

石炭灰の改質技術及びフライアッシュセメントの 製造利用技術の開発研究(その2)

—改質炉に関する熱流動シミュレーション—

泉川達哉、花城可英、平良秀春、中村秀樹¹、新垣武治¹、宮城正明¹

石炭灰の改質装置に関して熱流動シミュレーションを実施し、定性的な手法を用いて熱交換器内の温度分布に影響を与える設計因子の特定を行った。その結果、熱交換器での温度分布を高く保つための方法としては、断熱材の材質や寸法を変更するよりも、サイクロン後のダクト径を小さくすることや、原料温度を高くする等が有効であることが示された。シミュレーションの結果を用いて設計した実証装置では、石炭灰の改質を行うために必要な高温の温度分布を得ることができた。

1 はじめに

石炭火力発電所から発生する石炭灰を利用したフライアッシュセメントは、耐水性に優れた性質があることから、沿岸工事などで活用されるようになった。沖縄県内でも、現在、年間約25万トンの石炭灰が発生しており、その有効利用が求められている。しかし県内の石炭灰は使用炭種や発電所の運転状況などの影響で、石炭灰に含まれる未燃炭素量が不安定であり、そのままでは原料として利用することが難しい。

本研究は、石炭灰に含まれる未燃炭素を減少させ、フライアッシュセメントの原料として有効利用することを目的としている。また本研究は、プラントレベルの大型改質炉(実証装置)の設計を行う前に、小型実験機での改質試験を繰り返し行い、改質条件を定めていく方法で進められた。その中で熱流動シミュレーションは、計算結果から得られた知見を実証装置の設計に活用することを目的として、小型実験機での改質試験と並行して行われた。

2 方法

流体の運動を記述する基本式は、連続の式、ナビエ・ストークス方程式(NS方程式)、エネルギー式の3つであり、これらの式はそれぞれ質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則に対応するものである。燃焼炉内の熱流動の現象を調べるためには、これらの方程式を適当な条件のもとで解くのだが、NS方程式は非線形偏微分方程式であり解析的に解くことが難しく、そのためコンピュータを用いた数値的な解法が広く行われている。

炉内の流速や温度、圧力を計算機で扱うためには、これらの連続量を離散化して表す必要がある。また、こ

れらの物理量を表す微分方程式を解く場合でも、離散的な量を用いたアルゴリズムを使用する必要がある。ここでは、そのアルゴリズムとして有限体積法を用いた汎用の熱流動解析ソフト「FLUENT Ver6.0」を用いた。

表1に石炭灰の工業分析の結果を代表的な微粉炭の例と比較して示す。また、同様に表2には石炭灰の粒径について示す。一般の燃焼問題、例えば微粉炭の燃焼を解析する場合には、炉内の流れの乱流特性だけでなく、微粉炭粒子と主流との相互作用や化学反応を伴う燃焼を考慮するため計算が非常に複雑になるが、今回の石炭灰の燃焼に関しては石炭灰中に含まれるチャー分(可燃分)の割合が微粉炭の場合に比べ、はるかに小さく、また粒子径も小さいことから、燃焼による発熱等の効果と石炭灰粒子が主流に及ぼす影響を省き計算を行った。

また今回、解析の対象としている炉の最高温度は1,000℃以上にもなることから、輻射による伝熱を考慮した。輻射伝熱は高温のガスや粒子の熱が電磁波として燃焼炉内を放射状に伝播し低温壁などに吸収された結果、熱移動が生じるもので、通常、温度の4乗に比例することか

表1 工業分析の結果

	石炭灰	微粉炭
チャー分(Wt%)	3.3	64
灰分(Wt%)	95.4	8
揮発分(Wt%)	1.3	28

表2 粒径

	石炭灰	微粉炭
最小粒径(μm)	0.5	70
最大粒径(μm)	100	200
平均粒径(μm)	12.1	134

¹ 琉球セメント株式会社

ら燃焼炉などの伝熱解析では無視できないものである。小型実験機の概略を図1、その解析モデルを図2に示す。図2において、入口1からはバーナーの高温流体（1,000℃以上）、入口2からはサイクロン2を通った低温流体（300℃前後）が流れ込む。それぞれの流体は、図中の丸で囲った部分で合流し、熱交換器を通った後、出口1から流出する。実際の小型実験機には熱交換器の後方に2つのサイクロンが設置されており、ここで改質された石炭灰を回収しているが、解析モデルでは形状の複雑化を避け、サイクロンを省いた流路をモデル化した。入口2の境界条件としては、サイクロン2後の流体の温度を与えた。今回のシミュレーションでは、壁面の断熱効率や入口2からの流入温度（実際にはサイクロン2を通った原料の温度を計測）等をパラメータとして計算を行い、定性的な手法を用いて熱交換器での温度分布に最も影響を及ぼす設計因子の特定を行った。

3 計算条件

3次元で作成した計算モデルに対して、離散化の基準領域となる計算メッシュを86,944個生成した。メッシュは主に、一辺の長さが10mmの六面体を用いて構成し、これで表現できない部分は更に細かい六面体の組み合わせで作成した。一般的にメッシュの大きさが細かいほど実際の現象を忠実に再現できると言えるが、メッシュ数が多くなると、それに伴い計算時間が指数関数的に増大するため、これらの兼ね合いでメッシュの大きさを設定してある。今回の計算時間は約2時間程度である。

使用した乱流モデルは標準のk-εモデル、輻射モデルとしてはDiscrete Ordinatesモデル(DOモデル)を用いた。また空気の粘度や熱伝導率等の物性値を表3に示す。表中の吸収係数は輻射伝熱を計算する時に用いる値であり、この値が大きいかほど輻射による伝熱量を大きく見積もることになる。それから入口境界条件および壁面の境界条件を表4、5に示す。入口条件の温度は実測値を用いており、速度はガス流量と管断面積から求めている。今回のシミュレーションでは、表4、5の境界条件による計算結果を基準とし、壁面の断熱特性や低温流体の温度（入口2）を変化させ、計算結果の相対的な変化を調べることにした。

実際の流路断面は図3のように正方形の断熱材（熱伝導率 $\lambda=14\text{W/m/K}$ ）を厚さ6mmの鉄板で覆う構造になっているが、計算モデルでは、形状や熱伝導率の異なるこれら2つの部材を1つの円柱形状の断熱材（ $\lambda=14\text{W/m/K}$ ）として換算し用いた。その結果、計算上の断熱材厚さは98mmとなった。

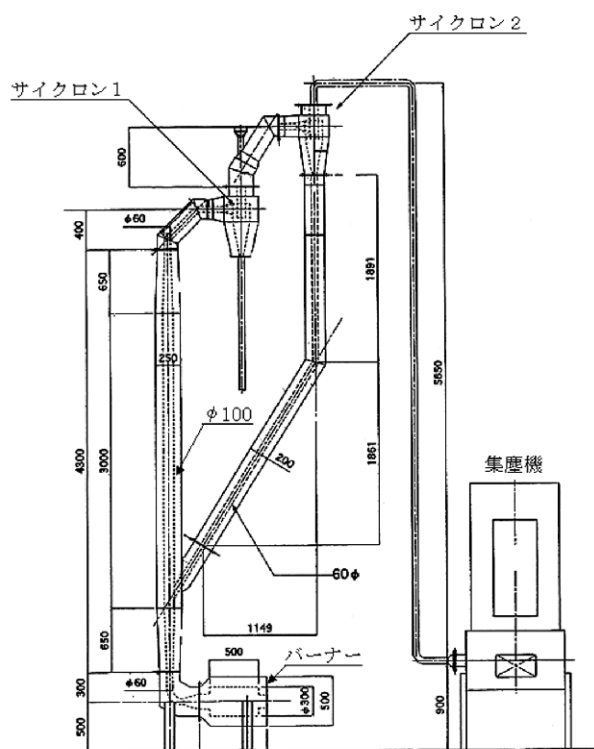


図1 小型実験機概略

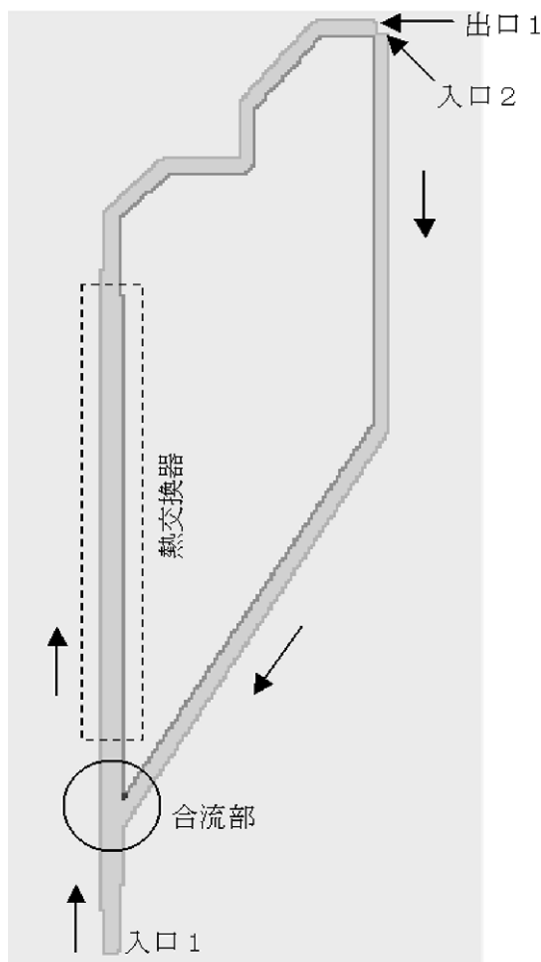


図2 解析モデル概略

4 解析結果と考察

計算された小型実験機の温度分布(°C)を図4に示す。境界条件から予想されたように、バーナーからの高温流体とサイクロンからの低温流体が熱交換器入口付近で混ざり合って上方に流れていく結果となっている。図5は流れの混合部の拡大図である。熱交換器における温度分布は、入口付近での混合流の影響が最上部でも残っているため様にはならないが、サイクロン1の入口付近では約740°Cの様な温度分布となっている。熱交換器前の温度は、境界条件で与えた1089°C、サイクロン1の入口までの温度低下量は約349度である。一方、実際に行った小型実験機での計測では、熱交換器前での温度が1089°C、サイクロン1の入口では673°Cであり温度低下量は416度となった。サイクロン1の入口付近での温度に関する解析値と実験値の誤差は約9%である。

このように解析結果と実験値が異なる理由としては、境界条件が現実の流れを反映したものでないという解析方法に起因するものと、実験機の断熱処理の不具合や計測誤差などの実験に起因する理由が考えられる。解析では入口2の境界条件として、投入する石炭灰の実測温度281°Cを与えているが、これがサイクロン2後の流体温度を正確に表しているとは言えない。また、今回は壁面の境界条件(表5)を熱交換器での内径(φ100)を基に定め、実験機全体にわたって同じ境界条件を用いているが、実際の装置では内径φ60の部分も多い。その結果、解析では現実よりも断熱効果を大きく見積もっていることになる。

これまでの石炭灰の性状分析の結果から、石炭灰に含まれる未燃炭素の燃焼は約400°Cから始まり、800°C程度でほぼ終了することが分かっているため、サイクロン1の入口付近での温度は800°C程度まで上げることが必要であり、小型実験機で得られた温度分布は、石炭灰の改質を行うには不十分なものであった。

図6に速度分布(m/s)を示す。入口1からの高温流体が24m/sで流れ込み、低速流体と合流した後、ほぼ様な速度14m/sの流れ場になっている。またサイクロン1の入口付近では管路断面積が小さくなることから、流速が約32m/sまで増加している。石炭灰粒子は質量が小さく、勢いの強い燃焼流によって流れていくことを考えると、熱交換器内での石炭灰の滞留時間は約0.2秒と推定される。

次に入口2からの流体温度と壁面の断熱特性について設定値を変更し、それに伴う解析結果(熱交換器での温度低下量)の変化を調べた

表3 空気の物性値

熱伝導率(W/m/K)	0.0242
粘度(kg/m/s)	1.789×10^{-5}
吸収係数(1/m)	0.2

表4 入口境界条件

	入口1	入口2
速度(m/s)	24.0	10
温度(°C)	1089	281
流体直径(m)	0.015	0.015

表5 壁面の境界条件

吸収係数(1/m)	0.2
熱伝導率(W/m/K)	1.4
熱伝達率(W/m ² /K)	10
厚さ (m)	0.098

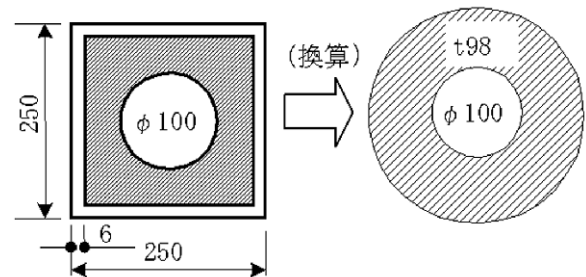


図3 流路断面形状

図7は断熱材の厚さを2倍の値にして計算を行った結果である。これによるとサイクロン1の入口付近は約789°Cであり、熱交換器での温度低下量は約300度となる。また、入口2からの流入温度を2倍にした場合は、サイクロン1の入口付近は約826°C、熱交換器での温度低下量は約263度となった。これらの結果から、熱交換器での温度分布を高く保つための方法としては、断熱材の材質や寸法を変更するよりも、サイクロン後のダクト径を小さくすることや、原料温度を高くする等が有効であると考えられる。

石炭灰の改質を効率良く行うためには、石炭灰と高温流体との熱交換が活発に行われれば良いので、これまで考えたような熱交換器における温度低下量を小さく抑えること以外に、熱交換器内での石炭灰と高温流体との接触時間を長くすることも1つの方法である。接触時間を長くするためには、管路にセラミック製のハニカム状フィルタ等を設け、流速を小さくすることや、壁面に突起を設け積極的に渦を発生させることで灰粒子の滞留時間を長くすることが考えられる。ただ、これらの方法はメ

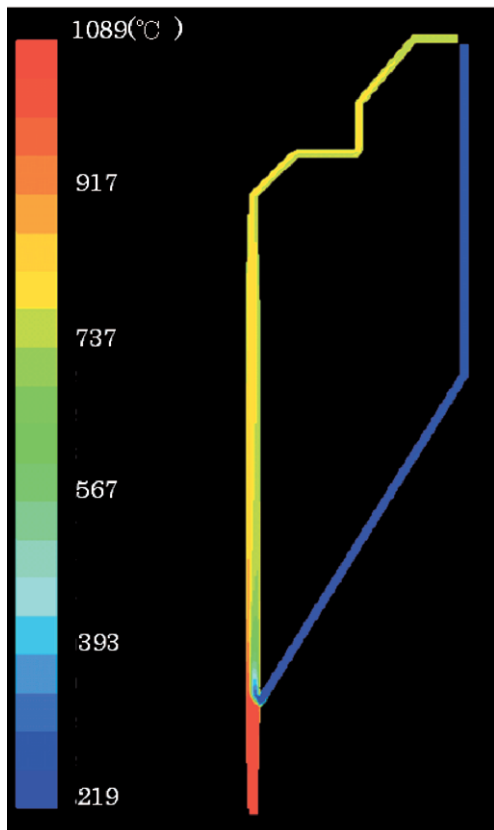


図4 温度分布

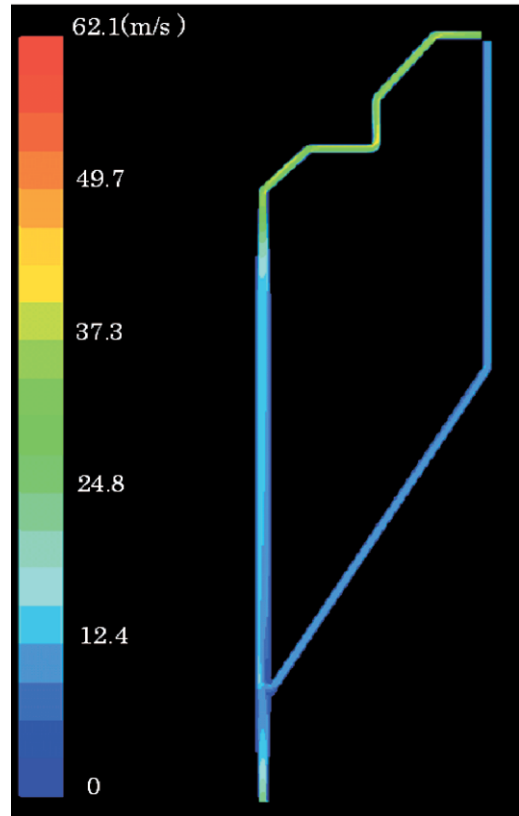


図6 速度分布

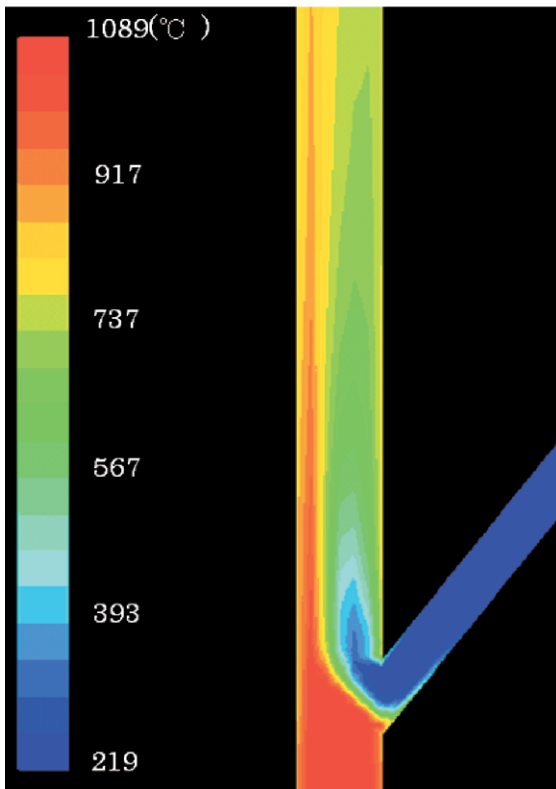


図5 温度分布の拡大

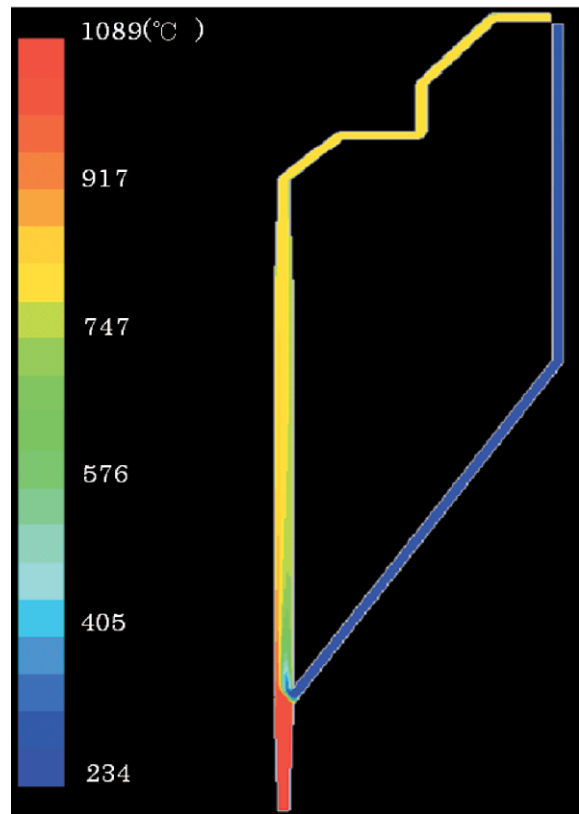


図7 温度分布

メンテナンス上の問題も少なくない。

最後に実証装置での温度計測の結果を図8に示す。図中の流体速度は設計値である。実証装置では、熱交換器における温度低下の大きな原因と考えられた2つ目のサイクロン後での原料温度を510℃と高くすることができた。また、熱交換器とサイクロン後のダクト径の比を大きくし（小型実験機の約1.8倍）、熱交換器に流れ込む低温流体の影響を少なくした。更に断熱特性を上げるため、小型実験機で使用した断熱材に加え熱伝導率が0.03(W/m/K)の断熱シートを追加し、トータルでの断熱特性を小型実験機の約15.6倍とした。これらの改良の結果、バーナーからの温度が実験機よりも若干低いにもかかわらず、サイクロン1の入口付近の温度は860℃と高く保つことができ、石炭灰の改質を行う上で十分な高温を実現することができた。

5 まとめ

熱流動シミュレーションによって熱交換器での温度分布を調べた結果、サイクロン2から熱交換器に流れ込む流体の温度と流速が、熱交換器での温度分布に大きな影響を与えることが分かった。熱交換器での温度分布は、バーナーからの高温流体とサイクロン2からの低温流体がどのように混ざり合うかで決定されるので、熱交換器での温度を理想的に保つためには、断熱材の選定だけでなく、熱交換器とサイクロン2後の流路の相対的な関係から、流路内径やサイクロンの選定を行う必要があったと言える。

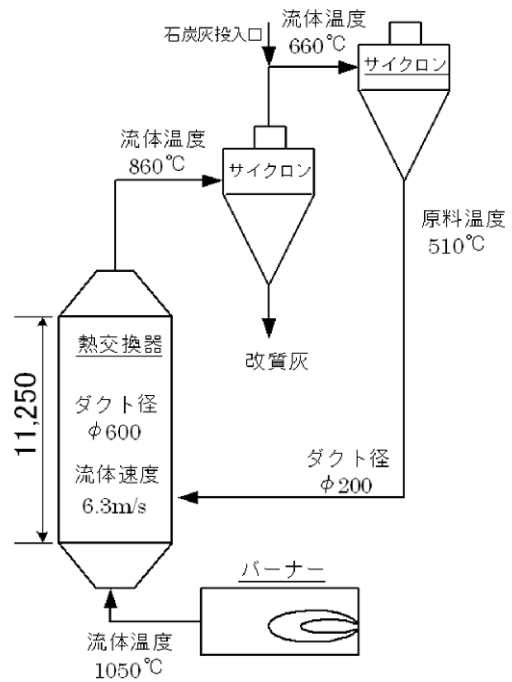


図8 実証装置各部の温度

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。