

# 製鋼スラグの加圧式蒸気エージング設備

市原明恵\*

Akie Ichihara

## 1. はじめに

製鋼スラグとは、製鋼工程より発生する鉄鋼スラグの総称であり、電気炉スラグと転炉スラグに分類される。製鋼スラグは硬質かつ高比重な石材状の物質であるため、その特性を活かし、古くより、路盤材や埋め戻し材等の道路用、土木用途に利材化されている。

鉄鋼スラグ製品は、様々な用途でグリーン購入法の「特定調達品目」に指定されており、当社製鋼スラグ製品の主用途である、「鉄鋼スラグ混入路盤材」、「鉄鋼スラグ混入アスファルト混合物用骨材」も、グリーン購入法の特定調達品目である。製鋼スラグ製品は、資源循環型社会に即したリサイクル資材であると共に、碎石採掘時に発生する二酸化炭素を削減した環境調和型の資材として、環境対策の重要性が高まる現代社会に適合した製品といえる。

公共工事の縮小による路盤材需要の低迷や、社会的な環境意識の高まりといった社会情勢の変化に適應し、製鋼スラグ製品をリサイクル資材として安定供給していくためには、製鋼スラグ製品の更なる品質向上と、多様な用途への適用が必要である。このため、均質かつ高品位なスラグ製品を、短期間で製造可能な加圧式蒸気エージング設備の導

入を行った。当該設備の仕様及び特性について、以下に紹介する。

## 2. 製鋼スラグの膨張特性とエージング処理

製鋼スラグを道路用、土木用途に利材化する際に考慮すべき性質として、製鋼スラグの膨張特性がある。製鋼スラグの主成分は、造滓材として投入されたCaO及び、精錬によって生成する $Al_2O_3$ や $SiO_2$ であり、これらは、 $2CaO \cdot SiO_2$ や $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ といった鉱物層の状態に凝固する。しかし、CaOが未溶解の状態に残留した場合（f-CaOと称す）、雨水等の水分と水和反応を起こして体積が約2倍に膨張し、道路用材料の場合、花咲き現象など路面トラブルの原因となる。

このため、エージング（Aging）と呼ばれる体積安定化処理<sup>1)</sup>を行い、水浸膨張試験にて膨張安定性を確認する事が、JIS A5015「道路用鉄鋼スラグ」にて規定されている。エージングには、製品粒度に破碎後、露天下で3～6ヶ月以上暴露する大気エージングのほか、蒸気や温水により水和反応を促進する促進エージングがあり、促進エージングには、蒸気配管上に積載し、保温シートをかけ1週間～10日程度養生する蒸気エージング<sup>2, 3)</sup>や、高温・高圧下にて養生する加圧蒸気エージング<sup>4, 5)</sup>が実用化されている。

当社では大気エージングにて処理を行ってきたが、大気エージングでは処理期間が3ヶ月～1年程度と長期に及び、製品のロット管理を行うには、広大なエージング場の面積が必要であった。また、f-MgO起因の膨張は反応の進行がより遅いため<sup>6)</sup>、短時間で安定した処理が期待される加圧式蒸気エージング設備の導入を行った。



図1. 製鋼スラグ（電気炉スラグ）製品の外観写真

\* スラグ製品事業室 兼 研究・開発センター プロセス開発グループ

### 3. 設備概要

加圧式蒸気エージング設備の外観写真を図2、仕様を表1に示す。加圧式蒸気エージング設備は、1基のオートクレーブ（圧力容器）及び2基のバスケット、昇降台車、走行台車及び架台から構成される。最大処理能力は15,000t/月である。

本機の特徴は、業界初となる1.0MPaの高温蒸気にて処理を行う点であり、微細な粒子間にも蒸気が行き渡り、処理の均一性が高いほか、膨張反応の遅いf-MgO系膨張に対し、高い効果を発揮する。

また、蒸気配管上に処理スラグを山積し、保温シートで被覆した状態で蒸気処理を行う、通常の蒸気エージングに比べ、加圧式蒸気エージングは蒸気封入式で、処理時間も短いため、蒸気使用量が少ない。即ち、エネルギー原単位の良い、低炭素型の処理設備であると言える。

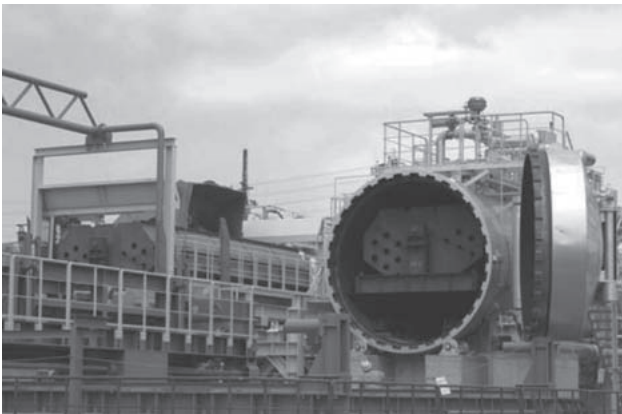


図2. 加圧式蒸気エージング設備

表1. 加圧式蒸気エージング設備 設備仕様

設備名	項目	仕様
オートクレーブ	設計圧力	1.1MPa(常用1.0MPa)
	設計温度	188℃飽和蒸気 (常用184℃飽和蒸気)
	寸法	内径 3,600mm ×有効長さ 9,250mm
	内容積	107m <sup>3</sup>
バスケット	開閉方式	底開式
	積載量	32m <sup>3</sup>
その他	自動運転機能	自動搬出入、昇降圧
	プログラム機能	複数の処理パターン登録

### 4. エージング処理の概要

加圧式蒸気エージング処理の流れを図3に示す設備上面図及び以下に示す図4～7で概説する。

まず、投入架台上で待機中のバスケットに処理スラグを重機にて積み込む（図4）。処理前スラグを満載したバスケットは、昇降台車によって走行台車（図5）に載せられ、オートクレーブ内へ搬入される（図3. 移動線①、図6）。

オートクレーブにてエージング処理後、バスケットを仮置架台に移動し（図3. 移動線②）、エージング処理中に次バッチの処理前スラグを搭載した2基目のバスケットを、投入架台からオートクレーブへ搬入する。

仮置架台上的の処理済みスラグ及びバスケットは、次バッチのエージング処理中に搬出ヤードへ移動し、防塵用の散水を行いながら、排出ヤード（図7）に処理済みスラグを排出する（図3. 移動線③）。処理済みスラグの排出を完了したバスケットは投入架台へ移動し、後続バッチの積み込みを待つ（図3. 移動線④）。

バスケット2基式であるため、1基目のバスケットをエージング処理中に、次バッチの処理前スラグを2基目のバスケットに投入可能で、連続操作が可能となっている。この連続操作により、オートクレーブの冷却が最小に押さえられ、昇降圧時のエネルギーロスを冬季期間中で約20%削減している。

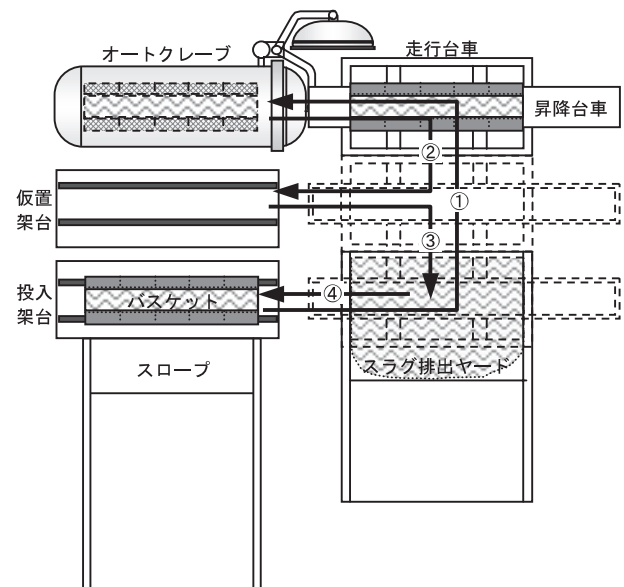


図3. 加圧式蒸気エージング設備 上面図



図4. 処理前スラグの積み込み作業

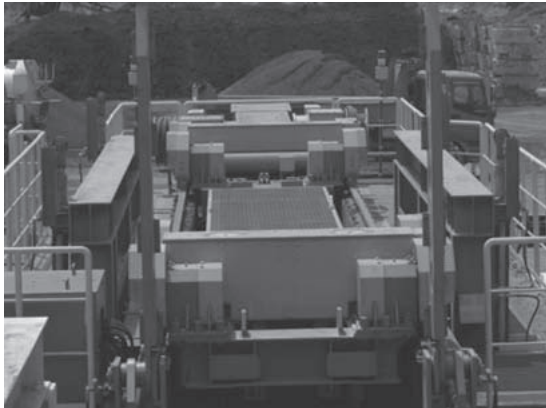


図5. 昇降台車及び走行台車

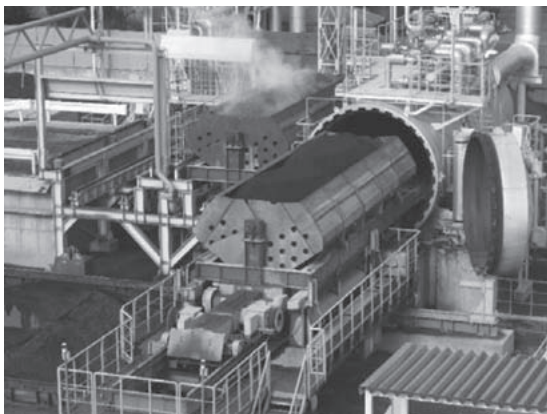


図6. オートクレーブへの挿入



図7. 排出ヤード

## 5. 高圧処理の効果

製鋼スラグの膨張要因であるf-CaOの水和膨張に及ぼす温度影響について、松田ら<sup>6)</sup>は、純CaOの水和反応速度は飽和蒸気圧力約1.5MPaに相当する200℃で最大値を示すとしている。また當房ら<sup>7)</sup>は、FeO, MnOが固溶したf-CaOでは、純CaOより高温側に反応速度のピークが来るとしている。当社製鋼スラグにおいても、特に粒度の細かいスラグに関して、同様の効果が確認されており、高温処理による反応の促進効果だけでなく、高圧処理により、スラグ微粒子の間隙にまで蒸気が浸透し易い等の効果があると考えられる。

また、一部の製鋼スラグにて、耐火物の溶損に起因すると考えられるf-MgO系膨張が観測されているが、北村<sup>8)</sup>らは、単結晶及び多結晶MgOの加熱水蒸気下での水和反応について、加圧蒸気温度135~200℃の範囲にて水和率を測定し、高温であるほど水和反応が短時間で進行し、多結晶MgOでは加圧蒸気温度が180℃以上となると、反応初期段階での水和反応の進行が特に速くなるとしている。

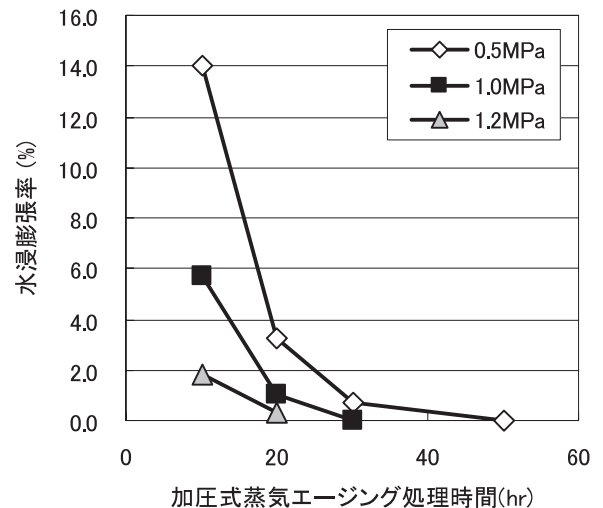


図8. 模擬スラグによる高圧処理（ラボ試験）の効果

図8に、模擬スラグを用いた高圧処理による膨張抑制効果のラボ試験結果を示す。MgOの混入源である耐火物を20%配合した模擬スラグを、実験室の小型圧力容器にて処理圧力0.5MPa、1.0MPa、1.2MPaにて加圧蒸気エージングし、水浸膨張試験を実施している。

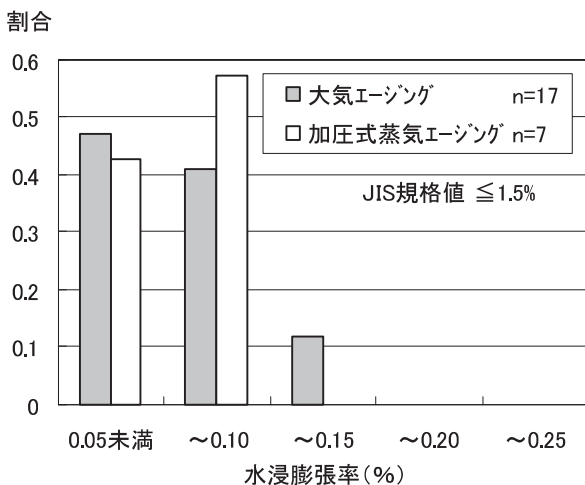
図8より、処理圧力が高いほどエージング処理後の水浸膨張率が低く、短時間処理が可能であることがわかる。当設備の処理圧力である、1.0MPaでの処理温度は184℃であり、図8の試験結果から、高圧処理がf-CaO系膨張だけでなく、もう一つの膨張要因である耐火物由来のMgOに関して、同様に高圧処理が有効であることがわかる。

## 6. 加圧式蒸気エージング設備の効果

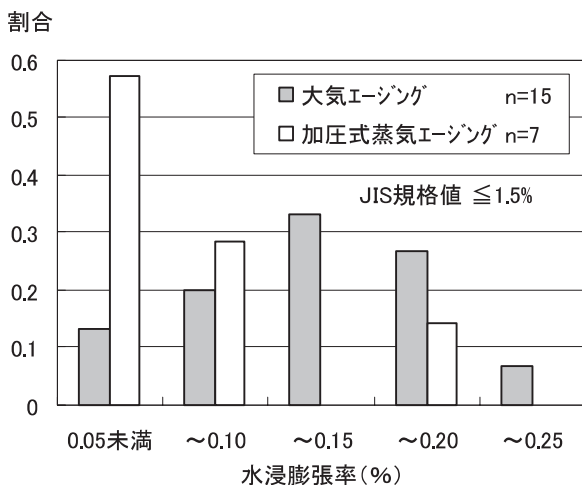
次に実機処理による膨張抑制効果を、図9に示す。図9は、a) 膨張性の低い製鋼スラグ及び、b) 比較的高い膨張特性を示す製鋼スラグに対し、大気エージング及び加圧式蒸気エージングを行った結果である。

a) 低膨張性スラグ、b) 膨張性スラグ共に、大気エージングでもJIS規格を満足するエージング処理が可能であるが、加圧式蒸気エージングを行った方が、膨張特性が低く、かつ、水浸膨張率のばらつきが少ないスラグ製品となっている。

大気エージングの場合、低膨張性スラグで3ヶ月程度、膨張性スラグで6ヶ月～1年程度の大気エージングを行った後出荷していたが、加圧式蒸気エージング設備の導入に伴い、処理時間を大幅に短縮できただけでなく、製鋼スラグの膨張特性に応じた処理を行うことで、水浸膨張率が低く、かつばらつきの少ないスラグ製品を、効率よく製造することが可能となった。



a) 低膨張性スラグ



b) 膨張性スラグ

図9. 加圧式蒸気エージングの効果

## 7. おわりに

製鋼スラグ製品は、古くより、道路、土木用途にリサイクルされており、リサイクルの優等生とも称せられる製品であるが、膨張によるトラブルに対し、使用者の懸念が今だ払拭しきれない側面がある。

ゼロエミッション、資源循環型社会の重要性が広く認識される近年、製鋼スラグ製品の膨張特性に対し、十分な信頼性を担保することは、将来にわたって製鋼スラグ製品というリサイクル製品を社会に提供していく上で、必須の要件である。

今回導入を行った加圧式蒸気エージング設備により、膨張安定性に優れ、品質ばらつきの少ない製鋼スラグ製品の提供が可能となっただけでなく、従来3ヶ月～1年程度必要であったエージング期間を大幅に短縮することが可能となり、生産性が大きく向上した。これにより、エージング処理中の仕掛在庫が縮小し、敷地面積の有効活用も期待される。今後とも、高品位な製鋼スラグ製品を提供するとともに、新規用途の開拓を推進し、製鋼スラグ製品の拡充に努めたい。

## 参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：「鉄鋼スラグの道路用材への利用」, 2004.
- 2) 亀井和郎, 門口維人, 伊藤良二, 西川恒明, 中嶋実：CAMP-ISIJ, 8(1995), 1103.
- 3) 深谷和夫, 木谷福一, 荒木茂, 辻松宏, 三宅公一：鉄と鋼, 71(1985), 784.
- 4) 住友金属工業, 川崎重工業：特許第2873178号 製鋼スラグのエージング方法及びその装置.
- 5) 住友金属工業, 川崎重工業：特許第2667800号 製鋼スラグのエージング方法及びその装置.
- 6) 松田仁樹, 石津貴, 李寿珏, 架谷昌信：化学工学論文集, 11(1985), 542.
- 7) 當房博幸, 松永久宏, 熊谷正人, 田口整司：CAMP-ISIJ, 8(1995), 119.
- 8) 北村夕, 鬼塚浩次, 田中国夫：耐火物, 50(1998), 45.