

環境研究総合推進費補助金
循環型社会形成推進研究事業
総合研究報告書

大量に廃棄される非飛散性アスベスト含有建材の常温分解処理と再利用法の開発と研究
(3K143011)

平成 26 年度～平成 28 年度

Development and Study on the Room-temperature Decomposition and Reuse of Asbestos
Involved in Construction Materials Wasted in Large Quantities

平成 29 年 5 月

佐賀大学 田端 正明

大量に廃棄される非飛散性アスベスト含有建材の常温分解処理と再利用法の開発と研究

(3K14301)

I. 成果の概要	
1. はじめに (研究背景等)	..... i
2. 研究目的	..... i
3. 研究方法	..... ii
4. 結果及び考察	..... iii
5. 本研究により得られた主な成果	..... iv
6. 研究成果の主な発表状況	..... v
7. 研究者略歴	..... vi
II. 成果の詳細	
要旨	..... 1
1. はじめに	..... 1
2. 研究目的	..... 4
3. 研究方法	..... 6
4. 結果及び考察	..... 16
5. 本研究により得られた成果	..... 68
6. 国際共同研究等の状況	..... 70
7. 研究成果の発表状況	..... 70
8. 引用文献	..... 72
研究概要図	..... 74
英文概要	..... 75

補助事業名	環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進研究事業（平成 26 年度～平成 28 年度）
所管	環境省
研究課題名 課題番号	大量に廃棄される非飛散性アスベスト含有建材の常温分解処理と再利用法の開発と研究 3K143011
研究代表者名	田端 正明（佐賀大学）
国庫補助金	39,889,000 円（うち平成 28 年度：13,537,000 円）
研究期間	平成 26 年 5 月 30 日～平成 29 年 3 月 31 日
本研究のキーワード	アスベスト、スレート、廃棄物、無害化、地盤改良技術、地盤材料
研究分担者	勝見 武（京都大学） 乾 徹（京都大学） 庄野 章文（㈱環境アネトス） 大塚 義一（㈱奥村組）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

アスベストは、天然鉱物で、軽く、耐熱性、絶縁性、保温性、耐摩耗性、吸音性に優れており、しかも繊維状であるので、様々な形に加工され使用されてきた。日本は、特に高度成長期に、カナダ、ブラジル、アフリカから輸入し、ブレーキや断熱材や天井の結露防止剤、また、セメントと混合してスレートとして、工場や住宅の屋根や壁、駅のプラットホームに使われている（図 1）。しかし 2005 年にアスベスト含有製品を生産していた工場近辺における住民の健康被害が明らかになったことで、アスベスト被害が取り上げられ、翌年、アスベストの輸入とアスベスト製品の製造は禁止された。しかし、スレートを使った建築物の老朽化とともに、今後 4 千万トンが廃棄され、毎年 100 万トン以上の廃棄が 30 年以上続くと予想されている。スレート中のアスベストは飛散しないので安全であるが、いったん破碎されるとアスベスト繊維が飛散する恐れがある。家屋や工場の解体時や地震による建物の倒壊のたびに大気中の飛散アスベストの測定が行われている。出来るだけ早くアスベスト含有建造物を撤去し、アスベストを無害化する必要がある。

吹付アスベストの一部は 1500℃で熔融処理後、産業廃棄物処分場で埋設されている。スレート類は二重梱包状態で産業廃棄物処分場の安定型埋設地で埋めるように決められている。しかし、新たな産業廃棄物処分場の建設は困難な状況である。しかも、地震や津波、更には大雨洪水等による大規模災害時には産業廃棄物処分場の埋め立て地の不足が懸念される。従って、アスベスト含有建造物の早急な撤去とアスベストの無害化、並びに埋め立て不要のアスベストの処理法が必要である。そのためには、解体時や災害時に搬入される産業廃棄物処分場や仮置き場でも稼働可能な迅速で簡便なアスベストの分解法と、しかも、分解物の安全性を確認の上で、有用な材料として再利用する技術の開発が必要である。



図 1 スレート屋根を補修する家族（上）と地震で倒壊したスレート屋根家屋（下）

2. 研究開発目的

アスベスト含有建材のほとんどはスレートであり、改築や取り壊し、更には災害での倒壊等で、毎年、排出・廃棄されている。本研究ではスレート中のアスベストを常温で分解し、分解処理物を地盤改良材等として再利用できるようにする。そして、有害廃棄物の埋め立て不要の処理システムを構築する。このために、(1) スレートの常温分解法の確立、(2) 分解生成物の同定と安全性並びに分解反応機構の解明、(3) 大規模災害地を想定したスレート処理システムの構築と消費エネルギーの算出、(4) 処理済みアスベスト建材の再資源化技術の開発、(5) 処理済みアスベスト建材の環境安全性の評価を目的とする。

上記目的を達成するためにつぎの目標を掲げた。①処理後のアスベスト含有量が0.1%未満（環境省告示第99号第1条（無害化の条件）にする。②分解生成物を同定し環境安全性を評価する。さらに、種々の分解条件の結果に基づいて、アスベストの分解原理を明らかにする。③災害現場で発生したスレート中のアスベストの分解を確認し、災害現場で適用可能なアスベスト分解プロセスフローを確立し、装置の設計図を作成する。分解処理量を5トン/日にする。④分解処理残渣から汎用の地盤改良技術の適用により建設資材として再資源化を行う。分解処理物の物性を調べ、再資源化材の力学的安定性等の結果に基づき最適な地盤材料製造工程を確立する。⑤再資源化工程で排出される副産物および再資源化材の環境安全性を確認し、適切な加工過程の確立を図る。このように、有害廃棄物であるアスベストを安全に無害化し、処理物の再資源化を図り、埋め立て地不要の有害廃棄物処理システムを構築し、循環型社会形成に寄与する。

3. 研究方法

上記研究サブテーマを次のように分担・協力して実施した（表1）。

表1. 研究サブテーマと研究体制

研究サブテーマ	研究分担者
(1) スレートの常温分解法の研究	田端正明（佐賀大学）、庄野章文（㈱環境アネトス）
(2) 分解生成物の同定と安全性ならびに反応機構に関する研究	田端正明（佐賀大学）
(3) 大規模災害を想定したスレート処理システムと消費エネルギーの研究	庄野章文（㈱環境アネトス）、大塚義一（㈱奥村組）
(4) 処理済みアスベスト建材の再資源化技術の開発に関する研究	勝見武（京都大学）、乾徹（京都大学）
(5) 処理済みアスベスト建材の環境安全性の評価に関する研究	勝見武（京都大学）、乾徹（京都大学）

(1) サブテーマごとの研究方法

サブテーマの関連性から上記5つのサブテーマをテーマ1（サブテーマ（1）と（2））、テーマ2（サブテーマ（3））、テーマ3（サブテーマ（4）と（5））の3つに整理して報告書を作成した。

1) アスベストの常温分解と分解生成物の同定並びに分解反応機構

硫黄と消石灰に水を加え加熱してアスベスト分解剤（無機硫黄高分子（Inorganic Polymer Sulfide、IPS）水溶液）を製造した、本分解剤を非飛散性アスベスト建材（スレート）に加え、常温でボールミルと一緒に密閉攪拌した。種々の処理時間後のスレート破碎物の粉末 X 線回折（XRD）、位相差顕微鏡・分散染色法（PCM）により、分解処理物中のアスベストの残存率を求めた。また、分解物を XRD、走査型顕微鏡法（SEM）、エネルギー分散型 X 線分析（EDX）により、アスベストの分解の確認、分解生成物の同定、形状、元素組成を明らかにした。アスベストの分解は、分解時間、分解剤濃度、ボールミルの種類、スレートの破碎粒子の大きさ、を変えて実施した。分解反応を解明するために、X 線吸収端近傍構造（XANES）により分解剤に含まれる硫黄の酸化状態を決定した。さらに、液体窒素によるアスベスト分解実験を行った。

2) 大規模災害を想定したスレートの処理システムと消費エネルギー

アスベストの分解処理量が5トン/日になるような分解処理条件を決定した。それに基づいて現場に適用可能な分解フローシステムを決め、装置の設計図を作成した。装置設計図より消費エネルギーを算定し、熔融法と比較した。

3) 処理済みアスベスト建材の再資源化技術の開発および再資源化材の環境安全性の評価

分解処理残渣にセメントを添加し、汎用の回転ミキサーを用いて分解処理物の安定化処理、粒状化処理、流動化処理を行った。それぞれの製造材料の力学的特性を測定し従来の地盤改良材と比較した。さらに、製造した地盤改良材の環境安全性を、特定有害金属の溶出や硫化水素や二硫化炭素の発生について環境基準から確認した。

4. 結果及び考察

(1) アスベストの常温分解と分解生成物の同定並びに分解反応機構

アスベスト分解剤を 5%または 10%添加し、水をアスベストの 2 倍量加えて、ボールミルで回転攪拌 (50~60 rpm) した。アスベストの第 1 ピークが攪拌時間とともに減少し消失した。第 1 ピーク: クリソタイル (12.18°)、クロシドライト (10.52°)、アモサイト (29.1°)、単位、 2θ (Cu K α)。

更に、アスベストの種類毎に屈折率の異なる溶媒でアスベストを染色後位相差顕微鏡による観察でアスベストの分解を確認した: 屈折率、アモサイト (1.550)、クロシドライト (1.680)、アンソフィライト (1.618)、トレモライト・アクチノライト (1.620)。アスベストの分解はボールミルの種類に依存した。セラミックスミル (容器) でアルミナボールを用いると 21 時間でアスベストのピークが XRD と PCM とともに消失した (0.1%未満) スチール容器で鋼球では 3 時間処理でアスベストのピークが消失した。

アスベスト分解物の XRD、EDX 測定で、分解生成物は主に炭酸カルシウムの塊となっていることが分かった。分解生成物を OECD テストガイドラインに則った試験法で環境評価を行った。その結果、オオミジンコに 48 時間暴露してもミジンコの遊泳阻害は認められなかった。

アスベストの分解原理を明らかにするために、アスベストの分解処理時間毎に試料を採取し分解剤に含まれる硫黄の酸化状態を XANES 法で調べた。硫黄は $\text{CaS}_n^{m-} (-2) \rightarrow \text{S}(0) \rightarrow \text{S}_2\text{O}_3^{2-} (2) \rightarrow \text{SO}_3^{2-} (4) \rightarrow \text{SO}_4^{2-} (6)$ と反応時間とともに酸化されていることが明らかになった。括弧内の数値は酸化数を示す。アスベストの分解機構は次のように考えられる。アスベスト分解剤 IPS がアスベスト結晶間隙へ浸透し、硫黄が酸化され体積が膨張し、アスベスト結晶を歪ませる。 $\text{S}^{2-} (1.70\text{\AA}) \rightarrow \text{SO}_4^{2-} (2.44\text{\AA})$ 。歪んだアスベストがキルン内で鉄球との衝突により分解し、無定形化するメカノケミカル反応である。含水したスレートを液体窒素に浸漬しアスベスト結晶間隙水を氷結した。その後、ボールミルで同様に 10 時間処理するとアスベストは分解した。すなわち、同じようなアスベスト分解反応機構 (結晶の歪とメカノケミカル反応による分解) を支持した。アスベストの歪・分解は風化現象と類似している。

(2) 大規模災害時のスレートの処理システムと消費エネルギー

大規模災害で多量に廃棄されるアスベスト含有建材を処理するために、災害地で廃棄されるスレートの分解法と分解時間の短縮法について研究した。東日本大震災、常総市で大洪水、熊本地震の災害地で採取したスレート中のアスベストは本法で分解できた。さらに、鋼球を用いるステンレスミルでアスベストを 3 時間の処理で分解できるようになった。本法を実用化するために現場でアスベストが分解可能な可搬型アスベスト分解装置を考え、その設計図を委託作成した。処理能力が 2.4 t/3h となり、8 時間運転で 4.8 t/日 を処理できることが明らかになった。本装置の消費エネルギーは 778 MJ/2.4t である。溶融法の 1.2% に相当する。本装置を用いて、熊本地震で搬出されたスレート (1,404 t) を処理すると 584 時間かかる。1 日 6 時間の運転を想定すると 97 日を要する。

(3) 処理済みアスベスト建材の再資源化技術の開発および再資源化材の環境安全性の評価

非飛散性アスベストを含む含有建材 (スレート) の無害化処理物に対する各種土質改良技術の適用性を再資源化材の強度変形特性や環境安全性の観点から明らかにした。例えば流動化処理土においては、一般の泥土を対象とした流動化処理土と比較して、無害化処理物の保水性が高いことから同程度の W/C においては泥土の流動化処理土と比較して、ブリージングが発生しにくい、一軸圧縮強度・変形係数が大きくなる一方で、密度が小さくなる特徴を有することを確認した。また、含水比、セメント添加量を問わず W/C と一軸圧縮強さ、変形係数には良好な相関が認められたことは、処理条件の設定において有用な知見である。

また、セメント添加によって高い pH を維持することで、硫黄に由来する硫化水素や二硫化炭素の発生を抑制することができることを確認した。このことは、再資源化技術としてセメントを用いた各種地盤改良技術を適用することの優位性を裏付けるものである。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ・ これまでに分解が困難であったアスベストの分解に関して、分解剤（無機高分子溶液(IPS)）の投入とボールミル（ステンレス容器と鋼球）で3時間回転攪拌により常温でのアスベスト分解が可能となった。
- ・ 結晶物質が回転攪拌によって破碎されることは高速回転（~3000 rpm以上）でのメカノケミカル反応として知られているが、IPS共存下でボールミルの低速回転（50~60 rpm）でのアスベスト分解はメカノケミカル反応で今までにない現象である。
- ・ アスベストの分解は、結晶層間に浸透した硫黄化合物の酸化数の増大にともなうイオン半径の増大、即ち体積膨張による結晶の歪みと、歪んだ結晶のボールミル（鉄球）間および容器の壁（鉄製）との衝突による破壊であることが明らかになった。分解剤の代わりに水を加え、含水したスレートを凍結（液体窒素、-196℃）させ、上記と同様のボールミル処理でもアスベストが分解されることを確認した。本法がアスベストの廃棄物の処理法としてだけでなく、ナノ空間での化学反応を伴うメカノケミカル反応として発展すると考えている。
- ・ アスベストの常温分解法は省エネルギー型で操作が簡便であるので、大規模災害などでアスベスト建材が多量に廃棄される場合には、仮置き場や廃棄物処理場でアスベストの分解が可能となる。
- ・ 非飛散性アスベストを含む含有建材（スレート）の無害化処理物に対する各種土質改良技術の適用性を再資源化材の強度変形特性や環境安全性の観点から明らかにした。例えば流動化処理土においては、一般の泥土を対象とした流動化処理土と比較して、無害化処理物の保水性が高いことから同程度のW/Cにおいては泥土の流動化処理土と比較して、ブリージングが発生しにくい、一軸圧縮強度・変形係数が大きくなる一方で、密度が小さくなる特徴を有することを確認した。また、含水比、セメント添加量を問わずW/Cと一軸圧縮強さ、変形係数には良好な相関が認められたことは、処理条件の設定において有用な知見である。
- ・ セメント添加によって高いpHを維持することで、硫黄に由来する硫化水素や二硫化炭素の発生を抑制することができることを確認した。このことは、再資源化技術としてセメントを用いた各種地盤改良技術を適用することの優位性を裏付けるものである。

(2) 環境政策への貢献

無機硫黄電解質溶液をスレートに加え密閉容器中で回転攪拌するだけでアスベストの含有率を0.1%以下にまでに低減することができた。更に、分解生成物を、環境安全性の確認の上、原料として地盤材料を製造した。本法は次の観点において環境施策に貢献できると考える。

- ・ 操作が簡単で特別な装置を必要としないアスベスト分解法である。溶融法のような高エネルギーを必要としないので、省エネルギー型の汎用性の高いアスベスト分解法である。しかも、処理物からの有害金属の溶出もなく、オオミジンコのような弱い生物に対しても環境上安全な分解物である。
- ・ 大規模災害を想定したアスベスト分解装置のシスムの構築と分解装置の設計図を作成した。本装置の処理能力は2.4トン/3h（4.8トン/日）である。消費エネルギーは、溶融法の1.2%である。従って、本装置は規模災害時のスレート仮置き場や産業廃棄物処理場でのアスベストの分解処理が可能と考える。
- ・ 無害化処理の再利用技術として汎用の機械を用いる、安定化処理、粒状化処理、流動化処理技術が適用可能であることを明らかにした。製造した処理土の強度変形特性は一般的な地盤改良材と比較して同等であることも確認した。このことは、無害化処理過程から発生した残渣を地盤材料として有効利用ができることを裏付けるものであり、処理プロセスからの廃棄物の発生を削減するものである。
- ・ 安定処理や流動化処理技術を適用することにより、残渣を高含水比の状態でも有効利用することが可能になる。よって、脱水処理、および脱水に伴い発生する排水の処理が不要となるため、本無害化処理技術のコストや投入エネルギーの削減、現場完結型の処理の実現に寄与すると考えられる。
- ・ アスベストの簡易分解と分解物の地盤改良技術の適用により、埋め立てによらないアスベストの分解と再利用法として本技術は環境施策に貢献すると考えている。また、分解物並びに再利用材料は環境基準を満たすことを確認した。

<行政が既に活用した成果>

本研究は着手してから3年しか経ていないので研究成果の活用はまだなされてない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

アスベストの常温分解法はユニーク処理法で省エネルギー型であり、処理物は地盤材料として活用されるので、循環型社会における有害廃棄物の在り方を示す例と考える。従って、今後実用化試験結果を経て行政が活用されることを期待する。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付論文>

- 1) M. TABATA, A. SHONO and A. Ghffar: *J. Mat. Cycl. Wast. Manag.*, 18, 483-492 (2016).
“Decomposition of Asbestos by a Supernatant Used for Immobilization of Heavy Metals in Fly Ash.”
- 2) 乾 徹、篠原智志、諸富鉄之助、勝見 武、高井敦史、水野克己：第 12 回地盤改良シンポジウム論文集、pp.331-336 (2016).
“非飛散性アスベスト含有建材無害化処理物の含水比に応じたセメント改良技術の適用性”

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) M. TABATA and A. SHONO: *Proceedings of The 2nd 3R International Conference*, Daejeon, Korea, 69-72 (2015).
“The Reuse of Supernatant after Metal Treatment in Fly Ash for Decomposition of Asbestos.”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) S. Shinohara, T. Inui, T. A. Takai, and T. Katsumi: *Geo-Environmental Engineering 2015 -Proceedings of the 14th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering*, (2015), on USB.
“Improvement of sludge generated from mechano-chemical treatment of waste slate containing non-scattering asbestos.”
- 2) T. Morotomi, T. Inui, A. Takai, and T. Katsumi: *Geo-Environmental Engineering 2016*, Nantes National University, Nantes, France, June 2-3, 2016, on USB.
“Mechanical properties of liquefied stabilized sludge generated from mechano-chemical treatment of waste slate.”

(2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) 田端 正明、庄野 章文：第 25 回廃棄物資源循環学会（2014）
「飛灰処理残渣液を用いる重金属不溶化とアスベスト分解に関する研究」
- 2) M. TABATA and N. Gundawardhana: The 2nd International collaboration research symposium o Sri Lanka and Japan, December, Kandy, Sri Lanka, 2014
“Decomposition of Asbestos at Room Temperature by Using Calcium Polysulfide. ”
- 3) M. TABATA and A. SHONO: 第 94 回日本化学会春季年会（2015）
“Decomposition of Asbestos by Using an Insolubilization Agent of Heavy Metals under Room Temperature.”
- 4) 篠原智志、乾 徹、高井敦史、勝見武：平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会（2015）
「非飛散性アスベスト含有建材無害化処理残渣の地盤材料としての適用性」、講演概要集、土木学会関西支部、III-16
- 5) 田端正明、庄野章文：第 26 回廃棄物資源循環学会（2015）
「アスベスト常温分解法の分解機構に関する研究」
- 6) M. TABATA, A. SHONO and A. Ghaffar: *The 2nd 3R International Conference*, Daejeon, Korea, 69-72, 2015.
“The Reuse of Supernatant after Heavy Metal Treatment in Fly Ash for Decomposition of Asbestos.”
- 7) 篠原智志、乾 徹、高井敦史、勝見武：第 50 回地盤工学研究発表会（2015）
「非飛散性アスベスト含有建材の無害化処理過程で排出される高含水比残渣に対する地盤改良技術の適用性」平成 26 年度発表講演集、pp.2401-2402
- 8) M. TABATA and A. SHONO: 第 96 回日本化学会春季年会（2016）
“Mechanochemical Decomposition of Asbestos involved in Slates in the Presence of Calcium Polysulfide.”
- 9) 田端正明、庄野 章文：第 65 回日本分析化学会年会（2016）

「災害時に発生するスレート建材中のアスベストの分析とその簡易分解法の研究」

10) M. TABATA, A. SHONO and S. UEDA: Asianalysis, Chiang Mai, Thailand, December, 8-11, 2016, 2016.

“Determination and Decomposition of Asbestos in Slates Scattered by Kumamoto Earthquake, April, 2016.”

11) M.TABATA and A. SHONO: 第 97 回日本化学会春季年会、(2017)

“Determination of Asbestos in Construction Materials Scattered by Kumamoto Earthquake and its Safety Treatment.”

12) 諸富鉄之助、乾 徹、高井敦史、勝見武：平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会(2016)

「非飛散性アスベスト含有建材無害化処理残渣の流動化処理土への適用性」講演概要集、土木学会関西支部、III-29

13) 諸富鉄之助、乾 徹、高井敦史、勝見武：第 51 回地盤工学研究発表会 (2016)

「非飛散性アスベスト含有建材の無害化処理過程で排出される高含水比残渣を用いた流動化処理土の強度変形特性」、平成 28 年度発表講演集、地盤工学会、pp.555-556

7. 研究者略歴

研究代表者：田端 正明

名古屋大学大学院理学研究科修士課程修了、理学博士、佐賀大学教授、現在、佐賀大学大学院工学系研究科客員研究員

研究分担者

1) 勝見 武

京都大学大学院工学研究科修士課程修了、博士（工学）、現在、京都大学大学院地球環境学堂教授

2) 乾 徹

京都大学大学院工学研究科修士課程修了、博士（工学）、現在、京都大学大学院地球環境学堂准教授

3) 大塚 義一

京都大学大学院地球環境学舎博士後期課程修了、博士（地球環境学）、現在、(株)奥村組土木本部土木統括部環境技術室長

4) 庄野 章文

日本大学農獣医学部卒業、学士、現在、(株)環境アネトス 取締役代表

3K143011 大量に廃棄される非飛散性アスベスト含有建材の常温分解処理と再利用の開発と研究

[要旨]

大規模災害時におけるアスベスト被害を少なくし、しかも埋立処分不要の非飛散性アスベスト含有建材（スレート）の無害化処理法と処理物の再利用を可能とするために、硫黄と消石灰からアスベスト分解剤（IPS）を合成し、それを用いてスレート中のアスベスト常温分解法と分解処理物の再利用法の技術開発と研究に取り組み次の成果を得た。

- (ア) IPS を非飛散性アスベスト建材（スレート）に加え、常温で磁製ボールあるいは鋼球と一緒に磁製またはステンレスミル内で回転攪拌（50～60 rpm）した。鋼球・ステンレスミルを用い3時間処理でアスベストのピークは消え残存率は0.1%未満となった。
- (イ) 分解生成物は主に炭酸カルシウムの塊となった。分解生成物を OECD テストガイドラインに則った試験法で、分解生成物はオオミジンコに 48 時間暴露してもミジンコの遊泳阻害を示さなかった。
アスベストの分解は、アスベスト分解剤 IPS がアスベスト結晶間隙へ浸透し、硫黄が酸化され体積が膨張し、アスベスト結晶を歪ませる。 S^{2-} (1.70Å) \rightarrow SO_4^{2-} (2.44 Å)。歪んだアスベストがキルン内で鋼球との衝突により分解し無定形化するメカノケミカル反応である。
- (ウ) アスベストの分解処理量が 5 トン/日になるような分解処理条件を決定した。それに基づいて現場に適用可能な分解フローシステムを決め、装置の設計図を作成した。装置設計図より消費エネルギーを算定し熔融法と比較した。また、熊本地震で搬出されたスレートの処理時間を計算した。
- (エ) 分解処理残渣にセメントを添加し、汎用の回転ミキサーを用いて分解処理物の安定化処理、粒状化処理、流動化処理を行った。それぞれの製造材料の力学的特性を測定した結果、従来の地盤改良材と比較して、軽量埋め戻し材、粒化材、流動化処理材として適していることが明らかになった。
- (オ) 製造した地盤改良材からの特定有害金属の溶出は認められなかった。また、硫化水素は検出限界以下であり、二硫化炭素は検出限界であった。

1. はじめに

(1) アスベスト含有建材の現状

アスベストは、天然鉱物で、軽く、耐熱性、絶縁性、保温性、耐摩耗性、吸音性に優れており、しかも繊維状であるので、様々な形に加工され使用されてきた。日本は、特に高度成長期に、カナダ、ブラジル、アフリカから輸入し、ブレーキや断熱材や天井の結露防止剤、また、セメントと混合してスレートとして、工場や住宅の屋根や壁、駅のプラットホームに広く使われている（図 1 (a)）。しかし 2005 年にアスベスト含有製品を生産していた工場近辺における住民の健康被害が明らかになったことで、アスベスト被害が取り上げられ、翌年、アスベストの輸入とアスベスト製品の製造は禁止された。スレート中のアスベストは飛散しないので安全であるが、いったん破砕されるとアスベスト繊維が飛散する恐れがある。家屋や工場の解体時や地震による建物の倒壊

(図 1 (b)) のたびにアスベストの飛散が問題となり、大気中の飛散アスベストの測定が行われている。出来るだけ早くアスベスト含有建造物を撤去し、アスベストを無害化する必要がある。スレートを使った建築物の老朽化とともに、今後 4 千万トンが廃棄され、毎年 100 万トン以上の廃棄が 30 年以上続くと予想されている (図 1 (c))。

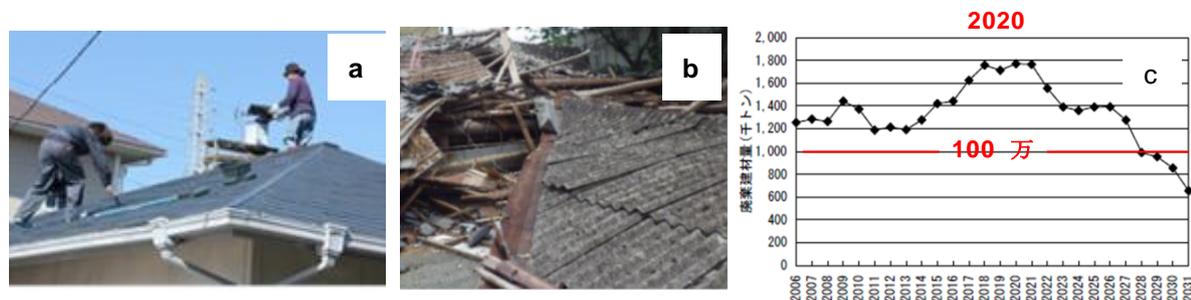


図 1 (a) スレート屋根を手入れする家族、(b) 地震で倒壊したスレート屋根、
(c) アスベスト廃棄予想量

(2) アスベストの分解処理法の現状

吹付アスベストの一部は 1500℃で熔融処理後、産業廃棄物処分場で埋設されている。スレート類は二重梱包状態で産業廃棄物処分場の安定型埋設地で埋めるように決められている。しかし、新たな産業廃棄物処分場の建設は困難な状況である。しかも、地震や津波、更には大雨洪水等による大規模災害時には産業廃棄物処分場の埋め立て地の不足が懸念される。従って、アスベスト含有建造物の早急な撤去とアスベストの無害化、並びに埋め立て不要のアスベストの処理法が必要である。そのためには、解体時や災害時に搬入される産業廃棄物処分場や仮置き場でも稼働可能な迅速で簡便なアスベストの分解法と、しかも、分解物の安全性を確認の上で、有用な材料として再利用する技術の開発が必要である。

1500℃での熔融処理がアスベストの分解法として推奨されているが¹⁾、それ以外には、水蒸気加熱法²⁾やマイクロウェーブ法^{3), 4)}、化学的な方法として H₂SO₄⁵⁾や HF, HCl⁶⁾を用いる方法が研究されている。表 1 には現在行われているアスベストの分解法との費用の概算をまとめた。現在ほとんどのアスベスト含有建材は安定型最終処分場で埋設されているので、処分場での埋設に替わるアスベスト処理法を推進するには、アスベストの分解費用が埋め立て費用より安いと同程度が望ましい。

表 1 アスベストの分解法と費用

企業名等	処理方式	1t 当たりの料金の目安
カワサキプラント システムズ	プラズマ熔融炉	20 万円前後
日本環境保全	表面熔融炉	5 万～15 万円
群馬高専小島教授ら	塩類による分解	5 万円以下
クボタ松下電工外装	マイクロ波加熱炉	2 万～3 万円
米 ARI テクノローズ	熱化学変換法	約 300 ドル (米国実績)
安定型最終処分場	埋め立て	1～3 万円

(3) 分解処理物の再利用法の背景

本研究課題においては、スレート建材に代表される非飛散性アスベスト含有建材の建設現場でも実施可能な無害化処理技術として、電解質硫黄溶液と一般的な破碎設備を用いたメカノケミカルの処理方法⁷⁾の確立を主たる研究目的としている。この提案方法による処理過程においては、建材を湿式破碎しながら電解質硫黄溶液と反応させることから、無害化処理後には細粒化されたスレート建材を主成分とする含水比が約 200%の高含水比残渣が排出される(図 2)。当該技術が現場内で実施可能であり、かつ埋立処分の代替技術として開発されていることを鑑みると、発生した残渣を処分せずに、無害化処理過程と一連の処理過程の中で再資源化して現場内で建設資材として有効利用することが望ましい。



図 2 高含水比残渣の外観

しかしながら、高含水比の細粒分主体の残渣を建設資材としてそのまま用いることが困難であり一定の強度や耐久性を保持するように適切な処理が必要となる。さらには、現場内で実施される無害化処理との一連の過程として再資源化処理を組み込み、現場内で汎用機材を使用して実施可能な処理とするためには、汎用の土質改良技術(含水比低下、粒度調整、安定処理等)を適用した再資源化を行い、地盤材料として利用することが有望であると考えられる。

一方、処理済み建材の特徴である高含水比材料への土質改良技術の適用という観点からは、添加する改質材(セメント等)と製造される再資源化材の量を最小化するためには、乾燥による収

縮や団粒化による改質材の混合不良が生じない範囲で含水比を低下させることが望ましいが、現場や工程上の制約によっては高含水比の状態でも迅速な再資源化が要求される場合もあり、残渣の含水比状態に応じた再資源化技術を確立することが重要となる。

さらには、製造した再資源化材の品質の観点からも再資源化技術の適用性を検討することは重要である。再資源化材の力学的特性の観点からは、要求される強度、支持力を確保することに加え、長期的な強度変形特性の観点からの検討も重要となる。特に、高含水比状態で処理を行った場合、再資源化材の間隙比が相対的に大きくなることから、粒子破碎やクリープ変形等によって長期的に過大な変形が発生することが懸念されるため、その評価が重要となる。一方、環境安全性の観点からは、地盤材料としての利用にあたって土壌溶出量および土壌含有量が基準値以下であることに加え、無害化処理過程で利用する電解質硫酸溶液の硫酸分由来する硫化水素等の有害ガスの発生ポテンシャルについて評価を行う必要がある。

2. 研究目的

アスベスト含有建材のほとんどはスレートであり、改築や取り壊し、更には災害での倒壊等で、毎年、排出・廃棄されている。本研究ではスレート中のアスベストを常温で分解し、分解処理物を地盤改良材等として再利用できるようにする。そして、有害廃棄物の埋め立て不要の処理システムを構築する。このために、(ア) スレートの常温分解法の確立、(イ) 分解生成物の同定と安全性並びに分解反応機構の解明、(ウ) 大規模災害を想定したスレート処理システムの構築と消費エネルギーの算出、(エ) 処理済みアスベスト建材の再資源化技術の開発、(オ) 処理済みアスベスト建材の環境安全性の評価を目的とした。

上記目的を達成するためにつぎの目標を掲げた。①処理後のアスベスト含有量が0.1%未満（環境省告示第99号第1条（無害化の条件）にする）。②分解生成物を同定し環境安全性を評価する。さらに、種々の分解条件の結果に基づいて、アスベストの分解原理を明らかにする。③災害現場で発生したスレート中のアスベストの分解を確認し、災害現場で適用可能なアスベスト分解プロセスフローを確立し、装置の設計図を作成する。分解処理量を5トン/日にする。④分解処理残渣から汎用の地盤改良技術の適用により建設資材として再資源化を行う。分解処理物の物性を調べ、再資源化材の力学的安定性等の結果に基づき最適な地盤材料製造工程を確立する。⑤再資源化工程で排出される副産物および再資源化材の環境安全性を確認し、適切な加工過程の確立を図る。このように、有害廃棄物であるアスベストを安全に無害化し、処理物の再資源化を図り、埋め立て地不要の有害廃棄物処理システムを構築し、循環型社会形成に寄与する。

本研究は5のサブテーマから構成されているが、サブテーマの関連性から上記5つのサブテーマをテーマ1（サブテーマ（ア）と（イ））、テーマ2（サブテーマ（ウ））、テーマ3（サブテーマ（エ）と（オ））の3つに整理して報告書を作成した。

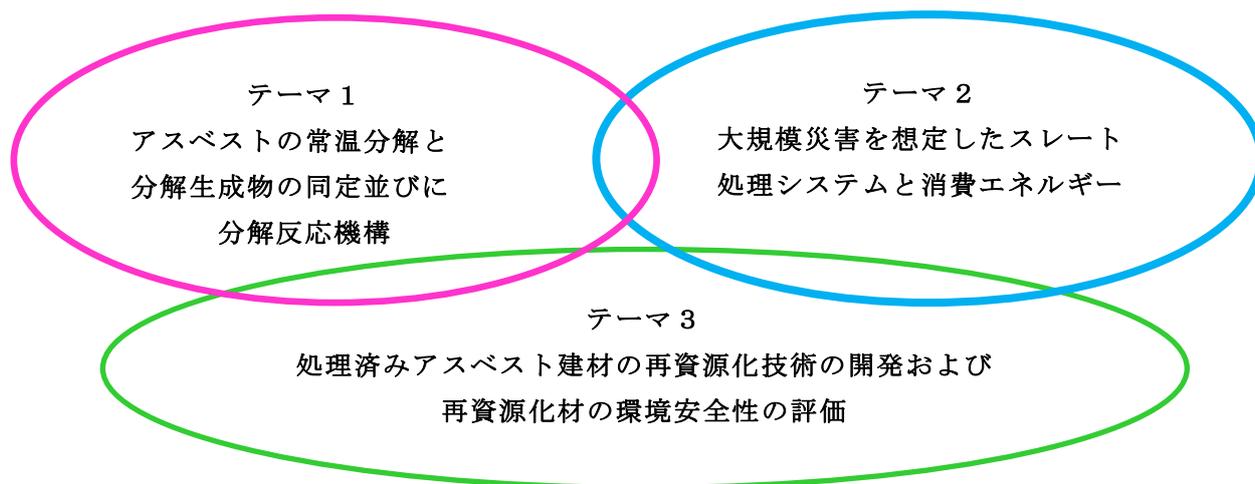


図3 報告書で整理された3つのテーマ

●テーマ（1）の目的

本研究課題の目的は硫黄と消石灰から製造した無機硫黄高分子電解質溶液（IPS）を用いて、アスベストを分解することである。しかし、表1に示すように種々のアスベストの分解法が提案されている。これに替わる分解法を提案しそれらが普及されるには、次の種々の基準や条件をクリアしなければならない。①環境基準として定めてあるアスベスト無害化の条件(含有率0.1%以下)を満たなければならない。そのために、種々の条件でアスベストを分解し基準を満足する最適なアスベストの分解条件を設定する。②分解生成物は、安全でかつ分解物からの溶出物は環境基準以下であり、更にOECDテストガイドラインに則った試験に合格したものでなければならない。③また、分解原理も明確にされなければならない。実験結果に裏付けされた明確なアスベスト分解機構でなければならない。これらの目的を達成するために以下に述べる種々の実験を行った。

●テーマ（2）の目的

災害時に大量に発生するアスベスト含有建材を無害化処理することが本研究の目的でもある。従って、処理量、処理時間、処理エネルギー（費用）、装置の汎用性、災害地での稼働性を満足できるものでなければならない。そのために、①出来るだけ短い時間で分解できる条件を設定する。②5トン/日を処理できる装置を設定する。③災害地でアスベストの分解が可能なおに移動可能な装置とする。④処理工程は安全で、アスベストが飛散しないような装置とする。⑤簡単な操作で、できるだけ簡単な工程でアスベストが分解されるようにする。これらを達成することが、サブテーマ（2）の目的である。

●テーマ（3）の目的

本テーマにおいて提案する高含水比処理残渣の再資源化技術の概念を図4に示す。

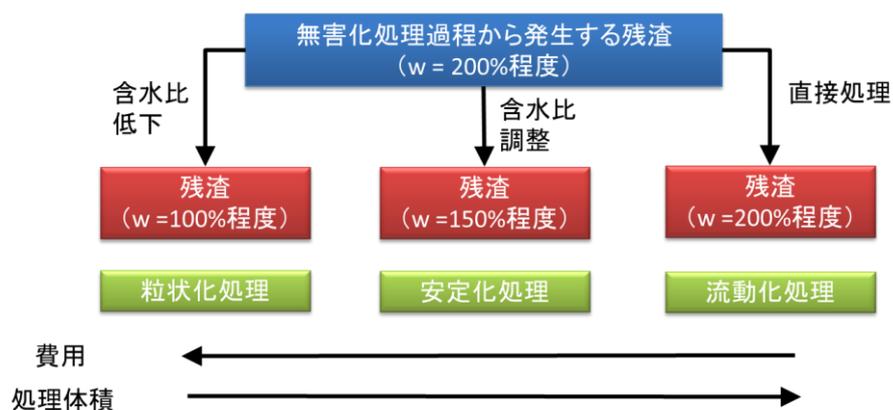


図4 本研究で提案する高含水比残渣の再資源化技術

図4に示すように、流動化処理、安定処理、粒状化処理という3種類のセメントによる地盤改良技術の適用性を評価した。これらの処理は現場において残渣の含水比や脱水処理の実施状況によって選択することを想定しており、粒状化処理では脱水や乾燥を実施する場合、流動化処理・安定処理は脱水処理を実施しない、もしくは含水比調整程度を実施する場合に適用することを想定している。脱水処理としては風乾や天日乾燥を含めた熱処理とフィルタープレス等を用いる機械処理が考えられるが、機械脱水を実施した場合には残渣が固結することによってセメントの混合性が低下すること、さらには濁水・排水の水質モニタリングと必要に応じた排水処理が必要になることを考慮すると、熱処理の適用が妥当であると考えられる。

本サブテーマにおける検討においては、上記3種類の処理によって製造した再資源化材を対象に、その物理特性および強度変形特性の評価を通して、各処理の適用性および適切な処理条件の選定を行った。さらに、特に間隙比が大きい流動化処理土を対象に一定荷重が長期間作用した際の変形特性（クリープ変形特性）の評価を行い、一般的なセメント改良土の変形特性との比較を行った。さらに安定処理により製造した再生資材を対象に、処理に用いる硫黄に由来する有害ガス発生ポテンシャルの抑制効果、および建材に含まれる微量重金属等の溶出抑制の観点からも改良技術の適用性を検討した。

3. 研究方法

(1) アスベストの常温分解と分解生成物の同定並びに分解反応機構（テーマ1）

1) アスベスト分解剤の製造

硫黄（270 g）と消石灰（100 g）と水（20 L）を混合し、圧力密閉容器内で5～6気圧、130～150℃で15分から20分間加熱して製造した。本溶液は図5（a）のように赤色の透明な水溶液である。動的光散乱法とゼータ電位測定により、負電荷（-93.4 mV）を帯びた8.2 μmの粒子の溶液であることが分かった（図5（b）、（c））。従って、本溶液を以下無機硫黄高分子電解質溶液（Inorganic Polymer Sulfide, IPS）と呼ぶ。本溶液はまた重金属を不溶化する機能を有する。

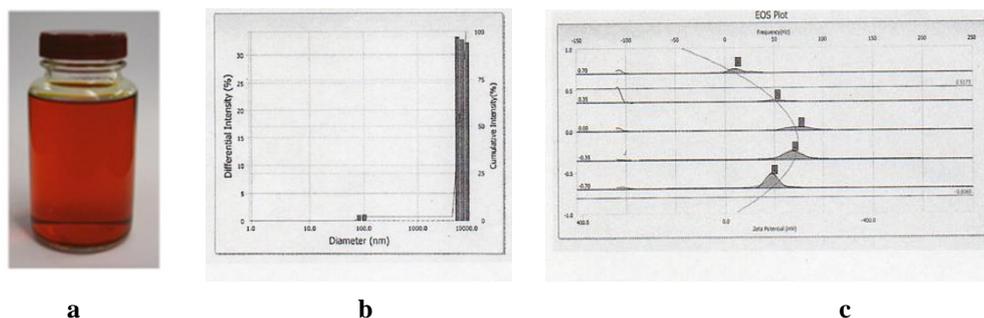


図5 IPS 溶液 (a) とその溶液中の粒子径 (b) と電荷 (c)

2) スレートの破碎

スレートを分解処理前にスレートをハンマークラッシャー (三庄インダストリー (株)、形式 H-34、回転数 3450 rpm) で 2 秒間破碎し、破碎粒子を $\Phi < 0.3$ mm、 $\Phi = 0.3 \sim 0.6$ mm、 $\Phi = 0.6 \sim 1.0$ mm、 $\Phi = 1.0 \sim 1.4$ mm、 $\Phi = 1.4 \sim 2.8$ mm、 $\Phi = 2.8 \sim 5.6$ mm、 $\Phi = 5.6 \sim 11.2$ mm、 $\Phi = 11.2 \sim 20.0$ mm に篩分けした。粒子径分布を図 6 に示す。

破碎したスレート中のアスベスト含有量を粉末 X 線回折法 (XRD) および位相差顕微鏡・分散染色法 (PCM) で求めた (表 2)。スレート中のアスベスト含有量は破碎によっても減少し、破碎粒子の大きさに依存した。しかし、0.6 mm の破碎粒子でも 1.5 % のアスベストを含み、アスベスト無害化基準 (0.1 % 未満) 以上であった。

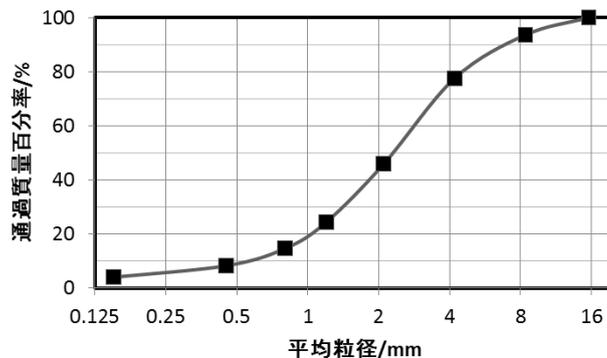


図6 分解処理前のスレート破碎粒子の大きさ分布

表2 分解処理前のスレート中のアスベスト含有量

試料 試料番号 大きさ	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子数中)		含有率 %	備考	
	アスペクト比 3 以上	アスペクト 比 3 以下			
スレート (67)	5mm~20.0mm	29	3	5.4	原試料
68	5mm 以下	19	3	5.0	破碎試料
69	5mm~0.6mm	4	0	3.4	破碎試料
70	0.6mm 以下	4	0	1.5	破碎試料

3) スレート中のアスベストの常温分解法

アスベスト分解剤（IPS）を試料重量の2%、5%、10%になるように加え、更に水を試料重量の3倍加えた。ボールミルを用いてスレートを磁球または鋼球ボールと一緒に、磁製ミルまたはステンレスミル内で一定時間回転攪拌した。小型ミル（16 L、直径 280 mm）では 50～60 rpm、大型スチールミル（900 L、直径 900 mm）では 50 rpm の回転で分解処理した（図 7）。ボールの大きさは直径が 20～30 mm である。ボールやミル容器の種類、ボールの大きさとその混合比を変え、種々の処理時間（3、6、9、12、15、21、48 時間）でアスベストを分解した。また、処理するスレートの大きさを変えて（5 mm～0.6 mm、0.6 mm 以下）分解した。また、汎用分解装置としてモルタルミキサーを用いてアスベストの分解も行った。表 3 に、用いた装置と条件をまとめて示す。

表 3 アスベスト分解剤装置と分解条件^{a)}

装置名	大きさ (容積/L、直径/mm)	ボールの種類、 量 (大きさ、Φ /mm)	試料量	IPS 溶液量	水の量	ミルの 回転数 /rpm
小型磁製ミル	16 L、280	アルミナ 6 kg (Φ = 20~10)	300～500 g	試料重量の 2.0～10.0 %	試料重量 の 3 倍	50～60
小型ステンレス ミル	8.2 L、 300	鋼球 12 k g (Φ = 20) 2 k g (Φ = 10)	300～500 g	試料重量の 2.0～10.0 %	試料重量 の 3 倍	50～60
大型スチール ミル	900 L 900	鋼球 1.5t (Φ = 20)	50～150 kg	試料重量の 2.0～10.0 %	試料重量 の 3 倍	50
モルタル ミキサー	72 L 600	アルミナ 6 kg (Φ = 20~10)	8 kg	試料重量の 2.0、5 %	試料重量 の 2 倍	45

a) 分解は室温で行った。



図 7 アスベスト分解用：小型磁製ミル (a)、小型ステンレスミル (b)、大型スチールミル (c)、モルタルミキサー (d)

4) アスベストの分解の確認と分解物生成物の同定

分解処理後のアスベストの残存率を偏光顕微鏡・分散染色法 (PCM) と粉末 X 線回折法 (XRD) で求めた。アスベストの有無は JIS A 1481-2 (建材製品中のアスベスト含有の有無を測定する定性的判定法) および JIS A 1481-3 (建材製品中のアスベスト含有の有無を判定する定量分析) に従った。PCM 法による標準アスベストの検出例を図 8 に示す。また、アスベストの分解前後の形状と大きさおよび元素組成を走査型顕微鏡法 (SEM) とエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) により明らかにした。同時に XRD と EDX により分解生成物の同定を行った。更に、アスベスト分解生成物の環境評価を OECD テストガイドラインに則った試験法であるオオミジンコを用いる 48 時間急性遊泳阻害実験で行った。

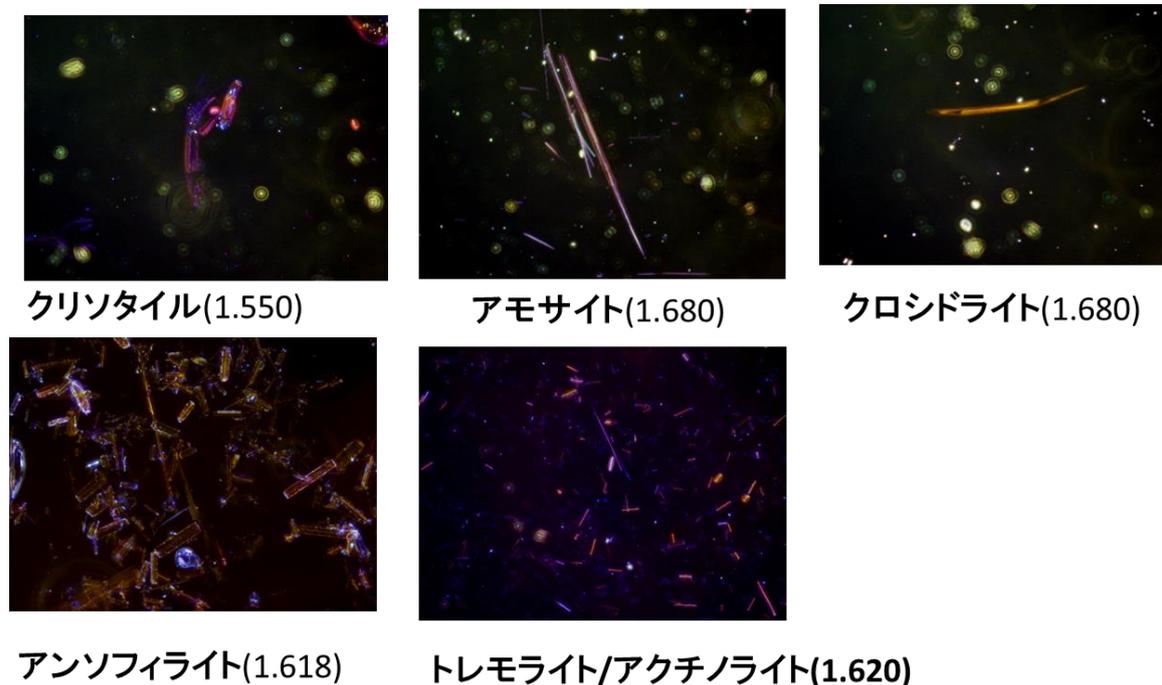


図 8 標準アスベストの位相差顕微鏡・分散染色分析法の結果。
括弧内の数値は用いた溶媒の屈折率を示す。

5) アスベスト分解反応機構

アスベスト分解剤である IPS 溶液中には硫黄化合物が含まれている。アスベストに分解に硫黄化合物がどのように関与しているかを知るために、分解処理時間毎に試料を採取し試料中の硫黄の酸化状態を X 線吸収端近傍構造 (XANES) 法 (図 9、10) により調べた。硫黄の軟 X 線吸収端エネルギーは 2.47~2.48 keV 付近に表れるので、測定は空気の影響をうける。そのために試料室をヘリウムガス中で置換して行った。

さらに、IPS を加えないでスレートの水に 1 時間浸漬後スレートを取り出し、液体窒素を加えて 1 時間放置した。その後磁製ボールミルでアスベストを分解した。同様に液体窒素処理したスレートに IPS を加えてアスベストの分解処理を行った。通常の IPS 添加によるアスベスト分解と液体窒素処理によるアスベスト分解に基づいて反応機構を検討した。

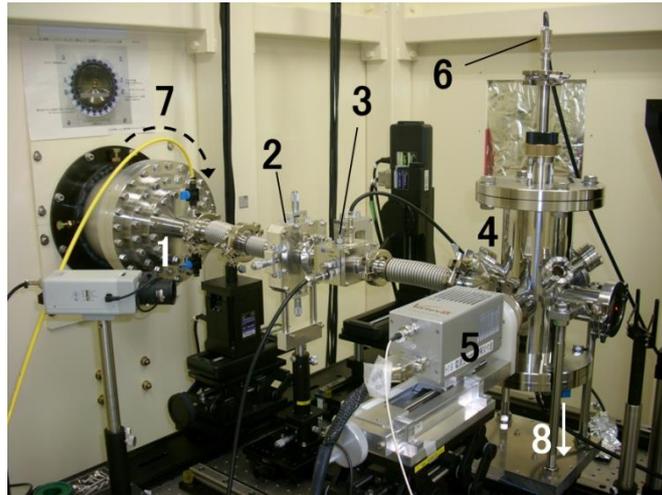


図9 X線吸収端近傍構造（XANES）分光法軟X線領域測定装置（佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター、BL11）1、X線ビームダクト；2、スリットチャンバー；3、イオンチャンバー（I0）；4、測定試料室；5、シリコンドリフト検出器（SDD）；6、電流測定端子；7、Heガス入口；8、Heガス出口

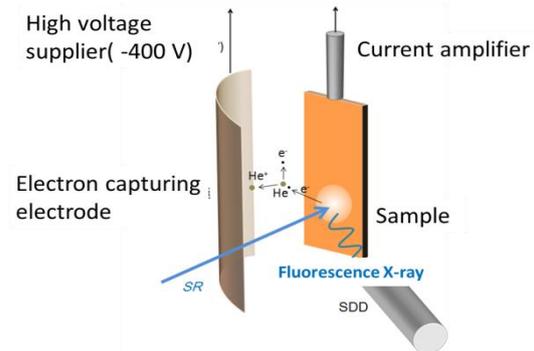
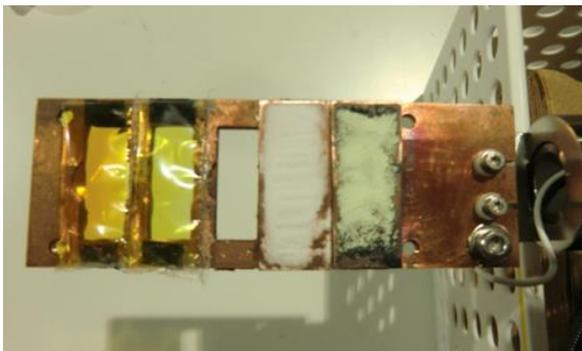


図10 試料ホルダーと検出器（蛍光収量検出器と転換電子収量検出器からなる）

（2）大規模災害を想定したスレートの処理システムと消費エネルギー（テーマ2）

大規模災害が発生した地域（東日本東北、常総市、熊本県、新潟県糸魚川市）でアスベスト含有建材を採取し、アスベストの含有量とアスベストの分解を行った。アスベストの最適分解条件を基に、災害時に適用が可能な指標である分解処理量5トン/日になるようにアスベスト分解工程を決定した。それに基づいて現場に適用可能な分解フローシステムを決め、装置の設計図を作成した。装置設計図より消費エネルギーを算定した。

（3）処理済みアスベスト建材の再資源化技術の開発および再資源化材の環境安全性の評価（テーマ3）

テーマ3の研究開発目的を達成するために、流動化処理、安定処理、粒状化処理を適用した無害化処理物を対象に各種室内試験を実施した。以下に、使用材料、室内試験方法を示す。

1) 使用材料

本実験で用いた試料は、スレート建材をボールミル等でおおよそ 50 mm 以下に粗砕した後、建材の質量比 5% の無機硫黄電解質溶液と約 200% の水を添加し、金属製球を投入して回転、湿式破碎を行い、分解反応を促進させた。なお、破碎時間は 48 時間である。

図 11 に処理物 2 の外観（輸送のため含水比を 80% 程度に低下させた状態）と各処理物の粒径加積曲線、表 4 に処理物の基本物性、表 5 に処理物を対象に実施した土壌溶出量試験と土壌含有量試験の結果を各基準値と比較したものをそれぞれ示す。異なる時期に処理を行った処理物 1（初期アスベスト（クリソタイル）含有量 5.0%）、処理物 2（同 5.4%）を実験においては使用しているが、処理によりアスベスト含有率がいずれも検出限界（0.1%）以下になっていることを確認している。処理時期によって処理対象とした建材の物性、破碎装置の仕様が異なることから処理物の粒度分布が図 11 に示すように大きく異なっているが、いずれも液・塑性限界が高く細粒分含有率が高い特徴を有している。

表 5 に示す第 2 種特定有害物質 9 項目の土壌溶出量については、処理物 1 のセレンの土壌溶出量のみが基準値を超過している。また、ふっ素とほう素の溶出と含有が認められるが、いずれも基準値以下となっている。一方、土壌含有量についてはいずれも基準を満たしていることから、処理によって各物質の土壌溶出量を抑制することができれば地盤材料として利用可能であると判断できる。

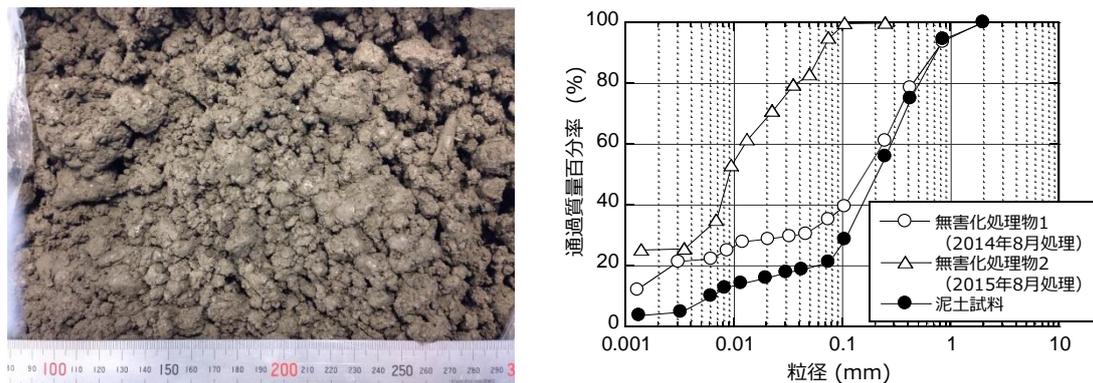


図 11 使用した無害化処理物の外観と粒径加積曲線

表 4 無害化処理物の基本物性

項目	単位	処理物 1	処理物 2
土粒子密度	g/cm ³	2.75	2.68
液性限界	%	139.8	89.3
塑性限界	%	96.2	57.4
塑性指数		43.6	31.9
pH		11.1	8.8
強熱減量	%	-	30.0
化学組成			
CaO	%	-	64.0
Fe ₂ O ₃	%	-	23.7
SiO ₂	%	-	5.4
SO ₃	%	-	4.7
Others	%	-	2.2

表 5 無害化処理物の土壌溶出量・含有量

物質名	処理物 1		処理物 2		参考：基準値	
	土壌溶出量 (mg/L)	土壌含有量 (mg/kg)	土壌溶出量 (mg/L)	土壌含有量 (mg/kg)	土壌溶出量 (mg/L)	土壌含有量 (mg/kg)
カドミウム	0.001 未満	5 未満	0.001 未満	5 未満	0.01 以下	150 以下
六価クロム	0.02 未満	5 未満	0.02 未満	5 未満	0.05 以下	250 以下
シアン	検出されず	1 未満	検出されず	1 未満	非検出	50 以下
水銀	0.0005 未満	0.05 未満	0.0005 未満	0.087	0.0005 以下	15 以下
セレン	0.015	5 未満	0.002	5 未満	0.01 以下	150 以下
鉛	0.005 未満	11	0.005 未満	10 未満	0.01 以下	150 以下
砒素	0.001 未満	5.4	0.001 未満	5 未満	0.01 以下	150 以下
ふっ素	0.24	260	0.18	230	0.8 以下	4,000 以下
ほう素	0.08	13	0.12	15	1 以下	4,000 以下

2) 適用したセメント改良技術と再資源化材の力学的特性の評価

図 4 に示した粒状化処理、安定処理、流動化処理の 3 種類のセメント改良技術を無害化処理物に適用した。各改良方法と改良体を対象に実施した試験の内容を以下に示す。

a 安定処理

無害化処理物 1 の含水比を処理時含水比に近い 180% に調整し、所定量の普通ポルトランドセメント添加・攪拌後、締固めを行わない方法 (CASE 1) とセメントの水和熱と自然乾燥で含水比を低下させ、締固めエネルギー 550 kJ/m³ で突固めによる締固めを行う方法 (CASE 2) で供試体を作製した。CASE 1 では、JGS 0821-2009 に従い供試体を作製し、セメントを加えたスラリー状

の試料を直径 5 cm、高さ 10 cm のモールドに充填した。CASE 2 では無害化処理物の締固め試験（図 12）で得られた最適含水比 93.2% を参考に、含水比を 93% に低下させて供試体を作製した。両 CASE ともセメント添加率は処理物の乾燥質量に対し 10%、20%、30% とし、密閉養生を行った。養生 7、28 日後の供試体に対し、毎分 1% のひずみ速度で一軸圧縮試験を行い、各処理条件での一軸圧縮強さを評価した。

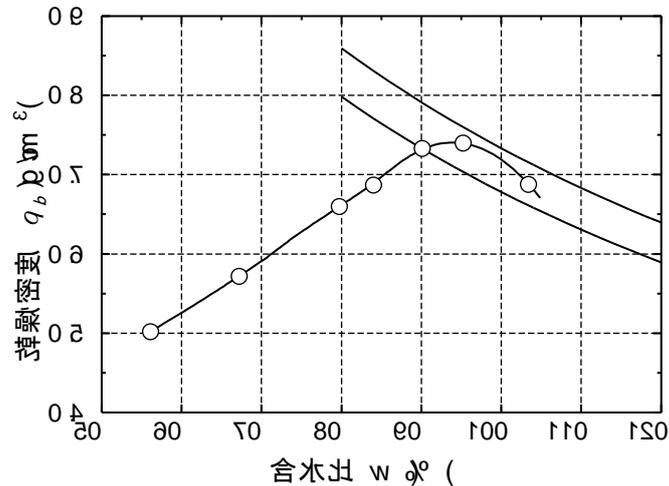


図 12 無害化処理物 1 の締固め曲線（締固めエネルギー：550 kJ/m³）

b 粒状化処理

自然乾燥（風乾）により無害化処理物 1 の含水比を約 80% まで低減させたものを含水比調整して試料とした。団粒化している部分を解きほぐし粒径 2 mm 以下に調整した。予備試験や著者の既往研究⁸⁾の結果から、粒状化処理の配合は処理物の含水比 90%、普通ポルトランドセメント添加量を処理物の乾燥質量に対し 20% を基本配合条件とした。ただし、初期含水比が造粒性に及ぼす影響を評価するために含水比を 70%、80%、100% に調整した試料も併せて準備した。

造粒は円筒形のポットミル（容量 1600 mL）を用いた回転混合によるラボ試験、および現場での適用を想定したモルタルミキサー（容量 90 L、図 13）での実規模試験の 2 種類の試験で実施した。試料投入量は無害化処理物の乾燥質量ベースで 50 g とした。ラボ試験においては、攪拌機で毎分 60 回転で約 2 分間攪拌した後、回転ミル装置で所定時間回転させて造粒処理を行い、造粒物を作成した。一方、実規模試験においては試料投入量は無害化処理物の乾燥質量ベースで 1 kg、3 kg の 2 通りを実施した。粒状化処理を実施した後、製造した再資源化材の粒度分布を測定し、使用機材、初期含水比、造粒時間が再資源化材の粒度特性に及ぼす影響を比較した。

続いて再資源化材の強度特性を一面せん断試験により評価した。ラボ試験と同じ方法で含水比 90%、セメント添加量 20%、造粒時間 3 時間の条件で再資源化材を作製し、28 日間密閉養生した供試体を対象に定圧一面せん断試験を実施した。落下高さ 10 cm で空中落下法により供試体を作製し、垂直応力 $\sigma = 50, 100, 150$ kN/m² でそれぞれ圧密後、せん断速度 0.1 mm/min の条件で試験を行った。また、せん断試験前後に再資源化材の粒度分布を計測することにより、せん断による粒子破碎の程度を評価した。



図 13 粒状化処理に用いたモルタルミキサー

c 流動化処理

流動化処理は、土砂に大量の水と固化材を加えて混合・攪拌することによって流動化させるセメント安定処理方法である。粘性土等の軟弱な土に地盤改良用の固化材を混合する場合、粘性土の団粒化により混合不良が生じるが、流動化処理工程においては土砂に水を加えて解泥したものに固化材を添加するため、均等に固化材を分散させることが可能になる。また、自硬性が高く、締固めも不要であることから、強度や施工性の面からも優位であり、国内での施工実績は年間 3～5 万 m^3 に及んでいる。本研究においては、フロー試験により流動性、ブリージング試験により水との分離抵抗性、一軸圧縮試験により強度特性をそれぞれ評価し、流動化処理土の製造における適切な配合条件の検討を行った。さらに、決定した配合条件で作製した処理土を対象に圧密試験を実施し、圧密変形特性、二次圧密特性を調査し、一般的な流動化処理土との変形特性と比較を行った。試験方法の詳細は以下のとおりである。

所定の含水比（150%、180%、200%の3水準）に調整した無害化処理物 2 に乾燥質量比で 10%、20%、30%の高炉セメント B 種と分散剤を 2.5%添加し混練した後、フロー試験（JIS R 5201）、ブリージング試験（JSCE F 522）を行った。その後、安定処理土の締固めをしない供試体作製方法（JGS 0821）に従い直径 50 mm、高さ 100 mm のプラスチックモールドで一軸圧縮試験用の供試体を作製した。圧密試験用の供試体は同様の方法で、直径 100 mm、高さ 200 mm のプラスチックモールドを用いて作製した固化後の試料を養生し、直径 60 mm、高さ 20 mm の円柱状に成形した。どちらも 20°C 条件下で密閉養生を行った。養生日数 28 日後の供試体に対しそれぞれ一軸圧縮試験（JIS A 1216、毎分 1%のひずみ速度）および段階荷重による圧密試験（JIS A 1217）を行った。流動化処理後に地盤材料として利用するにあたっては比較的浅い深度での利用や埋設管の埋戻し等が想定されることから、圧密試験においては地下約 10 m での土被り圧に相当する 157 kN/m^2 を最終荷重段階荷重とし、4000 分までの変形を計測した。流動化処理土の品質を評価するにあたっては埋設管の埋戻し基準（フロー値 160 mm 以上、ブリージング率 3%未満、一軸圧縮強さ 130～500 kN/m^2 、湿潤密度 1.35 g/cm^3 以上）を採用した⁹⁾。さらに、一般的な流動化処理土との特性を比較するために、細粒分 75%以上の泥土から製造した流動化処理土（以下、比較試料）との比

較実験を行った。図 11 に使用した泥土の粒径加積曲線を示すが、無害化処理物 2 と比較して細粒分含有量が少なく粒度が大きいため、処理土の密度や剛性の面では優位であるといえる。

なお、流動化処理については母材の材料特性（組成、粒度分布）によって、特にフロー値や一軸圧縮強さが大きく異なる。ここでは、発生時期・場所が異なるスレート材を無害化処理した処理物（以下、無害化処理物 3）についてもフロー試験、ブリージング試験、一軸圧縮試験を行い、異なる処理対象物を同様の配合で処理した場合に、一軸圧縮強さに有意な影響が生じるかを検証することを主要な目的とした。

3) 再資源化材の環境安全性の評価

a 重金属等の溶出特性

安定化処理、粒状化処理を実施した試料に対し環境省告示第 18 号に定められた試験法によって、セレン及び六価クロムの溶出量を測定した。セレンは無害化処理物の状態では溶出量が土壌溶出量基準を超過していたため、改良効果によるその溶出抑制効果を調査した。六価クロムについては、本研究では改良の際にセメントを用いていることから、セメント添加による溶出量の増大が懸念されるために調査対象とした。

2 mm 以下のふるいを通した改良後の試料 50.0 g、蒸留水 ($5.8 \leq \text{pH} \leq 6.3$) 500 mL をポリ容器に加え、6 時間振とう (200 回/分) させた。その後約 20 分間静置し、3000 rpm にて 20 分間遠心分離を行い、孔径 0.45 μm メンブランフィルタでろ過した。これを検液として試験を行った。なお、安定化処理を実施した試料については、28 日間養生後に一軸圧縮試験を実施した供試体を 2 mm 以下に破碎したものを供試した。粒状化処理試料についても養生 28 日試料を用いた。溶出試験方法は環境省告示第 18 号「土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件」に示されている環境庁告示第 46 号「土壌の汚染に係る環境基準について」の付表に掲げる方法に準じて実施した。

b 硫黄由来の有害ガス発生ポテンシャルの評価

地中や廃棄物処分場においては、①硫酸塩還元菌が増殖できる嫌気的な条件および水分、温度、pH 条件、②一定濃度の SO_4^{2-} 、③硫酸塩還元菌の基質となる有機物（揮発性脂肪酸等）の条件がすべて満たされる場合、硫化水素等の有害ガスの発生が懸念される。本研究では、遠藤ら¹⁰⁾が地盤材料中の廃石膏由来の硫化水素発生ポテンシャルを評価するために開発、適用している試験に準じて、硫黄由来の有害ガス発生ポテンシャルを評価した。

いずれの再資源化材も無害化処理物とセメントの混合物であることから、安定処理を実施した試料のみを対象に試験を実施した。100 mL 容量のバイアル瓶（ブチルゴム付き）に 7 日養生した一軸圧縮試験終了後の供試体を粒径 2 mm 以下に調整した破碎試料 20 g と蒸留水 40 g を加え液固比を 2 とした後、試料中に含まれる気泡を除去するため 2~3 cm の高さから数回落下させて衝撃を与えた。その後バイアル瓶中を純窒素（純度 99.9%）に置換し、摂氏 40 度の恒温槽に 20 日間静置養生した。その後ヘッドスペース部の硫化水素ガス、二硫化炭素の濃度を測定した。

4. 結果及び考察

(1) アスベストの常温分解と分解生成物の同定並びに分解反応機構

1) 標準アスベストの分解

スレート中のアスベストの常温分解に先立ち、標準アスベストの本法による分解の確認を行った。

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、アクチノライト、トレモライトである。IPS 溶液を 5%、水を試料の 3 倍、磁性ミル（16 L、 $\Phi = 300$ mm）内でアルミナボール（ $\Phi = 20 \sim 25$ mm の混合）と一緒に回転攪拌した。分解処理前後の XRD を図 14 に示す。アスベスト特有の第 1 ピーク（クリソタイル、 $2\theta = 12.18^\circ$ ；クロシドライト、 $2\theta = 10.52^\circ$ ）と第 2 ピーク（クリソタイル、 $2\theta = 24.44^\circ$ ；クロシドライト、 $2\theta = 28.66^\circ$ ）が消滅した。他のアスベスト（アモサイト、トレモライトも同様に IPS 添加後の攪拌でアスベストのピークが消滅した。

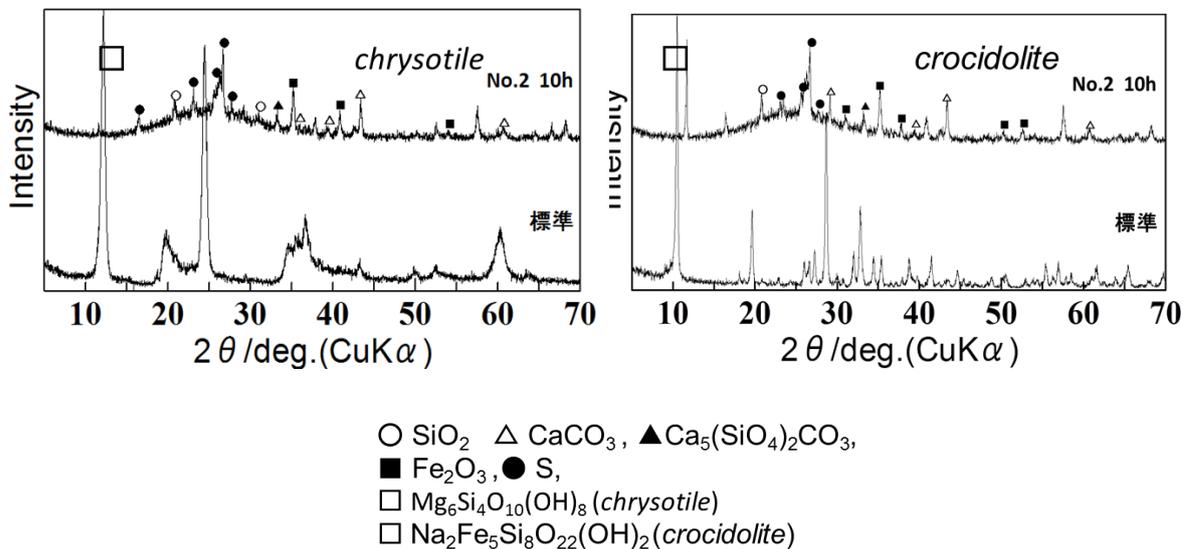


図 14 標準アスベストクリソタイルとクロシドライトの IPS 共存下での常温分解

更に、4種の標準アスベスト混合物について次の条件での分解処理によるアスベストの分解の確認を行い、処理前後のアスベストの濃度を XRD 法により求めた。その結果を表 6 に示す。

【試料】

標準アスベスト試料（純度 90%以上）をクリソタイル 5.8（15g）、アモサイト 6.4（15g）、クロシドライト 5.2（15g）、トレモライト 2（10g）を混合した。試料総量 55g。

【分解方法】

磁製ミル（内径 280 mm）内でアルミナボール（6 kg）と一緒にアスベスト混合試料を 10 時間および 20 時間回転攪拌（60 回転/min）した。

【配合】 IPS 5g、混合 50 g、反応水 500 g

表 6 標準アスベストの混合試料の分解処理

試料名 (混合試料)		アスベスト含有量/ 試料重量	アスベスト含有量/%	
			10 時間処理	20 時間処理
混合 試料	クリソタイル	5.8 (15g)	0.7	0.1>
	アモサイト	6.4 (15g)	1.2	0.1>
	クロシドライト	5.2 (15g)	0.6	0.1>
	トレモライト アクチノライト	2.0 (10g)	0.1>	—

【結果】混合試料において、クリソタイル、アモサイト、クロシドライト、トレモライト（アクチノライト）の含有量は 10 時間処理において各々、0.7 %、1.2 %、0.6 %、0.1 % 以下まで含有量まで減少した。20 時間処理試料においてすべてのアスベストは 0.1 % 未満となった。すなわち、種類の異なるアスベストの混合物においても、それぞれのアスベストは 20 時間処理に置いて全て分解した。

2) スレート建材中のアスベストの分解

スレート中のアスベストをできるだけ簡単な装置を用いて短時間で分解できる方法を確立するために、図 7 の装置を用いて表 3 の条件でスレート中のアスベストを分解した。

a モルタルミルミキサーによるアスベスト分解

モルタルミルミキサーはセメントの混合に使われる汎用攪拌装置である。本装置を用いて次のようにしてスレート中のアスベストの分解実験を行った。破碎したスレート ($\Phi < 5 \text{ mm}$) 8 kg に IPS 溶液を 2 % (160g) および 5 % (400 g)、水を 16 L 添加し、それぞれをモルタルミキサーを用いてアルミナボール (70 kg) と一緒に 3 時間から 24 時間回転攪拌した。結果を以下の表 7 に示す。代表例としてアスベスト分解前後の XRD および位相差顕微鏡・分散染色法の結果を図 15 および図 16 に示す。

表7 アスベスト分解における IPS の濃度の比較 (スレート粒径 < 5 mm)

IPS 溶液 2 %				
試料番号	処理時間/h	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子中)		石綿含有量 /%
		アスペクト比 3 以上	アスペクト比 3 以下	
68	0 (処理前)	19	3	5.0
71	3	9	0	4.6
74	6	5	0	3.2
75	9	9	2	3.1
76	12	7	2	3.5
IPS 溶液 5 %				
試料番号	処理時間	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子中)		石綿含有量 /%
		アスペクト比 3 以上	アスペクト比 3 以下	
68	0 (処理前)	19	3	5.0
97	3	—	—	1.7
97	6	—	—	1.2
127	9	—	—	1.2
127	12	—	—	1.0
144	15	—	—	0.5
144	18	—	—	0.3
156	21	—	—	0.1 >
156	24	—	—	0.1 >
244	48	—	—	0.1 >

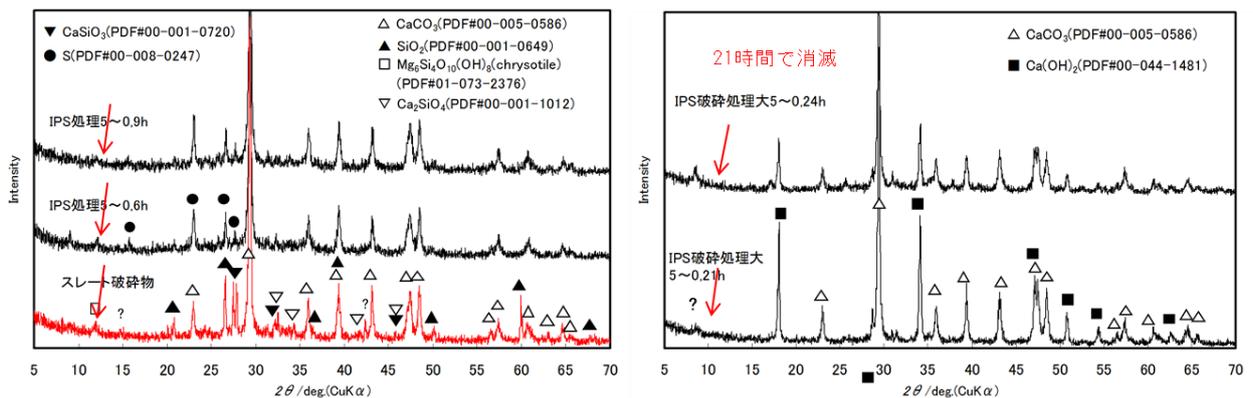


図15 IPS 共存下でのスレート中のアスベストの分解前後の XRD

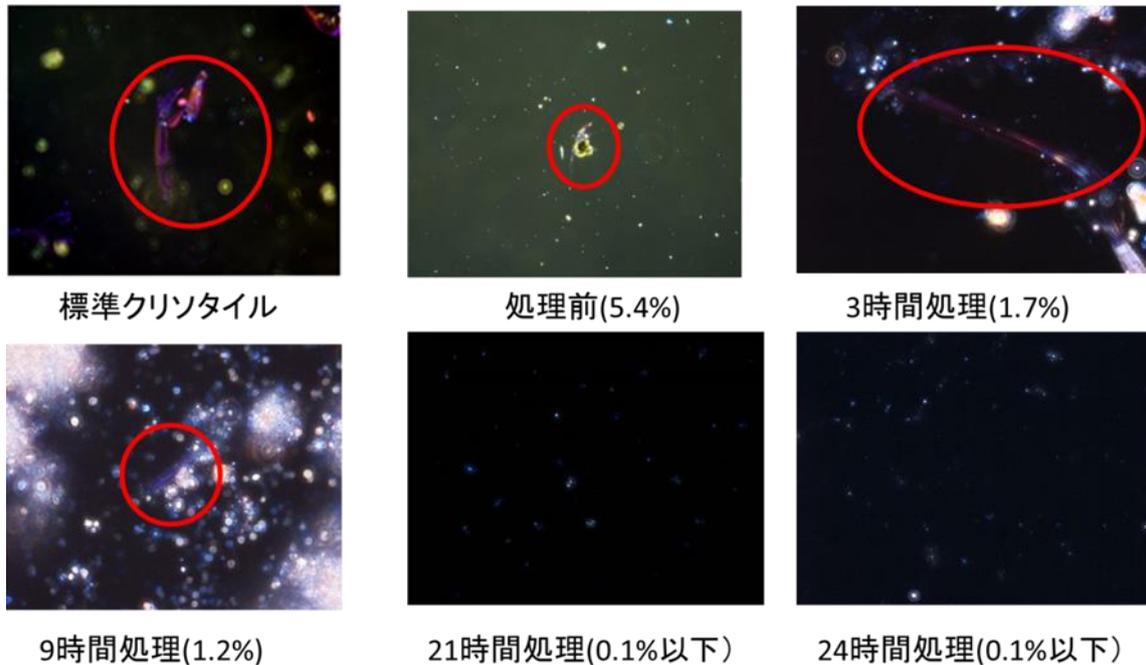


図 16 位相差顕微鏡・分散染色法による分解処理過程におけるアスベストの検出

処理時間 3、6、9、12 h において 5 % 添加処理は 2 % 添加処理の 2 倍以上の分解効果があった。IPS 溶液を 5 % 添加した条件では分解処理を 48 時間まで実施した。21、24、48 時間処理でアスベスト含有量は 0.1 % 以下となった。

b 磁製ミルを用いるアスベスト分解

i スレートの分解前の粒径の影響

表 2 に示したように、スレートを破碎するだけでもアスベスト含有量は数パーセント減少した。従って、磁製ミルとアルミナボールを用いて、IPS 5 % 共存下でスレートの大きさを変えてアスベストの分解を行った。結果を表 8 に示す。粒径別試料の 12 時間処理において、アスベスト含有量は 0.1% 未満となりアスベストは観測されなかった。6 時間処理においても 0.1% 未満を達成するがアスペクト比 3 以上の繊維を 1 個観測した。粒径試料の大きさが 20.0 mm 以下では、アスベスト含有量が 0.1 % 未満に達する時間には大きな変化は見られなかった。ナノサイズで起きるアスベスト分解反応には処理前の数ミリのスレートの大きさは影響しないと考えられる。また、図 17 に示すように、スレートの粒子の大きさが ($\Phi \leq 0.3 \text{ mm}$) と ($\Phi = 11.2 \sim 20.0 \text{ mm}$) と違っても、12 時間分解処理後の位相差顕微鏡・分散染色法においていずれも残留アスベストは確認されなかった。

表 8 粒径別アスベスト分解

試料番号 (処理時間)	試料の大きさ Φ /mm	分散色を呈する粒子 (3000 粒子中)		石綿含有量 (%)
		アスペクト比 3 以上 の繊維状粒子数	アスペクト比 3 以下 の粒子数	
68 (0h)		19	3	5.0
218 (6h)	1.0~1.4	1	3	0.1>
219 (6h)	2.8~5.6	1	2	0.1>
135 (12h)	0.3	0	0	0.1>
136 (12h)	0.3~0.6	0	0	0.1>
137 (12h)	0.6~1.0	0	0	0.1>
138 (12h)	1.0~1.4	0	0	0.1>
139 (12h)	1.4~2.8	0	0	0.1>
140 (12h)	2.8~5.6	0	0	0.1>
141 (12h)	5.6~11.2	0	0	0.1>
142 (12h)	11.2~20.0	0	0	0.1>

【実験条件】磁製ミル ($\Phi = 280$ mm、16L)、アルミナボール ($\Phi = 20$ mm、(6kg))、試料重量 500g、IPS 25g (試料の 5%)

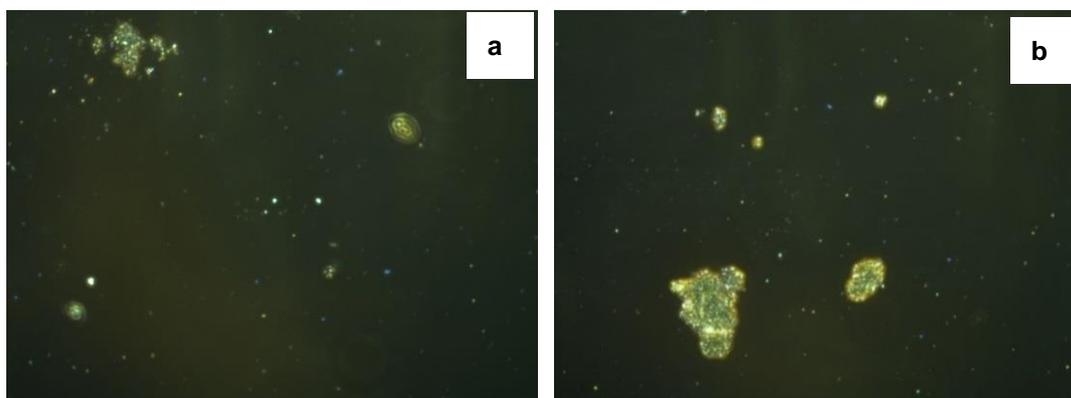


図 17 粒径別アスベスト分解における位相差顕微鏡・分散染色法による残留アスベストの確認
大きさ : a、 $\Phi \leq 0.3$ mm ; b、 $\Phi = 11.2 \sim 20.0$ mm、12 時間分解処理

ii 磁製ミル処理における IPS 濃度の影響

モルタルミキサーを用いたアスベスト分解では IPS2%よりも 5%の方が効果的であった(表7)。アスベストの粒径別分解実験では IPS 5%を添加した。分解時間を短縮するために IPS 10%を加えて実験した。結果を表9に示す。IPS 溶液を試料重量の 50g (10%) 添加すると、3 時間処理でアスベスト含有率は 0.1%以下となった。しかし、3 時間処理ではアスペクト比 3 以上の繊維を 1 個観測した。6 時間処理でアスペクト比 3 以上の繊維数は 0 となった。

表 9 IPS 10 %を添加した時のアスベストの分解

試料番号	処理時間 (h)	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子)		アスベスト含有量/%
		アスペクト比 3 以上の 繊維状粒子数	アスペクト比 3 以下の 粒子数	
67	0	29	3	5.4
27	3	1	1	0.1>
180	3“	—	—	0.1>
211	“3“	—	—	0.1>
28	6	0	4	0.1>
29	9	0	1	0.1>
130	12	0	1	0.1>

【実験条件】磁製ミル ($\Phi = 280$ mm、16L)、アルミナボール ($\Phi = 20$ mm、6kg)、スレート試料の径 11.2 mm 以下、(500g)、IPS 50g (試料の 10%)、処理水 1.5 L。表中の記号 3“と”3“は 3 時間分解処理後それぞれ 2 か月、4 か月養生した後の測定結果を示す。

IPS を 10%加えると 3 時間処理でもアスベストは消失した。養生によってもアスベストは 0.1 % 以下であった。しかし、3 時間処理ではアスペクト比 3 以上の繊維が 1 本観測された。図 18 に位相差顕微鏡・分散染色法の結果を示す。アスベスト繊維は観測されなかった。

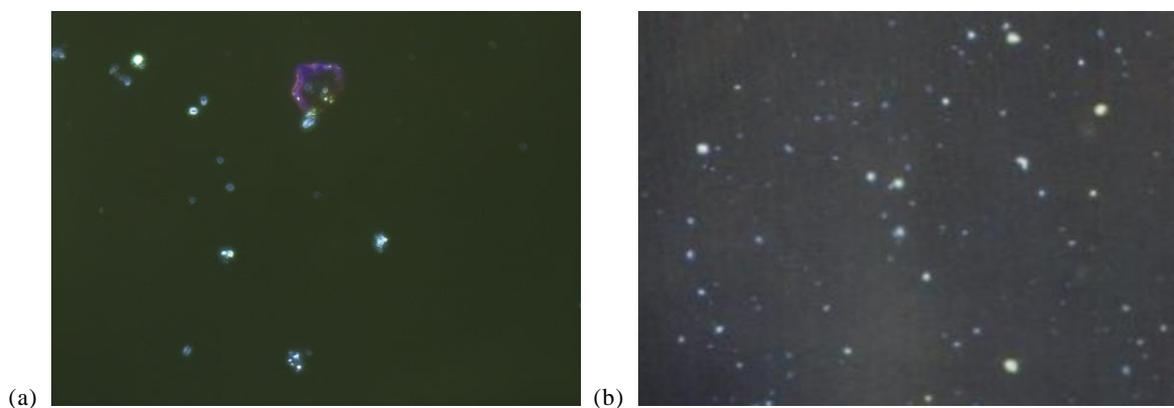


図 18 IPS 10 %添加での 3 時間分解処理 (a)、および更に 2 ヶ月養生 (b) したアスベスト分解物の位相差顕微鏡・分散染色法 アスベスト <0.1%

一方、IPS を 5 %加えて同様の実験を行ったところ 3 時間ではアスベストは 0.1%以下に達せず、6 時間処理で 0.1%以下になった。2 %の IPS ではアスベスト含有率は減少するが、アスベストは 12 時間処理で 1.9 %残った (図 19)。以後 IPS は 10%加えるようにした。

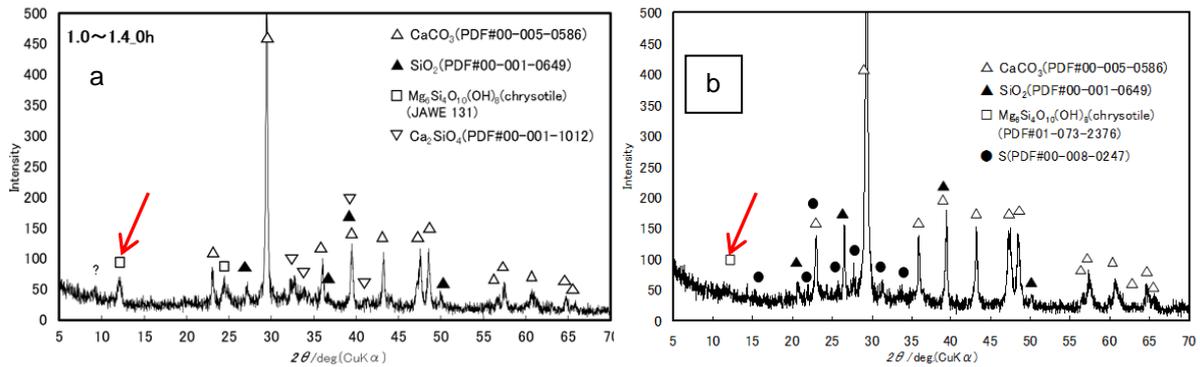


図 19 IPS2% 添加しアスベストを分解した後の XRD a : 分解処理前、b : 12 時間分解処理

c 大型スチールミルによるアスベストの分解

多くの試料を分解処理するために大型スチールミルを使ってアスベストの分解を行った。連続運転による温度上昇（常温 25°C→75°C）のため内部圧力の上昇がみられた。耐圧容器仕様で無いため給水孔を解放して運転した。又、吸水孔から水蒸が出たので現象がみられ流動性確保のため、排出直前に 50 L 給水した。アスベストの分解結果を表 10 に示す。6 時間処理でアスベスト含有率は 0.1% 以下を達成した。しかし、アスペクト比 3 以上の繊維を 2 個観測した。9 時間処理においてアスベスト繊維は観測されなかった。

アスベストの分解を示す位相差顕微鏡・分散染色法および XRD を図 20、21 に示す。いずれにおいても、6 時間分解処理ではアスベストは検出されなかった。

表 10 大型スチールミルによるアスベスト分解

試料番号	処理時間 /h	分散色を呈する粒子数（3000 粒子中）		アスベスト 含有量/%
		アスペクト比 3 上の 粒子数	アスペクト比 3 以下の 粒子数	
67	0	29	3	5.4
258	3	6	7	2.6
222	6	2	2	0.1 >
134	9	0	0	0.1 >

【実験条件】スレート：50 kg（Φ = 20.0 mm 以下）、IPS：5 kg（10 %）、反応水：150 L

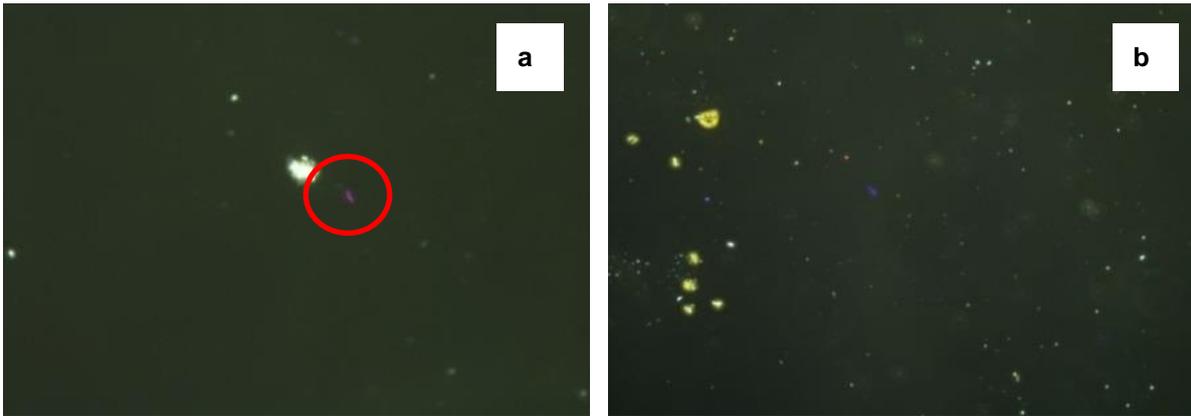


図 20 分解処理後の位相差顕微鏡・分散染色法によるアスベスト分析
(処理時間/h : a、3 ; b、6 アスベスト含有率 : a、1.5% ; b、0.1% >)

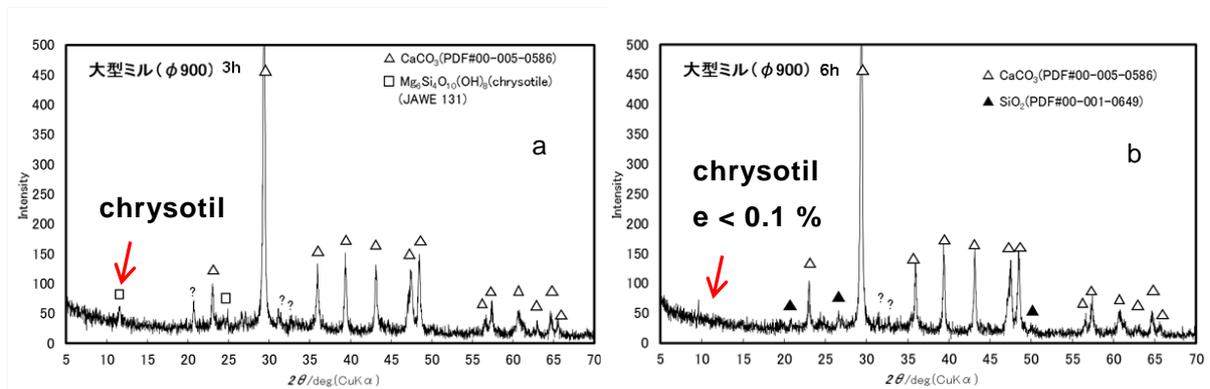


図 21 大型スチールミルを用いる分解処理後のスレート中のアスベスト
(処理時間/h : a、3 h ; b、6 h)

d ステンレスミルによるアスベストの分解処理

アスベストの分解処理時間の短縮を目的としてスチールミルと鋼球を用いる実験を行った。鋼球を単独で用いる場合と 2 種の鋼球を混合した場合のアスベストの分解を比較した。IPS 溶液をスレートの 10% 添加して以下の条件でスチールミルを回転攪拌した。その結果を表 11、12 に示す。

表 11 ステンレスミルと鋼球を用いるアスベスト分解 鋼球 ($\Phi = 20$ mm) 単球処理

試料番号	処理時間/h	分散色を呈する粒子 (3000 粒子中)		アスベスト含有量/%
		アスペクト比 3 以上の繊維状粒子数	アスペクト比 3 以下の粒子数	
67	0	29	3	5.4
84	1	1	4	0.1 >
85	2	0	4	0.1 >
86	3	0	1	0.1 >
187	3“湿潤養生	—	—	0.1 >
213	”3“湿潤養生	—	—	0.1 >
87	6	0	1	0.1 >
88	9	0	1	0.1 >

【実験条件】 鋼球： $\Phi = 20$ mm (10.7kg)、ステンレスポットミル(8.2 L) 試料： $\Phi = 11.2$ mm 以下 (試料 500g)、IPS：50g、処理水：1.5 L

表 12 混合鋼球 ($\Phi = 20$ mm、8 kg と $\Phi = 10$ mm、2.7 kg) によるアスベスト分解

試料番号	処理時間 (H)	分散色を呈する粒子 (3000 粒子中)		含有量(%)
		アスペクト比 3 以上の繊維状粒子数	アスペクト比 3 以下の粒子数	
67	0	29	3	5.4
82	1	14	5	4.5
83	2	12	8	3.6
23	3	0	2	0.1 >
187	3“湿潤養生	—	—	0.1 >
212	”3“湿潤養生	—	—	0.1 >
24	6	1	1	0.1 >
25	9	0	2	0.1 >
26	12	0	1	0.1 >

【実験条件】 鋼球： $\Phi = 20$ mm (8k g)、 $\Phi = 10$ mm (2.7kg)；ステンレスポットミル (容積 8.2 L) 試料 $\Phi = 11.2$ mm 以下 (試料 500 g)、IPS：50g、処理水：1.5 L

ISP は試料重量の 10 % 添加する。スチールミルを使用した単一鋼球 ($\Phi = 20$ mm) 処理、及び混合鋼球 ($\Phi 20$ mm と $\Phi = 10$ mm) 処理の結果を見ると次の違いがあった。鋼球 $\Phi = 20$ mm を配合した処理時間は 1 時間処理でアスベストが 0.1 % 未満となり、アスペクト比 3 以上の繊維が 1 本存在した。鋼球混合処理では 1 時間処理ではアスベスト含有量は 4.5 % であり、3 時間処理でアスベスト含有量は 0.1% 未満となった。しかし、6 時間処理でもアスペクト比 3 以上の繊維が 1 本存在した。単一鋼球 ($\Phi = 20$ mm) 処理が混合鋼球 ($\Phi = 20$ mm、 $\Phi = 10$ mm) 処理より効率的であった。

また、単一鋼球（ $\Phi = 20 \text{ mm}$ ）処理は表 8、9 の磁製ミルとアルミナボールによる処理より効率的な処理法であった。また、XRD および位相差顕微鏡・分散染色法による結果を下に示す。XRD では、混合球の場合はアスベストのピーク強く残っている。しかし、単一球ではアスベストのピークはほぼ消滅した（図 22）。同様に、位相差顕微鏡・分散染色法でも単一球では処理時間 1、2、3 時間においてアスベストは観測されなかった（図 23）。しかし、混合球の場合は 1 時間処理、2 時間処理でアスベストがそれぞれ 4.5%、3.6% 残った（図 24）。3 時間処理でアスベストは 0.1% 以下となった。

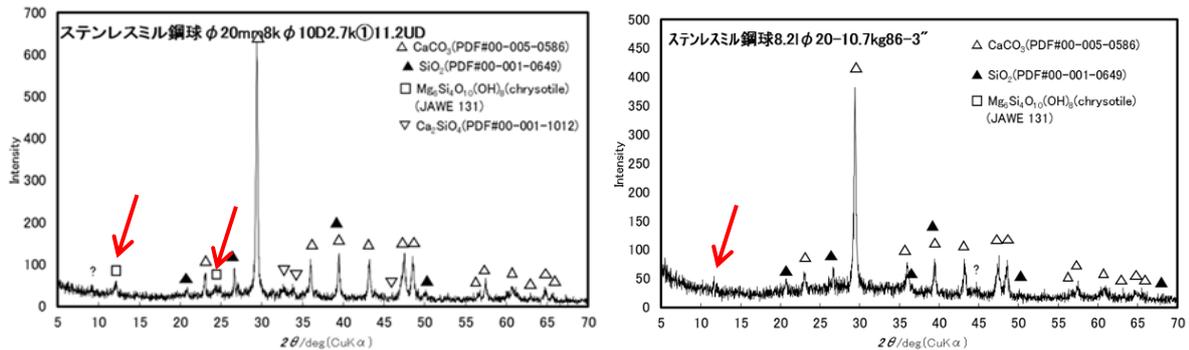


図 22 ステンレスミルで鋼球を用いるアスベスト分解の XRD。a、混合鋼球で処理；
b、単一鋼球で処理。

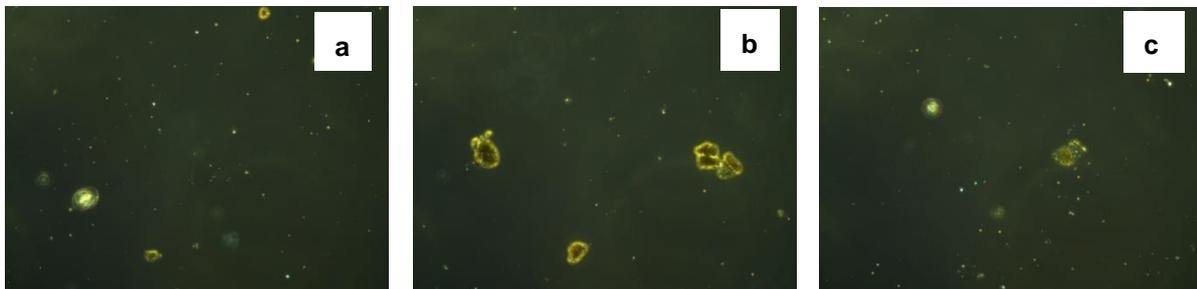


図 23 ステンレスミルと単一鋼球（ $\Phi = 20 \text{ mm}$ ）を用いるアスベスト分解。
処理後の位相差顕微鏡・分散染色法によるアスベストの定量。処理時間/h：a、1；b、2；c、3



図 24 ステンレスミルと混合鋼球（ $\Phi = 20 \text{ mm}$, 10 mm ）を用いるアスベストの分解。処理後の位
相差顕微鏡・分散染色法によるアスベストの定量。処理時間/h：a、1；b、2；c、3。
アスベスト含有量：4.5%；3.6%；0.1% >

e アルカリ溶液下でのアスベスト処理

アスベストはアルカリ溶液中で分解が促進されると考え、1M NaOH を用いて、セラミックミルとアルミナボールミルでアスベストの分解処理を行った。その結果を表 13 に示す。また、位相差顕微鏡・分散染色法の結果を図 25 示す。

表 13 高アルカリ溶液中でのアスベストの分解処理

資料 番号	処理 時間	試料 Φ mm	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子中)		含有量(%)
			アスペクト比 3 以上の 繊維状粒子数	3 以下の粒子数	
67	0		29	3	5.0
148	12h	Φ 1.0~1.4	0	0	0.1>
149	12h	Φ 1.4~2.8	0	0	0.1>
192	3h	Φ 2.8~5.6	8	4	5.5
193	6h		0	2	0.1>
150	12h		0	0	0.1>
151	12h	Φ 5.6~11.2	0	0	0.1>

【実験条件】 1 M NaOH、IPS = 50 g、磁製ミル ($\Phi = 300$ mm)、アルミナボール($\Phi = 20$ mm、6 kg) IPS 25g (5%)、試料 500g、処理水 1.5 L

スレートの粒径を変えてアルカリ条件下でアスベストの分解処理を行った。アルカリ条件下での 12 時間の処理ではスレートの大きさによらずすべての試料でアスベスト含有量は 0.1% 未満となった。 $\Phi = 2.8 \sim 5.6$ mm の試料では、3 時間処理では 5.5% のアスベストが残存したが、6 時間処理では 0.1% 未満となった。NaOH を添加しない場合 (表 8、試料 219) と NaOH を添加した場合 (表 13、試料 193) を比較するといずれもアスベスト残存量は 0.1% 未満である。アスペクト 3 以上のアスベスト繊維の残存量に少しの違いが見られるだけである。しかし、12 時間の処理では表 8 と表 13 から分かるように、NaOH の添加によるアスベスト分解促進効果はなかった。NaOH 添加効果が低かった原因として、①IPS 溶液に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が含まれているために 1M NaOH の影響が少なかったこと、②アルカリ濃度の増大とともに分解処理液の粘性が増し、ボールとアスベストの衝突・衝撃力が減少したためと考えられる。

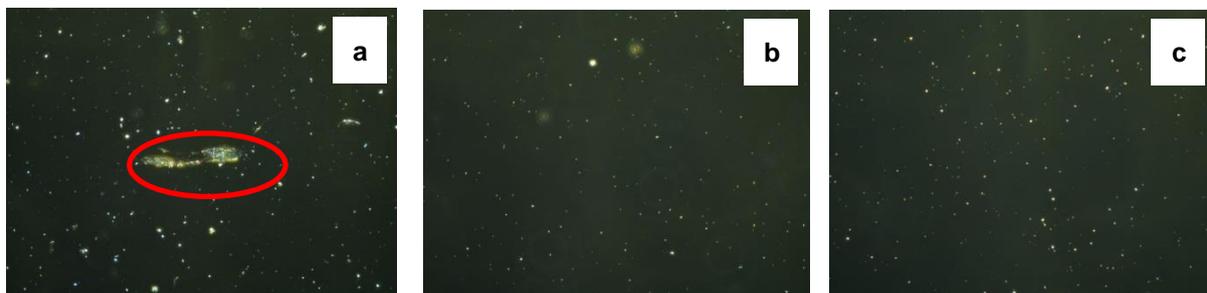


図 25 高アルカリ条件下でのアスベスト分解 NaOH = 1.0 M。処理時間/h : a、3 ; b、6 ; c、12
試料径 : $\Phi = 2.8 \sim 5.6$ アスベスト濃度 : a、5.5% ; b、0.1%> ; c、0.1%>

f 液体窒素凍結処理によるアスベストの分解

アスベストは破碎しただけでも数パーセントまでは分解することを表 2 に示した。従って、含水したアスベストを凍結しミルで回転攪拌すればアスベスト分解は促進されるだろうと考え、液体窒素処理後に IPS を加え、アスベストの分解を試みた。比較のために IPS 無添加で同様の実験を行った。その結果を表 14 と表 15 に示す。

表 14 液体窒素処理後のアスベスト分解 (IPS 無添加)

試料番号	処理時間	試料 Φ /mm	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子中)		アスベスト含有量/%
			アスペクト比 3 以上の繊維状粒子数	アスペクト比 3 以下の粒子数	
67	0		29	3	5.4
223	6	$\Phi 11.2 \sim 20.0$	5	3	1.5%
172	12	$\Phi 11.2 \sim 20.0$	0	0	0.1 >
171	12	$\Phi 2.8 \sim 5.6$	0	0	0.1 >

【実験条件】セラミックミル $\Phi = 280$ mm アルミナボール $\Phi = 20$ mm (6 kg)、IPS 25 g、試料 500 g、処理水 1.5 L

表 15 液体窒素凍結処理後 IPS を添加しアスベストを分解

試料番号	処理時間/h	試料 Φ /mm	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子中)		アスベスト含有量/%
			アスペクト比 3 以上の繊維状粒子数	アスペクト比 3 以下の粒子数	
67	0		29	3	5.4
244	6	$\Phi 5.6 \sim 11.2$	0	0	0.1 >
244	12		0	0	0.1 >

【実験条件】セラミックミル $\Phi = 280$ mm、アルミナボール $\Phi = 20$ mm (6kg)、IPS 25 g、試料 500 g、処理水 1.5 L

スレート中のアスベストを分解処理する前にスレートを水に浸漬した。そのあと取出し、液体窒素に 1 時間浸けた。そのスレートをセラミックミルとアルミナボールミルを用いてアスベストの分解処理をした。IPS を 5% 添加した場合と添加しない場合について実験した。表 15 より IPS 添加の場合は 6 時間でアスベストの含有量は 0.1 % 以下となった。IPS 無添加の場合は、6 時間処理ではアスベストが 1.5% 残留するが、12 時間処理でアスベスト含有量は 0.1 % 未満となった。IPS 添加の方がアスベスト分解は速く起きる。液体窒素処理後、6 時間分解処理した結果 (表 15、試料 244) を液体窒素処理しないで同一条件下でのアスベスト分解処理結果 (表 8、試料 219) と比較すると、小さな違いであるがアスペクト比 3 以上の粒子数と 3 以下の粒子数においていずれも液体窒素処理をした方が効率的な分解が起きていることが分かる。注目すべきことは IPS を添加しなくても 12 時間処理でアスベストの含有量は 0.1 % 以下となったことである。アスベストの分解は凍結した水を含むスレートをボールミルで回転攪拌によっても起きることが分る。この効果

については反応機構については述べる。液体窒素処理後のスレートの XRD と位相差顕微鏡・分散染色法を図 26～28 に示す。

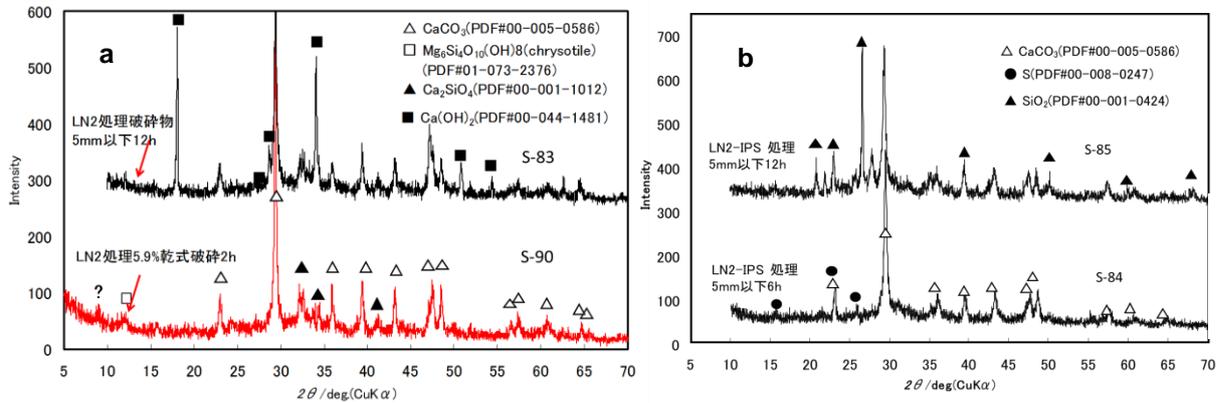


図 26 液体窒素処理によるアスベストの分解生成物の XRD a、分解処理前（下）、12 時間分解処理（上）、IPS=0% ; b、6 時間（下）および 12 時間分解処理 IPS = 5 %

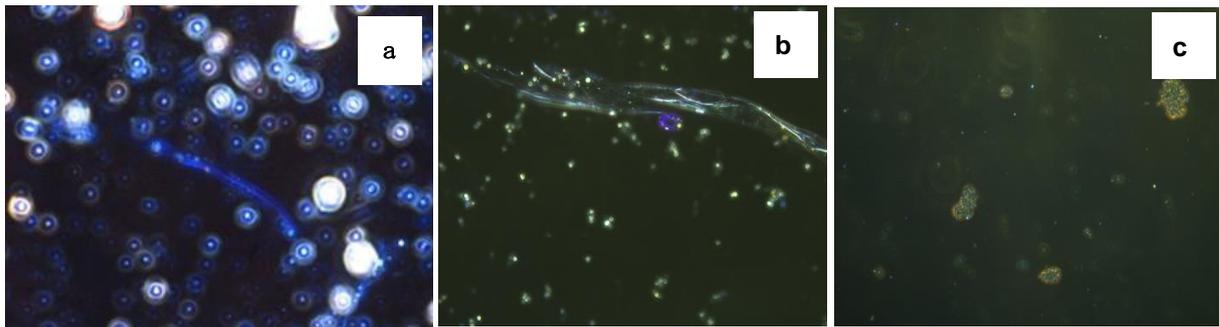


図 27 液体窒素処理によるアスベスト分解処理後の位相差顕微鏡・分散染色法 IPS = 0 %、処理時間/h : a、0 ; b、6 ; c、12 アスベスト含有率/% = 5.4 (a) ; 1.5 (b) ; 0.1 > (c)

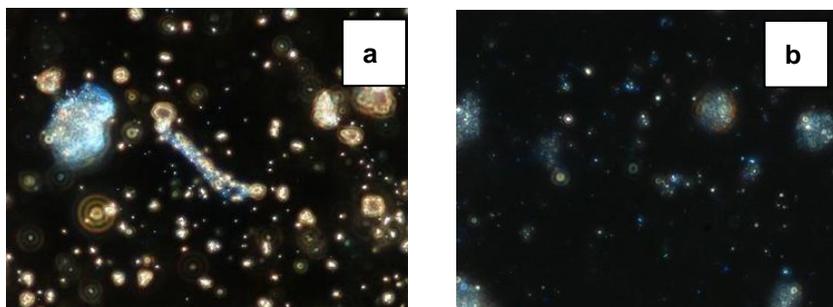


図 28 液体窒素処理によるアスベスト分解処理後の位相差顕微鏡・分散染色法 IPS = 5 %、処理時間/h : a、6 ; b、12 アスベスト/% = 0.1 > (a) ; 0.1 > (b)

g その他のスレート中のアスベスト分解

今まで実験に用いたスレートは工場の屋根や壁として使われていたスレート建材である。スレートの種類によるアスベスト分解処理効果を知るために次の二つ試料中のアスベストの分解を行った。一つは宅用建設メーカーの屋根材であり、未使用品である。もう一つは現在も製造され使われている、スリランカで製造された新しいスレート板である。

表 16 住宅用屋根材中のアスベストの分解

試料番号	処理時間 /h	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子中)		アスベスト 含有量/%
		アスペクト比 3 以上の 繊維状粒子数	3 以下の粒子数	
221	0	35	0	7.9
259	6	2	5	0.1 >
260	12	3	6	0.1 >

【実験条件】 磁製ミル(Φ280 mm)、磁球混合：Φ20 mm 6kg+Φ10 mm 2k 試料：Φ = 2.8 ~ 5.6 mm (500g)、IPS = 25g、処理水 1.5 L

表 17 スリランカスレート中のアスベストの分解処理

試料番号	処理時間 /h	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子中)		アスベスト 含有量(%)
		アスペクト比 3 以上の 繊維状粒子数	アスペクト比 3 以下の 粒子数	
256	0	—	—	10.0
263	3	11	7	6.3
264	6	3	6	0.1 >
265	18	2	3	0.1 >

【実験条件】 表 16 と同じ

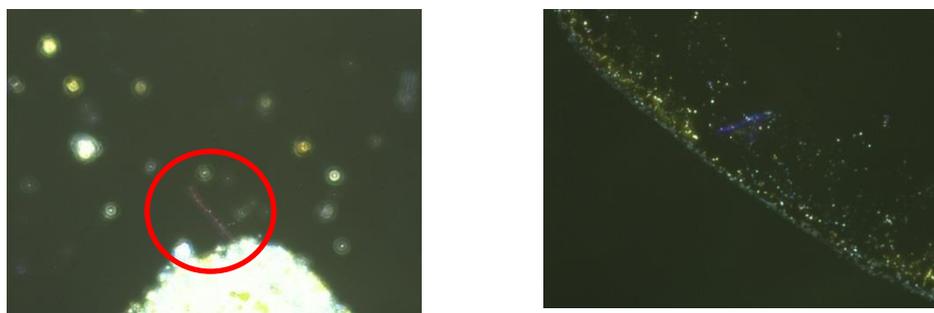


図 29 スリランカスレートの位相差顕微鏡分散染色法 a、分解処理前；b、3 時間分解処理後
アスベスト濃度：a、6.3 %；b、0.1 % >

磁製ポットミルにアルミナボール $\Phi = 20 \text{ mm}$ を 6 kg、 $\Phi = 10 \text{ mm}$ を 2kg と混合使用し処理を実施する。アスベスト繊維は両試料共に 6 時間処理 0.1% 以下であるがアスペクト比 3 以上の繊維が存在している。屋根材の 12 時間処理及びスリランカスレート 18 時間処理にても他のスレートに比べてアスペクト比が 3 以上のアスベスト繊維が 0 にならない。ルーフ材、スリランカボード材共に未使用製品であることが、アスベスト含有が 0.1 % 未満の結果に影響したと推察する。

2) アスベスト分解物の同定

a 粉末 X 線回折法 (XRD)

アスベストの分解を粉末 X 線回折法で確認した。それは、アスベスト特有のピークの消失だけでなく、あらたなピークの出現によって分解生成物を同定することができる。上記に示した分解後の X 線粉末回折の結果を見ると、主な生成物は炭酸カルシウムであり、他は少量の水酸化カルシウム、硫黄とケイ酸であった。

b 走査型顕微鏡法 (SEM) とエネルギー分散型 X 線分析 (EDX)

i モルタルミキサーによるアスベスト分解物生成物

スレート中のアスベストの形状と元素組成を SEM、EDX で決定した。図 30 に示すように、アスベストは細い繊維の束となっている。それにスレートの他の材質が付着している。観測した繊維の束がアスベストかあるいはスレート建材由来の材料であるかを調べるために元素マッピングを行った (図 32)。繊維状の形状は Mg と Si の分布と一致した。繊維状の物質に周りに付着している元素はカルシウムであった。

モルタルミキサーで分解処理した後の生成物の SEM および EDX を図 34、35 に示す。分解物は塊となっている。その構成元素はケイ素、カルシウムである。球状の塊に薄く付着しているのはマグネシウムとアルミナである。これらは、クリソタイルおよびスレートの構成成分である。処理前後の EDX スペクトルをみると、分解処理前は Mg が Ca より多いが、分解後では Mg は Ca より少なくなっている。この画像全域の分析と点分析の両方で EDX スペクトルを測定した。Mg が Ca より多い場合はクリソタイルである。

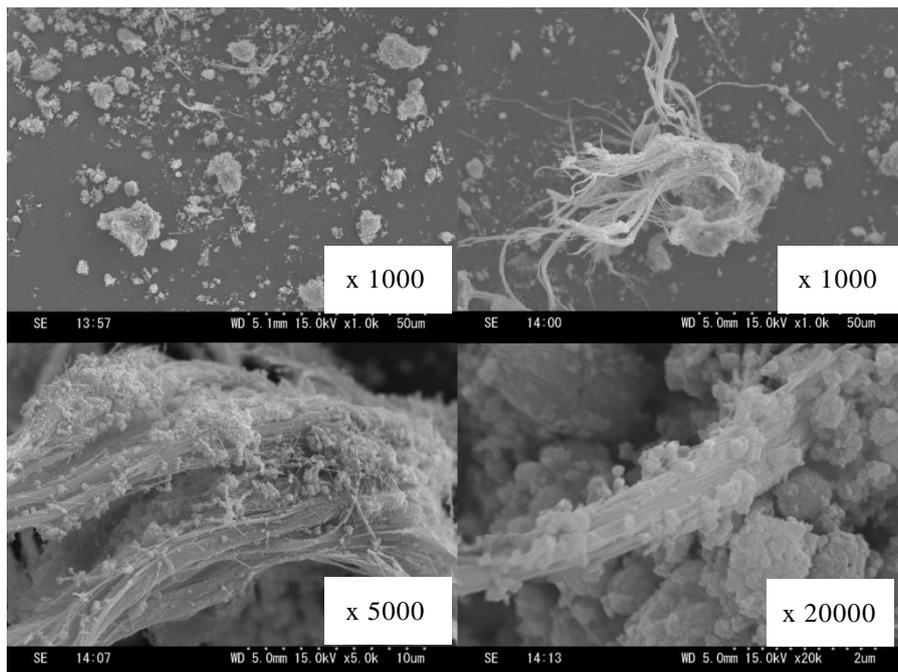


図 30 スレート中のアスベスト分解処理前の SEM 画像 表 8 (試料 68) 参照

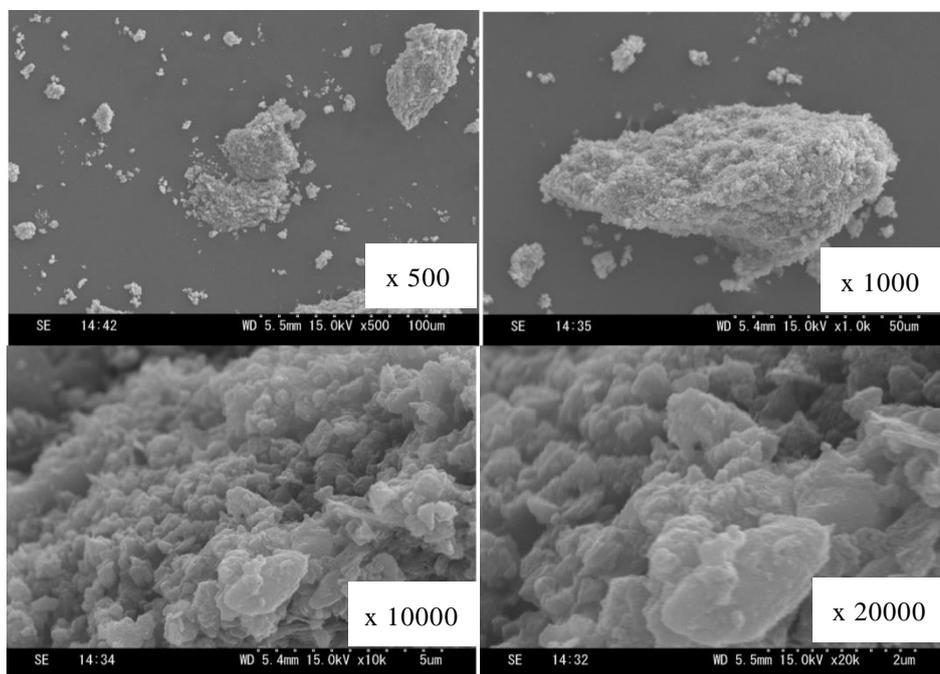


図 31 スレート中のアスベストの 21 時間処理後の SEM 画像 表 8 試料 156 参照、IPS = 5 %

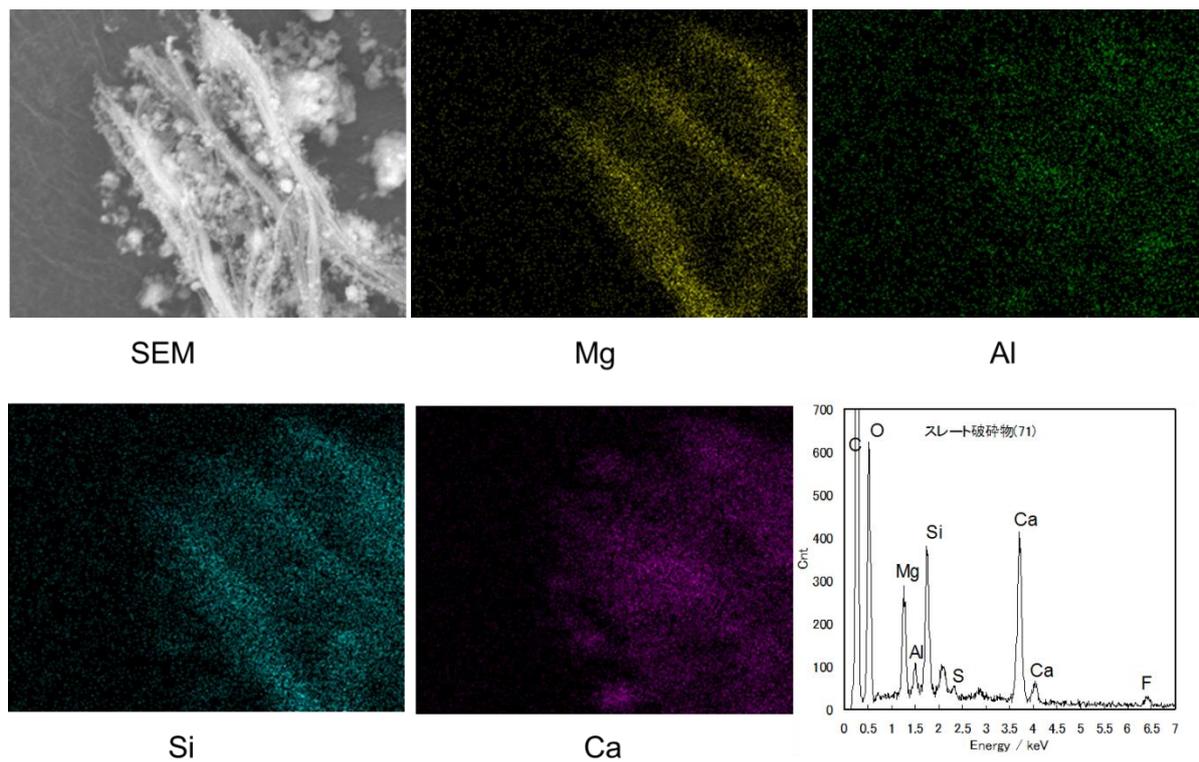


図 32 分解処理前のスレート中のアスベストの元素分布アスベスト含有率 = 5.4 %。

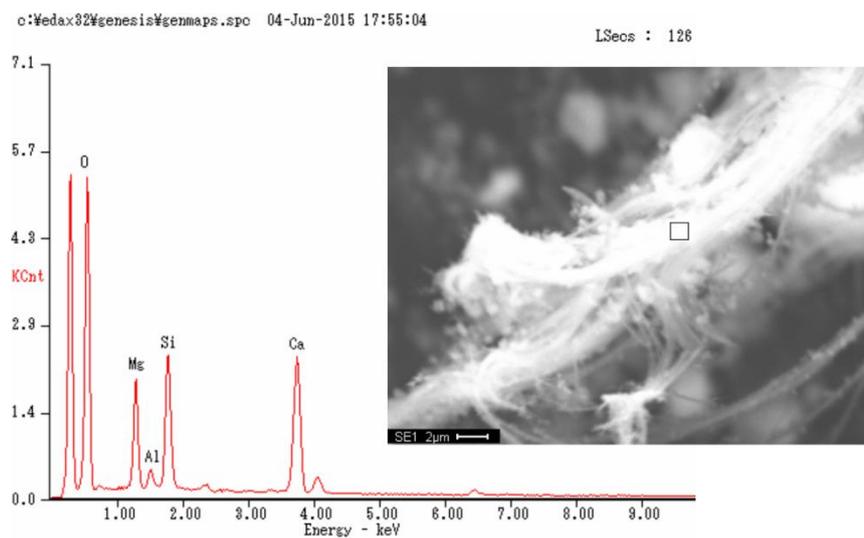


図 33 スレート中のアスベスト分解処理前の元素分布

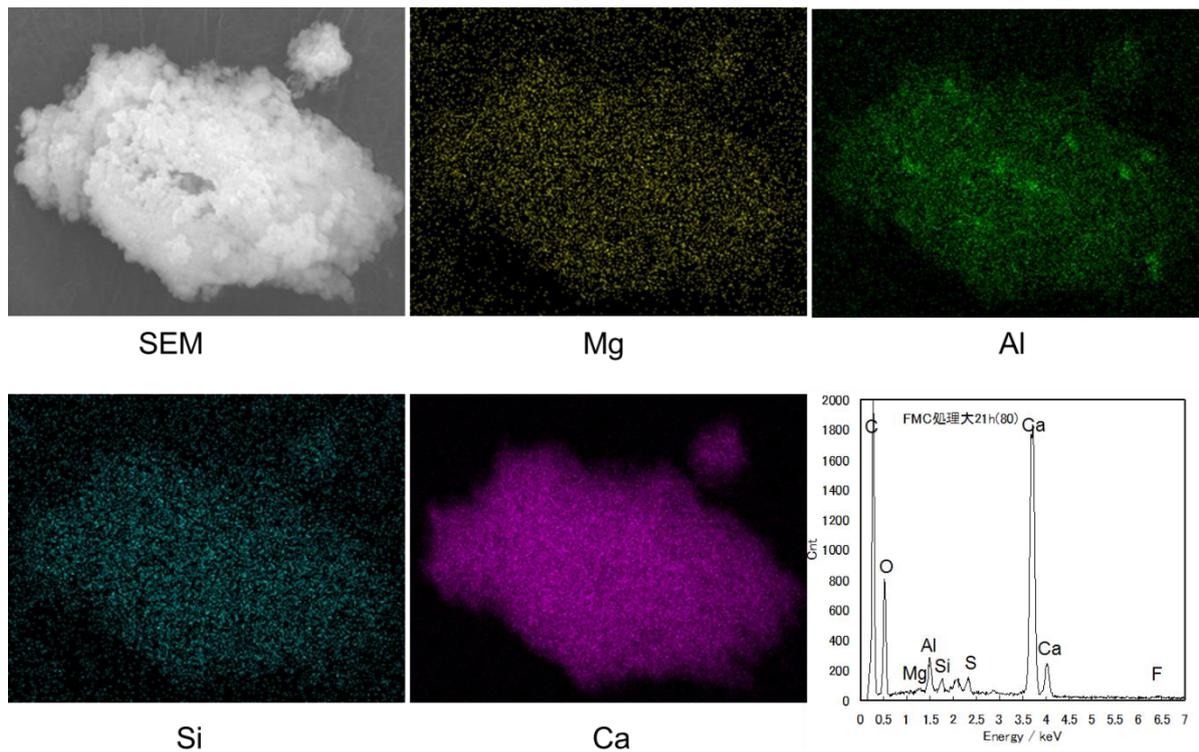


図 34 スレート中のアスベスト分解処理後の元素分布. スレートのアスベストは塊となっている.
Ca が主成分

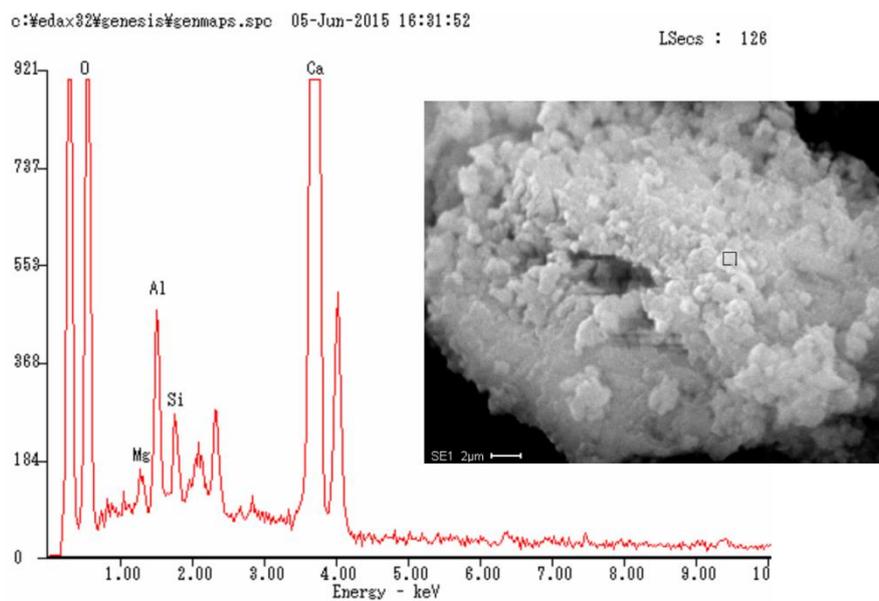


図 35 アスベスト分解処理後の点分析。塊は Ca が主成分。

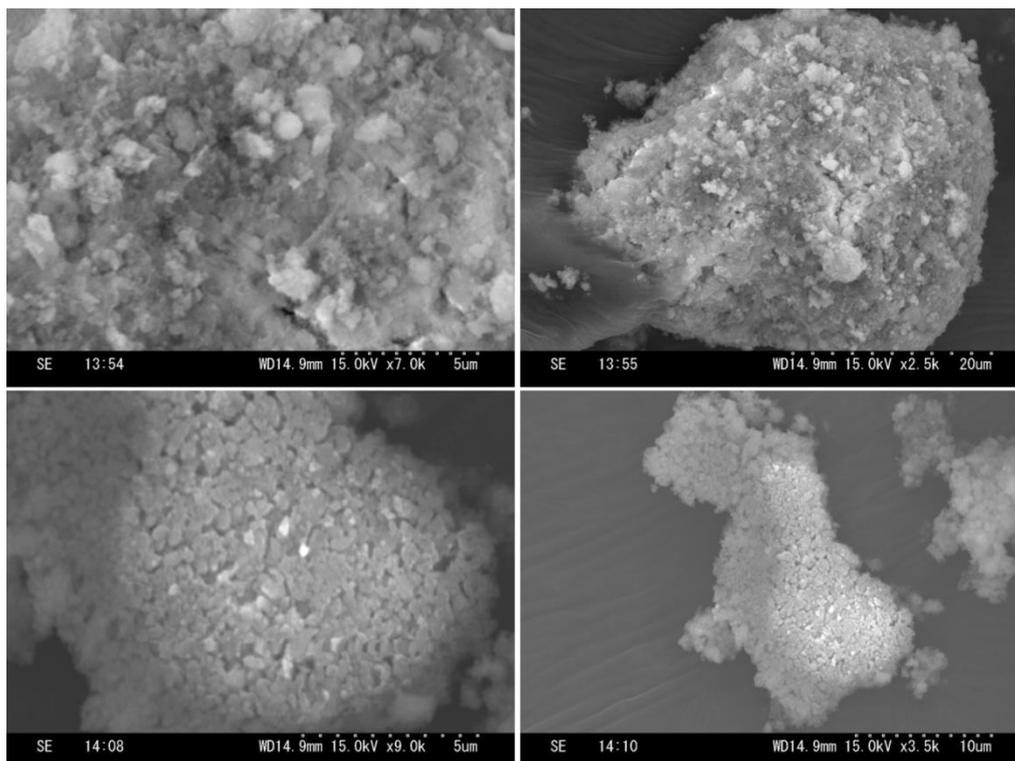


図 36 アスベスト分解処理後、HCl 洗浄した SEM 画像

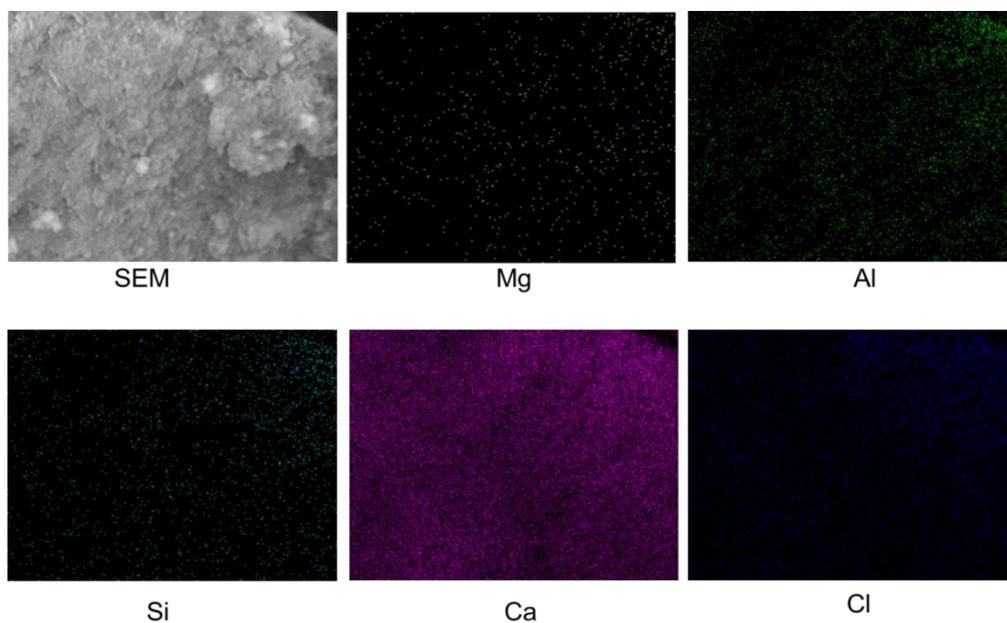


図 37 アスベスト分解処理後、HCl 洗浄した分解生成物の元素分布。塊の主成分は Ca である。
塩酸処理によって Mg は溶解した。

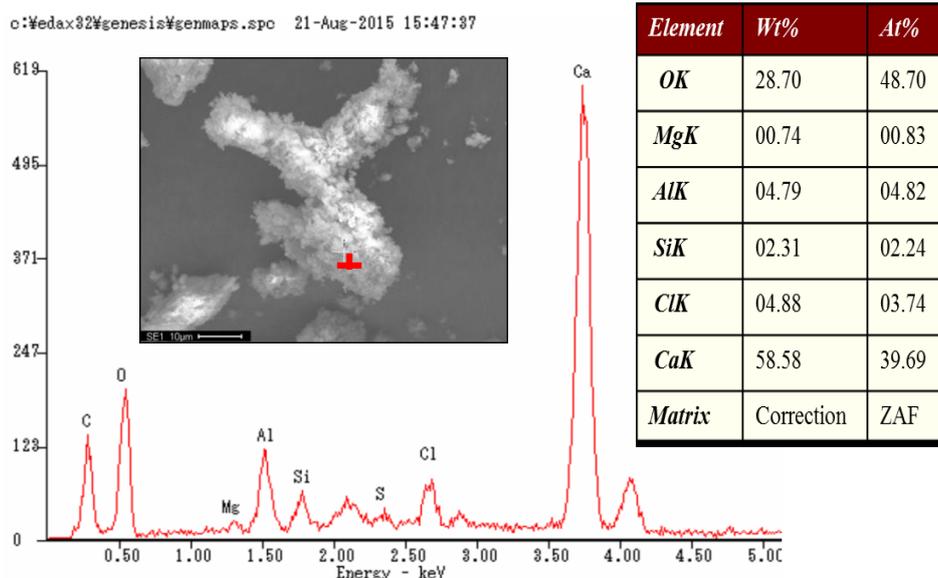


図 38 アスベスト分解処理後、HCl 洗浄した生成物の点分析 Mg は溶解して消滅している。
(試料 156)

c 液体窒素によるアスベストの分解処理

上記の SEM 画像及び EDX 分析結果はモルタルミキサーの条件下でアスベストを分解した後の生成物である。IPS を添加しなくてもアスベストが分解されることを XRD と PCM より明らかにした。ここでは、分解生成物の SEM 画像、構成元素より、分解生成物を同定した。その結果を以下に示す。

水を浸透させたスレートに液体窒素を加え、1 時間放置後、磁製ミルでアルミナボールと一緒に回転攪拌した。分解処理前のスレートと 12 時間処理したスレートの SEM 画像及び EDX のデータを以下に示す (図 39～43)。液体窒素で処理したスレートを破砕しただけでは、繊維状のスレートは残っていた (図 39、40)。繊維状の物質は Mg、Si からなるクリソタイルである (図 40)。しかし、ボールミルで回転処理すると繊維状物質は消え塊となった (図 41)。その塊は Ca と Si からなる。SEM 画像で洗浄に見えるものは、Mg を含んでいないので、アスベスト (クリソタイル) ではない (図 42)。このように、IPS を加えなくても、液体窒素で処理後、ボールミルで回転攪拌すると繊維状化合物消えることが、SEM, EDX からでも確認された。

。

i 液体窒素を加え破碎したスレート中のアスベストの SEM 画像

● 液体窒素から取り出し、ボールミルで分解する前のスレートの SEM 画像

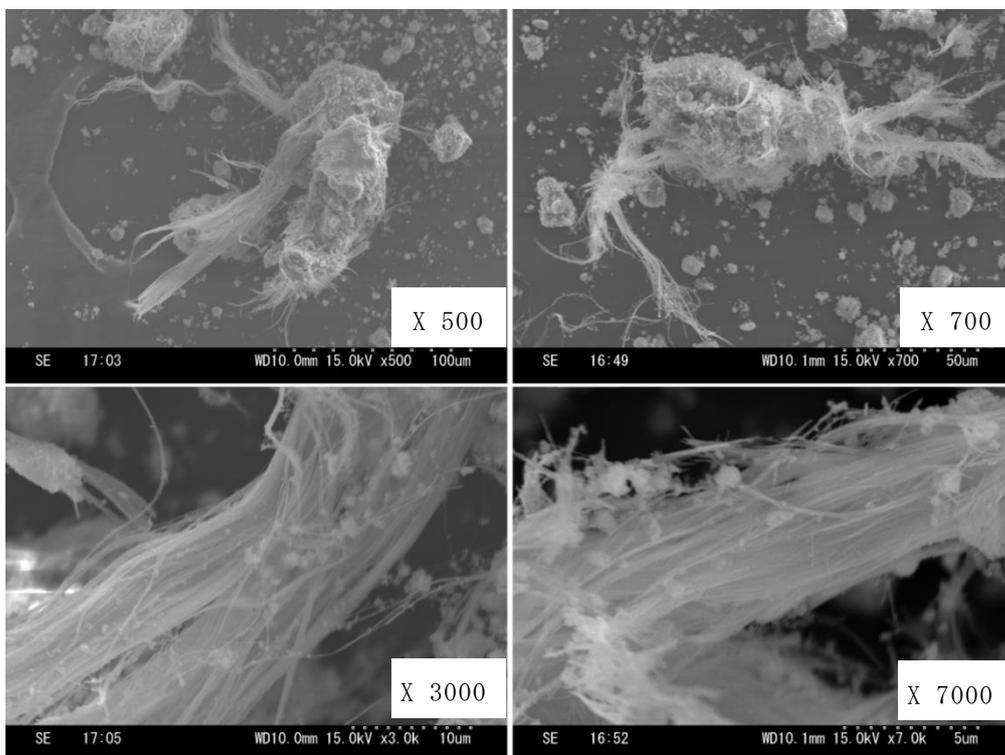


図 39 含水したスレートを液体窒素で浸漬し、磁製ミルで 2 時間破碎処理したアスベスト試料 67。アスベスト繊維は束になって集まっている。

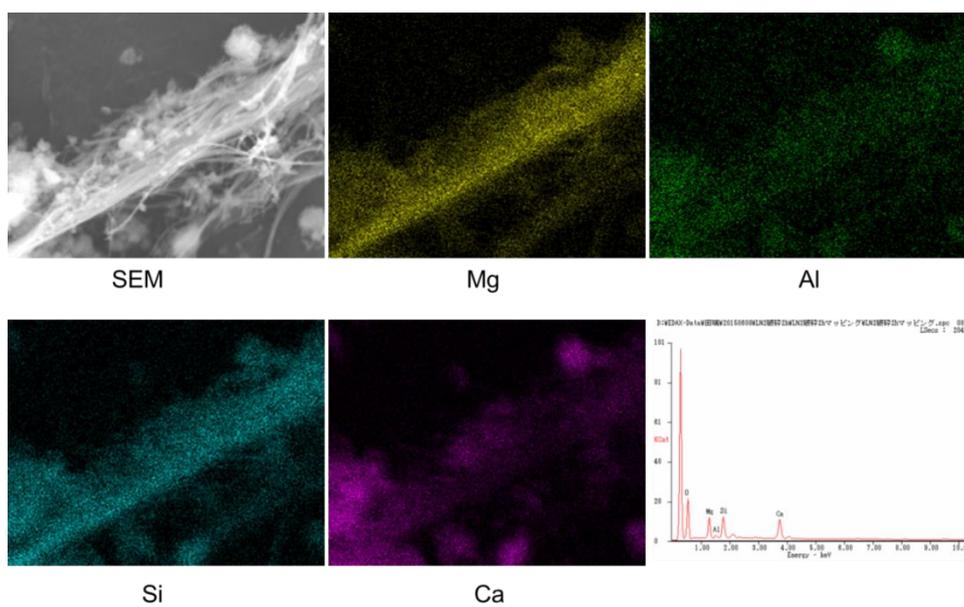


図 40 分解処理前の破碎処理したアスベストの元素分布。Mg, Si が繊維状物質の構成元素である。

●液体窒素処理後ボールミルで分解処理したアスベストの SEM 画像と EDX

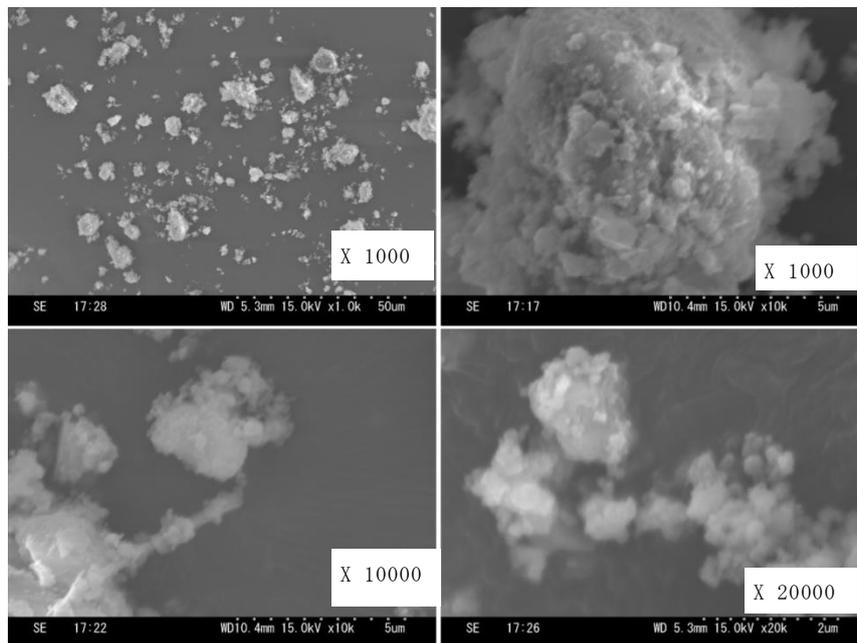


図 41 磁製ミルで 12 時間破碎処理したアスベストの SEM 画像。小さく破碎物が点在する。試料 172。

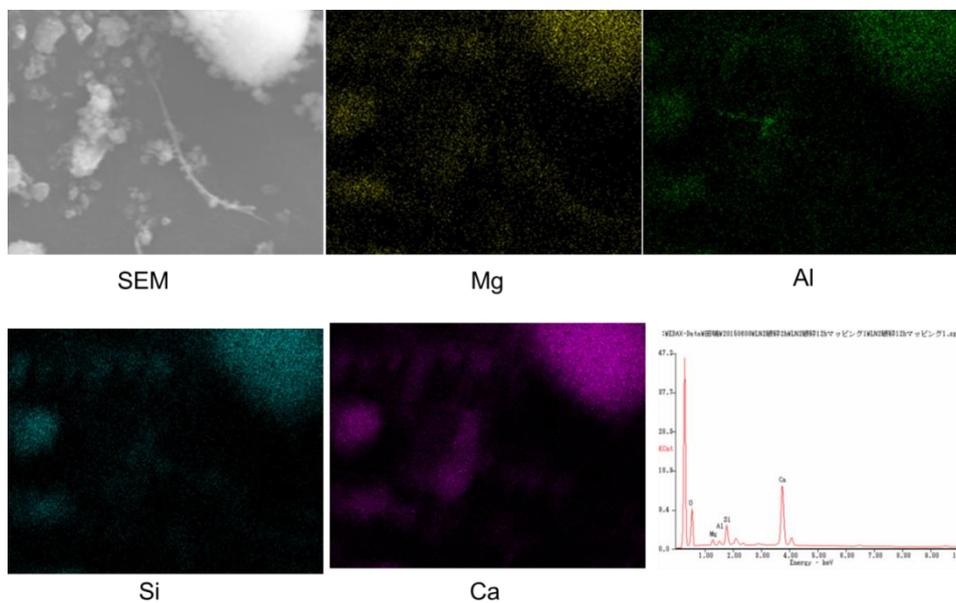


図 42 磁製ミルで 12 時間破碎処理したアスベストの元素分布。球状の塊は Ca、Si が主成分。繊維状物質は Mg、Ca を含まないのでアスベストでない

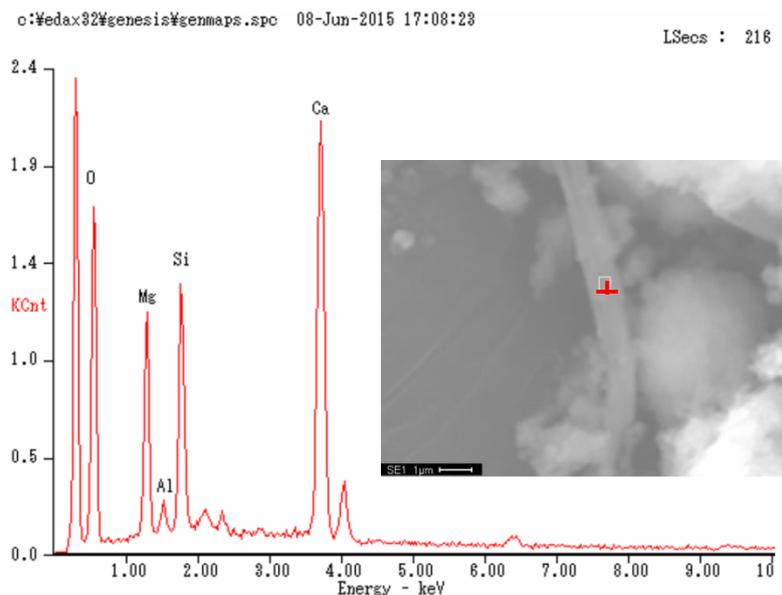


図 43 磁製ミルで 122 時間破碎処理したアスベストの SEM 画像と EDX 点分析。繊維所物質の主成分は Ca。

以上のように、アスベストの分解後生成物の XRD、PCM、SEM、EDX の測定結果から、アスベストは IPS 溶液を 5 % または 10 % 添加し、磁製ミルまたはステンレスミルでアルミナボールミルまたは鋼球と一緒に回転することによって分解することが明らかになった。ステンレスミルで鋼球を用いると 3 時間でアスベスト含油率は 0.1 % 未満になることが明らかになった。

d 分解生成物の環境評価

OECD テストガイドラインに則った試験法により、アスベスト分解生成物の環境評価を行った。一般財団法人化学物質評価研究機構久留米事業所で「アスベスト含有スレート破碎物 (IPS-NaOH 処理) のオオミジンコを用いる 48 時間急性遊泳阻害実験を依頼した。ミジンコが遊泳する水槽 400 mL にアスベスト分解物を 100 mg/L の濃度で加え、水温 20°C で 48 時間暴露後のオオミジンコの遊泳状態を観測した。水槽の pH はコントロールで 7.9 であるが、アスベスト処理物添加で pH が 8.8 (開始時) ~ 8.1 (終了後、48 時間後) と若干上昇するものの、オオミジンコの遊泳阻害は認められなかった。

(3) アスベスト分解反応機構

上述のように、スレートに含まれるアスベストは、IPS 溶液を加え、磁製またはステンレスミルアルミナボールまたは鋼球と一緒に回転攪拌すると、XRD スペクトルにおいてアスベスト由来のピークは消滅し、位相差顕微鏡・分散染色法では繊維状物質 (アスペクト比 3 以上) は 3000 粒子中 4 以下になり、XRD よりアスベスト含有率は 0.1 % 未満となった。また、SEM、EDX からアスベスト繊維構造は見られず丸い塊となった。その組成は主に CaCO_3 であることが明らかになった。アスベスト分解反応は、①IPS の濃度が濃いほど速く起こり、②磁製ミルよりもステンレスミルで鋼球を用いる処理では 3 時間でアスベスト含有量は 0.1 % 未満になった。更に、③水を

含侵したスレートを液体窒素で凍結処理し、ボールミルで回転攪拌するとアスベストの含有量は0.1%未満になった。凍結処理した試料にIPSを加えるとさらに短時間でアスベストの分解は起きた。従って、アスベストの分解剤であるIPS溶液は硫黄を含んでいるので、分解処理過程における硫黄の酸化状態をシンクロトロン光施設（佐賀県鳥栖市）で測定した（研究方法参照）。酸化状態の異なる硫黄化合物と分解処理過程における硫黄のXANESスペクトルを図44、45に示す。

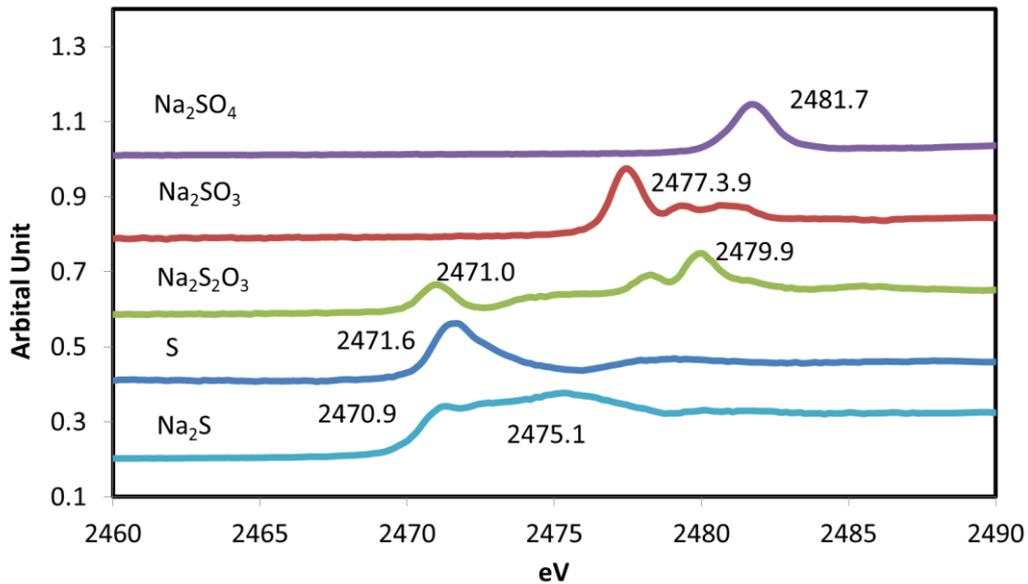


図 44 準硫黄化合物の XANES スペクトル

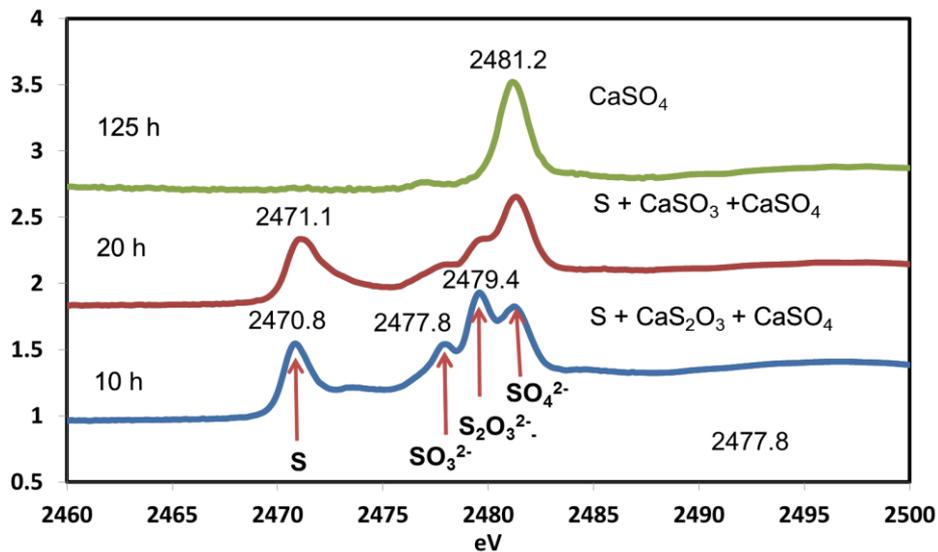


図 45 分解処理過程における硫黄の XANES スペクトル

図 44 よりピークの位置は硫黄の酸化状態によって違うことが分かる。高酸化状態の硫黄ほどピーク位置は高エネルギー側にシフトする。また、分解処理過程における硫黄の XANES スペクトルは分解時間とともに高エネルギー側にシフトしている (図 45)。すなわち硫黄は次のように酸化されていることが分かる。



アスベスト分解剤 (IPS) は硫黄と消石灰から合成された。IPS は黄赤色を帯びた透明な溶液で、負電荷を有する高分子として溶解している。その溶液の組成を知るために、IPS 溶液の XANES スペクトルを測定した (図 46)。硫化ナトリウム (Na_2S) よりも硫黄 (S) に似た XANES スペクトルである。しかし、硫黄は水に溶けないが IPS 溶液は水溶液である。従って、硫黄高分子の陰イオン S_n^{m-} として溶解していると考えられる。

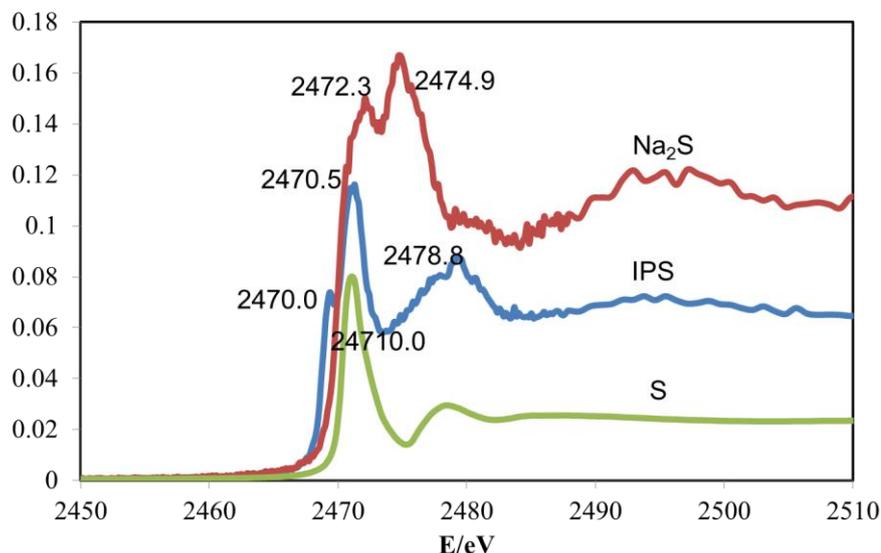


図 46 IPS 溶液及び関連硫黄化合物の XANES スペクトル

IPS によるアスベスト分解は次のように考えられる (図 47)。アスベストは層状構造であるので、IPS 溶液中の $(\text{Ca}_m)(\text{S}_n^{m-})_2$ がアスベストの層間にインターカレートし、 Ca^{2+} はアスベスト中の金属イオン、例えば Mg^{2+} 、と置換する。ボールミルで回転攪拌の過程で $(\text{Ca}_m)(\text{S}_n^{m-})_2$ の S は上記のように酸化される。硫黄が酸化されるとイオン半径が大きくなる。例えば、 S^{2-} (1.70\AA) \rightarrow SO_4^{2-} (2.44\AA)。その結果、アスベストの層間が拡張され結晶に歪が起きる。歪んだアスベストはボールミルと壁に衝突し破碎される。アスベストの分解は、IPS を加えなくても、含水したアスベストは液体窒素で凍結された後ボールミルでの回転攪拌でも分解することを先に示した。ここでも、アスベスト中の水が氷結し、体積膨張によって結晶間に歪が生じ、歪んだアスベストがボールミルの壁やボールとの衝突で破碎が起きると考えられる。アスベストの分解過程では、アスベストの XRD ピークが消滅し、SEM 画像で示されるように繊維状の結晶がなくなり、大きな塊となった。このように本アスベスト分解は、IPS 共存下でのボールミルとボールとの破碎作用に

よる結晶の無定形化をもたらすメカノケミカル反応と考えることができる。アスベストの分解は、①IPSが多いほど、②ステンレスミルと鋼球を用いる方が磁製ミルとアルミナボールを用いるよりも速く進むということは、上記メカノケミカル反応を支持していると考えられる。結晶に貫入した化合物の酸化膨張による歪と結晶間の水の氷結による膨張・歪が結晶を破壊する現象は自然界で起きる風化現象と類似している（図47）。

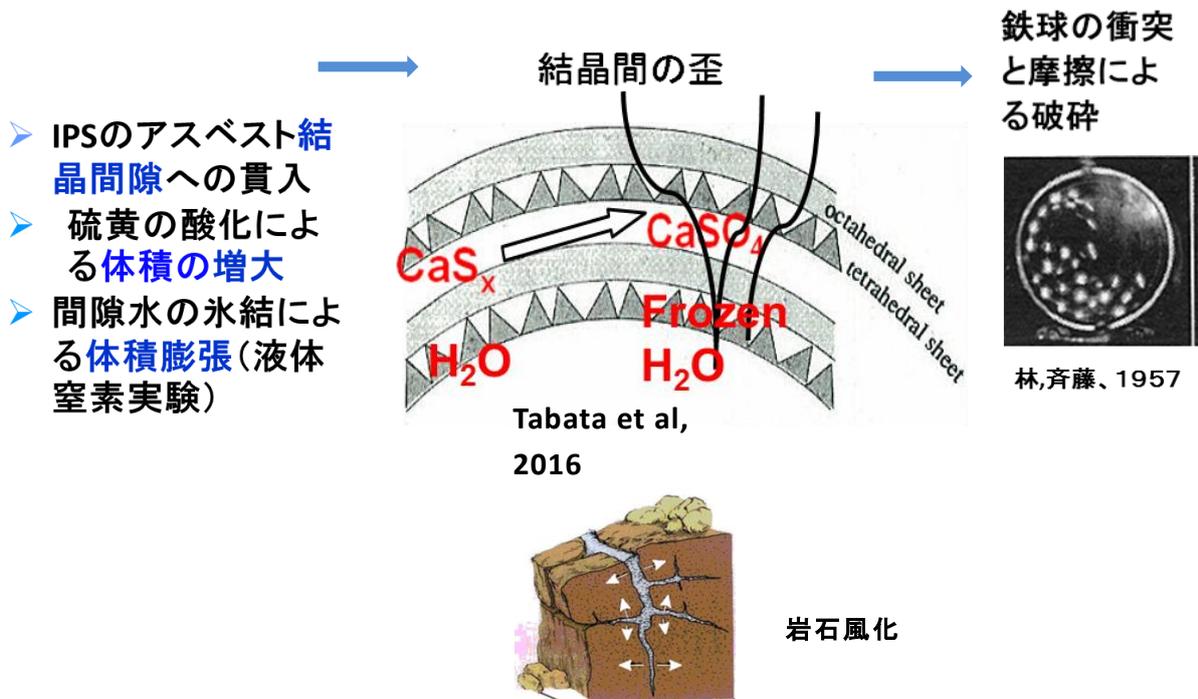


図 47 アスベスト分解反応のモデル図

4) アスベスト分解法の相互比較

上記のように種々の方法でアスベストを分解した。モルタルミル、大型ミル、磁製ミル、ステンレスミル、アルミナボール、鋼球、NaOH の共存、液体窒素処理、スレートの大きさなどである。ここでは、それらの分解条件の中で、ミルの種類やボールの種類と混合法の違い、IPS 濃度の違いが分解時間に同様に影響するかを総合的に検討する。そのため、今までの多くの実験結果からいくつかを抽出しアスベストの分解について相互比較を行った。

図 48 より、アスベストの分解に要する時間は IPS の濃度に依存する。IPS の濃度が濃いほど短く、大型ステンレスミルでは 9 時間でアスベスト含有量は 0.1% 未満となった。図 49 からは、小型ステンレスミルで単一鋼球を用いる方が混合球を用いるよりもアスベストの分解は速くなる。鋼球の全部の重さは混合鋼球と単一鋼球とは同じであるが、重い鋼球の方が効果的にアスベストを分解する。鋼球と鋼球および鋼球とステンレスミルの壁との衝突が強いほどアスベストは分解しやすいと考えられる。図 48 からは、3 時間内でアスベストを分解するには、IPS 濃度を 10% にし、磁製ミルと磁球またはステンレスミルと鋼球を用いると良い。しかし、図 50 から、ステンレスミルと単一鋼球を用いて、IPP = 10% で処理するとアスベスト分解はより効果的である。

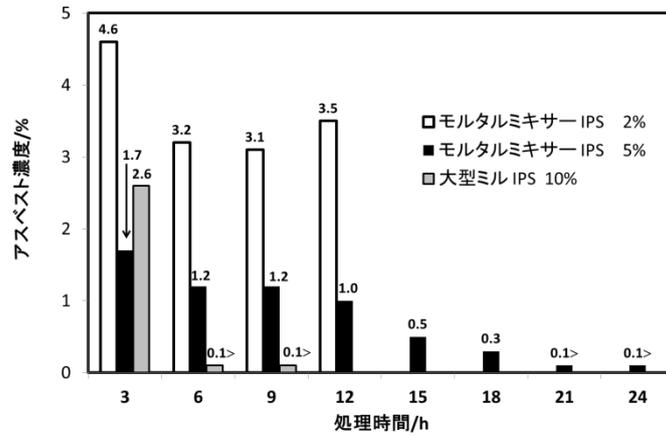


図 48 モルタルミルと大型ステンレスミルを用いるアスベスト分解時間の比較
ミルの大きさ：モルタルミキサー（ $\Phi = 600$ mm）、ステンレスミル（ $\Phi = 300$ mm）

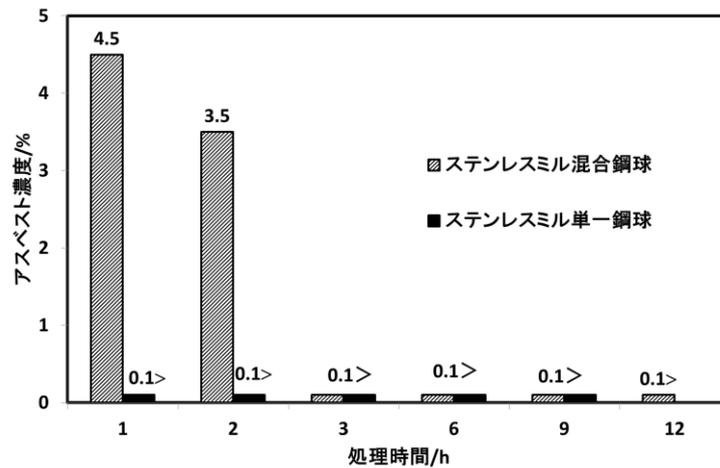


図 49 小型ステンレスミルを用いる単一鋼球と混合鋼球の違い
単一球（ $\Phi = 20$ mm、10.7 kg）、混合球（ $\Phi = 20$ mm（8 kg）、10 mm（2.7 kg）。IPS = 10%

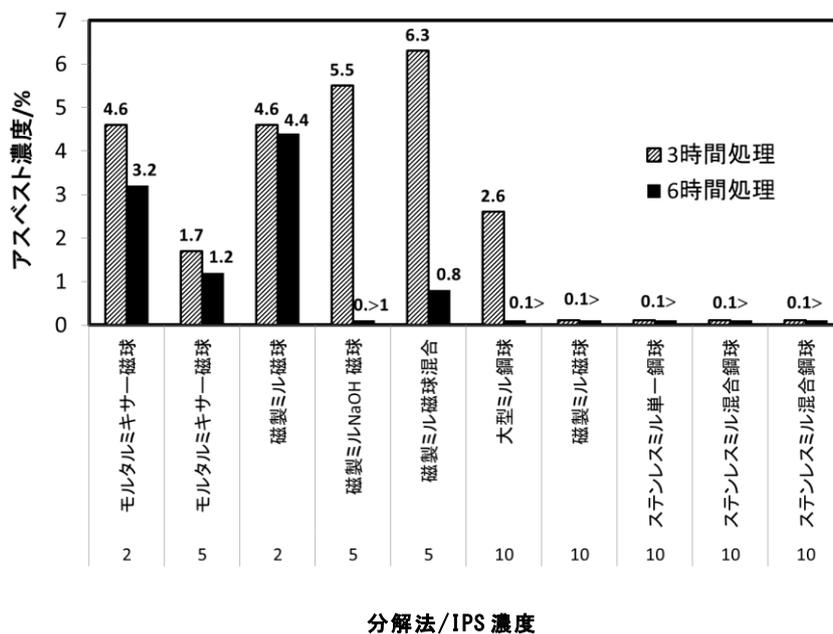


図 50 処理 3 時間と 6 時間における分解ミルとボールの違いの効果

ミルとボールの大きさ (Φ) /mm : モルタルミキサー (600、20~10)、磁製ミル (280、20~10)、大型ミル (900、20) ステンレスミル (300、20~10)

(2) 大規模災害を想定したスレートの処理システムと消費エネルギー

東日本大震災 (2011 年 3 月 11 日) 以降、国内では大規模災害が近年多発している。広島市土砂災害 (2014 年 8 月 20 日)、常総市大洪水、関東・東北豪雨 (2015 年 9 月 9~11 日)、熊本地震 (2016 年 4 月 14~16 日)、糸魚川大規模火災 (2016 年 12 月 22 日) である。これらの災害では家屋の倒壊が起きた。災害地で周辺に散乱したアスベスト含有建材を採取し、試料中のアスベストの含有量と被災地で採取したアスベストの本法による分解実験を行った。更に、災害地でのアスベスト分解法を確立するために、最適分解法にもとづいた可搬型アスベスト分解装置の設計図を委託し、それに基づく消費エネルギーを計算した。災害地でのアスベスト含有建材の散乱状況や仮置場と採取した試料の形状は報告書の末尾にまとめている。

1) 災害地で採取したスレート中のアスベスト含有量

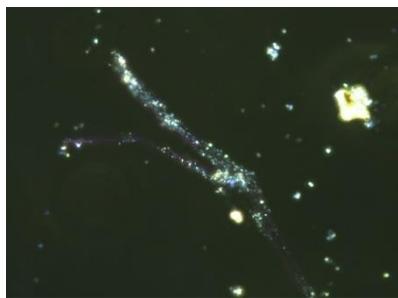
災害地で採取した試料中のアスベスト含有量を表 18 に示す。分析は位相差顕微鏡・分散染色法によりアスベストの含有を確認後、X 粉末 X 線回折法で定量した。

表 18 災害地で採取したアスベスト含有建材中のアスベスト分析

試料番号	採取場所・材料・採取年	アスベスト含有量 (%)
159	岩手県陸前高田市 スレート状 平成 26 年	6.2
160	岩手県大船渡 壁材 平成 26 年	0
161	常総市 堤防決壊箇所 スレート状 平成 27 年	8.8
162	常総市 IC 横集積所 壁状 平成 27 年	0
126	宮城県東松島市 スレート状 平成 28 年	8
127	宮城県女川 タイル状 平成 28 年	12
128	熊本県御船町 スレート状 平成 28 年	8.9
31	熊本県益城町津森 スレート 平成 28 年	8.3
108	熊本県益城町木山 内装壁材 平成 28 年	2.9
109	熊本県益城町中央小学校跡 スレート状 平成 28 年	13

被災地に於ける非飛散性アスベスト建材と考えられる試料を採取した建材の分析結果、10 試料の内 8 試料にアスベストを確認した。スレートに含有されるアスベストはすべてクリソタイルであったが、スレート建材以外の壁材にはアスベストが含まれているものと（試料 108）、含まれていないものがあった。壁材（試料 160、162）にはアスベストは含まれていなかったが、試料 160 では、XRD ではクリソタイル付近に大きなピークが観察された。しかし、PCM ではアスベストは観測されなかった。XRD のピークの位置が違っていたので、他の鉱物と考えられる。災害地で採取したスレート類の具体的な位相差顕微鏡・分散染色法及び XRD の結果は以下の通りである。

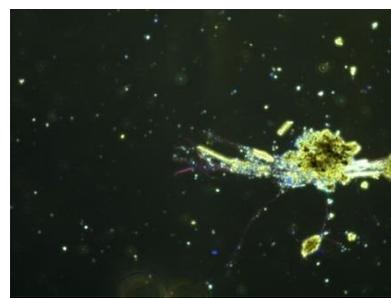
- a 災害地で採取したスレート類の位相差顕微鏡・分散染色法（図の下の説明は試料番号、採取地、アスベスト含有率を示している）。



159 陸前高田市 6.2 %



160 岩手県大船渡市 0 %



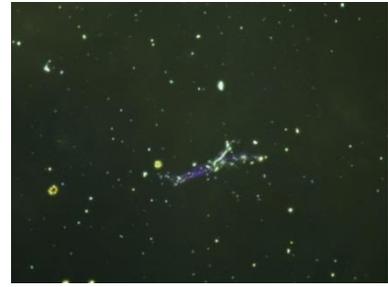
162 常総市堤防決壊箇所 8.8 %



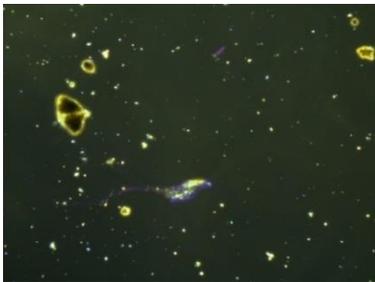
162 常総市 IC 集積所 0%



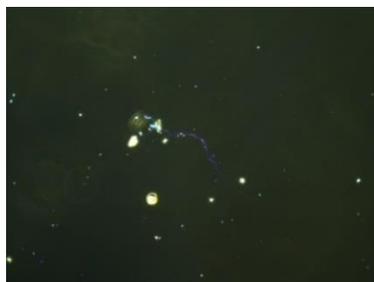
126 宮城県東松島市 8.0%



127 宮城県女川市 (タイル) 12%



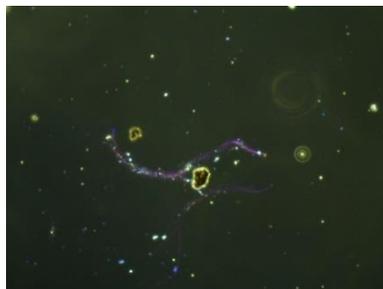
128 熊本県御船町 8.9%



31 熊本県益城町津森 8.3%

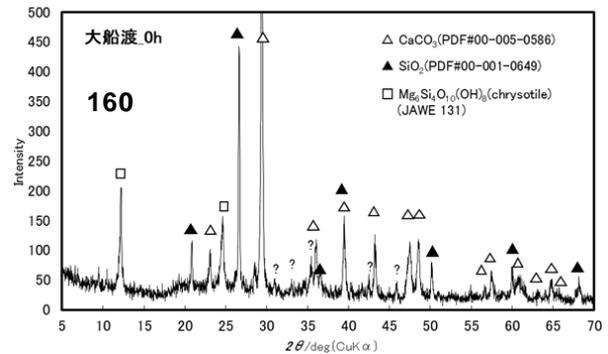
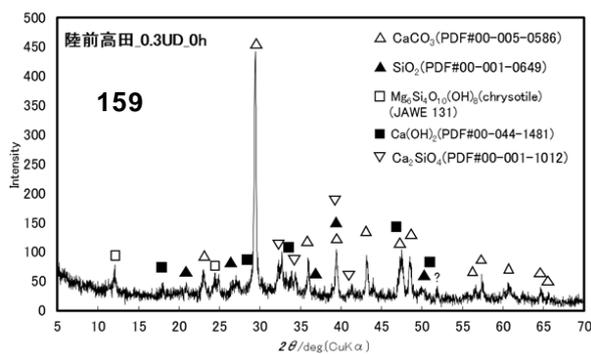


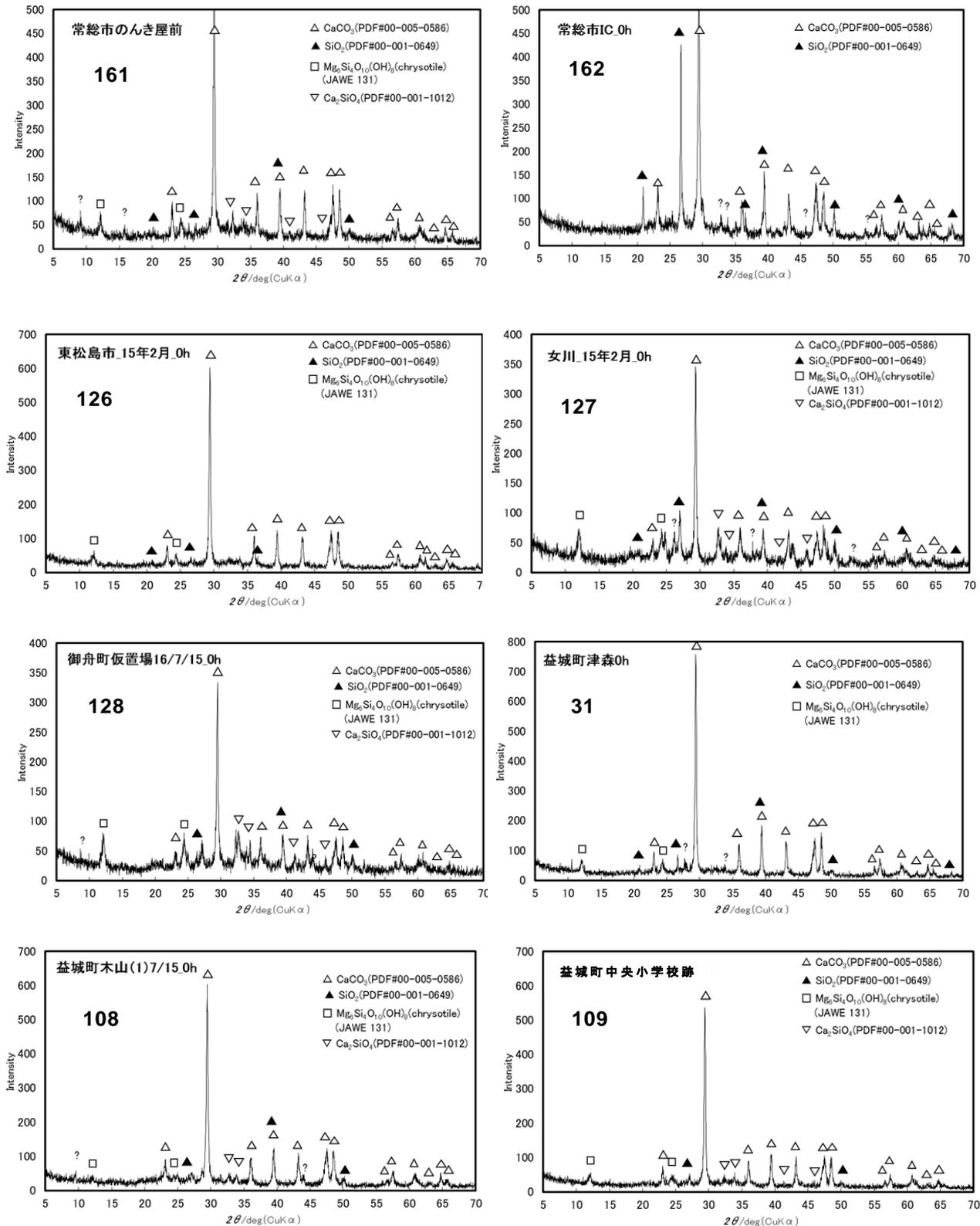
108 熊本県益城町木山 (内装壁材) 2.9%



109 益城町中央小学校跡 13%

b 災害地で採取したスレート類の粉末X線回折





2) 地震災害地試料のアスベスト分解処理

a 分解試験の結果

熊本地震災害地で採取したスレートを本法で分解した。その分析結果を以下に示す。

表 19 熊本県益城町津森地内試料

試料番号	処理時間	分散色を呈する粒子数 (3000 粒子中)		アスベスト含有率/%
		アスペクト比 3 以上の繊維状粒子数	3 以下の粒子数	
31	0	38	0	8.3
47	3	0	4	0.1>
47	3“(209)	—	—	0.1>
47	“3“(210)	—	—	0.1>
48	6	0	1	0.1>
49	9	0	2	0.1>
50	12	0	2	0.1>

【実験条件】小型ステンレスミル(容量 8.2 L)、混合鋼球 ($\Phi=20\text{ mm}$ (8 kg) + $\Phi=10\text{ mm}$ (2.7 kg))、IPS 50g、試料 500 g ($\Phi=11.2\text{ mm}$ UD)、処理水 1.5 L

IPS は試料重量の 10% 添加量した。20.0 mm~11.2 mm に破碎した試料で無害化試験を実施した。3 時間処理でアスベスト含有量は 0.1 % 未満となった。同様に、住宅家屋に使われるスレート屋根およびスリランカで最近製造されたスレートボードも同じように分解しできた (表 16 (86)、表 17 (23))。

b 分散染色法による確認



図 51 熊本地震後採取したスレートの分解処理前後の位相差顕微鏡・分散染色法分析。
アスベスト含有量：a, 8.3 %; b, 0.1 >。

c XRD

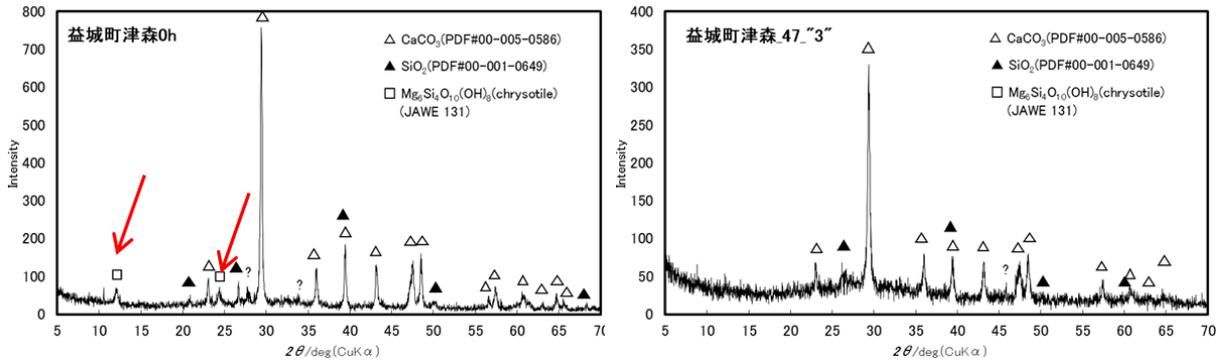


図 52 熊本地震後の採取したスレートの分解処理前後の XRD

アスベスト含有量：a、8.3 %；b、0.1 %

3) 大規模災害時のスレートの処理システム

災害地で採取したアスベスト含有建材（主にスレート）中のアスベストをステンレスミルで鋼球（20 mm）と一緒に IPS を 10 % 加えて 3 時間回転攪拌すると残留アスベストは 0.1 % 未満となった。本法を用いて災害地でアスベストを分解するために、可搬型のアスベスト分解装置の設計図を委託した。多量のアスベストの処理が可能で移動型とした。また、処理量を 5 トン/日を目標とした。

a 可搬式アスベスト含有建材処理装置及び負荷容量及びフロー図

災害地の仮置き場や産業廃棄物最終処分場（安定型）でアスベストが分解できるように可搬型アスベスト分解装置を設計した。アスベスト含有建材の装置への投入から分解（無害化）まで全て外部と遮蔽された装置である。アスベスト分解装置図と工程表を図 53、54 に示すが、装置の概要は以下の通りである。

- ① 災害地でアスベストの分解ができるように、災害地へ移動可能な 10 トントラックへの車載型とした。
- ② 集積されトン袋に入ったアスベスト含有建材（スレート等）を破砕車にホークリフトで運ぶ。
- ③ 破砕車にトン袋を投入し、袋を破りスレートを破砕車に移す。
- ④ スレートを破砕機で小片（10 mm 以下）に砕く（pp. 81、82 参照）。
- ⑤ 篩分けして、10 mm 以下に破砕されたスレートをアスベスト分解装置へ送る。磁気選別機で鉄類除く。
- ⑥ 10 mm 以上のスレート（10 mm 以上）は再び破砕装置へ戻し、再破砕する。
- ⑦ 破砕されたアスベストに、鋼球とアスベスト分解液および水を入れる。
- ⑧ 分解装置を 50 rpm で 3 時間稼働する。
- ⑨ 3 時間後、アスベスト分解物をアームロールコンテナに移す。

⑩アスベスト分解物をモルタルミキサーでセメントと一緒に混合して、地盤材料を製造する。

設計図は 100 ページに及んでいるのでその一部を以下に示し他は報告書の最後に記載した。

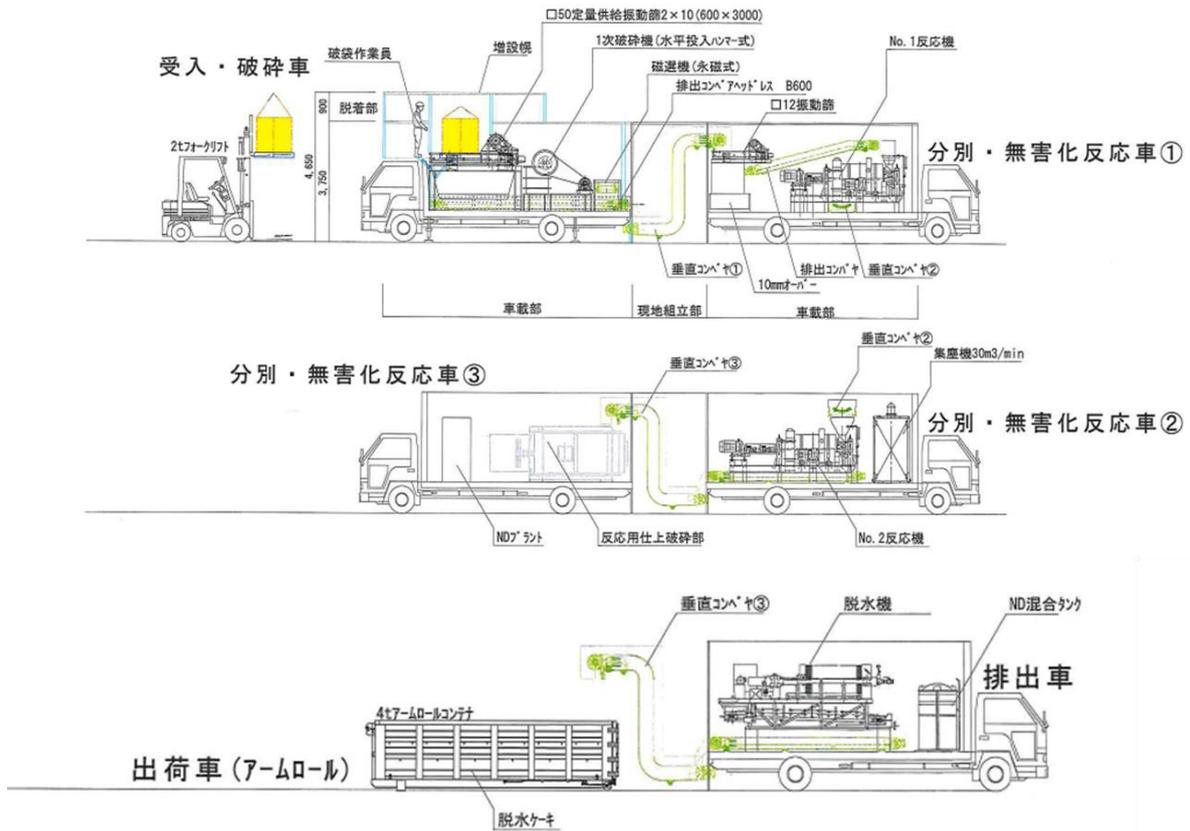


図 53 可搬型アスベスト分解装置図

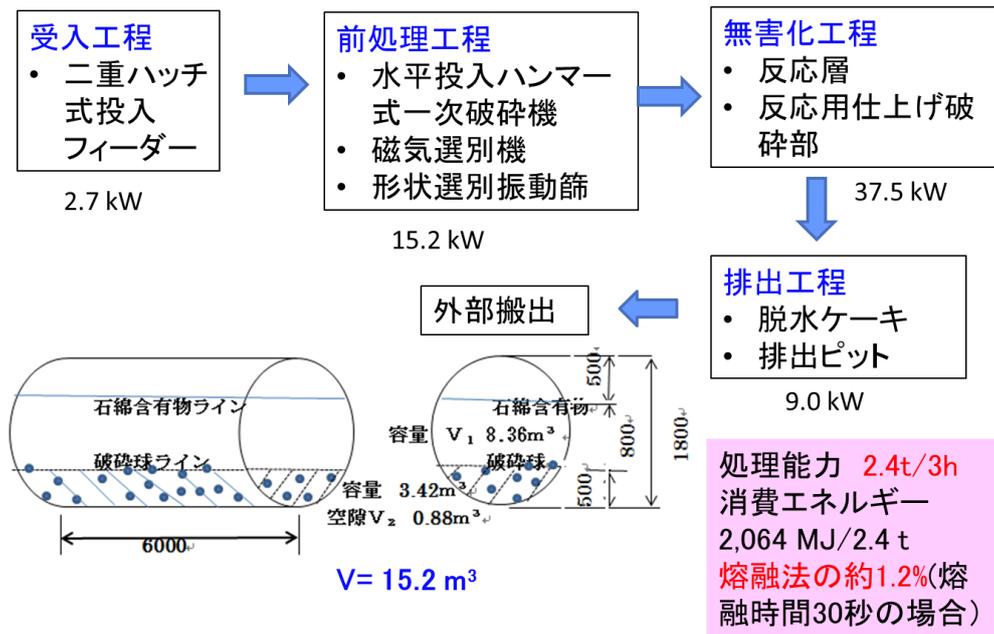


図 54 アスベスト分解工程と消費エネルギーの計算

b 可搬型アスベスト分解装置のアスベスト処理量

キルン直径 = 1.8 m、長 = 6.0 m、破碎球充填ライン = キルン底より 500 mm

石綿含有物及び処理水ライン = 破碎球ラインより 800 mm

キルン内容積 (V) = 15.2 m³

破碎球ライン容積及び上部空積 ($r = 900$, $h = 500$) ニュートン・ラフソン法

破碎球ライン面積 0.57 m²

容積 3.42 m³

上部面積 0.57 m²

容積 3.42 m³

破碎球充填率 (磁球径 20 mm) (最密充填構造)

$$r = (\sqrt{2}/4) a \quad \text{充填率} = \{4/3\pi r^3 \times 4\} / a^3 = 0.738 \quad 74\%$$

破碎球ライン空隙率

$$V_1 = 3.42 \text{ m}^3 \times 0.26 = 0.88 \text{ m}^3$$

破碎球上部 800 mm 容積

$$V_2 = 15.2 \text{ m}^3 - 3.42 \text{ m}^3 \times 2 = 8.36 \text{ m}^3$$

石綿及び処理水投入可能容積

$$V_3 = V_1 + V_2 = 0.88 \text{ m}^3 + 8.63 \text{ m}^3 = 9.5 \text{ L}$$

石綿含有物及び処理水の重量比率 1 : 3

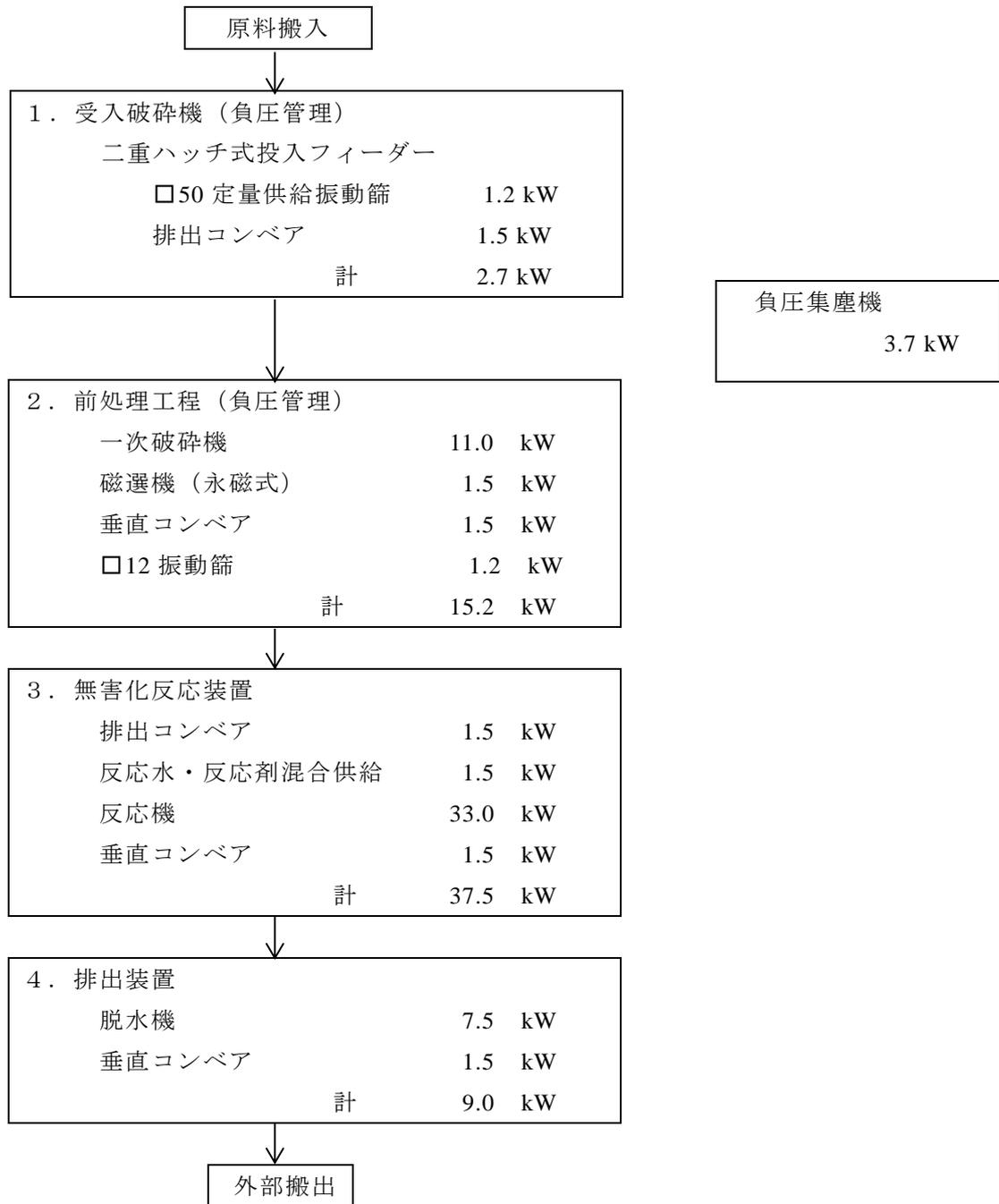
石綿含有物 (スレート嵩比重 1.0g/cm³)

$$9.51 \times 1 / 4 = 2.4 \text{ トン (3時間当たり処理量、4.8 トン/日当たり処理量)}$$

水量

$$9.51 \times 3 / 4 = 7.1 \text{ m}^3 \quad 7.1 \text{ トン}$$

c 本装置の消費エネルギー（石綿含有物 2.4 トンを処理するエネルギー）



i) 受入破砕機（負圧管理）

運転時総熱量計算

$$2.7 \text{ kW} \times 3.6 \text{ MJ/h} \times 1 \text{ h} = \mathbf{9.8 \text{ MJ}} \quad (1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ})$$

ii) 前処理工程（負圧管理）

集塵機 $3.7 \text{ kW} \times 3.6 \text{ MJ/h} \times 4 \text{ h} = 53.8 \text{ MJ}$

一次破砕等 $15.2 \text{ kW} \times 3.6 \text{ MJ/h} \times 2 \text{ h} = 109.4 \text{ MJ}$

運転時総熱量 $\mathbf{163.2 \text{ MJ}}$

iii) 無害化反応装置

運転時総熱量 $37.5 \text{ kW} \times 3.6 \text{ MJ/h} \times 4 \text{ h} = \mathbf{540 \text{ MJ}}$

iv) 排出装置

運転時総熱量 $9.0 \text{ kW} \times 3.6 \text{ MJ/h} \times 2 = \mathbf{65 \text{ MJ}}$

運転時総熱量(i ~ iv) $\mathbf{778.0 \text{ MJ}}$

d 本装置と同量（2.4 トン）のアスベストを熔融方式で処理するのに必要な消費エネルギー

アスベスト比熱 $800 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ （エネルギー・仕事・熱量の換算より）

i) 常温 25°C のアスベストを熔融温度 1100°C に昇温する熱エネルギー

熱エネルギー = 質量×比熱×温度変化

$$\text{熱エネルギー} = 2400 \text{ kg} \times 800 \text{ J} \times 1075^\circ\text{C} = 2,064,000,000 \text{ J} = 2064 \text{ MJ}$$

アスベストの融解熱と顕熱の区別はせず、アスベスト熔融温度まで昇温させるのに必要なエネルギーを計算した。また、現在実施されているアスベスト熔融処理は、製鋼メーカーの製鋼炉や電気炉、若しくは産業廃棄物焼却場の熔融炉である。これらの熔融炉は産業活動の一部として稼動されているために常に 1000°C 以上に維持されていると考えた。従って、炉自体の昇温エネルギーは考慮せず、アスベスト含有建材の昇温のみを考慮した。

e アスベスト 2.4 トン処理に必要な熱エネルギー消費量の比較

本開発計画消費エネルギー ÷ 熔融処理消費エネルギー × 100

$$778 \text{ MJ} \div 2064 \text{ MJ} \times 100 = 37.7\%$$

但し、熔融炉でアスベストが溶解するに要する時間を計算に入れていない。もし、投入された 2.4 トンのスレート建材の熔融に 30 秒かかるとすると、アスベストを熔融するのに必要なエネルギーは 61.92 GJ となる。その場合は、本法の消費エネルギーは熔融処理法の消費エネルギーの約 1.2% に相当する。本法は省エネルギーで環境負荷が少ない処理技術である。

f 熊本地震でのアスベスト搬出量

熊本地震におけるアスベスト含有建材の仮置き場から処理に搬出された量は以下の通りであった。従って、本装置によりスレートの処理した場合の処理時間を計算した。584時間かかる。一日6時間の運転を想定すると97日を要する。

表 20 熊本地震における災害廃棄物の種類別処理量（H28.4月～H29.2月）

（熊本県循環社会推進課災害廃棄物処理支援室）単位：t

種 類	処理量
石膏ボード	19,020
スレート	1,403
サイディング	19,933
石綿含有建材（スレートくず、石膏ボード、ケイカル板他）	2,550

（3）処理済みアスベスト建材の再資源化技術の開発および再資源化材の環境安全性評価

1）安定処理の適用性と再資源化材の強度特性

図 55 に CASE 1、および CASE 2 の養生 28 日供試体を対象とした一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係を示す。比較として、無害化処理物 1 を最適含水比 93.2%、締固めエネルギー 550 kJ/m³ で締固めて作製した供試体の応力-ひずみ関係を併記する。セメント混合直後に締固めを行わずに充填のみで供試体を作製した CASE 1 ではセメント添加率を増加させると大幅に剛性・強度が改善されていることがわかる。しかし、セメント添加率 10%では改良効果は小さくなっており、細粒分含有率が 35%と高くカルシウムの交換性吸着等の影響で強度改善効果は小さくなった¹¹⁾と考えられる。また、セメント添加率 20%の場合でも含水比調整を行い締固めを行った供試体と比較して、ピーク強度は低い値となった。供試体の乾燥密度を確認すると、安定処理供試体は 0.60～0.63 g/cm³、締固めた供試体は 0.74 g/cm³となっており、密度の差異が剛性に影響を及ぼしたと考えられる。

セメント混合後に乾燥、および締固めを行った CASE 2 では、破壊に至るまでの圧縮曲線はセメント添加率に関わらずほぼ同じ傾きとなっている。このことから、安定処理材の剛性は改良効果そのものよりも、締固めによる影響が大きいと考えられる。実際に安定処理供試体の乾燥密度は 0.71～0.77 g/cm³とセメント添加量を問わずほぼ一定となっている。しかしながら、セメント添加を行わずに締固めた供試体と比較して剛性は高くなっており、セメント添加による細粒分の団粒化によって剛性が改善されたと考えられる。また、セメント添加率の増加に伴い、ピーク強度が改善されており、セメント添加量の増加はピーク強度の改善に有効であると考えられる。一方、ピーク強度に達した後は安定処理供試体は急激に強度が低下しているひずみ軟化傾向がみられ、乾燥密度は非常に小さいものの一般的なセメント改良土と同様に脆性的な破壊傾向を示すと考えられる。

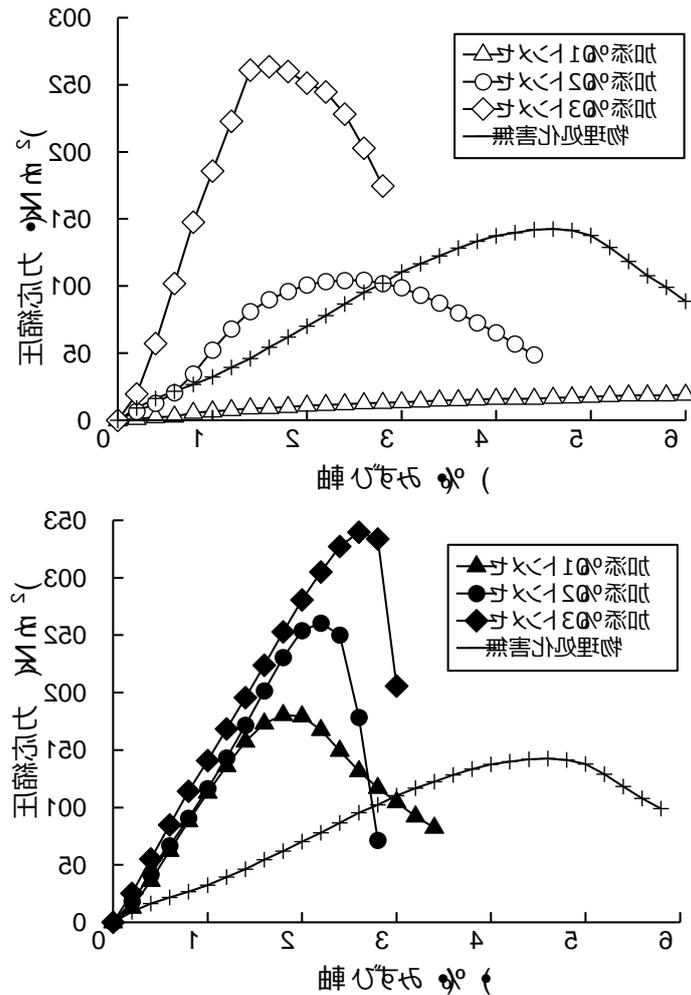


図 55 安定処理土の応力-ひずみ曲線

(上: 締固めを行わない場合、下: 含水比低下後締固める場合)

2) 粒状化処理の適用性

図 56 に初期含水比の違いによる粒状化処理材の粒度分布を示した。なお、造粒時間は 3 時間とし、粒度分布の計測にあたっては造粒物の破碎は行わずに見かけの粒度分布を示している。なお、 $w = 100\%$ のケースでは試料がミルの側壁に付着している場合や一部の造粒物の過度な団粒の進行により適切に造粒出来ないことが多く、安定した造粒を行うことが出来なかった。よって図 56 に示した粒度分布上は平均粒径は大きくなる結果となっているが、塑性限界を超える初期含水比となると、粒子同士が相互に付着しやすくなるため、団粒しやすい状態になると考えられる。初期含水比が塑性限界を超えない 70%、80%、90% のケースでは平均粒径が 1 mm 前後となっており、初期含水比に応じて平均粒径が大きくなっていることがわかる。特に 80%、90% のケースでは細粒分が 1% 以下にまで低減している。また、各含水比のケースでの均等係数は 70% のケースで 6.4、80% のケースで 4.3、90% のケースでは 2.3 となっており、初期含水比が高いと相対的に細粒分の減少が顕著となり、結果として均等な粒径の試料へと改良されていることがわかる。以上のことから、塑性限界をやや下回る含水比で適切な粒状化処理が可能と結論付けている既往の研究⁸⁾と一致する結果が得られており、概ね良好に粒状化が可能である。

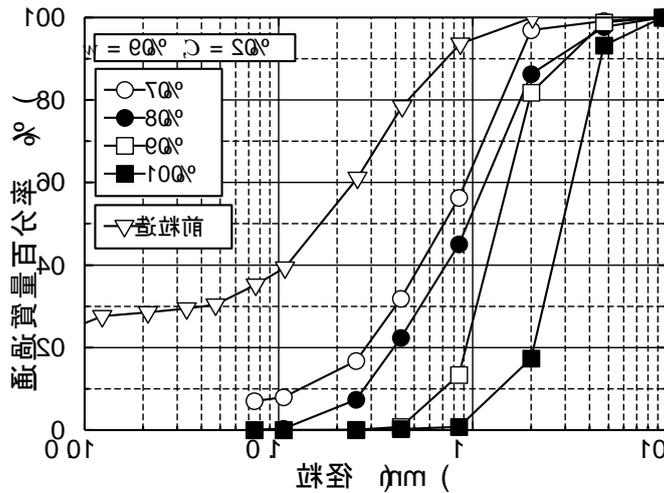


図 56 初期含水比が粒状化処理物の粒度分布に及ぼす影響

図 57 に初期含水比 90%、セメント添加量 20% の配合で、造粒時間を変化させて造粒した時の粒度分布を示す。全体的な傾向としては、造粒時間の増加に伴い、細粒分が減少し平均粒径が大きくなる傾向となる。15 分と 100 分とでは粒度分布に大きな違いはないが、100 分と 180 分を比べると均等係数が 5.6 から 2.3 となっており、平均粒径は 0.76 mm から 1.4 mm へと大きくなっている。その一方で、造粒時間が 180 分と 720 分の場合の粒度分布を比較すると、造粒時間が 720 分の場合の均等係数は 2.2 となっており大きく変化はしていない。よって、ラボ試験においてはある一定時間以上の造粒を行っても粒子径は概ね一定値に収束する結果となった。

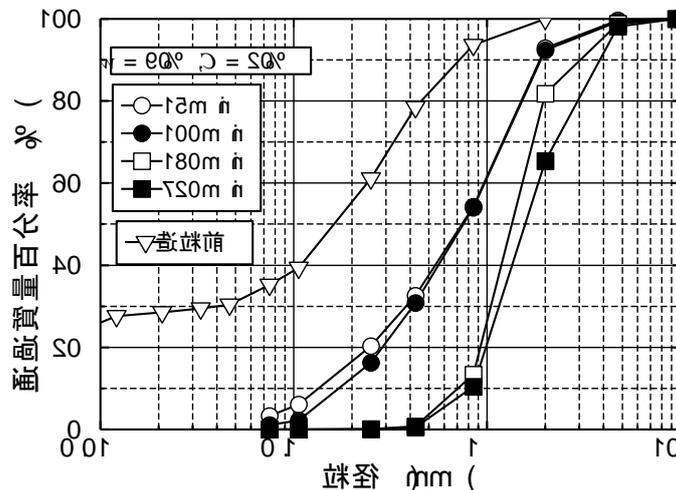


図 57 造粒時間が粒状化処理物の粒度分布に及ぼす影響

図 58 に造粒使用機材および試料の投入量が異なる場合の造粒物の粒度分布を示す。ポットミルを用いたラボ試験とモルタルミキサーを用いた実規模試験(試料投入量 1000 g)とした場合には、粒度分布に大きな相違がみられなかった。その一方で試料投入量を 3000 g とした実規模試験では、平均粒径が試料投入量 1000 g の場合と比較して約 3 倍の 4.0 mm となっている。これは、試料量

が多ければそれだけ粒子同士の接触機会が多くなることや、粒子が受ける圧力が大きくなること
 によって相互に付着しやすく、団粒化しやすい状態となっているためであると考えられる。図 59
 にほぼ同様の粒度分布が得られたラボ試験、実規模試験（試料投入量 1000 g）で作製した造粒物
 の外観を示す。外観では、容量の大きなモルタルミキサーを用いた実規模試験で製造された造粒物
 の方がより球に近い形状をしていることがわかる。これは円柱状のポットミルに夜造粒と比較
 して、モルタルミキサーでは回転攪拌が多方向に行われることから造粒物の形状がより球に近い
 形になったものと考えられる。

以上の結果より、実際の現場で適用が想定されるモルタルミキサーを用いても無害化処理物の
 造粒処理は良好に行われることが確認された。ただし、試料の投入量によって造粒物の平均粒径
 が大きく異なることから、実際の処理にあたっては処理時間の設計、管理が重要になるといえる。

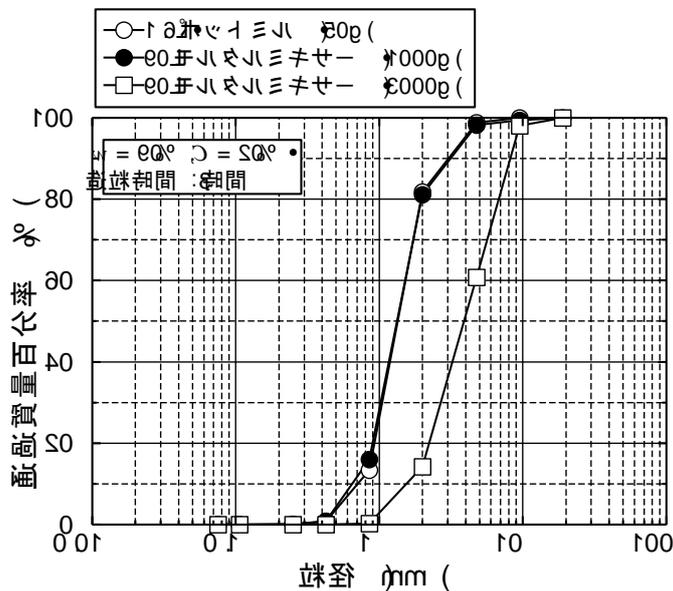


図 58 造粒使用機材および試料の投入量が粒状化処理物の粒度分布に及ぼす影響

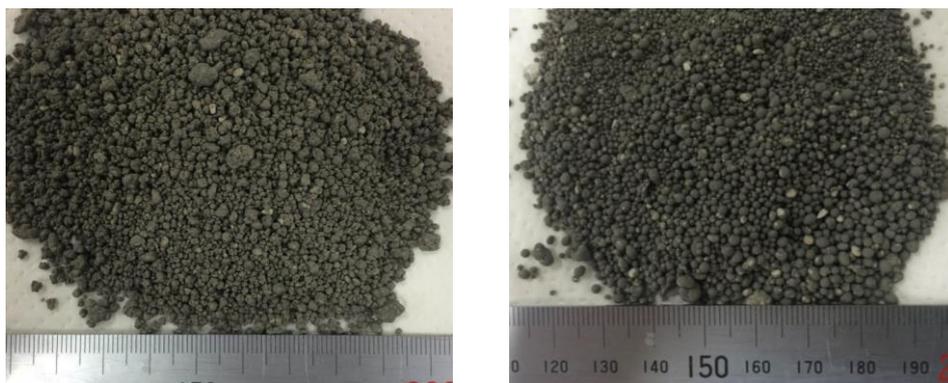


図 59 造粒処理後の無害化処理物の粒子形状比較（左：ラボ試験、右：実規模試験）

3) 粒状化処理による再資源化材の強度特性

一面せん断試験におけるせん断応力-水平変位関係とせん断時の垂直変位を図60に示す。また、
 造粒前後、およびせん断試験前後の無害化処理物1と粒状化処理材の粒径加積曲線を図61に示す。

図60に示すせん断中の体積変化をみると、乾燥密度が $0.61\sim 0.64\text{ g/cm}^3$ と非常に低いにも関わらず、いずれの垂直応力でもせん断初期にわずかな負のダイレイタンスが生じた後に正のダイレイタンスが生じており、密な砂のせん断挙動と似たような傾向となっている。また、垂直応力の増加に伴いダイレイタンス変化の挙動が小さくなっているがこれも砂と同様な挙動である。一方で、せん断応力-変位関係をみると、密な砂において一般的に確認される明確なピークは確認されず、水平変位の進行に伴う応力低下は比較的緩やかである。造粒物がせん断時において粒子破碎を伴う可能性が示唆されることから、試験前後の粒度分布を測定・比較した。図61に最も高い垂直応力を作用させた $\sigma=150\text{ kN/m}^2$ の試験前後の粒径加積曲線を示しているが、試験前後で粒径加積曲線に大きな差異はみられず、本試験条件下では顕著な粒子破碎は起こっていないと考えられる。一面せん断試験において得られた垂直応力とせん断強度の関係を図62に示す。これより推定される粘着力 c は 33 kN/m^2 、内部摩擦角 ϕ は 46° となり、内部摩擦角は砂質土と同程度であることが明らかになった。

以上のことから、粒状化処理によって得られた再資源化材は砂質土と同等のせん断強度を示すこと、またせん断帯においても著しい粒子破碎が発生しないことが明らかになり、地盤材料としての適用性を有すると判断できる。

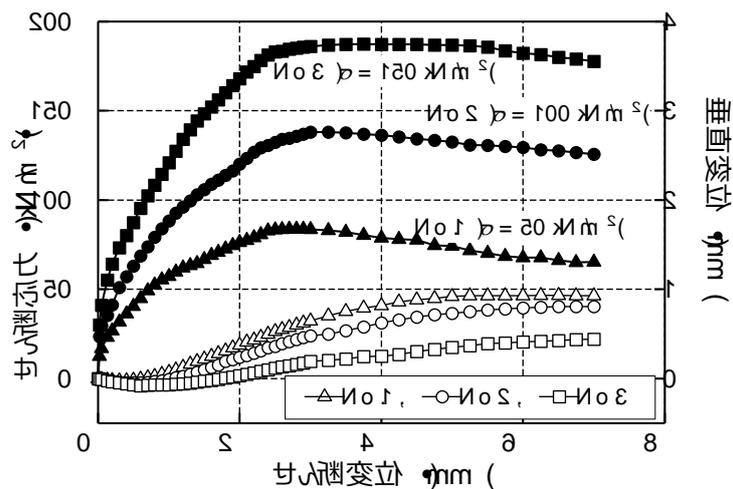


図 60 粒状化処理材料のせん断変位-せん断応力・垂直変位関係

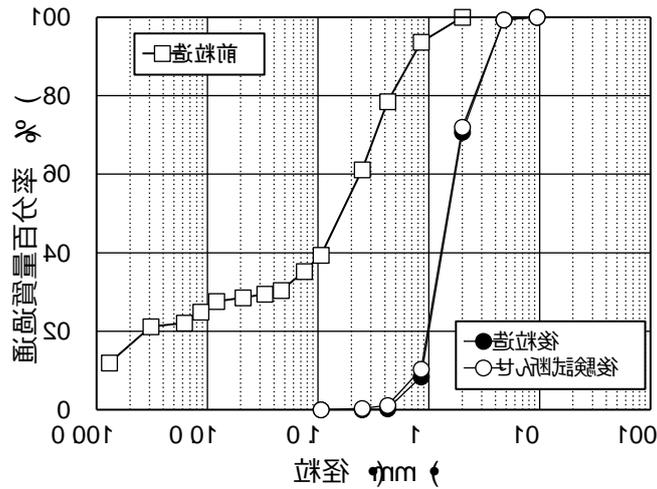


図 61 造粒による粒度の変化と一面せん断試験 ($\sigma=150 \text{ kN/m}^2$) 後の粒径加積曲線

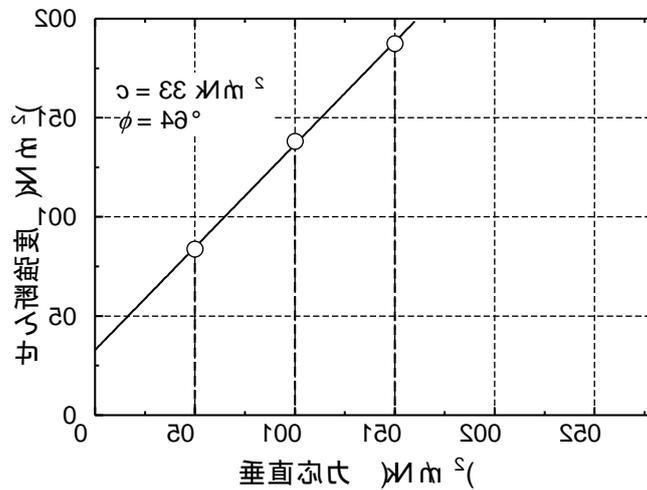


図 62 一面せん断試験で得られた破壊線

4) 流動化処理の適用性と再資源化材の強度変形特性

a 流動化処理土のフロー値およびブリージング率

表 21 に流動化処理の配合とフロー値及びブリージング率、図 63 にフロー試験の実施状況をそれぞれ示す。W/C とフロー値には相関性があり、同じセメント添加率であれば、含水比が高くなり W/C が増加するほどフロー値が大きくなる。これは単位水量が増加すると流動性が增大するという一般的な流動化処理土の傾向と整合する。流動化処理土においては母材となる土砂の細粒分の割合が大きいほどフロー値は小さくなるので、細粒分含有量の高い無害化処理物を流動化処理するにあたってフロー値の確保が困難と予想されたが、今回のように含水比 150% 以上では基準のフロー値 160 mm 以上を満足した。全てのケースにおいてブリージング率が 0% を示したのは、無害化処理物に多く含まれる細粒分の水分保持性が高いためであると考えられ、表 4 に示す比較的高い液性限界、塑性限界がこのことを裏付けている。

表 21 流動化処理土の配合とフレッシュ性状

Case	含水比 W (%)	セメント添加率 C (%)	W/C	フロー値 (mm)	ブリーディング率(%)
無害化処理物	150/10	150	10	15	190
	150/20		20	7.5	175
	150/30		30	5	165
	180/10	180	10	18	190
	180/20		20	9	185
	180/30		30	6	185
	200/10	200	10	20	195
	200/20		20	10	200
	200/30		30	6.7	200
比較試料	600	125	4.8	300 以上	1.5



図 63 フロー試験の実施状況

b 流動化処理土の一軸圧縮強さ

W = 200%、養生 28 日のケースにおけるセメント添加率毎の一軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を図 64 に示す。セメント添加量の増加に伴い一軸圧縮強さ、変形係数の改善が確認された。その一方で、破壊ひずみはセメント添加に伴い上昇している。C = 30%のケースでは供試体は脆性的な破壊挙動を示し、ピーク強度に達した後に急激に強度が低下するひずみ軟化傾向を示した。

図 65 に流動化処理土の W/C と一軸圧縮強さ、および変形係数の関係を示す、いずれも W/C との相関が高く、W/C を調整することで所要の圧縮強度、変形係数を有する流動化処理土の製造が可能であると判断できる。例えば、W/C を 7.5~13.5 の範囲に設定することで、先述の埋設管の埋戻し材として適切な強度である 130~500 kN/m²を確保することができる。

一方、比較実験の結果から一般的な泥土よりも同程度の W/C であれば高い一軸圧縮強さを得られることがわかった。これは、無害化処理物の保水性が高いことから同様の流動性を得るには泥

土の場合の方が水量が大きくなること、ならびに無害化処理物の主成分がカルシウムであるために、硬化反応が促進されやすいためであると考えられる。

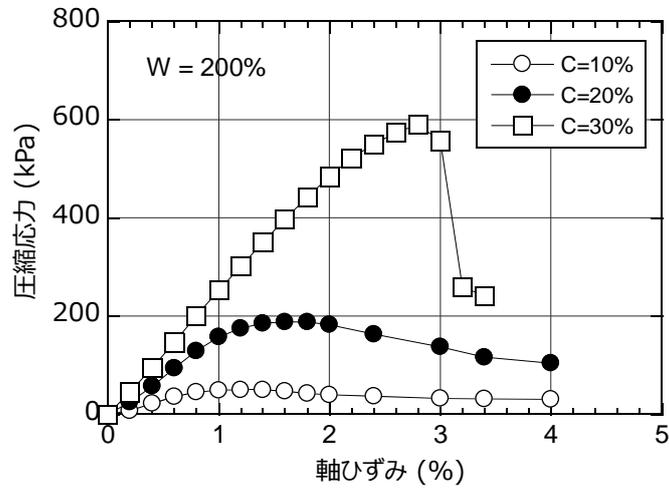


図 64 一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係 (W=200%、28日養生)

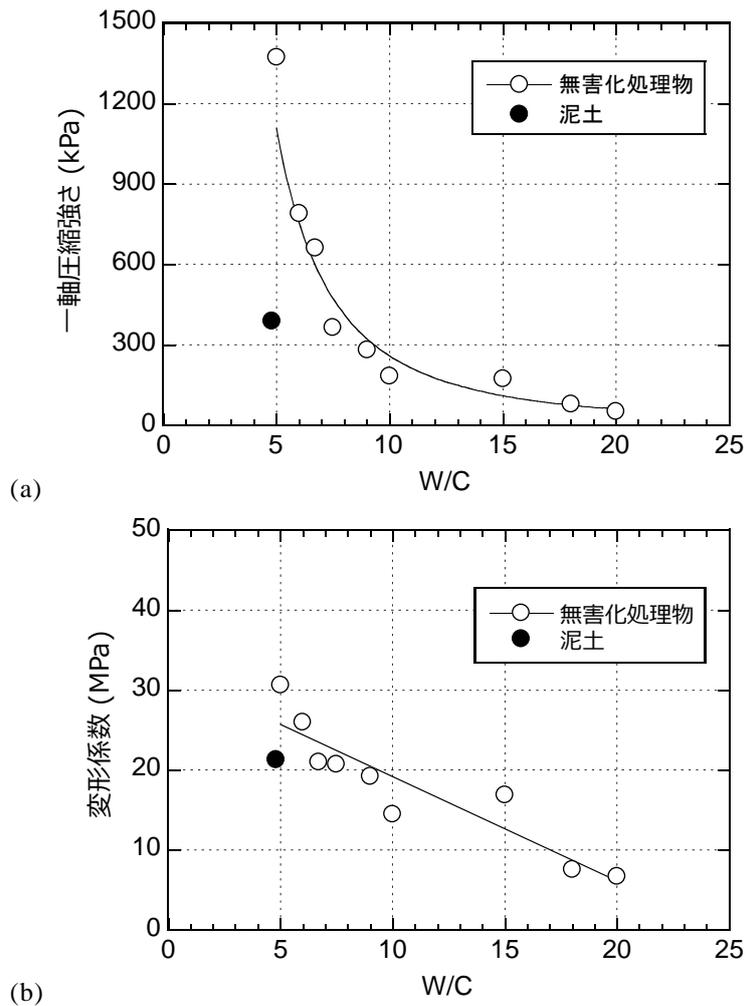


図 65 流動化処理土の W/C と (a) 一軸圧縮強さ、(b) 変形係数との関係 (28日養生)

c 流動化処理土の変形特性

無害化処理物を用いた流動化処理土の湿潤密度は $1.20\sim 1.32\text{ g/cm}^3$ となり、すべてのケースで埋設管の埋戻し材の基準である湿潤密度の基準値 1.35 g/cm^3 を満たしていない。これは、安定処理材等の乾燥密度が通常のセメント安定処理土より低いことから示唆されるように、細粒分主体の無害化処理物の保水性が高く、ミクロな間隙比が高いと考えられ、結果として流動化処理土の間隙比が大きくなるためである。したがって、流動化処理材の密度が低いことに起因して懸念される耐久性に関する課題としては、①乾燥収縮の発生、②長期的に荷重が作用した場合のクリープ変形の発生の2点が挙げられる。

乾燥収縮については泥土から製造された流動化処理土においても同様に懸念されることから、一般的に乾燥が発生する表層等で流動化処理土を使用することはなく、大きな問題にならないと考えられる。一方、長期的な変形特性については母材がスレート材で粒子構造も異なることから、一般的な泥土から製造した流動化処理土の変形性能と比較して把握しておくことは重要である。そこで、宮本ら (2004)¹²⁾が実施した一般的な粘性土を母材とする高間隙比セメント改良土（以下、高間隙比改良土）を対象とした同様の試験結果と無害化処理物から製造した流動化処理土の圧密試験結果の比較を行った。図 66 に $W=150\%$ のケースの $C=10\%$ （繰返し回数:2回）、 $C=20\%$ （同3回）の圧縮曲線（圧密圧力-間隙比関係）を示す。 $C=10\%$ のケースでは圧密圧力 $p=157\text{ kPa}$ においては正規圧密領域での沈下挙動を示している一方で、 $C=20\%$ のケースでは大きな圧密沈下は発生していない。これは、セメント添加量の増加による強度変形特性の相違が反映されているためである。図 65 (a) に示した W/C から判定される $C=10\%$ 、 $W=150\%$ のときの一軸圧縮強さは約 110 kPa 程度であり、応力状態は異なるものの $p=157\text{ kPa}$ においては一軸圧縮強さより大きい圧力が作用している。一方、 $C=20\%$ 、 $W=150\%$ のときの一軸圧縮強さは約 470 kPa と推定されることから、塑性的な変形は生じないことは妥当な結果であるといえる。

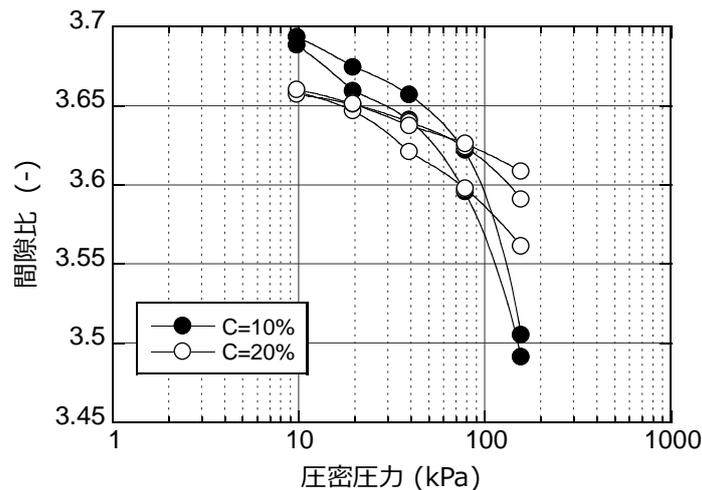


図 66 圧密試験における間隙比-圧密圧力 ($e-\log p$) 関係 ($W=150\%$ 、28日養生)

図 67 に W/C と膨張指数 C_s の関係、および W/C と二次圧密係数 C_a の関係を示す。前述したように、本研究での成果に加えて宮本ら (2004) によるセメント改良土を対象とした実験結果もブ

ロットしており、いずれも圧密圧力 $p = 157 \text{ kPa}$ における値である。全体的な傾向としては W/C が低下するに伴って C_s と C_a もそれぞれ減少しており、 W/C の低下による圧縮性の減少が確認された。

セメント改良土や比較として実施した泥土の流動化処理土との結果と比較すると、 C_s は無害化処理物から製造した流動化処理土の方が大きな傾向が見られた。このことは弾性的な圧縮変形量が比較的大きいことを示しており、一軸圧縮試験における変形係数が比較的大きいことからわかるように供試体の剛性に依存すると考えられる。一方、 C_a は若干の相違はあるものの概ね同程度の値となっている。このことは、一定荷重が長期に渡り作用した際の長期変形特性に関しては、無害化処理物を対象とした流動化処理土と泥土を母材とする高間隙比の流動化処理土やセメント改良土は同等の変形性を示すと判断できる。

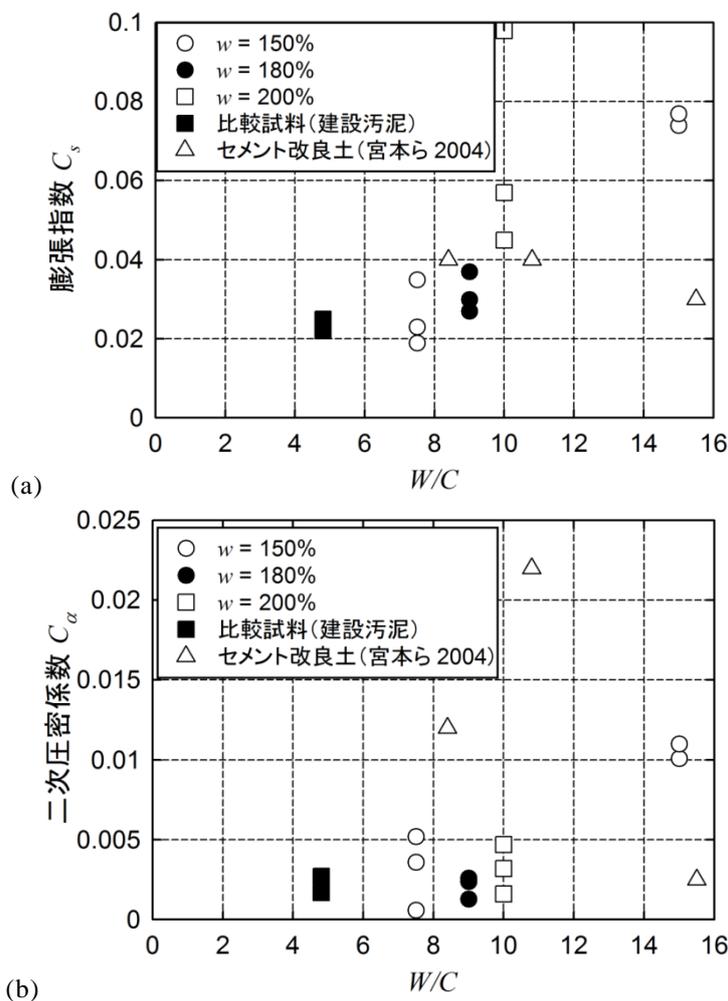


図 67 圧密試験における (a) 膨張指数と (b) 二次圧密係数

d 母材が異なる無害化処理物から製造した流動化処理土の特性

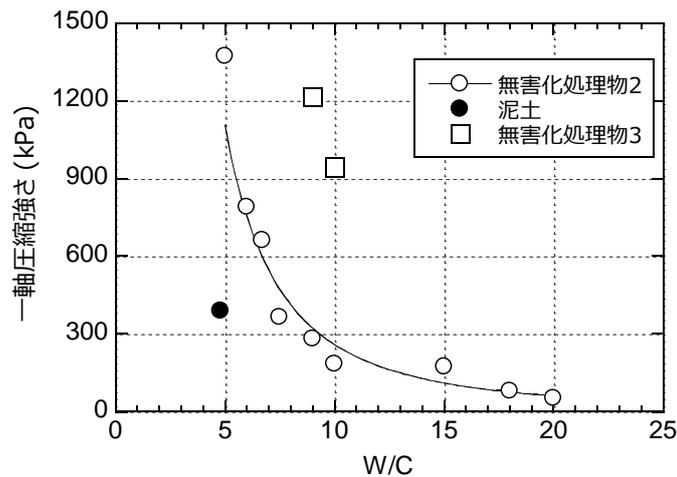
表 22 に無害化処理物 3 から製造した流動化処理の配合とフロー値及びブリージング率を無害化処理物 2 と比較して示す。 $W = 180\%$ 、および 200% の場合にはフロー値はほぼ同等であるが、 $W =$

150%においては、フロー値が小さくなっていることから無害化処理物のコンシステンシー特性の相違がフレッシュ性状に影響を及ぼしたと考えられる。しかし、含水比 150%以上では基準のフロー値 160 mm 以上を満足し、ブリージング率が 0%を示した。本研究で実施した範囲ではあるが、フレッシュ性状の観点からは無害化処理物の流動化処理土への適用性は高いといえる。

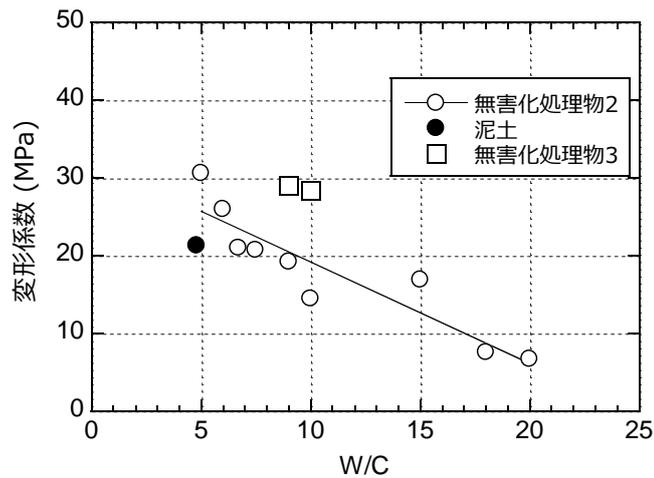
図 68 は無害化処理物 3 の実験結果を図 65 の流動化処理土の W/C と一軸圧縮強さ、および変形係数の関係にプロットしたものである。なお、試験はフレッシュ性状がほぼ同等であった表 22 中の Case 180/20、および 200/20 について実施している。無害化処理物 3 の一軸圧縮強さ、変形係数はいずれも同じ W/C で無害化処理物 2 から製造した流動化処理土と比較して高い傾向を示した。フロー値、および一軸圧縮試験の供試体の湿潤密度が 1.3 g/cm^3 と同程度であった考慮すると、母材の化学特性が強度発現に影響を及ぼした可能性が指摘できる。このことから、母材となるスレート材の種類や処理方法によって流動化処理土の強度発現に影響があること、さらには無害化処理物を対象とした事前の配合試験によって所要の強度を発現するような配合設計を行う必要があると判断できる。

表 22 流動化処理土の配合とフレッシュ性状

Case	含水比 W (%)	セメント添加率 C (%)	無害化処理物 3			参考：無害化処理物 2		
			W/C	フロー値 (mm)	ブリージ ング率 (%)	W/C	フロー値 (mm)	ブリージ ング率 (%)
150/10	150	10	15	165	0	15	190	0
150/20		20	7.5	160		7.5	175	
180/20	180	20	9	190		9	185	
200/20	200	20	10	205		10	200	



(a)



(b)

図 68 無害化処理物 3 から製造した流動化処理土の W/C と(a) 一軸圧縮強さ、
(b) 変形係数との関係 (28 日養生、無害化処理物 2 との比較)

5) 再資源化材の環境安全性の評価

a 硫黄由来の有害ガス発生ポテンシャル

無害化処理物、および無害化処理物の安定処理材からも 0.1 mg/L を越える硫化水素は検出されなかった。これは、無害化処理物および安定処理材がアルカリ性を示すために、硫酸塩還元菌の活動が抑制されたと考えられ、硫化水素ガス発生の観点からは問題がないと言える。一方、二硫化炭素については無害化処理物からは 0.16 mg/L、CASE 1 のセメント 10% 添加の試料のヘッドスペースからは二硫化炭素が検出された。二硫化炭素は土壌環境中においては金属硫黄化合物が存在している嫌気性条件の酸性下で生成される。労働安全衛生法第六十五条第二項に定められている作業環境基準によると管理濃度は 1.0 mg/L となっている。今回の実験で無害化処理物からは 0.16 mg/L、セメント 10% 添加の安定処理土試料から 0.066 mg/L と低濃度ではあるが二硫化炭素ガスが検出された。その他のセメント添加量 20%、30% の試料については検出限界以下 (0.05 mg/L 未満) となり、セメント添加による pH のアルカリ側への移行によって発生が抑制されていると考えられる。二硫化炭素の発生は溶解した二酸化炭素や有機物由来の炭素が存在する条件、ならびに 40℃ よりも高温の条件下で促進されることが報告されているが¹³⁾、十分なセメントを添加することによって発生が抑制されるといえる。しかしながら発生ポテンシャルの評価という観点ではさらなる検討が必要である。

b 再資源化材の重金属等の溶出

表 4 に示すように無害化処理物 1 からは基準値を超過するセレンの溶出が確認されたことから、無害化処理物 1 を母材としている安定処理材料、粒状化処理材料を対象に土壌溶出量試験を実施した。対象項目はセレン、およびセメントに由来する六価クロムである。なお、流動化処理土についてもセメント添加に由来する六価クロムの溶出は懸念されるが、配合自体は安定処理材とほぼ一致することから本研究では評価を実施していない。

表 23 に安定処理材料、粒状化処理材料 (養生 7 日) の溶出試験結果を示す。いずれの処理材料からも基準値を超過する溶出はみられなかった。個別の試料についてみると、安定処理材は乾燥、

締固めの有無を問わずほとんど溶出がみられなかった。一方、粒状化処理材料においては 0.03 mg/L の六価クロムの溶出が確認されたが基準値以下となっている。また、セレン、六価クロム以外のすべての第 2 種特定有害物質についても調査を行ったが、いずれも検出限界以下であった。以上より、本無害化処理物においては、重金属等の溶出リスクは小さいと判断できる。

表 23 安定処理材、粒状化処理材の溶出試験結果

処理方法	六価クロム	セレン
無害化処理物	N.D.	0.015
安定処理物 CASE 1		
セメント 10%	N.D.	0.001
セメント 20%	N.D.	N.D.
セメント 30%	N.D.	N.D.
安定処理物 CASE 2		
セメント 10%	N.D.	N.D.
セメント 20%	N.D.	N.D.
セメント 30%	N.D.	N.D.
粒状化処理物	0.03	N.D.

単位: mg/L、N.D.:検出限界以下

6) 試験結果に基づく再資源化処理手法の検討

本検討においては、スレート材をはじめとする非飛散性アスベスト含有建材の無害化処理物を対象として、

- ①現場内において再資源化材の製造を可能とするため汎用の資機材を利用する
- ②現場内での有効利用を可能とする建設資材を製造する
- ③高含水比残渣の性状を建設資材として利用可能な水準に改質する
- ④二次処理が必要となる排水や廃棄物を排出しない

という 4 件の要求項目を満たす再資源化技術の開発を行うために、3 種類の土質改良技術の適用性、ならびに製造した再資源化材の強度変形特性と環境安全性の評価を行った。特に無害化処理物の含水比に応じて安定処理、粒状化処理、流動化処理の適用性を評価し、処理条件の設定において検討が必要となる項目を図 69 にとりまとめた。

粒状化処理については、塑性限界よりやや低い程度まで含水比を低下させる必要がある。このことにより砂質土と同等のせん断強度を有する粒状材料を製造することが可能である。処理条件の設定においては、処理に適用するモルタルミキサーの形状や試料投入量によって処理材の粒径が大幅に異なるため、処理量や使用機材に応じた適切な処理時間の設定が必要となる。

安定化処理および流動化処理については、含水比が 150~200%の範囲で適用性が確認されており、W/C によって強度や変形係数が管理できる。その一方で、母材の性状によって強度発現特性が異なることから、現時点では事前の配合設計と目標強度に応じた W/C の管理が必要である。また、長期的に荷重が作用するような条件で利用する際には変形抑制の観点からは、低い W/C での施工が望ましいといえる。

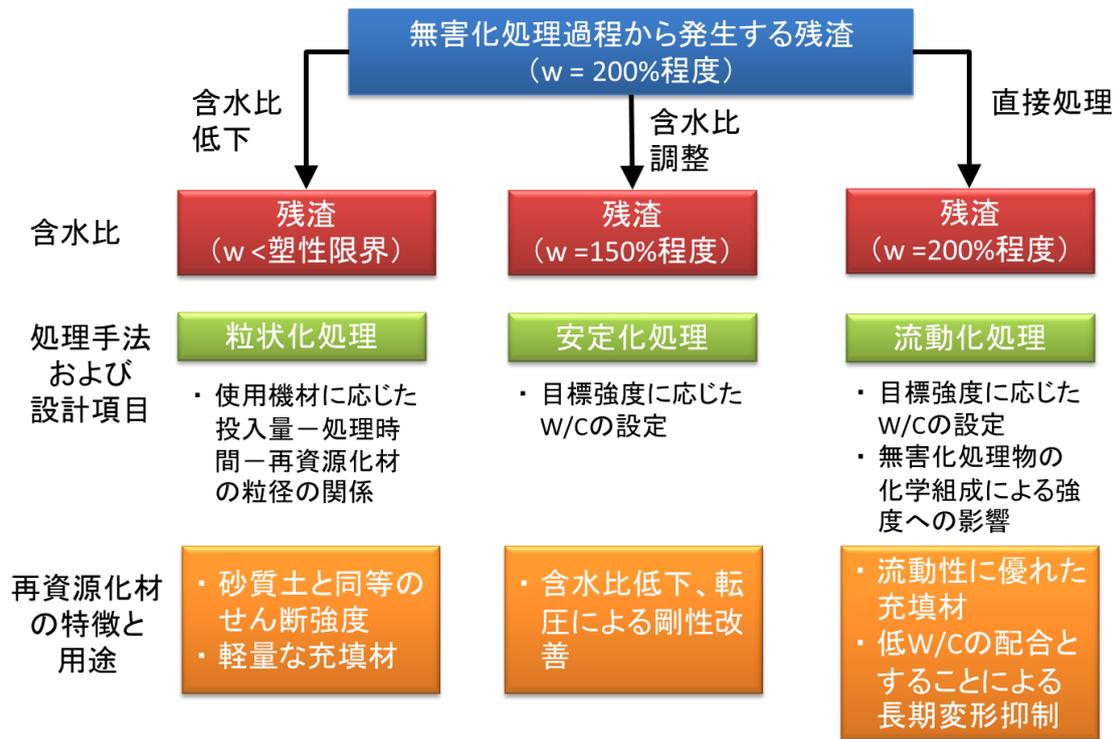


図 69 試験結果に基づく各再資源化処理手法の適用性のとりまとめ

7) 本研究開発のまとめ

本研究においては、スレート分解処理過程から発生する高含水比の残渣について、土木資材としての用途開発とその適用性を実験的に評価した。具体的には、土質改良技術を応用した処理物の建設資材としての再資源化技術の開発を実施し、処理物の地盤工学特性と変形特性を明らかにした。さらには、処理済みスレート建材から製造した再資源化材について、有害重金属の溶出の観点、有害ガス発生ポテンシャルの観点から環境安全性の評価を行った。得られた成果を以下に要約する。

- ・ セメント安定処理材料においては強度、剛性の改善効果が確認された。セメント添加後に乾燥を実施しない場合、セメント添加量の増加に伴い、強度、剛性ともに顕著に増加した。一方、セメント添加後に乾燥、締固めを実施した場合には、セメント添加量の増加に伴い、ピーク強度が増加する一方で、剛性には変化がみられなかった。
- ・ 安定処理の実施により、無害化処理過程で使用した硫黄由来と考えられる二硫化水素の発生が抑制されることが確認された。一方、無害化処理物自体には重金属等の溶出、含有による環境リスクが小さく、通常安定処理土と同様にセメント添加に伴う六価クロムの溶出に留意する必要があるといえる。
- ・ 無害化処理物の含水比を塑性限界よりやや低い程度に低下させた後に粒状化処理を実施することにより、顕著な粒子破碎を生じずに砂質土と類似したせん断強度を発揮する再資源化材を製造することが可能となった。ただし、粒状化処理に使用する攪拌装置の種類と試料投入

量によって造粒の進行程度が異なることから、実際の適用にあたっては処理条件の設定が必要である。

- ・ 無害化処理物に対する流動化処理技術の適用性をフレッシュ性状、強度変形特性の観点から明らかにした。一般の泥土を対象とした流動化処理土と比較して、無害化処理物の保水性が高いことから同程度の W/C においては泥土の流動化処理土と比較して、ブリージングが発生しにくく一軸圧縮強度・変形係数が大きくなる一方で、密度が小さくなる特徴を有することを確認した。また、含水比、セメント添加量を問わず W/C と一軸圧縮強さ、変形係数には良好な相関が認められた。
- ・ 同程度の間隙比、W/C のセメント改良土と比較して、膨張指数、二次圧密係数ともに同程度の値を示すことから、通常の流動化処理土と比較して同等の変形性を有することが明らかになった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) アスベストの常温分解と分解生成物の同定並びに分解反応機構

- ・ アスベストを分解には、今まで 1500℃での熔融処理が推奨され¹⁾その方法は吹付アスベストの1割に実施されてきた。それ以外には、水蒸気加熱法²⁾やマイクロウェーブ法^{3), 4)}、化学的な方法として H₂SO₄⁵⁾や HF, HC⁶⁾を用いる方法が研究されている。我々は、無機高分子溶液(IPS)を加え、ボールミルと一緒に回転攪拌)することで、アスベストが分解することを見出した⁷⁾。結晶物質が回転攪拌によって破碎されることは高速回転 (~3000 rpm 以上)でのメカノケミカル反応として知られているが、IPS 共存下でボールミルの低速回転(50~60 rpm)でのアスベスト分解はメカノケミカル反応で今までにない現象である。
- ・ アスベストの分解は IPS のアスベスト結晶間隙への貫入、イオン半径の増大、アスベストの歪とボールミルとの衝撃によって、起きることを明らかにした。同様な分解は水に浸したスレートの液体窒素処理によっても起きることを確認した。本法がアスベストの廃棄物の処理法としてだけでなく、ナノ空間での化学反応を伴うメカノケミカル反応としての発展が期待される。

2) 大規模災害を想定したスレート処理システムと消費エネルギー

- ・ 災害現場で適用可能な、可搬型アスベスト分解装置を設計した(委託)。処理能力(4.8 トン/日)。消費エネルギーは(4,1MJ/4.8t)である。操作が簡便で省エネルギー型のアスベスト分解法である。
- ・ 大規模災害では、災害地の仮置き場や廃棄物処理でアスベストの分解が可能となる。それによって、廃棄物の搬送過程におけるアスベスト被害を防ぐことができる。また、分解物は再利用されるので、廃棄物処分場確保の問題を解消することができる。

3) 処理済みアスベスト建材の再資源化技術の開発および再資源化材の環境安全性の評価

- ・ 非飛散性アスベストを含む含有建材(スレート)の無害化処理物に対する各種土質改良技術の適用性を再資源化材の強度変形特性や環境安全性の観点から明らかにした。例えば流動化処理土においては、一般の泥土を対象とした流動化処理土と比較して、無害化処理物の保水性が高いことから同程度の W/C においては泥土の流動化処理土と比較して、ブリージングが発生しにくい、一軸圧縮強度・変形係数が大きくなる一方で、密度が小さくなる特徴を有することを

確認した。また、含水比、セメント添加量を問わず W/C と一軸圧縮強さ、変形係数には良好な相関が認められたことは、処理条件の設定において有用な知見である。

- ・セメント添加によって高い pH を維持することで、硫黄に由来する硫化水素や二硫化炭素の発生を抑制することができることを確認した。このことは、再資源化技術としてセメントを用いた各種地盤改良技術を適用することの優位性を裏付けるものである。

(2) 環境政策への貢献

無機硫黄電解質溶液をスレートに加えボールミルで回転攪拌するだけでアスベストの含有率を 0.1%以下にまでに低減することができた。更に、分解物の地盤改良技術の適用により、本法は次の観点において環境施策に貢献できると考える。

- 省エネルギー型で、災害現場で適用可能なアスベスト常温分解
- アスベスト処理残渣の地盤材料としての再資源化
- 埋立て不要のアスベスト建材の処理法の構築

具体的には

- 操作が簡単で特別な装置を必要としないアスベスト分解法であり、熔融法のような高エネルギーを必要せず省エネルギー型の汎用性の高いアスベスト分解法である。しかも、処理物からの有害金属の溶出もなく、オオミジンコのような弱い生物に対しても環境上安全な分解物である。
- 本アスベスト分解装置をスレート解体作業現場や大規模災害時のスレート集積場に設置するために、可搬型アスベスト分解装置を設計した。特に大規模災害時の現場でのアスベストの分解処理が可能と考える。
- 可搬型アスベスト分解装置の処理用は 2.8 トン/3 時間であり、1 日 2 回運転で 4.6 トンを処理できる。
- 無機硫黄電解質溶液と破碎による無害化処理を実施した後の非飛散性アスベスト含有建材の有効利用技術として安定処理技術、粒状化処理技術、流動化処理技術が適用可能である。
- 製造した再資源化材の強度変形特性は一般的な地盤材料から製造した場合と同等であり、有効利用に必要な水準を満たした。
- 非飛散性アスベスト含有建材の無害化処理過程から発生した残渣を現場内において汎用の資機材を用いた処理で地盤材料として有効利用ができ、処理プロセスからの廃棄物の発生を削減する。
- 安定処理や流動化処理技術を適用することにより、残渣を高含水比の状態でも有効利用することが可能になる。よって、脱水処理、および脱水に伴い発生する排水の処理が不要となるため、本無害化処理技術のコストや投入エネルギーの削減、現場完結型の処理の実現に寄与すると考えられる。
- このように、埋め立てによらないアスベストの分解法と再利用法の新技术として環境施策に貢献する。

<行政が既に活用した成果>

本研究は着手してから 3 年しか経ていないので研究成果の活用はまだなされていない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

アスベストの常温分解法はユニーク処理法で省エネルギー型であり、処理物は地盤材料として活用されるので、循環型社会における有害廃棄物の在り方を示す例と考える。従って、今後実用化試験結果を経て行政が活用されることを期待する。

6. 国際共同研究等の状況

スリランカ、ペラデニア大学のナンダ教授と本法によるアスベスト分解法について共同を実施している。本研究の代表者である田端は日本とスリランカの国際共同研究シンポジウムに2回参加し、講演を行った。スリランカでは現在もなおアスベスト含有のスレートは製造され使用されているので、本法に強い関心を示し、学会講演後共同研究の申し出があり、現在共同研究を遂行中である。また、現地で、本法を用いてスリランカで現在使われているスレートのアスベストの分解に成功した。

ナンダ氏の所属と職名は以下のとおりである。Dr. Nanda Gunawardhana、Director/International Research Center、Senate Building、University of Peradeniya、Peradeniya、20400、Sri Lanka

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) M. TABATA, A. SHONO and A. Ghffar: *J. Mat. Cycl. Wast. Manag.*, 18, 483-492 (2016).
“Decomposition of Asbestos by a Supernatant Used for Immobilization of Heavy Metals in Fly Ash.”
- 2) 乾 徹・篠原智志・諸富鉄之助・勝見 武・高井敦史・水野克己: 非飛散性アスベスト含有建材無害化処理物の含水比に応じたセメント改良技術の適用性、第12回地盤改良シンポジウム論文集, pp.331-336.

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) M. TABATA, A. SHONO: *Proceedings of The 2nd 3R International Conference*, Daejeon, Korea, 69-72 (2015).
“The Reuse of Supernatant after Metal Treatment in Fly Ash for Decomposition of Asbestos.”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) Shinohara, S., Inui, T., Takai, A., and Katsumi, T. (2015): Improvement of sludge generated from mechano-chemical treatment of waste slate containing non-scattering asbestos, Geo-Environmental Engineering 2015 -Proceedings of the 14th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, on USB.
- 2) Morotomi, T., Inui, T., Takai, A., and Katsumi, T. (2016): Mechanical properties of liquefied stabilized sludge generated from mechano-chemical treatment of waste slate, Geo-Environmental Engineering 2016, Nantes National University, Nantes, France, June 2-3, 2016, on USB.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 田端 正明、庄野 章文：第 25 回廃棄物資源循環学会 (2014)
「飛灰処理残渣液を用いる重金属不溶化とアスベスト分解に関する研究」
- 2) M. TABATA, N. Gundawardhana: The 2nd International collaboration research symposium o Sri Lanka and Japan, December, Kandy, Sri Lanka, 2014
“Decomposition of Asbestos at Room Temperature by Using Calcium Polysulfide. ”
- 3) M. TABATA, A. SHONO: 第 94 回日本化学会春季年会 (2015)
“Decomposition of Asbestos by Using an Insolubilization Agent of Heavy Metals under Room Temperature.”
- 4) 篠原智志、乾 徹、高井敦史、勝見武：平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会 (2015).
「非飛散性アスベスト含有建材無害化処理残渣の地盤材料としての適用性」、講演概要集、土木学会関西支部、III-16
- 5) 田端正明、庄野章文：第 26 回廃棄物資源循環学会 (2015)
「アスベスト常温分解法の分解機構に関する研究」
- 6) M. TABATA, A. SHONO, A. Ghaffar: *The 2nd 3R International Conference*, Daejeon, Korea, 69-72 (2015).
“The Reuse of Supernatant after Heavy Metal Treatment in Fly Ash for Decomposition of Asbestos.”
- 7) 篠原智志、乾 徹、高井敦史、勝見武：第 50 回地盤工学研究発表会 (2015)
「非飛散性アスベスト含有建材の無害化処理過程で排出される高含水比残渣に対する地盤改良技術の適用性」平成 26 年度発表講演集、pp.2401-2402
- 8) M. TABATA, A. SHONO: 第 96 回日本化学会春季年会 (2016)
“Mechanochemical Decomposition of Asbestos involved in Slates in the Presence of Calcium Polysulfide.”
- 9) 田端正明、庄野 章文：第 65 回日本分析化学会年会 (2016).
「災害時に発生するスレート建材中のアスベストの分析とその簡易分解法の研究」
- 10) M. TABATA, A. SHONO, S. UEDA: *Asianalysis*, Chiang Mai, Thailand, December, 8-11, 2016, 2016.
“Determination and Decomposition of Asbestos in Slates Scatted by Kumamoto Earthquake, April, 2016.”
- 11) M.TABATA, A. SHONO: 第 97 回日本化学会春季年会 (2017)
“Determination of Asbestos in Construction Materials Scattered by Kumamoto Earthquake and its Safety Treatment.”
- 12) 諸富鉄之助、乾 徹、高井敦史、勝見武：平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会 (2016)
「非飛散性アスベスト含有建材無害化処理残渣の流動化処理土への適用性」講演概要集、土木学会関西支部、III-29

- 13) 諸富鉄之助、乾 徹、高井敦史、勝見武：第 51 回地盤工学研究発表会 (2016)
「非飛散性アスベスト含有建材の無害化処理過程で排出される高含水比残渣を用いた流動
化処理土の強度変形特性」、平成 28 年度発表講演集，地盤工学会， pp.555-556

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 平成 27 年度大学コンソーシアム「気を付けようアスベスト被害とその対策」(佐賀大学主催公開講座、平成 27 年 12 月 2 日、アバンセ、佐賀市、参加者数 30 名)にて成果紹介(実施者：田端正明)
- 2) 私立花園中学高等学校に対する特別授業「土と粘土を科学的視点からみてみよう」(実施者：乾 徹、研究成果の一部を紹介、2015 年 11 月 26 日、聴講者約 25 名)。
- 3) 京都大学科学体系と創造性がクロスする知的卓越人材育成プログラム 基盤コース(高校生に対する講義)「地球環境学 II: 廃棄物埋立処分の科学ー土を活かす環境保全技術ー」(実施者：乾 徹、研究成果の一部を紹介、2015 年 12 月 5 日、聴講者約 10 名)。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表(平成 26 年 9 月 5 日；於日本分析化学会事務局、「災害時に発生するスレート建材中のアスベストの分析と簡易分解法の研究」)
日本分析化学会第 65 年会で発表した上記成果が日本分析化学会の「展望とトピックス」の一つに選ばれ、記者会見がなされた、参加報道機関、9 社 13 名、学会側から 4 名

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

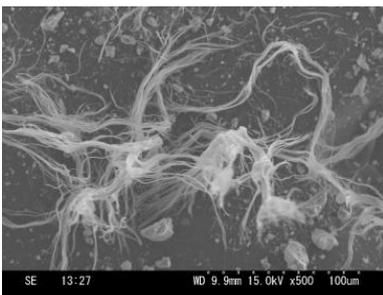
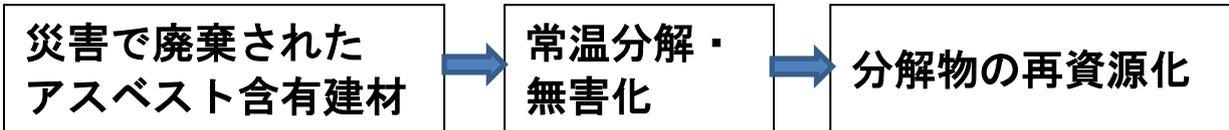
8. 引用文献

- 1) 環境省、環境省大臣官房廃棄物、リサイクル対策部：平成 23 年 3 月
「石綿含有廃棄物等処理マニュアル」(第 2 版)
- 2) T. KOZAWA, A.ONDA, K. YANAGISAWA, O. CHIBA, H. ISHIWATA and T. TAKANAMI, *Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal of the Ceramic Society of Japan*. 118, 1199-1201 (2010).
“Thermal decomposition of chrysotile-containing wastes in a water vapor atmosphere.”
- 3) C. LEONELLI, P. VERONESI, D.N. BOCCACCINI, M.R. RIVASI, L. BARBIERI, F. ANDREOLA, I. LANCELLOTTI, D. RABITTI and G.C. PELLACANI, *J. Hazard. Mater.* 135, 149-155 (2006).
“Microwave thermal inertisation of asbestos containing waste and its recycling in traditional ceramics.”
- 4) S. HORIKOSHI, T. SUMI, S.ITO, R. DILLERT, K. KASHIMURA, N. YOSHIKAWA, M. SATO and N. SHINOHARA, *Environ. Sci. Technol.* 48, 6882-6890 (2014).
“Microwave-driven asbestos treatment and its scale-up for use after natural disasters.”

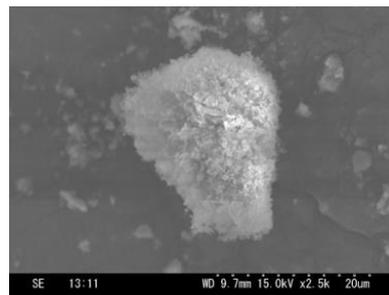
- 5) S.-N. NAM, S. JEONG and H. LIM, *J. Hazard. Mater.* 265, 151-157 (2014).
“Thermochemical destruction of asbestos-containing roofing slate and the feasibility of using recycled waste sulfuric acid.”
- 6) K. YANAGISAWA, T. KOZAWA, A. ONDA, M. KANAZAWA, J. SHINOHARA, T. TAKANAMI and M. SHIRAISHI, *J. Hazard. Mater.* 163, 593-599 (2009).
“A novel decomposition technique of friable asbestos by CHClF_2 -decomposed acidic gas.”
- 7) M. TABATA, A. SHONO and A. GHAFAR, *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 18, 483-492 (2016).
“Decomposition of asbestos by a supernatant used for immobilization of heavy metals in fly ash.”
- 8) 矢野 賢、山田 陽、乾 徹、勝見 武、高井敦史：地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2012 論文集、地盤工学会関西支部、131-138 (2012).
“アスベスト含有建材の無害化処理から発生する副産物の地盤工学的利用技術の開発”、
- 9) 建設省土木研究所、42 (1997).
「流動化処理土利用技術マニュアル」、技報堂出版
- 10) 遠藤和人、中川美加子、肴倉宏史、井上雄三、井真宏、杉原元一：第 9 回地盤改良シンポジウム論文集、日本材料学会、181-184, (2010).
“廃石膏・石灰系地盤改良における硫化水素ガス発生ポテンシャル試験に関する考察”
- 11) 三井隆、吉川正、池田昭彦、青山要、中川浩二：土木学会論文集、No. 693/VI-53、117-129 (2001).
“細粒分含有率が異なる改良土の室内配合試験による基礎的研究材”
- 12) 宮本佑樹、小澤喜治、竹村次朗：第 39 回地盤工学研究発表会、703-704 (2004).
“高間隙比セメント改良土の圧密特性に関する実験的研究”
- 13) D. H. STEDMAN, *Geophysical Letters*, 1(9), 858-860 (1984).
“Formation of CS_2 and OCS from decomposition of metal sulfides.”

【研究概要図】

【3K143011】 大量に廃棄される非飛散性アスベスト含有建材の常温分解処理と再利用法の開発と研究 佐賀大学 田端正明



地震で倒壊した家屋とスレート中のアスベスト繊維（含有率：8.3%）



アスベスト分解装置と分解後の生成物（含有量：0.1%未満）



再資源化された造粒材料と流動性充填材料

科学的意義と社会・環境施策への貢献

1. 新しいアスベスト分解機構を提案し、アスベスト常温分解法を確立
2. 省エネルギーで簡単な操作
3. 災害地の仮置き場や廃棄物処分場でも適用可能な可搬型アスベスト分解装置を設計
4. 分解処理物は地盤材料として再資源化
5. 埋め立てが不要となり新たな埋め立て地施設の建設の低減に貢献
6. 有害物質を安全な物質に変え、新たな資源として再活用する資源循環型社会の構築に貢献

[英文概要]

Development and Study on the Room-temperature Decomposition and Reuse of Asbestos Involved in Construction Materials Wasted in Large Quantities

Principal Investigator: Masaaki TABATA
Institution: Graduate School of Science and Engineering,
Saga University
1, Honjo-machi, Saga-City, Saga 840-8502
Tel: +81-952-28-8560 / Fax: +81-952-28-8560
E-mail: tabatam@cc.saga-u.ac.jp
Cooperated by: Kyoto University, Okumurgumi Co. Ltd., Kankyou-Anetos Co.
Ltd.

[Abstract]

Key Words: Asbestos, Decomposition, Reuse, Geo-materials

Asbestos in wasted slates was decomposed by mixing it with an inorganic polysulfide solution (IPS) prepared in our laboratory. The decomposition were performed at room temperature under various conditions such as concentration of IPS, 4 different types of ball mills using two kinds of balls and different treatment times. Chrysotile was main asbestos composition in most of slates and was decreased to less than 0.1 % by the treatment at 10 % IPS and in a steel mill with iron balls for 3 h, 45 rpm, and calcite was formed. X-ray diffraction and phase contrast microscope indicated complete disappearance of specific peaks of chrysotile and a needle shape of chrysotile. Scanning microscope showed the formation of a round cluster after the treatment, and electron dispersion X-ray indicated that Mg in chrysotile decreased and was replaced with Ca in the produced clusters. Present method was applied to slates collected after big disasters as the earthquake and Tsunami in north east Japan, 2011, the big flood in Joso-City, and the earthquake in Kumamoto. The decomposition mechanism was clarified by the measurement of the change in oxidation state of sulfur during the decomposition process. We proposed an asbestos-decomposition machine movable to disaster area. The machine can decompose asbestos of 2.4 ton/3h, that is, 4.8 ton/a day.

The proposed treatment process discharges high water content sludge, which is composed of fine-grained waste slate. On-site treatment process to recycle this residual sludge as geo-materials were developed by modifying conventional cement stabilization and granulation techniques. Mechanical properties, heavy metal leaching in waste slate, and potential of toxic gas generation due to sulfur contained in the chemical agent were evaluated for the residue improved by these

stabilization/granulation technologies. Granulated residue with the cement content of 20% is comparable with medium to dense sand in both shear strength and dilatation behaviors without particle breakage. Cement stabilization contributed to lowering the potentials of heavy metal leaching and toxic sulfur gas effectively. Applicability of liquefied stabilization technique was also assessed by determining workability, bleeding, unconfined compression strength and consolidation characteristics of the stabilized sludge with various water-cement (W/C) ratios. These characteristics of the liquefied stabilized sludge were consistent with those of typical high water content cement-stabilized soil, and W/C is a fundamental parameter for the compressive strength and deformation modulus. These observations confirm that the residue was accepted for geotechnical utilization by employing these improvement technologies.

参考資料

(1) 災害地で採取したスレート建材と採取地およびアスベスト埋施設写真



2015_02_18 岩手県陸前高田市 (159)

2015_02_18 岩手県大船渡市 (160)



2015_10_04 茨城県常総市堤防決壊地 (161)

2015_10_04 茨城県常総 IC 仮置場



2016_02_14 宮城県東松島市 (126)

2016_02_13 宮城県女川市水産加



2016_07_15 熊本県御船町仮置場

熊本県益城町津森 2016_05_24



2016_07_15 熊本県益城町木山

2016_07_15 熊本県益城町旧小学校跡



新潟県糸魚川市 2017_03 大火災跡

2016_07_15 熊本県益城町

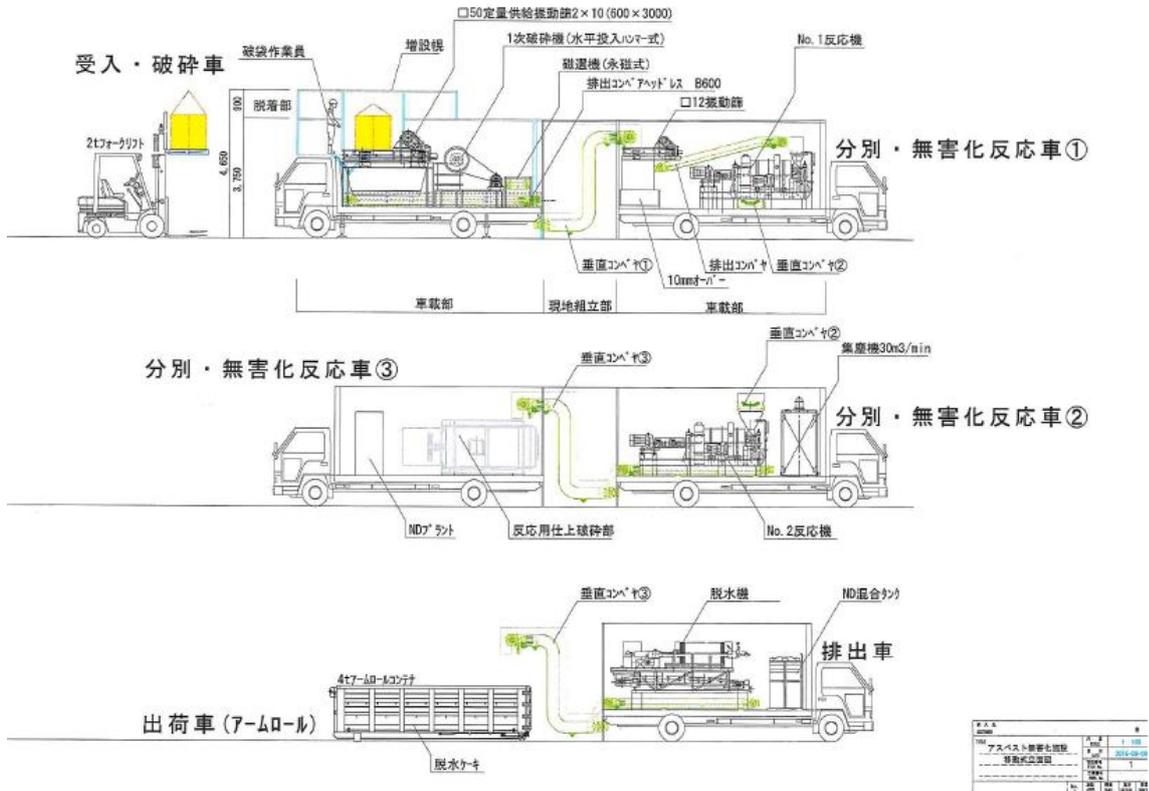


2015_02_18 岩手県大船渡市盛 廃棄物処理場

2016_10_3 産業廃棄物最終処分場(安定型)アスベスト埋設、岐

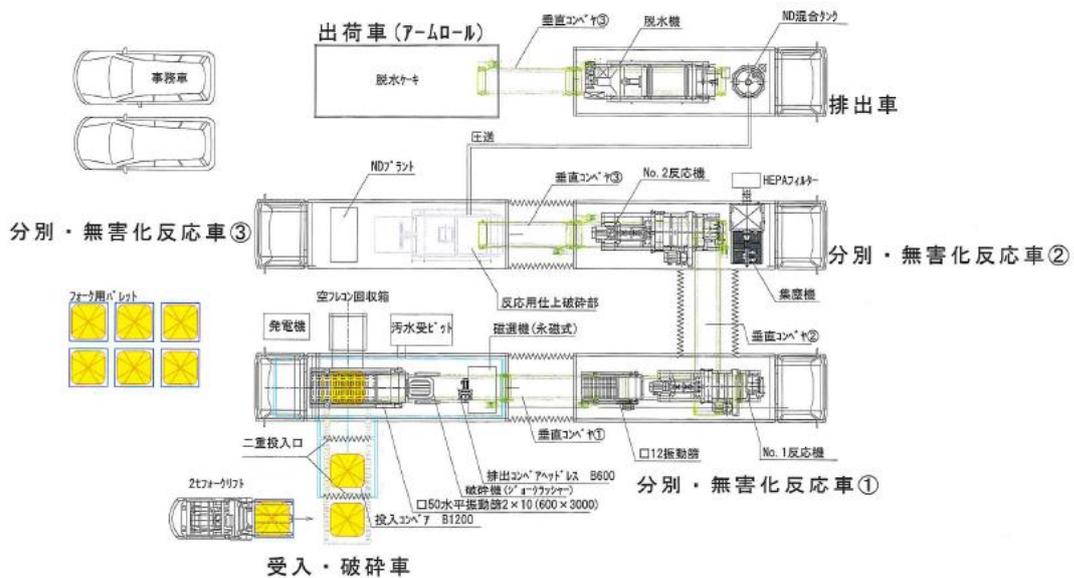
(2) 可搬型アスベスト分解装置設計図 (抜粋)

1) 装置全体図



項目	内容	単位	数値
100	アスベスト無害化施設	㎡	1,100
101	移動式装置	台	1
102	4t7-AD-コンテナ	個	1
103	脱水ケキ	個	1
104	ND混合タンク	個	1
105	脱水機	個	1
106	ND7フラット	個	1
107	反応用上破碎機	個	1
108	No.2反応機	個	1
109	No.1反応機	個	1
110	No.12振動篩	個	1
111	磁選機(永磁式)	個	1
112	1次破碎機(水平投入回転式)	個	1
113	増設機	個	1
114	脱着部	個	1
115	2tフォークリフト	台	1

アスベスト移動式無害化処理施設配置図



2) スレート一次破碎装置

HSS-400

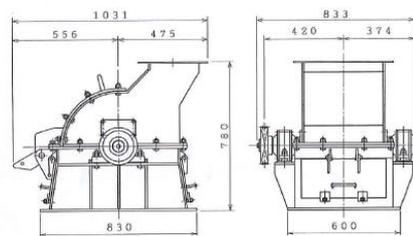
- 家電部品
- IC 部品
- セラミック
- 廃プラスチック
- ガラス
- 陶器・瓦
- バッテリー
- 貝殻



破碎例



外形寸法



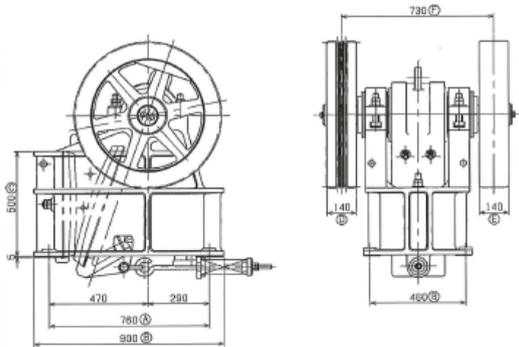
(400型仕様)

型式	供給口寸法	電動機	破碎対象物	質量
HS-400	240×400mm	11kW x4P	廃プラスチック・家電部品・IC 部品	550kg
HSS-400	240×420mm	11kW x4P	貝殻・セラミック	550kg
GHC-400	240×400mm	7.5kW x4P	ガラス・カーボン・肥料	550kg

寸法検査表

機器名称	破碎機 (10×TSTC)	立会検査	平成	年	月	日
		社内検査	平成	年	月	日

略図



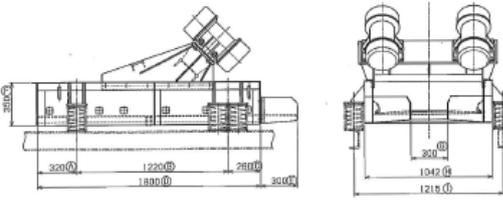
測定位置記号	単位: mm						
	A	B	C	D	E	F	G
図示寸法	760	900	500	140	140	730	460
公差	±2	±8	±5.5	±1.2	±1.2	±4	±2
立会検査							
社内検査							
測定位置記号							判定
図示寸法							
公差							
立会検査							
社内検査							

3) 水平振動篩

寸法検査表

機器名称	水平振動ふるい 1000×1800 (1) USL	立会検査	平成	年	月	日
		社内検査	平成	年	月	日

略図



測定位置記号	単位: mm						
	A	B	C	D	E	F	G
図示寸法	320	1220	200	1800	300	350	300
公差	±2.5	±6	±2.5	±6	±2.5	±2.5	±2.5
立会検査							
社内検査							
測定位置記号	H	I					判定
図示寸法	1042	1215					
公差	±6	±6					
立会検査							
社内検査							

4) スレート二次破碎装置 (ハリケーン)

HURRICANE
 高品質の骨材生産加工から
 エコロジー・リサイクル分野まで
 あらゆる用途に威力を発揮。

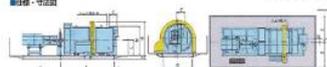
INDEX
 手取土場 3-5
 産業廃棄物 6
 ガラスカス 7
 池底土 8
 骨材 9,12
 製塩スベック 10,11

DATA of HURRICANE

省スペースに高性能を実現した“ハリケーンシリーズ”

型別: 10タイプ
オープンハリケーン
 破砕能力が大きい。高圧・高回転タイプ。高品質の骨材を生産する。

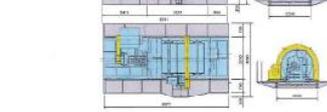
特長:
 ・高圧・高回転タイプ。高品質の骨材を生産する。
 ・高圧・高回転タイプ。高品質の骨材を生産する。
 ・高圧・高回転タイプ。高品質の骨材を生産する。



型別	最大処理量 (t/h)	最大粒度 (mm)	寸法 (mm)
10-1	10	100	1000x1000x1000
10-2	15	150	1500x1500x1500
10-3	20	200	2000x2000x2000
10-4	30	300	3000x3000x3000
10-5	40	400	4000x4000x4000
10-6	50	500	5000x5000x5000
10-7	60	600	6000x6000x6000
10-8	80	800	8000x8000x8000
10-9	100	1000	10000x10000x10000
10-10	120	1200	12000x12000x12000

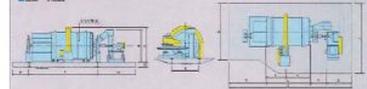
高圧のコンクリート用骨材に加工する

型別: 16タイプ
サンダーハリケーン
 破砕能力が大きい。高圧・高回転タイプ。高品質の骨材を生産する。



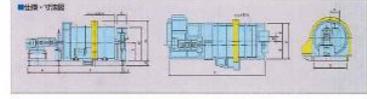
型別	最大処理量 (t/h)	最大粒度 (mm)	寸法 (mm)
16-1	10	100	1000x1000x1000
16-2	15	150	1500x1500x1500
16-3	20	200	2000x2000x2000
16-4	30	300	3000x3000x3000
16-5	40	400	4000x4000x4000
16-6	50	500	5000x5000x5000
16-7	60	600	6000x6000x6000
16-8	80	800	8000x8000x8000
16-9	100	1000	10000x10000x10000
16-10	120	1200	12000x12000x12000

ハリケーンNEO

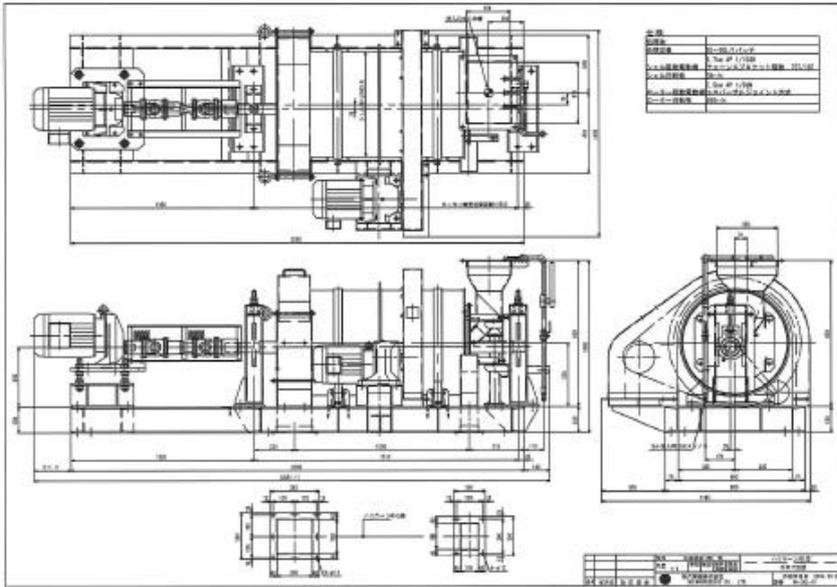


型別	最大処理量 (t/h)	最大粒度 (mm)	寸法 (mm)
NEO-1	10	100	1000x1000x1000
NEO-2	15	150	1500x1500x1500
NEO-3	20	200	2000x2000x2000
NEO-4	30	300	3000x3000x3000
NEO-5	40	400	4000x4000x4000
NEO-6	50	500	5000x5000x5000
NEO-7	60	600	6000x6000x6000
NEO-8	80	800	8000x8000x8000
NEO-9	100	1000	10000x10000x10000
NEO-10	120	1200	12000x12000x12000

ハリケーンカスガ



型別	最大処理量 (t/h)	最大粒度 (mm)	寸法 (mm)
CS-1	10	100	1000x1000x1000
CS-2	15	150	1500x1500x1500
CS-3	20	200	2000x2000x2000
CS-4	30	300	3000x3000x3000
CS-5	40	400	4000x4000x4000
CS-6	50	500	5000x5000x5000
CS-7	60	600	6000x6000x6000
CS-8	80	800	8000x8000x8000
CS-9	100	1000	10000x10000x10000
CS-10	120	1200	12000x12000x12000



ハリケーンで再生された骨材は セメント使用量の大幅削減と強度を向上させます

優れた構造で耐久性が向上し、メンテナンスも容易です。

ハリケーンシリーズは、円筒内の本体シェルとその内部を回転するローターで構成され、ローターがシェルの中心より下方に偏心してセットされています。偏心・偏心もとも異なる偏心で密着し高圧力に強い力を持たせ、シェルとローターをそれぞれ別々に回転させ、シェルと内側の山部のシェルライナーと、ローター表面の鋭いピッチのエッジによって骨材・砂の塊込みを

よくし、圧縮の押し出し作用をもたせています。結果として一部圧縮と摩擦成分を減少させることで耐久性も向上。シェルとローターの摩耗設計とともに、信頼性を高めています。
また、内部のシェルライナー、ローターエッジすべてポリト解めにし交換も容易に、維持、保守にかかる時間を大幅に削減できます。



9

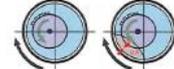


骨材加工に留まらない優れた汎用性を実現

■ハリケーンの特徴

従来の破砕装置では得られない高品質骨材を生み出すために、ハリケーンシリーズが開発されました。より堅固な骨材を生産できる新機構を採用し、原料の方向性と骨材の向きを自由に調整。骨材の向きに留まらぬ優れた汎用性を実現しています。

- 高圧力下で鋭いピッチコンテナ骨材を最高品質骨材へ変換できます。
- 破砕・圧縮による粉砕・調整が可能です。
- 従来の破砕装置の破砕性が向上します。【電立で骨材としての再利用率可】
- カレット（使用済ピン）再生の最先端工法を効果化できます。



ユニバーサルジョイント駆動により、傾斜・調整可能な角度での運転が可能です。

駆動部とドラム・ローターをシャフトとスプライン式ユニバーサル・ジョイントを採用することにより駆動力の効率化、低コスト化と傾斜・調整などの用途拡大が可能になりました。



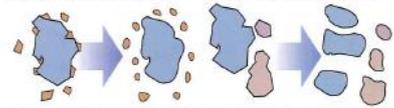
ハリケーン2大作用

〈すりつぶし〉

骨材中の不純物を取り除きます。
円錐（すりつぶし）作用の繰り返しによって、塊状の塊石・塊石・塊石・石の表面に付着する塊状から骨材の塊状にまでまで塊状に取り除きます。不純物を除去し、骨材の塊状（砕石）は、コンクリートの分離、強度の劣化を防止し、耐久性を高めます。

〈芯みすり〉

砕石の角を丸め、整粒を行います。
球状化作用（芯みすり）作用によって、これまで球状化作用や破砕材との混入による破砕では困難だった整粒が可能となり、骨材に均等の品質を得られます。整粒作用はコンクリートの強度を高め、骨材の配筋効果を向上させ、コンクリートの強度を高めます。



世界を目指すハリケーンの技術

あらゆる分野に有効な広範な骨材製造では、ハリケーンシリーズで培った高度な技術力をキーマンと海外へ輸出し、世界的に高い評価を得ています。

