

エージングによる転炉スラグの安定化機構

論文

佐々木 稔*・新井田有文*²・大槻 孝*³
土屋 桂*⁴・長尾 由一*⁵

Stabilization Mechanism of Steel Slag by Aging Treatment

Minoru SASAKI, Aribumi NIIDA, Takashi OTSUKI,
Katsura TSUCHIYA, and Yoshikazu NAGAO

Synopsis :

The effect of aging treatment on lime-falling of steel slag was studied by examining the microstructure and measuring the expansion in CBR mold soaked in water. The stability of crushed stone was decreased with the addition of small amounts of industrial fresh slag. After the slag was remolten in order to assimilate the calcined lime stone completely, the expansion coefficient of the slag didn't exceed 0.2%, even in the case of 5.3% of free lime content. Then, the new method was applied for the evaluation of the free lime in aged slag. The analytical values corrected as water-reactive form were below about 2% in the six-month aged slags. Those slags scarcely included unassimilated lime and indicated high stability in the CBR test. It was found that the free lime of unassimilated form changed into stable compounds by the aging treatment. Most of the remaining lime was of the crystallized phase from molten slag and didn't bring the lime-falling to the aged slag.

1. 緒 言

装鋼工程で副生する転炉スラグは、わが国では年間1000万tを越え、有効な資源化は緊急の課題となっており、現在業界を挙げてその解決に取り組んでいる。

資源化を計る場合、転炉スラグの発生量の大きさから道路用材、中でも路盤材としての活用がもつとも期待される場所である。これは一方に、高炉徐冷スラグの製造が減つて、スラグ碎石バラスが供給不足の状況にあることも条件になつている。

転炉スラグはその堅硬さと徐々に発現する水硬性の点からいつて、高炉スラグに匹敵する性質を有する。しかし、冷却、破碎したままのスラグは膨脹、崩壊作用¹⁾があるため、直接にそのまま利用することはできない。この作用を抑制する方法としてエージング法、あるいは溶融状態での調質法²⁾ ³⁾などが試みられているが、路盤材を対象とした場合は、処理コストの安いエージング法が実用的と考えられる。

転炉スラグについては、ほぼ半年以上のエージング処理を施すと膨脹性はほとんどなくなり、天然碎石並みの

性質を得られることが経験的に知られている。安定化の原因はスラグ中の遊離石灰がエージング過程で減少するためと考えられているが、説得力のある安定化機構はいまだ提案されていないのが現状である。

本研究ではまず、スラグ中の遊離石灰を晶出石灰と未さい化石灰に分け、膨脹性に及ぼすそれぞれの影響を、モデル化した試料について定量的に検討した。ついで実際のエージング過程で2種の遊離石灰が減少して行く傾向と遊離石灰が安定な鉱物に変化する機構を明らかにした。以下これらについて述べる。

2. 実験試料および方法

2.1 実験試料

転炉スラグ中の遊離石灰と言われるものは、1つは溶融スラグの凝固過程で生成する晶出石灰⁴⁾であり、他は精錬過程で溶融しないままに残る未さい化石灰である。2種の遊離石灰がスラグの膨脹性に及ぼす作用は異なることが予想される。そこでまず未さい化石灰を含まず、晶出石灰含有量の異なるスラグを得るために、添加量を変えて石灰を実用スラグに加え、電気炉で再溶解し、十

昭和56年4月本会講演大会にて一部発表 昭和56年5月22日受付 (Received May 22, 1981)

- * 新日本製鉄(株)基礎研究所 工博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)
- *² 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)
- *³ 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)
- *⁴ 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)
- *⁵ 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Preparation of the remolten slag without unassimilated lime.

No.	Composition of starting material		Composition of remolten slag		Autoclave test***	
	Mother slag(%)*	Lime (%)	CaO/SiO ₂	f. CaO**	-5mm (%)	-1mm (%)
1	100	0	3.8	0.26	0.4	0.2
2	95.0	5.0	3.8	0.24	0.4	0.2
3	90.0	10.0	4.4	0.74	1.3	0.2
4	87.5	12.5	5.2	2.10	12.0	6.3
5	80.0	20.0	5.6	5.30	18.5	13.7
6	75.0	25.0	5.8	8.00	92.0	83.4

* Composition of the slag: 45.9% CaO, 12.2% SiO₂, 7.5% MgO, 4.1% MnO, 19.7% T.Fe and 1.2% P₂O₅

** determined by TBP method.

*** 10/15mm sized-slag was autoclaved at 210°C for 4h under the pressure of 20 atm.

Table 2. Chemical composition of slag sample for aging test.

Slag	Chemical component (%)								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	T.Fe	P ₂ O ₅	f. CaO	CaO/SiO ₂
A	42.5	11.8	1.19	7.0	5.7	21.08	2.04	3.50	3.60
B	46.0	11.9	1.17	7.2	4.9	18.85	2.12	8.90	3.87
C	50.1	15.1	2.08	3.4	6.1	17.20	2.69	3.70	3.32
D	49.9	17.1	1.91	2.0	5.8	16.46	3.35	2.78	2.91

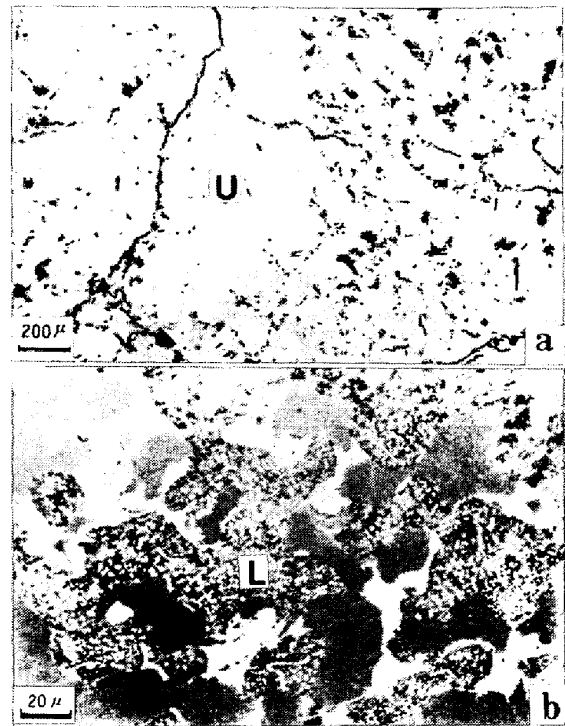
分な時間保持して未溶解の石灰が残らないようにした。こうして調製したスラグは MS-25 の粒度範囲に入るように破碎し、実験に供した。Table 1 には再溶解スラグの性状を示した。各試料スラグにつき 25/20 mm の粗粒を数個取って顕微鏡試料を作製し観察を行つたが、未さい化石灰は認められなかつた。これらのスラグについて Tribrom phenol 法 (以下 TBP 法と略称する) によつて定量した遊離 CaO の値は、晶出石灰態 CaO 量と見なしてほぼ間違いないと思われる。

一方、未さい化石灰量の異なる実験試料は、現在未さい化石灰を分別定量する化学的方法がないので、実用スラグから選り出すことができない。そこで同じ粒度に調整した天然砕石バラスと製造直後のエージングしない転炉スラグとをいろいろな割合に混合し、これを水浸膨張試験に供した。

エージングスラグとしては、畑流し法によるものから 4 種を選び、25 mm 以下に破碎して約 1000 t の山を作り、エージング処理を行つた。エージング途中のスラグは、一定期間ごとに定められた数個所の区域からおよそ 100 kg ずつ、合わせて数 100 kg を採取した。採取試料はよく混合して実験に供した。化学組成は Table 2 に示した。

2.2 エージングスラグ中の遊離石灰の評価方法

エージング過程で未さい化石灰が減少する傾向を定量的に把握するために、スラグに残存する未さい化粒子数



U) Unassimilated lime grains,
L) Crystallized lime phase

Photo. 1. Microstructures of steel slag.

を測定する方法を試みた。未さい化石灰は、Photo. 1-a) に低倍率の顕微鏡組織を示したごとく、lime は再結晶して空隙やき裂が多く生成している。1 mm を越す大きなものは、褐色を呈して肉眼的に容易に識別される。そこでスラグ粒を 2 つ割りにし、その破面に観察される斑点状の褐色粒子を数える方法をとつた。スラグ粒内に未さい化粒子があれば、そこが膨張の起点になり、やがてスラグ粒は割れ、内包する未さい化粒子がなくなるまでこれが続き、一方露出した未さい化粒子は風化して安定化するという考えにもとづくものである。採取したスラグの 25/20 mm の粗粒を約 100 個選んで測定した。

晶出石灰については、これまでの研究で L 相として分類されているものを QTM で組織定量した。L 相は結晶粒内に wustite の微粒が析出した lime 固溶体で、化学的に表す晶出石灰態 CaO とは一致しないが、含有量の変化傾向は同じはずである。

さて製造直後のスラグと違って、エージングスラグには水酸化カルシウムや炭酸カルシウムが生成しており、TBP 法、Ethylene glycol 法 (EG 法と略称) によつて遊離石灰を定量する際に分析操作にかなりの注意を払つても、遊離石灰の変化傾向を推定できるような定量値を得られないことが多い。本研究ではこれらの方法をエージングスラグに適用することはやめ、代わりに微粉碎したスラグに水を強制的に反応させて結合水の増加量を

測り、遊離石灰が水酸化物に変わったと仮定して“水和性” CaO を求める方法をとった。別に水酸化物態 CaO と炭酸塩態 CaO を定量し、遊離石灰からの風化生成物がどう変化するかを調べた。この新しい化学的評価法の原理ならびに分析操作方法は Appendix に説明した。

なおエージングスラグ表面に 2 次的に生成した層は、薄片の顕微鏡観察と走査型電子顕微鏡観察によつて微視的構造を調べた。

3. 実験結果および考察

3-1 遊離石灰量調整スラグの膨張性

Table 1 において再溶解スラグの遊離 CaO (すなわち晶出石灰態 CaO) 量とオートクレーブ試験粉化率との関係を見ると、遊離 CaO が 2% を越すと粉化率が急激に上昇することがわかる。これに似た傾向は調質スラグにおいても見られ⁵⁾、粒状スラグの構造的安定性は晶出石灰態 CaO 量が 2% 以下で維持されると考えられる。

これに対して水浸膨張試験の結果は、Fig. 1 に見られるように、遊離 CaO が 5.3% の試料 No. 5 でも膨張率は 0.2% 以下の低い値である。晶出石灰がスラグ粒内に平均して存在するときは、晶出石灰態 CaO がほぼ 5% 以下であれば、水和は徐々に進むのでモールド充てん体を膨張させる力は生じないことを表している。この原因を組織面から考察してみると、Photo. 1-b) に見られるように晶出石灰は 100 μ 以下の相で、組成的には Wustite が析出した lime 固溶体であり、また周囲は Magnesio-wustite や calcium ferrite などの安定相に囲まれ、晶出石灰相は互いに隔てられている。したがつてスラグ粒が水に浸されても、粒の表面に近い晶出石灰相の水和が進むだけで、内部の晶出石灰相では水和が起らないものと考えられる。しかし晶出石灰が、例えば試料 No. 6 のように多くなる(晶出石灰態 CaO で 8.0%)と、間隙の安定相が減つてスラグ粒内部でも水和が進行し、モールド充てん体を膨張させると思われる。

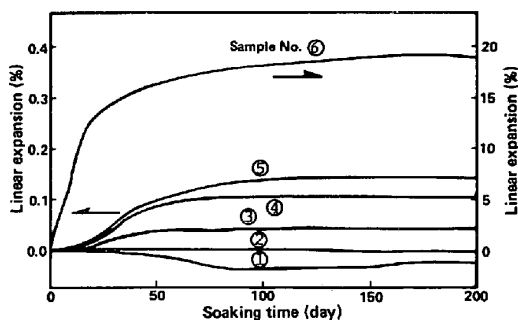


Fig. 1. Expansion curves of the remolten slag sample in the test of CBR mold soaked in water.

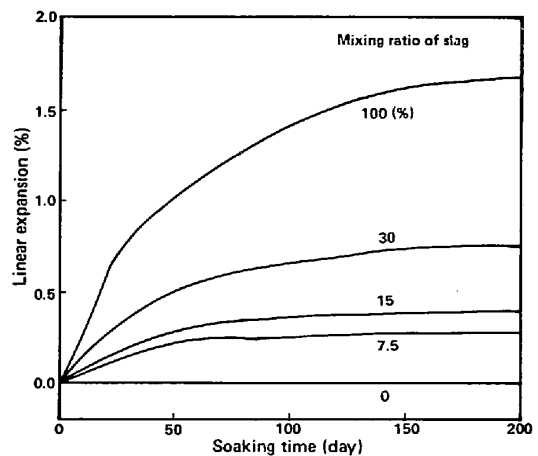


Fig. 2. Expansion curves of the mixture of crushed stone and fresh slag in the test of CBR mold soaked in water.

膨張率の低い再溶解スラグ No. 5 でも CaO/SiO₂ は 5.6 である。実際の転炉スラグでは平均組成としてこれほど塩基度の高いものはほとんど見られない。したがつて通常のスラグにおける高い膨張率の原因は他に求めなければならない。

Fig. 2 は天然碎石バラスに製造直後のスラグ(遊離 CaO : 5.10%) のスラグを配合して膨張試験を行つた結果である。新鮮なスラグの配合率が 30% であつても、90 日の膨張率は 0.6% を越している。また僅か 7.5% の配合でも 0.25% である。この結果から、転炉スラグの異常に高い水浸膨張率の原因は、未さい化石灰にあることが明らかになつた。

3-2 エージング過程における晶出石灰と未さい化石灰の変化

晶出石灰の QTM による定量は、Table 2 のスラグ B について行つた。測定は 25/20 mm の粗粒の研磨面において、1 個の試料につき 100 倍の倍率で 30 視野を測定し平均値をとつた。なお研磨面の晶出石灰相は顕微鏡下で黒色となるまで深く腐食し、析出 wustite の灰色が消えるようにしたので、析出 wustite をも含んだ晶出石灰相の面積が測定されたことになる。結果は Fig. 3 に示した。製造直後のスラグでは、スラグ粒によつて晶出石灰相面積率が 10~30% と大きな幅がある。測定個数が十分とはいえないが、エージングが進んだものでは面積率の分布幅は小さく、しかも低値になつている。個々のスラグ粒で晶出石灰が大幅に減ることはないから、Fig. 3 における面積率の減少傾向は晶出石灰含有量の高いスラグ粒が選択的に細化し、含有量の少ない安定な粗粒が残つたものと考えられる。細粒部分に移つたスラグの安定化については次節で述べる。

Fig. 4 はスラグ B について未さい化石灰の含有率を

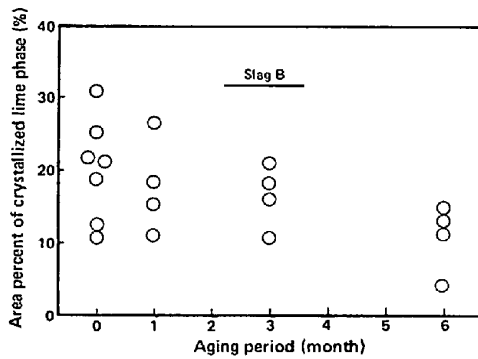


Fig. 3. Change in phase composition of crystallized lime (determined by QTM)

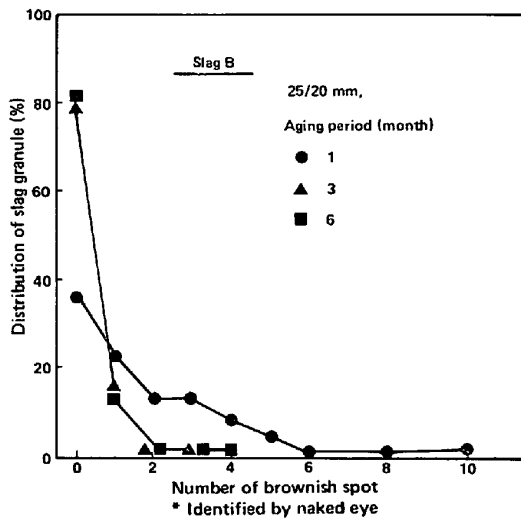


Fig. 4. Decrease of unassimilated lime showing brownish spot on the sectional plain of slag granule.

調べたものである。25/20 mm の粗粒を2つ割りにし、その破面で測定された褐色粒子の数に対するスラグ粒分布率を図示してある。これによればエージング1ヶ月では褐色粒子を2個以上含むスラグ粒はまだかなり多いが、3ヶ月を過ぎると急激に減り、大部分のスラグ粒で破面に現れる褐色粒子は1個以下になる。もちろんこの方法はスラグ粒に含まれる褐色粒子（未さい化石灰）のすべてを測定しているものではない。2つ割りにした場合に破面に現れる褐色粒子の頻度を、エージングゼロヶ月を基準に比較するものであり、定性的な詳細法にすぎない。したがって Fig. 4 から、未さい化石灰を多く含有するスラグ粒はエージング3ヶ月までに割れて小さくなり、それをまったく含まないか、あるいはごくわずかしかならないスラグ粒は、安定な粒子として細化せずに残るといふ定性的な結論が得られる。

Fig. 5 にはエージング3ヶ月、6ヶ月のスラグAならびにBの水浸膨張試験結果を示した。水浸日数200日で

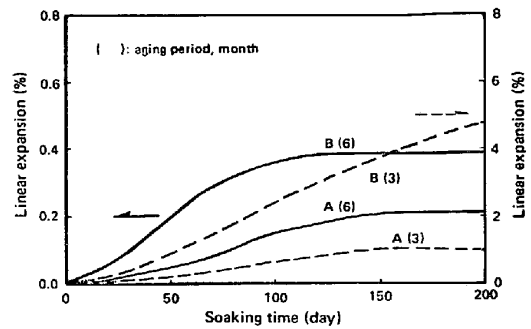


Fig. 5. Expansion curves of weathered slag samples in the test of CBR mold soaked in water.

比較すると、3ヶ月エージングではやはりまだ膨張率は高い。6ヶ月では0.5%以下になっているが、これはスラグC、Dでも同じであつた。天然碎石パラスは、90日の水浸で膨張率0.5%程度のもので実用に供せられている。したがってエージング6ヶ月の転炉スラグは、膨張性は天然碎石並みに抑制されているといふことができるであろう。

3.3 態別 CaO の変化と安定化機構

Fig. 6 には、Appendix に述べる方法によつて分析したエージング途中のスラグBの、粒度別水酸化物態CaO、炭酸塩態CaOならびに“水和性”CaOの値を示した。“水和性”CaOは、未さい化石灰態ならびに晶出石灰態CaOの含有量に近い測定値になっていると考えられる。図からわかるように、水酸化物態CaOはエージングが進むにつれて粗粒、中粒では漸増、細粒では急増している。炭酸塩態CaOは前者よりも含有量は少ないが、傾向は同じである。これに対して“水和性”CaOはエージング1~3ヶ月の間でいずれの粒度においても大幅に減少し、6ヶ月ではほぼ安定する。粗粒、中粒ではともに3%強の値に落ち着いている。これは未さい化石灰がなくなり、細化せずに残った粗粒、中粒では、晶出石灰の風化は粒の表面に近い部分で終わつてしまい、それ以上内部に進まないことを示している。-5 mmの細粒でも同じ傾向にあるが、3ヶ月以上では約1%と低いレベルに下がっており、粒径の影響が現れている。

水和性CaOの変化を4種のスラグについてまとめたものがFig. 7である。ここでは粒度ごとに分析した結果から全体の組成に換算してある。いずれも3ヶ月以降はほぼ1~2%の間に入っている。これは他のいく種かのスラグでも同じであつた。前節で述べたように、未さい化石灰はエージング3ヶ月以降ではきわめて少なくなるので、この1~2%の“水和性”CaOは、晶出石灰態CaO量に近いものと考えられる。一方再溶

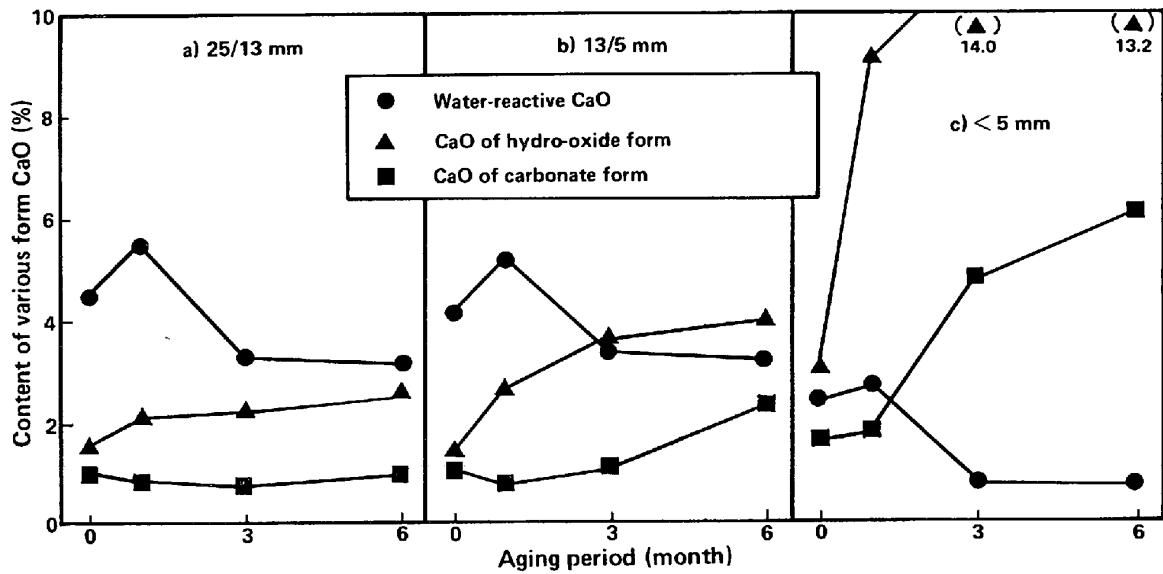


Fig. 6. Change in the contents of water-reactive, hydro-oxide and carbonate form CaO during aging treatment (Slag B)

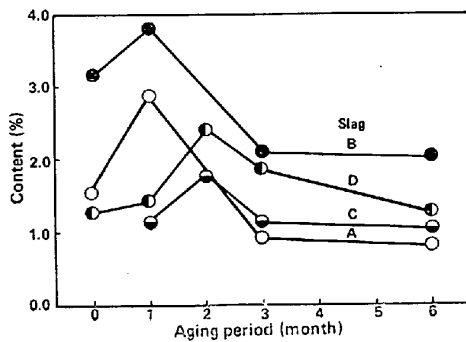
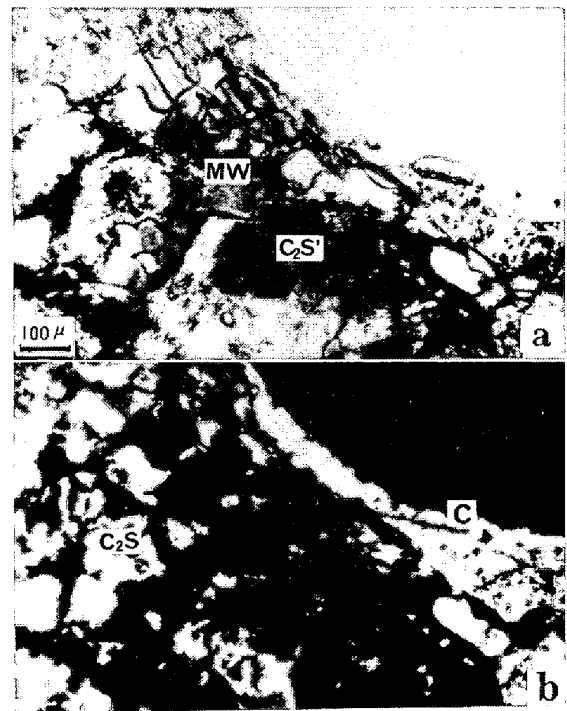


Fig. 7. Correct values of water-reactive CaO in the slag samples.

解スラグの実験で、晶出石灰態 CaO が 5% 以下であれば膨張率は天然碎石バラス並みになることが確かめられているから、“水和性” CaO が 1~2% まで下がった（未さい化石灰のほとんどない）エージングスラグは、膨張性は実用上完全に抑制されているといえよう。

THOMAS ら⁸⁾の報告では、-20 mm の粒度でエージングしたスラグは、20 数ヶ月を経過すれば遊離 CaO が最初の半分の、4% 前後に一定すると述べている。しかし残留する遊離 CaO の特徴は明らかにしていない。彼らの用いたスラグは塩基度 3.29 であり、遊離 CaO のすべてが晶出石灰態だとしても、Table 1 の結果からは 2% 前後の値にしかない。したがって、20 数ヶ月のエージングスラグに依然として未さい化石灰が残っているか、あるいは遊離 CaO の化学分析値に正の誤差が含まれているかのいずれかと思われる。

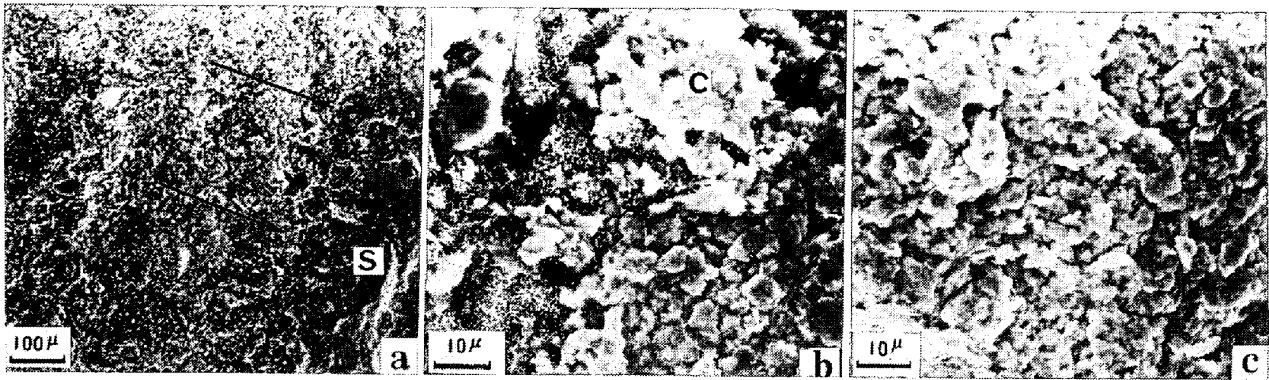
製造直後のスラグの未さい化石灰態と晶出石灰態の CaO は、前述のごとく従来の化学分析法で遊離 CaO



a) Open nicol, b) Crossed nicols, MW) Magnesiowustite, C₂S) Dicalcium silicate, C₂S') Decomposed tricalcium silicate, C) Calcite

Photo. 2. Microstructure of weathered slag with transmitted light.

として定量される。調べた4種のスラグA~Dはそれぞれ 3.50, 8.90, 3.70, 2.78% である。Fig. 7 に示す“水和性” CaO 量を比較すると、いずれもかなりの低値である。エージング1ヶ月（スラグC, D）でもやや低目の感じを与える。新鮮なスラグ中の未さい化石灰には FeO や MnO を固溶している部分がかかなり多くあつて、本法の化学操作では水和し難いことが低値の原因で



S) Surface layer, C) Calcite, ↑) Boundary

Photo. 3. Images of the cleavage end of weathered slag granule by a scanning electron microscope.

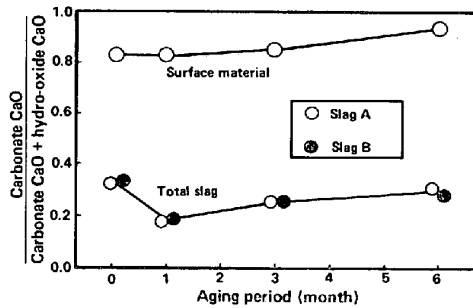


Fig. 8. Formation of calcium carbonate in the surface layer of slag granule.

はないかと思われる。

さて、晶出石灰の風化はスラグ粒の表面で起こり、粒子内部にまで進まないことを述べたが、エージングスラグの顕微鏡観察結果からもそれが裏付けられる。Photo 2は6ヶ月エージングスラグ表面近傍の透過光による顕微鏡組織である。表面から100 μ 位内部では晶出石灰相(L相)は変化していない。直交ニコル下で表面層内に明るく見える高複屈折率の結晶は炭酸カルシウムである。この表面層を走査型電子顕微鏡で観察したものがPhoto 3である。スラグ粒を2つに割り、スラグ粒子内部と表面層を比較している。板状結晶は炭酸カルシウムであり、表面層に多い。かなり緻密な表面層を形成していることがわかる。

スラグ粒表面層での炭酸化の程度を知るために、表面からかき取った粉末の水酸化物態と炭酸塩態のCaOを調べた。結果がFig. 8である。図の縦軸には、2つの態別CaOの中で炭酸塩態の占める割合をとった。スラグ全体では両者ともに0.3前後で推移している。両者の粒度分布はあまり変わらないので、外表面積はほぼ等しく、したがって炭酸化の進行度も同じになるのであろう。表面層での炭酸化の割合は、顕微鏡観察結果からも推察されるように、0.8~0.9と非常に高い。外表面で炭

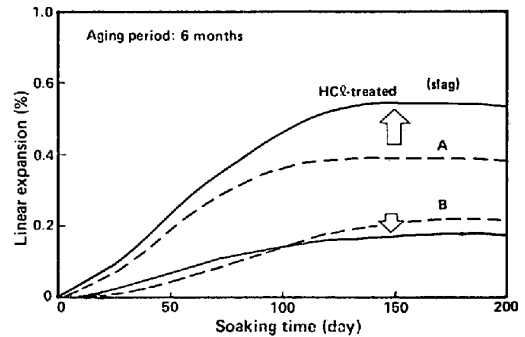


Fig. 9. Change in expansion of the aged slag after treated in HCl.

酸化が進むことが明らかである。

さて、晶出石灰相は周囲に magnesian-wustite や calcium ferrite などの安定相があるためにもともと風化しにくい。エージング過程でスラグ粒の表面に形成される炭酸カルシウムに富む層も、晶出石灰の風化を抑制するのに何らかの役割を果たしている可能性がある。そこで6ヶ月エージングスラグ(AおよびB)につき、1+50 HClに5min浸漬して表面の白っぽい生成層が溶出し無くなったのを確かめてから水洗を行い、水浸膨張試験に供した。膨張率の変化はFig. 9のごとくである。スラグAではごくわずかに膨張率が減少し、反対にスラグBではやや大きな増加が見られる。他のいく種かのスラグでも減少あるいは増加が現れたが、増加する場合の方が多かった。晶出石灰の風化抑制に表面層は副次的効果をもつように思われる。

しかし、いずれにしても未さい化石灰の減少が第1に必要なことであり、同時に晶出石灰の極端に多いスラグ粒が崩壊することも重要で、風化生成物である炭酸カルシウムはスラグの利用条件下で若干の補助的な役割を果たすにすぎないと考えられる。

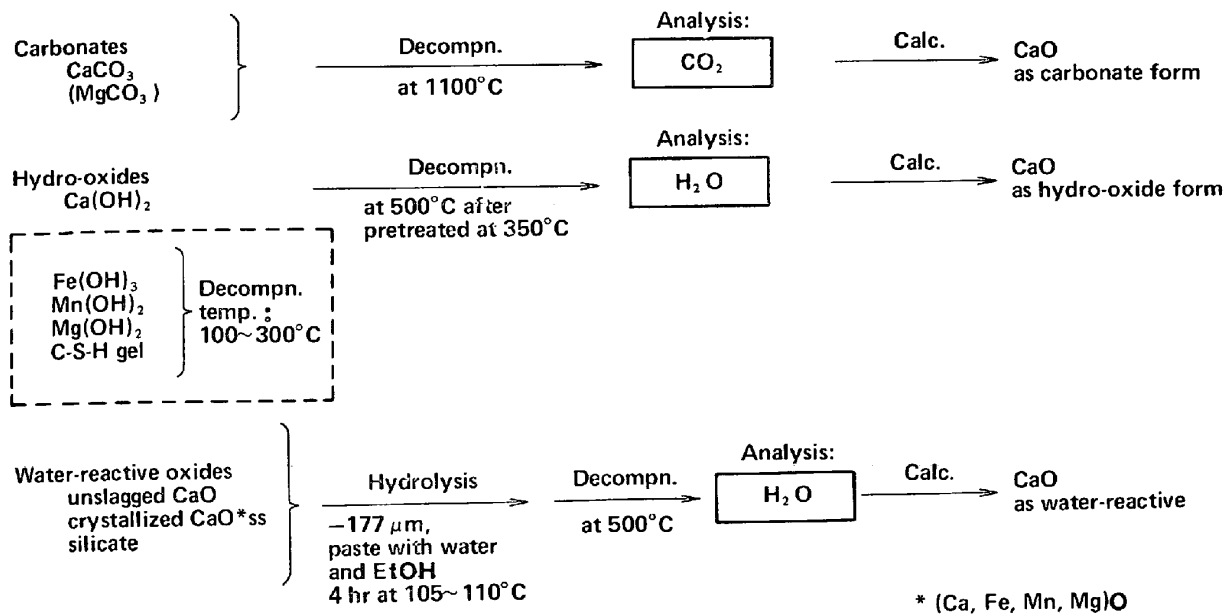


Fig. A. Method for the evaluation of various form CaO in aged slag.

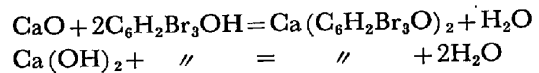
4. 結 言

晶出石灰と未さい化石灰の含有量を変えたスラグを実験的に調製して、それぞれが膨張性に及ぼす影響を検討した。ついで実際のスラグのエージング処理過程における晶出石灰と未さい化石灰の挙動を調べ、スラグの安定化機構を解明した。

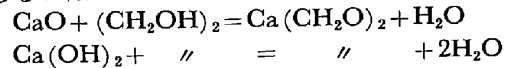
- (1) 晶出石灰態 CaO は 5% 以下であれば膨張性には影響しない。
- (2) 未さい化石灰は、それが少量であっても水浸膨張試験において大きな膨張率を与える。しかしエージング 3 ヶ月までの間に未さい化石灰を含むスラグ粒は細化し、細粒部分では石灰は水酸化物、炭酸塩に変わる。これによつてスラグの膨張原因は取り除かれる。
- (3) 未さい化石灰がほとんどゼロになつたと考えられるエージングスラグにつき、新たに考案した化学的方法によつて晶出石灰態 CaO 量を推定したところ、調査したスラグでは 1~2% であり、十分に安全な範囲内にあることがわかつた。
- (4) エージングスラグ表面に形成される炭酸塩に富む層は、膨張抑制に補助的効果を示す場合があつた。

Appendix エージングスラグ中の態別 CaO の化学的評価方法

製造直後の新鮮なスラグでは、いわゆる遊離の CaO は未さい化石灰態と晶出石灰態から成り、これは TBP 法や EG 法で精度良く定量することができる。しかしエージングスラグには水和物が生成し、化学操作の過程で試薬と反応するため正誤差を生じやすい[†]。すなわち



あるいは



さらに試薬のロットの違いや劣化による抽出能力の差が出てくるので、仮に水酸化物態 CaO を補正したとしても、再現性の良い分析法として確立するのは非常に難しいと思われる。またスラグの利用条件下での安定性の評価を抜きにして遊離 CaO の高精度の定量分析を試みても、必ずしも実際の効果が期待できるとはいえない。そこで本研究では、製造直後のスラグでは従来方法によつて未さい化石灰態 CaO と晶出石灰態 CaO の和を求め、エージングが進んで未さい化石灰がほとんどなくなつたスラグでは水和性の CaO を測定して晶出石灰態 CaO に非常に近い量と考えることにした。併せて遊離 CaO の風化生成物である水酸化物態と炭酸塩態の CaO を定量する方法を確立し、3つの態別 CaO の変化から総合的にエージングの進行度を評価した。以下に概要を述べる。

(1) 炭酸塩態 CaO の測定

炭酸塩としては CaO₃ のほかに少量の MgCO₃ が生成している可能性がある。この分別定量は困難なので、両者は合わせて分析する。Fig. A に示したように試料を窒素気流中 1100°C で処理し、発生した二酸化炭素を窒素と共にガスビュレットに集め、二酸化炭素をアルカリ溶液に吸収させて体積減を測る。

(2) 水酸化物態 CaO の測定

水酸化物は Ca(OH)₂ が主体であるが、ほかに Fe(OH)₃、Mn(OH)₂、Mg(OH)₂ や、いわゆる C-S-H ゲルも生成している。しかしこれらの副成分は 100~300°C に分解温度をもつているので、350°C において予備処理後、窒素気流中 500°C で Ca(OH)₂ 熱分解を行い、発生した水分を滴定セルに導入して吸収液に吸収させ、

[†] 鉄鋼連盟製鋼スラグ専門委員会資料 (昭和 56 年 11 月刊行)

カールフィッシャー水分計により測定する。

(3) 水和性 CaO の測定

未さい化石灰態 CaO, 晶出石灰態 CaO(FeO, MnO MgO を少量含んだ固溶体) の合計量の測定を目的とする。-177 μ に微粉碎した試料に水とエタノールの等量混合液を加えて糊状とし, よく練り混ぜ, 窒素気流中 105~110°C で恒量となるまで乾燥する。その後は水酸化物態 CaO の測定法に準ずる。

文 献

- 1) 水波英昭, 横幕豊一, 林田由美子, 高橋愛和: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 2316
- 2) 成田貴一, 尾上俊雄, 高田仁輔: 同上, 64

(1978), p. 1588

- 3) K. GRAGE and H. HAAS: Stahl u. Eisen, 94 (1974), p. 234
- 4) 和田 要, 福田正博, 内藤俊太, 山口紘一, 高橋宏美, 村上義男: 製鉄研究 (1980) 301, p. 59
- 5) 長尾由一: 鉄と鋼, 65 (1980), S 140
- 6) 田中 新, 大河平和男, 新井田有文, 磯辺隆一: 同上, 64 (1978), S 147
- 7) 佐々木稔, 福岡弘美, 榎戸恒夫, 兼松勤治, 長尾由一, 和田 要: 製鉄研究, (1980) 301, p. 3
- 8) G, H, THOMAS and L. M. STEPHENSON: The Aus. I. M. M., Illwarra Branch, Utilization of Steel Plant Slag Symposium, Feb. (1979)