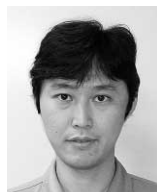


(技術資料)

石炭火力発電所におけるボイラ内灰付着およびクリンカの発生抑制技術

Evaluation of Ash Deposition and Clinker Generation in Boiler of Coal Fired Power Plant



菅原弘次*
Kouji SUGAHARA



近藤晶夫*
Akio KONDO



秋山勝哉**
Katsuya AKIYAMA



朴 海洋** (工博)
Dr. Haeyang PAK

Ash with low melting point causes the generation of a large mass of clinker and a number of operational problems in pulverized coal combustion boilers. Therefore, the development of a practicable technology for evaluating and predicting the generation of a large mass of clinker is needed. In this study, the analysis of clinker samples and the evaluation of operational results have been conducted. As a result, it has been clarified that the molten slag fraction in ash obtained by chemical equilibrium calculation and the content of iron in ash affect the generation of a large mass of clinker. Moreover, it has been confirmed that this evaluation method is one of the useful indices for proper coal blending to reduce the generation of a large mass of clinker.

まえばき＝神鋼神戸発電(株)神鋼神戸発電所（以下、当発電所という）は、70万kW×2基で計140万kWの石炭火力発電所であり、電力供給量は神戸市の最大需要量の約70%をカバーする規模である。1995年の電気事業法改正により、一般企業が電力卸供給事業に参入することが可能になったことを受け、関西電力(株)が実施した電力卸供給入札に応募、落札（70万kW×2基）した。2002年4月に1号機、2004年4月に2号機が営業運転を開始している。図1に発電所のレイアウトを示す。年間の石炭使用量は約300万tであり、石炭の燃焼に伴い発生する石炭灰の量は年間約30万tである。

ボイラ炉壁などへの石炭灰の付着性が高い場合、灰が

炉壁などで成長し、大きいものでは3m×2mほどの大きさのクリンカ（以下、クリンカ大塊という）になるものもある。クリンカ大塊がボイラ底部に落下すると、自動搬送および粉砕が困難となり、人手による粉砕作業が必要となるトラブルが発生する（図2）。既往の研究において、伝熱管への石炭灰の付着挙動が詳細にまとめられている^{1)~4)}ほか、灰中のアルカリ率が高く、灰の溶融点が低い場合に火炉壁などへの灰付着量が多くなる傾向があることが報告されている⁵⁾。しかしながら、これらの指標とクリンカ大塊の発生には明確な相関がなく、従来の評価手法ではクリンカ大塊の発生を予測することは困難である。今後、さらに低品位の石炭を使用した場合、クリンカ大塊の発生頻度が高まることが予想されるため、クリンカ大塊の発生を事前に予測し、使用する石炭の組合せを工夫することなどによりクリンカ大塊の発生を抑

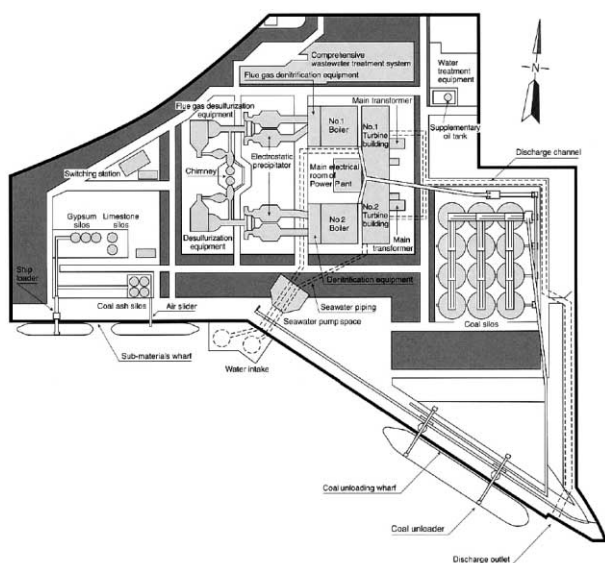


図1 発電所のレイアウト
Fig. 1 Layout of power station



図2 1次クラッシャ内のクリンカ大塊
Fig. 2 Large mass of clinker in clinker crusher

*鉄鋼事業部門 IPP 本部 発電部 **技術開発本部 機械研究所

制する技術が必要となる。

本稿では、機械研究所流熱技術研究室が開発した灰付着性評価技術⁶⁾を当発電所に適用した結果を報告する。

1. 灰処理設備の概要

図3に発電所の全体フローを示す。ボイラ内での燃焼によって生じた石炭灰の約90%は、燃焼ガス中を浮遊し、ボイラの後段に設置されている電気集塵器で集められる。これをフライアッシュと呼ぶ。また、石炭灰の粒子が溶解して相互に凝縮してボイラ内の炉壁などに付着したのち、ボイラ底部に落下・堆積したものをクリンカ灰と呼ぶ。クリンカ灰は、灰の全発生量の約10%を占める。当発電所では、ボイラ1基あたり平均で約2t/hのクリンカ灰を処理することになる。

図4に灰処理設備の概略系統を示す。当発電所は、神戸製鉄所西側1/3の狭隘(きょうあい)な敷地に立地している。そのため、ボイラ炉底に水槽を設置しない乾式クリンカ方式を国内で初めて採用した。乾式クリンカ方式では水を使用しないため、水処理設備などが不要である。また、湿式のように灰を埋立てる場所を必要としないため、用地面積の低減が可能となった。灰処理設備のうちのクリンカ処理設備は、ドライホッパ、ドライホッパボトムゲート、クリンカコンベヤ、1次クラッシャ、クリンカ冷却コンベヤ、2次クラッシャなどで構成される。ボイラ炉底に堆積したクリンカ灰は、クリンカコンベヤ

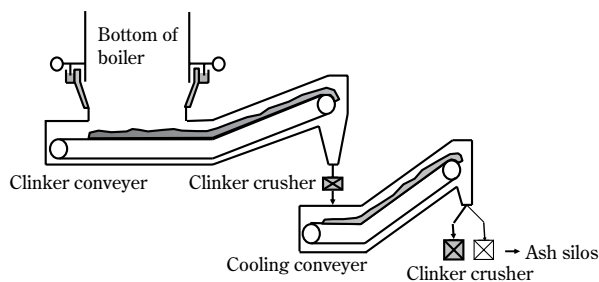


図4 灰処理系統図
Fig. 4 Ash handling system

によって炉外に搬出し、クラッシャで所定の大きさに粉碎される。1次クラッシャでは、下流側のクリンカ冷却コンベヤでの冷却効果を高めるため、1軸のシャフトに取付けた回転刃とケーシング側に固定された刃によってクリンカを75mm以下の大きさに破碎する。クラッシャで粉碎した石炭灰は、フライアッシュと合せて灰貯蔵サイロでいったん貯蔵し、セメント会社へ出荷してセメント原料として有効利用している。

2. クリンカ大塊の発生

ドライホッパの下部にはボトムゲートが設置されており、これを閉止することによって約8時間分のクリンカ灰をドライホッパ内に貯留することができる。クリンカ大塊発生などのトラブルによってホッパからのクリンカ灰搬出が滞った場合、クリンカ灰の発生量を低減するために石炭使用量を減らす措置を採る。すなわち発電出力を下げざるを得ない事態となる。

クリンカ大塊発生によってクリンカ灰の処理が滞るケースとしては二とおりある。一つは、クリンカ灰がクリンカコンベヤ上で引っ掛け1次クラッシャに搬送できないケースである。あと一つは、クリンカ灰が大き過ぎて1次クラッシャに設置された回転刃に噛込まれないケースである。前者の場合、クリンカコンベヤの側面に設置した扉を開け、人手によってクリンカ灰を破碎する必要があり、大きな労力を要する。後者の場合には、クリンカ灰を噛込ませるため、回転刃の正逆転を繰り返す。それでも噛込まない場合には、1次クラッシャを停止して内部に人が入り、削岩機を用いて破碎している。1次クラッシャ内はクリンカ灰の熱によって高温であるうえに足場も悪く、危険を伴う作業である。

過去の実績では、1, 2号機合計で年間250回程度のクリンカ大塊処理のうち、2割程度は削岩機での処理が必要となった。

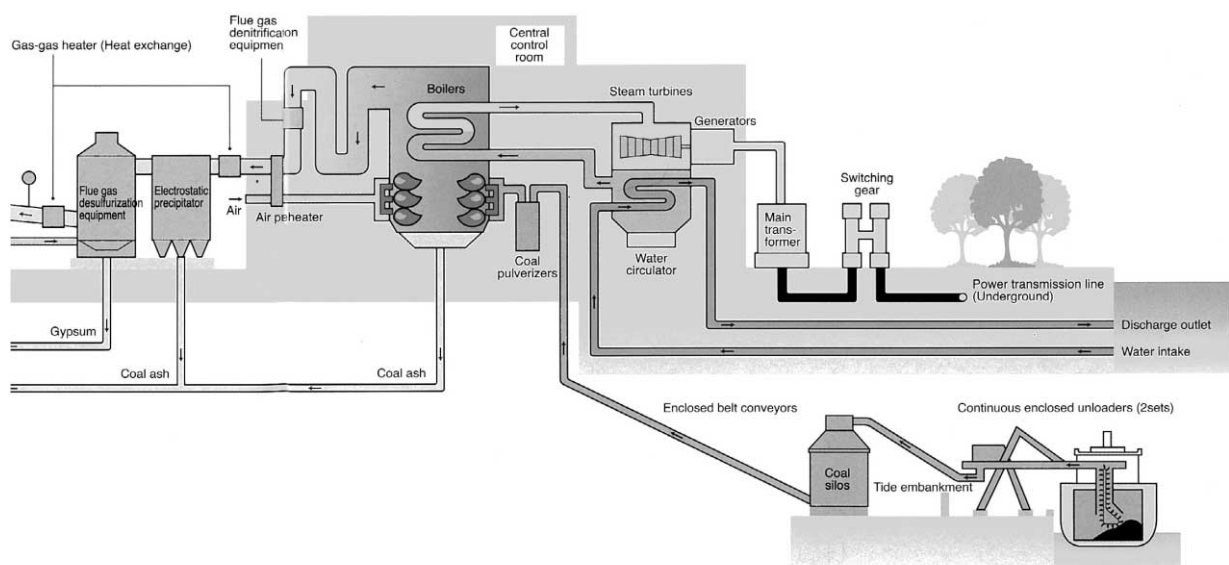


図3 発電所全体のフロー図
Fig. 3 Flow diagram of power station

3. クリンカの分析

図5に1次クラッシャ内から採取したクリンカサンプルを示す。これら3種類のクリンカサンプルは、炭種や燃烧条件が異なるものを採取しており、その形状や熔融状態も異なる。サンプルS1のクリンカは大塊となって炉底に落下し、1次クラッシャに噛込まなかったものである。ガラス質で緻密なスラグ塊である。S2は大塊には成長せずに落下したもので、一部は焼結しているものの空隙が多い。S3も大塊には成長せずに落下したものであるが、ガラス質で内部に空隙がある。これらのクリンカサンプルの組成分析、粘性および溶解性を測定し、クリンカ大塊の特性を考察した。

表1に3種の石炭灰およびクリンカの組成分析結果を示す。クリンカ大塊S1を生成した際に使用していた石炭灰は他の石炭灰に比べてSiO₂成分が少なく、アルカリ成分が比較的多く含まれているのが特徴である。図6に石炭灰とクリンカ組成におけるアルカリ率を示す。アルカリ率(B/A)の定義を式(1)に示す。

$$B/A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + NaO + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad \dots\dots(1)$$

3種のサンプルはいずれもクリンカ組成中のアルカリ率は石炭灰組成に比べて高くなっている。とくにS1のクリンカはその傾向が顕著に表れており、灰中のアルカリ成分がクリンカに濃縮していることが分かる。図7に石炭灰とクリンカ組成におけるFe₂O₃含有率を示す。本図から式(1)の分子に含まれる酸化物の中でも、とくにFe₂O₃成分が大塊に成長したS1のクリンカに濃縮していることが明らかとなった。これは、Fe成分を多く含む灰粒子は比較的融点が高いうえに粘性があるため、水管に付着しやすいことが原因であると考えられる。また、S1のクリンカは他のS2やS3のクリンカに比べて大塊に成長するまでにより長時間炉壁に付着したため、上記の傾向が顕著に表れたものと考えられる。

図8に各クリンカの粘性測定結果を示す。粘性測定は振動片式粘度測定装置を用いて大気中で実施した。3種のクリンカの粘性値は高温になるにしたがって低下する傾向が見られる。とくにS1のクリンカの粘性は他のクリンカに比べてより低い値になっていることが分かる。また、S1のクリンカは他のクリンカに比べて内部に気泡が少なく緻密なスラグになっていることから、粘性が低く流動性がよいスラグは気泡が発生しにくく緻密なクリンカになるものと推測される。

図9にクリンカの熔融割合(収縮率)の測定結果を示す。熔融割合の測定は熱機械分析装置(Thermo Mechanical Analysis, 以下TMA装置という)を用いてJIS M 8801の還元雰囲気下で実施した。TMA装置は、試料に荷重やを温度変化を与えた時に生ずる変位量を計測する測定器である。温度が高くなるにしたがって試料が熔融し、収縮率が増加する。測定結果を見ると、S1のクリンカ大塊は他のクリンカに比べて熔融割合が増加しており、スラグ中の融液の割合が多いことが分かった。したがって、比較的低温でも融液の割合が多く熔融しやすい

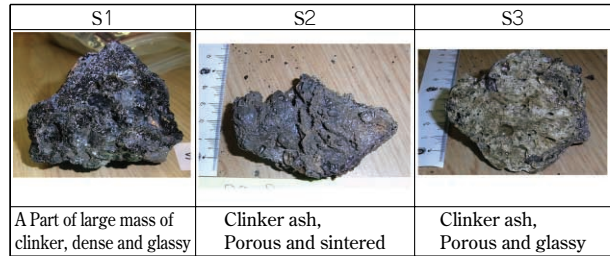


図5 クリンカサンプル
Fig. 5 Samples of clinker

表1 石炭灰およびクリンカの組成
Table 1 Composition of coal ash and clinker

	S1		S2		S3	
	Coal ash	Clinker	Coal ash	Clinker	Coal ash	Clinker
SiO ₂	56.54	61.94	64.82	69.32	62.40	65.88
Al ₂ O ₃	25.37	19.07	21.06	19.78	26.10	25.20
Fe ₂ O ₃	8.12	13.89	6.48	6.91	5.70	7.31
CaO	2.68	3.21	1.54	2.10	0.60	0.89
MgO	0.95	1.14	1.24	1.66	0.70	0.94
TiO ₂	1.16	0.89	1.00	0.91	1.40	1.30
P ₂ O ₅	0.63	0.40	0.30	0.20	0.20	0.13
Na ₂ O	0.35	0.27	0.46	0.50	0.25	0.28
K ₂ O	1.83	1.11	1.46	1.28	1.97	1.64
SO ₃	1.62	0.01	0.91	0.03	0.20	0.03

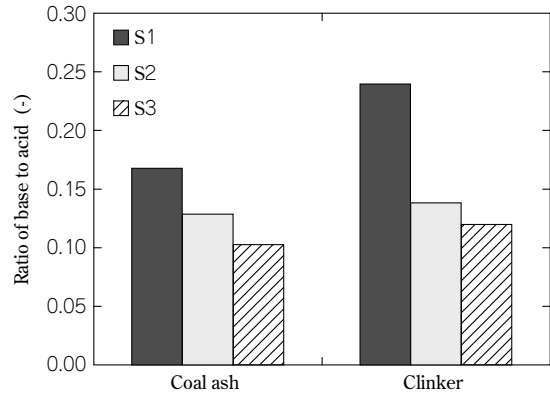


図6 石炭灰とクリンカ組成におけるアルカリ率
Fig. 6 Ratio of base to acid of coal ash and clinker

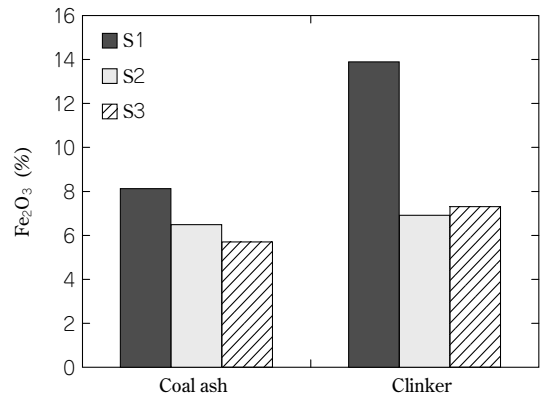


図7 石炭灰とクリンカ組成におけるFe₂O₃含有率
Fig. 7 Content rate of Fe₂O₃ of coal ash and clinker

いクリンカほど大塊に成長しやすいと考えられる。

つぎに、熱力学平衡計算ソフト(FactSage)を用いてクリンカの熔融挙動を解析した。本ソフトは、ある条件の温度、雰囲気ガス組成において熱力学的に最も安定する、つまりギブスの自由エネルギー(ΔG)がゼロになる状態の相(気・固・液)、およびその組成を求めることができる。ここで、熱力学的平衡時の固・液相中における

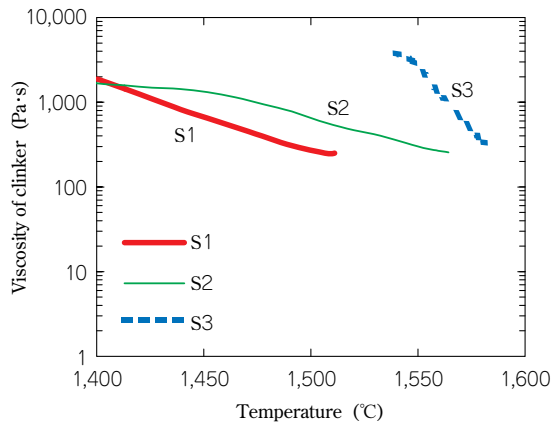


図8 クリンカの粘性測定結果

Fig. 8 Results of viscosity measurement of clinker

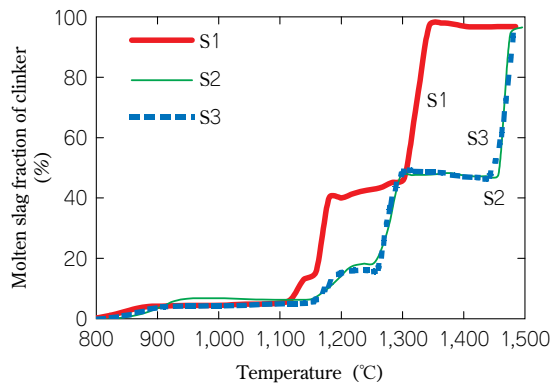


図9 クリンカの溶融割合(収縮率)の測定結果

Fig. 9 Results of thermomechanical analysis of clinker

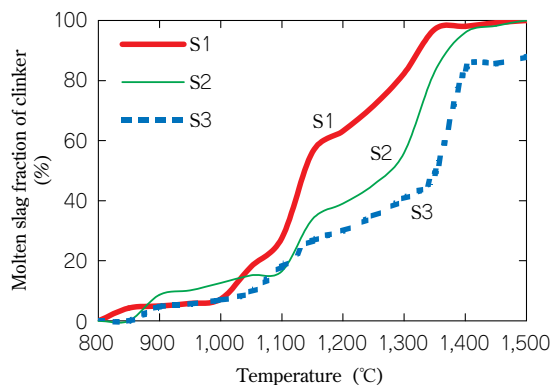


図10 クリンカの融液割合の計算結果

Fig.10 Calculated results of molten slag fraction of clinker ash

液相の重量割合を融液割合と定義する。図10に前述のクリンカ灰の組成を用いてJISの還元雰囲気下で計算した融液割合の結果を示す。本図を見て分かるように、ガラス質で緻密なクリンカ大塊であるS1の融液割合は、他のサンプルと比べて1,100~1,500°Cの範囲で多くなっており、クリンカの溶融割合(収縮率)の測定結果(図9)と同様の傾向を示すことが分かった。したがって、クリンカの溶融状態は、その組成から計算した融液割合を求めることによって推測が可能であると言える。

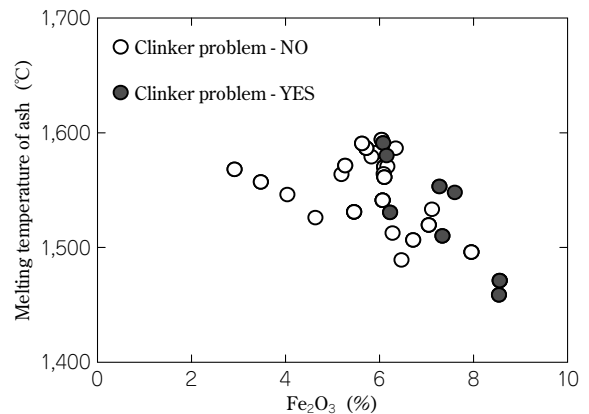
4. 操業におけるクリンカ大塊発生解析

3章での分析や考察を踏まえ、当発電所の1年間の操業において、R炭(豪州・瀝青炭)がベースとなっている操業条件を抽出し、クリンカ大塊の発生状況を解析し

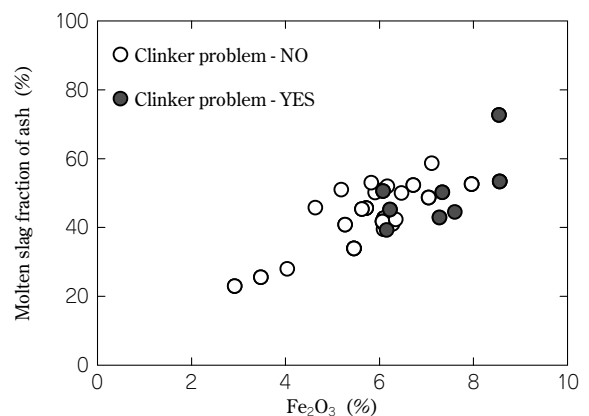
た。R炭をベースにした1年間の操業(件数)において、クリンカが1次クラッシャに嘔込まずに人手による除去作業が必要となった「クリンカ大塊あり」件数の割合は約3割であった。そこで、灰中の融液割合が多くなるほどクリンカ大塊が発生しやすいと考え、前述の熱力学平衡計算で求めた灰中融液割合を指標に用いてクリンカ大塊の発生状況を解析した。本計算には、操業時に使用した石炭の灰組成を用いた。また、温度・雰囲気条件は1,300°C、 O_2 :0%、 CO :8.9%、 CO_2 :13.3%、 H_2 :1.6%、 N_2 :76.3%をそれぞれ用いた。本条件はクリンカ大塊の発生が顕著になるバーナと2段燃焼空気(OFA)ポート間の温度・雰囲気を想定している。

図11にクリンカ発生状況と(a)灰の溶融点および(b)灰中融液割合の関係を示す。灰の溶融点は各石炭銘柄の酸化雰囲気における溶融点の加重平均から求め、灰中融液割合は前述の熱力学平衡計算で求めた。灰中の Fe_2O_3 含有率と灰の溶融点、および灰中融液割合の関係をクリンカ大塊発生の有無別にプロットした。なお、灰中の Fe_2O_3 含有率の代わりに灰中アルカリ率を用いても同様の結果になると思われるが、ここでは灰中の含有率が高くクリンカ大塊へ濃縮しやすい成分である Fe_2O_3 を用いて評価した。

灰の溶融点のグラフを見ると、 Fe_2O_3 含有率が6%以上になると灰の溶融点は若干低くなり、クリンカ大塊が発生する傾向が確認できる。しかし、クリンカ大塊は灰の



(a) 灰の溶融点
(a) Melting temperature of ash



(b) 灰中融液割合
Molten slag fraction of ash

図11 クリンカ大塊発生解析の結果

Fig.11 Analytical results of generation of clinker

溶融点が1,450~1,600℃と広い範囲で発生している。そのため、灰の溶融点ではクリンカ大塊の発生を予測することは難しいことが分かる。

一方、灰中融液割合のグラフを見ると、 Fe_2O_3 含有率が高くなるほど灰中融液割合が増加し、とくに灰中融液割合が40%以上かつ Fe_2O_3 含有率が6%以上の条件でクリンカ大塊の発生頻度が高くなることが分かる。これは、前述のとおりFe成分のクリンカへの濃縮がガラス質で緻密なクリンカ大塊の生成に大きく寄与するものと考えられる。

以上のことから、クリンカ大塊の発生には灰中融液割合と灰中の Fe_2O_3 含有率が大きく影響し、石炭灰の組成から熱力学平衡計算によって灰中融液割合を求める手法がクリンカ大塊の発生を評価するのに有効であることが分かった。したがって、使用する石炭の混炭条件を適正化することにより、クリンカ大塊の発生が抑制できるものと考えられる。

むすび＝クリンカサンプルの分析、ならびに熱力学平衡計算で求めた灰中融液割合を指標に用いた灰付着性評価技術を実缶ボイラの操業に適用した結果、以下のことが分かった。

- 1) クリンカ大塊は、他のクリンカ灰に比べて低粘性で流動性がよく、比較的低温で溶融しやすいという特徴がある。
- 2) 灰中融液割合が高く、 Fe_2O_3 含有率が高い条件でクリンカ大塊の発生頻度が高くなることが分かり、クリンカ大塊の発生を予測する上で本評価手法が実缶ボイラにも適用可能であることを確認した。

今後は本手法を用いて石炭の混炭条件を適正化し、クリンカ大塊発生の低減効果を確認していく。

参 考 文 献

- 1) Rassk, E. : Mineral impurities in coal combustion (Hemisphere Publishing Corporation), (1985), p.169, 189.
- 2) 神谷秀博: 化学工学シンポジウムシリーズ, 48, (1995), p.249-258.
- 3) 二宮善彦: 日エネ誌, 75 (6), (1996).
- 4) 二宮善彦: 日エネ誌, 77 (3), (1998).
- 5) Skorupska, N, M. : Coal specifications-impact on power station performance. IEACR/52, London, UK, IEA Coal Research, (1993), p.120.
- 6) Akiyama, K. et al. : Proceedings of The 6th Mediterranean Combustion Symposium, Ajaccio, Corsica, France, (2009), June.7-11.