

平成22年5月31日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2007～2009
課題番号：19310046
研究課題名（和文） 含飛散性アスベスト排ガスのマイクロ波プラズマ化による無害化処理
研究課題名（英文） Detoxication of exhaust gas containing airborne asbestos using microwave plasma
研究代表者
関口 秀俊（SEKIGUCHI HIDETOSHI）
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：50226643

研究成果の概要（和文）：

飛散性アスベストを含む排ガスを、大気圧下でマイクロ波放電によりプラズマ化し、その高温・高反応活性を利用してアスベストを無害化する技術について、実際に飛散性アスベストやアスベスト模擬物質を用いて実験を行った。その結果、形状変化や組成変化が観察され、この処理法の有効性を示した。また、アスベスト処理システムを例に挙げ、ここから排出される含アスベスト排ガスの処理に、この処理装置を組み込む実用的な配置を提案した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of the research was to develop the detoxication process for exhaust gas containing airborne asbestos by microwave plasma under atmospheric pressure. The experimental treatments of airborne asbestos and their imitated ceramic materials resulted in the change of their shape and composition, suggesting the effectiveness of this treatment process. The study also proposed the effective layout of this process for exhaust gas from bulk asbestos treatment system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、環境技術・環境材料

キーワード：アスベスト、マイクロ波プラズマ、無害化、熔融、針状消失率

1. 研究開始当初の背景

アスベストとは天然の繊維性けい酸塩鉱物の総称であるが、針状形状を有し、飛散しやすいため、これを吸い込むと肺に刺さり、悪性中皮腫や肺がんを誘因するといわれて

いる。このため、既に使用禁止と対策が国家レベルで講じられている。中でも飛散する可能性のあるアスベストは、特に危険とされ、決して周辺環境へ漏らさず処理しなければならない。現状は、防塵フィルター等を利用

して除去に務めているものの、中にはフィルターに捉えられないものもあり、またフィルター自体も処理する必要があることから、より簡便にそして確実に含アスベスト排ガスを処理できる方法が切望されている。

2. 研究の目的

この研究では、飛散性アスベストを含む排ガスを、迅速で安全にそして確実に無害化するため、排ガスを大気圧下でマイクロ波放電によりプラズマ化し、その高温・高反応活性を利用して、アスベストを溶融や熱分解またはガラス化することで形状変化や構造変化を起こさせ無害化する技術を開発するものである。ここでは、実際にアスベストやアスベスト疑似物質の処理を行い、数値解析も併用しながら、この無害プロセスについて実験的・理論的に検証することを通して、実用化に資する知見を得て、アスベスト処理装置の基本設計を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

この研究で利用した実験装置の概略図を図1に示す。内径 9.4mm、長さ 400mm の石英管内に 2.45GHz のマイクロ波発振器を用いて空気プラズマを作成した。原料にはクリソタイル、アモサイト、クロシドライトの三種の純アスベスト、またこれらのアスベストを含む廃材粒子、さらにはアスベスト模擬物質とするセラミックファイバーや SUS 繊維である。これらを、粒子供給装置を用いて、プラズマ上部より供給した。なお、アスベストの実験は、暴露及び周囲への露出を防ぐため、マスクや作業服等を着用し、密閉部屋で行った。処理した粒子は水中に張った紙で回収した後、乾燥させた。そしてその粒子を走査型電子顕微鏡 (SEM) によって形状変化を解析し、X 線回折 (XRD) および位相差顕微鏡でアスベスト含有状況を調べた。実験条件は、プラズマへの投入電力、粒子供給速度、キャリアガス流量等である。

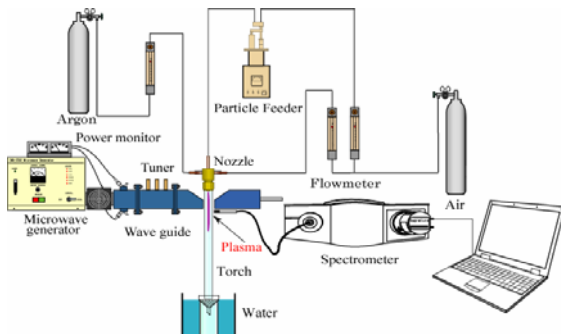


図1 実験装置の概略図

粒子形状の変化の解析には、まず処理前後の粒子を SEM で 100-200 個程度取り、画像

解析ソフトを用いて、投影面積 (Image area=S)、投影周長 (Perimeter length=P)、投影相当楕円の長半径 (Length=L)、及び短半径 (Width=W) を測定した。そして、以下の式で定義される投影面積円相当径 (Equivalent circular area diameter= D_a)、円形度 (Circularity=C)、アスペクト比 (Aspect Ratio=AR) という粒子形状指標に着目し、これらへのプラズマ処理の効果を調べた

$$D_a = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (1) \quad C = \frac{4\pi S}{P^2} \quad (2)$$

$$AR = \frac{W}{L} \quad (3)$$

以下の表1は用いたアスベスト含有粒子の初期の値である。

表1 アスベスト含有粒子の初期形状パラメータ

Type of asbestos	Chrysotile	Amosite	Crocidolite
D_a [μm]	31.0	41.9	38.7
C	0.65	0.65	0.57
AR	0.53	0.51	0.63

4. 研究成果

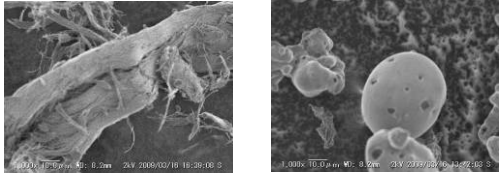
(1) SEM 観察

各純アスベストの処理前後の SEM による分析を行った結果を図2に示す。クリソタイルでは、実験前は針状粒子が含まれ、球状粒子はほとんどなかったが、処理後では球状化の粒子が現れ、またほとんどの球状粒子は他の粒子と合体し、無定形の構造をしていた。アモサイトでは、処理前は針状の繊維粒子が占めているが、処理後では、針状のものが球状粒子上に付着していることがわかる。ただし、針状を維持するものも多く見られた。クロシドライトは、処理前は針状からなるものがほとんどで、処理後では合体して処理されたような粒子が増えた。しかし、処理されるとは言え、完全に球状を形成するのではなく、表面だけが溶けたように見える。このようにアスベストの種類で形状変化に異なる結果が得られたものの、プラズマで溶融が可能ながわかった。

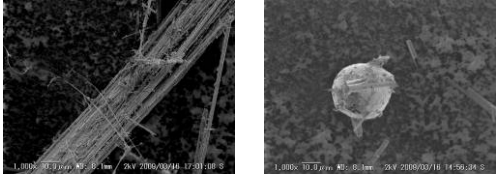
アスベストを含む廃材粒子の処理前後の SEM 写真を図3に示す。ここでは一例としてクリソタイルを含む廃材粒子の写真を示す。この廃材粒子はセメント成分が大部分を占め、この中にアスベストを含むものである。純アスベスト処理の結果と同様に、処理後では球状粒子が確認され、また粒子サイズは処理前のよりも大きくなっている。これは何個かの粒子が溶融し、合体して球状化されたためと考えられる。アモサイト含有物、クロシドライト含有物でも同様な結果が得られた。

クリソタイル

■ 10 μm



アモサイト



クロソドライト

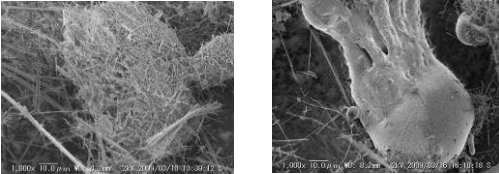


図 2 各純アスベストの処理の様子
(右図)処理前、(左図)処理後

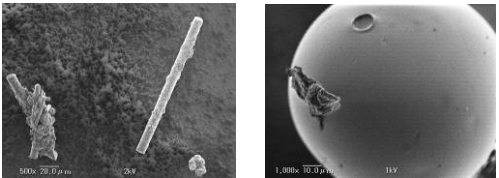


図 3 クリソタイル含有物の処理の様子
(右図)処理前、(左図)処理後

(2) XRD 分析結果

XRD による分析の結果の一例として純クリソタイルの処理前後の XRD 分析結果を図 4 に示す。クリソタイルの典型的なピークである $2\theta = 12.3$ 及び 24.5 は処理により、大幅に減少し、また新たなピークが出現していることがわかる。他の純アスベスト処理においても同様に、それらの典型的なピークが大幅に減少し、また新たなピークも出現した。このことから、SEM で観察されたような形状変化だけでなく、構造変化も引き起こされたことが示唆される。

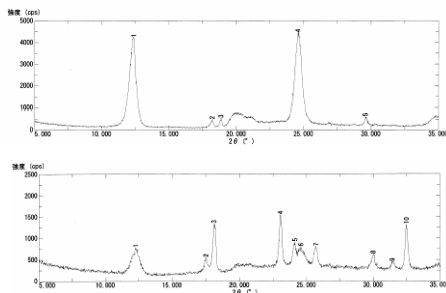


図 4 純クリソタイルの処理前後の XRD 分析
(上)処理前、(下)処理後

なお、各アスベストを含む廃材を用いた処理では、元々の含有処理量が少なく、処理前後共、アスベストの含有を示すピークが検出されなかった。

(3) 位相差顕微鏡による分析

アスベストは天然鉱物で偏光特性を持っているため、位相差・分散染色顕微鏡の観察側に偏光板を加えてこれを回転させると、分散色の発色の変化で存在を確認することができる。この方法でアスベストの残存を調べた。純クリソタイルの結果を図 5 に示す。処理前では強く紫色に光ったものが検出されているが、処理後ではこれが検出されておらず、処理による構造変化が示された。なお、他の純アスベストについては、アモサイト、クロソドライトともに、処理後も検出されたものの、その量は少なかった。一方、各アスベストを含む廃材の処理では、どのアスベストを含む粒子でも、処理後は観察されなかった。

以上、SEM、XRD、位相差顕微鏡観察から、プラズマによるアスベスト処理が可能であると言える。

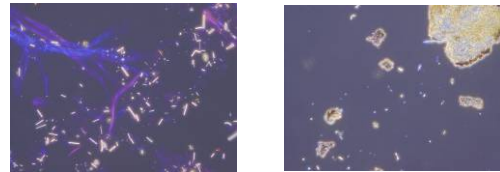


図 5 純クリソタイルの処理前後の位相差顕微鏡観察
(右図)処理前、(左図)処理後

(4) 粒子形状パラメータへの影響

投入電力 1000W、空気流量 11.11/min において粒子供給速度を変化させたときの平均の粒子形状パラメータへの影響を図 6-8 に示す。ここでは、各パラメータとも平均値の変化 (Δ) で示している。これらより、どの粒子供給速度でも平均相当径が上昇していることから、粒子が結合していることが示唆される。また、粒子供給速度の増加とともに相当径が減少し、結合しにくくなることもわかる。しなしながら、他の指標である平均円形度及び平均アスペクト比に関しては、粒子供給速度の影響は余り見られていない。

投入電力の影響では、投入電力の増加につれて平均相当径は減少し、平均円形度と平均アスペクト比は増加を示した。

図 6-8 のデータは個数平均を考慮したものであるが、例えば同じ円形度を持っていても投影面積の大きい粒子は投影面積の小さな粒子よりも球状化するために必要な熱量が大きい。そこで重量平均を考慮して、針状消失率(Fiber vanishing rate, V)を定義した。

ここで、アスペクト比を(3)式のように定義すると WHO によって定められた危険なアスベストは AR が 0~0.33 の範囲内にあるものとなるため、これを基に針状消失率(V)を次式で求めた。

$$V = \frac{\sum AR \leq 0.33 \text{を持つ粒子の投影面積}}{\sum \text{粒子の投影面積}} \times 100\% \quad (4)$$

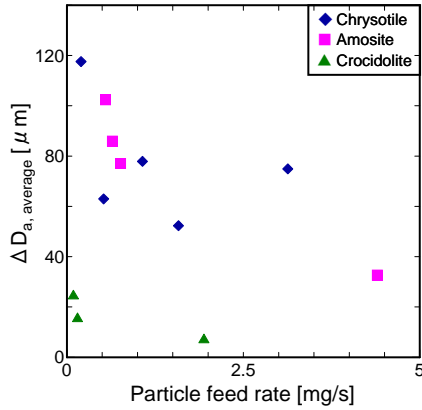


図 6 各アスベスト含有粒子の平均相当径の変化

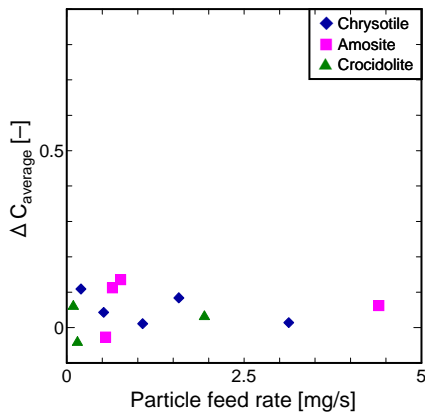


図 7 各アスベスト含有粒子の平均円形度の変化

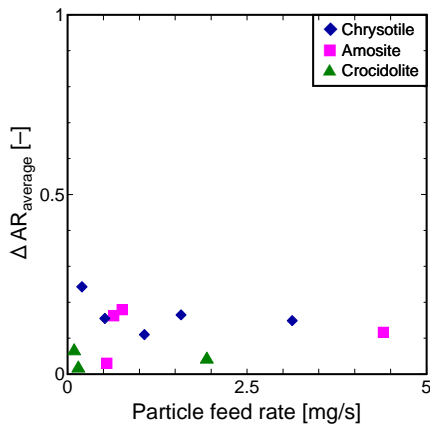


図 8 各アスベスト含有粒子のアスペクト比の変化

結果を図 9 に示す。全体的に見ると針状消失率はクロシドライトとアモサイトとクリソタイルの順に大きくなっていることが分かった。この結果は SEM や XRD 観察結果と矛盾しない。

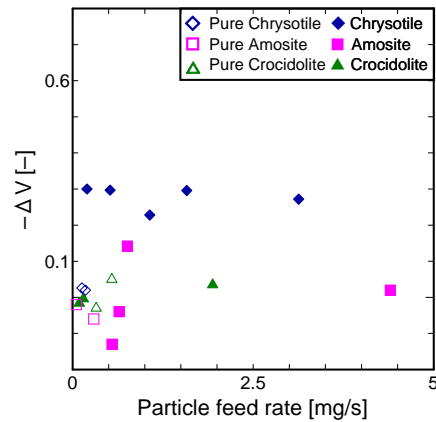


図 9 各種アスベストの針状消失率の変化

(5) 溶融球状化メカニズム

溶融球状化メカニズムとして、粒子はプラズマから熱エネルギーをもらった後、周囲の空気によって急冷される。そのため、熱処理に必要な時間は粒子の融点まで上げるための時間(t_1)と粒子が完全に溶融するための時間(t_2)となる。主な熱移動は対流伝熱であると仮定すると熱処理の必要な時間は(5)式で表せる。

$$t_1 + t_2 = \frac{1}{h} \left[\frac{\rho V C_p}{A} \ln \left(\frac{T_p - T_0}{T_p - T_m} \right) + \frac{\rho V \lambda}{A(T_p - T_m)} \right] \quad (5)$$

ここで、 ρ は粒子の密度、 V は粒子の体積、 A は粒子の表面積、 C_p は粒子の比熱、 λ は粒子の融解熱、 T は粒子の初期温度、 T_m は粒子の融点、 T_p はプラズマの温度、 h は伝熱係数である。この式の h を左辺に移項し変形すると右辺は処理物質の形状と物性値のみに依存するため、これを $\eta (=h(t_1+t_2))$ として、針状消失率との相関を取ったものを図 10 に示す。ここには、利用した試料で実験条件が比較的同じものだけをプロットしている。この図より、 η と針状消失率の間には物質に関わらず大まかな相関が見られている。そこで、この相関から、針状消失率がほぼ 1 となるための η を求めることができ、円柱形の純アスベストを想定すると、直径が $10 \mu\text{m}$ 以下のものであれば、本方法で針状を消失することができると推測された。

以上の結果から、飛散性アスベストの処理には本提案方法が有効であるといえる。

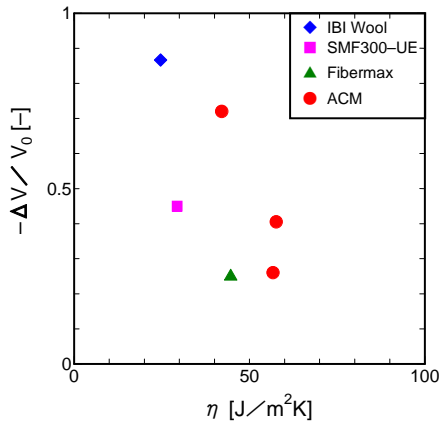


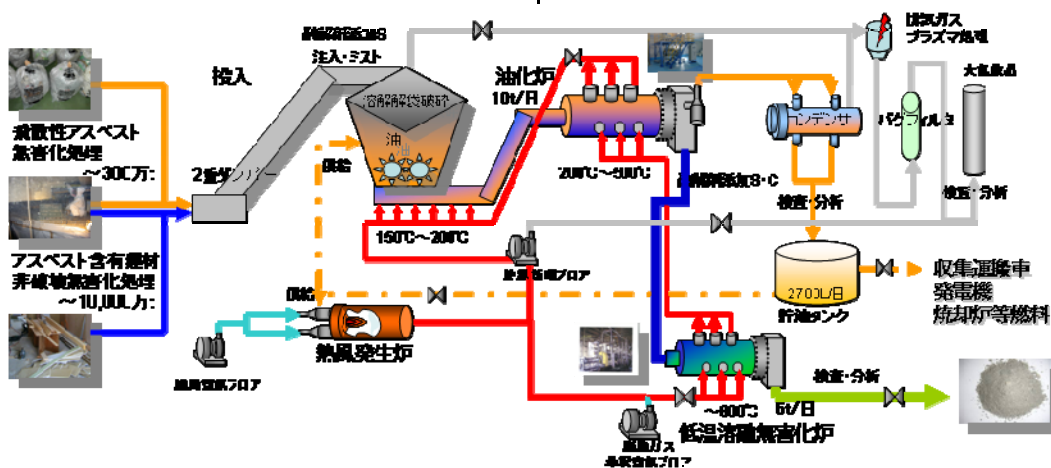
図 10 指標 η と針状消失率の相関

(6) 本処理法のアスベスト溶融システムへの適用

本研究の総括として、この処理法の適用分野を検討した。ここでは、現在、実用化が進められているロータリーキルン型アスベスト溶融処理システムを取り上げ、ここへの組み込みを検討した。想定したシステムの概略図と本処理法の適用可能位置を図 11 に示す。排ガス流量や粒子濃度を考慮すると、各排気管をまとめて最終的に大気に放出する前の、バグフィルタ前で処理することが最適と考えられた。またこの際には、生成するプラズマの活性により不純物も同時に処理できる可能性もある。特に含有が想定される炭素系物質は、酸素の追加導入により燃焼させることが可能であろう。

今後は、上述した相関の理論的導出と共に様々な実験条件での同様な相関から、最適な処理条件を決定するなど、実用化へ向けたさらなる検討が必要である。

図 8 アスベスト溶融処理システムへの導入例



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

① 関口 秀俊, A.Averroes, 坂本 佳次郎, “大気圧マイクロ波空気プラズマを用いた繊維状微粒子の処理”, 化学工学会第 75 回年会, 2010. 3. 18, 鹿児島大学

② 関口 秀俊, A.Averroes, 坂本 佳次郎, 坂本 竜二, “大気圧マイクロ波空気プラズマを用いた飛散性アスベストの処理”, 化学工学会第 41 回秋季大会, 2009. 9. 18, 広島大学

③ A.Averroes, H. Sekiguchi and K. Samamoto, “THE TREATMENT OF ASBESTOS-ALIKE CERAMIC FIBER BY USING ATMOSPHERIC MICROWAVE AIR PLASMA”, 8th World Congress of Chemical Engineering, 2009. 8. 26, カナダ・モントリオール

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 繊維状アスベスト浮遊物の処理法

発明者: 関口 秀俊、アウリア アウエルロース、坂本 竜二、坂本 佳次郎

権利者: 東京工業大学、坂本 竜二、坂本 佳次郎

種類: 特願

番号: 2009-82864

出願年月日: 2009/3/30

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関口 秀俊 (SEKIGUCHI HIDETOSHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：50226643

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし