

微粉炭焚きボイラにおけるスラッシング予測指標の構築

Study on a New Index to Predict the Slagging Characteristics of Coal in a Pulverized-Coal Fired Boiler

毛利 慎也 技術開発本部総合開発センター環境・化学システム開発部
茂田 潤一 技術開発本部総合開発センター環境・化学システム開発部 課長 博士（学術）
鈴木 孝平 株式会社アイテック 主任技術員
福島 仁 エネルギー・プラント事業本部電力事業部電力プロジェクト部 課長

近年、微粉炭焚きボイラでは劣質炭の利用拡大が図られており、従来の灰障害予測指標では完全に評価できず、新たな予測指標が必要である。そこで主要な灰障害のうち、炉壁への熔融灰付着に起因するスラッシングを対象として、実験室での焼結試験や灰付着試験の結果と、実機での付着灰調査結果を比較して、劣質炭をも評価できるスラッシング予測指標を構築した。膠着度という新しい概念で簡便に灰付着を評価できる手法を構築し、膠着度と相関の高い融点、塩基性成分などの因子を用いた実用的な指標となる。

Recently, poor quality coals have often been used for pulverized-coal fired boilers. Previous indexes could not adequately evaluate ash problems. Therefore, new indexes are required. IHI focused on the slagging problems caused by melting ash deposition on the furnace wall. Data of laboratory tests and evaluation of ash deposition in an actual plant were compared. Based on the study, IHI established new slagging indexes to evaluate various coal types including poor quality coal. IHI also showed that the sinter ratio is an effective parameter for evaluation. Thus evaluation of the ash deposition is easy. This sinter ratio has a strong relationship with ash fusion temperature, basic compounds, and other parameters.

1. 緒 言

近年の微粉炭焚きボイラでは、燃料コスト低減化、炭種の多様化によって瀝青炭以外の劣質炭（高 Ca 炭、高 Si 炭、高灰分炭、低揮発分炭など）の利用拡大が図られている。そのため、従来の灰組成や融点を用いた灰障害予測指標では問題ないとされていた炭種を運用したプラントで、以下のような灰障害が発生している^{(1),(2)}（第1図）。

火炉でのスラッシング（スラグの付着）

後部伝熱面でのファウリング（凝縮した Na_2SO_4 など付着）

後部伝熱面後流での低温ファウリング（高 Ca 炭燃焼灰による伝熱面への付着・たい積）

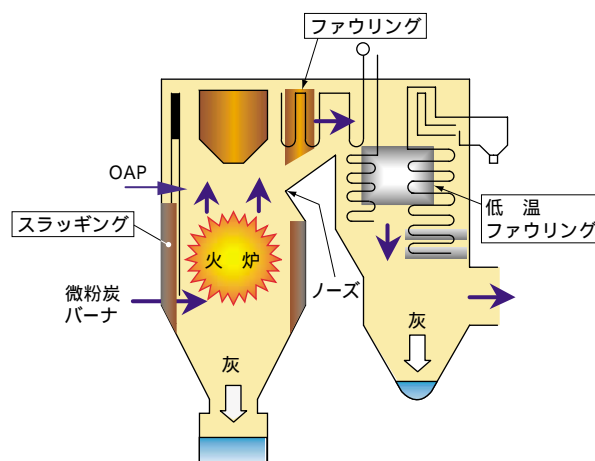
これら灰障害のために、伝熱効率低下などの弊害が生じている。これらの問題は今後のプラント運転、開発のためにも早急に解決しなければならないが、劣質炭に関する評価技術はいまだ明確なものがないのが現状である。

そこで筆者らは、主要な灰障害のうち、炉壁への熔融灰付着に起因する上記 スラッシングを対象として劣質炭をも評価可能とするスラッシング予測指標⁽³⁾の構築を目的として、従来の指標の見直しおよび新指標の作成を行った。

その結果、実用的な指標として成果が得られたので報告する。

2. 試 験

試験炭として、石炭灰性状（ Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 SO_3 ）、スラッシングファクター、塩基性成分および融点など、従来の指標で用いられている項目から総合的に評価して、100 種以上の石炭から 21 炭種を選定し、以下の試験を



第1図 微粉炭焚きボイラでの灰障害

Fig. 1 Ash deposits in the pulverized-coal fired boiler

実施した．上記項目は次のように一般的に定義される．

スラッシングファクター：

$$Rs = \text{塩基性成分} / \text{酸性成分} \times \text{石炭中 S 分}$$

塩基性成分（以下 base と表記）：

$$\text{base (wt\%)} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO}$$

酸性成分（以下 acid と表記）：

$$\text{acid (wt\%)} = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$$

従来は瀝青炭に対して各社多様なスラッシング指標を用いており、そのしきい値も各社異なる．例えば文献（2）では第1表のような項目を指標としている．

2.1 焼結試験⁽⁴⁾

2.1.1 試験方法と目的

灰の焼結性と石炭灰性状との相関を検討することで、付着に及ぼす影響因子や付着の程度を予測するため焼結試験を実施した．試験は JIS M 8812（1976 年）に基づいて 815 で灰化した燃焼灰を電気炉で加熱処理し、得られた焼結灰の硬さをラトラ試験器（第2図）で測定し、灰の焼結性を定量的に評価した．ラトラ試験とは粉体冶金の分野で金属圧粉体の耐摩耗性および先端安定性を測定する試験であり、石炭灰の焼結性評価に応用した．

2.1.2 試験条件

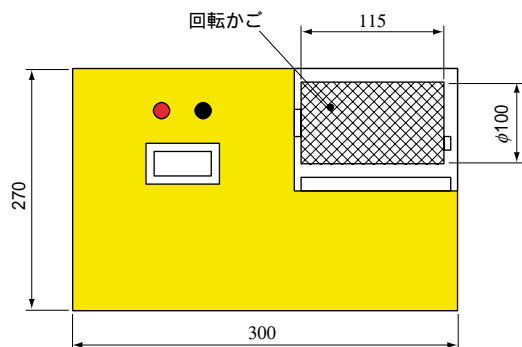
(a) 加熱条件

- ・温度：950 ～ 1 300 （50 ごと）
- ・時間：1.0 時間
- ・雰囲気：空気

第1表 従来のスラッシング指標例（文献値）

Table 1 Typical slagging index examples

指 標	スラッシングの程度			
	小	中	大	極大
base/acid	< 0.5	0.5 ～ 1.0	1.0 ～ 1.75	
スラッシングファクター	< 0.6	0.6 ～ 2.0	2.0 ～ 2.6	2.6 <
Fe ₂ O ₃ /CaO	< 0.31 または 3.0 <		0.31 ～ 3.0	



第2図 ラトラ試験器（単位：mm）

Fig. 2 Rattler tester (unit: mm)

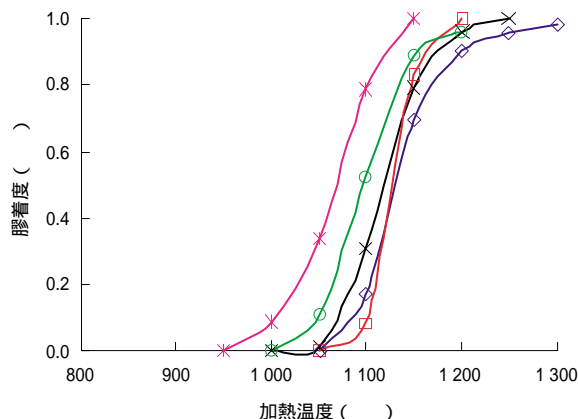
(b) ラトラ試験条件

- ・試料：加熱処理した灰を約 1 cm 大に切断し、角をとり、形を整え約 0.2 g にそろえる．
- ・装置：ミネルバ機器株式会社製ラトラ試験器
- ・測定方法：ラトラ試験器の回転かごに試料を入れ、一定条件で回転した後、回転かごに残った重量から灰の焼結性を評価する．
- ・評価方法：下記式で求められる数値を膠着度と定義して焼結性を定量化した．膠着度が 1.0 に近いほど固く焼結していることになる．また、炉内灰付着温度とされる 1 100 での膠着度と融点などの付着影響因子との相関を評価した．

$$\text{膠着度} = \text{ラトラ試験後の重量} / \text{ラトラ試験前の重量}$$

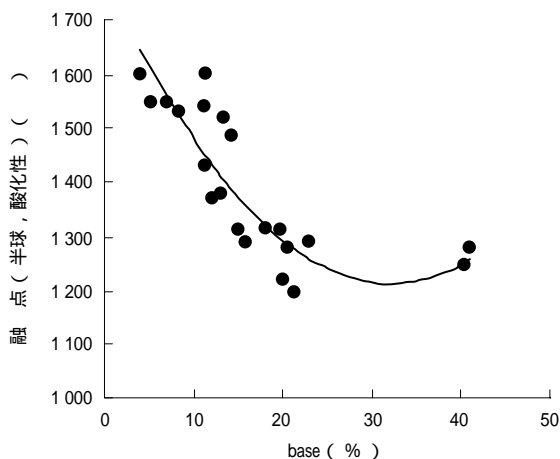
2.1.3 試験結果

第3図に加熱温度と膠着度の関係を示す（代表5炭種）．加熱温度が高くなるほど膠着度が高くなり、より固く焼結していくことが分かる．また、通常の灰融点は 1 200 以上あるが、それよりも低い温度で加熱しても固く焼結することが分かる．炭種によっては 1 100 では膠着度が低く問題ないと考えられるが、1 150 になると急激に膠着度が高くなり、温度が 50 違えば膠着度が大幅に変化するものもある．そのため実機では火炉内のガス温度が非常に重要な因子になる．また、第4図に base と融点の関係を示す．base と融点には base = 30% 付近で極値となる二次曲線の関係がある．base > 30% の試験炭種が少ないため、現段階では base < 30% 領域での評価とする．また、第5図、第6図に膠着度（1 100 における）と融点（酸化性雰囲気、半球温度）、base の関係を示す．融点、base は膠着度と非常に相関が高い因子であるといえる．なお、図は省略したが base/acid についても base と同じ傾向であ



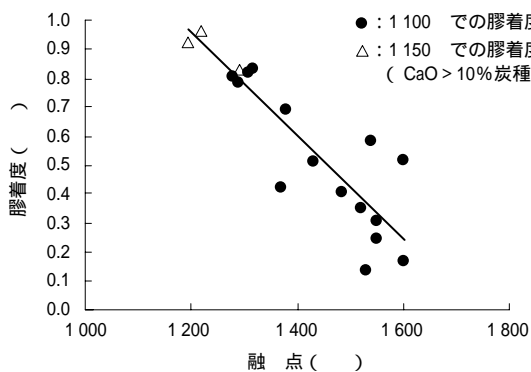
第3図 加熱温度と膠着度の関係

Fig. 3 Relationship between temperature and sinter ratio



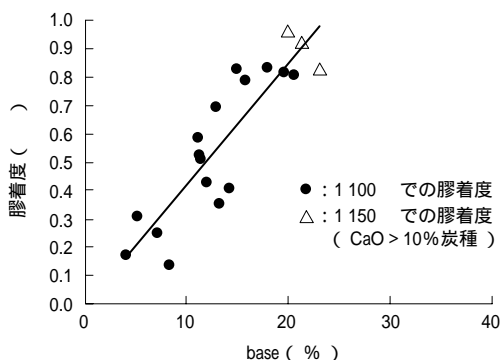
第 4 図 base と融点の関係

Fig. 4 Relationship between base and ash fusion temperature



第 5 図 焼結試験における融点と膠着度の関係

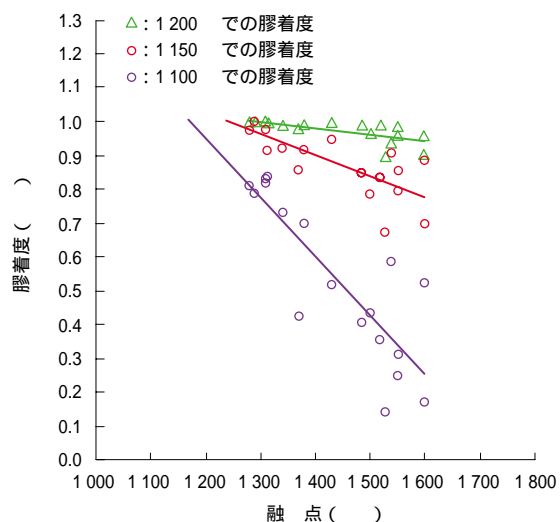
Fig. 5 Relationship between ash fusion temperature and sinter ratio in ash sintering tests



第 6 図 焼結試験における base と膠着度の関係

Fig. 6 Relationship between base and sinter ratio in ash sintering tests

った．しかし，従来の指標で用いられている Fe_2O_3 ， CaO は膠着度との相関が低かった．また，第 7 図に融点と加熱温度ごとの膠着度の関係を示す．この近似直線は温度が上昇するほど傾きが緩やかになり，1100 では低い膠着度であった炭種も，温度が上昇すると膠着度が急激に高くなる．実機でもガス温度が非常に重要な因子になる．



第 7 図 焼結試験における融点と加熱温度ごとの膠着度の関係

Fig. 7 Relationship between ash fusion temperature and sinter ratio at every temperature in ash sintering tests

また，灰中 CaO 濃度 > 10% の炭種は融点が低いにもかかわらず，1100 での膠着度が非常に低い（固まり難い）ため，通常の石炭と同じ近似直線では評価できなかった．そこでより高い温度（1150）での膠着度でプロットすると，通常の石炭と同じ近似直線に乗り，評価できることが分かった（第 5 図，第 6 図の中の）．

2.2 灰付着試験

2.2.1 試験方法と目的

実機燃焼条件を模擬した燃焼による灰挙動の評価から焼結試験の妥当性を確認するため灰付着試験を実施した．試験はボイラ火炉を模擬した反応管（ドロップチューブファーンス，第 8 図）での微粉炭燃焼で生成した灰を，円柱状付着部に衝突・付着させ，試験炭の灰付着性を評価した．

2.2.2 試験条件

(a) 微粉炭燃焼条件

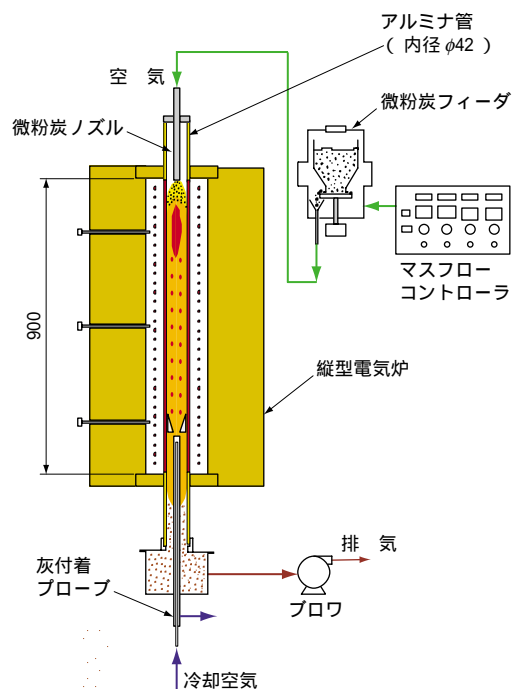
- ・燃 焼 温 度：1350
- ・微粉炭流量：約 1.0 g/min
- ・空 気 比：0.85（ - ）

(b) 灰付着部

- ・ガ ス 温 度：1350 （付着し難い炭種の灰サンプルを得るため，実際のガス温度よりも若干高い温度で試験を実施）
- ・メタル温度：450 （伝熱管表面温度を模擬）
- ・ガ ス 流 速：9.0 m/s

(c) 評価方法

ラトラ試験による膠着度（焼結試験と同条件で測定）を用いて付着灰を評価した．

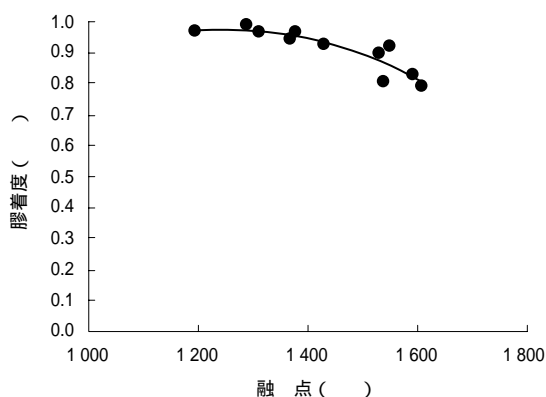


第 8 図 ドロップチューブファーンズ (単位: mm)
Fig. 8 Drop tube furnace (unit: mm)

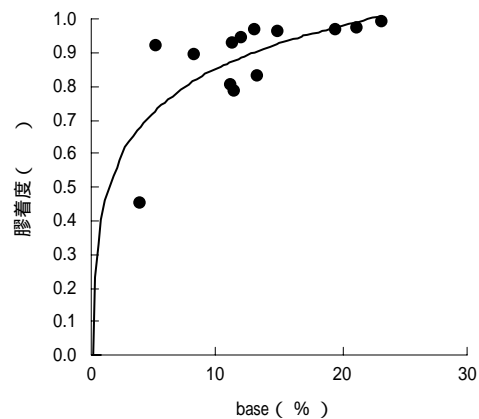
2.2.3 試験結果

第 9 図、第 10 図に膠着度と融点、base の関係を示す。焼結試験結果と同じく、融点は低くなるほど、base は多くなるほど膠着度は大きくなり、膠着度と融点や base との相関は非常に高かった。base/acid も膠着度との相関が高かったが、焼結試験同様、灰中 Fe_2O_3 、 CaO は相関が低かった。

上記 2.1 節、2.2 節の結果から、実際の燃焼を行った灰付着試験の結果が焼結試験と同じ傾向であるため、焼結試験による評価が有効であると考ええる。また、灰の融点、base、base/acid と焼結試験、灰付着試験の膠着度との相関は高く、スラッシングに影響を及ぼす因子と考える。



第 9 図 付着試験における融点と膠着度の関係
Fig. 9 Relationship between ash fusion temperature and sinter ratio in ash deposition tests



第 10 図 付着試験における base と膠着度の関係
Fig. 10 Relationship between base and sinter ratio in ash deposition tests

2.3 実機付着灰調査

2.3.1 試験方法と目的

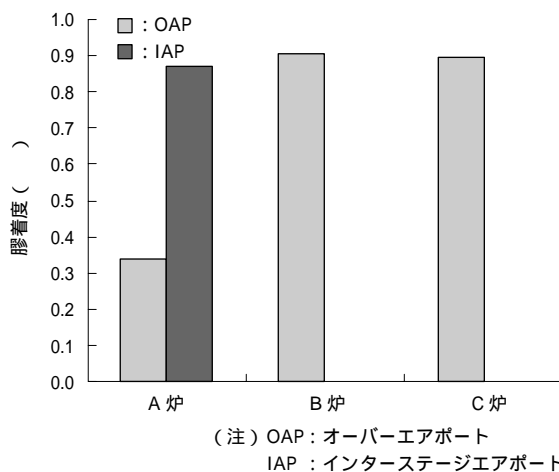
実験データの検証およびスラッシングに及ぼす焼結性の限界を実機データから求めるため、実機付着灰調査を実施した。調査は実機炉内から採取した付着灰の硬さや組成を分析し、付着状況との関係を得た。そこで、実験室での焼結試験で得られた灰の膠着度と比較して評価した。

2.3.2 調査概要

事業用ボイラ（例えば主蒸気 1 500 t/h、出力 500 MW）や産業用ボイラ（例えば主蒸気 490 t/h、出力 174 MW）などの実機火炉内（バーナ、オーバーエアポート（OAP）、ノーズなどの近傍）から付着灰を多数サンプリングし、化学組成、膠着度などを測定した。膠着度測定方法は 2.1.2 項の（b）ラトラ試験条件に基づく。

2.3.3 調査結果

第 11 図に膠着度測定結果例を示し、第 2 表に付着状況と膠着度の関係を示す。膠着度 0.4 以下の付着灰は手で簡



第 11 図 実機付着灰の膠着度
Fig. 11 Sinter ratio of ash deposition in actual plant

第 2 表 付着状況と膠着度の関係

Table 2 Relationship between deposition conditions and sinter ratio

付着状況	灰の状態	膠着度
付着なし	さらさら	< 0.2
付着 小	崩れやすい	0.2 ~ 0.4
付着 中	固いが手で崩せる	0.4 ~ 0.8
付着 大	堅固に焼結 / 溶融	0.8 <

単に崩せるほどもろく、付着したとしても問題ないと考えられるが、膠着度 0.8 以上の付着灰は非常に硬くて崩れ難く、溶融しているものもあった。これらは主に付着の多い箇所の灰であり、火炉内で成長してスラッシングを起こす可能性が高いと考えられる。また付着灰の硬さは同じ炉内でも場所によって大きく異なり、雰囲気温度の影響が強いと考えられる。したがって、第 7 図で示した結果と同じく、温度が重要な因子になる。組成では顕著な差はなく、付着との相関は認められなかった。付着灰の組成を第 3 表に示す。

以上の実機調査結果から、膠着度で付着の状況を表せることが分かったので、実験室の焼結試験で得た膠着度で実機の灰付着状況を予測できると考えた。

3. スラッシング予測指標の構築

これまでの結果から、焼結試験で得られた灰の膠着度から実機でのスラッシングが評価できると考えたが、さらに設計時や発電所現場での利便性を考え、焼結試験を行わなくても石炭性状だけでスラッシングを予測できる指標の作成を検討した。

焼結試験と付着試験の結果から、膠着度と融点、base、base/acid との相関が高く、これらがスラッシング予測指標として有効であると考えた。そこで融点、base、base/acid を用いてスラッシング予測指標の作成を検討した。実機付

第 3 表 付着灰の組成 (単位 : %)
Table 3 Analysis of ash deposition (unit : %)

項 目	A 炉		B 炉	C 炉
	OAP	IAP		
SiO ₂	56.8	55.9	51.8	72.3
Al ₂ O ₃	30.5	26.4	26.8	17.9
Fe ₂ O ₃	4.0	6.7	8.6	5.0
CaO	3.9	4.1	8.1	1.3
MgO	0.9	1.1	1.4	1.0
Na ₂ O	0.5	0.6	1.1	0.5
K ₂ O	0.5	1.9	0.6	1.3
TiO ₂	1.7	1.5	0.5	0.2
SO ₃	0.1	0.4	0.3	0.1
P ₂ O ₅	0.3	0.6	0.2	0.1

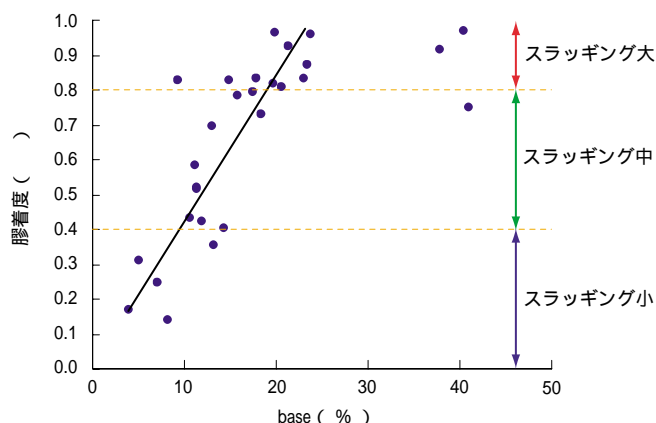
着灰調査から、膠着度 0.4 と 0.8 がスラッシングの限界と考えられ、焼結試験で得られた結果に当てはめると第 12 図のような評価図が書ける (融点、base/acid でも同様に書ける)。これらの図で近似直線と膠着度 0.4、0.8 との交点を求め、融点、base、base/acid のしきい値を求めた。その結果、第 4 表のようにスラッシング予測指標を作成した。ただし、base < 30% の炭種について適用できる指標である。base 単独での評価は新しい指標であり、base/acid などとは従来も用いられているが、しきい値を見直すことで粗悪炭にも適用できるものとする。

また、雰囲気温度の影響は非常に大きいので、スラッシングの程度が“ 中 ”の炭種はガス温度が上昇すると“ 大 ”になる可能性が高いといえる。この指標を用いることで、石炭性状が分かればスラッシングの発生程度を予測できるが、第 12 図で直線から外れる炭種があるように、指標どおりに評価できないものもあるため、焼結試験や灰付着試験で確認できればより精度が高くなる。

4. 結 言

さまざまな性状の石炭 21 種を用いて、焼結試験、灰付着試験を実施し、また実機の付着灰を調査することで次のような知見を得た。

(1) 灰の焼結性は膠着度という新しい概念で定量的に



第 12 図 base と膠着度によるスラッシング評価
Fig. 12 Slagging evaluation based on base and sinter ratio

第 4 表 スラッシング予測指標
Table 4 Slagging indexes

指 標	スラッシングの程度		
	小	中	大
灰の融点	1 280 <	< 1 280	
base	< 10.0	10.0 ~ 20.0	20.0 <
base/acid	< 0.1	0.1 ~ 0.3	0.3 <

(注) base < 30% の炭種について適用

評価でき、それを用いてスラッシング性を評価できる。

- (2) 膠着度と融点, base, base/acid との相関は非常に高く, スラッシングの予測指標となる。
- (3) 予測指標を用いれば石炭性状のみでスラッシング性が予測でき, さらに焼結試験や灰付着試験で確認できればより精度が高くなる。

参 考 文 献

- (1) 二宮善彦：石炭科学基礎論 (VIII) 日本エネルギー学会誌 第 75 巻第 6 号 1996 年 pp.433 -

440

- (2) IEA Coal Research : Understanding slagging and fouling during pf combustion (1994)
- (3) 積田佳満, 茂田潤一ほか：石炭だきボイラ灰付着特性の研究 - 新スラッシング・ファウリング指標開発に向けての基礎研究 石川島播磨技報 第 37 巻第 2 号 1997 年 3 月 pp.135 - 144
- (4) 毛利慎也, 茂田潤一：石炭灰の付着予測評価方法及び石炭灰の付着防止方法 特許 出願番号 P2003-163459, 2003