

オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システムの開発

山田 真一^{*1} 別 森 敬一^{*2}

1. まえがき

2005年6月、クボタが公表したアスベスト被害、いわゆる「クボタ・ショック」をきっかけに、アスベストによる健康被害が社会問題化した。このアスベストは、過去にカナダやブラジル等から多量に輸入され、建物の吹付け材から建材、保温材、配管シール材、自動車のブレーキパッドに至るまで、様々な用途で使用されてきた。国内にはアスベスト量で約1,000万tの輸入蓄積があると推定され¹⁾、今後も使い終えたアスベスト廃棄物の大量排出が30年以上に亘って続くものと予想されている。

一方、1980年代以前に建設された火力・原子力発電所では、推定約30万m³のアスベスト含有保温材（以下、「保温材」という）が高温部に用いられており²⁾、今後、老朽プラントの廃止やリプレースに伴う解体で、大量の保温材の排出が予想される。しかし、アスベスト廃棄物の処理は埋立処分に殆ど依存し、最終処分場の残余容量が年々減少しつづけている現況下において、これら負の遺産を先送りしないためにも着実な無害化処理が求められている。

北陸電力では、2006年度から独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業として、アルカリ融解を用いアスベスト含有保温材を無害化するオンサイト式溶融・無害化処理システム（以下、「オンサイト式システム」という）の研究開発に取り組み、2010年10月には、国内で3例目となるアスベスト無害化処理に係る環境大臣認定を取得した。現在、火力発電所の定期点検の際に排出される保温材の無害化処理を実施しているが、本稿では著者らがこれまで取り組んできた研究開発成果等について報告する。

2. アスベスト廃棄物と処理の現状

(1) アスベスト廃棄物

アスベストとは、石綿と呼ばれる天然鉱物繊維の総称で、蛇紋石系のクリソタイルと角閃石系のアモサイト、クロシドライト、アンソフィライト、トレモライト、アクチノライトの6種類が定義されており、耐熱性や耐摩耗性、耐薬品性などの多くの優れた性質を有することから、建物の吹付け材や建材、各種工業製品等に幅広く使用されてきた。

しかし、アスベストを吸い込むことによる中皮種や肺がん等の健康被害が顕在化したことから、アスベスト含有製品の製造等が限られた用途を除いて全面禁止化されるとともに、石綿障害予防規則や大気汚染防止法、廃棄物処理法などの規制が大幅に強化されている。

第1表に規制対象となっているアスベスト廃棄物の分類と製品生産量、推定残存量¹⁾を示す。オンサイト式システムの処理対象である保温材は、大分類のレベル2（比重0.5以下で発塵しやすい製品）に該当し、火力・原子力発電所を始め各種工業プラントの高温蒸気配管、ボイラ等の断熱材として過去に用いられていた。その主成分はケイ酸カルシウムであり、保温材成形時の補強材としてアスベストが使用されている。

分野	大分類	中分類	小分類	製品生産量 推定残存量
建材	レベル1 (著しく発塵量の多い製品)	吹付け材（飛散性）	吹付けアスベスト 吹付けロックウール パーライト吹付け	製品生産量 約170万 ¹⁾ 推定残存量 約1000万 ¹⁾
	レベル2 (比重0.5以下で発塵しやすい製品)	保温材、断熱材、耐火被覆材等 (飛散性)	配管、ボイラ、梁、柱、屋根用、煙突用	製品生産量 約4,600万 ¹⁾ 推定残存量 約4,000万 ¹⁾
	レベル3 (発塵性の比較的低い製品)	成形板、セメント管 (非飛散性)	外装用、内装用、水道管、農業用水、煙突など	製品生産量 約150万 ¹⁾ 推定残存量 約120万 ¹⁾
工業用			ガスケット、パッキングなど	製品生産量 約150万 ¹⁾
家庭用			電気製品、ガス石油製品など	製品生産量 約120万 ¹⁾

第1表 アスベスト廃棄物の分類と製品生産量、推定残存量

*1 技術開発研究所 技術開発チーム

*2 日本海環境サービス株式会社

(2) アスベスト廃棄物処理の現状と問題点

アスベストは、前述のとおり多くの優れた特性を有するが故に無害化処理が容易ではない物質とも言える。そのため、廃棄物処理法で定めるアスベスト廃棄物の処理は、2重梱包して特別管理産業廃棄物の最終処分場に埋め立てる方法か、都道府県知事の許可を受けた1,500°C以上の溶融施設で溶融処理する方法に限定されていた。

しかし、1,500°C以上での溶融処理となると、都市ごみ焼却灰の溶融に利用されているプラズマ溶融等のようにエネルギー投入量が大きく設備も重厚となり、膨大な設備投資が必要となってしまうことから、実際に溶融処理を行っている施設は僅かで、アスベスト廃棄物の処理に占める溶融処理比率は数%程度に止まっていた。

このような背景のもと、2006年10月に施行された改正廃棄物処理法において、高度な技術による無害化処理が証明できれば、1,500°C未満の処理技術であっても環境大臣が認定することにより処理が可能となった。しかし、アスベスト廃棄物が地元へ搬入されることによる健康被害を危惧する周辺住民の不安が、無害化処理施設の新規建設を難しくしており、同法施行から5年以上経過した現在でも殆ど進展していない状況である。

3. アスベスト溶融・無害化処理技術の開発

(1) 基本コンセプト

無害化処理システムの開発にあたっては、「オンサイト式」と「低温溶融」を基本コンセプトとした。

オンサイト式であれば、保温材が解体・廃棄されたタイミングで現場に出向き、その場で無害化処理を完結することができる。その結果、他所からアスベスト廃棄物が持ち込まれないこと、短期間で処理が完了すること、常設の処理施設ではないことから、周辺住民の理解が比較的得られやすくなる考えた。

一方、オンサイト式を実現するには、コンパクトかつ効率的な溶融処理装置が求められる。そのためには、アスベストを1,500°Cより極力低い温度で溶融・無害化できれば、結果として装置材料に金属が採用でき、耐久性向上やコストダウンが図れる。

(2) 低温溶融処理技術

a. アルカリ融剤の選定

保温材の主成分であるケイ酸カルシウムと補強材として添加されているアスベストは、共に安定で融点は最も高いクリソタイルで1,500°C以上もあることから、溶融温度を低下させるために着目したのは、過去に石炭火力発電所の石炭灰を溶融する研究で培ったアルカリ融解技術である。アルカリ融解は、酸分解が困難な鉱物、ケイ酸塩や高原子価の金属酸化物等の難分解性試料を、アルカリ化合物を用いて溶融する技術であり、無機分析の前処理方法としてよく使用されるとともに、ガラスの製法にも用いられている古典的な方法である。アスベストも鉱物の一種であり、その化学的組成ではなく微細な繊維形状が問題の本質となっていることから、適切なアルカリ化合物を選定すれば、無害化はもとより溶融温度の大幅な低下が図れると考えた。

そこで、保温材を溶融させる溶媒となるアルカリ化合物を選定するため、鉱物やケイ酸塩等のアルカリ融解に用いられているアルカリ化合物³⁾を9種類選択し、融点だけではなく将来の実用化のため汎用性・流通量、安定性、経済性およびMSDS情報や労働安全衛生法、消防法、PRTR法、毒劇取締法などの適用法令を評価条件としてスクリーニングを行った。第2表にスクリーニングの結果を示すが、一般的な工業原料として広く市場に流通し安定性にも優れ、比較的安価なアルカリ化合物EとFを有力候補として選定した。

第2表 アルカリ化合物のスクリーニング結果

物質名	スクリーニング条件					総合評価
	融点(°C)	汎用性 流通量	安定性	経済性	適用法令	
A	500°C 未満	○	△	△	労安法, PRTR法	○
B		○	×	○	労安法, 毒劇法	△
C		×	○	×	労安法, PRTR法	△
D		×	×	×	労安法, 消防法	×
E	500°C以上 1,000°C未満	○	○	○	労安法, PRTR法	◎
F		○	○	○	非該当	◎
G		○	△	△	非該当	○
H		×	○	×	非該当	△
I		×	×	×	労安法, 消防法	×

一方、スクリーニングで選定したアルカリ化合物 E と F を混合すれば、更に低融点のアルカリ化合物が得られると考え、2成分の場合に適用できるルシャトリエ・シュレーダーの式⁴⁾を用いて、アルカリ化合物 E と F の融点よりも低い極小点(共融点)が得られるモル分率を求めた。試算の結果、アルカリ化合物 E と F のモル分率はそれぞれ 0.54, 0.46 となり、共融点は 666℃ となった。また、このモル分率におけるアルカリ化合物 E と F のモル比は概ね 1 : 1 となり、溶融後はガラスとして最も安定な状態となることから、保温材を溶融させる溶媒として最適化が図られていると考える。

以上の結果を踏まえ、E と F をそれぞれ 0.54, 0.46 のモル分率で混合したアルカリ化合物（以下、「アルカリ融剤」という）を保温材の溶融に用いることとした。

b. 溶融・無害化条件の決定

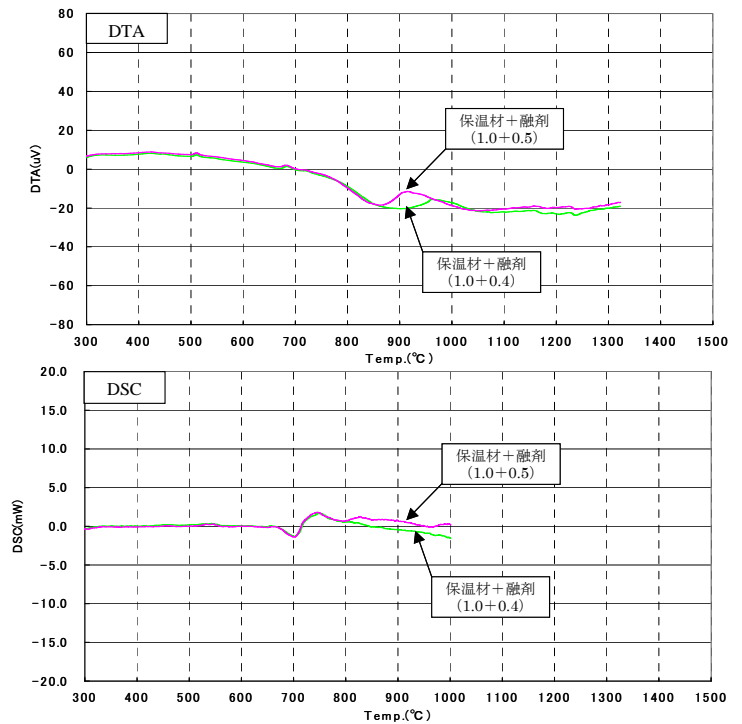
アルカリ融剤を併用して保温材を溶融・無害化する場合、多成分が混在した状態での溶融となるため、溶融温度を理論的に導き出すことはできない。

そこで、保温材に対するアルカリ融剤添加比と溶融完了温度を見極めるため熱分析を行った。第1図に添加比 0.4 と 0.5 の場合の示差熱分析（以下、「DTA」という）および示差走査熱量測定（以下、「DSC」という）結果を示すが、DSC チャートでは、いずれの添加比とも 670℃ 付近でアルカリ融剤の融解に伴う吸熱が始まり、700℃ 付近で発熱ピークに移行していることから、この温度域から融解したアルカリ融剤が溶媒となって保温材の溶融を開始したものと考えられる。また、DTA チャートでは、添加比 0.4 は 1,050℃ 付近で、0.5 は 1,020℃ 付近でカーブが飽和しており、溶融が完了したものと判断できる。

そこで、熱分析結果を検証するため、3kW 誘導加熱装置を用いて保温材（アモサイト 1.6wt% 含有）にアルカリ融剤を 0.4 と 0.5 の添加比で加え、1,100℃ 設定（るつぼ内実測温度 1,053℃）、溶融処理時間 3 分の条件で溶融・無害化実験を行った。第3表に実験結果を示すが、いずれの溶融物にも保温材の溶け残りや濁りはなく、JIS

A1481 に定める公定分析法でも溶融物からアスベストは検出されず、無害化されていることを確認した。なお、第2図にアルカリ融剤混合比 0.4 における溶融物の X 線回折分析結果を示すが、溶融前に検出されたアスベスト（アモサイト）のピークが溶融後は完全に消滅している。また、クリソタイルを含む保温材でも同様に溶融無害化できることを確認している。

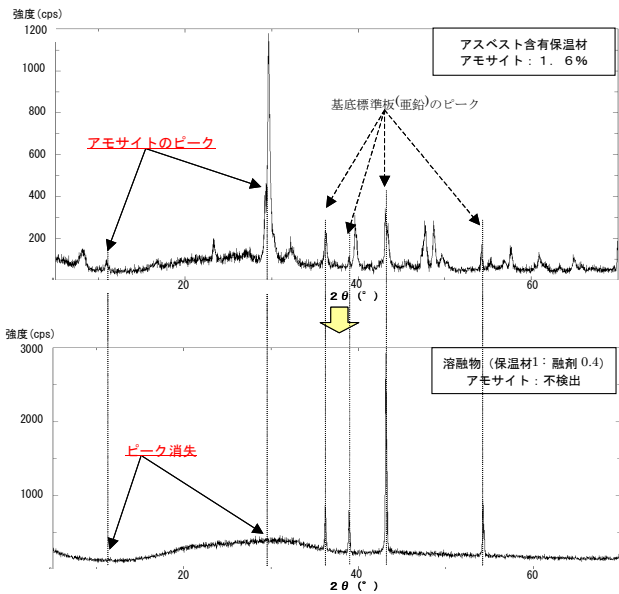
以上の結果を踏まえ、オンサイト式システムに適用するアルカリ融剤の添加比は余裕をみて 0.45、溶融温度は 1,050℃ 以上に決定した。



第1図 熱分析結果

第3表 アスベストの溶融・無害化実験結果

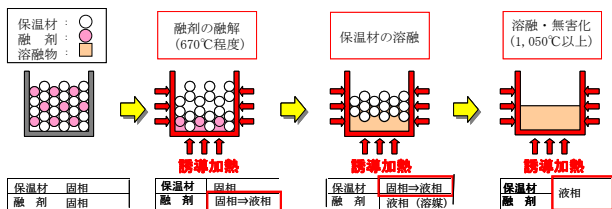
テストNo	サンプル1	サンプル2
保温材/融剤比	1 : 0.4	1 : 0.5
設定/実測温度	1,100℃ (るつぼ内温度 1,053℃)	
溶融処理時間	3分	
保温材中 アスベスト濃度 (JIS A-1481)	アモサイト : 1.6% それ以外の5種類のアスベストは不検出 (X線回折の分析結果は第2図参照)	
溶融状況	○ 溶融物内に溶け残り や 濁りは認められない	○ 同左
溶融物 アスベスト濃度 (JIS A-1481)	○ 不検出 (X線回折の分析結果 は第2図参照)	○ 不検出



第2図 X線回折分析結果

c. 低温溶融処理の概念図

3. (2) b. の熱分析結果と溶融・無害化実験結果を基に模式した保温材の溶融・無害化処理の概念図を第3図に示す。保温材にアルカリ融剤を添加 (1:0.45) して加熱すると、まずアルカリ融剤が 670°C程度で融解し、それが溶媒 (液相) となって保温材 (固相) の溶融が始まり



1,050°C以上ですべて液相となり溶融・無害化が終了する。

第3図 溶融・無害化処理の概念図

(3) 150kW 誘導加熱溶融炉の開発

a. ルツボ形状と誘導コイルの決定

オンサイト式を実現するため、溶融の加熱方式は装置をコンパクトにできる誘導加熱を用いることとした。そこで、実用規模の誘導加熱溶融炉を設計するため、試験用 60kW 誘導加熱炉を用いて 3. (2) b. で決定した溶融条件のもと溶融試験を行った。その結果、保温材が無害化されていることが確認できた。一方、連続的に溶融処理する場合、安定的かつ効率的に処理が行えるよう、金属ルツボ底部を含め全体を均一に

誘導加熱する必要があることがわかった。

金属ルツボ温度分布の均温化は、安定した処理に寄与する他、局部過熱を防ぎ金属ルツボの溶損防止にもつながるため、金属ルツボ形状と誘導コイル構造を順次改良しながら2次元有限要素法による磁界解析を行った。第4図に各タイプの磁界解析結果を示す。

①タイプ I

円筒状の金属ルツボ最上部に磁界が集中し局所的に温度上昇する一方、金属ルツボ底部へは殆ど磁界が届かず下部温度が上がりにくい。

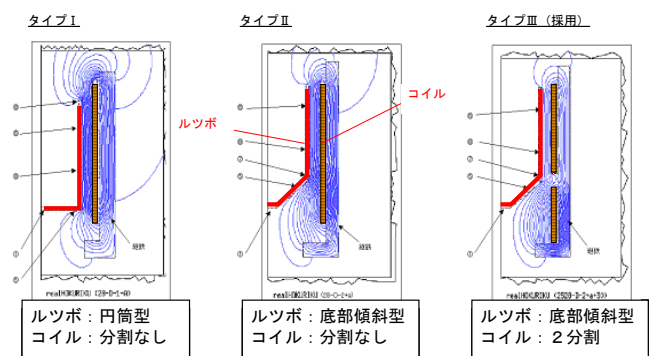
②タイプ II

金属ルツボ下部をテーパの形状としたことにより、底部にもある程度磁界が届くようになったが、金属ルツボの曲がり部に磁界が集中して局所的な温度上昇を生ずる。

③タイプ III

金属ルツボをタイプ II と同じ形状にすることに加え、誘導コイルを上下に2分割する構造としたことにより、ルツボの曲がり部への磁界集中が抑制でき、ルツボ底部の加温と側面均温化が図れる。

以上の結果を踏まえ、タイプ III の誘導コイル構造とルツボ形状の組み合わせを採用することとし、第1図の DSC 結果から得られる保温材溶融エネルギーや炉の熱損失等を考慮して実用規模の 150kW 誘導加熱溶融炉を設計開発した。



第4図 金属ルツボの磁界解析結果

b. 金属ルツボ材料の選定

誘導加熱溶融炉で使用する金属ルツボには当初ステンレス材 (SUS310S) を採用したが、

1,100℃以上の高温条件でアルカリ融剤を併用するため、高温酸化腐食、アルカリ腐食およびエロージョンにより減肉が進行したことから、ルツボ寿命の延伸化に取り組んだ。

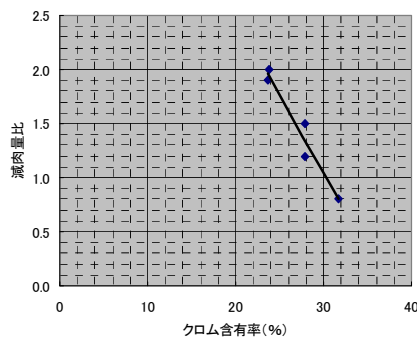
まず、高温酸化腐食およびアルカリ腐食に強い材料として知られている高ニッケルのインコネル材を採用し、ルツボ寿命の延伸を試みた。しかし、保温材に僅かに含まれる硫黄分と材料中のニッケル成分が反応して硫化腐食が発生したため、SUS310S以上のルツボ寿命の延伸を図ることはできなかった。

そこで、材料選定の方針を見直し、従来より厚肉成型が可能な耐熱ステンレス鋳鋼材に着目し、減肉を極力抑制できるクロム、ニッケル配合率の最適化を図るための実験を行った。第4表に示す含有率でクロム、ニッケル含有率を変化させた複数の耐熱ステンレス鋳鋼材の小型ルツボを試作し、その中に保温材とアルカリ融剤を充填して1,150℃の電気炉で溶融処理を行い、SUS310Sを基準材料に減肉量を比較した。

結果を第4表に示すが、クロム含有率が高いほど減肉量が小さくなることがわかった。単回帰分析結果では、第5図の減肉量とクロム含有率との相関は非常に高いが、ニッケル含有率との相関はみられなかった。

第4表 小型ルツボの含有率と試験結果

小型ルツボ	含有率(単位:%)			減肉量比
	Fe	Ni	Cr	
1	61	13	24	2.0
2	55	19	24	1.9
3	59	10	28	1.5
4	53	16	28	1.2
5	45	20	32	0.8
基準材料	54	19	25	1



第5図 減肉量とクロム含有率の関係

次に、鋳造が可能な高クロム(32%以上)のステ

ンレス鋳鋼で中型ルツボを試作し、試験用60kW誘導加熱炉でスケールアップ試験を行った結果、同条件下のSUS310Sに比べ大幅に減肉を抑制できた。

さらに、150kW誘導加熱溶融炉用の厚肉の高クロムステンレス鋳鋼ルツボを試作して実機で検証した結果、従来のSUS310Sに比べ2倍以上のルツボ寿命の延伸が図れたことから、厚肉の高クロムステンレス鋳鋼を採用することとした。

c. 150kW 誘導加熱溶融炉による実証試験

オンサイト式システムの核となる150kW誘導加熱溶融炉を隔離養生した負圧区画に設置し、当社火力発電所から排出された保温材を用いて3.(2)b.で決定した溶融条件で溶融・無害化試験を行った。JIS A1481に定める公定分析法では、処理後の溶融物からアスベストは検出されず、150kW誘導加熱溶融炉で無害化を確実に達成できることを確認した。

4. 溶融・無害化処理システムの構築

(1) システム構成

150kW誘導加熱溶融炉の溶融効率向上およびアスベスト粉塵の飛散防止を図るため、第6図に示す溶融・無害化処理システムを構築した。このシステムは、以下の機能を備えた5つの主要装置で構成されている。

a. 破碎機

アルカリ融剤との反応性を良くするため保温材を粗破碎する。

b. 搬送乾燥機

水分を含んだ保温材を下部から上部に搬送しつつ溶融物から回収した廃熱で予備乾燥する。

c. 誘導加熱溶融炉

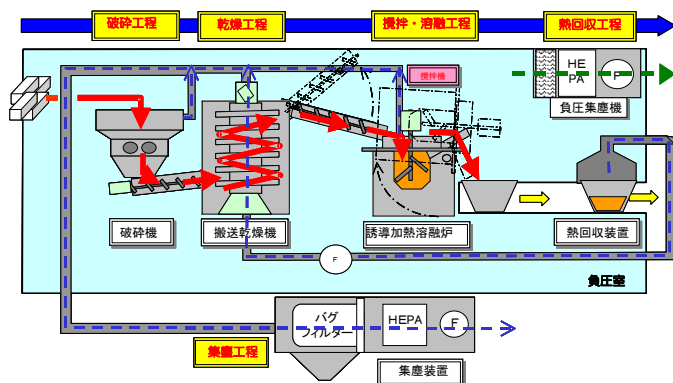
破碎・予備乾燥した保温材を攪拌機で拡散し効率良く溶融する。

d. 熱回収装置

処理後の溶融物から予備乾燥用の熱風として廃熱を回収する。

e. 集塵装置

システム各部から飛散するアスベスト粉塵を高効率で集塵する。



第6図 熔融・無害化処理システム構成図

(2) システム構築時の課題と対策

システムの構築にあたっては、ノンアスベスト保温材を用いて熔融試験を繰り返し行って不具合を洗い出し、重要な以下の課題について対策を講じた。

a. ダクトの閉塞対策

誘導加熱熔融炉外部へのアスベスト飛散を防止しつつ炉内の負圧を保持するため、集塵装置でガスを吸引しているが、炉内に投入されたアルカリ融剤と保温材の粉体の一部が吸引されてダクト内側に固着・閉塞してしまう現象が発生したことから、炉内の負圧維持に支障をきたさないよう、ダクト吸込口に固着物を掻き落とすピストン式のスクレーパを設置した。また、炉内に投入した保温材とアルカリ融剤の粉体が、熔融液面まで落下せずダクトから直接吸引されるのを防止するため、炉内投入口に仕切り板を設けた。

b. 炉内圧力変動への追従対策

高含水率の保温材が誘導加熱熔融炉に投入された場合、大量の水蒸気発生で急激に炉内圧が上昇し、回転数可変式吸引ファンが圧力変動に追従できないため、誘導加熱熔融炉からの吸引ダクトに瞬時に開閉できる大気導入弁を設置し、炉内圧力の急激な上昇に即応できるようにした。

c. 乾燥能力の向上対策

現場から実際に解体される保温材には、50wt%（保温材重量と同じ水分を含む）を超え

る高含水率のものも存在するため、熔融物から回収した 250℃程度の熱風に加えて、搬送乾燥機に遠赤外線シーズヒータを追設し乾燥能力の強化を図った。これにより炉内での水蒸気発生量を抑制でき、炉内圧の変動が緩和された。

5. オンサイト式システムの開発

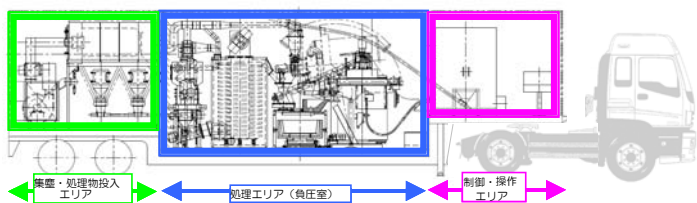
(1) オンサイト式システム

研究開発の最終段階として、トレーラに熔融・無害化処理システムを搭載するオンサイト式システムの開発に取り組んだ。オンサイト式システムは、解体現場に出向く際に一般公道を走行するため、道路運送車両法に定める車両保安基準をクリアする必要がある。そこで、設計に当たっては、車両総重量、寸法（高さ3.8m以内、車幅2.5m以内）および車両転倒角（25度以上）等の車両保安基準を満足しつつ、最適な処理の動線が描けるよう機器レイアウトを工夫した。

オンサイト式システムの外観図を第7図に、搭載図を第8図に示すが、誘導加熱熔融炉を始めとする主要機器を高さ制限内で設置するため、トレーラ台車は中低床式（中央部の床高さが地上から60cm）を採用するとともに、主要機器の重心も極力低くした。



第7図 オンサイト式システム搭載図



第8図 オンサイト式システム外観図

また、トレーラは全体をアルミパネルで囲み、前方から「制御・操作エリア」、「処理エリア」、「集塵・処理物投入エリア」に分割した3室構造とした。特に処理エリアでは、密閉された主要機器をHEPA フィルター付きのバグフィルターで集塵するとともに、処理エリア室内をHEPA フィルター付き集塵機で負圧維持し、アスベスト飛散防止対策の二重化を図った。

システムの主な仕様を第5表に示す。

第5表 システムの主な仕様

無害化処理の方法	アルカリ融剤を併用した誘導加熱溶融炉による溶融処理
溶融炉	150kW 誘導加熱溶融炉
処理対象	アスベスト含有保温材
溶融温度	1,050℃以上
処理能力	5ト/日
ユーティリティ設備	<ul style="list-style-type: none"> ・高調波フィルター付受電ユニット ・誘導加熱溶融炉用インバータ盤 ・誘導加熱溶融炉用冷却装置 ・空気圧縮機

(2) 非常時対策

地震対策として、加速度センサーが150ガル以上（震度5弱）を感知した場合に自動停止する機能を備えるとともに、外部電源喪失対策として、無停電電源システム（UPS）と非常用ディーゼル発電機で、運転監視機器や集塵機、誘導加熱溶融炉冷却水ポンプの各電源をバックアップする機能も備えた。

(3) 火力発電所での実用化の検証

保温材を解体している遠隔地の火力発電所にオンサイト式システムを搬入し、廃棄物処理法に基づき地元自治体へ必要な手続きを経て実証試験を行った。6日間の連続処理運転において以下の事項について検証を行った結果、すべて目標を満足しておりオンサイト式システムが実用化レベルであることを確認した。

- a. 遠距離移動の影響も含めたシステム構成機器の機能
- b. 溶融能力の確保
- c. 溶融温度の安定維持
- d. 溶融物のアスベストが不検出（公定法および透過型電子顕微鏡（TEM）による）
- e. 周辺大気への環境影響なし

6. 実用化の状況

国内で3例目となるアスベスト無害化処理に係る環境大臣認定の取得以降、実機を当社3火力発電所に順次移動させ、定期点検時に解体・除去された保温材の無害化処理を実施した。処理時の実機からの排気、周辺大気および処理後の溶融物の公定分析結果においてアスベストは一切検出されず、実機の安全安定運転と確実な無害化を確認した。一方、1箇所当たりの保温材処理量が一定規模を超えない場合、移動や設置・撤去等の固定費により、現状の埋立処分よりコストアップになることも明確になった。

また、さらなる信頼性向上に向けた改良点（消耗部品・部材の耐久性向上策、機器の構造・機能の見直し等）の洗い出しも行い、その成果を反映した次期商用機の基本仕様をまとめることができた。

7. 今後の展望

今般、次期商用機の基本仕様をまとめるという当初の目標を達成したことから、実機を用いた自社の保温材の無害化処理を終了することとした。

国内には、火力・原子力発電所はもとより高熱を取り扱う他業種の大規模プラントにおいて、現在も大量の保温材が残存していると推察される。将来、大規模プラントの解体・リプレース等の現場で基本仕様に基づき製作された商用機が稼動し、国内のアスベストによる環境リスクが少しでも回避できることを期待したい。

参考文献

- (1) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構；アスベスト削減技術戦略ロードマップローリング及び俯瞰調査 平成 21 年度成果報告書, (2010), 92-93.
- (2) 電気事業連合会；石綿に関する電力各社の調査結果のとりまとめについて, (2005).
http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/sonota/_icsFiles/afiedfile/2008/08/25/20050805.pdf (アクセス日：2012.3.30)
- (3) 松本健；難溶解性物質の分解法, ぶんせき, 2002-2 (2002), 60-66.
- (4) 吉野治一；共融混合物の相転移, 大阪市立大学ホームページ,
http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/~yoshino/edu/exp/Text_mix.PDF
(アクセス日：2012.3.30)

(本論文は, エネルギー・資源学会論文誌 2012 年 9 月号「オンサイト式アスベスト溶融・無害化処理システムの開発」より, 許諾の上転載しております。)