

氏 名	あき 秋	やま 山	とも 友	ひろ 宏
授 与 学 位	博 士 (工 学)			
学位授与年月日	平成 3 年 12 月 11 日			
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項			
最 終 学 歴	昭 和 60 年 3 月			
	北海道大学大学院工学研究科金属工学専攻 修士課程修了			
学 位 論 文 題 目	製鉄システムの伝熱およびエクセルギー解析			
論 文 審 査 委 員	東北大学教授	八木順一郎	東北大学教授	大森 康男
	東北大学教授	新山 英輔	東北大学教授	齊藤 武雄

論 文 内 容 要 旨

1. はじめに

近年、エネルギー多消費産業の代表格である鉄鋼業においては今まで以上に環境保全・省エネルギー・省資源の3者をバランスよく調和させた最適なトータルシステムの再構築が望まれている。特に、製鉄法はそのエネルギー消費量の大きさゆえに新技術導入が及ぼす影響力が大きく、現在、図1に示すように各国のエネルギー事情にあったプロセスが種々提案されている。現在わが国の製鉄法が抱える課題はいくつかあるが、主要なものを以下に列挙する。

- 1) 設備投資の削減
- 2) 装置の小型化および生産の弾力性
- 3) 使用原料の多用性
- 4) 環境問題への適合性
- 5) 排出エネルギーの回収・再利用～高温排熱の回収・貯蔵および輸送技術

本研究はこのような現状を背景に、製鉄システムの最適化を推進するために熱力学第1および第2法則に立脚したエネルギー評価法(エクセルギー解析)により体系的に製鉄システムを解析するとともに、熱エネルギーの有効利用を計るために製鉄およびエネルギー回収プロセスの伝熱解析をおこなった。

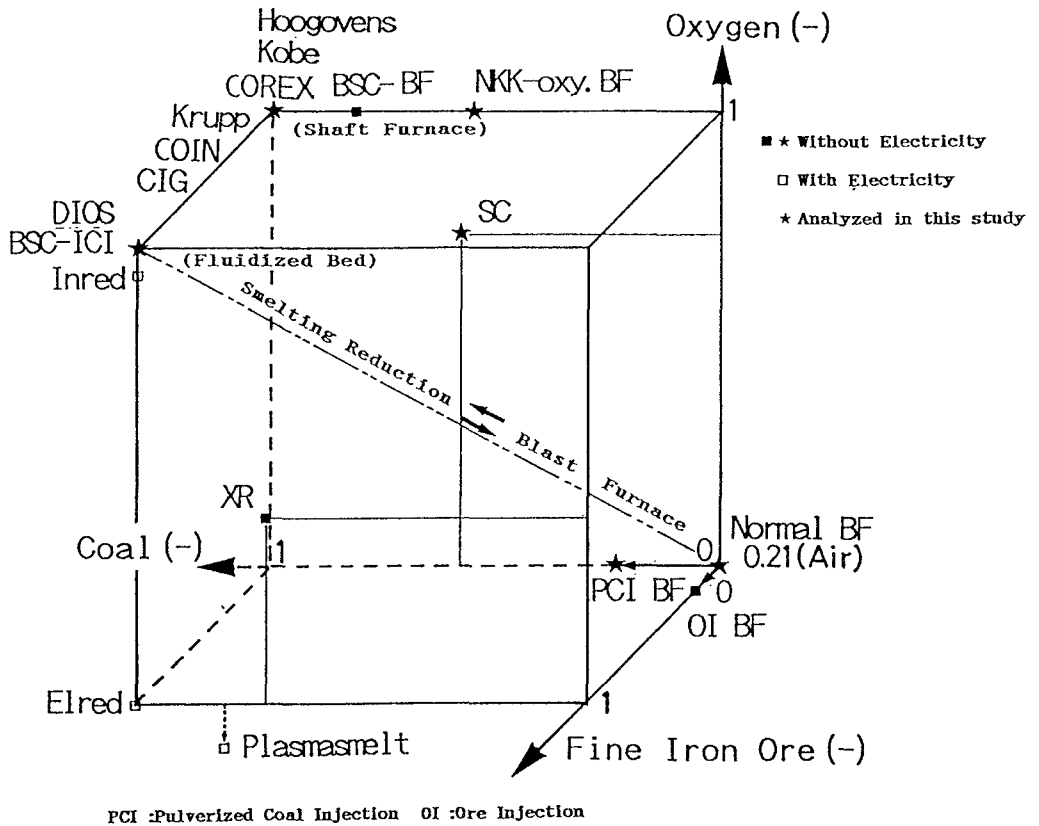


Fig. 1 Ironmaking process map

2. 本研究の概説

エネルギーという言葉はかなり混乱して使われており、通常工学的な意味で「エネルギー問題」や「省エネルギー」を論ずる場合はエネルギーは消費され最後に消滅してしまう。それにもかかわらず、一般的なエネルギー評価はエンタルピー収支法に基づき行われているのが現状で、この概念ではエネルギーは保存されてしまうためエネルギーの真の消費現象を表現することはできない。そこで本研究ではこの欠点を補うために単にエネルギーの量的評価法であるエンタルピー収支法にかえて、エネルギーの量のみならず質をも評価できるエクセルギーの概念を用いて製鉄システムの解析を試みている。エクセルギーとは熱力学第2法則の概念を取り込んだ、有用さで計ったエネルギーを表す概念である。本研究では、対象システムおよびプロセスに対して特定の基準面を設定することにより、1) プロセス内の真のエネルギー消費量は流入出エクセルギーの差で表示すること、2) システム内の各プロセスのエクセルギー損失の和はそのシステムにおける最小エネルギー消費量であること、3) 異なるシステム間の相互比較の指標としてその値は最適であることを等を提案し、種々提案されている製鉄システムへ適用した。その結果、従来のエネルギー保存則に基づく評価法に比べより現実的な、「使えば減る」という工学的なエネルギーの感覚と一致する評価が可能とな

り、各製鉄システムの特徴が明らかになった。また、CO₂排出量の観点からも比較を試みている。

エネルギー有効利用のためには、各プロセスの伝熱解析を推進し、熱の有効利用を計ることが重要となる。将来の製鉄原料は、1) 簡略化した予備処理プロセスを用い、2) 結合水を含有する低品位鉱石を使用しなければならないという観点から、冷間でセメントにより塊成化する非焼成ペレットの使用が有望と考えられる。そこで本研究では、結合水含有の非焼成ペレットの熱伝導率、結合水の熱分解現象、移動層における伝熱現象、エクセルギー消費の面からの検討を試み、最終的には焼成ペレットと比較を試みている。また、製鉄システムからは1550℃のスラグ顕熱に代表されるように多量の高温排熱が放出されその約半分が未回収となっている。そのため、高温排熱をポテンシャルの高い高温のまま回収し他プロセスで再利用する高温排熱貯蔵装置の開発により大幅な省エネルギーが期待されている。ここでは球カプセルを使用した潜熱蓄熱による充填層型高温排熱貯蔵プロセスを提案し、伝熱実験および数学的モデルによる解析を行ない、最終的には操作条件の最適化を検討している。

3. 本論文の構成と主な内容

本論文は全9章より構成されており、具体的内容を以下に記す。

第1章は緒論であり本研究の背景、目的および構成を示した。

第2章では製鉄原料として注目されている非焼成ペレットの熱拡散率を測定した。その結果、次の結論を得た。

- 1) 非焼成ペレットは焼成ペレットに比較して熱拡散率が小さい。この傾向は含水率の高いペレットほど著しい。
- 2) 焼成ペレットの熱拡散率は結合水の分解温度で低下する傾向がみられ、950K以上では上昇する。
- 3) 結合水含有率が高い非焼成ペレットほど熱拡散率は小さい。これは結合水の分解反応は吸熱反応であり、見かけ上比熱が大きくなることが主原因と考えられる。

また、緻密でかつ純粋なヘマタイト、マグネタイト、ウスタイトおよび鉄の熱伝導率を室温から1553Kまで測定した。その結果として、

4) 酸化鉄の熱伝導率はヘマタイトおよびマグネタイトに比べて小さく温度依存性も顕著ではなかった。これはウスタイトに格子欠陥が存在していることが主原因と考えられる。

6) 伝熱抵抗 ($1/k$) の温度依存性に注目して酸化鉄の熱伝導率の経験式を提示した。伝熱抵抗は低温域ではウスタイトを除いて原点を通る直線で整理することが可能であった。ただし、Tammann 温度 ($0.5 T_m$) 以上の高温域ではこの直線関係からの明らかな偏寄が確認された。

第3章では移動層において熱交換実験を行い、高炉やシャフト炉の伝熱解析に必要な不可欠な粒子流体間の熱伝達係数の推算式を提案した。実験室的規模の向流式移動層において、ヘマタイトペレットと窒素ガスを使用し熱流比の異なる3種類の実験条件下で熱交換実験をおこなった。軸方向のガス温度、ペレット温度および熱損失量データから移動層における粒子流体間熱伝達係数を求めた。

実験結果を平均すると以下の式となった。

$$Nu = 2.0 + 0.39 Pr^{1/3} Re_p^{1/2}$$

この式より移動層における熱交換速度は従来の推算式の値にくらべ、0.2~0.3倍程度であることが明らかになった。

第4章では非焼成ペレットを使用し、単一粒子および移動槽において乾燥・伝熱解析を行ない、開発した数学的モデルにより2, 3のシミュレーション実験を行い操作条件の最適化を試みた。実験は結合水を4%程度含有する非焼成ペレットを用い、非反応系で単一粒子の乾燥実験および移動層による乾燥実験をおこない、数学的モデルによる解析を試みた。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 亀裂の生成や破裂を伴わない結合水含有非焼成ペレットの乾燥は、伝熱律速を仮定した数学的モデルにより説明できる。
- 2) 自由水にくらべ結合水の蒸発は高温で起こるため、移動層内の高温領域における温度を低下させる。
- 3) 結合水を含有する非焼成ペレットを使用した場合、熱流比を下げることで層内温度分布を高温側に移行させることができる。

第5章では実験結果に基づきエクセルギー消費からみた従来の焼成ペレットとの比較を総合的におこない、非焼成ペレットの優位性を定量的に明らかにとした。還元鉄製造における焼成ならびに非焼成プロセスをエクセルギーを用いて評価した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 鉱石から還元鉄を製造する全工程における非焼成プロセスのエクセルギー損失は、焼成プロセスの約6割である。この値はセメント添加量の低減等によってさらに下がる可能性がある。
- 2) 非焼成プロセスにおいて、セメント製造におけるエクセルギー損失は、非焼成ペレット製造におけるエクセルギーの約4割を占める。養生過程に想定した連続急速養生法は、エクセルギーの損失が少なく効率も高い
- 3) 焼成プロセスにおいて、燃焼によるエクセルギー損失は大きい。しかし、非焼成ペレットはセメント添加のため脈石成分が高く、加熱および冷却に際して焼成ペレットにくらべ、多くのエクセルギーを要する。したがって、シャフト炉による還元プロセスでは焼成ペレットが有利である。
- 4) 鉄鋼製錬のように、熱のみならず、物質分離、化学反応をともなったプロセスのエネルギー評価に際しては、本報で示したように、物質のもつエネルギーが明確に表現でき、かつ、熱エネルギーの質的评价ができるエクセルギー評価が有効である。

第6章では溶融還元法、高炉製鉄法、直接製鉄-電気炉法のエクセルギー解析を行い、各方法の特徴を明らかにした。エネルギー評価にエクセルギーの概念を用い、高炉製鉄法、直接製鉄-電気炉法、溶融還元法について解析をおこなった。その結果以下のことが明らかとなった。

- 1) 三方法のうちエクセルギー損失が最小であるのは溶融還元法である。特徴としては溶融還元炉と酸素製造プロセスでエクセルギー損失が大きい、高炉製鉄法にくらべ石炭のコークス化過程を必要としないためシステムとしては正味のエクセルギー消費量は最小となる。予備還元炉についてはシャフト炉にくらべ流動層は、鉱石を塊成化しないためさらに少ないエクセルギー損失となる。
- 2) 溶融還元法のエクセルギー損失は酸素製造プロセスが約30%を占める。酸素製造の技術改善に

よりさらに低減の可能性がある。

3) 直接製鉄-電気炉法の非焼成ペレットを使用したケースは焼成ペレット使用の場合の90%のエクセルギー損失である。高炉製鉄法, 熔融還元法(シャフト炉使用)に非焼成ペレットの使用も有力である。

4) 酸化鉄の還元・溶解という機能でみるとエクセルギー損失は
高炉<(シャフト炉+電気炉)<(予備還元炉+熔融還元炉)

となる。三方法のうち高炉がエクセルギー損失最小のプロセスである。

第7章では高温ガスの排熱貯蔵を目的として, 実験および数学的モデルにより潜熱蓄熱法の適用の可能性を基礎的に検討した。500~1100Kに融点を持つ相変化物質(PCM)を球カプセルに封入して, 強制対流条件下で蓄熱・放熱実験をおこなった。PCMとしては KNO_3 -47mol% NaNO_3 , Pb, Al-12.6mass%Si, Al-25.1mass%Si, Al, NaClの6種類を用いた。

実験および数学的モデルによるシミュレーションの結果, 以下のことが明らかになった。

- 1) 金属系PCMの場合, 熱伝導率が大きいためカプセル内温度はほぼ均一となった。
- 2) 無機塩系PCMの場合, カプセル内に大きな温度分布が生じる。これは潜熱蓄熱法の利点である一定温度の熱回収という観点からすると望ましくない。
- 3) シミュレーション結果は実測値と比較的よく一致した。ただし, 無機塩をPCMとして使用した場合, 固相の沈降や自然対流の影響が見られた。
- 4) 球-ガス間の熱伝達係数は, 放射伝熱の寄与を分離することにより493K以上の高温域においても実用的にPanz-Marshall式から対流伝熱係数を求めることができた。

また, 高温用潜熱蓄積熱充填層の設計および操業条件の最適化のために, 伝熱, 流動, エクセルギーの観点から検討を行なった。結果として以下のことが明らかとなった。

- 5) 流動解析により充填層直径と粒子径の比が壁付近の偏流におらぼす影響を明らかにした。 D/d が20の時壁近傍に偏流が生じ, 壁面近似の空間率を減少させるような装置設計の必要性があった。
- 6) 伝熱解析により一定温度の熱回収という観点からは, ガスの流通は並流方式が望ましい。また, 充填層高さや層径および粒子径の関係は軸方向のPCM温度が一定でできるだけ長時間保持されるように設計することが重要であった。
- 7) エクセルギー効率の概念による最適流量評価法を提案した。

第8章では高炉製鉄法における微粉炭吹き込み操業のエクセルギー解析を行い, 各種操業条件下の新製鉄法との比較を試みるとともに, その降下を定量的に評価した。また, 操業条件が CO_2 排出量に及ぼす影響を明らかにした。

高炉製鉄法, SC法および鉄浴型熔融還元法のトータルシステムにおけるエクセルギー損失量と温室効果ガス排出量の両面から比較検討を行った。結果として以下のことが明らかとなった。

- 1) 高炉操業のエクセルギー損失は微粉炭吹き込み110kg/thmで9.3GJから8.0GJまで減少した。
- 2) 2400t/d規模のSC法のエクセルギー損失量は7.1GJであった。
- 3) 鉄浴型熔融還元法のエクセルギー損失は予備還元率および2次燃焼率に大きく依存した。予備

還元率が0から80%に増えると損失は11.8GJから6.2GJまで減少した。

4) 高炉法の温室効果ガスは発電プロセスも含めて約520kg-CO₂/t_{hm}で、熔融還元法は操業条件に大きく依存した。

第9章では研究の総括を行い、今後の研究の方向性について述べた。

審 査 結 果 の 要 旨

鉄鋼業においては、近年、一層の環境保全、省エネルギーおよび省資源の3項目を調和させた最適なトータルシステムの再構築が望まれている。特に、製鉄工程は膨大なエネルギー消費を伴うため、新技術導入がエネルギー消費に及ぼす影響もきわめて大きく、関連する操業改善や新プロセスが種々提案されている。本論文は伝熱とエネルギーの観点から製鉄システムの解析を試みたもので、全編9章より構成されている。

第1章は緒論である。

第2章では伝熱解析の基礎的物性値である。緻密な酸化鉄ならびに多孔質非焼成ペレットの熱伝導率を測定している。得られた結果は温度依存性を考慮した形で整理されている。

第3章では移動層における粒子流体間の対流熱伝達係数を求めている。この解析には粒子内の温度分布も考慮されているが、得られた熱伝達係数は従来の実験式から得られる値の10~20%程度であった。この値を使うと移動層内の温度分布をよく説明することができる。

第4章では移動層において結合水を含有する非焼成ペレットの乾燥・伝熱実験を行ない、数学的モデルを開発している。このモデルに第2,3章で得られた速度パラメータの値を適用すると、実験結果を良く表現することができる。数値シミュレーションにより、水分含有量および熱流比が層内温度分布に及ぼす影響を検討し、最適操作条件を決定している。

第5章では還元鉄製造システムをエネルギー消費の観点から体系的に比較している。非焼成ペレットを使用したシステムは、焼成ペレットを使用したシステムに比べ、約6割りのエネルギー消費となることを示している。

第6章では各種製鉄システムのエネルギー評価を行っている。溶融還元法においては使用する酸素を製造するためのエネルギー消費は大きいですが、高炉製鉄法、直接製鉄-電気炉法に比べ消費量の総和は大きくない。しかし、膨大なエネルギーが排出されるため、その回収プロセスの開発が重要であることを指摘している。

第7章では中高温排熱の回収を目的とした潜熱蓄熱充填層の基礎的研究を行い、伝熱解析およびエネルギー効率の観点から、最適操作条件を決定している。また、蓄熱材としてシルミンなどの金属系PCM（相変化物質）の有効性を示している。

第8章では高炉への微粉炭の多量吹き込み操業がエネルギー消費におよぼす影響を検討した結果を述べている。微粉炭の吹き込みは、エネルギー消費量ならびに炭酸ガス放出量の削減に有効であることを明示している。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、将来の最適な製鉄システムを構築すべく、伝熱ならびにエネルギーの観点から製鉄システムの解析を行ったものであり、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。