

焼結層内のin situ測定による温度分布， 燃焼挙動の可視化

Temperature Distribution and NO_x Emission Profile in the Sinter Beds Visualized by in-situ Measurement Techniques

平 健 治*
Kenji TAIRA

抄 録

焼結工程では，装置内に充填された原料層の内部で焼結反応が進行する。充填層内部での反応の理解により，さらなるプロセス改善を可能とすることを目指し，焼結反応中の焼結層内部の温度分布と，燃焼に伴うNO_x発生について，その場観察を行った。温度測定では，焼結層内部で熱電対を走査し，得られた温度データを解析することで，充填層内部の温度分布の時間変化を可視化した。燃焼時のNO_x発生に関しては，焼結層内部のガス分析を実施し，ガス組成の経時変化を解析することで，燃焼帯内の下層側においてNO_x発生量とNO_x転換率の双方が大きいことを確認した。

Abstract

All the chemical reactions in the sintering process of the steel industry proceed in a packed bed along with the combustion of coke particles. Although detailed information is desired for pursuing the higher productivity and the lower environmental load of the process, it is difficult to monitor the inside of packed bed during combustion. This report shows experimentally determined temperature distribution and NO_x emission profile during combustion in the packed bed. The in-situ temperature measurement was performed by scanning a sheathed thermocouple in the sinter bed. The information on the temperature variation during sintering showed a clear correlation between the quality of the sinter and the sinter heat pattern for each layer. The time-course profile of NO_x emission was also determined by analyzing the results of in-situ gas measurement during packed bed combustion. Both the emission of NO and the conversion rate were found to be higher in the lower-temperature region in the combustion layer, corresponding to the beginning of coke combustion. The presented in-situ measurement techniques enabled unprecedented detailed discussions with the data on the temperature and gas composition inside the sinter bed during sintering.

1. 緒 言

日本国内で製造される鉄は年間約1億tであり，そのうちの8千万t程度は高炉と呼ばれる大型の反応装置で製造されている¹⁾。高炉の内部に，酸化鉄と炭素などの原料を投入し，酸化鉄を還元することで金属の鉄を製造しているが，このとき，粒子径が小さい粉状の原料を投入してしまうと，高炉の内部で詰まり，ガスが流れなくなって反応が進行しなくなる²⁾。塊状の鉄鉱石を購入し利用すればよいが，実際には，輸入される鉄鉱石の大部分が小粒径であるため，あらかじめ適度なサイズに焼き固めたうえで高炉に投入する必要がある。この焼き固められた鉄鉱石が焼結鉱

であり，焼結鉱を製造するプロセスが焼結工程である。

焼結工程の概略図を図1に示す。数珠状に連なった台車上に，鉄鉱石，石灰石，コークスなどの原料を投入し，図中の右方向へと台車を移動させながら表層をバーナーで着火する^{3,4)}。充填層内部を下方向へ流れる空気流に沿って，より下層のコークスへと燃焼が伝播していき，最終的に全体が焼き固まった焼結鉱となる。銑鉄1t製造するのに1.1～1.2tの焼結鉱が利用されており⁵⁾，日本国内で年間約1億tの焼結鉱が利用されている計算となる。出来上がった焼結鉱は適度なサイズに碎かれ，高炉へと投入される。

膨大な量が製造される焼結鉱であるが，ただ固まっていればよいわけではなく，その化学的性質も重要となる。焼

* 先端技術研究所 環境基盤研究部 主任研究員 博士 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

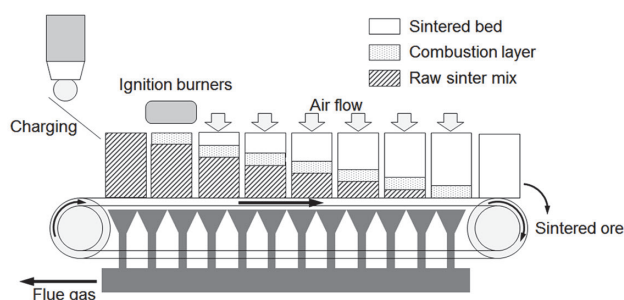


図1 焼結プロセス概略図
Schematics of the sintering process

結鉱の化学状態によって高炉内での還元反応速度が大きく変わることが知られており、焼結鉱の品質向上に向けた研究開発が進められている。原料の充填の仕方^{6,7)}、原料の配合や組成比^{8,9)}、粒径分布を制御し、バーナー着火後、焼結反応が完了するのを待って、得られた焼結鉱の品質を評価することで研究が進められている。このとき、焼結反応は充填層の内部で進行する反応であり、試験装置の外側からモニターすることが難しいという課題がある。

反応温度は最高で1300℃を超え、しかも、燃焼箇所が上から下へと経時的に移動するという非正常な反応である。測定に際して注目すべき場所が移動してしまうため、一般的な測定法が適用しにくい。また、焼結層内に充填された酸化鉄は、マイクロ波からX線まで幅広い電磁波を強く吸収するため、分光的な手法を適用することも難しい。そこで、焼結層の内部での反応の経時変化を可視化するための手法を開発すれば、焼結反応を制御するための技術開発が促進できると考え、さらなるプロセス改善に役立てることを目的に、焼結層内部での反応を可視化するための測定手法の開発を行った。本報告では、焼結層内部の温度分布¹⁰⁾と、焼結層内部の燃焼の様子を分析した結果⁹⁾について紹介を行う。

2. 本 論

2.1 焼結層内の温度分布の可視化¹⁰⁾

2.1.1 背景

前述の通り、焼結鉱の高い歩留と高い品質とを実現することを目的に、多数のパラメーターに着目した研究が進められてきた。近年では、焼結層内の温度分布の時間変化(ヒートパターン)が特に注目されている^{11,12)}。バーナーで表層を着火し、上層から下層のコークスへと燃え移る過程で、燃焼部分の温度が徐々に変化していく。上層は温度が低くなりやすく、一方で下層は高くなりやすいことが知られている。その結果、上層部は歩留が低くなりやすく、下層部では歩留は高く保持されるものの、過度に高温条件に曝されるために高炉内での反応に適さない相が出現しやすい。こうした現象を避けることを目的に、原料層の上下方向に対して、コークスの量や粒子径に意図的に分布を持た

せる手法が開発され、利用されている¹³⁻¹⁶⁾。コークスだけでなく、鉄鉱石の種類や粒子径にも分布を持たせることも広く検討されている¹⁷⁾。

さまざまな施策が焼結層内のヒートパターンに対して与える影響を調べるために、焼結反応試験の際には、装置の側面より熱電対を10cm以上の間隔で数本挿入し、各点の温度変化が測定されている。より多くの点に熱電対を差し込めば、より詳細にヒートパターンを調べることも可能であるが、熱電対を側面から差し込んだ箇所では、原料層が崩れてしまい通気状態にも影響がでる。さらには、試験装置の側面に空けた穴から鍋の内側に空気が漏れこむことも避けられない。したがって、側面から熱電対を装入する方式では、数点での測定が限界となる。一方で、原料自身にも粒度分布があり、完全には均一ではないため、原料を投入する際には不可避免的に場所むらが生じてしまう。より多くの点で温度測定を行い、場所むらも含めてヒートパターンを評価することで、より有意義なデータを取得することができると考えられる。

反応場での温度分布を詳細に調べたいというニーズは他業種でも存在し、実験室スケールでの触媒反応試験において、サブmmという高い空間分解能で触媒層内の温度分布を達成した報告がいくつか存在する^{18,19)}。そうした報告では、触媒層の流れ方向に熱電対を走査することで温度の場所依存性を調査していた。充填層内部で熱電対を走査するというアプローチは焼結層にも適用可能だと考えて検討を行うこととした。焼結反応は、触媒反応と比べて層内の最高温度が高く、酸化物の融液が生成する他、燃焼部が経時的に移動するなど、測定の難易度が高い部分はあったが、測定方法とデータ解析法の工夫によって測定を達成した¹⁰⁾。測定法詳細と測定結果の一部について以下で述べる。

2.1.2 実験

実験方法の概略を以下に示す。さらに詳細な実験条件は発表済みの論文をご確認いただきたい¹⁰⁾。図2に示すような内径100mm、層厚440mmの鍋試験装置を用いて試験を実施した。断熱材としてガラスウールを内壁に固定し、鍋試験装置の中心軸に沿って外径1.8mm、内径1.2mmのアルミナ管(トリオセラミックス、PTOシリーズ)を固定した。標準的な配合の原料を鍋試験装置内に投入した。表層をバーナーで60s間着火した後すぐに、外径1.0mmのシースK熱電対(岡崎製作所、HOSKINS2300シリーズ)をアルミナ管に挿入し、電動スライダ(オリエンタルモーター、EASシリーズ)で上下方向へ走査しながら温度を測定し、データロガーで記録した。鍋試験装置下のウィンドボックスの負圧を350mmH₂Oに保持した条件で空気を流通させ、焼結反応を進行させた。焼結反応が完了するまで、熱電対での温度測定を継続した。焼結反応完了後、得られた焼結鉱を層厚方向に7等分し、それぞれをシャッター試験にか

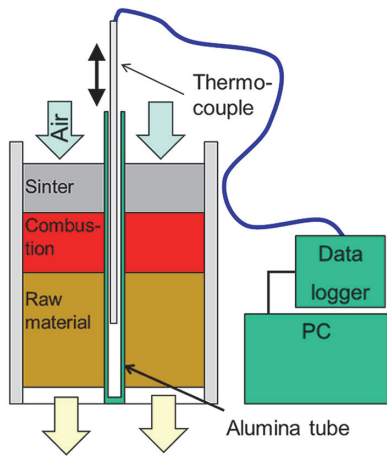


図2 温度測定のための鍋試験の概略図
Schematic of the pot test equipment for in situ temperature measurement

け、粒度分布を測定した。

2.1.3 結果と考察

本研究では、焼結層内部で熱電対を上下方向に走査しながら温度測定を行い、そのデータを解析することによって、焼結層内部の温度分布とその時間変化を可視化した。以下では、その解析の手順について示すとともに、得られた結果を用いた考察の一部を紹介する。

図3に、熱電対先端部の位置の時間変化を示す。上下方向へと熱電対を移動させながら、燃焼帯の付近の温度を測定し、燃焼帯が下方向へと移動するにあわせて、走査する位置を下方向へと移動させた。燃焼帯の付近のみ集中的に温度を測定した理由は大きく2つある。

1つ目の理由は、その他の部分の温度はそれほど重要でないためである。着火前の部分は70℃前後で一定となっていることは他の測定でも確かめられている。着火後の部分についても、燃焼完了後しばらくして以降は、主たる反応は完結しているため、その部分の温度は焼結鉄の品質への影響は小さい。2つ目の理由は、測定の時間分解能を高めるためである。熱電対を移動させる距離を短くすると、単位時間当たりで往復できる回数が増え、より高頻度で燃焼帯の温度を測定することができることとなる。熱電対を走査させることで得られた温度測定結果を図4に示す。燃焼帯の付近を幾度も行き来した結果、多数のピークが検出されていることが分かる。検出されているピークの一つ一つが、燃焼帯前後での走査に対応している。

以上の図3と図4の結果から、時刻と位置、そして温度という3次元の情報の相関関係が得られた。このデータを、MATLABを用いて3次元グラフで描画した結果が図5である。この時、データ間隔は10sと2mmとし、データが存在しない箇所については、周囲のデータからの内挿補間を実施した。図5を見ると、上から下方向へと燃焼が伝播していくにつれて、燃焼の前後で高温に保持される時間が

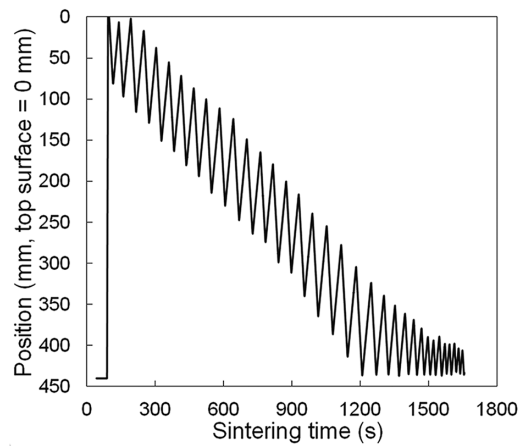


図3 熱電対での測温位置の時間変化
Time variation of the thermocouple-tip position during sintering

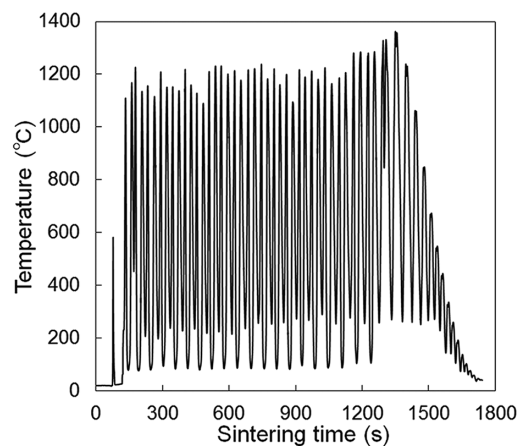


図4 測定温度の時間変化
Time variation of the monitored temperature during sintering

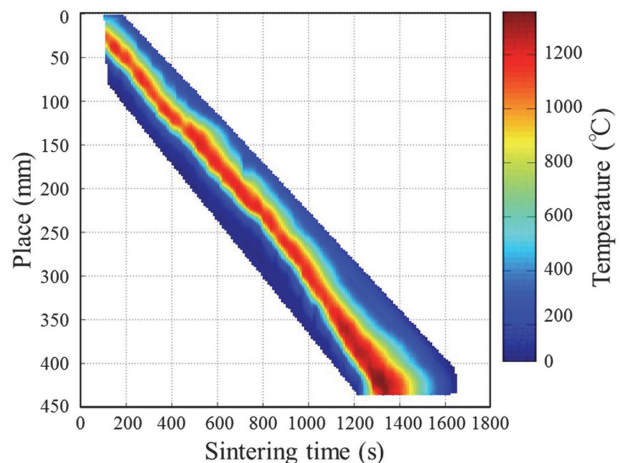


図5 焼結層内の温度分布の時間変化
Time variation of the temperature distribution

長くなっていることが分かる。特に、焼結層の下側を見ると、上層部や中層部と比較してピーク温度も高くなっている。これは、従来から知られている傾向と合致するものである^{7,11,12)}。このように、本測定手法によって、焼結層の層厚

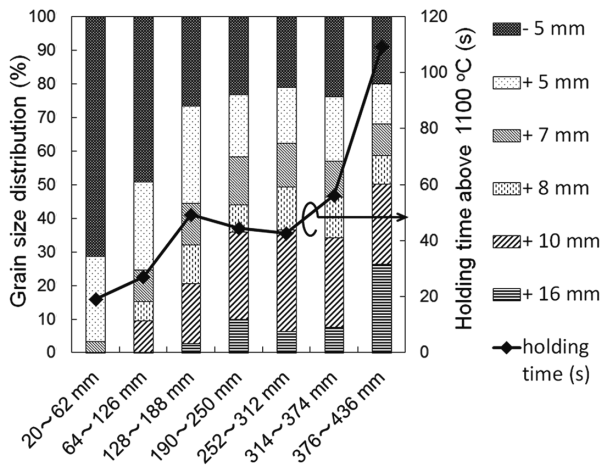


図6 各層における1100℃以上の高温保持時間とシャッター試験後の粒度分布との関係
Average holding time of temperature above 1100°C, and the grain size distribution after the shutter test for each portion of the sinter

方向に対して、高い空間分光能で温度分布の時間変化を測定することができた。

得られたデータを活用することで、さらに詳細な議論を行うことも可能となる。ここでは紙面の関係で、焼結層の歩留と温度変化との関係についてのみ紹介する。焼結鉍の組織構造と、焼結反応の際に高温に保持された時間との間には強い相関があることが知られている²⁰⁻²²⁾。一般には、高温に保持された時間が長いほど、歩留が高くなる傾向がある。そこで、図5から、各位置の層が1100℃以上に保持された時間を計算し、対応する層における歩留の測定結果と比較した。その結果を図6に示す。ここでは、ふるい目5mm上の焼結鉍の割合を歩留の指標として評価を行った。

表層の126mmまでの部分については、1100℃以上に保持された時間が長くなるにつれて、ふるい目5mm上の粒子の比率が高まっているのに対し、それより下層の128～436mmの部分については、高温保持時間と歩留との関係は小さくなった。一方で、最下層の376～436mmについては、ふるい目16mm上のような粒子の大きい焼結鉍の比率が高まった。このように、焼結層内部の温度変化を詳細に調べることができるようになった結果、焼結鉍の品質と焼結層内の温度変化との関係をより詳細に対応付けることが可能となった。同様の測定を、原料の偏析条件や着火条件を変化させながら実施することで、それぞれの施策が、層厚方向のどの位置に対し、どれだけの効果を発揮するかを定量化することが可能となると考えられる。

2.2 焼結層内のガス分析による燃焼挙動の可視化³⁾

2.2.1 背景

前述の通り、日本国内では年間約1億tという膨大な焼結鉍が利用されており、その製造のために投入されるエネルギーと、それに伴う排ガスの量も甚大である。光化学ス

モッグの原因となるNO_xの排出量は特に多いことが知られており^{23,24)}、一貫製鉄所全体で排出されるNO_xのうち約35%は焼結工程から放出されている²⁵⁾。焼結鉍の品質を高めることも重要であるが、その製造に伴う環境負荷を抑制することも非常に重要であり、古くよりNO_x排出量低減に向けた研究開発が進められている。

焼結工程から排出される排ガス中に含まれるNO_xを除去するために、多くの製鉄所に排ガス処理設備が設置され、利用されている。活性炭や触媒を設置した設備の内部でNH₃を噴霧し、排ガス中のNO_xと反応させることでN₂へと還元除去している。一方で、そもそも焼結工程からNO_xを発生させないことを目的に、石炭の種類を選定や、コークスの前処理方法の開発などが行われ、実機化されている。

さらなる操業条件の検討によって、焼結工程のNO_x排出量削減が期待されるが、これは非常に難易度の高い研究である。

その原因の1つとして、焼結層内部での非定常的な燃焼挙動が挙げられる。固体燃料の燃焼に伴うNO_x発生は古くから研究されており、燃焼温度^{26,27)}、燃料の粒子径^{27,28)}、燃焼時の雰囲気²⁶⁾、燃料と接触する化合物の種類によって²⁹⁻³¹⁾、NO_xの発生の仕方が大きく変化することが知られている。焼結工程では、前述の条件のいずれもが、時間経過に伴って同時に変化する。刻一刻と燃焼条件が変化するために、排ガス組成を見るだけでは、いつ、どこで、どれだけNO_xが出ているのかを同定することができない。したがって、NO_x排出量削減のための施策のそれぞれが、どの部分におけるNO_x発生抑制にどれだけ寄与しているかも議論ができず、研究を進めるに際して支障となっている様子が見受けられた。

そこで、NO_x排出量削減に向けた技術開発を促進することを目的に、焼結層内部での燃焼に伴うNO_x発生挙動の可視化を進めている。本報告では、焼結工程で広く利用されるコークスを燃料として用いて実験を行い、一般的な操業条件でのNO_x発生挙動について議論を行った結果を紹介する³⁾。

2.2.2 実験

実験方法の概略を以下に示す。詳細な実験条件と測定方法については、既報の論文を参照頂きたい³⁾。原料配合は標準的な配合とし、凝結剤としてコークスを3.8wt%だけ加えた。用いたコークスの化学組成を表1に示す。灰分量はJIS M 8812、C、H、Nの量はJIS M 8819、Sの量はJIS M 8813に従ってそれぞれ決定した。Oの量は、以上の差分を用いて計算した。

図7に実験の概略を示す。内径100mm、層厚440mmの鍋試験装置を利用し、ガラスウールの断熱材を内壁に敷き詰め、前述の原料を試験装置に投入した。鍋試験装置の側面に開けられた穴(表層から120mm)から、温度測定用

表 1 コークスの組成分析結果

Ultimate and proximate analysis results of coke

	C	H	O*	N	S	Ash
Ratio (dry basis, wt%)	85.5	0.3	2.7	1.1	0.6	9.8

* Amount of oxygen was calculated by subtracting other values from 100%.

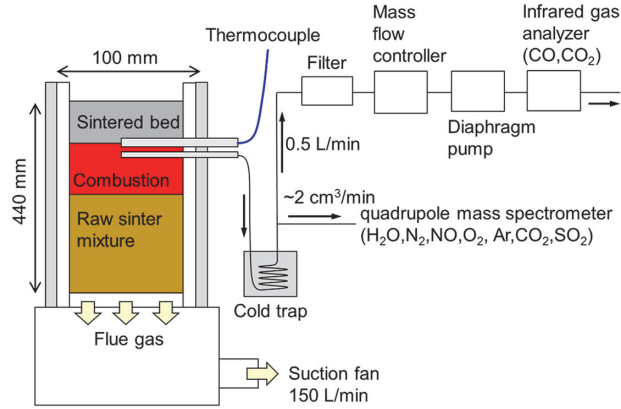


図 7 焼結試験中のガス分析方法の概略図

Schematic of in situ gas measurement during combustion

の K 熱電対 (岡崎製作所, HOSKINS2300 シリーズ, 外径 1.6 mm) とガスサンプリング用のアルミナ管 (トリオセラミックス, PTO シリーズ, 外径 1.8 mm, 内径 1.2 mm) を挿入した。このとき, 熱電対とガスサンプリング用のアルミナ管の先端部の位置をほぼ一致させ, いずれも原料層の中心軸付近となるようにした。ガスサンプリング用のチューブは, 図 7 に示すように氷浴トラップを経由したうえで, 四重極ガス分析計 (Pfeiffer Vacuum, OmniStar GSD 320), および, フィルターを介してマスフローコントローラーとダイアフラムポンプ, 非分散型赤外線ガス分析計 (横河電機, IR200) に接続した。

ガスサンプリング用のチューブから, 0.5 L/min でガスサンプリングを開始してから, 表層をバーナーで 60 s 着火し, 空気流量 150 L/min 一定の条件で焼結反応を実施した。サンプリングされたガスは, 氷浴トラップで除湿され, 四重極ガス分析計と赤外ガス分析計でそれぞれ分析された。四重極ガス分析計では, $m/z=18(\text{H}_2\text{O}^+)$, $28(\text{N}_2^+)$, $30(\text{NO}^+)$, $32(\text{O}_2^+)$, $40(\text{Ar}^+)$, $44(\text{CO}_2^+)$, $64(\text{SO}_2^+)$ の各イオンを分析し, 赤外ガス分析計では CO と CO₂ の分析を行った。両者の CO₂ 濃度の測定結果を比較し, 測定結果の妥当性を評価した。

2.2.3 結果と考察

焼結反応中に側面からサンプリングしたガスの分析結果を図 8 に示す。時間変化とともに, 測定位置の温度と, サンプリングされるガス組成が変化していくことが分かる。測定時刻 530 s の時点では, CO₂ 濃度が 10% 程度と高いが, 680 s ではほぼゼロとなっている。このガス組成の経時変化

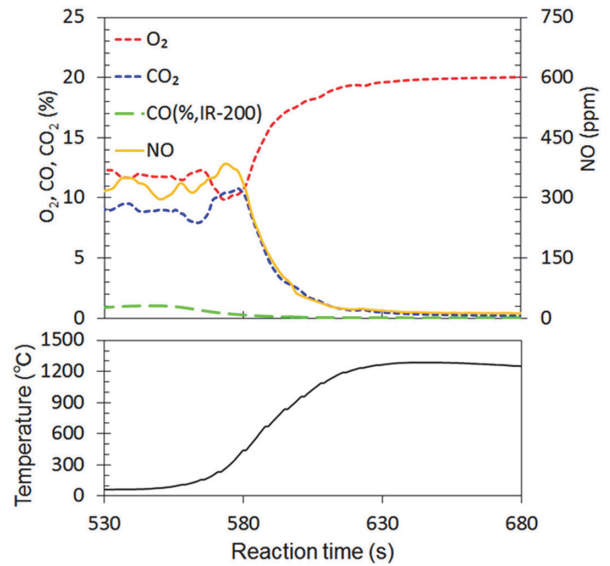


図 8 ガス分析結果

In situ gas measurement results

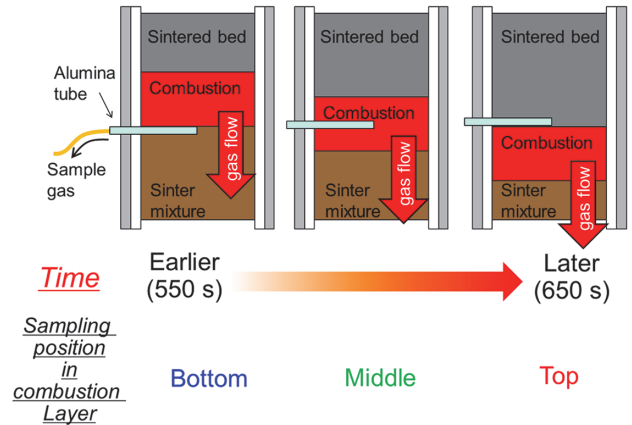


図 9 ガスサンプリング位置の経時変化

Time variation of the sampling position in the combustion layer

は, サンプリング位置と, 焼結帯との相対的な位置によって説明することができる。図 9 に示す通り, 測定時刻が 550 s 付近においては, 焼結帯の下端付近にサンプリング部が存在する。したがって, 焼結帯で放出された排ガスをサンプリングすることとなる。一方で, 測定時刻 650 s 付近においては, 焼結帯の上端付近にサンプリング部が位置する。この時には, 焼結帯に流入する前の空気をサンプリングすることとなるので, サンプリングされたガスの組成は空気とほぼ同じとなる。測定時刻が 550 s と 650 s の間では, その中間的な組成となると理解できる。

上述の通り, サンプリングされたガスの組成は, 焼結帯とサンプリング部の相対的な位置によって決まっており, 測定時刻 550 s の測定結果は, 焼結帯下部のガス組成に対応しており, 測定時刻 650 s の測定結果は, 焼結帯上部のガス組成結果に対応している。焼結帯がほぼ一定の速度で下層方向に進んでいることを考慮すれば, 図 8 のグラフを,

燃焼帯内での相対的なサンプリング位置に置き換えて考えることができるはずである。本試験条件では、燃焼帯の進行速度は 16.3mm/min と計算されたため、この値を用いて、燃焼帯内での各位置におけるガス組成分布のグラフとしたものを図 10 に示す。

このとき、焼結層内での渦発生とサンプリング過程でのガスの混合とを考慮して、各測定点前後の 3.75 mm で値を平均化した。横軸を位置で置き換えたグラフとすることによって、燃焼帯内でのガスの流れを、ガスの流れに着目して議論することが可能となる。これを、模式的に示したものが図 11 である。燃焼帯の上流側 (図 10, 11 中の右側) から空気が流れてきて、空気中の O₂ が燃焼帯内でコークスが燃焼し、CO₂ や NO が放出される。これにより、下流側 (図 10, 11 中の左側) に行くに従って CO₂ と NO の濃度が上昇すると解釈することができる。

測定されたガス濃度を、各位置でのガス濃度に置き換え

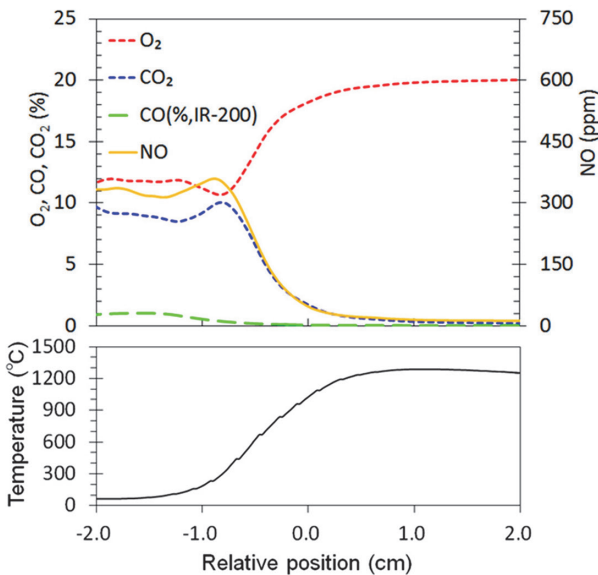


図 10 燃焼層内部での相対位置とガス組成との関係 (正の値が層の上方向に対応)
Gas composition at each relative position inside the combustion layer; a positive value corresponds to the upward direction

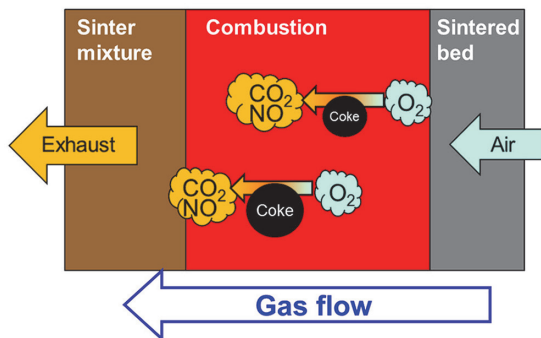


図 11 燃焼帯内部でのガス組成変化の模式図
Schematic of gas composition change inside the combustion layers

ることによって、ガスの流れに着目した議論ができることが分かった。具体的には、各位置で発生したガスが、その位置よりも下流のガスに混じり、また、各位置で消費されたガスが、その位置よりも下流のガスからは取り除かれるのである。これより、ガス組成を位置によって微分することによって、各位置でのガス発生量と消費量を計算することができると考えられる。本実験条件では、コークスはほぼ完全燃焼しており、燃焼前後でのガス成分のモル流量変化は無視できる。また、流量一定条件で実施しているため、焼結層内に流入する空気中の不活性ガスである N₂ のモル流量はほぼ一定とみなすことができる。したがって、以下の式が成り立つ。

$$F_{N_2} \times \frac{d \frac{C_{CO_2}(x)}{C_{N_2}(x)}}{dx} = A_{CO_2}(x) \quad (1)$$

$$F_{N_2} \times \frac{d \frac{C_{O_2}(x)}{C_{N_2}(x)}}{dx} = A_{O_2}(x) \quad (2)$$

$$F_{N_2} \times \frac{d \frac{C_{NO}(x)}{C_{N_2}(x)}}{dx} = A_{NO}(x) \quad (3)$$

$$F_{N_2} \times \frac{d \frac{C_{CO}(x)}{C_{N_2}(x)}}{dx} = A_{CO}(x) \quad (4)$$

ここで、 x は相対位置、 F_{N_2} は N₂ のモル流量、 $C_X(x)$ はガス種 X のモル濃度、 $A_X(x)$ はガス種 X の単位厚み当たりの発生量である。

以上の式により、各ガス濃度の位置依存性 (図 10) を数値微分することによって、図 12 に示すように各位置での

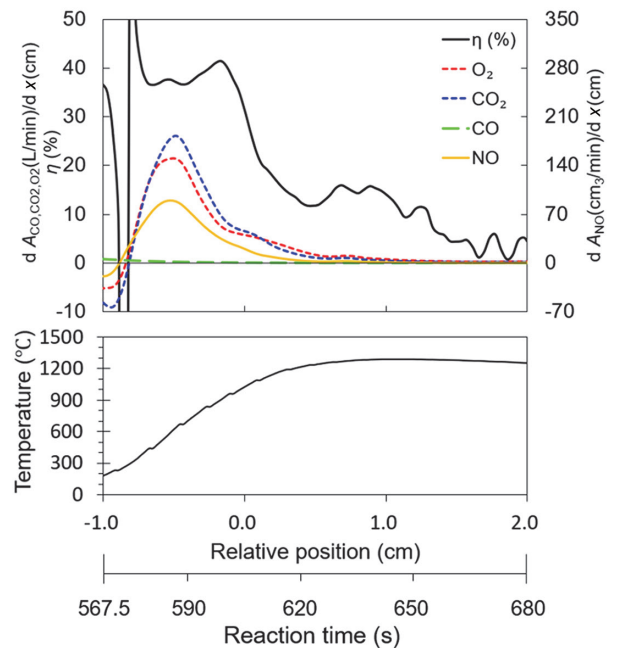


図 12 各相対位置、および、反応時間における、O₂ 消費量と他のガスの発生量
O₂ consumption and NO emission at each position during combustion and the reaction time

ガス発生量のグラフを得ることができる。図 12 の 580s 前後で層内の温度が上昇し、コークスの燃焼によって多量の O_2 が消費され、 CO_2 と NO が放出されていることが分かる。一方、焼結層の温度が上昇し終わる 630s 付近では、コークスの燃焼は完了しており、いずれのガスの消費も放出も少なくなっていることが分かる。以上の議論によって、コークスの燃焼は、燃焼帯の特に前半部（下層側に対応）で進行する割合が高いことが分かる。 NO の発生量も同じ場所が多くなっていることが分かった。

各位置におけるガス濃度を微分することで、燃焼帯の各位置で発生するガスの量を調べることができた。これにより NO の発生量は、燃焼帯の下層側で特に多いことが確認されたが、 NO 発生量を抑制する手法について議論するには、 NO_x 転換率と呼ばれる別の指標を用いて議論する必要がある^{27,32)}。 NO_x 転換率とは、コークス中に含まれる N のうち、 NO_x に変換される割合を示すものである。燃料として利用される炭材の種類によって含有される N の割合は異なっており、 N の量が多い石炭を利用した場合には当然のことながら NO 発生量が多くなりやすい。

一方で、含有される N のうち NO になる割合が低ければ、同じ量の N が含まれていても NO の発生は少なく抑えられる。したがって、焼結工程からの NO 発生量を抑制する際には、 NO_x 転換率を低く抑えることが志向される。そこで、燃焼帯内での各位置での NO_x 転換率を計算することを試みた。ここで、コークス粒子中には N がほぼ均一に賦存していると仮定し、また、コークス粒子の外側から未反応核モデルに従って外側から燃焼が進行すると仮定すると、コークスの燃焼に消費された O_2 の量と、 NO の放出量とから、以下の式 (5) によって、各位置の NO_x 転換率を推定することができる。ここで、 M_C 、 M_N はそれぞれコークス中の C 、 N のモル比を示し、 A_X は注目した位置でのガス種 X の発生量である。

$$\eta (\%) = \frac{M_C}{M_N} \times \frac{A_{NO}}{A_{O_2} \times \frac{A_{CO_2} + A_{CO}}{A_{CO_2} + \frac{1}{2}A_{CO}}} \times 100 \quad (5)$$

式 (5) を用いて計算した、燃焼帯内部の各位置での NO_x 転換率の値を図 12 にあわせて示した。各ガスの発生量のグラフと比較すると、 CO_2 や NO の発生量が多い場所において、 NO_x 転換率も大きくなっていることが分かる。すなわち、燃焼帯の下層側において NO の発生量も NO_x 転換率も大きくなっていることが確認された。

これまで多くの報告で、焼結層内の燃焼に伴って発生する排ガスについてその組成の分析結果が示されているが、その燃焼帯の内部での NO_x 転換率の分布を示したものは本報告が初めてである。本手法によって、焼結層内部での NO_x 発生挙動が明確化され、 NO_x 発生抑制のために進められてきた施策について、具体的にどの部分における NO_x 発生抑制に対して効果が発揮されているのかを議論することが可能となった。今後、各手法が NO_x 発生量に対して与

える影響を可視化するとともに、それによって得られた知見を踏まえて、さらなる NO_x 発生量低減に向けた手法の開発に役立てていきたい。

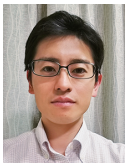
3. 結 言

焼結工程では、可動式のパレットに充填された原料層の内部で焼結反応が進行する。充填層内部での燃焼に伴う化学反応は、外部から観察することが難しく、焼結工程のさらなる生産性向上や環境負荷低減に向けた開発を行ううえで支障となっている。そこで、焼結反応最中の焼結層内部の温度分布と、燃焼に伴う NO_x 発生について、可視化するための検討を行った。温度測定に関しては、焼結層内部で熱電対を走査し、それによって得られた温度データを解析することで、充填層内部の温度分布の時間変化を可視化することに成功した。燃焼時の NO_x 発生に関しては、焼結層内部のガスサンプリングを実施し、燃焼帯の移動に伴うガス組成の変化を解析することによって、燃焼帯内の下層側において NO_x 発生量と NO_x 転換率の双方が大きいことを確認した。さまざまな操業条件での試験に対して本分析手法を適用することで、既存の技術の効果を検証するとともに、今後の技術開発に役立てていきたい。

参考文献

- 1) The Japan Iron and Steel Federation: The Japan Iron and Steel Federation (Statistics & Analysis) (2018). at <<http://www.jisf.or.jp/en/statistics/>>
- 2) Kawaguchi, T., Matsumura, M.: Tetsu-to-Hagané. 100 (2), 148-159 (2014)
- 3) Taira, K.: Fuel. 236 (15), 244-250 (2019)
- 4) Zhou, H., Zhou, M., Liu, Z., Cheng, M., Chen, J.: Fuel. 179, 322-331 (2016)
- 5) JFE Steel Corporation: JFE 21st Century Foundation (2003). at <<http://www.jfe-21st-cf.or.jp/>>
- 6) Oyama, N. et al.: ISIJ Int. 45 (6), 817-826 (2005)
- 7) Machida, S. et al.: ISIJ Int. 49 (5), 667-675 (2009)
- 8) Lu, L., Holmes, R. J., Manuel, J. R.: ISIJ Int. 47 (3), 349-358 (2007)
- 9) Matsumura, M., Hoshi, M., Kawaguchi, T.: ISIJ Int. 45 (4), 594-602 (2005)
- 10) Taira, K., Matsumura, M.: ISIJ Int. 58 (5), 808-814 (2018)
- 11) Toda, H., Senzaki, T., Isozaki, S., Kato, K.: Trans. Iron Steel Inst. Japan. 24 (3), 187-196 (1984)
- 12) Toda, H., Kato, K.: Trans. Iron Steel Inst. Japan. 24 (April 1982), 178-186 (1984)
- 13) Honorato, E. P., Seshadri, V.: Ironmak. Steelmak. 35 (6), 405-415 (2008)
- 14) Kasai, E., Komarov, S., Nushiro, K., Nakano, M.: ISIJ Int. 45 (4), 538-543 (2005)
- 15) Lu, L., Ishiyama, O.: Iron Ore Sintering in Iron Ore. Elsevier,

- 2015, p.395-433, doi:10.1016/B978-1-78242-156-6.00014-9
- 16) Ishiyama, O., Hara, K., Matsumura, M., Higuchi, K., Nomura, S.: Tetsu-to-Hagané. 103 (10), 564-569 (2017)
- 17) Iwami, Y. et al.: Tetsu-to-Hagané. 103 (6), 325-334 (2017)
- 18) Touitou, J. et al.: Analyst. 138 (10), 2858 (2013)
- 19) Touitou, J. et al.: J. Catal. 319, 239-246 (2014)
- 20) Webster, N.A.S. et al.: Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci. 45 (6), 2097-2105 (2014)
- 21) Webster, N.A.S., Pownceby, M.I., Madsen, I.C.: ISIJ Int. 53 (8), 1334-1340 (2013)
- 22) Hida, Y., Okazaki, J., Itoh, K., Sasaki, M.: Tetsu-to-Hagané. 73 (15), 1893-1900 (1987)
- 23) Lu, L., Ooi, T.C., Li, X.: Sintering Emissions and Their Mitigation Technologies in Iron Ore. Ed. Lu, L., 1st Ed. Woodhead Publishing, Cambridge, 2015, p.551-579, doi:10.1016/B978-1-78242-156-6.00018-6
- 24) Morioka, K., Inaba, S., Shimizu, M., Ano, K., Sugiyama, T.: ISIJ Int. 40 (3), 280-285 (2000)
- 25) Mo, C.-L.: A Study of In-plant de-NO_x and de-SO_x in the Iron Ore Sintering Process. Univ. Wollongong Thesis Collect. 1954-2016, 1997. at <http://ro.uow.edu.au/theses/1379>
- 26) Glarborg, P., Jensen, A. D., Johnsson, J. E.: Prog. Energy Combust. Sci. 29 (2), 89-113 (2003)
- 27) Yue, G. X., Pereira, F. J., Sarofim, A. F., Beer, J. M.: Combust. Sci. Technol. 83 (4-6), 245-256 (1992)
- 28) Lázaro, M. J., Ibarra, J. V., Moliner, R., De Andrés, A. G., Thomas, K. M.: Fuel. 75 (8), 1014-1024 (1996)
- 29) Lv, W. et al.: ISIJ Int. 58 (2), 236-243 (2018)
- 30) Wu, Z., Sugimoto, Y., Kawashima, H.: Fuel. 82 (15-17), 2057-2064 (2003)
- 31) Zhao, Z., Li, W., Qiu, J., Li, B.: Fuel. 82 (15-17), 1839-1844 (2003)
- 32) Williams, A., Pourkashanian, M., Jones, J. M.: Proc. Combust. Inst. 28 (2), 2141-2162 (2000)



平 健治 Kenji TAIRA
 先端技術研究所 環境基盤研究部
 主任研究員 博士
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511