

灰汚れ評価「灰の膠着度」の亜瀝青炭への適用について

知恵賢二郎^{*1} 茂田 潤一^{*2}
Chie Kenjiro Shigeta Jun-ichi

近年の微粉炭焚きボイラでは、燃料の多様化、コスト低減化のため低品位石炭（亜瀝青炭）の利用拡大が海外にて図られており、我が国でも亜瀝青炭の混焼率を高めて使用する動きがある。しかし、従来の灰汚れ指標（スラッキングインデックス・ファウリングインデックス等）で問題ないとされる亜瀝青炭を使用した実機にて、火炉や後部伝熱面に燃焼灰が付着堆積して伝熱阻害やガス流路閉塞などのトラブルが発生している。我々は、この灰障害を評価する方法として、瀝青炭・亜瀝青炭のいずれにも適用可能な「灰の膠着度」を新たに開発した。「灰の膠着度」は、従来の灰障害指標では評価困難な石炭でも精度高く評価することが可能となる。

キーワード：亜瀝青炭、石炭火力発電、灰障害、スラッキング、ファウリング、膠着度

1. はじめに

亜瀝青炭は灰障害の影響が顕著に現れるが、その特性を事前に把握することは困難である。これは、灰障害の従来の指標（スラッキングインデックス・ファウリングインデックス等）が主に瀝青炭について検証・確立されており、インドネシア等の亜瀝青炭では、その指標がそのまま適用できないことにある。事実、東南アジア地域の石炭焚きボイラでは、特定の亜瀝青炭の燃焼時にボイラ過熱器管や再熱器管への灰付着・損傷や閉塞に起因したボイラ停止が頻繁に発生している。本稿では、灰障害の予測手法「灰の膠着度」の概要とインドネシア瀝青炭／亜瀝青炭への適用事例について、その結果の一例を紹介する。

2. 亜瀝青炭

2.1 亜瀝青炭とは

石炭は発熱量、燃料比、揮発分等の違いで数種に分類され、例えば炭素の濃縮度を表す石炭化度の高い順に、無煙炭（anthracite）、半無煙炭（semi-anthracite）、瀝青炭（bituminous coal）、亜瀝青炭（sub-bituminous coal）、褐炭（brown coal）、亜炭（lignite）、泥炭（peat）に分類される。日本の石炭火力発電には主に「瀝青炭」が用いられているが、近年は価格が高騰しており事業者のコスト圧迫要因の一つとなっている。亜瀝青炭は全石炭埋蔵量の30%を占め、瀝青炭に比べて安価であるため資源量、価格、および調達範囲拡大の視点で亜瀝青炭を用いる石炭焚き火力発電プラントが増えている。亜瀝青炭は東南アジア地域で多く産出されるため、近隣国の火力発電所燃料に用いることが多くなってきて

*1：計測事業部 計測エンジニアリング部 課長 博士(理学) 環境計量士(濃度関係、騒音・振動関係) 一般計量士
*2：フェロー 博士(学術) 環境計量士(濃度関係)

いる。しかし、亜瀝青炭は瀝青炭に比べて固有水分が多く、石炭灰に Base (塩基性成分：Fe₂O₃、CaO、MgO、Na₂O、K₂O) が多い性質を持つため、瀝青炭とは異なった運用が必要となる。特に石炭燃焼に伴って発生する燃焼灰に起因するトラブルが発生しやすいことが知られている。

2.2 亜瀝青炭の灰障害予測

亜瀝青炭は瀝青炭と比較し、スラッキング (火炉部分での灰付着) よりファウリング (火炉上部～後段の伝熱管への灰付着・閉塞) が発生しやすい。ファウリング評価にはファウリングインデックス (※1) が広く用いられているが、炭種によるファウリングインデックスの変動が大きく、また同じ産地ごと (銘柄) でも大きく変動するため、ファウリングインデックス、石炭性状、灰性状は石炭船ごとに確認することが望ましい。図1にインドネシア産・亜瀝青炭の石炭船ごとのファウリングインデックスの変動の一例を示す。

$$\text{※1: ファウリングインデックス (-)} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) \times \text{Na}_2\text{O}$$

ファウリング評価の例を表1に示す。これは、灰性状のデータからファウリングインデックス等を算出し、ボイラ燃料として用いた際のファウリング性を評価している。

表1 ファウリング評価の一例⁽¹⁾

Factor / 評価	Low	Medium	High
Fouling Index (-)	<0.2	0.2-0.5	>1.0
Na ₂ O (%)	<2	2-6	>4
Na ₂ O + K ₂ O (%)	<3	3-5	>5

従来のファウリング評価は瀝青炭を対象として構築されており、この評価を亜瀝青炭に適用した場合、表2に示すようにファウリング評価と実機運用結果が異なることがある。

表2 ファウリング評価と実機運用結果

Factor / 石炭の種類	瀝青炭	インドネシア	
		亜瀝青炭 1	亜瀝青炭 2
Fouling Index(-)	0.2	8.1	0.9
Na ₂ O	0.5	4.9	1.6
Na ₂ O + K ₂ O	1.2	6.3	2.6
予測	○	×	○
実機運用結果	○	○	×

ファウリング評価と運用結果が異なる原因の一つとして灰の化学組成・灰の溶融性の評価領域が瀝青炭と亜瀝青炭で異なっている点が挙げられる。瀝青炭の場合、灰の Base と Acid (酸性成分：SiO₂ + Al₂O₃ + TiO₂) の比 Base (Fe₂O₃ + CaO + MgO + Na₂O + K₂O) / Acid (SiO₂ + Al₂O₃ + TiO₂) が大きくなると溶融温度が低下するため、ファウリング性が高くなると考えられている⁽²⁾。

亜瀝青炭の場合には Base/Acid 比の領域が瀝青

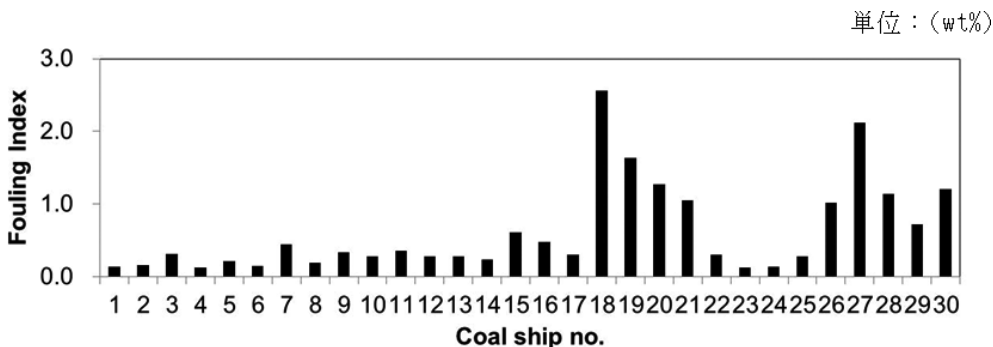


図1 インドネシア産・亜瀝青炭の石炭船ごとのファウリングインデックス変動の一例

炭と異なり、Base/Acid比の上昇が溶融温度の低下に必ずしもつながらない点の一つの特徴である(図2)。

したがって、亜瀝青炭は灰の化学組成・溶融温度の観点でも瀝青炭と異なることから、亜瀝青炭を対象とした新規予測法が必要となる。

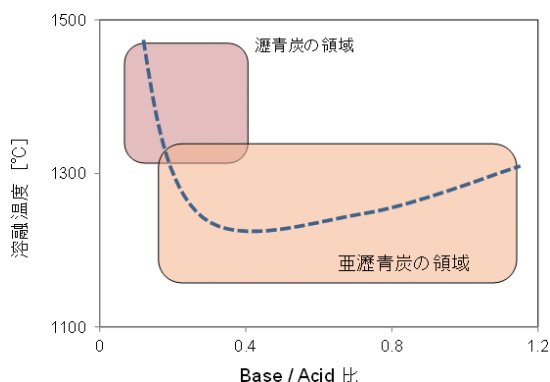


図2 瀝青炭および亜瀝青炭の溶融温度と Base/Acid 比の関係

3. 灰の膠着度

「膠着度」は図3に示すように、金属圧粉体の耐磨耗性および先端安定性を定量的に評価するラトラ試験を応用し、焼結体の固さを定量化するための指標として新たに定義したものであり「膠着度 = ラトラ試験後の重量 / ラトラ試験前」で求められる。なお、焼結体は石炭灰を一定温度(例えば 1000℃、1100℃など)で焼結させることで得る(図4)。

過去の実機付着灰調査から、灰障害(スラッシング・ファウリング)を起こし硬く付着している灰はいずれも膠着度 0.8 以上であり、付着していても比較的にもろく、問題ないとされる灰が膠着度 0.4 以下であったことから、灰汚れと膠着度の関係は表3とした⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

亜瀝青炭焼きボイラではガス温度 1000 ~ 1100℃領域の過熱器で灰の著しい付着・閉塞が発生するため、この温度域での灰の挙動を把握することが

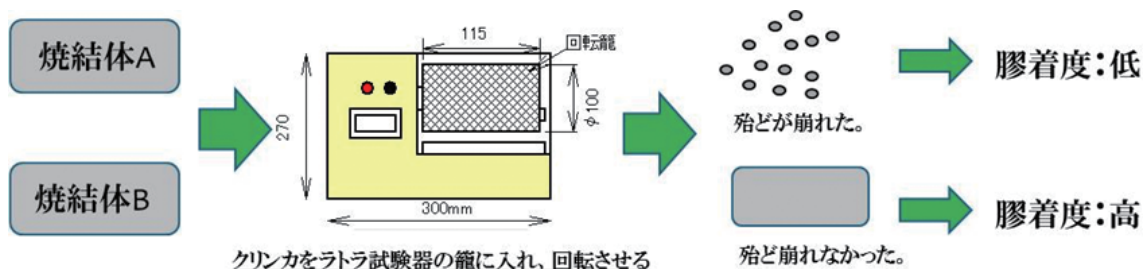


図3 膠着度の概要





石炭灰 A	焼結前	
	1000℃ 焼結後 (膠着度:0.9)	
石炭灰 B	焼結前	
	1000℃ 焼結後 (膠着度<0.1)	

図4 焼結体外観

表3 灰汚れの程度と膠着度の関係

実機灰の付着状態	灰汚れの程度	膠着度
パウダー状で付着	無し(O)	<0.2
手で簡単に崩すことができる	小(O)	0.2 - 0.4
手では簡単に崩すことができない	中(Δ)	0.4 - 0.8
崩す事ができない (溶融してガラス状態)	大(x)	>0.8

非常に重要である。しかし、灰の溶融性評価は、最低温度指標の初期変形温度 (Initial Deformation Temperature: IDT) でも 1100℃ 以上からの評価しかできない。これに対して、膠着度は IDT よりも低い温度 (900℃～) での灰の挙動 (焼結性) を評価できる。

4. 亜瀝青炭への適用結果

亜瀝青炭の膠着度を測定・評価するため、表4に示す灰の化学組成を持つ亜瀝青炭4種(①～④)の膠着度を測定した。図5に1000℃、1100℃、1200℃ 膠着度結果を示す。

表4 膠着度測定に用いた亜瀝青炭の灰の化学組成

項目		①	②	③	④
SiO ₂	wt%	43	42	47	38
Al ₂ O ₃	wt%	20	23	31	29
TiO ₂	wt%	1.2	1.0	1.8	1.5
Fe ₂ O ₃	wt%	11	16	4.7	4.5
CaO	wt%	13	6.5	6.2	10
MgO	wt%	3.3	3.1	1.3	2.8
Na ₂ O	wt%	3.1	1.8	0.6	0.9
K ₂ O	wt%	0.9	2.9	0.7	0.8
SO ₃	wt%	5.2	6.2	4.9	5.3
溶融温度	℃	1210	1240	1330	1300

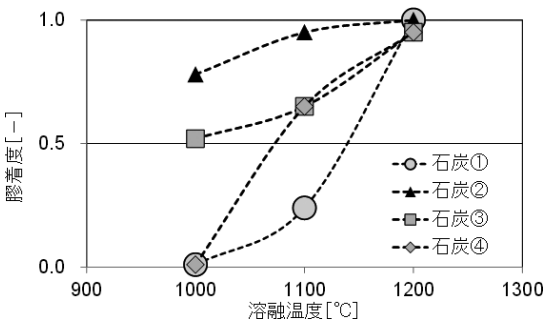


図5 溶融温度と膠着度の関係 (亜瀝青炭4種)

瀝青炭の場合、溶融温度と膠着度に強い相関が得られる (溶融温度が高ければ膠着度が低い)。上記亜瀝青炭の溶融温度は④>③>②>①であるため、膠着度は④<③<②<①と予想されるが、実際の膠着度 (1000℃) は①=④<③<②となり、傾向が一致しなかった。そこで、運用実績のある亜瀝青炭数十種の溶融温度、膠着度との関係を調べた、その結果を図6に示す。

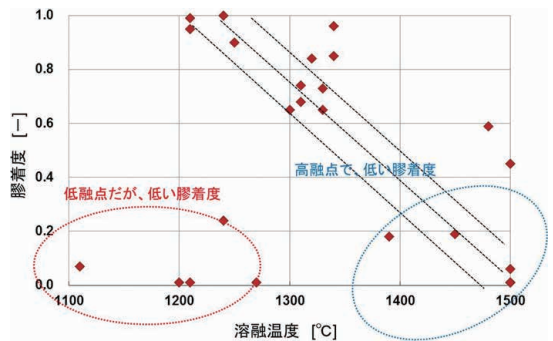


図6 溶融温度と膠着度の関係 (実機運用炭)

亜瀝青炭の場合、溶融温度が低いにも関わらず膠着度が低い石炭が存在することがわかる。膠着度が低い石炭を用いることは、ボイラの灰障害抑制・安定運用につながると考えられるが、実際に1000℃ 膠着度の低い石炭は実機ボイラの運用が良好であった。一方、膠着度の高い炭種は、灰付着による閉塞が発生し、中にはスートブローア (伝熱面の付着物を蒸気や空気噴射により除去する装置) でも除去できず、ボイラを停止しなければならない状況になった。図7に示すように、灰付着・伝熱障害に起因する膠着度が高い石炭は、ボイラ出口排ガス温度の上昇が確認できた。

灰の膠着度は、膠着度とボイラ出口排ガス温度の関係からも、実機ボイラでの灰の付着挙動を推測する有効な一手法となると考えられる。膠着度の高い石炭の利用を回避することはもちろんであるが、「溶融温度が低いが、膠着度も低い石炭」は実機での運用も良好であり、この特長を持つ石炭

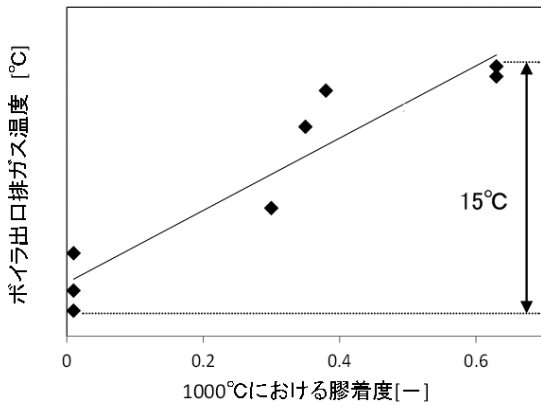


図7 膠着度とボイラ出口排ガス温度の関係

を見つけ出すことは安価で、かつボイラの安定運用につながると思う。

5. おわりに

上記の試験結果から、下記の結論を得た。

- (1) 膠着度という新しい概念で、定量的に灰汚れを評価することができる。
- (2) 膠着度は、実験室での焼結試験で簡便に求めることができる。
- (3) 膠着度は、瀝青炭、亜瀝青炭等のさまざまな炭種に適用できることがわかった。

これまで亜瀝青炭の灰障害も従来の指標で評価できると考えていた。しかし、亜瀝青炭の灰の挙動は瀝青炭と大きく異なり、従来の指標では評価できなかった。新たに開発した「膠着度」は亜瀝青炭の灰障害を評価・予測できる手法であり、今後の運用拡大が予測される亜瀝青炭の選定に役立つことを期待する。

参考文献

- (1) Hirofumi TSUJI, Yoshiko HIEI, Nobuyuki WAKABAYASHI and Hiromi SHIRAI: Formation Mechanisms, Evaluation Methods and Research Perspective of Slagging and Fouling on Pulverized Coal Combustion, Journal of the Japan Institute of Energy, 89, 2010, pp.893-902
- (2) 茂田潤一、知恵賢二郎：高温加熱顕微鏡による石炭灰の溶融温度測定技術、IIC REVIEW、Vol.49、2013/04、pp.46-55
- (3) 毛利、茂田、鈴木、福島：微粉炭焼きボイラにおけるスラッシング予測指標の構築、火力原子力発電、Vol.56、No.1、2005、pp.26-31
- (4) 毛利、茂田、鈴木、福島：微粉炭焼きボイラにおけるスラッシング予測指標の構築、石川島播磨技報、Vol.45、No.1、2005、pp.36-41
- (5) 茂田潤一、知恵賢二郎：石炭焚ボイラにおける燃焼灰の付着挙動、IIC REVIEW、Vol.55、2016/04、pp.21-29



計測事業部
計測エンジニアリング部 課長
博士(理学) 環境計量士(濃度関係、騒音・振動関係) 一般計量士
知恵賢二郎
TEL. 045-759-2122
FAX. 045-759-2119



フェロー
博士(学術)
環境計量士(濃度関係)
茂田潤一
TEL. 045-791-3516
FAX. 045-791-3541