【研究ノート】

廃アスベストおよびアスベスト含有廃棄物の
溶融処理を目的とした模擬溶融実験

—— 溶融条件の検討 ——

水 上 正 善*・野 田 明 宏*・武 井 宏 幸*
片 岡 義 雄*・坂 後 充 宏**

【要 旨】 廃アスベストの処理はこれまで埋立処分を中心に行われてきたが、最終処分場等の寿命は全国的に残り 2.5 ～ 4.5 年と短く、現在埋め立てに代わる新しい処分方法が求められている。筆者らはこのたび、産業廃棄物の処理に伴って発生する主灰と飛灰を使用して 1,500℃ 以下の低温で廃アスベストおよびアスベスト含有廃棄物の溶融処理を検討するラボ実験を行ったので報告する。

今回の実験の結果クリソタイルを 1,300℃、30 分の温度条件（雰囲気温度）で溶融処理する場合、クリソタイルと飛灰、主灰の混合比が大きく影響していることがわかった。実験に使用した灰については、主灰に Fe_2O_3 が多く、また飛灰には CaO が多い。 SiO_2 は主に主灰の方に存在するが、その量は廃棄物の種類と投入量に左右されている。クリソタイルは Si を多く含んでおり、全体での SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO の比率が適したときにクリソタイルの溶融が可能になったのではないかと考えられた。この主灰と飛灰を使用することで、純クリソタイルの比率 40% まで溶融することができた。

キーワード：アスベスト、溶融条件、飛灰、主灰、ドラム破碎

1. 序 文

日本においてアスベストは、高度経済成長期における産業の発展に伴い、耐火材、保温材、自動車部品等で大量に消費されてきたが、その有害性が指摘され、現在では一部の商品を除いてアスベストの使用が禁止になっている。近年中にその一部の商品についてもアスベストの使用が禁止され、今後アスベストの使用は全面禁止になると思われる。現在、国の各部署にてアスベスト対策がなされ、JIS 規格の改正や大気汚染防止法、石綿障害予防規則、建築基準法といった法規制の強化が行われている。

今後、アスベスト廃棄物は 2020 年のピークを迎えるまで年々増え続け、平均で年間 150 万 ton のアスベスト廃棄物が発生するといわれている。一方、アスベストの処分についてはこれまで 90% 以上が埋め立てされてきたが、安定型最終処分場をはじめとして、廃棄物の最終処分場の寿命は全国的に 2.5 ～ 4.5 年と短く、埋め立てに代わる新しい処分方法の確立が急務とされている¹⁾。

現在検討が進んでいる埋め立て以外の処分方法の一つに溶融固化処理があるが、1,500℃ 以上の炉内温度が必要であり²⁾、この高温度が炉壁を傷めるためあまり普及していないのが現状である。もし溶融固化の際、添加剤等を使用して溶融温度を下げるのが可能であれば、消費エネルギーを低下させ普及性が上がると思われる。

一般的に溶融スラグの形成には SiO_2 と Fe_2O_3 、そして CaO の存在比が重要で³⁾、産業廃棄物用の溶融炉を使用し溶融スラグを形成することを考えた場合、これらの供給源を廃棄物とその焼却灰、つまり主灰と飛灰から確保する必要がある。飛灰は CaO を多く含み、 CaO の供給源として機能するものと考えられる。また、 SiO_2

原稿受付 2006. 6. 29 原稿受理 2007. 1. 12

* (株) カムテックス 環境技術センター

** (株) カムテックス 福山本社

連絡先：〒720-0402 広島県福山市沼隈町中山南永道 21-1

(株) カムテックス 環境技術センター 水上 正善

は主灰にある程度存在し、土壤廃棄物等にも多いため、これらを使用することで供給可能と考えられる。しかし一般的な廃棄物処理施設の場合、 Fe_2O_3 の供給源は廃棄物にFeがない限り確保は困難と考えられる。

筆者らが使用する焼却炉にはドラム缶を密閉室内で破碎し、そのまま焼却炉に投入するドラム破碎搬送設備があり、危険物の入ったドラム缶、斗缶等はこの破碎機を用いて処理されている。また、危険物ではない廃棄物が入った斗缶等は、破碎機にかけられた後、ピット経由で焼却炉に投入される。このため当社の主灰は Fe_2O_3 の含有量が高い。したがって Fe_2O_3 も主灰から供給可能である。これまで当社ではこの主灰および飛灰を使用して炉内温度 $1,500^\circ\text{C}$ 以下の低温で溶融スラグを製造し、リサイクル商品として供給してきた。

今回筆者らはこの金属を豊富に含んだ主灰および飛灰を添加剤とし、アスベストの炉内温度 $1,300^\circ\text{C}$ での低温溶融固化が可能かどうか、ラボ実験にて検討したので報告する。

2. アスベストについて

アスベストにはクリソタイル（白石綿）、クロシドライト（青石綿）、アモサイト（茶石綿）等を含む6種類がよく知られているが、これらは若干化学組成や性質が異なっている。融点はクリソタイルが $1,521^\circ\text{C}$ と一番高く、続いてアモサイトの $1,399^\circ\text{C}$ 、そしてクロシドライトの $1,093^\circ\text{C}$ と続いている⁴⁾。建築物における吹き付け石綿には主にクリソタイルが用いられており、今後、老朽化した建物の解体が増えるのに比例して、建築物からのアスベスト廃棄物が増えるものと思われる。

3. 試 薬

実験には和光純薬工業(株)製の市販のアスベストを使用した。このアスベストを基安化発第0622001号「建材中の石綿含有率の分析方法について」（以後、基安化発第0622001号）にて分析した結果、100%のクリソタイルであることを確認した。マッフル炉は雰囲気温度で $1,700^\circ\text{C}$ まで昇温可能なヤマト科学社製のFD 31を使用した。この装置は広島県東部工業技術センターの設備で、今回の実験にご協力をいただき使用させていただいた。飛灰と主灰については、当社の焼却炉から発生したものをを使用した。使用した飛灰と主灰についても基安化発第0622001号に従って分析し、クリソタイルが不検出（1%未満）であることをあらかじめ確認した。また、飛灰については、アルカリ度（中和に必要な0.02 Nの硫酸

の量（mL）とする）が380～390のものを使用した。

4. 実 験

4.1 添加剤の性質

実験に使用した飛灰および主灰の成分については、蛍光X線分析法にて金属の組成を調べた。

4.2 クリソタイルと添加剤の混合条件

主灰、飛灰とクリソタイルは、実際の溶融炉の状況に合わせ攪拌せず、上からかぶせるように加えた。試料の採取量については、原則として主灰、飛灰、クリソタイルの合計が30gになるように調整した。一部例外としてクリソタイルの比率が高い試料については、体積が大きいため全体が20gになるように試料を調製した。容器はアルミナルツボを使用し、3成分の比率を変えたものに対して $1,300^\circ\text{C}$ で30分加熱した。この時の温度は雰囲気温度を測定している。この温度は $1,350^\circ\text{C}$ で炉の運転を行った場合の最低温度（変動範囲 $1,300 \sim 1,400^\circ\text{C}$ ）であり、より安全サイドでの温度設定となる。また炉の滞留時間が30分であることからこの時間は30分とした。実験における温度変化をFig. 1に示す。

放冷後中身を確認し繊維状物質の有無を調べた。繊維状の物質が目視で確認できる場合は溶融不可とした。繊維状物質が確認された場合、それがクリソタイルの変性物質（フォレストライト等）なのかどうかは確認できなかった。繊維状物質が目視で確認できないものについては粉碎後、基安化発第0622001号に従い分散染色一位相差顕微鏡およびX線回折法によりクリソタイルの有無を確認し、クリソタイルがないことを確認できたものを溶融可とした。X線回折法については定性分析および1%の定量下限値での定量分析を行った。これらの結果を基に、主灰、飛灰、そしてクリソタイルの3成分で、クリソタイルの溶融可否について三相図を作成し、 $1,300^\circ\text{C}$ 、30分での溶融可能濃度領域を確認した。

Fig. 1 加熱における昇温設定（昇温速度 $10^\circ\text{C}/\text{分}$ 、 $1,300^\circ\text{C}$ 保持30分、その後自然放冷）

5. 結 果

まず、主灰および飛灰を蛍光 X 線分析法にて分析した結果、Table 1 に示すように飛灰には CaO が約 52% 含まれていた。ZnO と SiO₂ はそれぞれ 1.7%、1.2% と少なく、大半が CaO と Cl であった。一方、主灰の方は SiO₂ が 28%、Fe₂O₃ が 19%、CaO が 20% と 3 成分がバランスよく含まれていた。また金属類は、Fe₂O₃ 以外にも Al₂O₃、TiO₂、CuO、ZnO 等が若干含まれていた。

この主灰と飛灰を使用し 1,300℃、30 分の温度条件でクリソタイルとの混合条件を検討した結果を三相図にまとめて Fig. 2 に示す。

試料を均一に混合しているわけではないが、三相図を作成することで混合条件についての参考になるデータが得られると考えた。Fig. 2 より、クリソタイルの存在比で最大 40% まで溶融することかできたが、飛灰と主灰

Table 1 主灰と飛灰の主な成分

	主 灰	飛 灰
SiO ₂	28.0%	1.2%
CaO	20.0%	52.0%
Fe ₂ O ₃	19.0%	0.5%
Al ₂ O ₃	7.5%	< 0.1%
CuO	1.8%	0.4%
ZnO	1.7%	1.7%
Cl	2.9%	25.0%
MgO	0.0%	< 0.1%
TiO ₂	5.1%	< 0.1%
その他	14.0%	19.2%

(蛍光 X 線分析法による)

溶融条件：1,300℃、30 分

○：加熱後、繊維状物質なし

●：加熱後、繊維状物質あり

Fig. 2 クリソタイル溶融処理における三相図

のバランスによっては溶融できない条件もあった。この温度条件でクリソタイルを溶融するためには主灰が少なくとも 25% 程度必要であることがわかった。また、飛灰の方は 50% 以下で溶融が可能で、これを超えると溶融できていないことがわかった。また今回の実験において各成分は混合しているわけではなく下から主灰、飛灰、アスベストの順でかぶせるように加えた非混合の状態であることから、完全に混合しない状態でも、溶融可能であることがわかった。

6. 考 察

主灰には SiO₂、CaO、Fe₂O₃ がバランスよく含まれているものの、主灰のみでは 50% のクリソタイルを溶融することができなかった。これはクリソタイルに由来する SiO₂ によって、全体の SiO₂ の比率が上がり、金属と CaO の量が不足したためと考えられる。ただし、30% のクリソタイルまでは溶融することができた。また、同じ温度条件において飛灰とクリソタイルの等量混合物の溶融を試みた場合も溶融することができなかった。これは CaO 過多で、金属類が足りなかったためと推測される。この結果から、産業廃棄物用の灰溶融炉で主灰、飛灰とクリソタイルを混合処理する場合は SiO₂、CaO、Fe₂O₃ の混合比の検討が必要と思われる。そこで、より詳しく解析するために成分レベルで Fig. 2 の現象を調べた。この時、クリソタイルの成分データは文献より引用した。

Table 1 と Table 2 を基に主灰、飛灰、クリソタイルの 3 者混合時における各成分の濃度を算出し、その中から SiO₂、CaO、Fe₂O₃ の 3 種類の濃度が合計 100% になるように計算し直して三相図を作成した。Fig. 3 に示す。

Fig. 3 を見ると、1,300℃での溶融可能範囲は Fe₂O₃ が 10% 以上で、CaO が 20 ~ 60% の間に分布していることがわかった。文献³⁾の同様の三相図と比べると、文

Table 2 クリソタイルの成分データ (引用)

成 分	クリソタイル*
SiO ₂	40.75%
CaO	0.35%
Fe ₂ O ₃	0.44%
Al ₂ O ₃	3.37%
FeO	0.28%
MnO	0.03%
MgO	41.28%
その他	14.19%

※: Cape Asbestos Fibres Ltd. Chrysotile from Cassiar Mine, British Columbia, Canada

※右上の枠内の数字は、共存成分の濃度変動範囲を示す。
溶融条件：1,300℃、30分 ○●については Fig. 2 と同様

Fig. 3 CaO, SiO₂, Fe₂O₃ の濃度からみた三相図

※右上の枠内の数字は、共存成分の濃度変動範囲を示す。
溶融条件：1,300℃、30分 ○●については Fig. 2 と同様

Fig. 4 CaO, SiO₂, Al₂O₃ の濃度から見た三相図

献では中央付近から右下に向けて 1,300℃ での溶融可能範囲が広く分布しているのに対し、Fig. 3 では左側に偏っている結果となった。

Fig. 3 の結果より、Ca の多いスレート廃材や非飛散化処理を施した吹き付け材中に含まれるクリソタイルを処理する際は、投入量に注意する必要があると考えられた。これについては、今後詳しく検討することとする。

Fig. 3 と同様に SiO₂, CaO, Al₂O₃ の三相図も作成した。これを Fig. 4 に示す。この場合は 1,300℃ での溶融可能範囲が Al₂O₃ の少ないところに偏った結果となり、Al₂O₃ 20% 以下のところに溶融不可範囲と溶融可能範囲がそれぞれ見られた。そしてその境界線は Al₂O₃ 5% 付近のところにあった。

Table 3 模擬の主灰と飛灰で行った溶融実験の結果

模擬灰の種類	1,300℃、30分で加熱後の状態
Table 1 と同じ組成	繊維状物質なし
Fe ₂ O ₃ のみなし	ほとんど溶融せず
ZnO のみなし	一部溶融、繊維状物質あり
CuO のみなし	ほとんど溶融せず
Al ₂ O ₃ のみなし	一部溶融、繊維状物質あり
TiO ₂ のみなし	一部溶融、繊維状物質あり

※Table 1 と同じ組成で調製した模擬の主灰および飛灰、そしてその組成から 1 種類の金属だけを抜いて調製した模擬の主灰および飛灰にて同様の実験を行った。金属を抜いた場合その金属の代わりに主灰では SiO₂、飛灰では CaO を添加した。
条件：1,300℃、30分

模擬主灰、模擬飛灰、クリソタイル各 10 g 使用 (各 33%)

文献³⁾の同様の三相図と比べると、文献では中央やや左の部分に狭い範囲で 1,300℃ での溶融可能範囲があったのに対して、Fig. 4 では左下に細長く伸びている。Fig. 2 のように主灰と飛灰の濃度で見ていた現象も、Fig. 3 や Fig. 4 のように成分で見た場合、Fe₂O₃ は 30% 以下、Al₂O₃ は 20% 以下であった。ただしこれは、共存物質があつてのことと考えられる。そこで、共存物質の影響を確認するために模擬灰で実験を行った結果を示す。

Table 3 はこの実験で使用した主灰、飛灰の成分をもとに調製した模擬灰にてクリソタイルの溶融実験を行い、金属の有無による違いを比較したもので、この表からも共存金属に何らかの影響を受けている可能性があると考えられる。これについても、今後詳しく検討することとする。

今回の実験はアスベスト廃棄物として純クリソタイルを使用しており、実際のアスベスト廃棄物は 5～30% 程度のアスベストを含んでいることが多いことから、40% の割合でアスベスト廃棄物を投入したとしても、アスベストそのものはそれよりも少なくなると思われる。しかし非飛散化処理を行った吹き付け材やスレート等の廃棄物は Ca を豊富に含んでいることが多く、大量に投入すると CaO 過多になる可能性があるため、処理の際には飛灰の量またはアスベスト廃棄物の投入量を調整する必要があると考えられる。また、今回は主灰、飛灰とクリソタイルを完全混合せず、順次上からかぶせただけの非混合の状態で加熱していることから、貯槽をもつ燃焼式表面溶融炉等でその貯槽にアスベスト廃棄物を投入した場合、貯槽内を混合することもなく同条件にて溶融処理が可能であることが期待される。実機との混合状態の違いがあると思うが、今後実証試験を行う価値のある結果となった。

7. ま と め

産業廃棄物用の焼却炉から排出される飛灰、主灰を使用してアスベスト廃棄物（クリソタイル等）を1,300℃にて低温熔融処理するための模擬実験を実施した。結果としてアスベスト廃棄物または飛灰、主灰の投入量の調節により熔融そのものは可能であることが示唆された。今後はアスベスト含有スレート等を使用した実験も行い、また実証実験に向けた安全対策等の検討を行う予定である。そしてその際製造されるスラグの性状等についても評価を行う予定である。

アスベスト廃棄物は2重の袋に梱包され、未開封のまま熔融炉に投入されるのが飛散もなく理想的である。燃焼式の表面熔融炉では容器を燃焼させることが可能であることから、アスベスト廃棄物の熔融処理に適していると思われる、熔融温度を1,500℃から1,300℃まで温度を下げたことによるエネルギーコストの削減と、容器の燃焼による若干の燃料消費の削減が期待される。また、炉

内温度を低くできることで普及性が増し、今後のアスベスト問題対策が推進されることと思われる。

[謝 辞]

本実験を行うにあたり、設備を使用させていただいた上、数々の貴重なご助言を賜りました広島県東部工業技術センターの大石郁氏に深く感謝します。また、本実験にご協力頂いた関係者の方々に深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 環境省編：環境白書，平成17年版，pp. 106 - 113 (2005)
- 2) 公害研究対策センター：官公庁環境専門資料，第40巻別冊号，アスベスト関係資料集，pp. 106 - 136 (2005)
- 3) (株)エヌ・ティー・エス：廃棄物の熔融処理技術とスラグの有効利用，pp. 3 - 27 (1998)
- 4) 田中信壽編著，松藤敏彦，角田芳忠，東條安匡共著：廃棄物工学の基礎知識，技報堂出版，pp. 188 - 190 (2006)

Test Melting Experiment to Investigate Melting Conditions for Asbestos and Wastes that Contain Asbestos

Masayoshi Minakami*, Akihiro Noda*, Hiroyuki Takei*

Yoshio Kataoka* and Mitsuhiro Sakajiri**

* Kamtecs Co., Ltd., Environment Tech, Center

** Kamtecs Co., Ltd., Fukuyama main office

† Correspondence should be addressed to Yoshio Kataoka:

Kamtecs Co., Ltd., Environment Tech, Center

(21-1 Eidou, Nakasanna, Numakuma-cho, Fukuyama-city, Hiroshima, 720-0402 Japan)

Abstract

Asbestos waste has been disposed of in landfills for many years. However, since landfills will be unable to accept more waste in 2.5 to 4.5 years, we need new disposal methods for asbestos. This study reports the results of laboratory experiments that examined the disposal of asbestos and waste that contains asbestos by melting with fly ash and ash at temperatures below 1500°C.

The proportions of chrysotile, ash and fly ash influenced the melting of chrysotile in a test of 30 minutes at a temperature of 1300°C. The ash used in this experiment included much Fe_2O_3 , and the fly ash used in this experiment had a lot of CaO . SiO_2 also existed in the ash, but the amount depended on the type and volume of waste. Chrysotile contains much Si . Melting is possible when the proportions of SiO_2 , Fe_2O_3 and CaO are suitable. Using ash and fly ash, we were able to melt 40% pure chrysotile.

Key words: asbestos, melting conditions, ash, fly ash, drum crushing