

第3章

アスベストの無害化と
再資源化への応用

3-1	アスベスト廃棄物の法規制	26
3-2	アスベスト廃棄物の無害化	26
3-3	アスベスト廃棄物の溶融スラグの再資源化	28

3-1 アスベスト廃棄物の法規制

老朽化した火力発電所の改修工事や原子力発電所の廃止措置などでは、アスベストを含む保温材が発生する可能性がある。保温材のような飛散性アスベスト廃棄物の処分については、1992年7月に施行された廃掃法（廃棄物の処理および清掃に関する法律）の改正で、二重梱包または固型化し管理型最終処分場で処分すること、または、高温溶融処理し安定型最終処分場で埋立処分することが定められた。この時点では、中間処理としては高温による溶融のみが認められていた。また、溶融炉の要求温度が概ね1,500℃以上で、アスベストの中で最も融点の高いクリソタイル^(注1)の有害な繊維構造を消滅させることを前提としていた⁽¹⁾。その後、アスベストが大きな社会問題となり、廃掃法が改正された。すなわち、2006年10月には、アスベスト廃棄物の基準が厳格化（アスベストの含有量が1%を超えるものから0.1%を超えるものへ改正）され、これとほぼ同時の同年8月には、高温の溶融などによる高度技術による無害化処理の確保を促進・誘導するため、特例制度（無害化処理認定制度）が創設された。この制度は、国が個々の施設の安全性を確認して、廃棄物処理施設の設置許可及び処理業の許可なしに、高度な技術を用いて無害化する処理を行う者を個々に国が認定するものである。しかし、この制度が発足し2年が経過した2008年度末では、認定を受けた事例はない。

(注1)：アスベストは、繊維状の天然の鉱石で6種類ある。この中で、保温材としては、クロシドライト（融点：1,193℃、比熱：0.84 kJ/(kg・K)）、アモサイト（融点：1,399℃、比熱：0.81 kJ/(kg・K)）とクリソタイル（融点：1,521℃、比熱：1.1kJ/(kg・K)）が用いられていた。

3-2 アスベスト廃棄物の無害化

当研究所は、1998年度に、アスベスト廃棄物に加えて、アスベスト除去作業時に発生する金属やコンクリートなどを一括溶融でき、かつ大幅な減容比も得られるアークプラズマ加熱を用いて、アスベスト廃棄物を溶融無害化し、さらに、下層路盤材として再利用できることを確認した⁽²⁾⁽³⁾。また、溶融状態にあるスラグから、直接、骨材を製造する技術開発を進めた⁽⁴⁾。

(1) 実験方法

アスベストを含む保温材として表3-1に示す6種類を選定した。市販の保温材にはアスベストが含まれていないため、当時、入手可能であったクリソタイルを混入し試料とした。クリソタイルは融点、比熱ともアスベストの中で最も高いため、溶融しにくいと考えた。また、アスベストが規制される前の保温材に含まれたアスベストの使用実績から、重量割合で5～10%を混入した。その他に当時市販されていた石綿クロスおよび石綿スレートも選定した。さらに、建築廃材などの混在を想定して、炭素鋼やコンクリートを加えた実験も行った。また、表中でスチール缶と記載したケースでは、アスベスト試料を十数個のスチール缶に分けて封入し炉内へ間欠投入した。試料番号gの条件では、溶融試料の全量を予め炉内に装荷した。

溶融実験を行う際には、空気を炉内へ注入し（1m³N/h）、炉内圧力が微負圧一定となるように排ガス吸引量を制御することで、プラズマ炉からアスベストが飛散しないよう安全に配慮した。

クリソタイルの無害化を評価する方法として、スラグのSEM（走査型電子顕微鏡）写真による繊維構造の消失の観察と、X線回折分析による結晶構造の消失から確

表3-1 溶融試料

試料番号	炭素鋼 [kg]	スチール缶 [kg]	コンクリート [kg]	アスベスト	
				[kg]	種類
a	-	1.00	-	3.14	水練り保温材+クリソタイル(10%)
b	-	2.81	-	3.00	パーライト保温材+クリソタイル(5%)
c	-	3.28	-	3.04	ケイ酸カルシウム保温材+クリソタイル(10%)
d	-	1.70	-	3.00	石綿クロス
e	-	0.85	-	2.94	石綿スレート
f	-	1.31	-	3.00	クリソタイル
g	10.1	-	1.50	1.50	ケイ酸カルシウム保温材+クリソタイル(10%)

認した。また、スラグを再利用するための化学的安定性を「環境庁告示46号」に準拠した溶出試験により評価した。

(2) 実験結果

まず、アスベストの繊維構造と結晶構造が、アークプラズマ溶融により消失することを確認した。アークプラズマで溶融した各試料について、図3-1に溶融前後のSEM写真と、溶融後のスラグの外観を示す。SEM写真による観察から繊維構造が完全に消失していることが確認された。スラグの外観として、水練り保温材およびパーライト保温材を溶融した場合のスラグはガラス状となり、それ以外は結晶質の岩石状となった。スラグがガラス質になるか結晶質になるかは化学組成に依存する。水練り保温材およびパーライト保温材はシリカ (SiO₂) の濃度が高くて塩基度が低いため、ガラス質のスラグとなった。一方、ケイ酸カルシウム保温材および石綿スレートはカルシア (CaO) の濃度が高く、石綿クロスおよびクリソタイルはマグネシア (MgO) の濃度が高い。また、一括溶融試験では、溶融固化体の酸化鉄の濃度が高い。これらは塩基度が高いため、結晶質のスラグになった。

次に、スラグのX線回折分析結果から、いずれの試料を溶融したスラグでもクリソタイル特有のピークが検出されないことを確認した。一例として水練り保温材の結果を図3-2に示す。この溶融固化体は、スチール缶に由来する金属層の上部に、保温材に由来するスラグ層が形成された2層構造となっている。スラグ層について、内部、金属層との界面、るつぼとの界面、上面の4箇所から分析用の試料を採取した。図3-2にはこれらの結果を示している。

さらに、環境庁告示46号に準拠したスラグの溶出試験では、すべてのスラグについて規定されている重金属類⁽⁵⁾は表3-2に示すようにすべて溶出液中で検出されず、一般廃棄物の溶融固化物に係わる目標基準を満足した。以上から、溶融で得られたスラグの化学的安定性を確認した。

最後に、アスベスト保温材などの溶融前後の比重から、溶融による減容比を求めたところ、約5%~40%となり、大きな減容比が得られた。

以上から、アスベストは、その組成や溶融条件によら

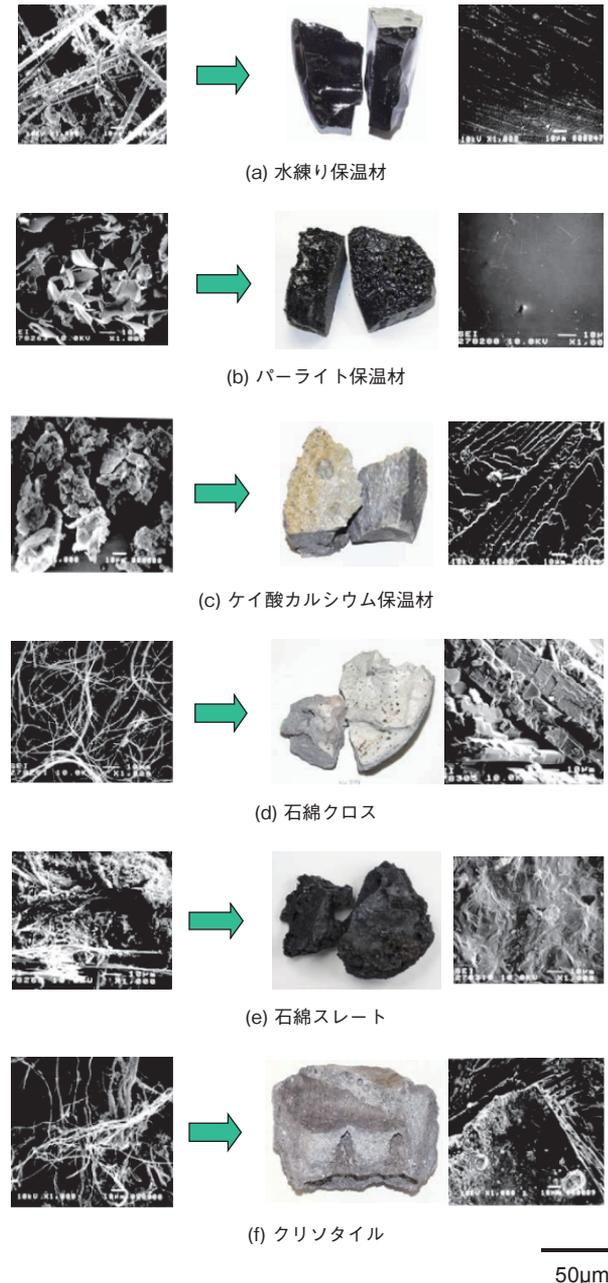


図3-1 溶融試料のSEM写真とスラグの外観およびSEM写真

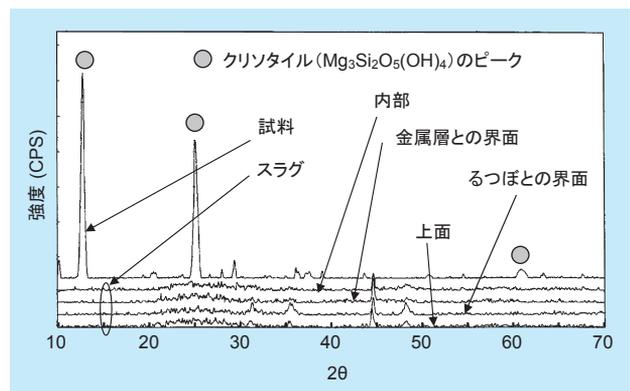


図3-2 X線回折結果 (試料：水練り保温材)

表3-2 スラグの溶出試験結果

項目	溶出基準(mg/l)	溶出試験結果 ¹	検出限界値(mg/l)
カドミウム	0.01以下	ND	5×10 ⁻⁴
鉛	0.01以下	ND	5×10 ⁻³
六価クロム	0.05以下	ND	5×10 ⁻²
砒素	0.01以下	ND	2×10 ⁻³
総水銀	0.0005以下	ND	5×10 ⁻⁴
セレン	0.01以下	ND	2×10 ⁻³

注)溶出試験の方法は、環境庁告示46号に定める方法とした。
*1:全ての溶出試験で、重金属類は溶出液中から検出されなかった。

ず、プラズマ溶融処理することによりアスベストとしての特質が消滅し、化学的に安定なスラグとなることを明らかにした。

3-3 アスベスト廃棄物の溶融スラグの再資源化

アスベスト廃棄物は、比重が小さく特別管理廃棄物であるため最終処分場まで運搬して埋め立て処分するには、運搬費も処分費も非常に高い。そのため、アスベスト廃棄物の溶融スラグの再資源化は経済的にも成立する余地が十分にある。一方スラグは、路盤材やコンクリート用骨材などとしての需要が期待されている。

クリソタイル含有水練り保温材を溶融したスラグは一番強度の低いガラス質であるものの、JISに準拠したそのスラグの路盤材試験は、表3-3に示すように修正CBR以外を満足した。修正CBRは、比較的入手が容易な碎石ダストを30%以上混合することで下層路盤材料の規定値を全て満足することを確認している。

表3-3 路盤材試験結果

項目	道路用路盤材材料の規定値			溶融スラグ
	表層・基層	上層	下層	
表乾比重 (g/cm ³)	≥2.45	—	—	2.62
吸水率 (%)	≤3.0	—	—	0.06
すり減り減量 (%)	≤30	≤50	≤50	35.9
安定性 (%)	—	≤20	≤20	0.0
修正CBR (%)	—	≥80	≥20	12.8

表乾比重：骨材が吸収できる水分を全て吸収し、かつ、表面が湿潤していない状態での骨材の比重。
吸水率：表乾比重と絶乾比重の差の絶乾比重に対する割合。
絶乾比重：骨材が含水していない状態での比重。
すり減り減量：摩耗による耐久性を確認する試験。ロサンゼルス試験機と呼ばれる鋼製円筒容器内に、鋼球と骨材を入れて回転させ、回転の前後での骨材の質量の減少量を回転前の質量で除して求められる。
安定性：骨材の凍結融解に対する耐久性を評価する試験。
修正CBR：締め固められた時の支持力を評価する試験。

下層路盤材のように、比較的大きな塊状で利用する場合と異なり、スラグを骨材として利用するには、何度も粉砕・摩砕して粒度調整を行う必要があり、時間とコストがかかる。そこで、溶湯を冷却された回転漏斗に出湯し、溶融スラグを斜面上に分散・滑落させることで、20mmアンダーの球状の骨材を直接製造する研究を実施した。

図3-3に回転式溶融スラグ骨材化装置を示す。100kW級プラズマ溶融処理実験設備に合わせ、数十秒間出湯したスラグ（出湯速度30g/s相当）を骨材にする規模で、回転漏斗、骨材回収機構、冷却機構、分散機構などから構成される。

プラズマ溶融処理実験設備で加熱溶融した珪酸カルシウム系保温材を骨材化する実験では、アークを消弧後、手動制御でつぼを傾動させて、溶融スラグを骨材化装置に出湯した。炉内に設置した骨材化装置は、出湯直前

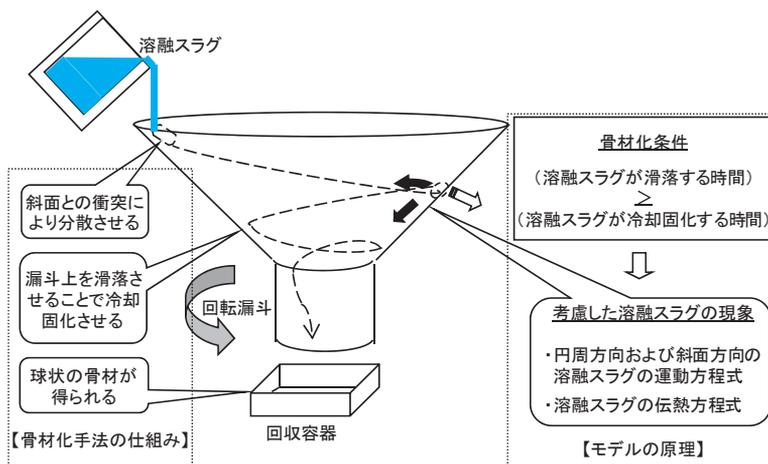


図3-3 溶融スラグ直接骨材化手法および骨材化条件を計算するモデルの概要

に所定の循環冷却水流量と回転速度に設定して運転し、必要に応じて空気吹き付けや水噴射を行った。図3-4に得られた球状のスラグを示す。図に示すように比較的球状に近いスラグを得ることができた。

現在は、出湯方法や分散機構を改善することで、骨材の回収率向上を検討している。引き続き、熔融スラグの組成変動時の対応とその際の骨材の品質確保、連続運転時の信頼性検証、骨材生成に最適なプロセスの確立などの課題を克服することで、最終的には処分場の延命や循環型社会の構築に貢献していきたい。



回転式熔融スラグ骨材化装置の運転条件
 回転速度 : 3 rps
 背面冷却水 : 50 l/min
 噴霧冷却水 : なし

図3-4 作製した骨材の一例

当研究所が進めてきた無害化に関する研究成果は、1,500℃以上の熔融法として、NEDOが実施した「アスベスト含有建材等安全回収・処理等技術開発」の中で、最新の技術動向として紹介されている⁽⁶⁾。

参考文献

- (1) 廃石綿等処理マニュアル、特別管理廃棄物シリーズⅡ：厚生省生活衛生局水道環境部 作業廃棄物対策室監修、(財) 廃棄物研究財団編、化学工業日報社（1993）
- (2) 安井晋示、天川正士：アスベスト廃棄物のプラズマ熔融無害化・再資源化技術、第15回電熱大会予稿集、p49（2000）
- (3) 安井晋示、天川正士、山崎克男、門井英一：再利用化に向けたアスベスト廃棄物のプラズマ熔融処理技術、電気学会論文誌、Vol.120-A、p335（2000）
- (4) 池田弘一、天川正士、安井晋示：プラズマ熔融によるスラグ再資源化技術の開発－アスベスト廃棄物のスラグ直接骨材化手法の提案と基礎的検討－、電力中央研究所研究報告、W03005（2004）
- (5) 通達文書「生衛発第508号」、厚生省生活衛生局水道環境部、（平成10年3月）
- (6) 山下勝、今西信之：アスベスト対策の現状とNEDOにおける対策技術の最新動向、資源環境対策、Vol. 44、No. 3、pp. 30-35（2008）