Review

Formation Mechanisms, Evaluation Methods and Research Perspective of Slagging and Fouling on Pulverized Coal Combustion

Hirofumi TSUJI, Yoshiko HIEI, Nobuyuki WAKABAYASHI, and Hiromi SHIRAI

(Received February 5, 2010)

微粉炭燃焼時のスラッシングとファウリングの発生機構, 評価法と研究展望

辻 博文, 日恵井佳子, 若林信行, 白井裕三

It is very important to understand the mechanisms of the slagging and the fouling on the pulverized coal combustion in order to avoid the troubles due to ash depositions on furnace walls and tube surfaces. This review shows the fundamentals of ash deposition mechanisms and indices for predicting slagging and fouling propensities based on bulk compositions of coal. The new evaluation methods are also summarized, which use advanced coal analyses. A lot of indices based on bulk compositions of coal are widely used for prediction of ash depositions. These are, however, not applicable to determine the positions, where ash depositions occur, and the effect of combustion conditions. The advanced method by use of the numerical simulation techniques, which incorporate the models of ash formation process and ash deposition behavior during pulverized coal combustion, is desirable for precise evaluation.

Key Words

Pulverized coal combustion, Ash deposition, Slagging, Fouling

1. はじめに

微粉炭火力発電は, エネルギーセキュリティなどの観点から, 今後も重要な電源のひとつと位置づけられている¹⁾。このため微粉炭火力の高度化に向けて, 利用炭種の拡大, 環境汚染物質排出量の一層の低減および石炭灰の利用用途の拡大など, 様々な研究開発¹⁾が行われている。これらに加え, 地球温暖化対策として, 各種バイオマスの混焼²⁾や, さらなる発電効率向上を目指し蒸気条件改善のための材料開発¹⁾³⁾⁴⁾も進められている。したがって, 今後微粉炭火力では, 燃料種や運用条件が多種・多様化する傾向にある。

微粉炭火力で一部の石炭を利用した際に, 石炭中の灰分がボイラの伝熱面に付着 (スラッシングおよびファウリング) し, 伝熱効率の低下やガス流れの閉塞, これらによる脱硝装置入口温度の上昇, およびボイラチューブの損耗などの灰付着事象が発生している。この灰付着事象により, 利用炭種や発電所の運用に制限が生じる場合があり, その回避は微粉炭火力の安定運転を行う上で極

めて重要である。

微粉炭燃焼時のスラッシングとファウリングについては, 国内外で古くから研究が行われており, 伝熱面への灰粒子の付着性を石炭中の灰組成等から判別する評価法が提案されている。わが国の微粉炭火力では, 前述のように利用炭種の拡大や, 各種バイオマス等の導入が急速に進展すると予想され, これらの燃料の灰粒子の付着性評価も今後重要となる。

本報では, 以上のような状況を踏まえ, 微粉炭燃焼時のスラッシングおよびファウリングについて, その発生メカニズムと既存の評価法を概説する。あわせて, 評価法の高度化における課題を展望する。

2. スラッシングとファウリングの発生メカニズムおよび評価法

わが国の微粉炭火力で利用されている石炭には, おおよそ数%~20%の灰分が含まれている。この灰分がボイラや排煙処理装置などに付着し, 運転に影響をおよぼす

場合がある。ボイラで生じる灰粒子の付着のうち、ふく射伝熱面で生じるものをスラッシング、対流伝熱面で生じるものをファウリングとそれぞれ呼ぶ。図1にスラッシングおよびファウリングの発生領域と付着状況の写真を示す。ファウリングについては、ガス温度が高い領域（約900℃以上）で生ずる高温ファウリングと低い温度領域（約900℃未満）で生ずる低温ファウリングとに分けられる。灰粒子の伝熱面への付着は、伝熱効率の低下やガス流れの閉塞、これらによる脱硝装置入口温度の上昇、ボイラチューブ等の損耗、および付着物の落下による炉底部の損傷などを生じることがある^{7)~9)}。

スラッシングとファウリングは、ボイラ内の乱流燃焼場内での灰粒子の昇温・冷却、揮発・凝縮、溶融・固化、伝熱面への移動・到達および付着後の化学変化・焼結などを含む極めて複雑な現象であり、その解明のため多数の研究が様々な観点から行われている^{8)~19)}。これらの研究により、灰粒子の伝熱面への付着は、石炭および灰分

図1 スラッシングとファウリングの発生領域および発生状況の写真（文献5）6）を参考に作成）

図2 伝熱面への灰粒子の移動・到達機構（文献7）を参考に作成）

の組成・形態、ボイラ内の燃焼・流動状況および伝熱面の物理・化学的状態などに影響されることが明らかにされている。

伝熱面への灰粒子の移動・到達機構の概念を、図2に示す。灰粒子の移動・到達は、図示のように、①約10 μm以上の粒子による慣性衝突、②1～10 μm程度の粒子の熱泳動、および③伝熱面近傍で冷却され凝縮したサブミクロン粒子の拡散、によって生ずる。

2.1 スラッシング

2.1.1 発生メカニズム

スラッシングは、火炎からのふく射を受ける伝熱面に生じる灰粒子の付着のことであり、水冷壁、ふく射型スーパーヒータ、バーナ出口部およびボイラ下部ホッパ部等に生ずる。微粉炭燃焼時は、火炎内の粒子温度が1500℃以上となり、灰粒子の溶融が生ずる。このうち、Na、CaおよびFeを含むケイ酸塩化合物などを含む溶融が進行しやすい灰粒子が伝熱面に移動・到達して、付着層の形成が始まる。この付着層の成長により、層内の温度勾配が高くなる。これにともない、付着層の表面は高温となり、著しい粘着性・溶融性を示すようになる。その付着層に新たに到達した灰粒子は、その灰粒子自身が粘着性・溶融性を示さなくても捕捉され、付着層の成長が加速される。したがって、十分発達したスラグ層では、その組成が石炭中の灰組成と概ね近似する例が報告⁸⁾されている。スラグ層の構造の概念図を、図3に示す。

スラッシングの主な発生域である水冷壁の表面温度は、通常300～550℃程度で灰粒子の融点以下である。したがって、十分に発達したスラグ層では、水冷壁表面付近の付着物は溶融しておらず、スラグ層の火炉側表面が溶融した状態である。スラグ層は、その厚さにより、次の4つに分類されることがある⁸⁾。

- ①流動スラグ（running slag）
- ②厚さが2.5cm以下の小規模な付着
- ③厚さが2.5～7.5cmの中規模な付着
- ④厚さが7.5cmを超える大規模な付着

図3 スラッシングによる灰粒子の付着層の構造（文献7）を参考に作成）

この分類では①から④になるにしたがい、スラッシングがボイラの運転・管理におよぼす影響が顕著になると考えられる。

またスラグ層は、その物理的状況の観点から、次のように分類される場合もある⁸⁾。

- ① 高い流動状態を示し、流れやすい。
- ② 熔融し、下部へゆっくりと流動する。
- ③ 熔融しており表面が丸みを帯びている、あるいは溶融しているが下部への流動はない。
- ④ 溶融しておらず (dry deposit)、層のエッジがシャープである。

2.1.2 評価法

スラッシングの評価指標を、表1に示す。評価指標は、大まかに、①石炭中の灰組成から導出するもの、②石炭灰の溶解性から導出するもの、および③石炭灰の焼結性から導出するものに、分類される。ほとんどの指標が、定義式に従い評価値を算出し、その値に基づきスラッシング性を小からシビアに区分する。

灰組成から導出する指標には、灰アルカリ率 (Base/Acid 比) や、 SiO_2 、 Fe_2O_3 および CaO などの含有率に着目したものがある。石炭灰の溶解性から導出する指標は、石炭灰の粘性や融点などから求めるものである。石炭灰の焼結性から導出する膠着度は、近年提案されたもの⁵⁾¹⁷⁾¹⁸⁾で、冶金の分野で用いられるラトラ試験により、スラグ灰を評価する方法である。表1の指標は、必ずしも、同様の設備・手法を用いて確立されたものではなく、また評価基準の判定方法も明らかにされたものが少なく、指標を使用する際には留意が必要である。

表1には、わが国の微粉炭火力発電所等においてスラッシングの評価に良く用いられる指標を示した。Base/Acid 比、スラッシングファクタおよび灰融点等が一般的に用いられている。ただし、これらの指標の精度については、公表されたものが少なく、明確にされていない。

2.2 ファウリング

2.2.1 発生メカニズム

ファウリングの付着層構造の概略を、図4に示す。ファ

ウリングは、ガス温度が約900℃以上の高温ファウリング (主にスーパーヒータとリヒータ等の領域) と、約900℃未満の低温ファウリング (主にエコノマイザ等の領域) に分けられる。

ファウリングは、燃焼時に一旦揮発した後、凝縮した灰分粒子が伝熱面に付着して形成される薄い層から始まる。これは、主にNa, K, Caおよびこれらの硫酸塩で構成される。アルカリ金属は、ガス層で酸化物や水酸化物となり、 SO_3 と反応し硫酸化合物となる。これらが、低融点の共晶物となり、粘着性のある付着物として伝熱面表面に付着する。

高温ファウリングは、硫酸塩が安定に存在する温度より高温の領域で生じる。伝熱表面の付着層に、粒子が慣性力等で衝突すると、粒子表面でアルカリ溶融が生じ、粒子が粘着性となる。付着物が成長すると、焼結が生じ、付着層内の温度勾配が増加する。この際、ケイ酸塩溶融物がバインダとなり、焼結が生じやすくなる。この結果、付着層の表面温度が上昇し、表面は液層となるか、付着性を有するようになる。これにより、最終的に付着性のない粒子まで伝熱面に付着する。一方、低温ファウリングでは、主に CaSO_4 などの硫酸塩がバインダとなり、粒子の付着層を成長させる。その後の付着層の成長過程は、高温ファウリングと同様である。高温ファウリングと低温ファウリングでは、付着層内の位置により、粒子径や組成が大きく異なる。

高温ファウリングと低温ファウリングでは、図4に示すように、伝熱面の流れと衝突する領域 (ボイラチューブの上流側) で、付着層がガス流れと逆方向に成長する。一方、図5に示すように、ボイラチューブの下流側にも

図5 ボイラチューブの下流側に生ずる灰粒子の付着層 (文献8)を参考に作成)

図4 ファウリングによる灰粒子の付着層の構造 (文献7)を参考に作成)

表 1 スラッキング性評価指標

No.	指標	定義	単位	適用炭種・条件	評価基準			一般的に用いられている指標	文献
					小	中	大	シビア	
Ⅰ．石炭中灰組織から導出するもの									
1	Base/Acid 比	$\frac{\text{Base}}{\text{Acid}} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2}$	[-]	褐炭 CaO + MgO > Fe ₂ O ₃	< 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 175	> 1.75	○
				全燃料	≤ 0.4 or ≥ 0.7		0.4 ~ 0.7		
				Base < 30%	< 0.1	0.1 ~ 0.3	> 0.3		
2	スラッキングファクタ①	(Base/Acid) × S _{dry} [%]	[%]	瀝青炭 CaO + MgO > Fe ₂ O ₃	< 0.6	0.6 ~ 2.0	2.0 ~ 2.6	> 2.6	○
3	シリカ比	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}} \times 100$	[%]	瀝青炭	> 77.5	70 ~ 77.5	< 70		<div></div>
4	鉄／カルシウム比	Fe ₂ O ₃ /CaO	[-]	全燃料	< 0.3 or > 3.0	0.3 ~ 3.0	~ 1.0		
5	シリカ／アルミナ比	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	[-]	-	Low ←		→ High		
6	鉄・カルシウム含有率	Fe ₂ O ₃ + CaO	[%]	-	< 12	> 12	→ High		
7	Base	Base = Fe ₂ O ₃ + CaO + MgO + Na ₂ O + K ₂ O	[%]	Base < 30%	< 10	10 ~ 20	> 20	○	18)
Ⅱ．石炭灰の溶解性から導出するもの									
8	石炭灰の粘性	石炭灰の粘度が250 poise時の温度	[℃]	全燃料	> 1302	1399 ~ 1149	1246 ~ 1121	< 1204	<div></div>
9	灰軟化点	還元性雰囲気下での初期軟化温度	[℃]	全燃料		> 1350		< 1350	○
10	スラッキングファクタ②	$\frac{\text{半球温度} + 4 \times \text{初期変形温度}}{5}$	[℃]	全燃料	> 1343	1232 ~ 1343	1149 ~ 1232	< 1149	<div></div>
11	粘性スラッキングファクタ	$\frac{T_{250}(\text{酸化雰囲気}) - T_{1000}(\text{還元性雰囲気})}{975\text{Fs}}$ (Fsは1037 ~ 2593℃の温度範囲で、1.0 ~ 11.0の値を与える。)	[-]	全燃料	< 0.5	0.5 ~ 0.99	1.0 ~ 1.99	> 2.00	8) 14)
12	灰融点	←	[℃]	Base < 30%	< 1280		> 1280	○	18)
Ⅲ．石炭灰の焼結性から導出するもの									
13	膠着度	ラトラ試験法に基づく	[-]	Base < 30%	0.2 ~ 0.4 (0.2未満は影響無)	0.4 ~ 0.8	> 0.8		<div></div>

付着が発生する場合もある⁸⁾。この付着は、石炭中のNaが主体の粒子がボイラチューブの下流側に生ずる流れの渦によってボイラチューブ表面に到達し、生ずる。この灰粒子の付着は、瀝青炭の燃焼時にも見られるが、Na含有率が高い褐炭の燃焼時に特に生じやすいとされている⁸⁾。

2.2.2 評価法

ファウリングの評価指標は、表2に示すように、①石炭中の灰組成から導出するもの、②石炭灰の溶解性から導出するもの、および③石炭灰の焼結性から導出するものに、スラッシングの評価指標と同様の分類ができる。ファウリングの指標も、定義式に従い評価値を算出し、その値に基づきファウリング性を小からシビアに区分する。ただし、高温ファウリングと低温ファウリングを区別して評価する指標は見られない。

石炭中の灰組成から導出する指標が、9種類と最も多い。スラッシングの評価指標では灰の溶解性に着目した指標が多いのに対して、ファウリングの評価指標ではNaやKの含有率に着目したものが多く、これは、前項で述べたように、ファウリングが凝縮したアルカリ金属等から生じることを反映していると考えられる。ファウリングによる灰粒子の付着層は、局所的に溶解していると考えられるが、付着層全体に溶解は生じていない。このため、ファウリングの場合、石炭灰の溶解性から導出する指標の数は、スラッシングに比べて少ない。石炭灰の焼結性から導出する指標も2種類見られる。ファウリングの評価指標も、必ずしも、同様の設備・手法を用いて確立されたものではなく、また評価基準の判定方法も明らかにされたものが少なく、指標の使用時には注意が必要である。

表2には、わが国の微粉炭火力発電所等においてファウリングの評価に主に用いられる指標を示した。アルカリ金属を用いる指標が一般的に用いられているが、その精度等は、公表されたデータがほとんどなく、明確にされていない。

スラッシングおよびファウリングでは、伝熱面での灰粒子の初期付着層に別の粒子が到達し、溶解・焼結しながら付着層が成長する。初期付着層は短時間で形成されるが、灰粒子の付着層の成長に関与する焼結は長い時間を要すると考えられる。

初期付着層に関しては、大学等の研究機関により、小型の試験炉や落下型電気炉等を用いた多くの研究が実施されている。Suら^{16) 22) ~24)}は、試験炉で多数の石炭を同一条件で燃焼し、初期付着層に関する詳細な研究を行っている。その結果、初期付着層の形成には、FeおよびNaを主に含む粒子が深く関与すると結論付けられている。

著者らは、表1および表2のうち石炭中の灰組成から導出する指標とSuらの試験結果の関係を評価・検討した

が、いずれの指標に対しても明確な相関性は見られなかった。すなわち、石炭中の灰組成から導出する指標の、初期付着に対する評価精度はあまり高くないと考えられる。付着層の溶解・焼結性が、初期付着層の形成過程と同様にスラッシングとファウリングに関する重要なプロセスであることが示唆される。灰粒子の焼結性は、長い時間を要する現象であるため、十分な検討が行われているとは言い難い。今後、付着層の焼結に関する検討が必要であると考えられる。

2.3 高度分析技術を用いた評価法

石炭中の灰粒子は、石炭中に不均一に分散して存在している。石炭粉碎後の灰分は、炭素質とイオン結合しているもの、炭素質に取り込まれている灰粒子(Included粒子)、および炭素質に取り込まれておらず、外周部の一部あるいは全てが周囲ガスに晒されている灰粒子(Excluded粒子)に分類される。

これらの灰粒子の燃焼時の変化過程を、図6に示す。本図のように、灰粒子の燃焼時の変化過程は、その存在形態によって大きく異なる。炭素質とイオン結合した無機物は、揮発・凝縮および合一等を経て、燃焼灰粒子(フライアッシュ)となる。Included粒子は、チャー内での灰粒子の合一、チャー表面からの鉱物の脱落およびチャーの分裂などを生じながら、フライアッシュを生成する。一方、Excluded粒子は、鉱物単体粒子の分裂、溶解を経てフライアッシュとなる。一部のExcluded粒子は、内部にガスを含んだ中空灰粒子となる。フライアッシュの粒径分布は、鉱物由来の0.5 μm 以上の双峰分布に、無機物の揮発・凝縮過程で生成する0.1 μm 程度にピークを持つ単峰分布を組み合わせたものとなる^{8) 25)}。

以上のように、石炭中灰粒子の存在形態によって、燃焼時の粒子の揮発・凝縮、溶解状態および粒径が異なるため、灰粒子の付着挙動も変化する。したがって、石炭中灰粒子の存在形態の把握はスラッシングとファウリングの評価において重要である。石炭中灰粒子の存在形態の分析手法として、CCSEM(Computer Controlled Scanning Electron Microscopy)などが一般的に用いられている。なお、第2章の表1および表2に示した指標は、いずれも石炭のバルクとしての特徴を表しており、石炭中灰粒子の存在形態の影響を考慮したものではなく、留意が必要である。

これに加え、固気反応の熱平衡計算技術の進歩等により、微粉炭燃焼時の灰粒子の相変化、ボイラ内のガス温度およびガス組成等をある程度の精度で把握することが可能になった。これらの技術と石炭中灰粒子の存在形態の分析結果を組み合わせた、スラッシングとファウリングの解析ツールが、表3に示すように提案されている。現在、本表に示す4種類のツールが開発され、スラッギン

表2 ファウリング性評価指標

No.	指標	定義	単位	適用炭種・条件	評価基準			一般的に用いられている指標	文献	
					小	中	大			
Ⅰ．石炭中灰組織から導出するもの										
1	Base/Acid比	$\frac{\text{Base}}{\text{Acid}} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2}$	[-]	-	Low←	→High			8)	
2	シリカ比	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}}$	[-]	-	Low←	→High			8)	
3	ファウリンゲファクタ①	$(\text{Base}/\text{Acid}) \times \text{Na}_2\text{O} [\%]$	[%]	瀝青炭, CaO + MgO < Fe ₂ O ₃	< 0.2	0.2 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	> 1.0	○	
4	ファウリンゲファクタ②	$(\text{Base}/\text{Acid}) \times \text{Na}_2\text{O} (\text{水溶性} [\%])$	[%]	瀝青炭, 低温灰	< 0.1	0.1 ~ 0.25	0.25 ~ 0.7	> 0.7	○	
5	ファウリンゲファクタ③	$(\text{Base}/\text{Acid}) \times (\text{Na}_2\text{O} [\%] + \text{K}_2\text{O} [\%])$	[%]	-	< 0.7	→High			○	
6	石炭の灰中ナトリウム含有率	Na ₂ O	[%]	瀝青炭, CaO + MgO < Fe ₂ O ₃ 褐炭, CaO + MgO > Fe ₂ O ₃	< 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 2.5	> 2.5	○	
7	石炭の灰中全アルカリ金属含有率 (Na ₂ O相当)	Na ₂ O + 0.6589K ₂ O	[%]	瀝青炭, CaO + MgO < Fe ₂ O ₃ 褐炭, CaO + MgO > Fe ₂ O ₃	< 2.0	2.0 ~ 6.0	6.0 ~ 8.0	> 8.0	○	
8	石炭中全アルカリ金属含有率 (Na ₂ O相当)	$(\text{Na}_2\text{O} [\%] + 0.6589\text{K}_2\text{O} [\%]) \times (\text{ash} [\%] / 100)$	[%]	瀝青炭	< 0.3	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 0.6	> 0.6	○	
9	石炭中塩素含有率	Cl[dry coal]	[%]	全石炭	< 0.3	0.3 ~ 0.5	> 0.5			○
Ⅱ．石炭灰の溶融性から導出するもの										
10	石炭灰の粘性	石炭灰の粘度が250 poise時の温度	[℃]	-	> 1302	1399 ~ 1149	1246 ~ 1121	< 1204	○	
Ⅲ．石炭灰の焼結性から導出するもの										
11	石炭灰の焼結強度①	ボイラ回収灰の, 925℃ 15時間焼結時強度	[MPa]	-	< 7	7 ~ 35	35 ~ 110	> 110	○	
12	石炭灰の焼結強度②	←	[psi]	全石炭	< 1000	1000 ~ 5000	5000 ~ 16000	> 16000	○

図6 微粉炭燃焼時の灰粒子の変化過程（文献7）を参考に作成）

表3 高度分析に基づくスラッシング・ファウリングの解析ツール

ツール名	開発組織 (国名)	入力項目	評価項目
PCQUEST ²⁶⁾ (Predictive Coal Quality Effects Screening Tool)	Energy & Environmental Research Center (EERC) (米国)	・石炭性状 ・鉱物組成 ・燃焼条件	・スラッシング性 ・高温ファウリング性 ・低温ファウリング性 ・配管腐食性 ・石炭粉碎性 ・スートプロアタイミング他
ADLVIC ²⁷⁾ (Ash Deposition Local Viscosity, Index of reflection, and Composition)	Sandia National Laboratories (米国)	・石炭性状 ・鉱物組成 ・ボイラサイズ・運転条件 など	・灰付着量と組成 ・灰付着箇所 ・付着速度 ・付着物の硬度 ・付着物の除去性（付着強度）
PSI Slagging Advisor ²⁸⁾	PSI Power Serve (米国)	・石炭性状 ・CCSEM 測定結果	・燃焼灰の粒径や組成 ・付着物の粘性 ・灰付着位置と付着量
石炭評価システム ^{29) 30)}	出光興産(株) (日本)	・石炭性状 ・ボイラのサイズ・構造、 運転条件 ・CCSEM 測定結果等	・石炭使用可否 ・スラッシング性 ・最適混炭条件 ・炉内温度分布・ガス濃度分布 ・NO _x 濃度、灰中未燃分濃度 ・運転条件変化時の上記項目

グとファウリングの評価に用いられている。

これらのツールの代表例として、PSI Slagging Advisorの解析フローを図7⁸⁾に示す。本ツールでは、従来の石炭の分析結果に加えて、CCSEMによる灰粒子の存在形態の分析結果を使用する。これらと灰粒子の燃焼時の変化過程モデルおよび簡略化されたボイラ内の流れモデルなどから、スラッシング性を評価する。

3. スラッシングおよびファウリングに関する今後の研究展望

第2章の表1および表2に示した指標は、いずれも石炭のバルク組成等から灰粒子の付着性を評価するものである。これらの指標では、従来から用いられている石炭の分析手法から灰粒子の付着の予測ができるため、簡易に評価を行うことができる。このため、これらの指標に関して、微粉炭火力等では多数の知見が蓄積されており、今後も活用されていくと考えられる。ただし、これらの

図7 PSI Slagging Advisorの解析フロー⁸⁾

指標は、燃焼時の挙動が大きく異なる石炭中灰粒子の存在形態を考慮したものではない。また、灰粒子の付着箇所の特異や燃焼条件の影響評価を行うことができない。したがって、これらの指標の今後の大幅な進展は望めないと考えられる。

一方、石炭中灰粒子の存在形態の分析結果や簡略化されたボイラ内の流れモデルなどを用いる、新たな解析ツールが開発されている^{26)~30)}。これらのツールでは、石炭の高度な分析技術などを必要とするが、灰粒子の変化過程等を考慮した、より精度の高い評価が可能である。ただし、これらの解析ツールについては、精度検証等が十分になされているとは言い難く、今後の検討が重要であると考えられる。

スラッシングおよびファウリングのより高精度な評価、例えば、運転条件等の変化時における灰付着事象発生の有無の判別や灰粒子の付着発生箇所の特定を行うためには、微粉炭の燃焼シミュレーションの活用が不可欠であると考えられる。このためには、既存の燃焼シミュレーション技術へ灰粒子の変化過程および伝熱面への付着過程のモデルを導入する必要がある。図6の灰粒子の変化過程、および図2の灰粒子の付着過程のすべてをモデリングすることは、計算機の負荷や実用性の面から、現状では有効ではないと考えられる。スラッシングやファウリングに深く関連するプロセスの抽出とそのモデル化が不可欠である。

灰粒子の変化過程については、燃焼後のフライアッ

シュの粒径分布の予測手法が、いくつか提案^{31)~33)}されており、その一部はスラッシングやファウリングに関連する灰粒子の変化過程のモデル化にも活用できると考えられる。灰粒子の分裂のみを考慮した、固体燃料の燃焼・ガス化過程のシミュレーションが行われ、灰粒子の分裂が粒子軌跡、ガス温度分布およびガス組成分布等に影響することが報告されている³⁴⁾。

スラッシングによる灰粒子の付着に関しては、商用の微粉炭燃焼ボイラを対象に、灰粒子の付着が灰粒子の粘度によって決定されるモデルを用いたシミュレーションが行われている³⁵⁾³⁶⁾。Plazaら³⁷⁾は、灰粒子の付着が灰粒子の固層と液層の割合によって決定されるモデルを用いて、スラッシングと高温ファウリングのシミュレーションを実施している。これらの研究では、シミュレーション結果と試験データの比較評価が不十分であり、シミュレーションの精度が十分に明らかとなっていない。Maら³⁸⁾は、スラッシングとファウリングのシミュレーションを実施し、その精度を商用の微粉炭燃焼ボイラを用いて評価しているが、付着過程等のモデルが明確にされておらず、今後の検証が必要である。

以上のように、スラッシングとファウリングのシミュレーションは現在、灰粒子付着過程などのモデルの検討とその精度評価が行われている段階である。今後、スラッシングとファウリングの現象解明が進展して、新たなモデルが開発され、実験との対比等を通じてシミュレーション技術の高度化が図られるものと考えられる。

4. おわりに

本報では、微粉炭燃焼時のスラッシングおよびファウリングに関し、その発生メカニズムおよび既存の評価法を概説するとともに、評価法の高度化における課題を展望した。石炭のバルク組成等から、スラッシングやファウリングを評価する指標が多数あり、微粉炭火力等で用いられている。ただし、これらの指標では燃焼条件の影響評価や灰粒子の付着箇所の特定ができないなどの課題がある。また、これらの指標は燃焼時の挙動が大きく異なる石炭中灰粒子の存在形態を考慮したものではない。

他方、CCSEM等の石炭の高度分析技術を用い、石炭中灰粒子の存在形態などを考慮した新たな解析ツールの開発がなされている。これらの解析ツールは、今後の進展が期待されるが、まずは精度の検証が重要であると考えられる。

スラッシングやファウリングの評価法を一層高度化するためには、燃焼条件の影響把握や灰粒子の付着箇所の特定などができるようにする必要がある。このためには、燃焼時の灰粒子の変化過程と伝熱面への付着過程などのモデルを高度化し、それらを燃焼シミュレーションへ導入した新たな解析技術の開発が望まれる。

文 献：References

- 1) 持田 勲 編, クリーン・コール・テクノロジー, (工業調査会), (2008) : Mochida, I. ed., Clean Coal Technology, (Kogyo Chosakai Publishing, Inc.), (2008)
- 2) 中村孝洋, 中川賢剛, 田中誠, 鈴木昭雄, 金氏武, 木本政義, 火力原子力発電, **57**, 839 (2006) : Nakamura, T., Nakagawa, K., Tanaka, M., Suzuki, A., Kaneuji, T., Kimoto, M., *The Thermal and Nuclear Power*, **57**, 839 (2006)
- 3) 佐藤幹夫, 日エネ誌, **86**, 304-309 (2007) : Sato, M., *Jpn. Inst. Energy*, **86**, 304 (2007)
- 4) 佐藤幹夫, 屋口正次, 田中良典, 岩崎淳, 福田雅史, 斎藤英治, 中川博勝, 椎橋啓, 和泉栄, 火力原子力発電, **57**, 821 (2006) : Sato, M., Yaguchi, M., Tanaka, Y., Iwasaki, J., Fukuda, M., Saito, E., Nakagawa, H., Shiihashi, A., Izumi, S., *The Thermal and Nuclear Power*, **57**, 821 (2006)
- 5) 毛利慎也, 茂田潤一, 鈴木幸平, 福島仁, 火力原子力発電, **56**, 26 (2005) : Mouri, S., Shigeta, J., Suzuki, K., Fukushima, H., *The Thermal and Nuclear Power*, **56**, 26 (2005)
- 6) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成19年度成果報告書「国際石炭利用対策事業 クリーン・コール・テクノロジー実証普及事業(案件発掘調査)ナノ石炭添加剤利用技術導入可能性調査」, (2008)
- 7) 二宮善彦, 日エネ誌, **75**, 433 (1996) : Ninomiya, Y., *Jpn. Inst. Energy*, **75**, 433 (1996)
- 8) Couch, G., Understanding slagging and fouling during pf combustion, IEA COAL RESEARCH, (1994)
- 9) Williams, A., Pourkashanian, M., Jones, J. M., Skorupska, N., Combustion and Gasification of Coal, (Taylor & Francis, Inc.), pp. 158-160 (2000)
- 10) 寺前剛, 山下亨, 日エネ誌, **76**, 988 (1997) : Teramae, T., Yamashita, T., *Jpn. Inst. Energy*, **76**, 988 (1997)
- 11) Wall, T. F., Lowe, A., Wibberley, L. J., Stewart, McC., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **5**, 1 (1979)
- 12) 篠崎貞行, 谷口一徳, 燃協誌, **68**, 1020 (1989) : Shinozaki, S., Taniguchi, K., *Nenryo Kyokaishi*, **68**, 1020 (1989)
- 13) Smoot, L. D. ed., Fundamentals Coal Combustion for Clean and Efficient Use, Coal Science and Technology 20, (ELSEVIER), (1993)
- 14) Bryers, R. W., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **22**, 29 (1996)
- 15) Heap, M. P., Kramlich J. C., Pershing, D. W., Pohl, J. H., Richter, W. F., Seeker, W. R., Effects of Coal Quality on Power Plant Performance and Costs Volume 4: Review of Coal Science Fundamentals, Project 2256-1, (EPRI), (1986)
- 16) Su, S., Combustion Behaviour and Ash Deposition of Blended Coals, Dr. Thesis, The University of Queensland, (1999)
- 17) 毛利慎也, 福島仁, 茂田潤一, 羽嶋範昭, 蔵田良正, 山崎英幸, 火力原子力発電, **59**, 601 (2008) : Mouri, S., Fukushima, H., Shigeta, J., Hajima, N., Kurata, Y., Yamazaki, H., *The Thermal and Nuclear Power*, **59**, 601 (2008)
- 18) 毛利慎也, 茂田潤一, 鈴木孝平, 福島仁, 石川島播磨技報, **45**, 36 (2005) : Mouri, S., Shigeta, J., Suzuki, K., Fukushima, H., *Ishikawajima-Harima Gihou*, **45**, 36 (2005)
- 19) 長沼宏, 成瀬一郎, 宮内良樹, 河合隆之, 伊藤正, 三木良治, 相澤威一郎, 狩野勝広, 日エネ誌, **86**, 102 (2007) : Naganuma, H., Naruse, I., Miyauchi, Y., Kawai, T., Itoh, T., Miki, Y., Aizawa, I., Karino, K., *Jpn. Inst. Energy*, **86**, 102 (2007)
- 20) Bott, T. R., Proc. Eng. Foundation Conf., Palm Coast March 10-15, 499 (1991)
- 21) 日本機械学会編, 燃焼工学ハンドブック, (日本機械学会), (1995) : The Japan Society of Mechanical Engineers ed., JSME Combustion Handbook, (The Japan Society of Mechanical Engineers), (1995)
- 22) Su, S., Pohl, J. H., Holcombe, D., Hart, J. A., *Fuel*, **80**, 1351 (2001)
- 23) Su, S., Pohl, J. H., Holcombe, D., Hart, J. A., *Combustion Sci. and Tech.*, **165**, 129 (2001)
- 24) Su, S., Pohl, J. H., Holcombe, D., *Fuel*, **82**, 1653 (2003)
- 25) Markowski, G. R., Ensor, D. S., Hooper, R. G., Carr, R. C., *Environ. Sci. Technol.*, **14**, 1400 (1980)

- 26) http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/advresearch/pubs/ARSS-016_4P.pdf
- 27) EPRI, Technology Review, "Validation of fireside performance tools for coal combustion", (2000)
- 28) Baxter, L. L., DeSollar, R. W., *Fuel*, **72**, 1411 (1993)
- 29) <http://www.idemitsu.com/energy/environment/system.html>
- 30) 山下亨, 日本エネルギー学会, 第42回石炭科学会議発表論文集, **57** (2005) : Yamashita, T., Jpn. Inst. Energy, the 42th Conference of Coal Science, **57** (2005)
- 31) Barta, L. E., Horvath, F., Beer, J. M., Sarofim, A. F., Twenty-Third Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1289 (1990)
- 32) Barta, L. E., Toqan, M., Beer, J. M., Sarofim, A. F., Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1135 (1992)
- 33) Yan, L., Gupta, R. P., Wall, T. F., *Fuel*, **81**, 337 (2002)
- 34) Syred, N., Kurniawan, K., Griffiths, T., Gralton, T., Ray, R., *Fuel*, **86**, 2221 (2007)
- 35) Fan, J. R., Zha, X. D., Sun, P., Cen, K. F., *Fuel*, **80**, 645 (2001)
- 36) Fang, Q., Wang, H., Wei, Y., Lei, L., Duan, X., Zhou, H., *Fuel Processing Technology*, **91**, 88 (2010)
- 37) Plaza, P., Griffiths, A. J., Syred, N., Rees-Gralton, T., *Energy and Fuels*, **23**, 3437 (2009)
- 38) Ma, Z., Iman, F., Lu, P., Sears, R., Kong, L., Rokanuzzaman, A.S., McCollor, D. P., Benson, S. A., *Fuel Processing Technology*, **88**, 1035 (2007)
-