下の通りである。

検査項目：位相差顕微鏡、XRDにより、試料中のアスベスト含有率を評価（JIS A 1481に準拠）

- (1) XRDピーク強度より、クリソタイルなどのアスベスト纖維の含有率(%)を算出。
- (2) 位相差顕微鏡視野において3000粒子中のアスペクト比3以上の纖維数を計測、図(1)-13参考
- (3) クリソタイル含有率0.6%，纖維数5/3000粒子という良好な結果を得る事ができた。

実験計画で述べた900°Cより低い温度で、纖維数3/3000粒子以下というJIS1481検定の基準を満たせる可能性がある。



図(1)-13 位相差顕微鏡によるクリソタイル纖維観察 左：処理前、右マイクロ波処理後。クリソタイルは紫色に着色する。アスペクト比（長さ/直径）が3以上の纖維を有害と判定する。処理前は、右の画像では、中心付近に1本認めるのみであり、他は完全に丸くなっている。3000粒子中のアスベスト纖維数結果を表(1)-2に示す。

マイクロ波照射の有無	差室部スト処理装置 雰囲気ガス温度	残存アスベスト粒子数 (本/ 3000粒子)	残存アスベスト重量比
マイクロ波13.5kW照射	700°C	5/3000	0.7%
処理前	—	多数	12%

表(1)-2 700°C 14.5kW照射に於けるアスベスト残留量の違い

操業2 H25.01.26~01.27 : 第二回 処理実験

- H25.01.24~01.25 :
- 木質系燃焼炉—マイクロ波炉接続部の煙道に設置したマイクロ波フィルターを改良型に交換（中部大、日工）。
 - No2マイクロ波入射系統分解検査。（中部大）
 - ガス流速測定（日工）

H25.01.26~01.27 :

- 第二回 処理実験
- 定格2トン相当処理実証試験

今回は、前段燃焼炉とアスベスト処理炉の詳細な基礎データを蓄積することを主な目的として、実験を進めた。この処理量数トン/日の小さいパイロットプラントから、100トン/日の実用機につなげるために必要不可欠なデータを取得することが出来た。すなわち、高温ガスとマイクロ波の複合炉の設計・製作には、高温ガスおよびマイクロ波のエネルギー供給の違いを明確にしておく必要がある。まず、高温ガスの働きは、在来の高温ガス炉と本質的な違いはない。すなわち、非加熱物への熱エネルギーの出入りは、破碎片の表面を通して行われる。非加熱物への対流熱伝達および放射熱によるエネルギー交換は非加熱物の表面積に比例する。一方、非加熱物の熱容量は、非加熱物の体積に比例する。よって、非加熱物を高温ガスによって、短時間に外部から加熱するためには、粒径を細かくする必要がある。しかし、この細かい粒子からなる粉体では、塊の内部にある粒子は、粒界の熱伝導によってのみ加熱されるので、内外の温度差が大きくなる。これを防ぐために、粉体を攪拌して、内側の粒子を外に出し、暖まった粒子を内部に持ってくる必要がある。マイクロ波は、非加熱物の内部まで、浸透しそこで誘電損失などの機構によって、熱エネルギーに変換される。従って、ほとんど粒径に依存しないで、内外が同時に昇温出来るとこ

ろに特徴がある。しかし、セメントの誘電損失は、室温から600°C程度までは、低い値であり、効率が悪いという欠点がある。そこで、低温域を高温ガスとの熱交換で行い、高音域をマイクロ波でいうという発想が生まれてきたのである。

この両者の特徴を生かした設計をするために、高温ガスの状態を前段燃焼炉—供給煙道—マイクロ波フィルターアスベスト処理炉—排気煙道—高温集塵機—吸引送風機という流れに沿って詳細に測定した。データは、図(1)-14, 15, 16の様にまとめられた。なお、図中に示された表では行が実験時刻、列が各パラメータである。

炉操業の概要について説明する。図(1)-17は本操業における実証機排ガス、入力ガス温度データ及びマイクロ波出力を示したものであるが、アスベスト処理炉には、図(1)-17のAで示す650°C付近で、40kg/hの試料を投入した。この実験では、3台のマイクロ波源の内、No. 2系統の導波管にアークが発生し、実質的に2台、13.5kWのマイクロ波の投入にとどまった。処理後の検体を、JIS1481に従い分析した。比較試料として、同じ温度、同じ高温ガス条件で、マイクロ波を照射しない実験を行った。結果は、表(1)-3の通りである。これを表(1)-2と比較すると、残留アスベストは、雰囲気温度の差によって、残留アスベストの量に大幅な違いが現れている。同じ温度であっても、マイクロ波を照射することで、無害化が進んでいる。本操業は、アスベストに関しては一定の無害化を示す程度に留まったものの、同無害化処理におけるマイクロ波の有効性を示す意味では重要な成果を得た。

マイクロ波照射の有無	アスベスト処理装置 雰囲気ガス温度	残存アスベスト粒子数 (定性分析 本/ 3000粒子)	残存アスベスト重量比 (XRD定量分析)
マイクロ波13.5kW照射	650°C	15/3000	2.4%
マイクロ波 照射無し	650°C	22/3000	5.1%

表(1)-3 雰囲気温度650°C、40kg/hにおけるマイクロ波照射の有無によるアスベストの処理割合比較

操業3 H25.02.21~01.26 : ・第三回 处理実験 定格2トン相当処理実証試験

No. 2 マイクロ波源の導波管系統を予備のポートに移し、3台で20kWの照射を目指した。

第2回実験のパラメータに従って、前段燃焼炉を稼働させ、アスベスト処理炉の雰囲気温度を650℃、マイクロ波出力19kWで実験を行った。また、試料投入量を 80kg/h (日処理量2トン) に増加させた。

マイクロ波照射 の有無		アスベスト処 理装置雰囲気 ガス温度	残存アスベスト粒子数 (定性分析 本/ 3000粒子)	残存アスベスト重量比 (XRD定量分析)
マイクロ波 19kW照射	粗粒度	700℃	5/3000	0.82%
	中粒度	700℃	8/3000	1.2%
	微粒度	700℃	15/3000	1.1%
マイクロ波 19kW		600℃	56/3000	5.1%

表(1)-4 雰囲気温度700℃および600℃、80 kg/hにおける雰囲気温度とアスベストの処理割合比較。

この結果は、雰囲気温度がマイクロ波処理に効果的に働くことを示している。温度700℃、滞留25分のサンプルを各粒度で分析した（粗粒度：10mmメッシュ以上中粒度：3~5mm微粒子：1mm以下の三検体）。無害化処理した試料において、粉碎状態の粒度ごとにアスベストの含有率、纖維数を調べ、表(1)-4の結果を得た。アスベストは尖った粒子であるから、その周りで、強い電界集中が起こるという仮説がある。実験結果は、粒度が大きい方が、マイクロ波によってアスベスト結晶の転移が起こることを示している。微粒度の方が、電界の集中を受け無害化が進むと考えられる。しかし、実験結果は、粒度が多くときの方が、無害化が進むことを示している。この結果の物理的解釈は仮説の段階であり、マイクロ波の電磁界と粒子内の蓄熱、温度分布に関する詳細な基礎実験が必要である。

操業4 H25.03.21~01.26 : ・第4回 900℃雰囲気処理実験 定格2トン相当処理実証試験

1~3回の実験結果を詳細に分析した結果、アスベスト纖維を3/3000粒子以下にするには、900℃以上の雰囲気温度が必要であると判断された。これまでの実験では、前段燃焼炉(キルン)900℃-高温煙道-アスベスト処理装置-排気煙道-高温集塵機-吸引送風機-煙突を流れる燃焼ガス量・流速・圧力・温度・酸素分圧測のデータを分析したところ、各部の温度、圧力、ガス流束は、計画値と良く一致しており、熱設計が正しく行われたことが確認されている。設計ではアスベスト処理炉を1000℃以上の雰囲気にするためには、前段燃焼炉で1300℃以上の燃焼ガスを発生させる必要がある。使用している前段燃焼炉では、1000℃が上限であった。高温煙道に設けられているマイクロ波フィルタからの熱損失(抜熱)を節約する必要がある。そこで、助燃バーナーをアスベスト処理炉に直接取り付けて、1500℃の燃焼ガスを炉内に直噴するように、レイアウトを変更した。1500℃の火炎直噴ガスと、逆側のフード部から吸引される冷却空気が乱流状態で混合し、炉内の温度を最高900℃程度に調整する手法をとった。この改造によって、炉内温度を1000℃まで、任意に調整できるようになった。

第4回の試験では、当初の計画値であるアスベスト含有瓦礫日処理量2トンで無害化を実証する

ため、雰囲気温度900°C、処理量40 k g(日量1トン相当)および80 k(日量2トン相当)のアスベスト含有瓦礫を処理する連続操業試験を行った(図(1)-18(a-b), 表(1)-5)。

マイクロ波照射の有無		アスベスト処理装置雰囲気ガス温度	残存アスベスト粒子数 (定性分析 本/ 3000粒子)	残存アスベスト重量比 (XRD定量分析)
マイクロ波 19kW照射	粗粒度	900°C	0	
	中粒度	900°C	0	
	微粒度	900°C	0	
マイクロ波 無し		900°C	0	0.1未満(0.08)

表(1)-5 雰囲気温度 900°C、処理量40kg/h および 80kg/hにおける雰囲気温度とアスベストの処理比較

この結果は、表(1)-4に示す700°Cの場合の結果に比較し、無害化の効果が顕著に現れている事が示されている。すなわちマイクロ波印加が無い場合、40kg/hの少量投入においてアスベストが検出されたのにも拘わらず、マイクロ波印加に依れば80kg/hの投入量でも、全ての粒度で無害化が達成された事が分かる。表(1)-2はスレート片の粒径に依る無害化への影響を示しているが、この結果に関しては、物性学の観点より議論された(サブテーマ2. 3)。



図(1)-18 a 雰囲気温度900°C マイクロ波18kW, 投入量40kg/h 処理後のスレート破碎片。強化繊維が消滅している。



図(1)-18 b 同条件でマイクロを照射しない場合。尖った纖維が破壊されずに残留している。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本委託研究にて設計された試験設備は、前段燃焼炉（木質瓦礫処理設備）、アスベスト処理装置および排ガス処理装置（高温集塵機）より構成されており、それぞれ東日本大震災で生じた木質瓦礫燃焼、アスベスト含有スレート瓦無害化及び全プロセスの排ガスを制御する。これら全く異なる設備を要素とし、震災瓦礫処理を目的としたひとつのシステムとして設計された本設備は、その温度分布、ガス流量、常温空気の流入量等において、設計目標値と非常によい一致を示している。これは、環境プロセス・科学プロセス工学における重要な知見となる。また、本設備の各要素接合部において、想定とは異なる急速な温度減少が観測されている。これは、マイクロ波遮断フィルターによる抜熱の影響である。この解決策を提案した本委託研究はマイクロ波工学、伝熱工学的に重要な知見であり、これら分野の大型化に向けた接合部設計へ新しい課題を提案し得る現象である。

(2) 環境政策への貢献

本試験機は、現状木質瓦礫 2 – 10 トン/日、アスベスト1 – 2 トン/日の処理速度を有しており、操業3の時点においてほぼ無害化に成功している。この無害化温度は凡そ750°Cで観測されており、従来の1500°Cに比して、プロセス設計上で有利である（ただし、完全なアスベスト無害化には950°C以上を必要と考える）。また、日産5-10 トン/日処理能（木質+スレート瓦）を有する本試験機は、着工より10日程度にて運用可能なほどコンパクトである。これは次に述べるような環境政策への寄与を有する。

第一に、我が国的重要な政策課題である震災復興への貢献である。本プロジェクトは環境総合研究費（復興枠）における委託研究を受け、その上で、災害廃棄物の処理を迅速・円滑に進めるための研究として実施した。被災地における有害物質を含んだ瓦礫は法令によりそのリサイクルが制限され、特にアスベスト類を含む無害か処理が困難な物質はその輸送も厳しく制限されている。既存技術では、東日本大震災の被害は広範囲に及び、災害廃棄物の発生量も膨大であることから、本震災で生じた瓦礫中のアスベスト類の無害化は困難である。本プロジェクトで得られた高速・低価格なアスベスト無害化処理法が実証、迅速な廃棄物処理を取り扱う施設（中間処理・最終処分）の維持管理・解体手法・管理手法を確立は、東日本大震災からの復興迅速化への障害となる多くの法令上の困難が回避するだけでなく今後生じ得るこれら有害物質の処理および輸送における法令上の困難を技術的なアプローチにより解消する。

第二に、これまで処理が困難とされていた非飛散性アスベストの新しい処理アプローチの開発として環境政策に寄与できる。我々の測定においても、現地には非飛散性アスベストは多く存在することが確認されており、これは被災地のみならず我が国の至る所に存在する。これは埋め立てにて処理される予定である。これら瓦礫処理の行政的手続きを、現状の瓦礫量が甚大であること、現地での瓦礫分類状況が良好であることを考慮すると妥当な処理である。しかし、埋め立て処理されたアスベスト類が露出した場合、これらは有毒な飛散性として観測される。本処理法を用いることでこれらの大量の非飛散性アスベストを含有する建材を「迅速」に無害化することができる。我々は「後世に負の遺産を残すべきではない」との立場をとってきたが、本試験機運用の情報媒体における注目度を考慮すると、これは我が国の民意に則していると言える。

<行政が既に活用した成果>

「新仕分け」、(2013/11/16) 分資料2/3における行政刷新会議ワーキンググループにおいて本プロジェクトの成果が参考された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

東日本大震災により電気・水等の基礎的な環境が破壊された地域において、アスベストを含有した有害物質を迅速に無害化し得る処理設備を建造し(80kg/hour)、この建造は凡そ10日で完了後、そのまま4ヶ月間の現地実証試験運用に耐えられることが示された。これまでアスベスト含有物質は、回収・輸送・処理の手続きを経て行われるが、これらの工程はそれぞれ複雑な行政手続き及び認可を必要とする。本設備を用いることで、これらの手続きを解消し、我が国の有事に際して迅速に復興に動くことが可能となる。この成果が我が国の環境政策へ寄与しえる可能性があることは、本研究がメディア等の高い注目度からも明らかであると考える（メディア等の発表参照）。

現在、我が国には、「アスベスト」と「放射性廃棄物」双方の行政手続き対象となる物質を処理する施設は見当たらない（この問題は本装置を撤収する際、明らかとなった）。こうした複数の有害物質を含む瓦礫を処理するためには、本設備のような現地で処理する設備を導入することにより行政手続きが大きく削減できると考える。

6. 国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。」

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) K. Kashimura*, N. Sabelstrom, K. Imazeki, K. Takeda, M. Hayashi, T. Mitani, N. Shinohara and K. Nagata: Quasi-Stable Temperature of Steady State of Hematite by Microwave Heating, *Chemical Engineering & Processing*, 76 (2014) 1– 5
- 2) M. Yanagawa, K. Kashimura*, M. Hayashi, M. Sato, T. Mitani, N. Shinohara and K. Nagata: Control of Hot Spots for Continuous Microwave Iron Making – Effects of Ore-Carbon Mixture Rotations on Refractory and Pig Iron Production –, *International Journal of Materials Engineering and Technology*, Vol. 9, 2 (2013) 119 – 134
- 3) M. Hayashi*, K. Takeda, K. Kashimura T. Watanabe and K. Nagata: Carbothermic reduction of hematite powders by microwave heating, *ISIJ International*, Vol. 53, 7 (2013) 1125–1130
- 4) K. Kashimura, N. Hasegawa, S. Suzuki, M. Hayashi, T. Mitani, K. Nagata and N. Shinohara: Microwave Heating Behavior of Conductive Multi-particles using Spatially Separated Electric and Magnetic nodes – Effects of Relative Density on Absorption Properties of Various Carbon Powder Compacts –, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, 1 (2013) 024902 – 1 – 5
- 5) J. Fukushima, K. Kashimura, S. Takayama, M. Sato, S. Sano, Y. Hayashi and H. Takizawa: In-Situ Kinetic Study on Non-Thermal Reduction Reaction of CuO during Microwave Heating, *Materials Letters*, 91 (2013) 252–254
- 6) K. Kashimura, J. Fukushima, T. Mitani, M. Sato and N. Shinohara: Metal Ti-Cr Alloy Powders Nitriding under Atmospheric Pressure by Microwave Heating, *Journal of alloys and compounds*, 550 (2013) 239–244
- 7) K. Kashimura, S. Suzuki, M. Hayashi, T. Mitani, K. Nagata and N. Shinohara: Surface-Plasmon-Like Modes of Graphite Powder Compact in Microwave Heating, *Journal of Applied Physics*, Vol. 112, 3 (2012) 034905 – 1 – 5

<査読付論文に準ずる成果発表>（対象：社会・政策研究の分野）

- 1) 横村京一郎: マイクロ波加熱と材料プロセッシング、金属, アグネ技術センター (2013年8月号 特集)
- 2) 「最新 マイクロ波エネルギーと応用技術」、産業技術サービスセンター (平成26年出版予定, アスベスト無害化技術に関する解説)
- 3) 横村京一郎, 蓬萊秀人: 学振, 先導的委員会「電磁波励起非平衡反応場の物理化学と産業応用」(2013/2/27)
- 4) 篠原真毅、佐藤元泰、堀越智、吉川昇、横村京一郎、木嶋敬昌: マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理研究の現状, 先進素材開発解析システムシンポジウム (講演) 2012/11/13
- 5) N. Shinohara, N. Yoshikawa, S. Horikoshi, T. Mitani, T. Kishima, K. Kashimura and M.

Sato: Applications of Microwave Powers for the Rubble Processing to the Great East Japan Earthquake - Test System for Rendering Asbestos Harmless in the Crashed Slate, proceeding of 2th GCMEA (2012)

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 篠原真毅、樋村京一郎、佐藤元泰、吉川昇、堀越智、米田沙織、木嶋敬昌：アスベストのマイクロ波及び高温集塵による無害化処理技術、粉体工学会秋期研究発表会, 2013/10/8 (インデックス大阪)
- 2) 樋村京一郎、篠原真毅、吉川昇、堀越智、佐藤元泰：震災瓦礫に含まれる有害物質の高速無害化システム実証試験、鉄鋼協会秋季講演大会, 金沢大, 2013/9/19
- 3) 佐藤元泰、樋村京一郎、篠原真毅、東北大 吉川昇、堀越智:マイクロ波による東日本震災瓦礫中の有害物質迅速処理－アスベスト飛散とダイオキシン発生防止－, JSEM実験学会, 秋田大, 2013/8/30
- 4) 樋村京一郎：東日本大震災より生じた震災廃棄物の有機的処理に関する予告フォーラム, 鉄鋼協会春季講演大会, 電通大, 2013/3/29
- 5) 篠原真毅、佐藤元泰、堀越智、吉川昇、樋村京一郎、木嶋敬昌：マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理研究の現状、先進素材開発解析システム(ADAM)シンポジウム（講演）

2012/11/13

(3) 出願特許

「特に記載すべき事項はない。」

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理装置の見学会」(2013/3/35) 16名
- 2) 「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理装置の研究開発」(2012/6/26) 8名
「被災地瓦礫処理場見学・勉強会」(同日) 7名

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 週刊環境循環新聞：「震災廃棄物をマイクロ波処理」（平成25年3月11日）
- 2) 日本テレビ：「震災から2年、がれき処理の現状（ズームイン！！サタデー）」, (平成25年3月1日)
- 3) 日刊工業新聞：「震災がれき処理にマイクロ波が一役－非飛散性アスベストの無害化コスト半減」(平成25年2月14日掲載)
*朝日新聞デジタル：同研究にて同日掲載
- 4) NHK サイエンスゼロ：「電子レンジで鉄が作れる！？ 未知のマイクロ波効果を活用せよ」(平成25年1月23日放送)
- 5) FNS 仙台：「がれきのアスベストを無害化 研究進む」, ニュース (平成25年12月20日)

(6) その他

「特に記載すべき事項はない。」

8. 引用文献

- 1) 地域新生コンソーシアム研究開発事業「アスベストの飛散がない迅速無害化処理システムの開発」（2006～2007年度、146千円）
- 2) JIS規定が示すアスベスト含有率の測定は、顕微鏡による定性分析法及びX線回折による定性分析法によって、アスベストの有無を確認した後、アスベストありと判断された試料について、X線回折分析法によって、アスベストの定量分析を行う手順となる。

送付資料1

設備の構成は、前掲の送付1図に示すとおりである。処理システムは前段燃焼炉(事項、赤)、マイクロ波キルン(事項、青)、高温集塵フィルタ(事項、緑)で構成され、それぞれ木質瓦礫の燃焼、スレート瓦の無害化及び排ガス制御を行う。以下に本システムを構成する各区画の基本仕様を示す。

前段木質燃焼炉

①材料ホッパ

形式：鋼鉄製

容量：1 m³

寸法：1500W x 1000D x 800H

②投入スクリュ

能力：100kg / h

動力：1.5 kW x 4P x 1/40

③ロータリキルン

能力：100 kg / h

寸法：Φ863 x 3000L x t6

④廃棄室

寸法：600 x 1200 x 1800L

⑤第一熱風ダクト

寸法：Φ480 x 1400L x t3.2

特殊：セラミクス内貼り t50

マイクロ波ロータリーキルン

①キルン

型式：HMWK-RK-10+72

管体寸法（レトルト寸法）：2,880L×900W×900Hmm（六角レトルト）

外形寸法：6,000L×1,800W×3,750Hmm（菊水化学工業㈱殿設置）

：6,000L×1,800W×2,600Hmm（車載設置）

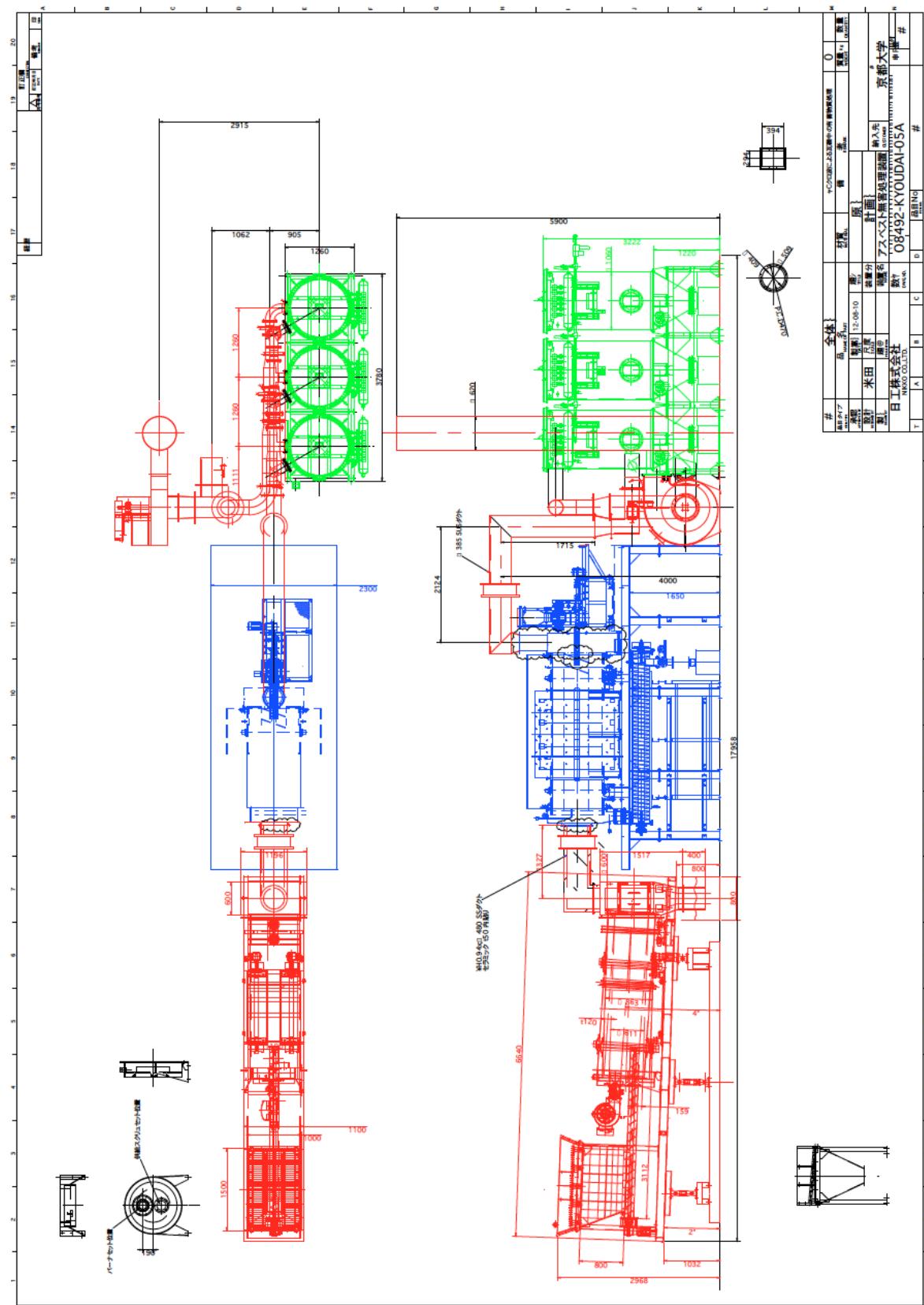
外壁材質：SUS304

有効容積：0.17m³（六角レトルト内容積1.51m³）

内壁材質：SUS310S・インコネル600相当

使用温度：Max1050°C

重量：5,000 kg



送付1図 総合組立図 赤線：日工、青線：高砂工業、緑線日本スピンドル殿分担区分

②クーラ

形式：水冷式スクリューコンベヤ

内枠寸法：2,780L×φ308mm

外枠寸法：3,550L×750W×625Hmm

外壁材質：SUS304

重量：540 kg

③加熱装置

マイクロ波発振器：10kW × 3 台 = 30kW

電源・動力：三相 200V 60Hz

電気ヒータ：4kW×18 台 = 72kW

電源・動力：三相 200V 60Hz

④安全装置（計装・動力制御板）（核融合科学研究所より借用）

i マイクロ波関係

方 式：漏電ブレーカ

操 作：漏電時に警報出力をし、マイクロ波発振停止。

方 式：点検扉ハンドル締付け確認式

操 作：締付け不足時（隙間がある時）、リミットスイッチOFF

稼動中にリミットスイッチOFF 信号でマイクロ波発振停止。

方 式：定量供給機前板ボルト締め付け確認式

操 作：締付け不足時（隙間がある時）、リミットスイッチOFF

稼動中にリミットスイッチOFF 信号でマイクロ波発振停止。

方 式：マグネットロン冷却温度確認式

操 作：冷却水温度を温度センサで測定を行い、設定温度以上で警報出力。警報

出力時、マイクロ波発振停止。

方 式：マイクロ波漏洩確認式

操 作：入口・出口フード部隙間よりマイクロ波漏洩センサで漏洩量の確認を行

い、漏洩基準以上で警報出力。警報出力時、マイクロ波発振停止。

ii 電気ヒータ関係

方 式：漏電ブレーカ

操 作：漏電時に警報出力をし、ヒータが停止。

方 式：断線検知

操 作：断線時に警報出力をし、ヒータが停止。

iii集塵排気装置関係

方 式：冷却空気導入による温度制御

操 作：集塵排気装置の使用温度（500°C）以上にならない様、温度センサで稀釈

空気ダンパを自動制御。

方 式 : フィルタ交換検知

操 作 : フィルタのつまりを差圧計で検知し、警報出力。

▼水冷装置関係

方 式 : 水量検知

操 作 : 水量不足で、警報出力。

⑤スクリュー式供給器

品名 : 車載型・移動式処理プラント

規格 : マイクロ波—電気ハイブリッロータリーキルン専用原料供給器

型式 : HMWK-RK-10+62

製造会社 : 高砂工業株式会社

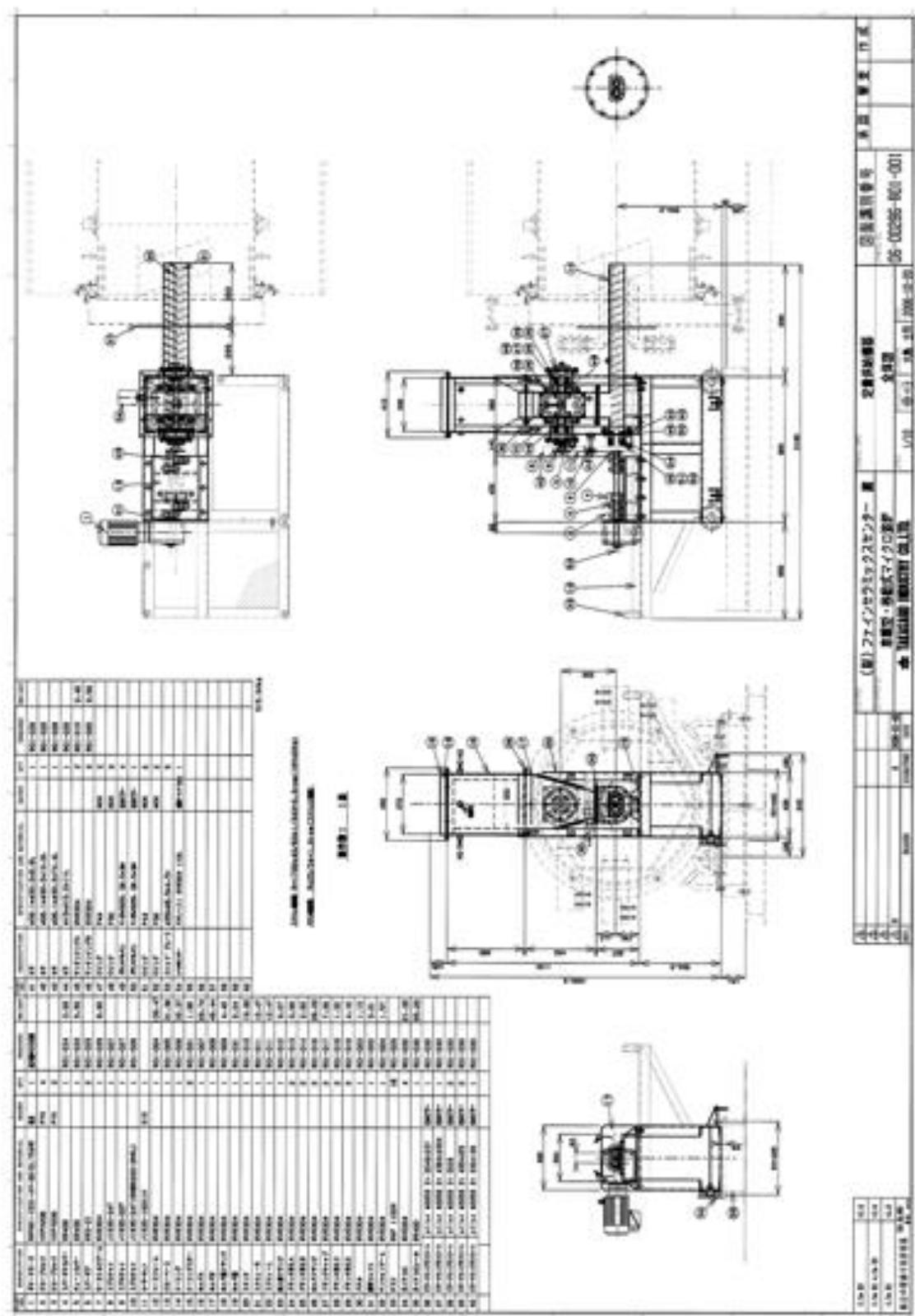
製造年月日 : 平成19年4月2日

供給速度 : 100kg/時

供給物粒径 : 10mmアンダー、スレート粉碎片

供給器ホッパー : 密閉式

外形寸法 : 送付2図の通り



送付2図 スクリュー式供給器外形図

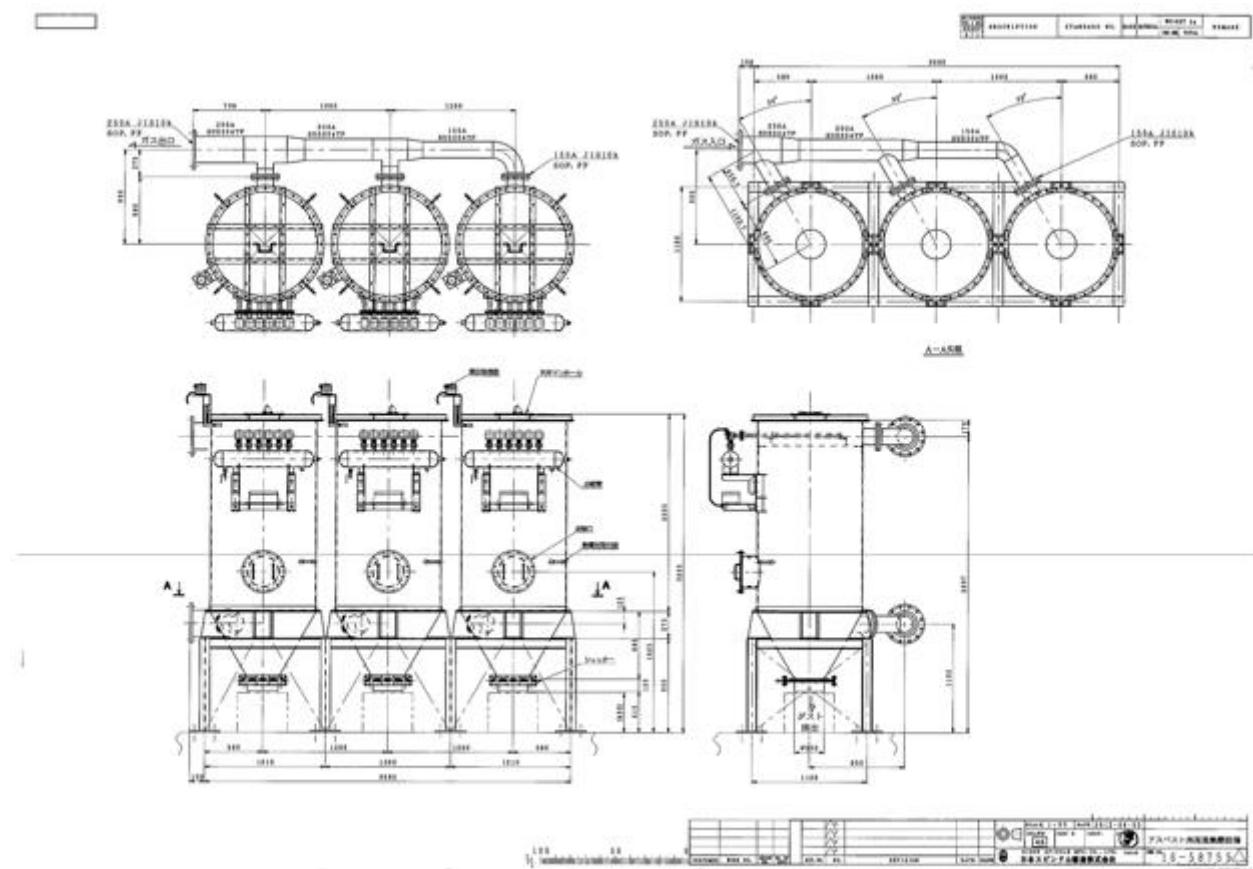
高温集塵機

外形寸法：送付3図の通り

重量：2700kg

基本性能：

- 1) 处理ガス量 : 800 Nm³/h
- 2) 粉塵粒子径 : 2 - 5 □m
- 3) 入口濃度 : 100 g /Nm³
- 4) 入口濃度 : 0.1 g /Nm³
- 5) 耐圧 : - 4.0 kPa
- 6) ガス温度 : 500 °C以上 目標



送付3図 アスベスト用高温集塵設備外形図

耐熱バーナーファン（耐熱吸引ポンプ）

品名：ターボブロア

規格：耐熱型

型式：TBL-10-PW0

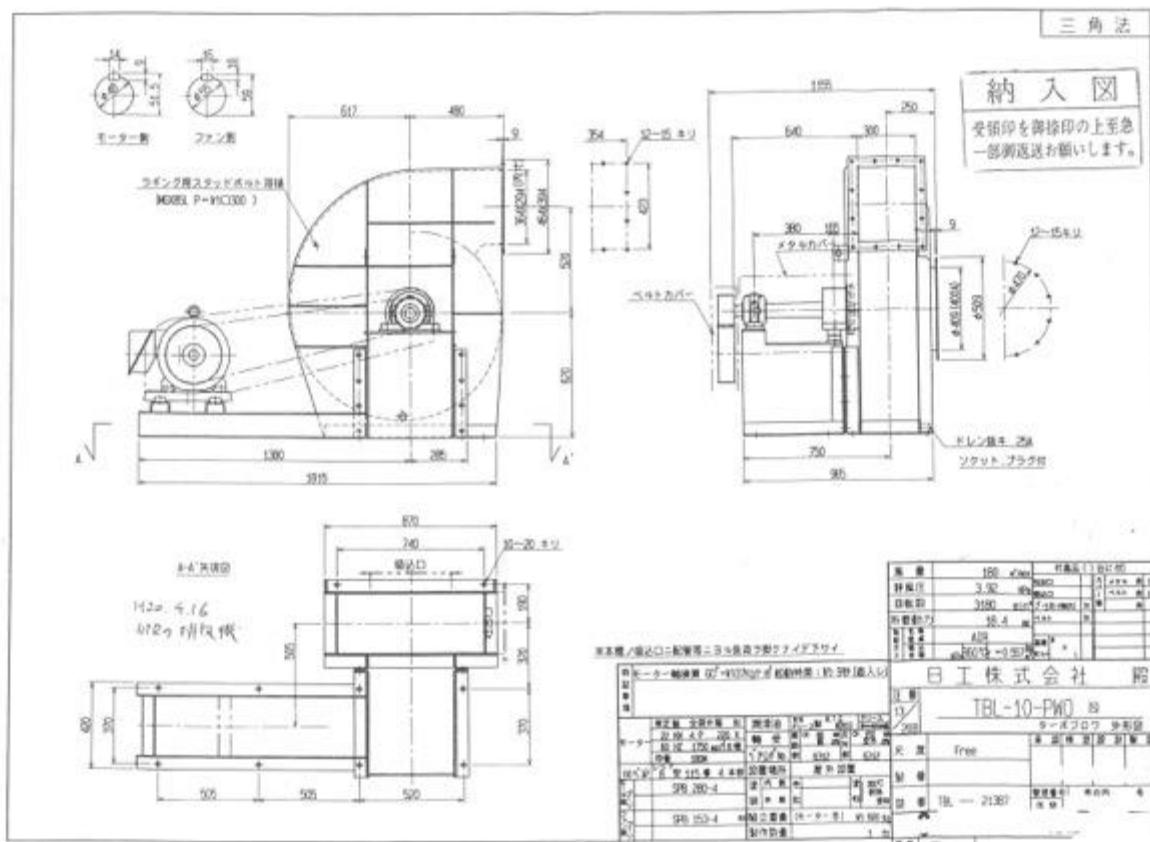
製造会社：日工株式会社

外形寸法：送付4図の通り

重量：600kg

基本性能：

- 1) 風量：180m³/分
- 2) 静風圧：3.92 kPa
- 3) 回転数：3180rpm
- 4) 所要動力：18.4kW
- 5) 取扱ガス：空気
- 6) 入口温度 360°C



送付4図 耐熱バーナーファン 外形図

総合制御盤

核融合科学研究所から貸与。

前項3.1～3.3（必要なら3.4も）の各機器には、ローカル制御盤を設け、単独試験が可能であるものとする。総合制御（エンジニアリング（整合調整））盤は、前項3.2の個別制御板が兼ねるものとする。各機器からの信号取り込みは、日工（株）に依頼総合制御盤の機能・取り込み情報等は以下の通りとする。

燃焼ガス温度・流量、瓦礫出口温度等のローカル制御盤情報の取り込み記録。

- ・上記情報を使って排気ファン回転速度と木質系燃焼炉を制御、
- ・マイクロ波炉出口フード空気流入弁は手動とする。
- ・前段燃焼炉、マイクロ波炉、高温集塵機の運転可・不可に関するインターロック情報は、運転可・不可、温度上限とする。また、各機器の作動確認情報を総合制御盤に取り込むこと。
 - ・取り合いパラメータ、信号規格（接点開閉、電圧・電流出力、熱電対規格、マノメータその他）は、別途協議。
 - ・インターロック信号は、マイクロ波炉制御盤信号出力端子板渡し、信号種類は、N C接点とする。

送付資料2 【担当：東北大学、京都大学】

本委託研究はその予算の多くを昨年度に建造された現地実証試験の撤退に使用している。この撤退工事の流れを以下に示す。

工程表：現地実証試験解体における工程表

取り外し工程	7月前半	7月後半
取り外し準備	1日－5日	
高温集塵機	5日－8日	
キルンカバー、クーリングタワー、冷却水タンク	9日－10日	
マイクロ波ロータリーキルン	10日－11日	
ロータリーキルン撤収片付け	11日－20日	

アスベスト処理設備の解体は、その汚染度により解体取り扱いレベルが設定されている。法令ではレベル1－3までが設定されており、これに属する処理での解体が義務づけられている。本実験設備は前段ロータリーキルン、マイクロ波ロータリーキルン、高温集塵機に分類されるが、本研究ではこれは本研究の注目度及びアスベストに関する民意を考慮し、それぞれ一段階上のレベルで対応することで安全配慮を行った（具体的にはそれぞれ、レベル3、レベル1、レベル1として取り扱った）。撤退業務は概ね予定通りに進行し、今年度9月末時点において、現地からの撤退が完了した。



図：撤退前の現地実証試験画像（左）と撤退後画像（右）

(2) 瓦礫中有害物質処理の実験的研究

東北大学

工学部 環境科学研究科 環境科学専攻 谷口研究室 准教授 吉川 昇

平成24～25年度累計予算額：7,937千円（うち、平成25年度予算額：929千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

クリソライト（代表的なアスベストの一種）はマイクロ波で加熱すると1050°Cで無害化出来る。この現象を利用し、マイクロ波-燃焼ハイブリッド加熱炉による、東日本大震災で生じたアスベスト含有瓦礫の無害化・再資源化処理の試作機を開発した。熱源として利用する木材としては、同じく震災で生じた津波堆積物を用いた。現地には再利用不可能な木質系廃棄物が大量に存在するため、これを燃料としてセメントを600°Cまで予熱した。この予熱炉をマイクロ波炉の前段にカスクードを接続し、一連の工程で、セメントが1050°C以上に加熱され、アスベストが無害化すると共に、マイクロ波の電磁界および高温のセメントとの接触によって、ダイオキシンが分解される。この分解方法は日本スピンドルによって開発され、完成された技術である。さらに、排ガスに高性能集塵機・2次燃焼器を接続し、有害成分を大気中に排出しない二重の安全対策を施すものである。

マイクロ波加熱炉を用いることで、この瓦礫中のアスベスト含有セメント無害化処理、再利用不可能な高濃度塩分含有木質系廃材の無害燃焼による迅速減容処理を提案する。本サブテーマではサブテーマ1において建造されたアスベスト無害化システム試作炉を、実験的に運用することで、その最適運用条件を導出する。また、実証試験の結果を解釈する上でアスベスト含有スレート瓦のマイクロ波加熱特性を知るために実験室的な基礎研究を行った。その概要を以下に述べる。

1、大学の実験室にアスベスト含有物を持ち込みマイクロ波印加基礎実験を行う事は、安全管理の面から実験を準備するのに時間を要するため、アスベスト模擬物質を選択し、そのマイクロ波加熱特性に関して調べた。

2、この目的で、アスベスト疑似物質としてタルク、母相スレートとしてCaOを選択し、その高温誘電率測定を行った。

3、次に、この測定値を用いて、マイクロ波加熱に関する計算機シミュレーションを行った。この結果を用いて、マイクロ波印加によるアスベストファイバーの無害化実証試験結果に関する考察を行った。

[キーワード]

アスベスト無害化、クリソタイル、アモサイト、マイクロ波加熱、非平衡温度場、東日本大震災

1. はじめに

東日本大震災における津波によって倒壊し流された瓦礫には、法令で規定された有害物質が、混入していることは各種の調査で判明している。アスベスト粉塵による健康被害は遅発性であり、吸引後、10年以上経過して、発症することが多い。阪神淡路大震災から13年後、倒壊した建物の解体作業に従事した労働者が、2008年にアスベスト（石綿）が原因の中皮腫を発症し、労災認定を受けている。さらに2012年には、救援に従事したボランティアから、中皮腫を発症された方が出てきている。長期の復興体制に移行している現時点では、作業者が大量のアスベスト粉塵を吸引する危険は無いと考えられるが、大量の瓦礫は地盤の埋め立て嵩上げに使用される。その中にアスベスト含有のスレート等が混入していると、後世まで汚染土壤の不安を残すことになる。埋め立てに先立ち、アスベスト含有スレートを選別し、無害化処理を施すことは、必要不可欠である。このアスベスト無害化には、高温加熱して組織構造を変える必要があるが、アスベストを含むスレート瓦は断熱性、耐熱性が高く熱伝導率が小さいため、外部からの加熱では、塊を均一に加熱処理するには長い時間が必要であった。そのため、従来法では震災起因のコンクリート材（想定値：200万トン）に含まれる有害物質無害化は困難であり、これを埋め立てし、封じ込める事をもってその処理としている。これは非飛散性アスベスト処理手法としては、現状では、最も現実的で効率的な手続きではあるが、可能であれば、これらを無害化した後、埋め立て用資材に用いることが望まれる。

本プロジェクトでは、マイクロ波加熱炉を用いることで、この瓦礫中のアスベスト含有セメント無害化処理、再利用不可能な高濃度塩分含有木質系廃材の無害燃焼による迅速減容処理を提案している。このサブテーマではアスベスト無害化を達成するための、システム操業条件の導出と、マイクロ波加熱によるアスベスト無害化機構について担当する。

2. 研究開発目的

本テーマは大別すると以下の2点を担当している。

1. 現地実証試験における最適条件の導出
2. アスベスト無害化のメカニズム解明

「1. 現地実証試験における最適条件の導出」についてはサブテーマ1において既に報告されたので、本報告書では「2. アスベスト無害化のメカニズム解明」について述べる。マイクロ波プロセッシングにおいては、単純に発熱による効果の他に熱的現象では説明できない”非熱的効果”が存在すると言われ、これに関する検討が長年行われてきた。本研究に於いても、このような効果を期待したのであるが、過去の研究においては、その原因や機構に関しては現在も十分に解明されているとは言い難い。本テーマでは無機材料工学、応用物理の観点からこの”非熱的効果”を本実験系において探索し、この学術的メカニズムを明らかにすることである。

3. 研究開発方法

当初想定した無害化機構に関するシナリオ

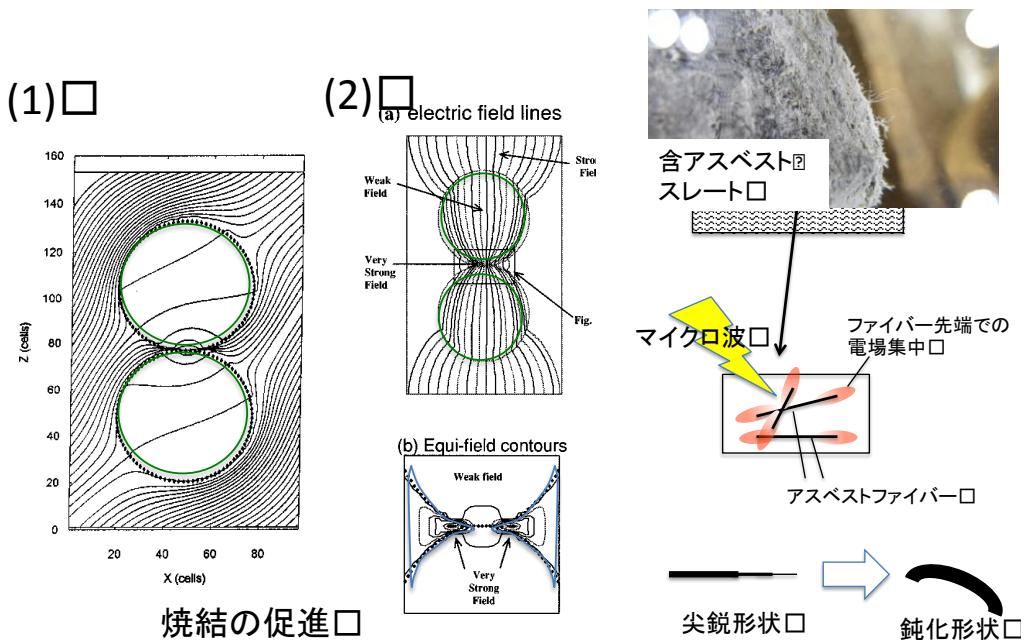
マイクロ波プロセッシングにおいては、単純に発熱による効果の他に熱的現象では説明できない”非熱的効果”が存在すると言われ、これに関する検討が長年行われてきた。本研究に於いても、このような効果を期待したのであるが、過去の研究においては、その原因や機構に関しては現在も十分に解明されているとは言い難い。

この中で、アスベストファイバーの無害化機構として検討可能な以下の2つモデルを提案すると共に、これを基本として基礎研究を展開する事にした。

(1) 電場集中の効果

マイクロ波は電磁波であり、高周波電場と磁場が存在している。このような電磁波が物質に照射されると、物質の表面においてはその形状に依存した電磁場分布が形成される。今回対象とするアスベスト含有スレート瓦は誘電体であり、主にその電場分布が問題となる。

図(2)-1には、Birnboimらが行ったセラミック粒子周囲に生じる電場集中に関する計算機シミュレーションの結果を示す。粒子接触点近傍のような局所領域に於いて電場の集中が生じている事が分かる。著者らはこれによる焼結促進の効果を提唱している。



図(2)-1: マイクロ波印加における2つのセラミック粒子周囲の(1)電位(2)電界分布
Birnboim (1999)

図(2)-2: アスベストファイバー先端における電場集中効果(イメージ図)

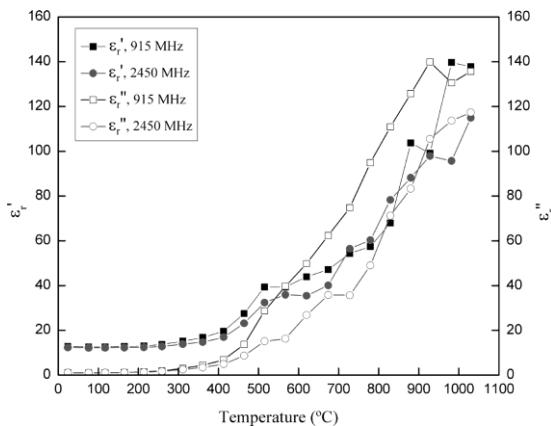
このように外部(空気)と物質との誘電率が大きく異なり、その形状変化が著しい領域においては、電場分布の不均一性が生じやすくなる。本研究に於けるアスベストファイバーは、ナノサイ

ズの径を有する個々のファイバーが捻り合って太さ数10ミクロンのファイバー束を形成しているが、このようなファイバー束の先端においては図(2)-2のような電場集中が生じ、他領域とは異なった電場強度を有する領域を形成している可能性がある。この事が原因となって先端部の発熱が促進され、先鋭であったアスベストファイバー先端が鈍化して、無害化が促進される可能性がある。

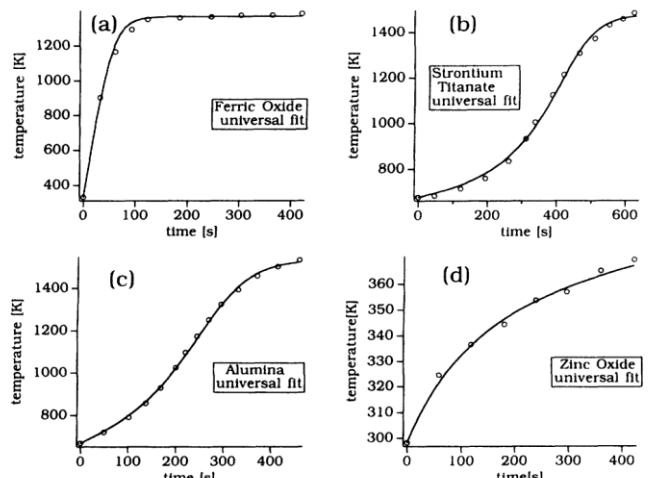
(2) 高温に於ける金属酸化物の誘電損失の非線形的な変化

主に(重)金属酸化物においては誘電率の温度依存性が大きい事が知られている。誘電損が高温で急激に大きく成る事が一般に知られており、これがマイクロ波加熱に於けるホットスポットの形成や熱暴走(Thermal Runaway)の原因となる事が議論されている。この原因に関しては以下の通りである。

水のような分子性液体の場合(沸点以下の)高温になるに従い、マイクロ波電場印加による分子の配向は熱振動により妨げられ、誘電率や誘電損率は温度上昇とともに低下する事が知られている。それに対し金属酸化物のようなイオン結晶固体においては、物質を構成するイオン自体は電荷を持っていても、マイクロ電場印加を行っても水分子のように動きやすくはなく、誘電配向等は生じにくいと考えられる。これに対し高温(例えば500°C以上)の昇温により、イオン空孔の形成が著しく促進されると、イオン空孔の導入により原子尺度の電荷分布の局所的不均一部分が生じこれにより固体結晶中に双極子モーメントを有するイオンクラスターが形成される事になる。これが原因となって誘電率や誘電損率の急激な上昇が生じる事になる。重金属酸化物ではこの傾向が著しい。図(2)-3には Fe_3O_4 の誘電率の温度依存性の例を示している。500°C以上からの変化に注目したい。またKenkreらは、このような原因を基に、酸化物のマイクロ波加熱挙動を4種類に分類した。それらの昇温曲線と理論に依るフィッティング結果を図(2)-4に示す。



図(2)-3 : Fe_3O_4 の高温誘電率、
Peng et al. (2010)



図(2)-4 : 酸化物のマイクロ波昇温
挙動(4タイプ) Kenkre et al. (1992)

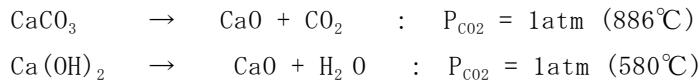
(3) 模擬物質の選択

前述のように、アスベスト含有物を使用したマイクロ波印加基礎実験を行う事が困難であるためアスベスト模擬物質を選択し、そのマイクロ波加熱特性に関して調べる事にした。本課題研究に於ける実証試験で使用したのは、アスベスト含有スレート瓦であるが、この構成成分である母相とファイバー相に関して検討する。

(4) 母相とファイバー相の分析

1) 母相

母相であるスレート板は、図(2)-5に示すX線回折プロファイルが示すように、主に CaCO_3 から(または Ca(OH)_2)構成されている。これが加熱されると、 CaCO_3 や Ca(OH)_2 が以下のように分解する事が知られており、この様子がX線回折の結果から確認する事ができる。



この事から、アスベスト含有スレート瓦は、900°C以上の高温加熱によって分解が生じ、既にCaOに変化していると考えて良いと判断できる。

2) ファイバー相

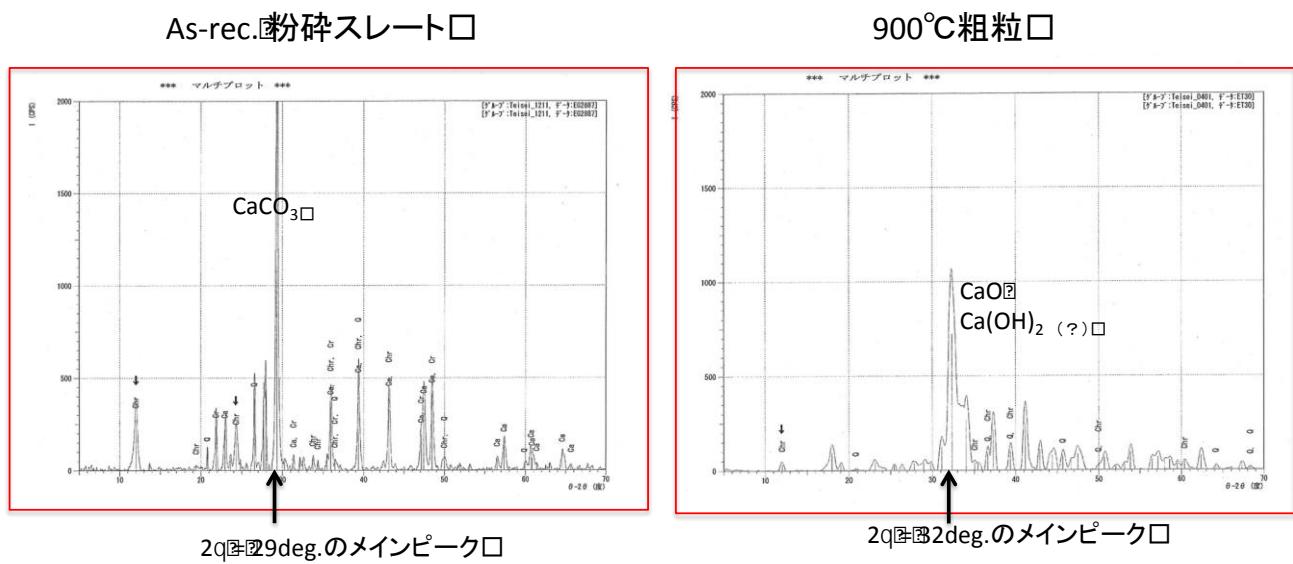
アスベストは、複数の種類の物質の総称であり、表(2)-1のように分類されている。この中で本課題研究において対象としたスレート瓦中にはクリソタイルとアモサイトが存在する事が分かっている。

表(2)-1 : アスベストの種類と諸性質

	蛇紋石族	角閃石族				
	クリソタイル	クロシドライト	アモサイト	アンソフィライト	トレモライト	アクチノライト
硬度	2.5~4.0	4	5.5~6.0	5.5~6.0	5.5	約6
比重	2.4~2.6	3.2~3.3	3.1~3.25	2.85~3.1	2.9~3.2	3.0~3.2
比熱	0.266	0.201	0.193	0.210	0.212	0.217
抗張力 (kg/m ²)	30,000	35,000	25,000	2,800	70~560	70
ろ過性能	遅い	速い	速い	中間速	中間速	中間速
溶解点	1,521°C	1,193°C	1,399°C	1,468°C	1,316°C	1,393°C
紡糸性	良	良	良	不良	不良	不良
柔軟性	大	良	良	不良	不良	不良
耐熱性	良	良	良	優秀	良	良
耐酸性	弱い	強い	中	中	極めて強い	強い
耐アルカリ性	極めて強い	強い	強い	強い	極めて強い	強い
分解温度*	450~700°C	400~600°C	600~800°C	620~960°C	600~850°C	950~1,040°C

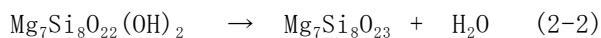
*脱水反応を起こし、結晶構造が崩壊して強度を失う温度をいう。

出典：大気中発がん物質のレビュー 石綿- S55.3



図(2)-5:スレート板の加熱前(左)および加

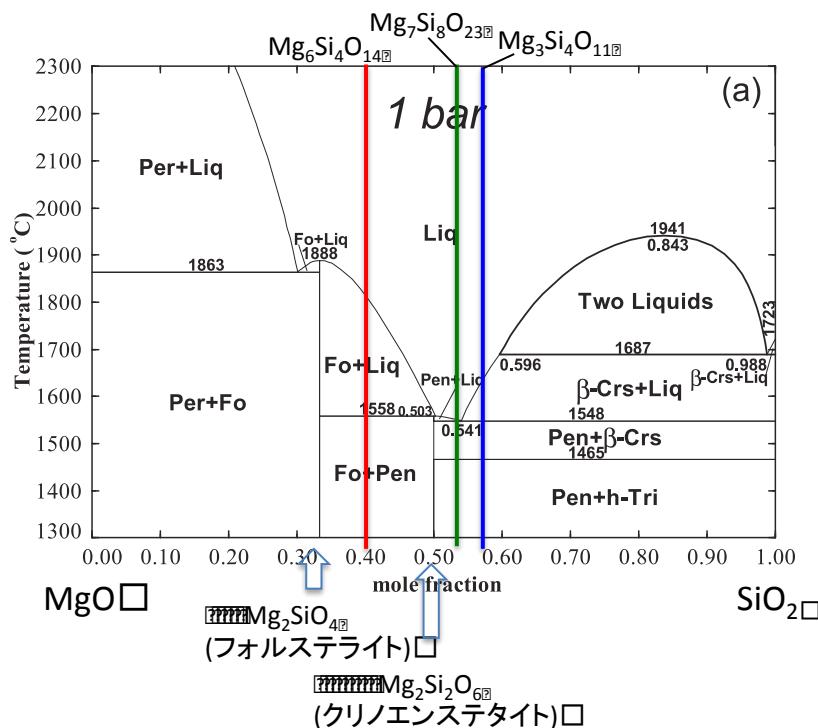
クリソタイルおよびアモーサイトの組成は以下に示す通りであり、結晶水(OH)基を含有している。しかしながら高温加熱(表3参照)により以下の反応により結晶水が脱離して、酸化物に変化する事が知られている。

(a) クリソタイル ($Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$)(b) アモーサイト ($Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$)

これらの分解反応を考慮すると、800°C以上の昇温により分解反応が生じる事によりMg-Si-O系の酸化物が生成する事になる。

3) アスベストに関連する複酸化物

前述のように、クリソタイルやアモーサイトは高温でそれぞれ $Mg_6Si_4O_{14}$ および $Mg_7Si_8O_{23}$ 等のMg-Si-O系の複酸化物に変化すると考えられるが、これは $MgO-SiO_2$ の擬2元系平衡状態においては、図2-6に示されるような組成を有する事になる。



図(2)-6 : MgO-SiO₂擬2元系状態図2 – 上に示した、各複酸化物組成

本状態図に依れば、クリソタイルから生じたMg₆Si₄O₁₄は融点が1800°C程度で非常に高いが、1558°C以上においては、一部融液が存在する事になる。一方、アモーサイトから生じるMg₇Si₈O₂₃の融点は1600°C程度であり、Mg₆Si₄O₁₄より融点が遙かに低い事になる。しかしながらこれも1548°C以上において融液が生成し始まる事になる。どちらも室温に於ける平衡組成としては2相共存領域であり、それぞれ(フォルステライト(Fo) + クリノエンステタイト(Pen))および(クリノエンステタイト(Pen) + h-トリジマイト)であることになる。ただしこのようなアスベスト由来の複酸化物を室温における平衡相まで分解させる事は、非現実的な長時間を必要とするであろうと考えられる。

4) アスベスト含有スレート模擬物質に関して

まず800°C以上の母相としては、CaOを考えれば良いため、以降に記述する誘電率測定やシミュレーションについては、CaOを模擬物質として考慮して検討を行う事とした。

次に、アスベストの模擬物質であるが、当初MgOとSiO₂粉末からクリソタイル由来のMg₆Si₄O₁₄を高温で反応させて合成し、室温にクエンチして単相を得る事を試みたが、現存の電気炉を用いると1700°Cが限界であり、両者の反応を十分に進行させる事ができなかった。このため、融点が低く合成がより容易でありそうなアモーサイト由来の複酸化物Mg₇Si₈O₂₃にターゲットを絞ろうとした。この場合、溶融させる事は可能であったが、後述するように誘電率測定のための試料加工において現状では困難が生じ、作製を断念した。

そこで粉末物質として市販されているタルク(talc 滑石 : Mg₃Si₄O₁₁)という物質に注目した。タ

タルクの組成も共に図2-6内に示している。タルクは組成としてアモーサイトよりも SiO_2 が過剰であるが、アスベスト類似物質として知られている。しかしながら粉末形状はアスベストのような先鋒形状を有す訳ではなく、無害物質である。粉末にして黒板用のチョーク、玩具、工事現場等でマーキング用、ベビーパウダーなど化粧品類、医薬品や上質紙の混ぜ物等に利用されている。このように実験室において使用する場合に於いても十分安全な物質であると考えられている。このような理由からタルクをアスベストの模擬物質として検討を行う事とした。

(5) 誘電率測定

本研究においては、アスベスト含有スレート瓦のマイクロ波加熱挙動を解析する目的で、母相模擬物質CaOとアスベスト模擬物質であるタルクの誘電率を室温から900°Cまでの温度範囲において測定する事を試みた。どちらも粉末試料である。

本研究においては、同軸導波管法による室温での誘電率測定、および空洞共振摂動法を用いて高温の誘電率測定を行った。前者においては、標準試料などを使用し誘電率の絶対値を評価したが、後述するように高温での測定値の絶対値導出においては、種々のパラメータを導入する必要があり、測定値の絶対値の信頼性に乏しいと考えられる。そこで本研究においては室温で得られた誘電率の絶対値を基本として、温度変化による誘電率の相対的な変化を後者の方法で推定した。次にそれぞれの測定方法について説明する。

誘電率測定法

1) 同軸導波管法

マイクロ波周波数領域における複素誘電率の測定を行った。図(2)-7に示すように、誘電率測定にはネットワークアナライザを用いた同軸導波管法を採用した。測定では、マイクロ波周波数領域の電磁場を回路(円筒型導波管)に組み込まれた媒質(試料)に入力し、電磁波の反射および透過に応じて得られるSパラメータに基づいて誘電率の算出が行われる。解析はNicolson-Ross法という方法のプログラムが、解析用のコンピュータにインストールされている。これに依れば、透磁率も同時に測定する事ができるが、今回は対象物質が非磁性物質であるため、その値が十分真空の透磁率 μ_0 に近いか調べ、測定の妥当性をチェックする事ができる。

また測定原理上、試料が大きな導電性を有する場合には、入射した電磁波の大部分が反射してしまい、Sパラメータを得ることができないため正確な誘電率が得られないとされている。本研究で測定対象としたCaOやタルク粉末においては、そのような事は無かった。

測定では、粉末試料を同軸型のサンプルホルダに充填し、図(2)-7に示すようにネットワークアナライザへ接続した。測定方法の詳細を以下に示す。

<測定条件>

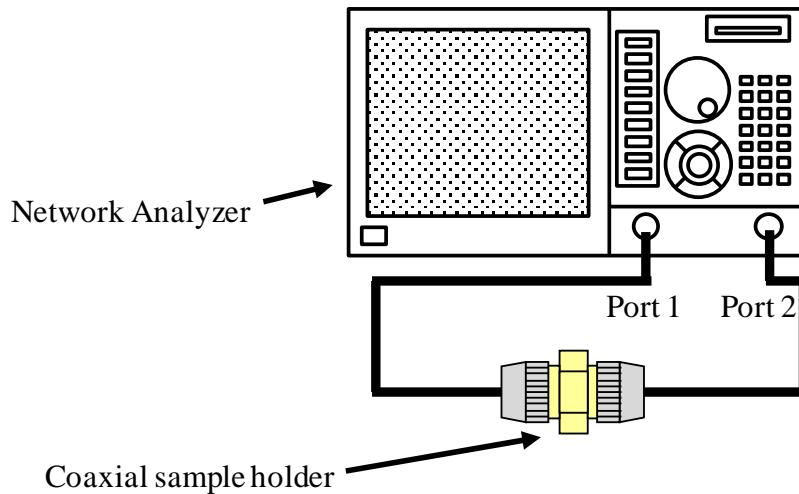
使用機器：ネットワークアナライザ (E5062A / Agilent Technologies, Inc.)

周波数域：1～3 GHz (0.01 GHz間隔で測定値を記録)

測定試料：CaO、タルク粉末

試料形状：内径3 mm、外径7 mm、厚さ3 mmの同心円筒形金属治具に充填

測定温度：室温



図(2)-7：同軸導波管法による誘電率測定

2) 空洞共振摂動法

非導電性物質においては誘電損率の値がマイクロ波を吸収する度合を決定する。いくつかの酸化物の誘電率の温度依存性は確認されているが、高温での誘電率を測定したデータは未だに少ない。ある種の酸化物のマイクロ波加熱を行った場合には500°C以上から急速な温度上昇が観測されており、この急激な昇温過程を解明するためには室温から高温までの広い温度域における複素誘電率の挙動を把握する必要性がある。マイクロ波領域における誘電率の測定方法には、同軸プローブ路法、導波管法、自由空間法等が有る。本研究では高温における誘電率測定にあたってノイズの影響を受けにくく空洞共振摂動法を用いて計測を行った。本手法は、单一の周波数の誘電特性を求めるために適した手法であり共振条件の相対的な変化で測定を行うためノイズの影響を受けにくく、精度の高い測定が行えるという利点がある。

ネットワークアナライザに接続されたキャビティ内には特定の周波数で共振する定在波が存在する。このキャビティ内に微小な誘電体や磁性体を挿入すると共振周波数や半値幅がわずかに変化する。この共振周波数や半値幅の変化量を測定し、材料の複素誘電率や複素透磁率を算出する方法が共振器法である。Perturbation(摂動)とは試料の挿入前後で電磁場が等しいと仮定する考え方である。

本手法では試料の体積を ΔV とし、試料挿入前の (f_0, Q_0) を測定したのち試料挿入後の (f_L, Q_L) を得ることで複素誘電率、複素透磁率を以下に示す式を用いて求める。

$$\varepsilon_r' = 1 - \frac{1}{\alpha_\epsilon} \frac{f_L - f_0}{f_L} \frac{V_0}{\Delta V}, \quad \varepsilon_r'' = \frac{1}{2\alpha_\epsilon} \left(\frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V_0}{\Delta V} \quad (2-3)$$

ここで

f_0 : 非挿入時の共振周波数 [Hz]、 f_L : 挿入時の共振周波数 [Hz]、 Q_0 : 非挿入時のQ値 [-]

Q_L : 挿入時のQ値 [-]、 V_0 : 共振器の体積 [m^3]、 ΔV : 試料の体積 [m^3]

α_ε : 共振モード、試料形状で決まる定数 [-]

これらの式において α_ε は理論的に決定される定数であり各種形状によって値が求められている。本実験では矩形型キャビティを用いたため $\alpha_\varepsilon = 2$ として代入した。ここで本手法における Q 値とは次式で定義される共振器の特性を表すものである。

$$Q = 2\pi f \frac{\text{蓄えられるエネルギーの時間平均値}}{\text{単位時間当たりに失うエネルギー}}$$

また Q 値は次式のように近似することができる。

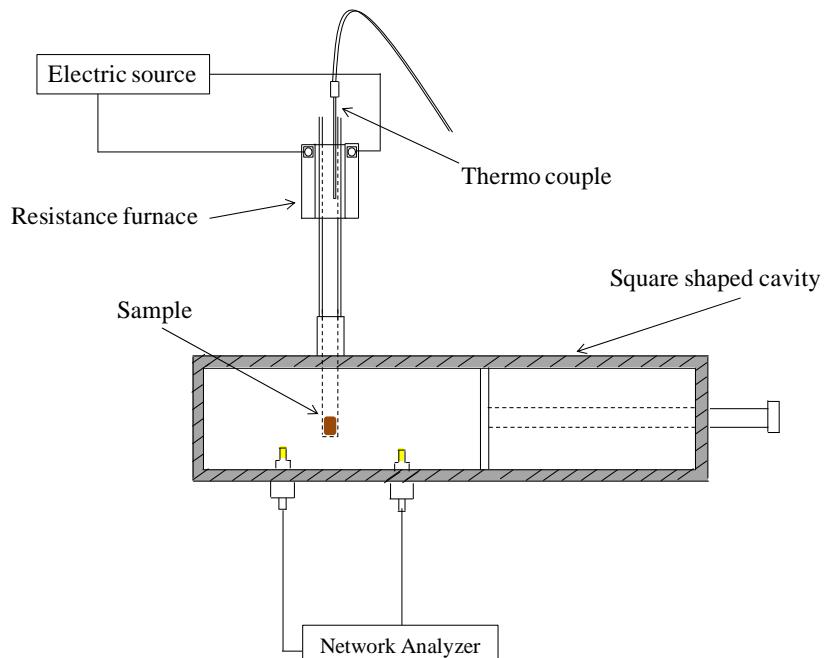
$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (2-4)$$

もしくは

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \cdot \frac{1}{1 - 10^{-\frac{IL_0}{20}}} \quad (2-5)$$

とすることができる。 f_0 は共振周波数 [Hz]、 Δf は 3dB 帯域幅もしくは半帶域幅 [Hz]、 IL_0 は挿入損失 [dB] である。一般に Q 値は式(2-4)で求めるが、挿入損失 IL_0 が 40dB よりも小さい場合は、外部 Q の影響が 1%以上となるので、補正項を含む(2-5)を用いたほうが精度よく求めることができる。本実験では誘電率の測定を行うため電場最大の位置に試料を挿入した。

実験装置の概略図(2)-8 を示す。キャビティ上部には電気炉が設置され、温度の測定には熱電対を用いた。プランジャー付きキャビティはネットワークアライザに接続されており、出力されたデータをパソコン上で解析した。上部の電気炉内で加熱を行い一定温度に保持した後、素早く下部のキャビティに挿入し、各温度での誘電率を測定した。測定方法の詳細を次項に示す。



図(2)-8：空洞共振摂動法による高温誘電率測定装置

<測定方法>

使用機器：ネットワークアナライザ(MS2026A VNA MASTER/ Anritsu)

TE103矩形型キャビティ、SiC発熱体電気炉

測定周波数：2.13 GHz(ブランクの共鳴周波数を2.13GHzに設定)

測定試料：CaO、タルク粉末

試料形状：内径9.31mm、外径11.61mm、厚さ1.15mmの石英ガラス製の試料ホルダー
に粉末を入れる。

雰囲気：大気

測定条件：上部の電気炉で加熱を行いつつ各温度で誘電率を測定、室温から900°Cまで

(6) 電磁場解析と電場集中効果

本研究においては、前節における誘電率測定結果を用いて、アスベスト含有スレート瓦片に対するマイクロ波照射により生じるファイバー近傍の電磁場分布に関する計算機シミュレーションを行った。本研究においては電磁場解析のために、市販数値解析ソフトウェアである COMSOL Multiphysics (COMSOL, Inc.) RFモジュールver. 4.3(b)を用いた。ソフトウェアにおいては、Maxwell方程式を有限要素法により解いている。

1) 電磁場解析モデル

解析領域の概要を図(2)-9に示す。直方体形状のCaOの中に2本のタルクファイバーが存在し、このファイバーの交差位置における電場の集中等を検討する目的から1本が直立してゐるのに対し、他方が傾いでいる配置を考慮した。

CaOの上側には空気が存在している。直方体底面は $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ の正方形形状であり、ファイバーの直径 $50\mu\text{m}$ 、長さ $500\mu\text{m}$ とした。電磁波は入射波として 100W の平面波を上方向から入射している(波動関数で表示)。CaO領域の側壁の境界条件としては、x方向に電気壁、y方向に磁気壁を設定した。また出口は(ソフトウェア上では)散乱境界を設定し、電磁波は底面を突き抜けて行く事に相当する。

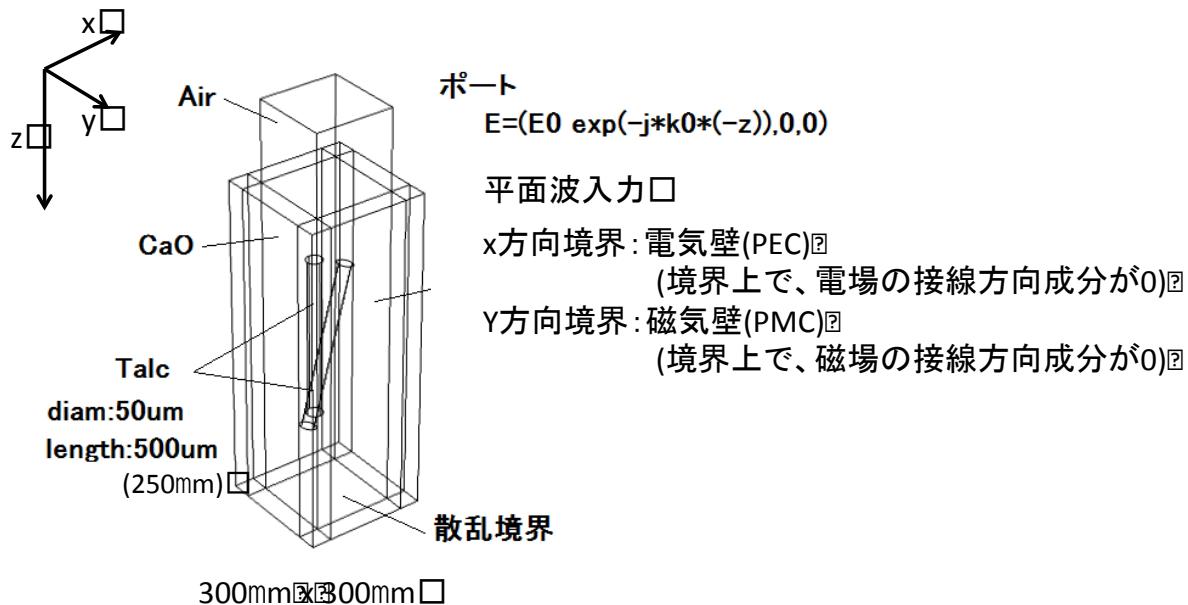


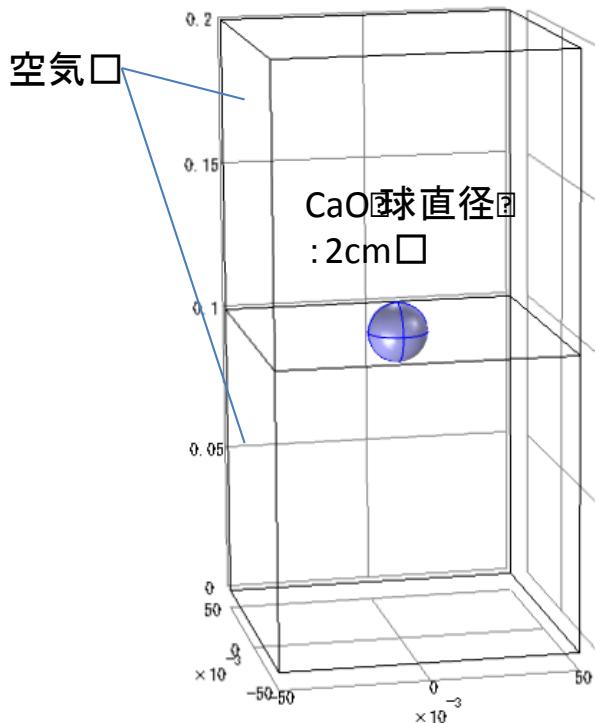
図 (2) - 9 : 電磁場解析領域

(7) アスベスト含有スレート球の加熱シミュレーション

ここに至るまでの議論から、マイクロ波は主にCaO母相により吸収され、加熱に至るという可能性が指摘された。そこでアスベスト含有スレート瓦の素片がマイクロ波照射を受けた場合に生じる温度上昇に関し、簡単なシミュレーションを行った。モデルの概要と解析結果について紹介する。

マイクロ波加熱シミュレーションモデル

本モデルにおいては、タルクよりも誘電損失の大きなCaO相において加熱が生じやすいと考えられるため、非加熱物はCaO単一相からなる直径2cmの球であると仮定する。電磁場および伝熱の解析領域は図(2)-10に示す。 $10 \times 10 \times 40$ cmの領域である。



図(2)-10：電磁場/伝熱解析における解析領域

この伝熱解析においては、以下に示すような基礎式を利用している((7)の解析も同様である)。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = |\nabla^2 T + Q|, \quad Q = \frac{I}{2} \epsilon''(T) \omega |E|^2 \quad (2-6)$$

これは電磁場解析で得られた電場 E が、上の右式の中に導入され、これに誘電損率の温度依存性 $\epsilon''_r(T)$ を考慮した上で、単位体積、単位時間あたりの発熱量 Q が計算される。これが左式の右辺第2項(発熱項)としてCaO固体中の熱伝導方程式に導入される。これを解く事により温度場 $T(\mathbf{r})$ (\mathbf{r} は位置ベクトル)が計算され、これに依り誘電損率への影響が生じるという連成モデルである。この解析を行うにあたり使用した熱物性値と境界条件に関して次に示す。

物性値

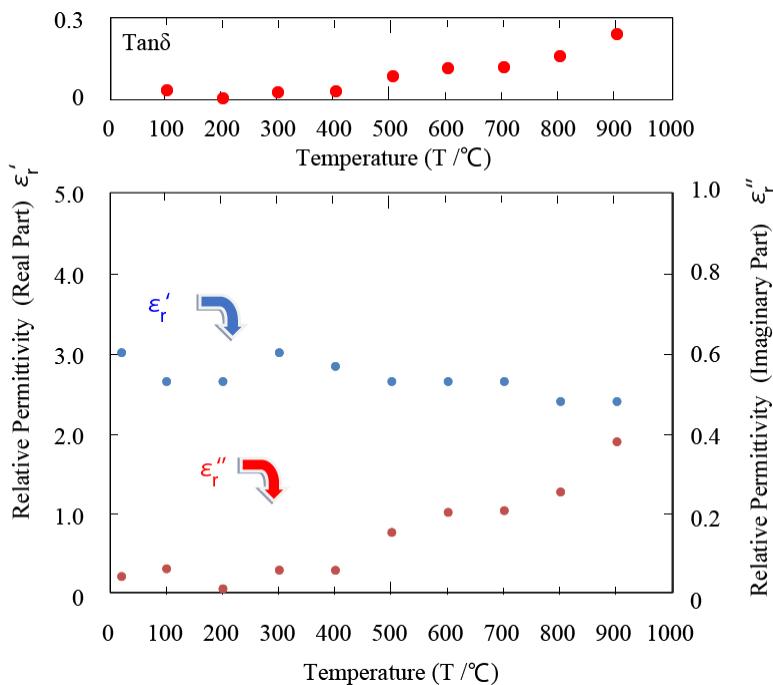
ρ : 密度 [$3.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$]、 C_p : 定圧比熱 { 0.96 J/kg/K }、 T : 温度 [K]、 λ : 热伝導度 [13 J/m/s/K]、 ϵ''_r : 誘電損率 [F/m]、 $\omega (=2\pi f)$: マイクロ波周波数 f [2.45GHz]、 E : マイクロ波電場 [V/m]
ここに示す熱物性値(ρ , C_p , λ)は、CaOの室温における値である。これらも温度依存性を有するが、本モデルではこれらが一定であるとして解析を行った。誘電損率 $\epsilon''_r(T)$ に関しては、次節における誘電率測定結果の値を用いた。

境界条件

熱伝導方程式を解くための境界条件として、以下の式を検討した。球表面から空気相への熱の逃げは、対流(右辺第一項)と放射(右辺第2項)により生じると仮定し、それによる熱流束 q を境界条件として与えた。 T_0 は周囲温度(室温300K)である。

CaOの誘電率の温度依存性に関する測定値を図(2)-11に示す。図(2)-12には、比誘電率(ϵ_r')および比誘電損率(ϵ_r'')の他に、 $\tan\delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$ の値もプロットしている。タルクと同様に比誘電率の温度変化は比較的小さいが、比誘電損率においては、500°C付近から増加傾向に有り、本測定装置の測定限界である900°C以上において更なる増加が生じる事が予想される。

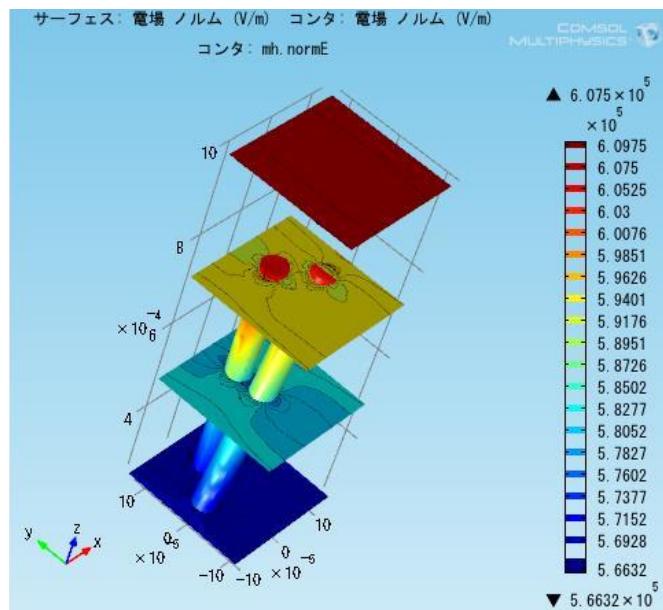
この傾向は一般に誘電損失として重要であるtan δ の温度依存性からも読み取る事が可能である。CaOは重金属酸化物ではないが、マイクロ波照射により「3.(2)：高温に於ける金属酸化物の誘電損失の非線形的な変化」において述べたような現象が生じる事が予想される。



図(2)-12: CaOの比誘電率(ϵ_r')および比誘電損率(ϵ_r'')の温度依存性

(2) 電磁界解析計算結果の概要

本解析においては、マイクロ波による誘電加熱(後述)を検討するために、電場分布の結果を主に検討する事にする。図(2)-13には、900°Cにおける誘電率の測定値を用いた電場分布解析結果を示す。z方向すなわち解析領域の上部から下部にかけて電場は弱くなっている。これは母相におけるロス(誘電損失)に依るものと考えられる。しかしながら全体として電場の変化は小さいと考えて良い。これは領域が500μm(0.5mm)程度であるためと考えられる。

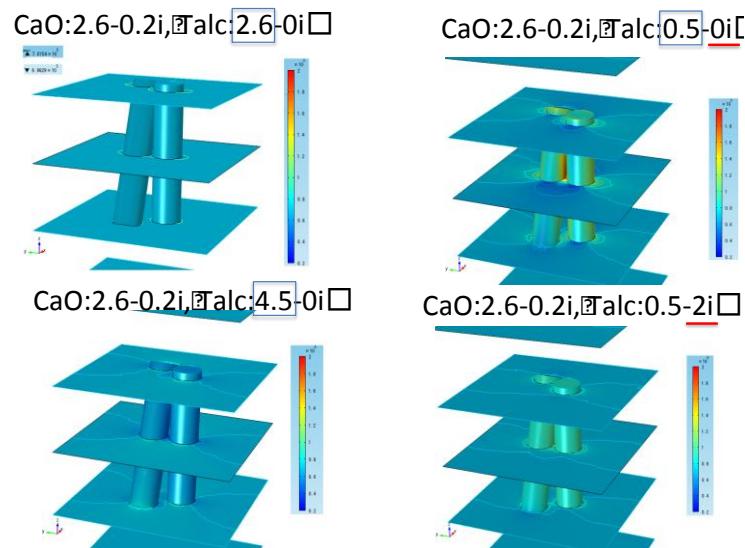


図(2)-13：電場分布解析結果(CaO:3.31-0.3i, Talc:3.6-0.02i(900°C)での計算)

ここで、次に示す2点(a)(b)について検討を行う必要がある。

a) ファイバーと母相内の電場の強さ比較について

既に述べたように、本解析対象であるファイバーと母相に於いては、誘電率が温度と共に変化し、その大小関係にも影響している。図(2)-13の結果からファイバー表面の電場を見ても、誘電率の実部(ϵ_r')の変化による影響が大きい事が分かる。また誘電率が大きい程、その中の電場は小さくなると考えられる。



図(2)-14：誘電率の実部、虚部の違いによる電場の大きさ比較

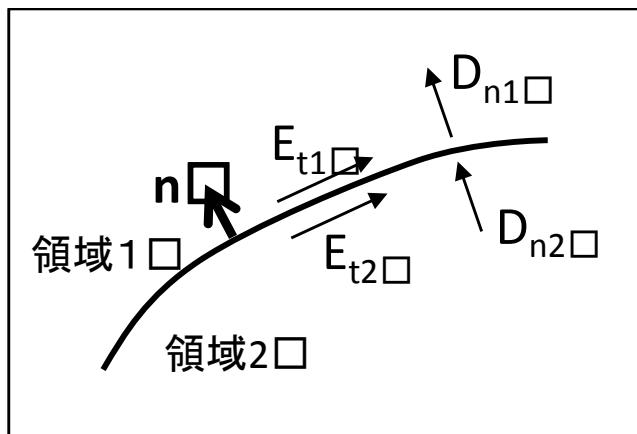
その原因に関しては、図(2)-14に示すように誘電体境界においては、電束密度の条件

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{D}_1 = \mathbf{n} \cdot \mathbf{D}_2 \quad (\varepsilon_1 \mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_1 = \varepsilon_2 \mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_2, \quad D_{n1} = D_{n2})$$

$$(\mathbf{n} \times \mathbf{E}_1 = \mathbf{n} \times \mathbf{E}_2, \quad E_{t1} = E_{t2})$$

より、誘電率(実部)の小さい相の電場は高くなり、加熱には都合が良いと考えられる。

CaOとタルクの場合、なかなかその判断が難しいのであるが、図(2)-9, 10に依れば高温(900°C)において、誘電率(ε_r')が小さく成るのはCaOであるため、CaO内の電場が高く成ると考えられる。またCaOの方が、高温で誘電損率(ε_r'')も大きく成る事から、マイクロ波加熱はCaOにおいて生じやすくなる事が予想される。

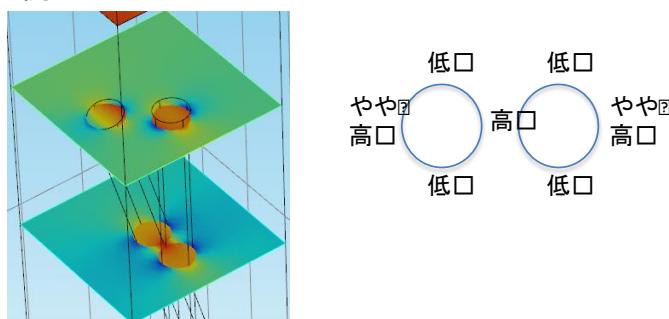


図(2)-15：誘電体境界に於ける電場、電束密度の関係

b) ファイバーにおける電場の集中について(ファイバー交差、先端の影響について)

ファイバーが交差するところで、電場の集中が生じる事が判明したが、その傾向に関して図(2)-16, 17に示す。この中で図(2)-16, 17にも示すように、特に電場集中はファイバー間隙およびファイバー周囲のCaO相において生じる可能性がある事が分かった。しかしながら本解析による電場の集中効果は、残念ながらそれほど大きいものではない。それは両相の誘電率が近い値であるためであると考えられるが、このような電場の不均一性がファイバー周囲のCaO母相中に生じる事と、CaOの誘電損率の温度依存性が大きい事から、ファイバー周囲のCaO相中にはミクロホットスポットが生じる可能性が指摘された。

例1口



図(2)-16: ファイバー交差部の電場分布(例1)

例2□ CaO:3.6-0.3i,Talc:2.9-0.02i□

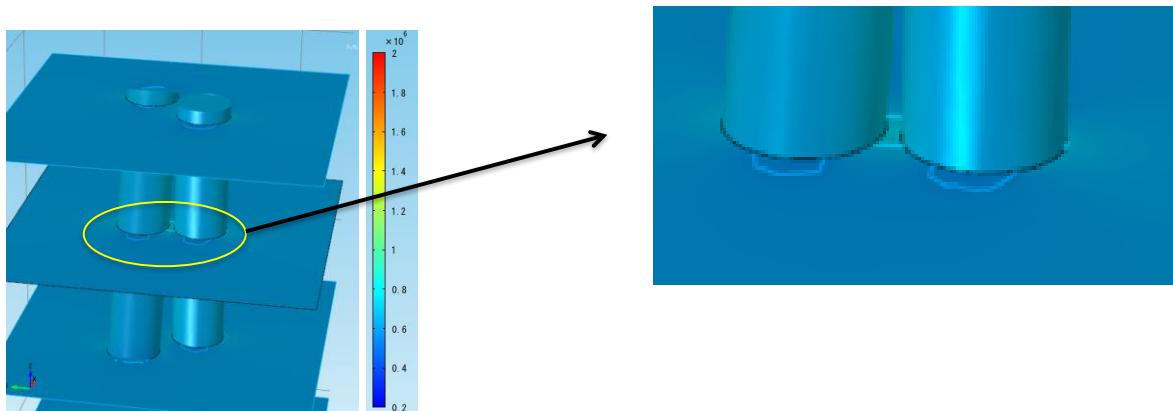
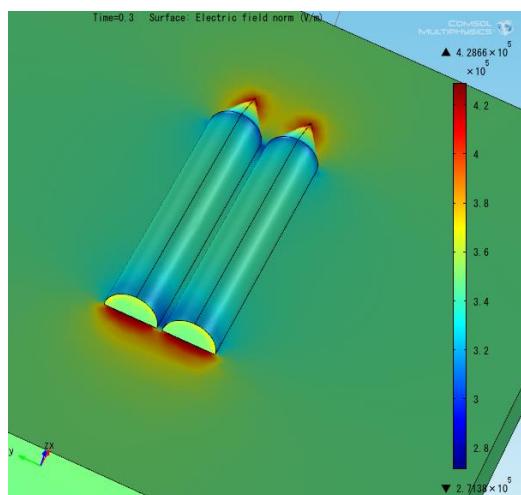


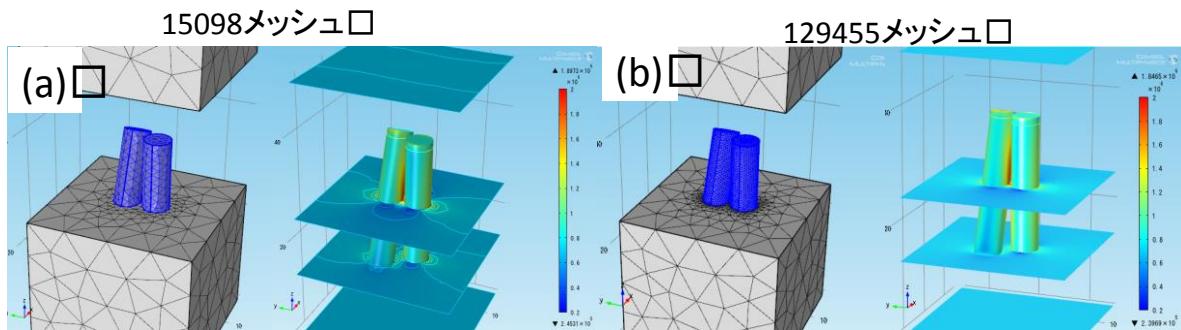
図 2-17 : ファイバー交差部電場分布(例2)

次にファイバーの先端に於ける先鋒化が電場集中に影響する可能性があり、それに関し調べた。しかしながら図(2)-18に示すように、その度合いは2倍程度にもならなかった。



図(2)-18 : ファイバー先端の先鋒化に依る電場集中の影響

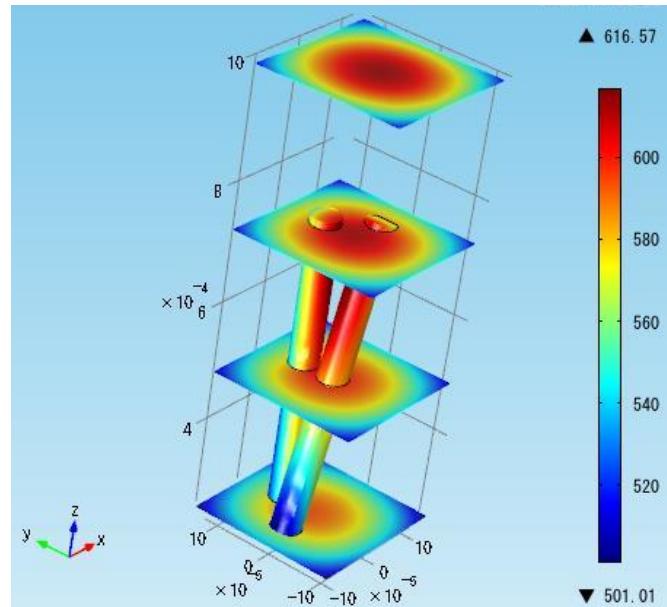
最後に、電場集中の概要が分かってもその拡大の度合いに関しては、メッシュ依存性が有る。例えば亀裂先端に於ける応力拡大を見る場合のように、メッシュが細かい程電場の値が大きく成る可能性がある。そこで電場分布与えるメッシュ数依存性に関して調べた。図2-19から分かるようにその影響は小さい事が分かった。



図（2）－19：集中電場のメッシュ数依存性

（3）マイクロ波加熱による伝熱解析

（2）において検討したファイバー近傍の電場解析結果に対し、マイクロ波印加による加熱の解析を行った。この場合ソフトウェアのRFモジュール自体が、電磁場解析と伝熱解析が連成されたものであり、ユーザーは境界条件を指定できる。解析領域の境界面には無限要素ドメインを設定し、無限遠方での温度を室温とした。この条件で図（2）－12の条件に対応する温度分布の解析結果は、図（2）－20のようになった。



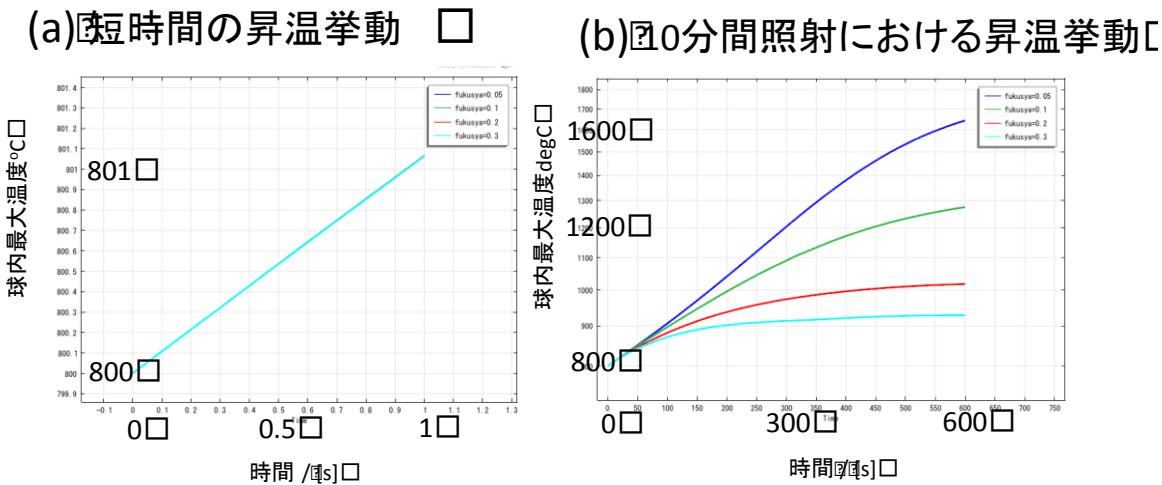
図（2）－20：ファイバー近傍の温度分布シミュレーション結果

上図より、電場の高い上面から下方に向けて、順に温度が低下している。壁面からの熱の逃げによりファイバーを含む正方形の中心部で温度が高い。これはCaOの誘電損失による発熱と電場低下に依るものであると考えられる。しかしながらこのシミュレーション結果だけからは、電場集中の可能性が指摘されるファイバー間隙において十分な温度上昇が生じることを観察する事はできなかった。すなわち電場集中による局所的な異常加熱より、母相CaOによる均一な誘電損失による加熱が支配的である事になる。これは構成相の熱拡散係数等の物性値や境界条件にも依る結果

であるが、詳しいモデルに関しては次節2-7に述べる。

(4) 解析結果と考察

2.45GHzで6kWのマイクロ波を上面から平面波条件で入力し、初期温度を800°Cとして昇温挙動を解析した結果を図(2)-22に示す。



図(2)-22：伝熱解析によるCaO球の昇温挙動解析結果

本結果に依れば、マイクロ波照射により10分間の間で、1000°C程度に昇温される事が予想される。しかしながらこのモデル解析に関しては、非常に大雑把な仮定を用いて、解析結果を得ている事に注意が必要である。少なくとも次に示す3パラメータに関しては実測が難しく、精密な数値計算には至らなかつたと言わざるを得ない。

1) マイクロ波入射電力は実証試験においては、キルン炉内に18~19kWの導入を行っているが、個々のスレート瓦片にキルン炉内でどの程度の強度で入射するかについては、炉内に於ける電磁場のマクロ的な精密解析が必要であると共に、測定値が有れば良いのであるが、これを得る事は困難であろう。

2) 火炎が存在する場合における燃焼雰囲気の伝熱係数については予想が非常に難しく、 $h^{\text{convection}}$ の値は、単なるフィッティングパラメータであるとしか言えない。

3) CaOの輻射率(ϵ)の値として、CaOは白色であるため0.1と仮定したが、この値も温度依存性があり、輻射係数と共にその境界条件に関しては不明確性が否定できない。

これらの任意性に比較すると、熱物性値(ρ , C_p , λ)の温度依存性に関して考慮していない事自体は重要性が少ないとかんじられるのであるが、今後の解析研究においては、少しづつ現実に近い精密な解析が可能となるように努力する必要があると考えられる。

(5) 総括

本研究においては、アスベスト含有スレート瓦のマイクロ波加熱による無害化について基礎的な研究を行った。現試料の分析(業者に依頼)から、試料中にはアスベスト相として主にクリソタ

イル、そしてアモーサイトも存在する事が分かった。一方母相としては、 CaCO_3 が主であり、 Ca(OH)_2 も存在している事が分かった。アスベスト相はOHを含んでいるが、これらは無害化処理温度800°C以上では分解しMg-Si-O系の複酸化物に変化しているであろうと考えられる。同様に母相である CaCO_3 も分解し、 CaO に変化していると考えられる。

実験室内で行うマイクロ波加熱に関する基礎的研究では、アスベスト含有スレート瓦片の模擬物質として、 CaO 母相中に存在するタルクという物質の加熱挙動について調べた。 CaO 、タルク粉末の複素誘電率を室温と900°C以下の高温で測定し、マイクロ波加熱挙動を検討した。この結果、両者の誘電率は室温においては同様の値であるが、温度の上昇に伴い CaO の誘電損率の増加が著しいという傾向が有る事が分かった。これは重金属酸化物においては良く観察される現象では有るが、 CaO においてもこのような傾向が有る事が判明した。

次に、電磁場/伝熱の連成解析が可能なソフトウェアを用いて数値解析を行ったが、それに依ると両相においては誘電率の実部が同様の値であるため、両相の境界において電場集中はあまり生じる事は無く、それによる局所加熱に関してもシミュレーションでは観察する事ができなかった。この点を考慮すると当初検討していたシナリオとは食い違う結果であった事になる。上に述べたように CaO の誘電損率が高温で上昇するため、アスベスト含有スレート瓦のマイクロ波加熱は主に母相である CaO 相の加熱が関係している事が予想される。また母相の誘電損率を上昇させて、マイクロ波エネルギーを有効に吸収させるには高温での予備加熱が重要である事が指摘された。このため、本プロジェクトに於いて、前段燃焼炉を設置する事は大変意義が有る事が結論づけられた。表1に示したように、今年度の分析結果より、900°C以上の処理温度においては、十分な無害化が達成できた事は、前段燃焼炉による予備加熱によって、 CaO 誘電損率を上昇させる事ができた事と関係していると考えられる。

今回のマイクロ波加熱の対象とするスレート瓦片ではマイクロ波の浸透距離は試料寸法に比較し十分大きいため、試料全体にマイクロ波が吸収される。すなわち体積加熱であると考えられる。発熱量は体積(半径の3乗)に比例するのに対し、片からの熱の逃げは表面積(半径の2乗)に比例するため、片の寸法が大きい程、マイクロ波加熱による昇温効果が高いと考えられる。このために表2に示すように、スレート瓦粉碎片が粗粒である程無害化の効果が向上したと解釈する事ができる。今回 CaO の誘電率測定は900°Cまでしか行わなかったが、これ以上の温度において誘電損率がそれ以上に上昇することが予想される。現段階の解析によると、母相との境界に於ける電場集中の度合いはそれ程著しくはないが、ファイバーと母相の境界に於いて CaO 相中にミクロ的なホットスポットを形成し、アスベストの無害化(鈍化形状への変化)に対し、何らかの影響が有りうると言う可能性は否定できない。これは今度の更なる研究が期待されるところである。本研究においてはアスベスト含有スレート瓦片のマイクロ波加熱は、専ら母相である CaO 相の加熱に依るものであるという仮定の上で、電磁場/伝熱連成解析を試みた。この中では、大雑把な仮定ではあるが、現実として可能である物性値や境界条件等を考慮する事により、本実証試験における試料の昇温挙動について解析を行ったところ、10分以内で1000°C程度に至る事ができると言う解析結果を得る事ができた。

しかしながら上述のように、この解析に於いては、試料片にロータリーキルン内において照射されるマイクロ波入射電力の見積もり、試料片からの熱の逃げを記述するために必要な火炎存在下における伝熱係数の見積もり等、現実的に予想や実験が非常に困難である要素が含まれている。

また物質の物性定数の温度依存性は誘電率のみを考慮したに過ぎないため、今後精密な解析を行うためには、これらの事象に関し一つずつ検討を重ねて行く必要があろう。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

研究提案じにおいて、マイクロ波加熱設備によるスレート瓦中のアスベスト無害化処理は新しい現象を示している。アスベストを含むスレート瓦は、その無害化に1500°Cもの高温での処理を必要とするが、本設備では950°Cでの凡そその無害化が観測されている。これは、学術的に未知とされているMicrowave Effect¹⁻³⁾と呼ばれる現象に類似しており、物性論的にも科学的発展性が予想された。実際に、アスベスト含有スレート瓦をマイクロ波で加熱するとCaOの誘電損率が高温で上昇する。アスベスト含有スレート瓦のマイクロ波加熱は主に母相であるCaO相の加熱が関係していることが予想され、計算実験において観測された。そのため、マイクロ波エネルギーを有効に吸収させるには高温での予備加熱が重要である事が指摘され、これは本プロジェクトに於いて、「前段燃焼炉を設置する事は大変意義が有る」という実験結果を裏付けることとなる。

本プロジェクトにおける当班及びシステム処理班により実証された工学的に重要な成果は、その理論的裏づけがあつてその工学応用の信頼性が向上する。当研究により得られたアスベスト無害化メカニズムの学術的解を用いれば、プロジェクトにより得られたアスベスト完全無害化をさらに高効率化、高速化することが可能となる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

「新仕分け」、(2013/ 11/ 16) 分資料 2 / 3 における行政刷新会議ワーキンググループにおいて本プロジェクトの成果が参考された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本プロジェクトでは、東日本大震災により電気・水等の基礎的な環境が破壊された地域において、アスベストを含有した有害物質を迅速に無害化し得る処理設備を建造し(80kg/hour)、この建造は凡そ10日で完了後、そのまま4ヶ月間の現地実証試験運用に耐えられることが示された。これまでアスベスト含有物質は、回収・輸送・処理の手続きを経て行われるが、これらの工程はそれぞれ複雑な行政手続き及び認可を必要とする。本設備を用いることで、これらの手続きを解消し、我が国の有事に際して迅速に復興に動くことが可能となる。この成果が我が国の環境政策へ寄与しえる可能性があることは、本研究がメディア等の高い注目度からも明らかであると考える(メディア等の発表参照)。

当研究ではこの工学的に重要な成果の学術的な裏づけをするものであり、これにより得られたアスベスト無害化メカニズムの学術的解を用いれば、プロジェクトにより得られたアスベスト完全無害化をさらに高効率化、高速化することが可能となる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 篠原真毅、佐藤元泰、堀越智、吉川昇、樋村京一郎、木嶋敬昌：マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理研究の現状、先進素材開発解析システムシンポジウム（講演）2012/11/13
- 2) N. Shinohara, N. Yoshikawa, S. Horikoshi, T. Mitani, T. Kishima, K. Kashimura and M. Sato: Applications of Microwave Powers for the Rubble Processing to the Great East Japan Earthquake – Test System for Rendering Asbestos Harmless in the Crashed Slate, proceeding of 2th GCMEA (2012)

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 篠原真毅、樋村京一郎、佐藤元泰、吉川昇、堀越智、米田沙織、木嶋敬昌：アスベストのマイクロ波及び高温集塵による無害化処理技術、粉体工学会秋期研究発表会, 2013/10/8 (インデックス大阪)
- 2) 樋村京一郎、篠原真毅、吉川昇、堀越智、佐藤元泰：震災瓦礫に含まれる有害物質の高速無害化システム実証試験、鉄鋼協会秋季講演大会, 金沢大, 2013/9/19
- 3) 佐藤元泰、樋村京一郎、篠原真毅、東北大 吉川昇、堀越智:マイクロ波による東日本震災瓦礫中の有害物質迅速処理－アスベスト飛散とダイオキシン発生防止－, JSEM実験学会, 秋田大, 2013/8/30
- 4) 樋村京一郎：東日本大震災より生じた震災廃棄物の有機的処理に関する予告フォーラム, 鉄鋼協会春季講演大会, 電通大, 2013/3/29
- 5) 篠原真毅、佐藤元泰、堀越智、吉川昇、樋村京一郎、木嶋敬昌：マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理研究の現状、先進素材開発解析システム(ADAM)シンポジウム（講演）
2012/11/13

(3) 出願特許

「特に記載すべき事項はない。」

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理装置の見学会」(2013/3/35) 16名
- 2) 「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理装置の研究開発」(2012/6/26) 8名
「被災地瓦礫処理場見学・勉強会」(同日) 7名

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 週刊環境循環新聞: 「震災廃棄物をマイクロ波処理」 (平成25年 3月11日)
- 2) 日本テレビ: 「震災から2年、がれき処理の現状（ズームイン！！サタデー）」, (平成25年3

月1日)

- 3) 日刊工業新聞:「震災がれき処理にマイクロ波が一役—非飛散性アスベストの無害化コスト半減」(平成25年2月14日掲載)
*朝日新聞デジタル: 同研究にて同日掲載
- 4) NHK サイエンスゼロ: 「電子レンジで鉄が作れる! ? 未知のマイクロ波効果を活用せよ」
(平成25年1月23日放送)
- 5) FNS 仙台:「がれきのアスベストを無害化 研究進む」, ニュース (平成25年12月20日)

(6) その他

「特に記載すべき事項はない。」

8. 引用文献

- 1) R. Roy, D. Agrawal et al.: Nature, 399 (1999) 668
- 2) K. Kashimura et al.: Journal of Applied Physics, Vol. 112, 3 (2012) 034905 - 1 - 5
- 3) J. Fukushima et al.: Materials Chemistry and Physics, Vol. 131 (2011) 178-183

(3) 生態毒性物質および環境汚染物質の評価・解析

上智大学 物質生命理工学

堀越智

平成24～25年度累計予算額：5,616千円（うち、平成25年度予算額：866千円）
予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

クリソライト（代表的なアスベストの一種）はマイクロ波で加熱すると1050°Cで無害化出来る。この現象を利用し、マイクロ波-燃焼ハイブリッド加熱炉による、東日本大震災で生じたアスベスト含有瓦礫の無害化・再資源化処理の試作機を開発した。熱源として利用する木材としては、同じく震災で生じた津波堆積物を用いた。現地には再利用不可能な木質系廃棄物が大量に存在するため、これを燃料としてセメントを600°Cまで予熱した。この予熱炉をマイクロ波炉の前段にカスクエードを接続し、一連の工程で、セメントが1050°C以上に加熱され、アスベストが無害化すると共に、マイクロ波の電磁界および高温のセメントとの接触によって、ダイオキシンが分解される。この分解方法は日本スピンドルによって開発され、完成された技術である。さらに、排ガスに高性能集塵機・2次燃焼器を接続し、有害成分を大気中に排出しない二重の安全対策を施すものである。

マイクロ波加熱炉を用いることで、この瓦礫中のアスベスト含有セメント無害化処理、再利用不可能な高濃度塩分含有木質系廃材の無害燃焼による迅速減容処理を提案する。本サブテーマでは、アスベスト含有スレート瓦のマイクロ波無害化に対するダイオキシン類の生成確認を行った。本装置では、復興瓦礫の中でも木材の燃焼処理も併用している。そのため、ここからのダイオキシン類の生成も予想され、飛灰中のアスベスストリスクも評価せねばならない。本テーマでは、これら有機系有害物質の評価を行い、同装置の安全性を実証した。また、アスベスト-マイクロ波相互作用を明らかにするために、同組織のマイクロ波変性を実験的・理論的なアプローチにより明らかにした。

[キーワード]

アスベスト、有機系有害物質、現地装置無害化リスク評価、

1. はじめに

東日本大震災における津波によって倒壊し流された瓦礫には、法令で規定された有害物質が、混入していることは各種の調査で判明している。アスベスト粉塵による健康被害は遅発性であり、吸引後、10年以上経過して、発症することが多い。阪神淡路大震災から13年後、倒壊した建物の解体作業に従事した労働者が、2008年にアスベスト（石綿）が原因の中皮腫を発症し、労災認定を受けている。さらに2012年には、救援に従事したボランティアから、中皮腫を発症された方が出てきている。長期の復興体制に移行している現時点では、作業者が大量のアスベスト粉塵を吸引する危険は無いと考えられるが、大量の瓦礫は地盤の埋め立て嵩上げに使用される。その中にアスベスト含有のスレート等が混入していると、後世まで汚染土壤の不安を残すことになる。埋め立てに先立ち、アスベスト含有スレートを選別し、無害化処理を施すことは、必要不可欠である。このアスベスト無害化には、高温加熱して組織構造を変える必要があるが、アスベストを含むスレート瓦は断熱性、耐熱性が高く熱伝導率が小さいため、外部からの加熱では、塊を均一に加熱処理するには長い時間が必要であった。そのため、従来法では震災起因のコンクリート材（想定値：200万トン）に含まれる有害物質無害化は困難であり、これを埋め立てし、封じ込める事をもってその処理としている。これは非飛散性アスベスト処理手法としては、現状では、最も現実的で効率的な手続きではあるが、可能であれば、これらを無害化した後、埋め立て用資材に用いることが望まれる。

本プロジェクトでは、アスベスト含有スレート瓦のマイクロ波無害化に対するダイオキシン類の生成確認を提案している。本装置では、復興瓦礫の中でも木材の燃焼処理も併用しているが、そのため、ここからのダイオキシン類の生成も予想され、飛灰中のアスベスリスクも評価せねばならない。本テーマでは、これら有機系有害物質の評価を行い、本装置のリスク評価を行った。また、アスベスト-マイクロ波相互作用を明らかにするために、同組織のマイクロ波変性を実験的・理論的なアプローチにより明らかにした。

2. 研究開発目的

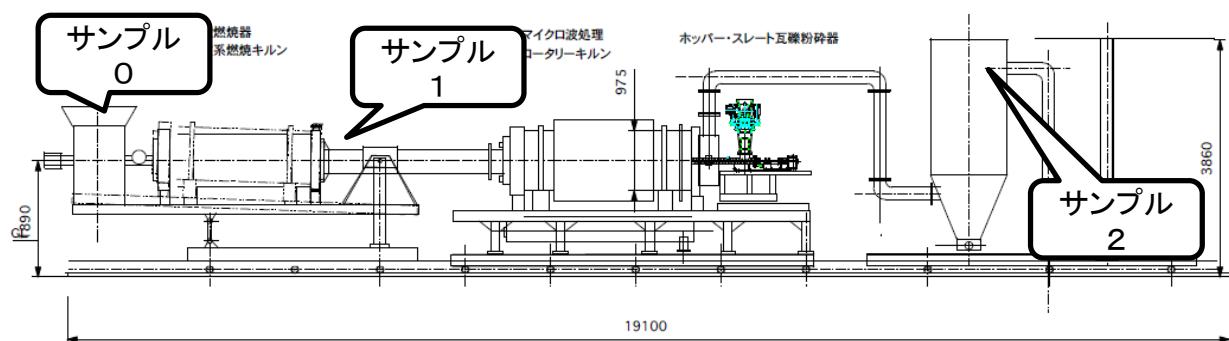
本テーマは大別すると以下の3点を担当している。

- 1) 現地実証試験における有害物質のリスク評価と実証試験へのフィードバック
- 2) 現地実証試験における有機系有害物質の解析
- 3) アスベスト無害化のメカニズム解明へ向けた実験的アプローチ

「1. 現地実証試験における有害物質のリスク評価と実証試験へのフィードバック」についてはサブテーマ1において既に報告されたので、本報告書では「2. 現地実証試験における有機系有害物質の解析」、「アスベスト無害化のメカニズム解明へ向けた実験的アプローチ」について述べる。マイクロ波プロセッシングにおいては、単純に発熱による効果の他に熱的現象では説明できない”非熱的効果”が存在すると言われ、これに関する検討が長年行われてきた。本研究に於いても、このような効果を期待したのであるが、過去の研究においては、その原因や機構に関しては現在も十分に解明されているとは言い難い。本テーマでは環境化学、フォトケミストリーの観点からこの”非熱的効果”を本実験系において探索し、この学術的メカニズムを明らかにすることである。

3. 研究開発方法

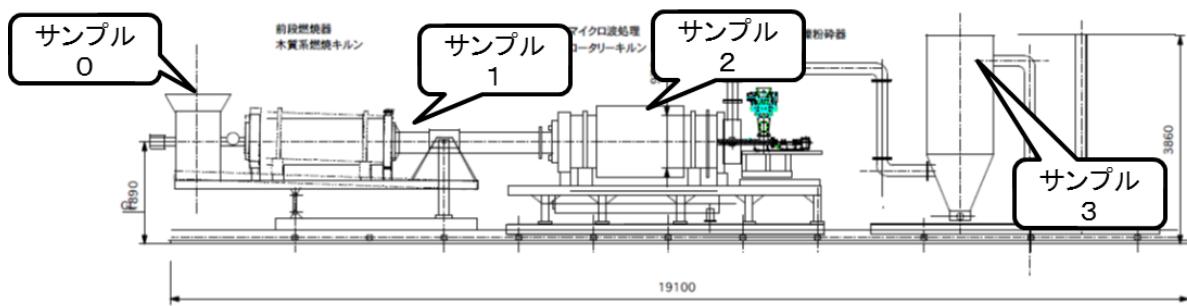
本担当では、アスベスト含有スレート瓦のマイクロ波無害化に対するダイオキシン類の生成確認を行った。本装置では、復興瓦礫の中でも木材の燃焼処理も併用しているため、ここからのアスベストの生成も予想された。ダイオキシン類のサンプルは図(3)-1に示す装置内の各位置で固体サンプルを採取し、(株)環境ソルテックおよび(株)日吉に分析を依頼した。サンプル0では、未処理の木材瓦礫をサンプルとした。サンプル1では燃焼後に発生した飛灰をサンプルとした。サンプル2では木材燃焼およびアスベストの無害化により発生した高温ガスおよび飛灰をろ過するための高温フィルターに付着した粉末をサンプルとした。サンプルは11月および12月に行った実験終了後、装置が完全に冷却されたことを確認して採取した。また、12月のサンプリングではフィルターの交換等は行わず、実験期間の蓄積した灰の測定を行った。



図(3)-1 ダイオキシン類の測定に対するサンプリングポイント

(1) 含有有機物の成分確認実験

ガスクロマトグラフ質量分析（島津製GCMS—QP2010SE）を用いて、図(3)-2に示したサンプルポイントにおける含有有機物の成分確認実験を行った。サンプルの抽出溶媒として1-プロパノールまたはトルエンを使用した。



図(3)-2 無害化によって発生した有機物の分析を行ったサンプリングポイント

(2) アスベスト無害化における無害化メカニズムの解明

東日本大震災で発生した津波により、発生した瓦礫中に含まれているスレート瓦を試料として用いた（図(3)-3）。スレート瓦の厚さが0.5cmで繊維状の物質が表面に露出していることが目視か

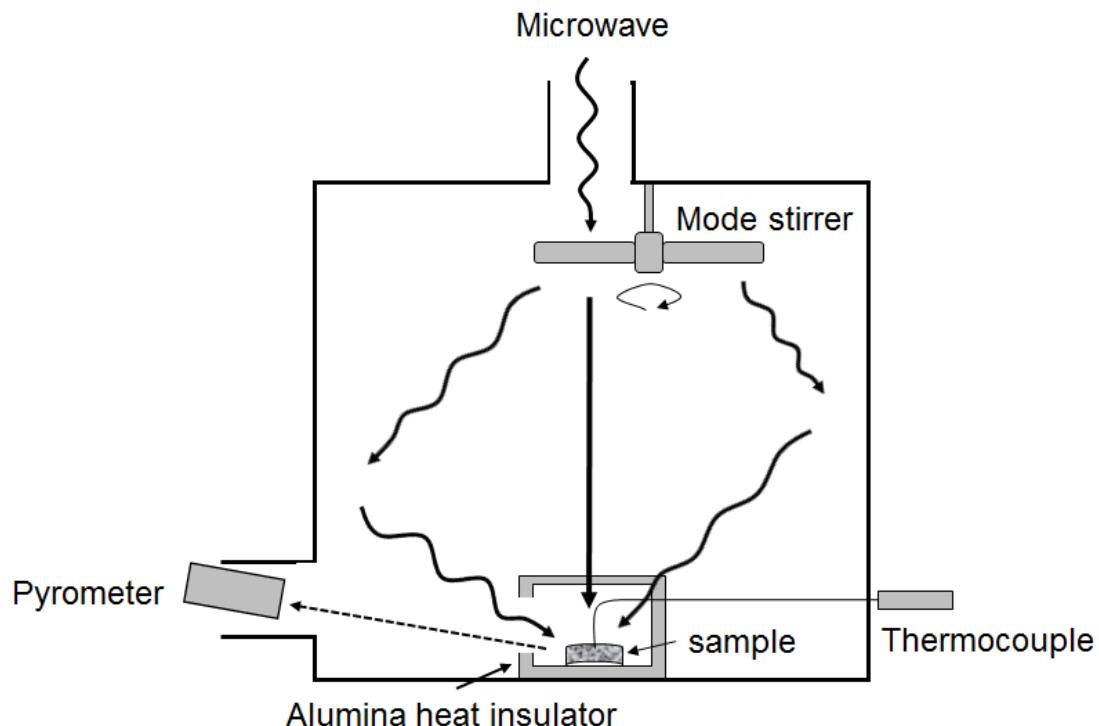
らも確認できた。またこのサンプルは東日本大震災で発生した瓦礫であるため、建材用に使われているスレート瓦とは異なり、泥や海水中の無機塩を大量に含んでいると考えられる。スレート瓦のサイズは数cm程度のブロックでそのサイズは一定ではないが、実験には極力大きさを揃えたスレート瓦を使用した。スレート瓦はセメントとアスベストの合成物であり、主成分はCaO、SiO₂、Al₂O、Fe₂O、MgOである。



図(3)-3 試料で用いたアスベスト含有スレート瓦

マイクロ波照射装置はモードスターラーを備えたマルチモード型キャビティを用い、試料の温度測定は、ハステロイ製の熱電対(チノー製)およびサーモグラフィー(日本アビオニクス製)を用いて測定した(図(3)-4)。熱電対は、スレート瓦に2 mmの穴をあけて、熱電対の先端を導入設置した。予備試験で、マイクロ波が放射を止めても、試料の温度変化がほとんど起きないことから、マイクロ波による熱電対の誤作動が進行していないことを確認している。一方、試料はアルミナ(Al₂O₃)断熱材内部に設置し、側面に開けた穴から内部の試料の表面温度をサーモグラフィーで観測した。スレート瓦の平均サイズは0.5×3.0×3.0cmを用いた。初期実験において、熱電対とサーモグラフィーの間の温度の差は、5°C未満であり、これらに差がないことが示された。比較実験として電気炉(いすゞVTDSモデル)を使用した加熱実験も行った。

各分析として、アスベスト含有スレート瓦の温度特性の評価は熱重量測定(TG)および示差熱分析(DTA)をRigaku Thermo TG8120を使用した。マイクロ波無害化によるクリソタイル結晶のピークの変化をRigakuのX線回折計(RINT-2000)で分析した。スレート瓦の形状変化は、日立SU8000走査電子顕微鏡法(SEM)を使用して観察した。SEM測定には、無害化後のスレート瓦を碎いて内部の状態を評価した。アスベストの残存評価としてJIS A 1481で指定されている位相差顕微鏡は(株)島津製作所テクノリサーチに分析を依頼した。



図(3)-4 スレート瓦のマイクロ波無害化装置のイメージ図

4. 結果及び考察

(1) 燃焼灰の分析

分析結果からサンプル0およびサンプル1付近のダイオキシン類の生成は認められなかった。一方、サンプル2付近の最も高濃度に蓄積していると思われるダイオキシン測定より、ダイオキシン類(毒性等量)がガスから $0.70 \text{ ng-TEQ m}^{-3}\text{N}$ 、灰から $0.15 \text{ ng-TEQ g}^{-1}$ 検出された(図(3)-5)。

項目	試料名	2次燃焼炉出口 排ガス	計量方法	
ダイオキシン類(毒性等量)	ng-TEQ/m ³ N	0.70	JIS K 0311(2008)	
項目	試料	サイクロン灰	キルン炉 堆積物	計量方法
ダイオキシン類(毒性等量)	ng-TEQ/g	0.15	0.000000066	JIS K 0311(2008)

図(3)-5 サンプル2より採取したガスおよび灰の中のダイオキシン量((株)環境ソルテックによる分析)

環境省のホームページより、廃棄物焼却炉として2トン/時間未満の場合、排ガスでは2 ng-TEQ $m^{-3}N$ で灰からは3 ng-TEQ g^{-1} に定められている(図(3)-6)。したがって、本装置の運転により、発生するダイオキシン類は基準値を下回った。

① 排出ガスの基準値(規制対象となる廃棄物焼却炉に係る廃ガス)(法第8条第2項第1号, 法施行規則第1条別表第1)

焼却能力	新設施設の 排出基準 平成12年1月15日~	既設施設の排出基準	
		~平成14年11月30日	平成14年12月1日~
4 t / 時間 以上	0.1 ナノグラム/ m^3N		1 ナノグラム/ m^3N
2 t ~ 4 t / 時間	1 ナノグラム/ m^3N	80 ナノグラム/ m^3N	5 ナノグラム/ m^3N
2 t / 時間 未満	5 ナノグラム/ m^3N		10 ナノグラム/ m^3N

ナノグラム (n g)

= 10億分の1グラム

m^3N (ノルマル立方メートル)

= 標準状態のガス量

※新設施設:H12.1.15

以降に新設された
施設

※既存施設:H12.1.15

時点で既に設置さ
れている施設

③ ばいじん等の基準値(廃棄物焼却炉から排出されるばいじん、焼却灰その他の燃え殻、廃ガス洗浄施設汚泥及びこれらの廃棄物を処分するために処理したもの)(法第24条, H12.1.14厚生省令第1号)

新設施設に係る基準	既設施設に係る基準	
平成12年1月15日~	~平成14年11月30日	平成14年12月1日~
3ナノグラム/g	基準の適用猶予	3ナノグラム/g (注)

図(3)-6 新設廃棄物焼却炉におけるダイオキシン類の発生規制値(環境省:ダイオキシン類対策特別措置法に基づく規制(B)より抜粋)

その後、アスベスト含有スレート瓦や木材瓦礫の無害化および燃焼処理実験を繰り返した後、12月および1月にサンプル2の位置の灰中に含まれるダイオキシン類の測定を行った。12月の測定結果からは、業者を(株)日吉に変え分析を依頼した。サンプル2付近の最も高濃度に蓄積していると思われるサンプルより、灰の中のダイオキシン類(毒性等量)は0.78 ng-TEQ $m^{-3}N$ であり、この実験からも基準値を下回る値しか観測されなかった(図(3)-7)。

項目	実測濃度	試料における定量下限値	試料における検出下限値	測定量 (毒性等量)
	ng/g	ng/g	ng/g	ng-TEQ/g
Total ダイオキシン類 (PCDDs + PCDFs + コブラナ-PCBs)	2.4	0.0030	0.0015	0.78

図(3)-7 サンプル2より採取したガスおよび灰の中のダイオキシン量(株) 日吉による分析)

本実験結果より、本装置でのアスベスト含有スレート瓦や木材瓦礫の処理によってダイオキシン類の発生量は基準値以下であることが示された。

(2) 実証試験ガス分析

サンプリングポイント0、1、3の分析結果から、2-propenoic acid tridecyl ester(図 (3) -8)、13-octadecenamide(図 (3) -9)、benzyl alcohol(図 (3) -10)、tetralin(図 (3) -11)、4-methyl-biphenyl(図 (3) -12)が主な有機物として検出された(構造検索は島津製作所製のNISTライブラリーを用いた)。長鎖アルキル化合物は、木材廃棄物の燃焼によって生成したと考えられる。一方、本装置では、木材瓦礫の処理を行う際に、灯油を助燃材として投入していることから、方向感化合物が生成したと考えられる。しかし、いずれの化合物についても、生成量はごく微量であり、毒性は低くないことから、人体に対しては無害であると考えられる。また、ハロゲン化物の検出はGC-MS測定からは観測されなかった。

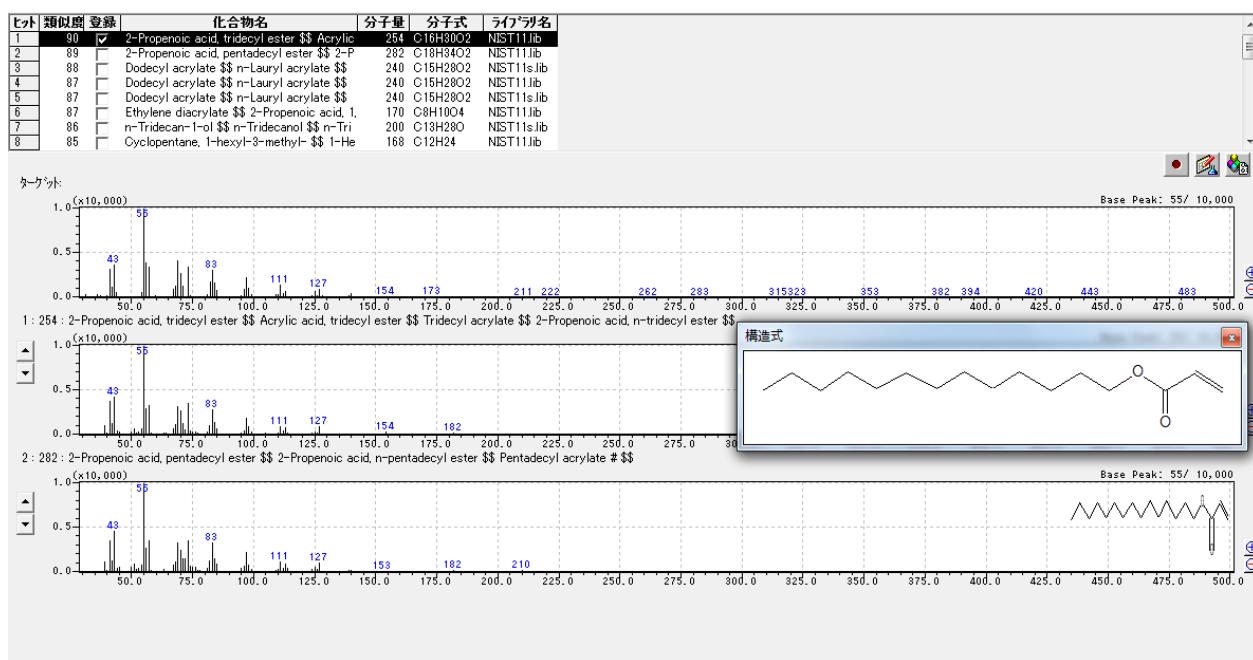
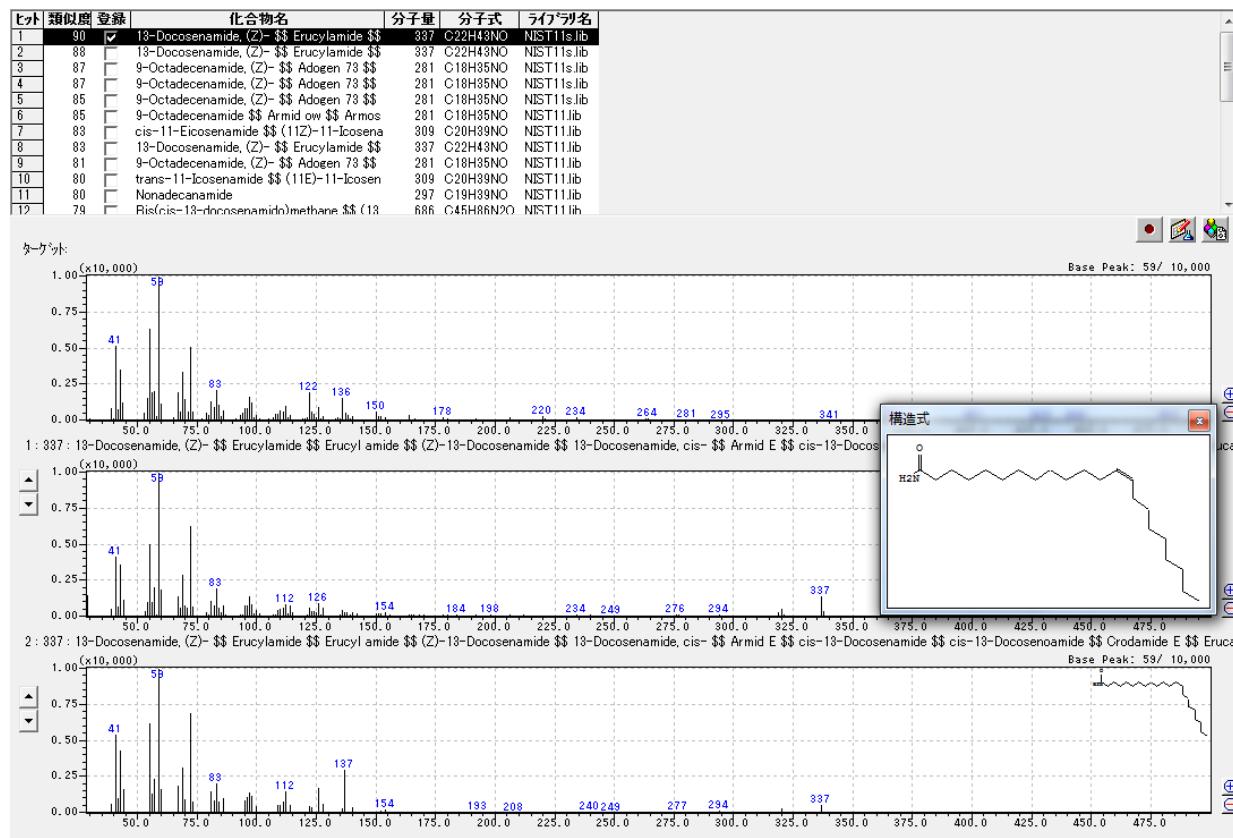
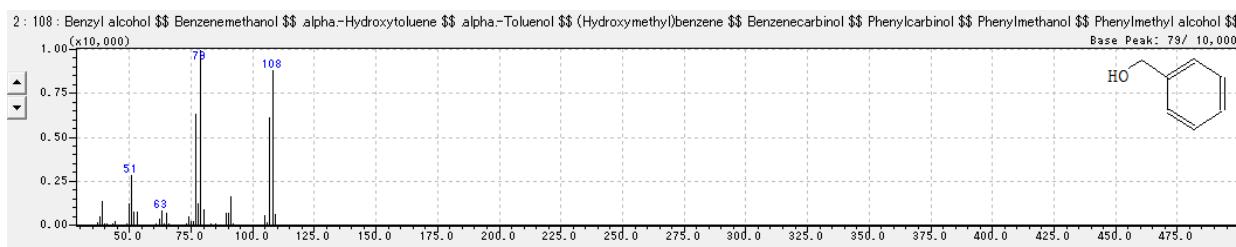


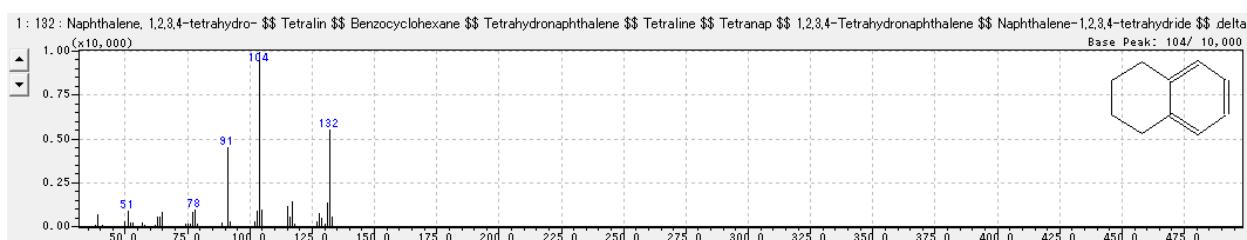
図 (3) -8 GC-MS分析とライブラリー検索による2-propenoic acid tridecyl esterの同定



図（3）-9 GC-MS分析とライブラリー検索による13-octadecenamideの同定



図（3）-10 GC-MS分析とライブラリー検索によるBenzyl alcoholの同定



図（3）-11 GC-MS分析とライブラリー検索によるTetralinの同定

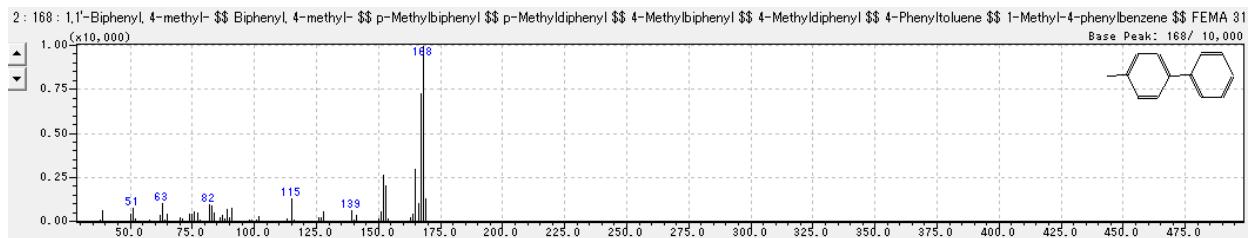
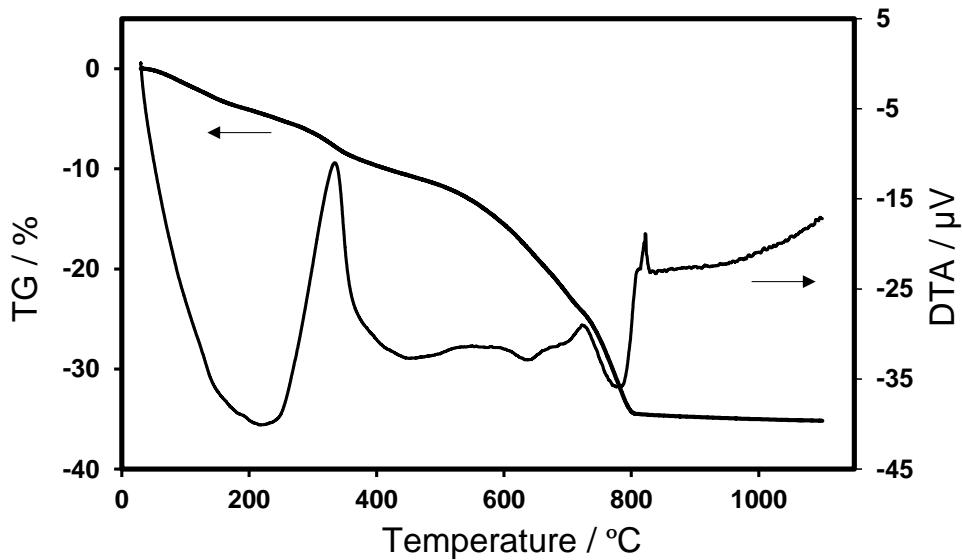
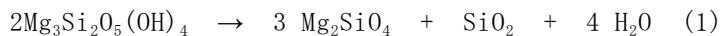


図 (3) -12 GC-MS分析とライブラリー検索による4-methyl-biphenylの同定

(3) アスベスト無害化における無害化メカニズムの解明

TGおよびDTA分析の結果を図 (3) -13に示す。市販亭は空気中で 1 K min^{-1} の昇温速度で行った。DTA曲線において、334°Cの吸熱ピークが観測され、これはスレート瓦に含まれる有機物の分解ピークである。また、633°C付近に観測されているブロードな吸熱ピークはOHグループの分解に起因している。823°Cに観測されるピークはアスベスト(クリソタイル)のピークと考えられる。したがって、スレート瓦に含まれるクリソタイルは、加熱温度800~850°C付近で変化すると予想できる。一方、TG曲線から、600~800°Cで急激な減少が観察された。これは式1に示すようにアスベストの還脱OHが進んだためと考えられる。

図 (3) -13 廃棄物スレート瓦のTGおよびDTA曲線(空気中での 1 K min^{-1} の昇温)

スレート瓦に含まれるアスベストの無害化実験について述べる。DTAの結果からスレート瓦に含まれるアスベストは800°C以上で変化するため、無害化実験は800°Cから50°C刻みで温度に対して検討した。また、電気炉においても同じ温度条件で行った。マイクロ波法では800°Cの条件を達成するために1325Wの連続照射を行った。一方、900°Cに達成させるため1486Wのマイクロ波入射電力を使用した。さらにマイクロ波出力を増加させ、より高い温度を達成させた。たとえば、図 (3)

-14には900°C条件に対するマイクロ波法および電気炉法における温度変化を示す。マイクロ波法による昇温速度は平均で $87\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ であった。一方、電気炉ではるつぼに入れたスレート瓦を $35\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ の昇温速度で加熱を行った。電気炉では目的温度に到達してから5分間温度を保持した後自然冷却を行った。昇温速度の点からはマイクロ波法が電気炉法に比べて2.5倍高い値を示しているが、800°C以上の保持時間は電気炉法のほうが明らかに有利である。したがって、電気炉法に比べマイクロ波法は加熱時間が非常に不利な条件で、アスペストの無害化評価を比較検討した。

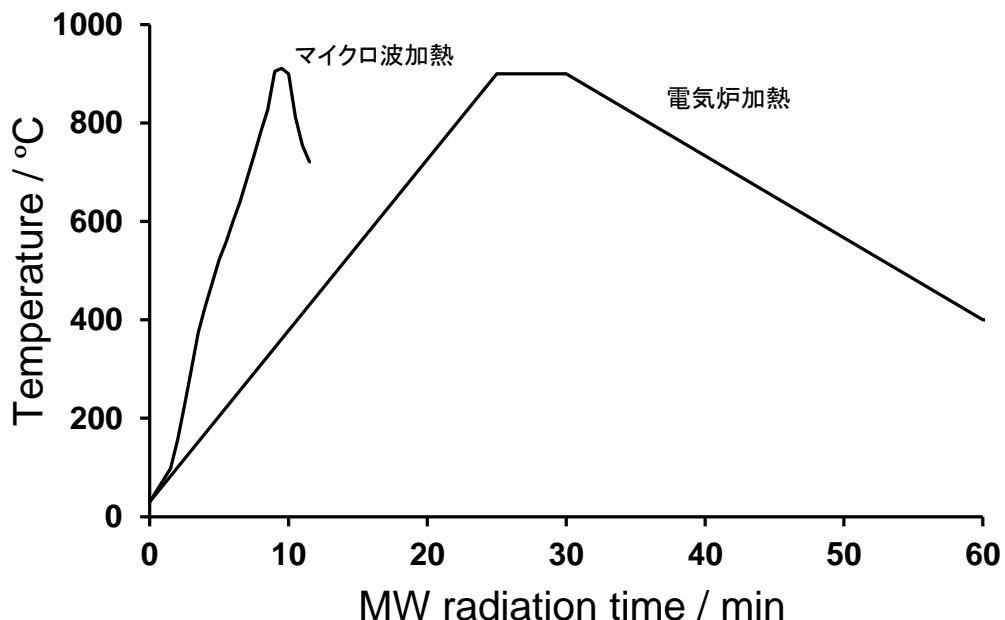
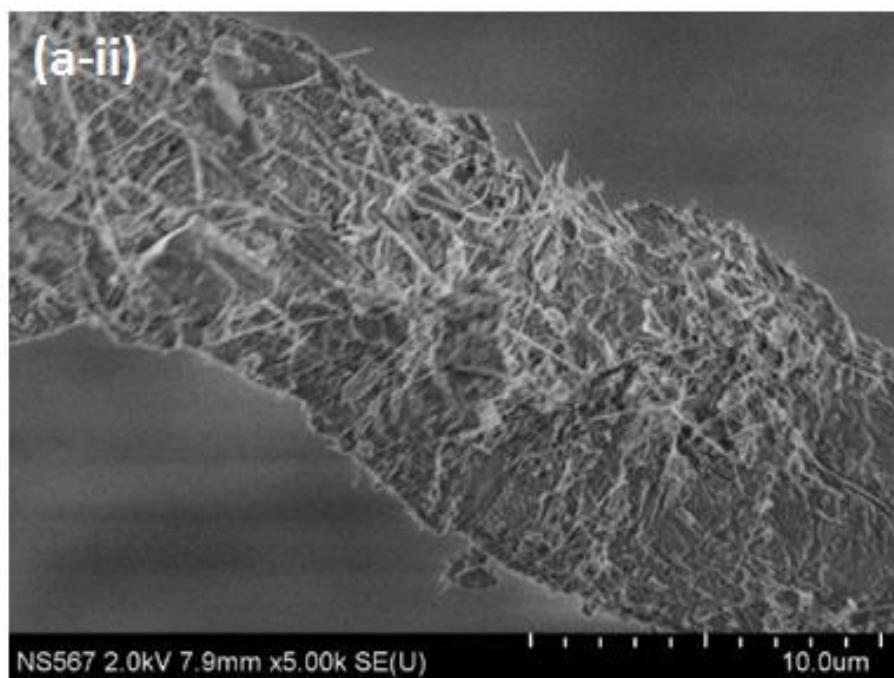
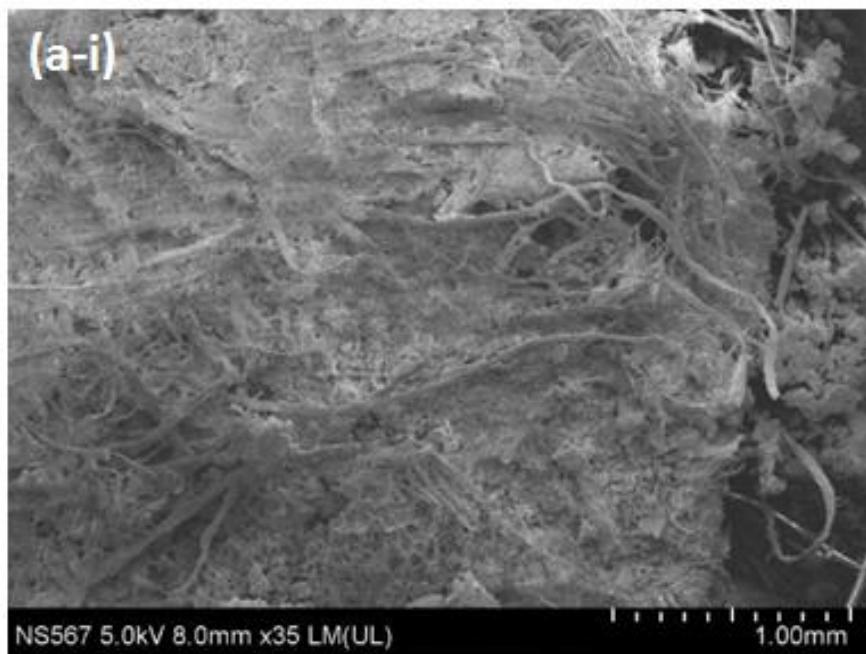
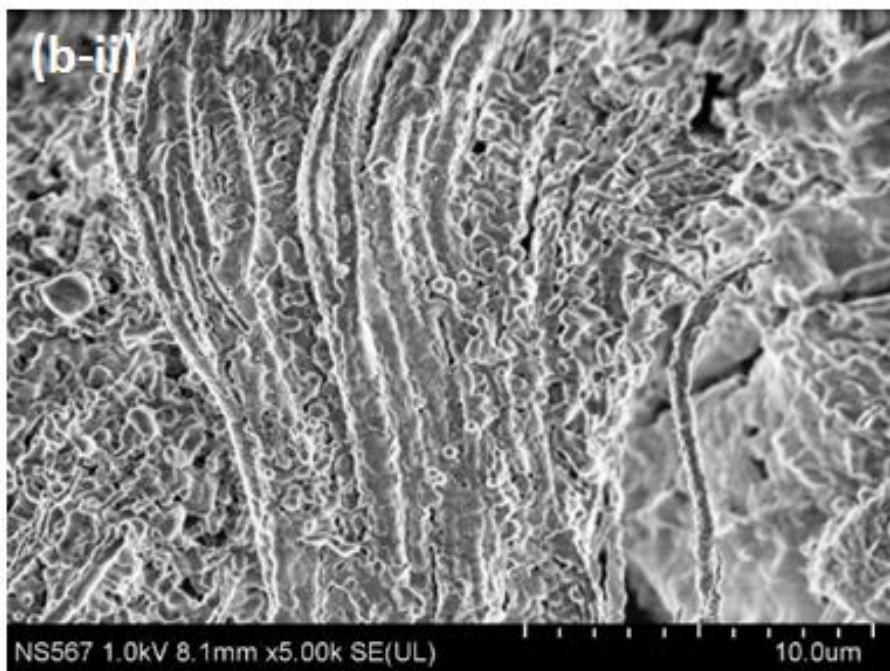
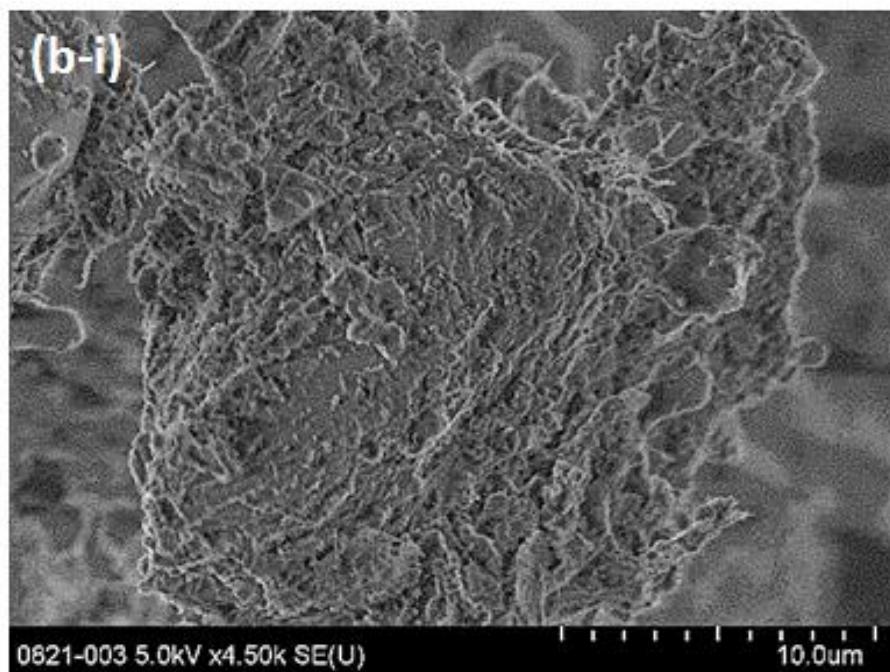
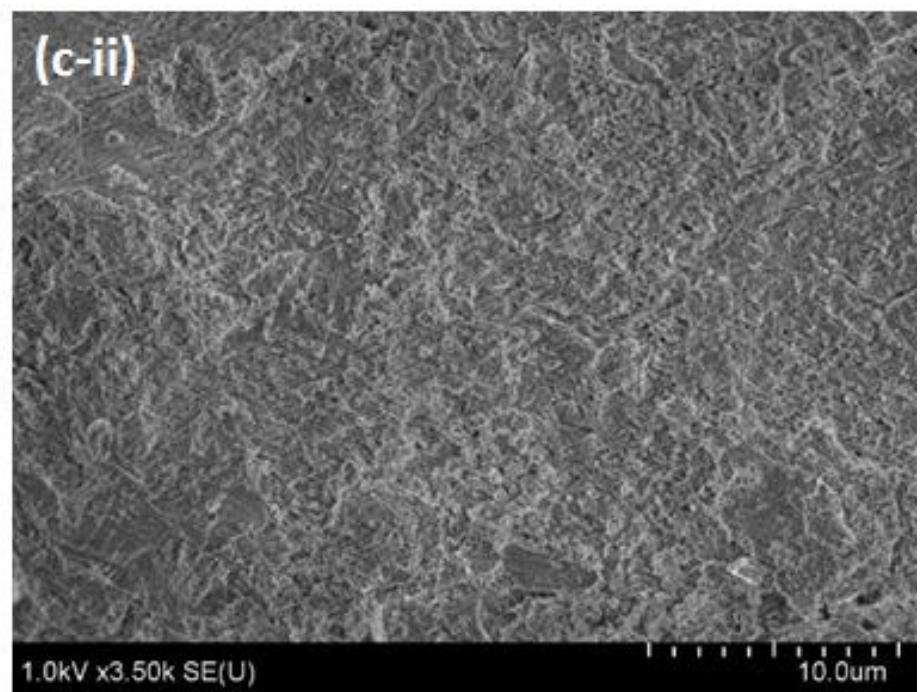
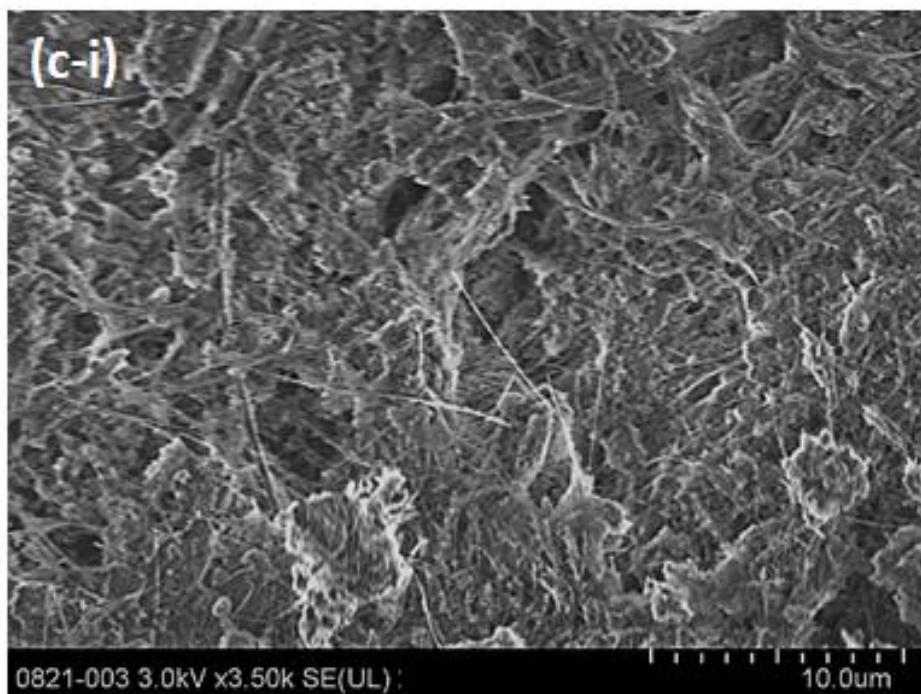


図 (3) -14 マイクロ波法および電気炉法によるアスペスト含有スレート瓦無害化実験(900°C)における昇温変化

無害化前のスレート瓦のSEM像を図3-15aに示す。35倍の拡大では纖維状の構造がバインダーによって硬化されている状態が観察できる(図 (3) -15a-i)。一方、5000倍のSEM像から、纖維状の構造表面にアスペストの針状構造が多数観測される(図 (3) -15a-ii)。マイクロ波法を用いたアスペストの処理による構造変化を図3-15bに示す。加熱温度が800°Cの条件で処理したスレート瓦から、大量に存在していたアスペスト針状構造は確認されなかった(図 (3) -15b-i)。同様に、900°Cで処理した場合ではスレート瓦が溶融固化したSEM像が観測された(図 (3) -15b-ii)。一方、電気炉によるスレート瓦の加熱では、800°Cの加熱において十分に針状アスペストの溶解無害化が進まず、多数存在していることがSEM像から観察できた(図 (3) -15c-i)。この状況は900°Cによる加熱でも同様であり、マイクロ波法と同じ温度条件でもアスペストの無害化を完全に行うことができないことが分かった(図 (3) -15c-ii)。電気炉法で1000°Cに加熱温度を向上させると、マイクロ波法同様にスレート瓦の溶解固化が進行し、全体にアスペストの存在が観察されなかった(図 (3) -15c-iii)。したがって、マイクロ波法では900°Cの加熱でアスペストの無害化が進み、電気炉法では1000°Cの処理が必要であることが分かった。







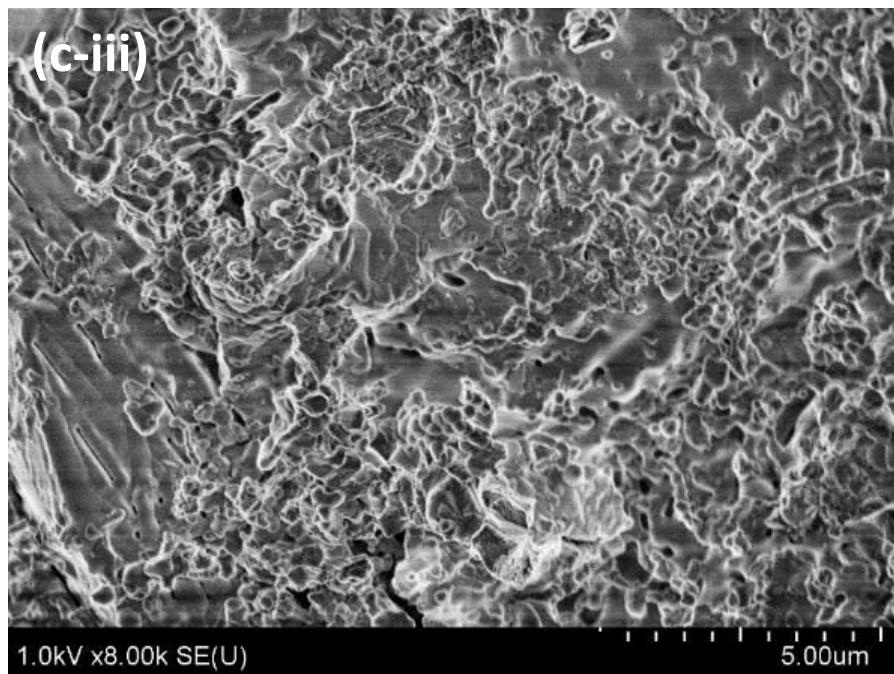
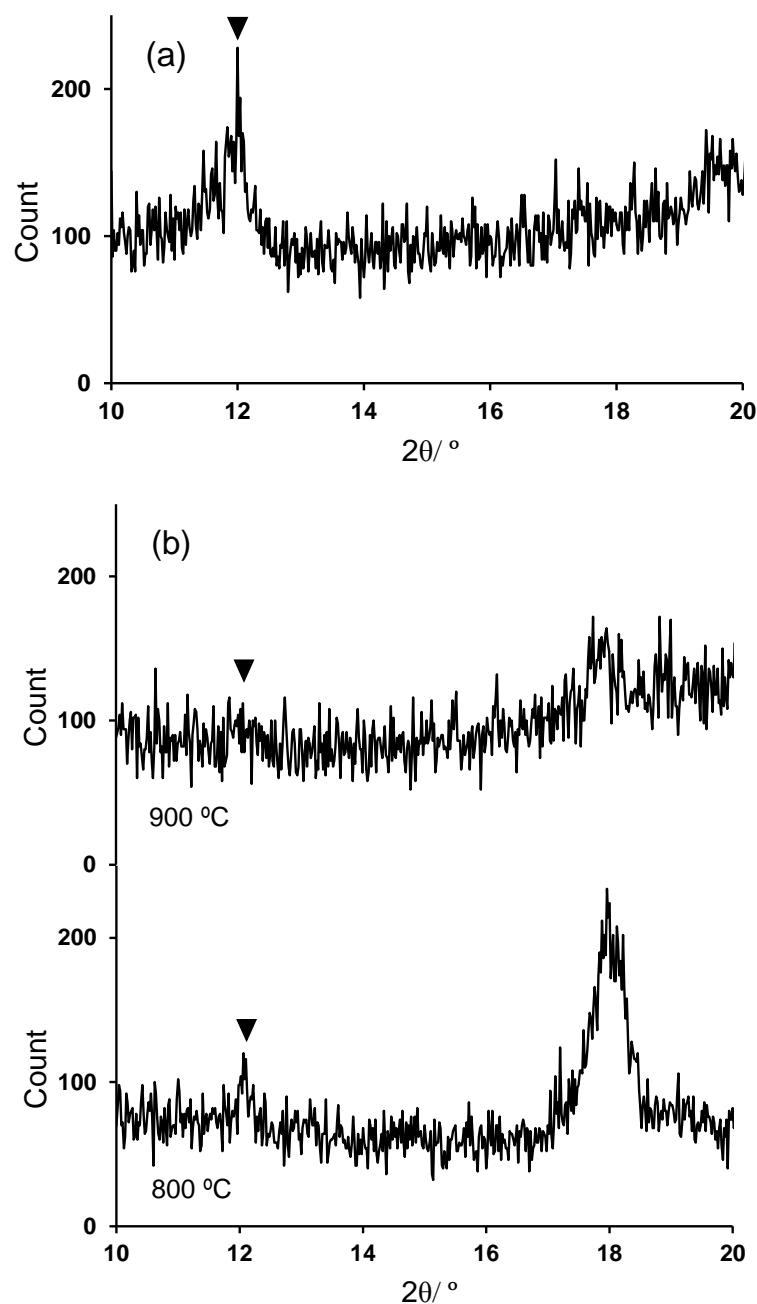
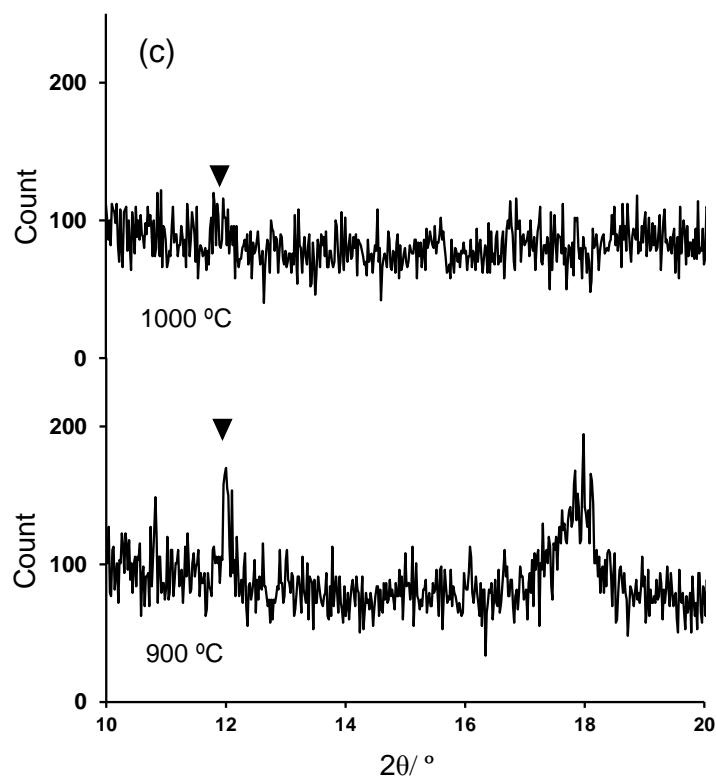


図 (3) -15 マイクロ波法および電気炉法によって無害化したアスベスト含有スレート瓦のSEM像、(a) 未無害化試料、(b-i) マイクロ波処理(800°C)、(b-ii) マイクロ波処理(900°C)、(c-i) 電気炉法(800°C)、(c-ii) 電気炉法(900°C)、(c-iii) 電気炉法(1000°C)

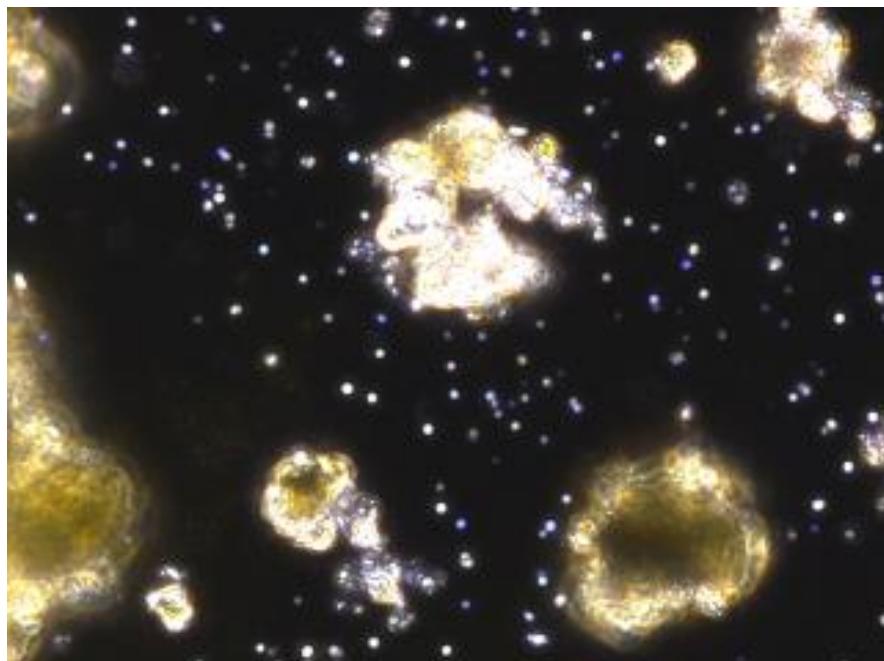
スレート瓦の無害化に対するXRD回折スペクトルを図 (3) -16に示す。アスベスト(クリソタイル)の 2θ のピークは、約12°に観測された。マイクロ波法により無害化処理をされたスレート瓦には800°Cの加熱処理でピークの高さが著しく低下し、900°Cでは消失した。しかし、900°Cで電気炉法による無害化を行った試料から、クリソタイル由来のピークが観測された。さらに1000°Cに試料を加熱すると、クリソタイル由来のピークが消失した。SEM像の結果同様に、マイクロ波法は電気炉法に比べ温度条件で不利であったが、温度が100°C低温である900°Cで無害化を行うことができた。





図(3)-16 スペスト含有スレート瓦のXRD回折スペクトル(a)未無害化試料、(b)マイクロ波法(800°C 、 900°C)、(c)電気炉法(900°C 、 1000°C)

SEMやX線回折の結果を受けて、 900°C でマイクロ波加熱を行った試料の、JIS A 1481に則った位相差顕微鏡による測定を行った。 900°C でマイクロ波加熱を行った試料からはクリソタイル由来の染色物は観察されなかった。この評価は、(株)島津製作所テクノリサーチによって行われ、3000本の纖維の中でクリソタイルは0本であった(図(3)-17)。



測定分析結果報告書					
				発行番号: RQ-09584	
			発行年月日: 平成25年12月24日		
ご報告先:	上智大学 理工学部 殿		受注番号: 209549		
事業者名 株式会社島津テクノリサーチ					
所在地 〒604-8436 京都市中京区西ノ京下合町1番地					
試験所名 株式会社島津テクノリサーチ 本社					
所在地 〒604-8436 京都市中京区西ノ京下合町1番地					
Phone (075)811-3181 FAX (075)821-7837					
測定分析結果を下記のとおり報告致します。					
持込試料については試料受け取り後の工程について責を負います。					
発行者 試験解析事業部テクニカルセンター 部長 中沢 典子					
分散染色法結果					
アスベストスクリーニング 測定分析項目	観察結果	分析日	顕微鏡観察 担当者	測定分析方法	フロー 番号
クリソタイル(Chr)	観察されず	H25.12.18	木村彰良	JIS A 1481 位相差・分散顕微鏡による定性分析方法	FZ-902
アモサイト(Amo)	観察されず	H25.12.18	木村彰良		
クロシドライト(Cro)	観察されず	H25.12.18	木村彰良		
トレモライト/アクチノライト (Tre/Act)	観察されず	H25.12.18	木村彰良		
アンソフィライト(Ant)	観察されず	H25.12.18	木村彰良		

図 (3) -17 マイクロ波法で900°C加熱処理したスベスト含有スレート瓦の位相差顕微鏡像とデータシート

5. マイクロ波促進効果の浸透深さからの検証

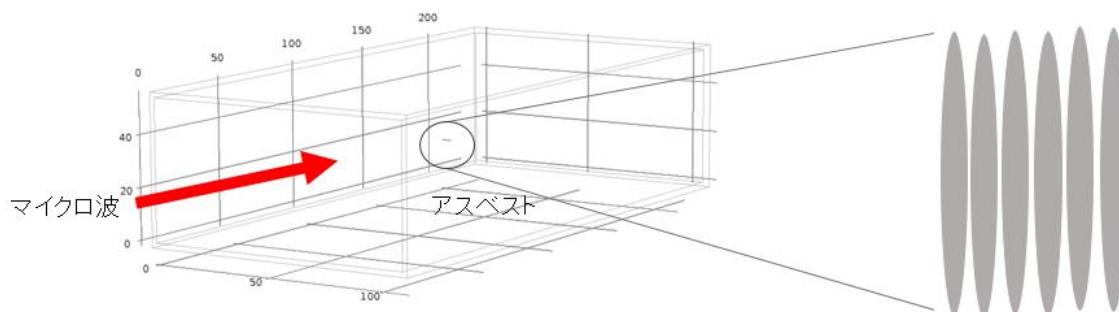
マイクロ波法を用いることで電気炉法に比べ、100°C低温でアスベストの完全無害化ができた理由を浸透深さから考察した。マイクロ波による浸透深さは、式2から算出することができる。すなわち、波長(λ)は2.45GHzは固定であるため、比誘電率(ϵ_r')および比誘電損失(ϵ_r'')を算出することで求めることができる。摂動法を用いたアスベスト含有スレート瓦の比誘電率(ϵ_r')および比誘電

損失(ε_r'')計測結果より、 $\varepsilon_r' = 5.9 \pm 0.5$ および $\varepsilon_r'' = 0.5 \pm 0.1$ であることが分かった。この実測値から、2.45GHzに対するスレート瓦の浸透深さは、約4.0cmであることが分かった。したがって、波板として成形されているスレート瓦の厚みは4cm以下であるため。マイクロ波が十分にスレート瓦の中心まで浸透して、加熱が進行することが分かった。

$$D_p = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\frac{2}{\varepsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\varepsilon_r''/\varepsilon_r')^2} - 1 \right)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

6. マイクロ波促進効果の電界集中からの検証

マイクロ波法による迅速なアスベストの無害化メカニズムに対して、マイクロ波を効率よく吸収する空間(または電磁界集中)について電磁界シミュレーションを用いて考察した。電磁界シミュレーションのソフトはRFモジュールを組み込んだCOMSOL Multiphysics (Ver. 4.3a)を用いた。特に、アスベストをマイクロ波導波管内に並べ、そこへマイクロ波を照射した(図(3)-18)。



図(3)-18 シミュレーションのモデル概略

アスベストを半径0.1 μm、長さ2.0 μmの楕円体でモデル化し、比誘電率5.9、比透磁率1、導電率 1.0×10^{-14} S/mという物性値で、導波管の中心に長軸がマイクロ波の照射する方向と同じ方向になるように配置した。手前から矢印の方向でマイクロ波を照射したときの電場の分布を例として示す(図(3)-19)。楕円体にモデル化したアスベストを2本用いて間隔を0.1 μmの距離で配置した。2本楕円体を間隔で0.01 μmで配置した。

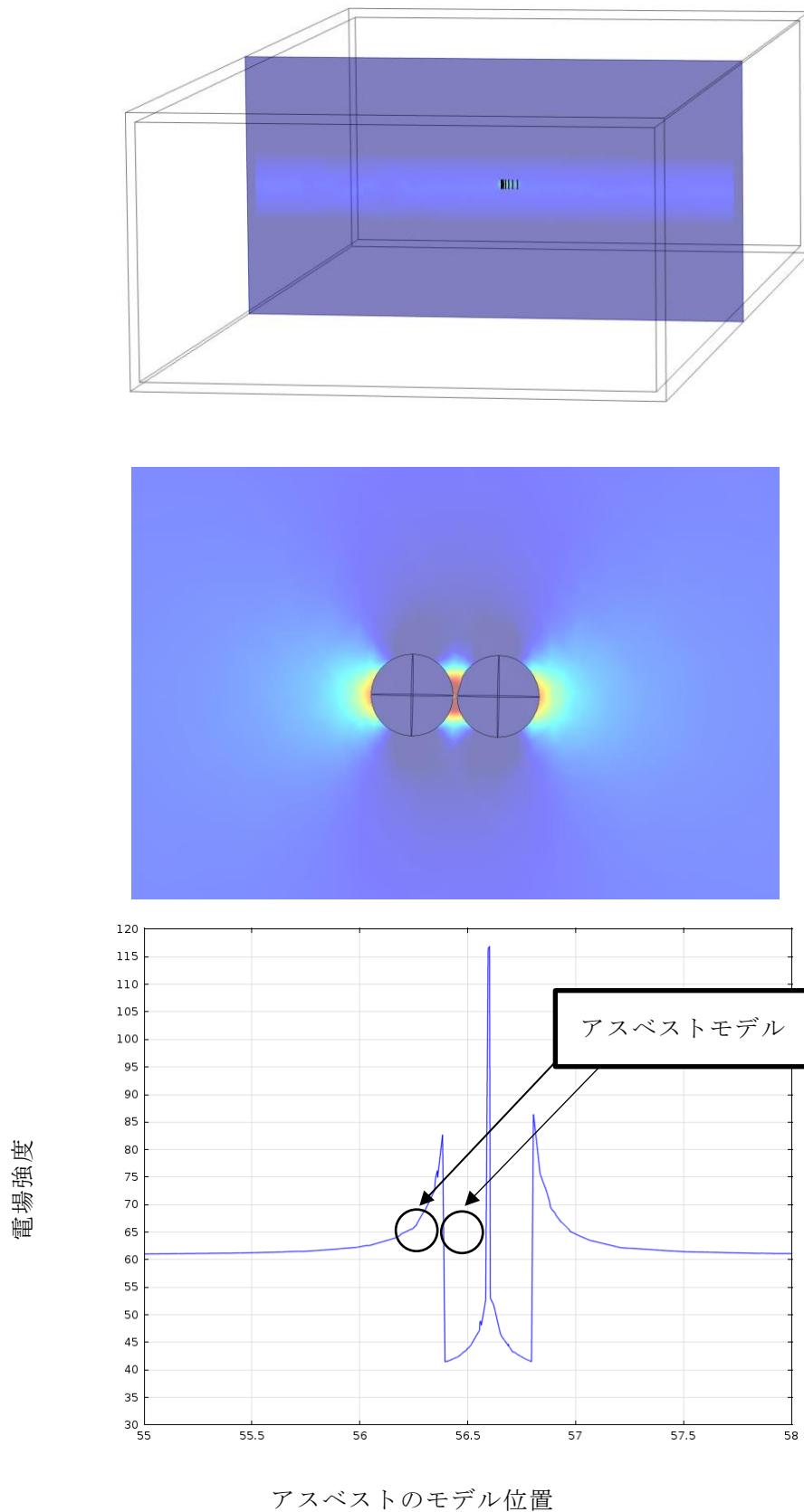
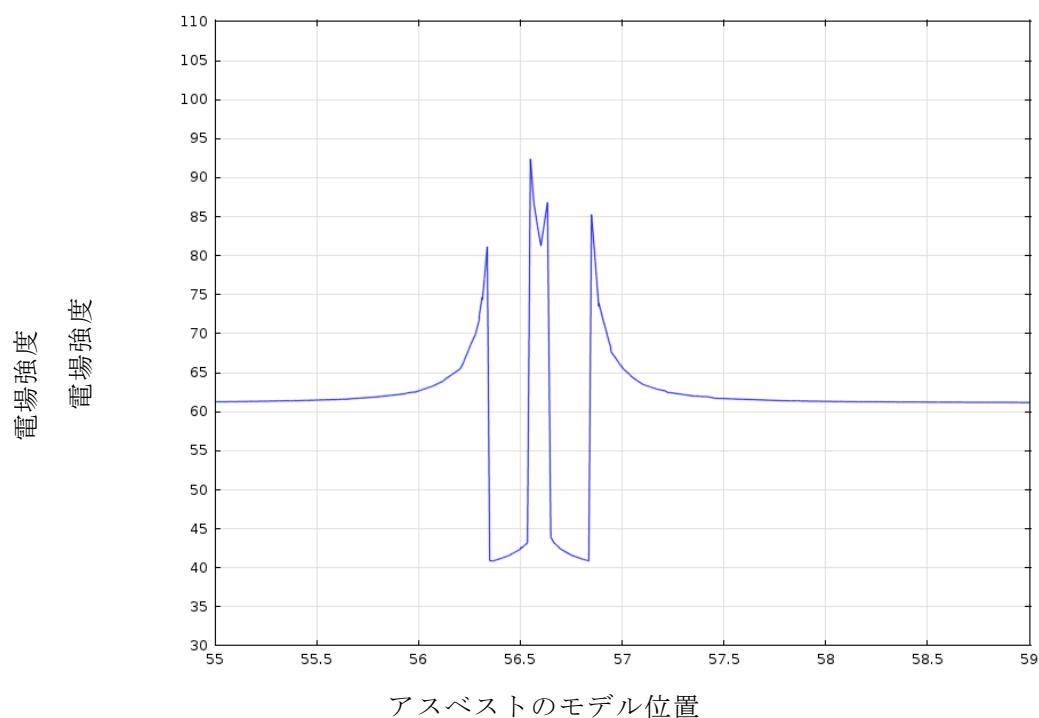
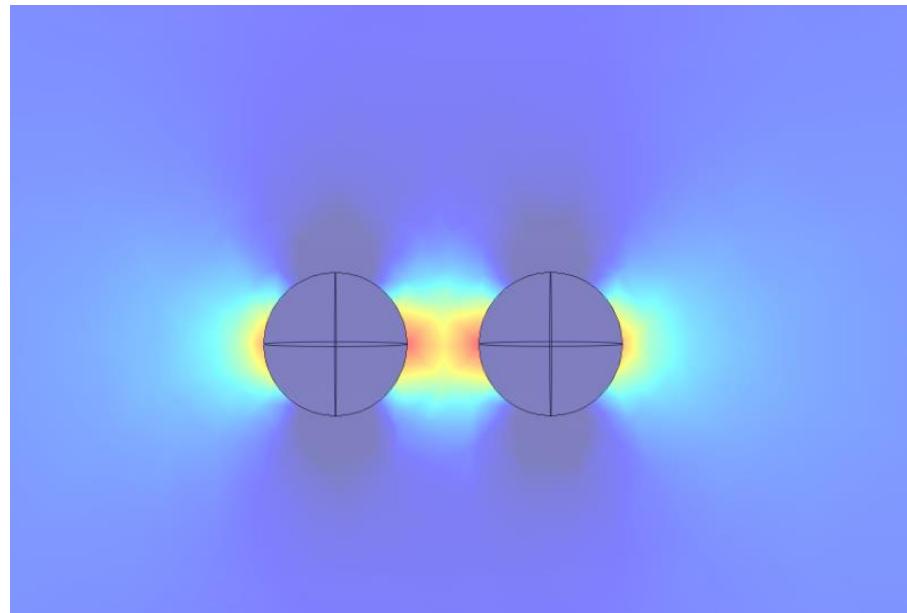


図 (3) -19 アスベスト2本を0.01 μm 間隔で導波管内に配置し電磁界シミュレーション(上)と拡大図-(中)、電場の分布図-(下)

次に、アスベストのモデル間を $0.1 \mu\text{m}$ で再配置し計算を行った（図（3）-20）。電場の集中はあまり起こらないことから、アスベストモデルの間隔が電界集中の重要因子であることが分かった。



図（3）-20 アスベスト2本を $0.1 \mu\text{m}$ 間隔で導波管内に配置し電磁界シミュレーション拡大図-(上)と電場の分布図(下)

そこで、様々なアスベストモデルの間隔($0\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、 $9\mu\text{m}$)を導波管内に配置し、電磁界シミュレーションを行った(図 (3) -21)。

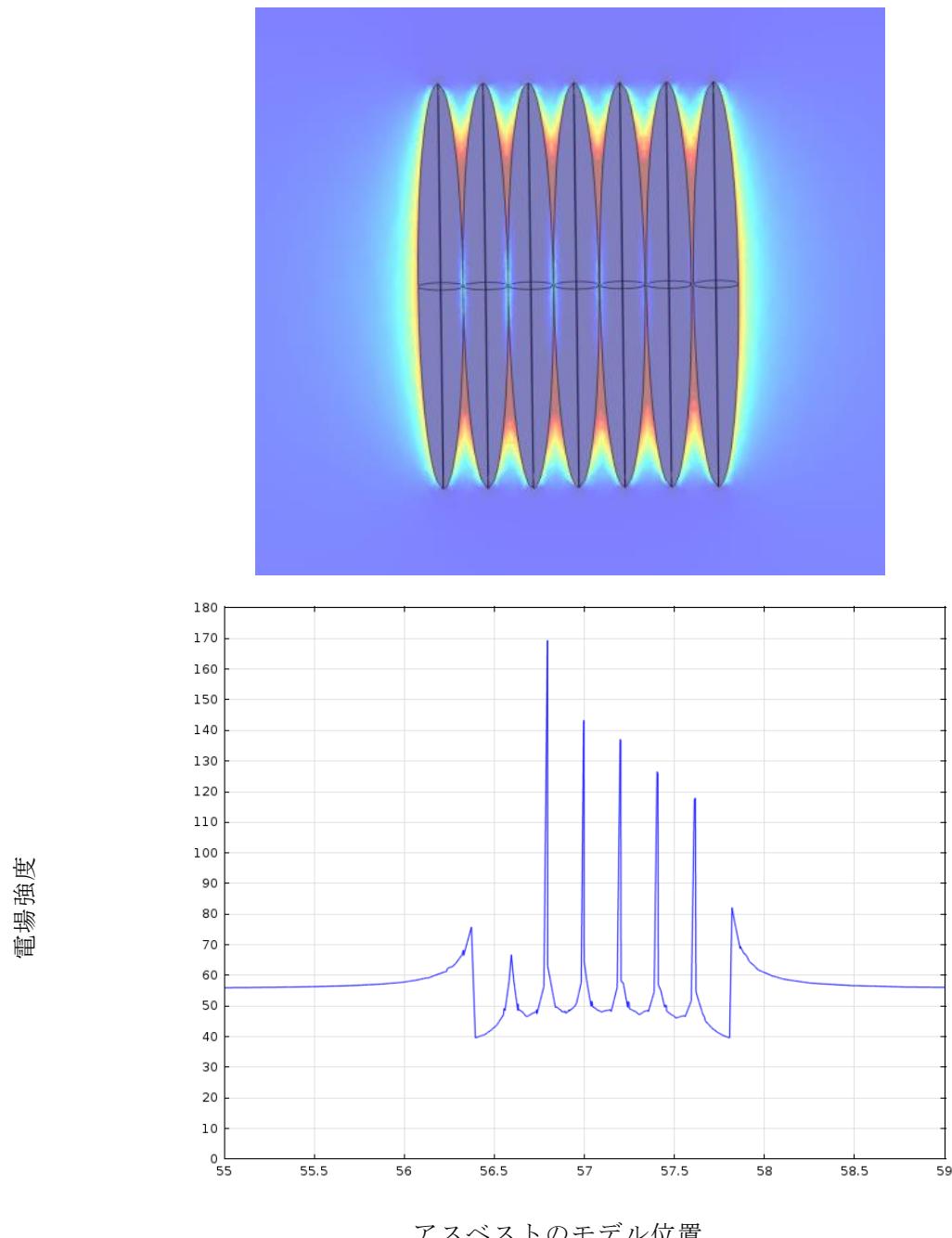


図 (3) -21 アスベストモデルを $0\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、 $9\mu\text{m}$ の間隔で導波管内に配置し電磁界シミュレーション拡大図(上)と電場の分布図(下)

この結果からは、アスベスト間が全く開いていない状態では($0\mu\text{m}$)、電場の集中が進行しない。

一方、間隔が1μmでは最も電場が進行しやすいことが示された。また、間隔が広がるにつれ、電場の集中は低下した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

研究提案時において、マイクロ波加熱設備によるスレート瓦中のアスベスト無害化処理は新しい現象を示している。アスベストを含むスレート瓦は、その無害化に1500°Cもの高温での処理を必要とするが、本設備では950°Cでの凡そその無害化が観測されている。また、化学工学の観点からは、マイクロ波下において観測される選択的加熱の工学応用が盛んに議論されている。

本プロジェクトにおける当班及びシステム処理班により実証された構造による選択的な加熱現象はこれらの疑問を説明できる重要な知見である。当班により得られた数値計算結果は、これまで仮説であった構造による電磁界散乱を説明するだけでなく、構造が形成する選択加熱を説明するものである。また、実際のアスベスト粒子を測定に用いることで、サブテーマ2における観測結果を実験的に裏づけている。工学的な観点からも、本班の成果はプロジェクトの科学的意義に対して大きな寄与も行っている。第1班、第2班により、本プロジェクトは有事におけるアスベスト問題を解決するために、大きな成果を挙げる事が示されている。これらの成果は開発された装置が安全であるとの前提に立脚しており、この確認・リスク評価を担当する本サブテーマは、本プロジェクトにおいて重要な意義を持つ。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

「新仕分け」、(2013/11/16) 分資料2/3における行政刷新会議ワーキンググループにおいて本プロジェクトの成果が参考された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本プロジェクトでは、東日本大震災により電気・水等の基礎的な環境が破壊された地域において、アスベストを含有した有害物質を迅速に無害化し得る処理設備を建造し(80kg/hour)、この建造は凡そ10日で完了後、そのまま4ヶ月間の現地実証試験運用に耐えられることが示された。これまでアスベスト含有物質は、回収・輸送・処理の手続きを経て行われるが、これらの工程はそれぞれ複雑な行政手続き及び認可を必要とする。本設備を用いることで、これらの手続きを解消し、我が国の有事に際して迅速に復興に動くことが可能となる。この成果が我が国の環境政策へ寄与しえる可能性があることは、本研究がメディア等の高い注目度からも明らかであると考える(メディア等の発表参照)。

当研究ではこの工学的に重要な成果の安全性を保障するものであり、これにより得られた安全性の上で初めて得られた成果を主張することができる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 篠原真毅、佐藤元泰、堀越智、吉川昇、樋村京一郎、木嶋敬昌：マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理研究の現状、先進素材開発解析システムシンポジウム（講演）2012/11/13
- 2) N. Shinohara, N. Yoshikawa, S. Horikoshi, T. Mitani, T. Kishima, K. Kashimura and M. Sato: Applications of Microwave Powers for the Rubble Processing to the Great East Japan Earthquake – Test System for Rendering Asbestos Harmless in the Crashed Slate, proceeding of 2th GCMEA (2012)

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 篠原真毅、樋村京一郎、佐藤元泰、吉川昇、堀越智、米田沙織、木嶋敬昌：アスベストのマイクロ波及び高温集塵による無害化処理技術、粉体工学会秋期研究発表会, 2013/10/8 (インデックス大阪)
- 2) 樋村京一郎、篠原真毅、吉川昇、堀越智、佐藤元泰：震災瓦礫に含まれる有害物質の高速無害化システム実証試験、鉄鋼協会秋季講演大会, 金沢大, 2013/9/19
- 3) 佐藤元泰、樋村京一郎、篠原真毅、東北大 吉川昇、堀越智：マイクロ波による東日本震災瓦礫中の有害物質迅速処理－アスベスト飛散とダイオキシン発生防止－, JSEM実験学会, 秋田大, 2013/8/30
- 4) 樋村京一郎：東日本大震災より生じた震災廃棄物の有機的処理に関する予告フォーラム, 鉄鋼協会春季講演大会, 電通大, 2013/3/29
- 5) 篠原真毅、佐藤元泰、堀越智、吉川昇、樋村京一郎、木嶋敬昌：マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理研究の現状、先進素材開発解析システム(ADAM)シンポジウム（講演）
2012/11/13

(3) 出願特許

「特に記載すべき事項はない。」

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理装置の見学会」(2013/3/35) 16名
- 2) 「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理装置の研究開発」(2012/6/26) 8名
「被災地瓦礫処理場見学・勉強会」(同日) 7名

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 週刊環境循環新聞：「震災廃棄物をマイクロ波処理」（平成25年 3月11日）
- 2) 日本テレビ：「震災から2年、がれき処理の現状（ズームイン！！サタデー）」, (平成25年3月1日)

- 3) 日刊工業新聞：「震災がれき処理にマイクロ波が一役－非飛散性アスベストの無害化コスト半減」（平成25年2月14日掲載
*朝日新聞デジタル：同研究にて同日掲載
- 4) NHK サイエンスゼロ：「電子レンジで鉄が作れる！？ 未知のマイクロ波効果を活用せよ」
(平成25年1月23日放送)
- 5) FNS 仙台：「がれきのアスベストを無害化 研究進む」，ニュース（平成25年12月20日）

（6）その他

「特に記載すべき事項はない。」

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

Rapid Rendering of Harmful Matter in Rubbles by Microwave Processing -Protection of Asbestos and Dioxin Scattering-

Principal Investigator: Naoki Shinohara

Institution: Kyoto University

Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, JAPAN

Tel: +81-774-38-3601 / Fax: +81-774-38-3600

E-mail: kashimura@rish.kyoto-u.ac.jp

Cooperated by:

Faculty of Engineering, Chubu University, 1200 Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi
487-8501, Japan

Tohoku University, 6-6 Aoba, Aramaki, Aoba, Miyagi, Japan

Sophia University, Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

[Abstract]

Key Words: asbestos; chrysotile; microwave; Great East Japan Earthquake; waste treatment

The rapid transformation technology are needed when huge disaster devastated the town, especially in countries with adequate asbestos regulation. In the case of “Tōhoku Earthquake” on March 2011, fire disaster and Tsunami devastated a great deal of towns and remained large amount of rubbles. These rubbles include a huge amount of cement-asbestos slates which were parts of old buildings (For example, the Japanese government did not limit use of cement - 0.1% asbestos slates by 2006 and these old building included both airborne asbestos and non-asbestos). To recover these polluted environments into sustainable society with overcoming their regulations, we needs rapid transformation of a huge amount of asbestos materials into harmless waste because of hugeness of asbestos materials from the disaster.

It is well known that asbestos materials transforms into harmless wastes at the temperature of 1200 °C or higher. The problem to recycle of a great amount of asbestos-cement materials is that asbestos-cement materials are hard to be heated because of their low thermal conductivities (Usually, we employs crashing process to heat the materials with low thermal conductivity. Crashing was not adequate in this case because the asbestos-cement materials emitted fine asbestos fibers by crashing). To overcome the problems for rapid recycles of a great amount of these materials, we noticed microwave heating as a new form of supplying energy instead of heating with fire.

In this project, we first investigate the temperature dependence of the numbers of asbestos fibers of cement slates for various microwave treatment time in desktop research. In this experiment, we estimates internal temperature and decided the conditions of outer temperature to control the process (see below). Next, using the rubble of the 2011 Tōhoku Earthquake, we demonstrate experimentally that the rapid heating and transformation of asbestos-cement materials into harmless wastes. In this stage, we employed woody waste as fuels and established the compact system to recycle slates with asbestos. Finally, the detoxification mechanism of asbestos materials was investigated through simulations and experiments. The permittivities of pure CaO and $Mg_3Si_4O_{12}$, as quasi-asbestos materials, were measured using the cavity perturbation method. Optical microscopic observation revealed that the thickness of chrysotile fibers decreased as a result of CaO heating. The heating mechanism of asbestos materials has been determined using CaO phase, and the detoxification mechanism of asbestos materials was discussed based on the heating mechanism.