

## 製鋼スラグの蒸気エージング処理の開発

## Development of Steam-aging Process for Steel Slag

佐々木 剛\*  
Tsuyoshi SASAKI浜崎 拓司  
Takuji HAMAZAKI

## 抄 録

製鋼スラグは、日本において主に道路用路盤材や土工用材として利用されており、製鋼スラグの約30%が路盤材として利用されている。製鋼スラグは、遊離石灰の水和反応による膨張特性があり、道路用路盤材として使用する前にエージング処理をする必要がある。蒸気エージング方法と加圧蒸気エージング方法は、1990年代に開発された。これらのエージング方法の開発により、自然放置によるエージングと比較して、画期的にエージング時間を短縮することができるようになった。蒸気エージング方法および加圧エージング方法の開発について紹介した。

## Abstract

**In Japan steel slag is mainly used for road construction and civil works. And the ratio of steel slag used for road construction is about 30%. Steel slag needs aging treatment before used for road construction because it has expansive nature due to the hydration of free CaO. Steam aging method and pressurized steam aging method were developed in 1990's. And these methods can shorten aging time dramatically compared with air aging (open-air storage). This paper introduces the development of steam aging method and pressurized steam aging method.**

## 1. はじめに

1990年代に地球環境問題が大きく注目され、1991年10月に、再生資源の利用に関する法律（リサイクル法）が施行された。これにより、製鉄工程で副次的に生産されるスラグも副産物の一つに指定され、その用途開発や品質向上が義務付けられた。鉄鋼スラグの有効利用については、従前からさまざまな研究が行われ、高炉スラグについては水砕化率が向上し、100%が有効利用されていた。高炉スラグと比較すると、製鋼スラグは、遊離石灰による膨張の課題等もあり、製鋼スラグの有効利用は現在と比較して必ずしも十分ではなかった。

製鋼スラグは、現在、主に道路用路盤材や土工用材として利用されており、製鋼スラグの約30%が路盤材として利用されている。製鋼スラグを路盤材として利用する場合の大きな課題である膨張特性は、製鋼スラグ中に少量含まれる遊離石灰が水と反応し、水酸化カルシウムを生成するときに見られる現象で、その体積は約2倍になる。この遊離石灰の膨張を事前に進行させ、製鋼スラグの膨張を抑制する方法として、1990年代以前は自然放置によるエージング

(以下、大気エージングという)が行われていた。しかし、大気エージング処理では6か月以上の期間を要し、そのため広い敷地が必要となるため、促進エージング（蒸気エージングおよび加圧蒸気エージング）方法が1990年代に開発され、実用化された。

本報では、1990年代初頭に当時の小倉製鉄所で開発され、実機化された蒸気エージング方法と1995年に和歌山製鉄所で実機化された加圧蒸気エージング方法について紹介する。

## 2. 蒸気エージング方法の開発と実機化

はじめに、1990年代初頭に小倉製鉄所で取り組んだ蒸気エージング方法の開発状況と実機化について紹介する<sup>1,2)</sup>。

## 2.1 促進エージング方法の検討

製鋼スラグの遊離石灰は、大気圧下で水が存在する場合、雰囲気温度が高いほど水和反応速度が早く、短時間に反応することに着目し、水分と熱を有している蒸気と熱水による促進エージング方法をまず検討している。図1に、25mm以下に破碎した製鋼スラグを50℃、75℃の温水およ

\* スラグ・セメント事業推進部 企画調整室 主幹 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

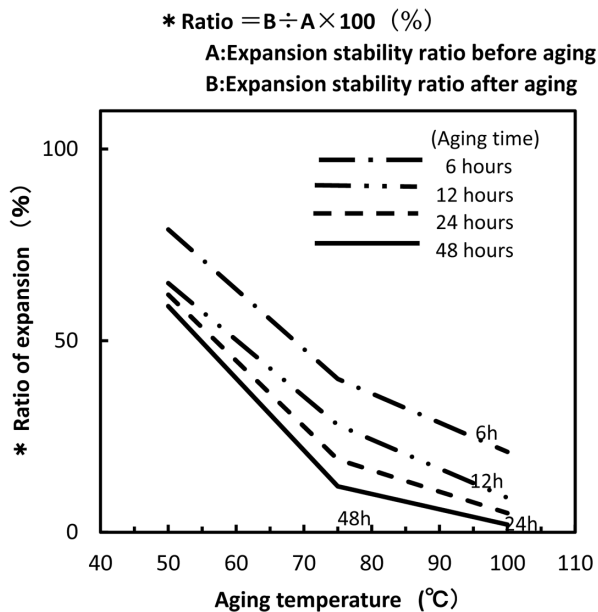


図1 エージング温度と膨張率の関係  
Relation between aging temperature and expansion ratio

び、100℃の蒸気雰囲気中に一定時間置いたとき、製鋼スラグの膨張量がどう変化するか実験した結果を示す。

この結果、スラグは雰囲気温度が高いほど短時間に安定化し、特に蒸気の場合は、48時間で膨張安定性が得られることが判明した。そこで、膨張安定化には高温が安定して得られ、運用面で有利な蒸気による促進エージングが優れていると判断し、蒸気エージングの開発に取り組むこととした。

## 2.2 ミニ蒸気試験機での実験結果

製鋼スラグの膨張特性は、遊離石灰の含有量によって大きく異なっている。そこで、1回に150kg処理可能なミニ蒸気試験機で、サンプリングした製鋼スラグを蒸気エージング処理し、水浸膨張比を調べた。水浸膨張比と蒸気エージング時間の関係を図2に示す。ここで、蒸気エージング時間が0時間とは、蒸気エージング処理前のことを意味する。この結果、遊離石灰量が多く、膨張量の大きいスラグでも、蒸気エージング6時間後に膨張量は急激に減少し、48時間後ではすべてのスラグで同等の膨張安定性を確認することができた。ミニ蒸気試験機でのさまざまな実験を経て、蒸気エージング方法は、遊離石灰が種々異なる製鋼スラグの膨張安定化方法として適用可能であると判断し、蒸気エージング方法の実機化に取り組むこととなった。

## 2.3 蒸気エージング方法の実機化

ミニ蒸気試験機の実験から、蒸気エージングによって、製鋼スラグの膨張は大気エージングに比較して大幅に短時間で安定化することが可能であることが判明したため、1回に300t処理できる実機規模の設備を建設し、その実用

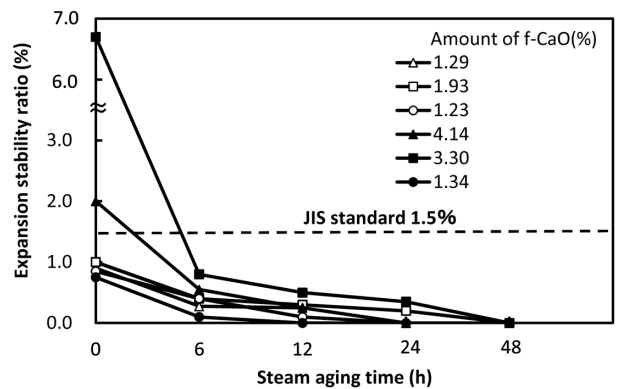


図2 蒸気エージング時間と水浸膨張比の関係  
Relation between aging time and expansion stability ratio

化を検討した。

小倉製鉄所では、1990年2月に実用化テスト機を兼ねた蒸気エージング設備（1号機）が完成し、実用化テストが続けられた。もちろん前例がない実用化の検討であったため、蒸気配管の配置、温度センサーの位置や数、昇温・保温時間の設定等々、全てが試行錯誤の検討であった。このように操業上の改良を重ね、ノウハウを蓄積しつつ、1991年8月に2号機が、1992年12月には3号機が設置された。

## 2.3.1 蒸気エージング設備の概要

図3に蒸気エージング設備の概要を、写真1には1992年12月に完成したNo. 3蒸気エージング設備の外観を示す。設備構造は、下部に蒸気噴霧管を配置し、側壁はコンクリート擁壁で3方を囲み、上部を耐熱シートで覆って、蒸気の損失を最小限に抑えている。また、蒸気の通気を均一化するため、配管構造の多ループ化、蒸気拡散層および、蒸気噴出孔を工夫している。そしてスラグ層の上部には熱電対を設置し、スラグのエージング時間を管理できるようにした。

## 2.3.2 蒸気エージング処理工程

実機の蒸気エージング設備で、製鋼スラグの安定化に必要なエージング処理工程を検討した結果、当時の小倉製鉄所では、図4に示すように、1サイクル6日間にとすることとした。このエージング処理工程は、6か月以上のエージング期間が必要な大気エージング方法と比較して、30倍以上も短い期間である。

## 2.4 蒸気エージングスラグの安定性

図4に示した処理工程で、実機設備によって蒸気エージングした製鋼スラグについて、いろいろな角度から膨張安定性について検討した結果、路盤材に適用しても膨張の問題はないことがわかった。

図5には、実機設備によって蒸気エージングしたエージング処理48時間後の製鋼スラグ膨張量を示す。この結果、

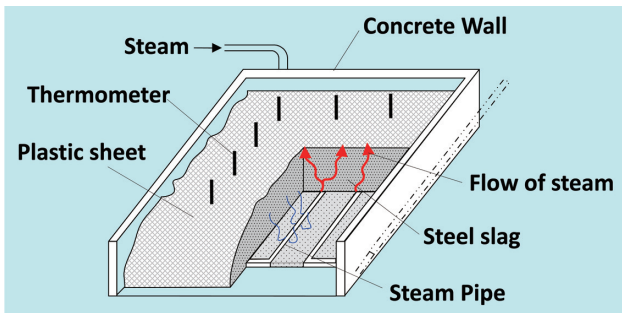


図3 蒸気エージング設備の概要  
Outline of steam aging equipment



写真1 No. 3 蒸気エージング設備  
No. 3 steam aging equipment

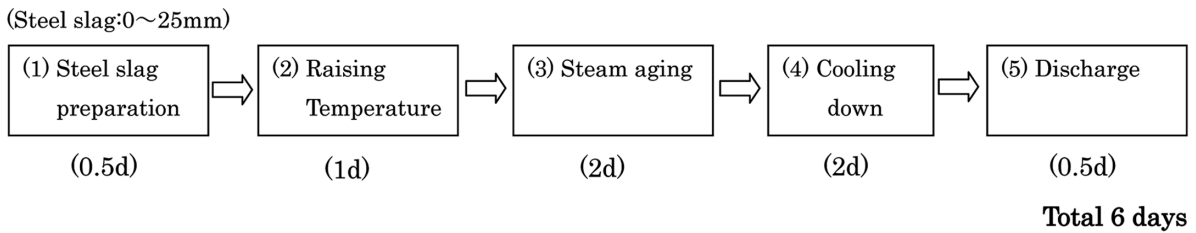


図4 製鋼スラグの蒸気エージング処理工程  
Steam aging process for steel slag

JIS A 5015 “道路用鉄鋼スラグ”<sup>3)</sup>の水浸膨張規格値 1.5% 以下を十分に満足し、膨張安定性に問題ないことを確認することができた。更に、モデル路盤試験や実路試験で、路盤における膨張安定性に加えて、その耐久性についても確認、立証し、その技術検討結果が認められ、蒸気エージング処理した製鋼スラグ路盤材が、1993年4月に初めて公共事業で採用されるに至った。以降、蒸気エージング処理した製鋼スラグが道路用路盤材として、さまざまな公共事業で利用されている。

蒸気エージング方法は、その後各社各事業所で採用され、現在では、製鋼スラグのエージングにおいて主流のエージング方法となり、欠かすことのできない技術となっている。

### 3. 加圧蒸気エージング方法の開発と実機化

次に1995年に和歌山製鉄所で実機化された加圧蒸気エージング方法の開発状況と実機化について紹介する<sup>4,5)</sup>。

#### 3.1 加圧蒸気エージングの開発

一般的に広く採用されている蒸気エージング方法は、大気圧下で行われるが、和歌山製鉄所では早くから加圧蒸気により製鋼スラグ中の遊離石灰の水和反応速度が飛躍的に向上することに着目し、加圧蒸気エージング方法の実用化の研究を進めてきた。図6に各蒸気圧力におけるエージング時間と製鋼スラグの膨張量の関係を示す。JIS A 5015 “道路用鉄鋼スラグ”では、路盤材膨張抑制のため水浸膨張比は1.5%以下と規定されている。図6に示すように、大気圧下の蒸気に対して、0.6MPaの蒸気圧力下では、大幅にエージング時間を短縮することが可能になる。このように、エー

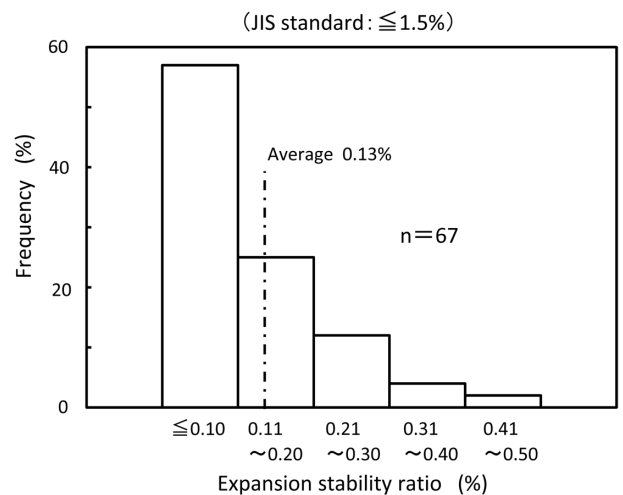


図5 エージング後の製鋼スラグの水浸膨張比  
Expansion stability ratio of steel slag after aging

ジングに加圧蒸気を使用することにより大幅に処理時間が短縮され、設備規模の縮小および自動化が可能となる。

しかしながら、加圧蒸気エージング方法を実用化するにあたっては種々の課題があり、そのため、オートクレープ技術の経験に豊富な川崎重工業(株)の協力を得て開発を実施した。以下に実用化の要点を簡潔に述べる。

#### 3.1.1 実用化上の主な課題

- エージングによりスラグが膨張するため、膨張圧に対する設備対策が必要
- スラグの膨張により容器内で拘束されているスラグが圧密し、容器からの排出時に強固なブリッジを形成し、排出が困難

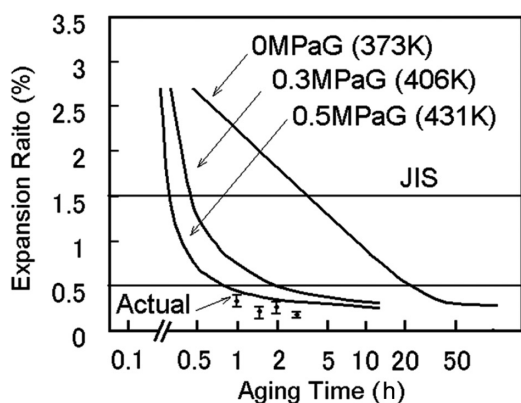


図6 エージング時間と水浸膨張比の関係  
Relation between aging time and expansion ratio

- ・製鋼スラグは硬く、容器の摩耗対策が必要
- ・蒸気漏れ防止のため、開閉箇所は極力少なく、かつシール部分がスラグ等で汚れない対策が必要

### 3.1.2 課題に対する主な対策

- ・オートクレーブに直接スラグが触れないようにするためバスケット方式を採用、バスケットごとにエージングする方式とした。またバスケットはスラグの膨張を吸収できる構造とした。
- ・オートクレーブは横型とし、バスケットの搬入、排出を同一扉で行うようにし、開閉部分は1か所とした。これらの対策により上記課題を解決することが可能となり、1995年4月に和歌山製鉄所内に本格設備を設置、同年5月に営業運転を開始した。

### 3.2 加圧蒸気エージング設備概要

図7に加圧蒸気エージング設備の概要を、写真2には加圧蒸気エージング設備の外観を示す。加圧蒸気エージング設備は、圧力缶（オートクレーブ）、バスケット、台車と操作室から成る。まず、ショベルカーにて台車に乗ったバスケットに製鋼スラグ製品が投入され、バスケットは移動台車によって圧力缶前まで移動する。圧力缶の蓋が開きバスケットを圧力缶の中に挿入する。圧力缶の蓋を閉めて、蒸気が投入され、圧力缶の内部が0.6MPaまで加圧され、2～数時間程保持されてエージングが完了する。

加圧蒸気エージング方法の導入により、大幅にエージング時間を短縮することができ、設備規模の縮小および自動化が可能となった。更に完全密閉構造であるため、蒸気損出が低減し、加圧により水蒸気がスラグ層内に均一に浸透することにより品質の安定化も図ることができた。

本技術はその実績が評価され、(財)クリーン・ジャパン・センターの2007年度資源循環技術・システム表彰“経済産業省産業技術環境局長賞”を受賞しており、これまでに和歌山製鉄所以外に国内他社2社が本技術を導入している。

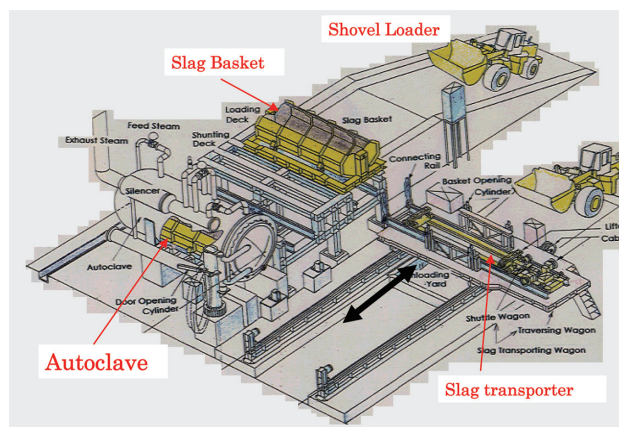


図7 加圧蒸気エージング設備の概要  
Outline of pressurized steam aging equipment

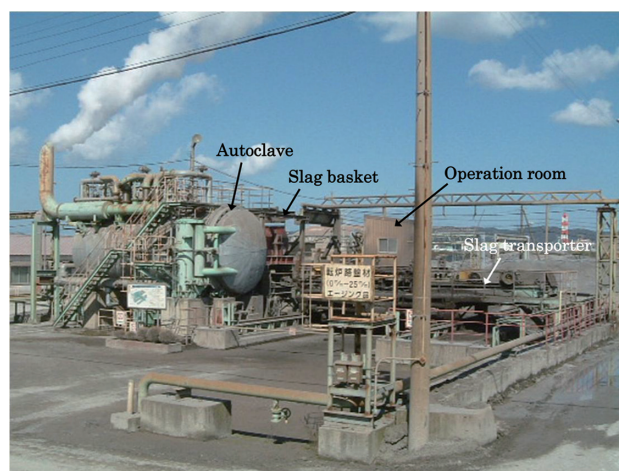


写真2 加圧蒸気エージング設備  
Pressurized steam aging equipment

## 4. おわりに

製鋼スラグを路盤材として利用する場合の大きな課題である膨張を抑制する技術として、1990年代に開発、実機化された蒸気エージング方法と加圧蒸気エージング方法について紹介した。

製鋼スラグの膨張特性は、その含有する遊離石灰量等により異なることから、本技術においてはエージング時間の設定等の操業条件もまた重要な技術要素と言える。

### 謝辞

本報告書作成において、日鉄住金リコテック(株)寿崎益夫部長と日鉄住金鉱化(株)坂修平部長に多大なご協力とご指導をいただいた。ここに謝意を述べる。

### 参照文献

- 1) 横山正章 ほか：蒸気エージング処理した転炉スラグ路盤材の開発. 住友金属. 45 (4), 32 (1993)
- 2) 下馬場定雄 ほか：蒸気エージング処理した製鋼スラグ路盤材の資源化. 建設道路. (557), 54 (1994)

- 3) JIS A 5015:2013 道路用鉄鋼スラグ
- 4) 小出浩：加圧式蒸気エージング法による道路用転炉スラグの製造とその利用. 舗装. 32 (4), 19 (1997)
- 5) 神田和俊 ほか：Pressurized Steam Aging Process for Steel Slag. SEIASI Environmental & Safety Seminar, 2010



佐々木剛 Tsuyoshi SASAKI  
スラグ・セメント事業推進部  
企画調整室 主幹  
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



浜崎拓司 Takuji HAMAZAKI  
和歌山製鉄所 環境・エネルギー部  
リサイクル技術室 主査