

環境省環境研究総合推進費(委託費)

研究課題番号：1ZF12-03

課題名：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—

研究代表者名：篠原真毅 (京都大学)

研究グループ：吉川昇 (東北大学)

堀越智 (上智大学)

佐藤元泰 (中部大学)

研究実施期間：H24-H25年度



研究背景: 瓦礫中の有害物質迅速処理が求められる

1次仮置き場



2次仮置き場



2012/3/20事前現地調査
(上は1/7の画像)



研究体制

研究代表者プロジェクトリーダー：篠原真毅(京都大)

処理設備システム構築
佐藤元泰(中部大), 京都大

- * マイクロ波によるエネルギー伝送・放射系の強化・改造
- * 高性能フィルターの設置
- * マイクロ波回転処理炉整備
- * 木質系廃棄物活用前段燃焼

処理システムへの
フィードバック



処理システムへの
フィードバック



瓦礫中有害物処理の実験的研究
吉川昇(東北大)

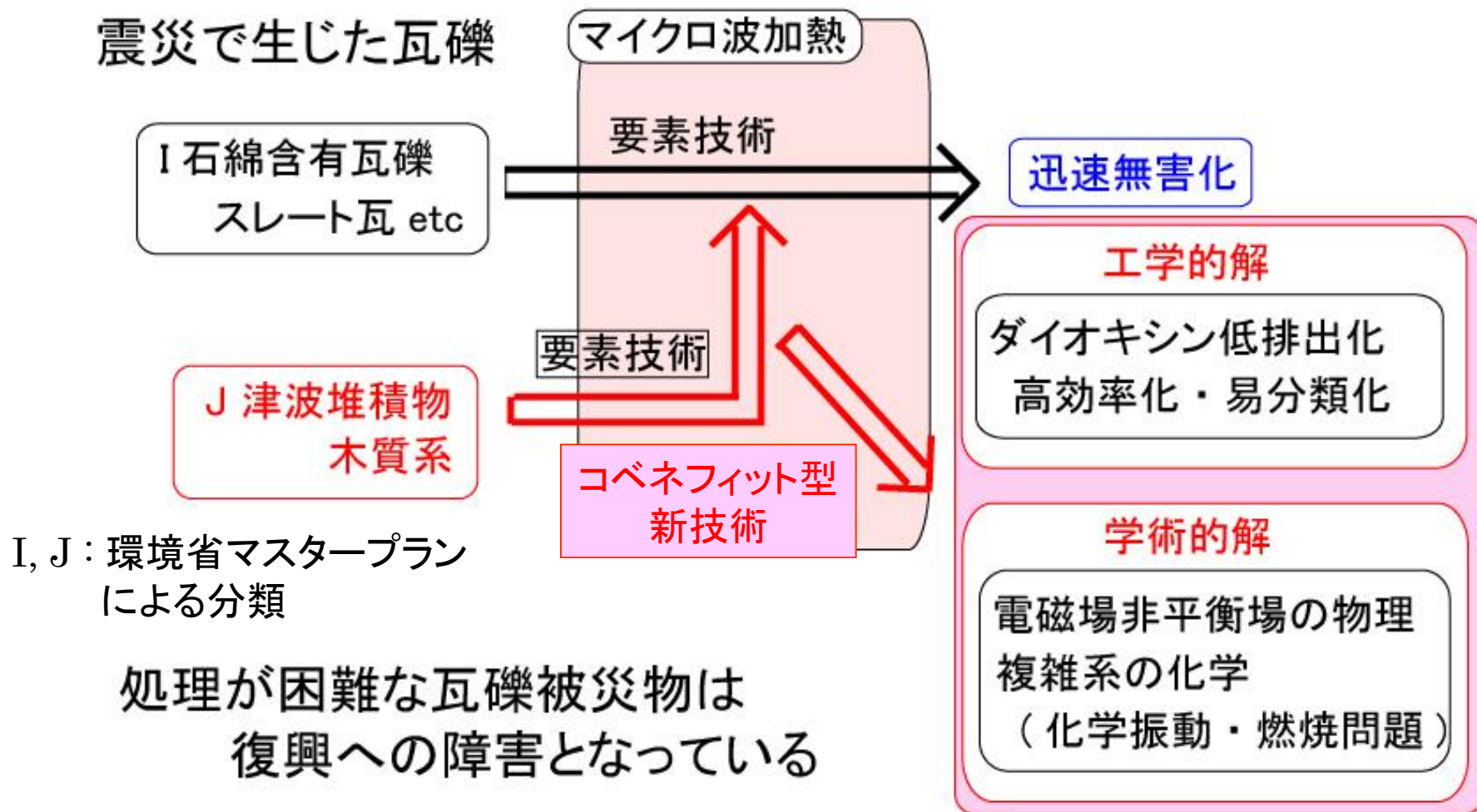
- * 瓦礫確定・選別・評価
- * 現場指導・運営
- * 無機物構造評価

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)

- * 有害化学物質の分析・評価
- * スラグ・飛灰の分析・評価

研究開発目的（コベネフィット型技術・システムの展開）

- 1) マイクロ波加熱によるアスベスト無害化装置の大規模化（工学的解）
- 2) 分別度の低い瓦礫処理の問題点解決（学術的解）
- 3) 1)2)をあわせた瓦礫中の有害物質迅速処理法の確立



研究計画(様式B)に記載の目標

- 京大、中部大

事例の緊急性を考慮し、平成25年6月末までに、瓦礫中の有害物質(アスベスト飛散とダイオキシン発生)を日処理量3~5トンの初期実証試験を行う。

- 東北大

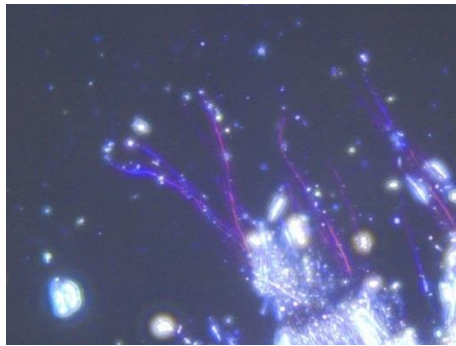
現場における処理設備の管理及びその運用性評価を行う。本テーマでは、この操業条件を検討することによって、瓦礫が無害化・減容化する最適熱処理条件を抽出・確定する。

- 上智大

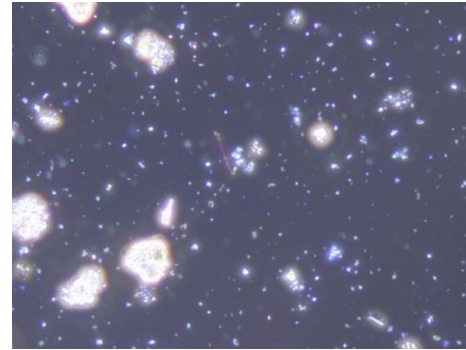
阪神淡路大震災と異なり、本震災における瓦礫成分の詳細は依然未知である。ゆえに、本装置により生じる瓦礫に残留する汚染物質の濃度低下を分析し、装置最適化のための情報をフィードバックする。

緒言 平成24年度における成果

アスベスト含有物質を現地で無害化できる施設システムの構築



(a) マイクロ波処理前の瓦礫の顕微鏡写真



(b) 処理後の顕微鏡写真

- ・アスベスト含有スレート **1.9 ton / day**, 木質瓦礫(ダイオキシン発生可能性物質) **3 ton / day**で達成。(アスベスト繊維数が3000粒子中0粒子)
- ・システムの最適熱処理条件を確立(**900°C以上**)
- ・ダイオキシン排出基準値以下の確認(前段燃焼炉 ⇒ 排ガス **0.70ng-TEQ/m³N**, ダスト **0.15 ng-TEQ/g**, 高温防塵フィルター内のダスト ⇒ **0.78 ng-TEQ/g**)

新聞・ニュースにおける高い評価を得た(5件)。

**平成25年度では1) 現地実証試験の解体・撤収,
2) マイクロ波効果の学理的検証、が中心**

現物の分析と把握: (アスベスト)クリソタイルの無害化



450-700°Cで分解、溶融点1521°C:1000°C以下で無害化可能

表2. 2- 1 アスベストの物性

	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

A) マイクロ波炉によるアスベストの加熱ラボ実験

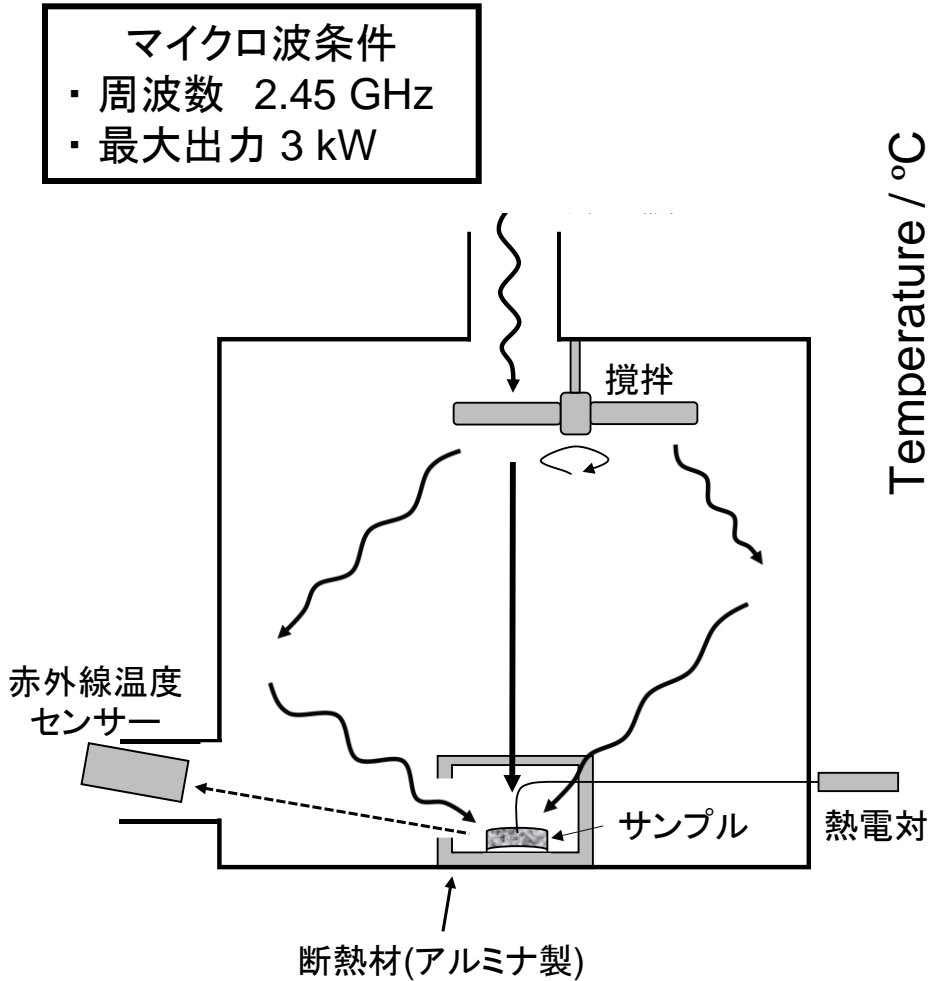


Fig. 1 マルチモードマイクロ波照射装置

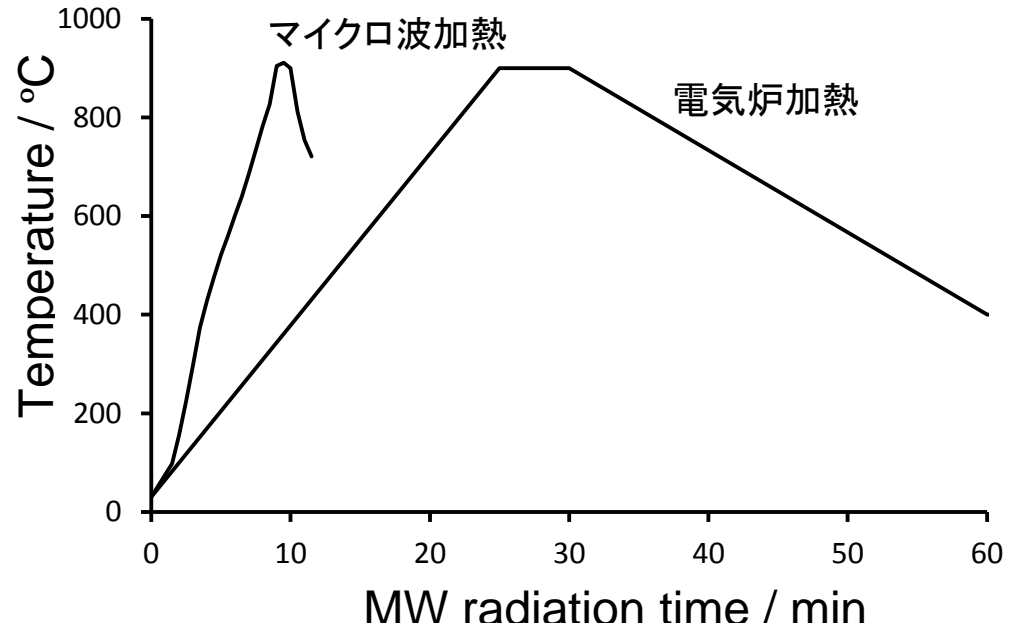


Fig. 2 マイクロ波加熱と電気炉加熱によるアスベストサンプルの温度上昇

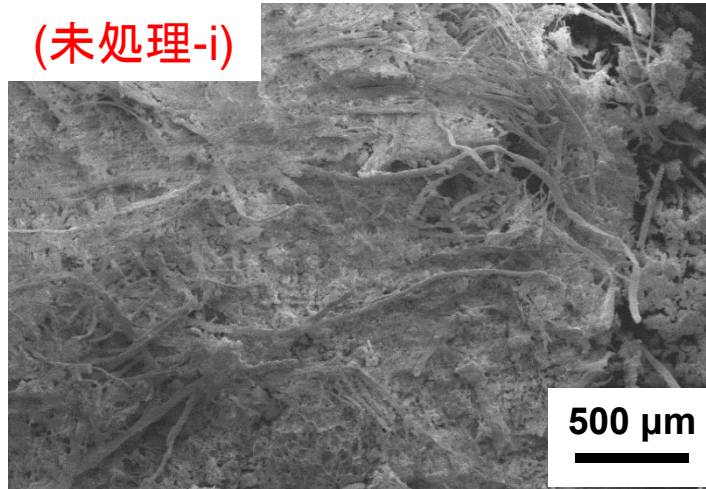
比較実験

電気炉による加熱: 40°C/分の昇温

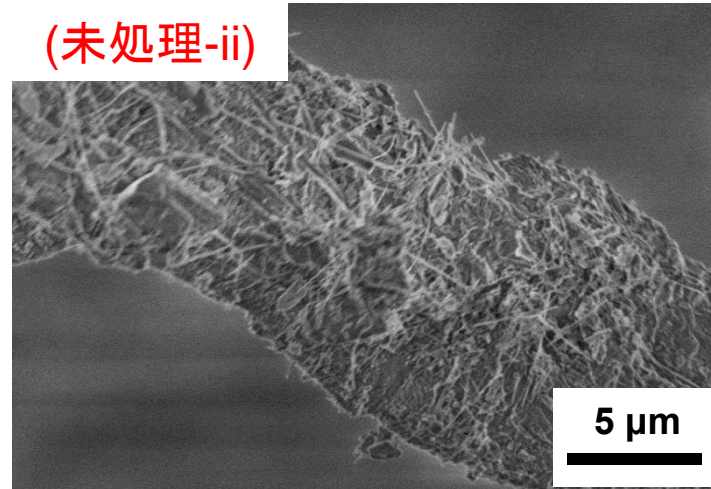
A) SEM観察によるアスベストの形態変化

(マイクロ波加熱)

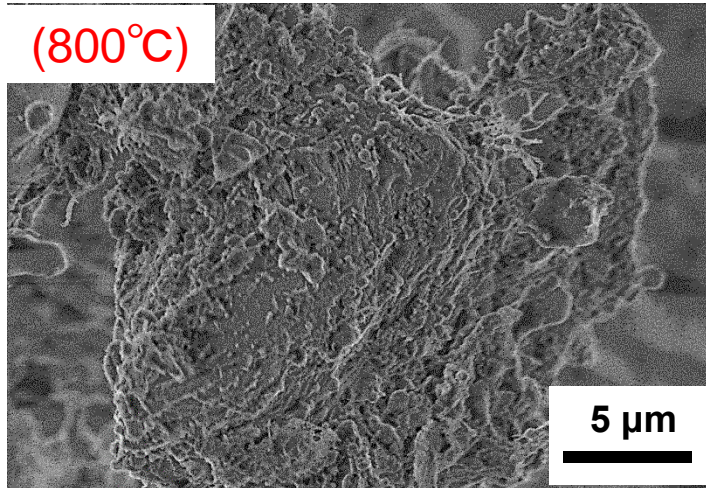
(未処理-i)



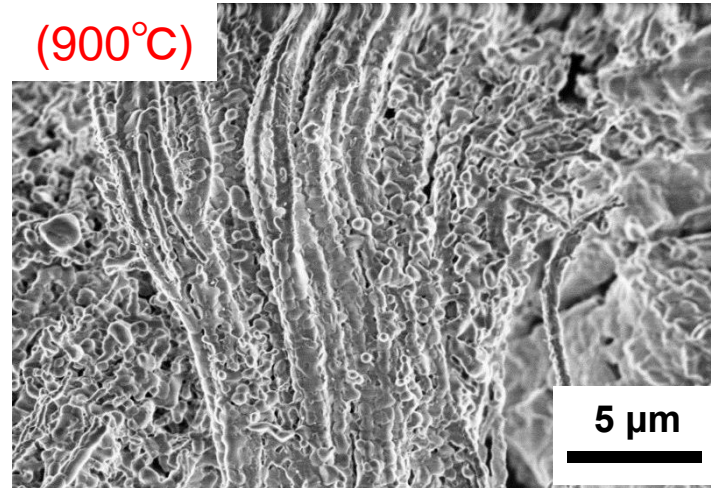
(未処理-ii)



(800°C)



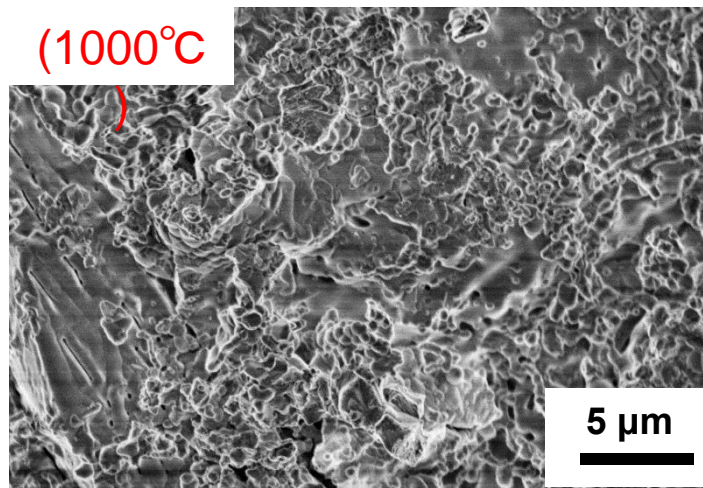
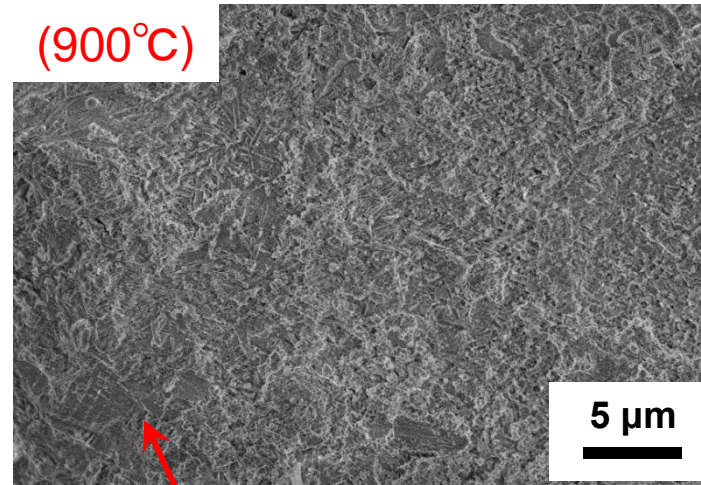
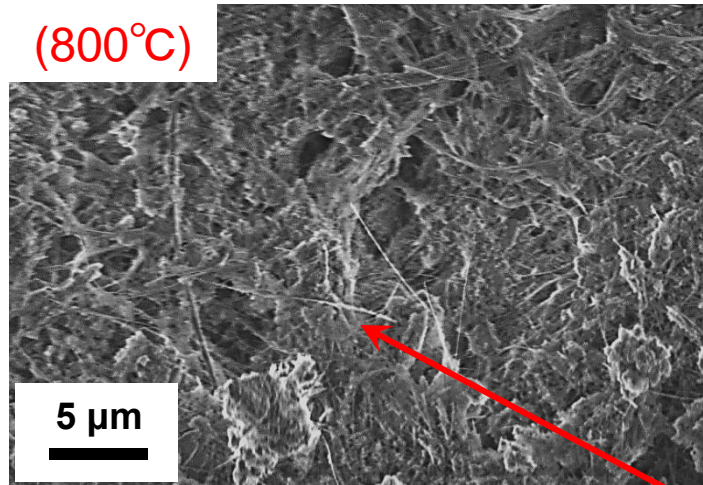
(900°C)



マイクロ波処理前後のアスベストの形態変化

A) SEM観察によるアスベストの形態変化

(電気炉加熱)



アスベストの数は減っている
が存在は確認できる

電気炉処理前後のアスベストの形態変化

A) X線分析によるアスベストの存在確認

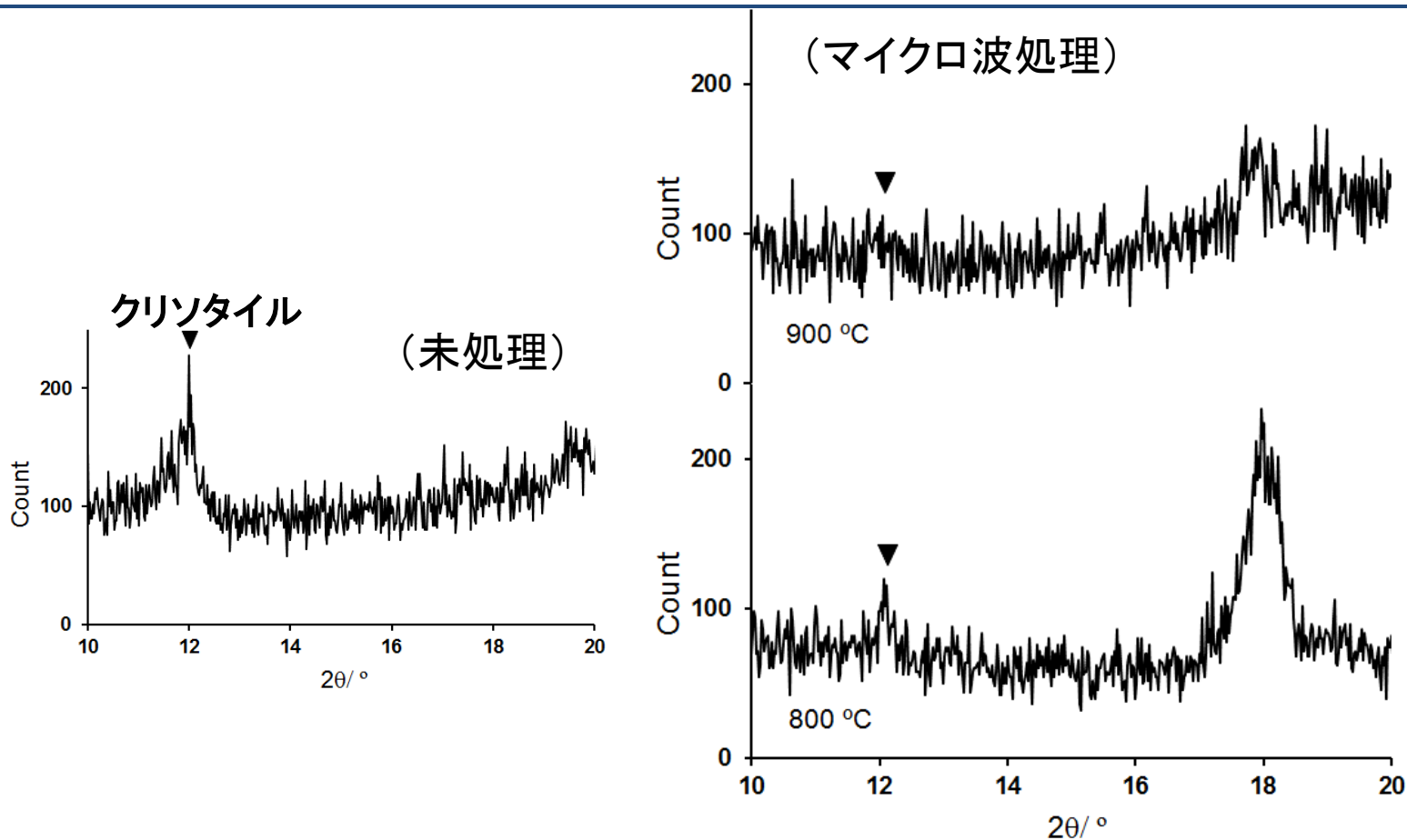


Fig. 6 マイクロ波加熱前後のサンプルのXRD測定結果

800 °Cマイクロ波加熱 ➡ クリソタイルのピークを確認

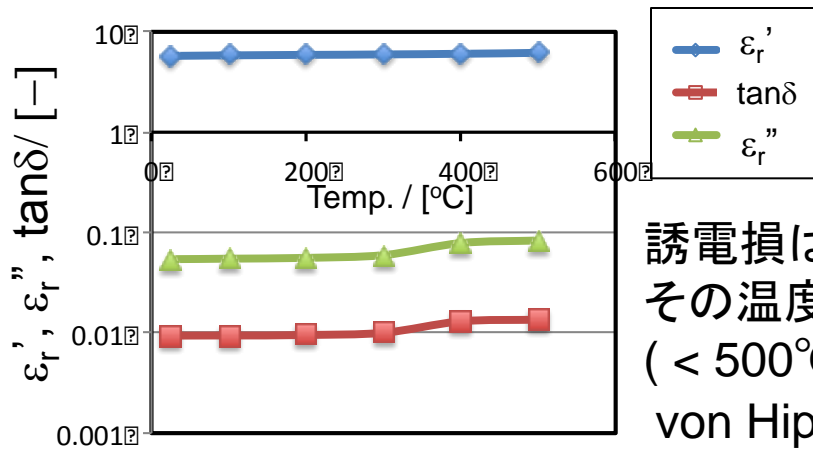
900 °Cマイクロ波加熱 ➡ クリソタイルのピークが消失

マイクロ波処理は電気炉より100°C低い温度で処理が可能

B) アスベスト含有スレート瓦模擬物質

1. タルク(Talc)

ステアタイト系セラミックス
=アスベスト (クリソタイル)

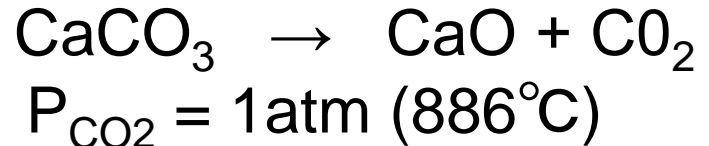


誘電損は小さく、
その温度変化も小さい。
(< 500°C)

von Hippel (1954)

2. 石灰石(CaCO₃: 炭酸カルシウム)

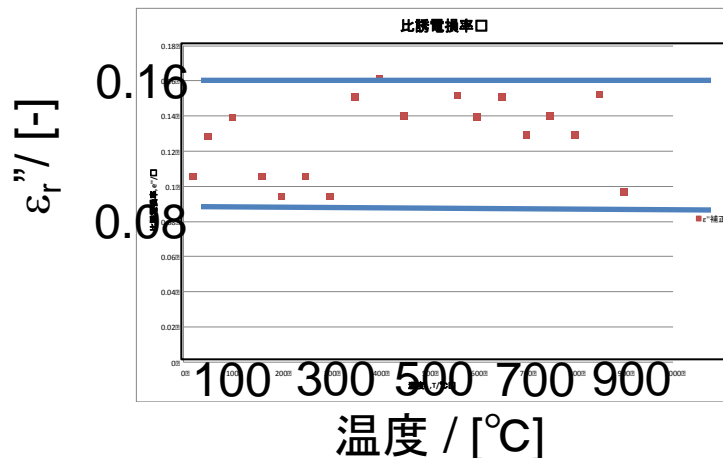
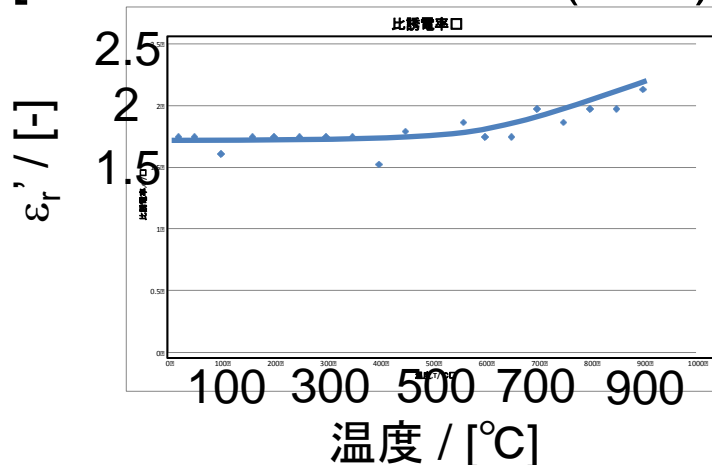
=スレート瓦



室温: 同軸導波管 (室温)

	ϵ_r'	ϵ_r''
タルク	3	0.02
CaO	3.31	0.04

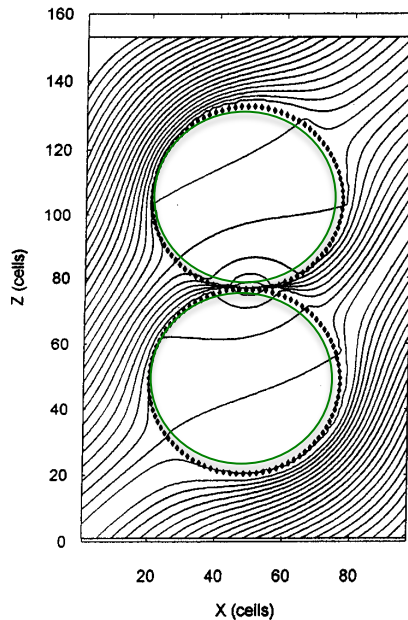
[誘電率の実測結果 (Talc)]



B) アスベスト無害化メカニズム仮説

電場集中効果の例

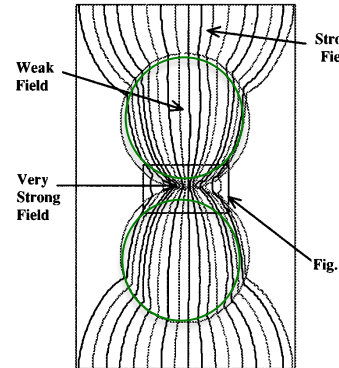
(1)



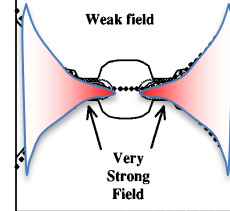
焼結の促進

(2)

(a) electric field lines



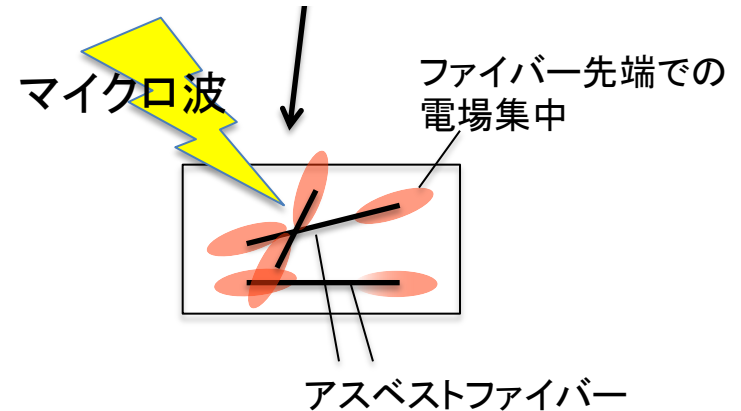
(b) Equi-field contours



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)

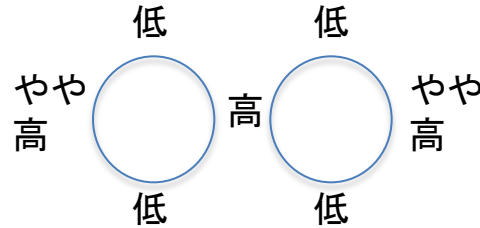
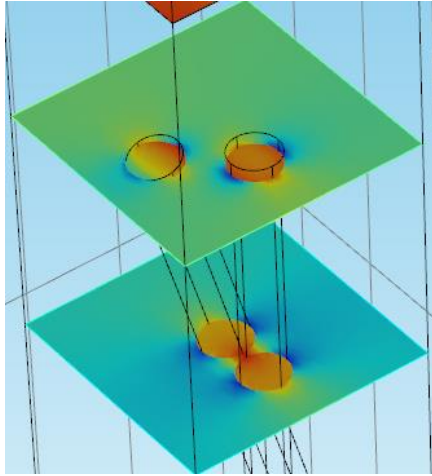


含アスベストスレート
ナノ繊維束: 太さ数10ミクロン
ファイバー)



B) 電磁場解析:電場の集中について

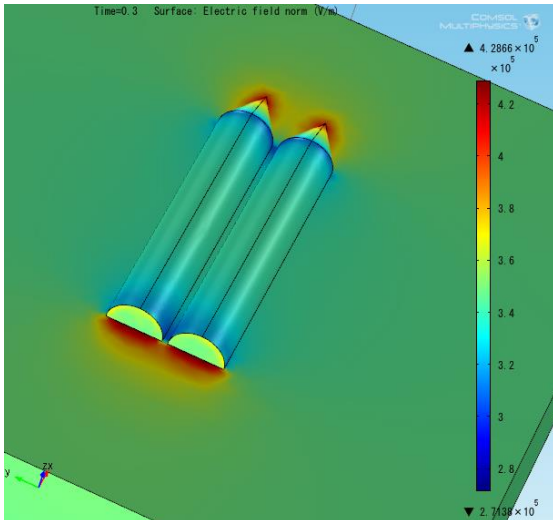
シミュレーション結果例1



入射電場の振動方向と
ファイバーの方向に依存

ファイバー間に高電場が発生

シミュレーション結果例 2: ファイバーの先鋭化

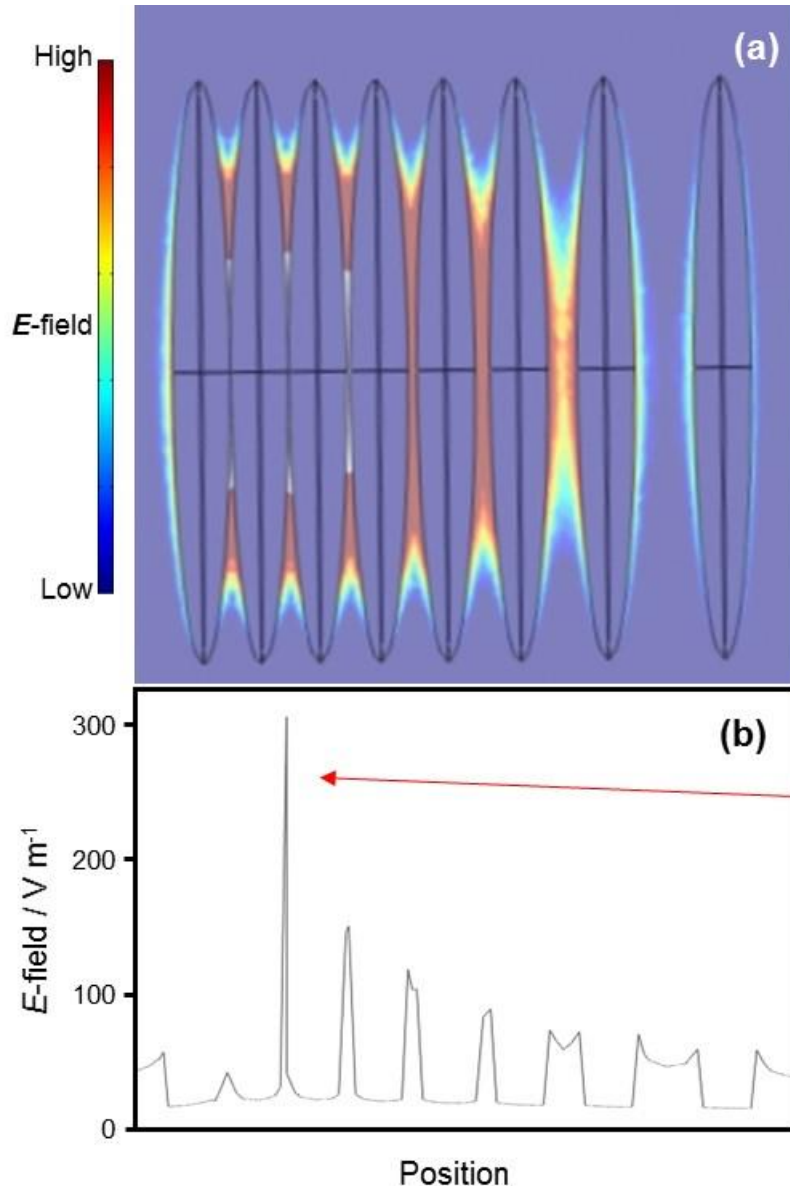


ファイバー先端を先鋭化させた。

電場集中が生じても、その程度は
せいぜい2倍程度である。

ソフトウェア(COMSOL multi-Physics ver. 4.3b,
RFモジュール)
(有限要素法、電磁場、伝熱連成解析)

B) マイクロ波照射下のアスベストに対する電場強度 (別シミュレーション)



左から

0 μm · 0.001 μm · 0.01 μm · 0.03 μm

0.05 μm · 0.1 μm · 0.2 μm

の間隔でアスベストを並列

アスベスト間が0.001 μmになるように配置すると電場が最も集中する

瓦礫に含まれる金属成分などと相乗効果を起こし、ホットスポット(高温場)が発生するかもしれない

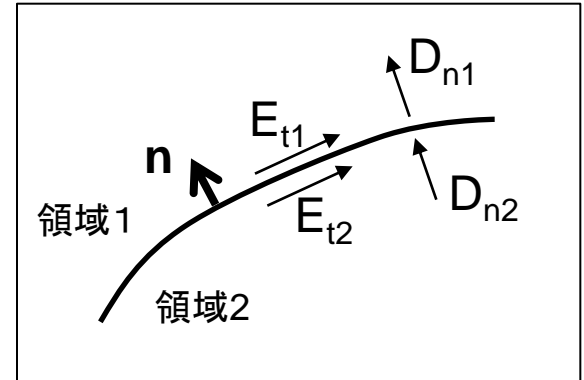
B) 電磁場解析:ファイバー内と母相の電場の違い

* 境界における電束密度の条件(誘電体境界)

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{D}_1 = \mathbf{n} \cdot \mathbf{D}_2 \quad (\epsilon_1 \mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_1 = \epsilon_2 \mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_2, D_{n1} = D_{n2})$$

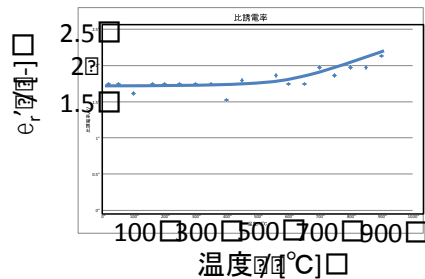
$$(\mathbf{n} \times \mathbf{E}_1 = \mathbf{n} \times \mathbf{E}_2, E_{t1} = E_{t2})$$

誘電率(実部)の小さい相の電場は高くなる。
加熱には都合が良い。



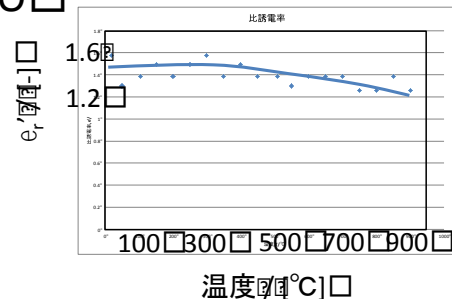
* CaOとTalcの場合

Talc □ 誘電率実部



3.6
↑
 $\epsilon_r' = 3$

CaO □



$\epsilon_r' = 3.31$
↓
2.9

* 高温でどちらが大きくなるか
分かりにくい。

* 多分Talcの方が高くなる。
すなわち電場が高く成るのは、
CaOであろう。

* 高温で誘電損率(ϵ_r'')が高くなり、
誘電率(ϵ_r')が低くなるため、電場
が高くなるCaOの方が加熱される
であろう。

まとめ

- * アスベスト含有物質を現地で無害化できる施設システムを構築し、アスベスト含有スレート 1.9 ton / day, 木質瓦礫(ダイオキシン発生可能性物質) 3 ton / dayを達成。(アスベスト繊維数が3000粒子中0粒子)
- * 要求される 1) 安全性(本研究の高い注目度による制約)、2) 適法性(アスベストのもつ特異性と放射性物質による制約)、3) 迅速性(現地試験場の借用期間による制約)を満たしつつ、無事施設の撤収を完了。
- * ・ダイオキシン排出基準値以下の確認(前段燃焼炉 ⇒ 排ガス 0.70ng-TEQ/m³N, ダスト 0.15 ng-TEQ/g, 高温防塵フィルター内のダスト ⇒ 0.78 ng-TEQ/g)。
- * マイクロ波炉によるアスベストの加熱ラボ実験と比較のための電気炉加熱実験を行い、より低温でのマイクロ波炉アスベスト処理を確認。
- * CaO母相中のTalcファイバー交差箇所や先端で、電場集中が生じることをシミュレーションで確認。また、ファイバー間距離が近い場合も電界集中が生じる。両者の誘電率の相違は小さく、最大電場強度は十分大きく成らないこのため、単純な条件だけでは局所加熱には至らないと予想するが、瓦礫に含まれる金属成分などと相乗効果を起こし、ホットスポット(高温場)が発生する可能性がある。
- * CaO単体の誘電損失は、800°C以上の高温では十分大きくなり、加熱メカニズムとしてCaO加熱→Talcファイバー加熱の可能性を示唆。

まとめにかえて

-コベネフィットな研究体制から生まれるコベネフィット型技術-

H26以降

さらなる効率の向上(国プロ) or

実用化(産官への技術移転・ベンチャー創業)

分析・原理の解明

東北大学 吉川
(材料の立場)

上智大学 堀越
(環境・化学の立場)

マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理(H24・25)

(マイクロ波の
専門家集団)

実証試験

京都大学 篠原
(電波の立場)

中部大学 佐藤
(装置設計の立場)

環境省・地域新生コンソーシアム事業等 (過去の研究)(H13-20)