

「エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉における革新的製鉄反応に関する研究」 (H11年～H13年, 第1期)

H13年度予算額: 1.4億円 (前年度 1.9億円)

研究代表者: 石井邦宜(北海道大学) 他17機関

## 研究の概要・目標

### 1. 研究目標

・鉄鉱石からの鉄を作り出す高炉法プロセスにおいて、新プロセスを用いてエネルギー及び排出物の低減を目指す。

・第Ⅰ期の目標

効率的な新プロセス理論の創出

・第Ⅱ期の目標

新プロセスを応用した低負荷環境型高炉製鉄法モデルと新システムの提案

### 2. 研究内容

これまでの製鉄反応を見直し、(1)反応の高速化、(2)原料の改質化、(3)エネルギー低減のための温度低下、(4)新プロセス提言のためのシステム化、に関する理論構築並びに新製鉄システムの提案を行う。

### 3. 研究の新規性

・環境・エネルギー技術の観点から新たな高炉製鉄技術の研究を行う。

・これまでの高炉製鉄プロセスの研究は、経験則や実用化開発が主流であり、従来技術の限界を打破するために、これまでの考え方にとらわれず、金属工学的、熱力学的、反応工学的など基盤的、体系的研究を行う。

## 諸外国の現状等

### 1. 諸外国の現状

・欧米の鉄鋼業の変遷と同様に先進国においては鉄鋼に関する次世代へ向けた新技術の研究開発は殆ど行われていない。

・今後、鉄鋼生産の伸びが予想される東南アジアにおいては日本からの技術導入であり、研究開発は殆ど行われていない。一部韓国・中国において鉄鋼研究も行われているが、先進的技術開発では無く、生産性向上や操業技術に関するものである。

### 2. 日本の水準

・鉄鋼製造に関する研究のみならず実用化技術において日本が圧倒的に優位である。

## 研究進展・成果がもたらす利点

### 1. 世界水準との関係

新理論・新技術による鉄鋼製造研究の国際的リーダーシップの維持並びに製造技術の優位性確保

### 2. 波及効果

・本研究の成果を応用した新高炉製造システムが実用化されれば、鉄鋼生産における炭酸ガス排出量、エネルギー消費量、不純物排出量を現状の5割程度に低減が可能。

・また、研究成果を現行製造法に取り入れることによりエネルギー等の低減を前倒しに実現できる可能性がある。

エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究

研究成果の概要

鉱石、石炭、空気  
のFe新世界

反応の高速化・低温化

- a) ガス還元平衡制約の解除はガス化とペアで可能
- b) ガス化の高速化・低温化は非構造型炭素で可能
- c) 高速気固還元は双峰型の気孔径分布を持つ改質鉱石で
- d) 高速溶融還元のため所期スラグを低粘度に組成設計
- e) 将来は触媒元素を鉱石の格子中に配置して改質

鉱石、石炭原料の性状最適化

- a) CaO 利用溶融接合法の究極化
- b) 組織画像から反応性、強度の推定可能
- c) 最適焼結鉱は塩基度=1、炭材内装鉱で熱保存帯温度 700°Cまで低下
- d) 石炭接合鉱石で新高炉の設計可能

溶融温度低下

- a) 還元鉄の高速浸炭は固体炭素で可能
- b) その際に脈石融点を低く設計
- c) 低融点脈石の組成設計は FeO を含む多成分系状態図から
- d) 溶融スラグの運動挙動予測は拡張性のある物性値から
- e) プロセス開発には DB が重要

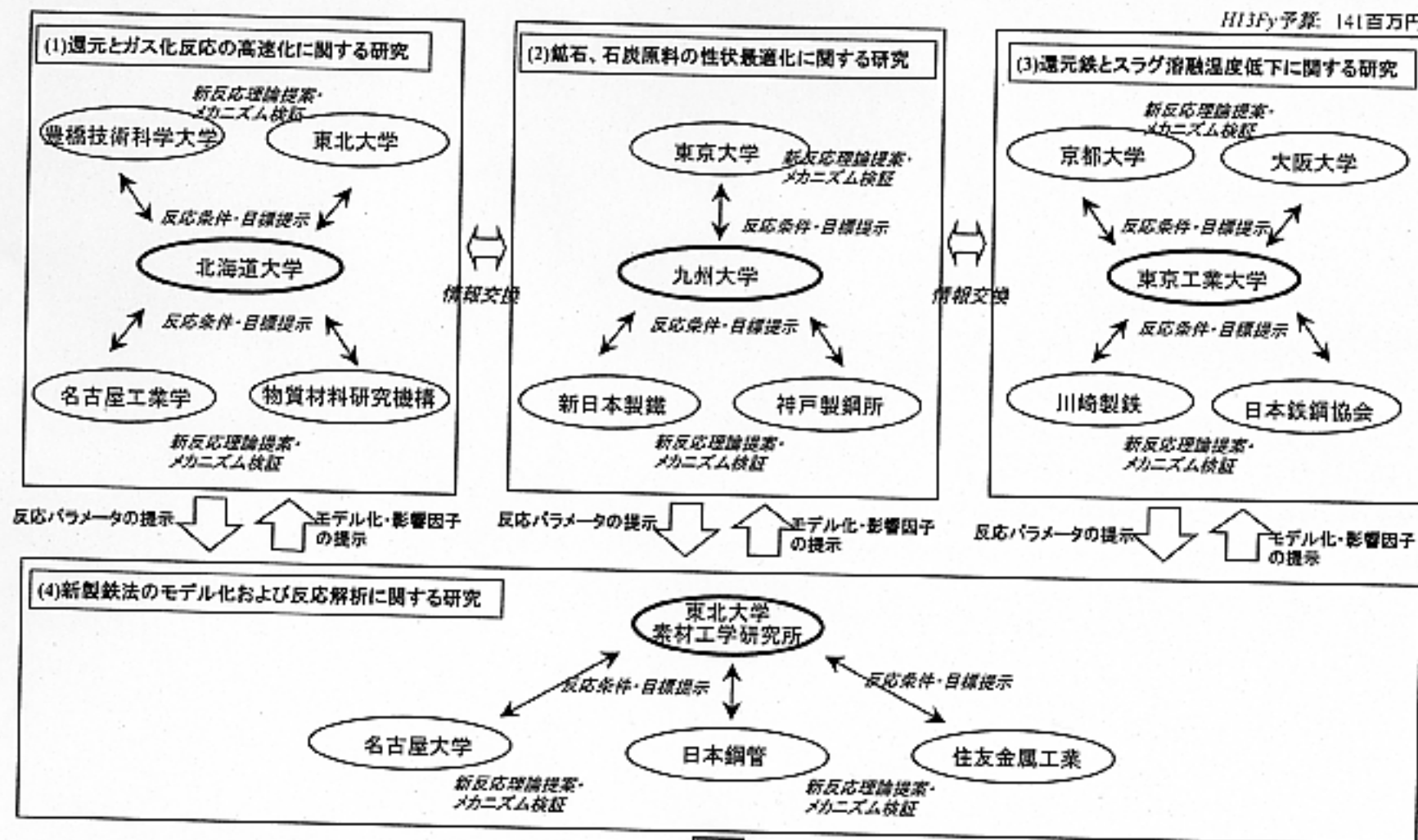
エネルギー半減高炉

モデル化・反応解析

- a) 燃料比 30%減、1350°C出鉄で操業可能
- b) 多流体高炉モデルを新高炉設計と操業設計に使用可能
- c) 炉下部溶解帯における熱量の高効率使用に向けた新提案が可能
- d) 溶融反応のモデル解析が可能

# 「エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉における革新的製鉄反応に関する研究」の研究体制

H13Fy予算 141百万円



高炉製鉄法の新プロセス理論構築(I期)⇒新製鉄システムの提案(II期)

科学技術振興調整費総合研究「エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製鉄反応に関する研究」所要経費

調査項目	担当機関	担当者	平成11年度	平成12年度	平成13年度	第1期 合計
			所要経費 (単位:千 円)	所要経費 (単位:千 円)	所要経費 (単位:千 円)	
1.還元とガス化反応の高速化に関する研究						
(1)カップリング反応の機構と速度論	北海道大学	石井 邦宣	29,799	37,424	13,318	80,541
(2)炭素ガス化反応の高速化と反応開始温度の低温化	豊橋技術科学大学	川上 正博	13,518	4,832	9,056	27,406
(3)熔融還元の微視的機構	東北大学	日野 光兀	8,182	7,620	6,123	21,925
(4)気固還元のメゾ機構と細孔デザイン	名古屋工業大学	井口 義章	4,034	7,892	6,021	18,847
(5)還元ナノ機構から見た酸化鉄成分の設計	独立行政法人物質材料研究機構	石川 信博	7,328	7,817	7,279	22,424
2.鉱石、石炭原料の性状最適化に関する研究						
(1)相変化を考慮に入れた鉱石接合速度の定式化	九州大学	清水 正賢	6,581	9,616	9,578	25,775
(2)酸化物熔融相の組織形成と強度	東京大学	相澤 龍彦	6,879	11,329	7,423	25,631
(3)脈石成分と気孔構造の最適化	新日本製鐵㈱ 鉄鋼研究所	内藤 誠章	6,437	7,350	7,239	21,026
(4)石炭と鉱石接合体の高強度化・高密度化	㈱神戸製鋼所 技術研究センター	野間 文雄	9,848	4,497	7,836	22,181
3.還元鉄とスラグの熔融温度低下に関する研究						
(1)熔融現象の微視的機構	東京工業大学	永田 和宏	17,221	15,923	11,198	44,342
(2)スラゲーメタル分離温度低下の熱力学	京都大学	岩瀬 正則	3,150	9,450	5,842	18,442
(3)製鉄スラグ物性値の計算法	大阪大学	碓井 建夫	3,146	14,704	5,261	23,111
(4)還元鉄の高速浸炭と界面現象	川崎製鉄㈱ 技術研究所	武田 幹治	14,254	4,912	4,905	24,071
(5)熱力学・物性・状態図データベースの構築	(社)日本鉄鋼協会	宮川 一也	6,137	9,106	8,898	24,141
4.新製鉄法のモデル化及び反応解析に関する研究						
(1)エネルギー半減製鉄プロセスの影響因子解析	東北大学	八木 順一郎	9,705	13,581	7,186	30,472
(2)熱移動と相変化連成系のマイクロ反応解析	名古屋大学	佐野 正道	3,336	11,154	6,993	21,483
(3)高酸素、高水蒸気燃焼域のマクロ反応解析	日本鋼管㈱ 総合材料技術研究所	有山 達郎	3,048	6,732	8,401	18,181
(4)充填層における広域・低温・高速燃焼の解析	住友金属工業㈱ 総合技術研究所	山岡 秀行	2,988	6,725	7,493	17,206
5. 研究推進	推進委員会					
	文部科学省 研究振興局		591	591	533	1,715
合計			156,182	191,255	141,483	488,920

## 研究目標の概要・成果の概要<課題全体>

課題名(研究代表者) : エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究(石井邦宜)

### 【研究目標の概要】

本研究は鉄鋼業の使用エネルギー量、CO<sub>2</sub>排出量、銑鉄中不純物量、およびスラグ排出量の4つを半減し、日本の全エネルギー使用量3%強の削減を目標に、その中核エンジンとなるコンパクトな高炉を創出するためのプロセス原理とシーズ技術の創出を狙いとしている。新プロセスは、熱保存帯温度700℃、浸炭温度1250℃を目標におき、そのためのプロセス原理として、「反応の高速化」と「低温化」を挙げた。また、それを実現するに欠かせない支援プロジェクトとして「組成組織設計」と「制御の高精細化」があり、これらを体系的に研究するため、4つのサブテーマ(分科会)を設定した。すなわち、

第1分科会:(SGL:北大 石井邦宜)還元とガス化反応の高速化に関する研究

第2分科会:(SGL:九大 清水正賢)鉍石、石炭原料の性状最適化に関する研究

第3分科会:(SGL:東工大 永田和宏)還元鉄とスラグの熔融温度低下に関する研究

第4分科会:(SGL:東北大 八木順一郎)新製鉄法のモデル化および反応解析に関する研究

第1分科会では、還元、ガス化、浸炭の3反応を主な対象にして、熱力学的、速度論的研究が行わうこととし、①還元とガス化のカップリング反応、②ガス化反応の高速化と開始温度の低温化、③熔融還元と浸炭の同時反応、④気固還元を最適化する気孔設計、⑤触媒効果の電子顕微鏡的解明、などの研究を行うこととした。

第2分科会では、低エネルギー・低スラグ・高反応性を目指した塊成化をテーマに、⑥熔融接合現象のシミュレーション、⑦熔融凝固多孔体の組織制御と強度、⑧鉍石の炭材による直接還元とその熱保存帯温度低下への応用、⑨鉍石の石炭接合の研究、を計画した。

第3分科会では、高炉操業の「低温化」を主たるテーマとして、⑩浸炭の現象論的機構と熔融現象の構造的解明、⑪低融点スラグの熱力学的探査、⑫主として流れに関連した輸送物性の測定と推算、⑬還元鉄の浸炭シミュレーション、⑭製鉄に関する熱力学および物性のデータベース構築、を研究項目とした。

第4分科会では、安定操業に資するプロセス解析と制御の高精度化をテーマに、⑮本プロジェクトを総括する総合モデルの開発、⑯多成分粒子の軟化熔融モデルの構築、⑰エネルギー30%減を実現するコンパクト高炉の操業諸元、⑱運動に伴う脆性固体の破壊現象の計算科学、などをテーマとして選定した。

分科会各個別テーマの研究目標を第1期は当面、先行研究を除き、シーズ探査とチャンピオンデータの達成におき、従来にない新知見の発見を目指すものとした。

### 【研究成果の概要】

第1分科会:反応の高速化(倍速化)、開始温度低温化に関して、①カップリング現象を確認したこと、②炭素ガス化反応機構の大略を解明したこと、③熔融還元の直接観察が可能

になったこと、④気固還元最適気孔構造を設計する指針を得たこと、⑤電子顕微鏡下においてウスタイトからの還元生成物を始めて確認したこと、さらに、⑥マイクロリアクター化により超高速還元が達成可能であることを確認したこと、⑦ガス浸炭の速度には平衡制約上限界があり還元鉄の低温溶融を図る場合固体浸炭の導入が不可欠であること、などを明らかにした。

**第2分科会：**①溶融接合組織の基本となる $\text{SiO}_2\text{-CaO-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 系酸化物の高酸素分圧下での状態図作成、②融液の浸透・拡散速度の定量、③還元と溶融に優れたスラグ成分と気孔構造の究明、④多孔質体の強度予測モデルの開発、⑤高速還元への道を開く鉄石と石炭の高密度・高強度異相接合技術の開発など、性状最適化への具体的な目標値と熱力学的基礎情報の構築および新技術の創出に成功した。

**第3分科会：**①炭材内装ペレットの鉄生成は $1325^\circ\text{C}$ 、約10分で進行する、②固体炭素浸炭および $\text{CO}$ ガス浸炭・溶融速度の律速過程を明らかとした、③浸炭は固体浸炭がガス浸炭より速く、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、硫黄の第3成分も影響を与える、④多元系スラグが効率的に溶融分離するための $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$  4元系および $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-FeO}$  4元系の相平衡を明らかにした、⑤浸炭・溶融・分離の挙動を支配する表面張力や粘度の推算方法を提案した、などの成果があり、製鉄温度の低温化への研究の方向性が明確になった。

**第4分科会：**ガス化反応の影響を考慮したコークス粒子の接触破壊理論を展開し定式化に成功した、②離散要素法をレースウェーの形状と粒子の運動解析に始めて適用した、③酸化鉄および脈石混合物の軟化溶融現象を高温顕微鏡で観察し、固液変態のミクロ的解析の指針を把握した、④コークス充填層型プロセスにおいて炭酸ガス排出量を半減する条件を熱物質収支より検討し、溶鉄温度 $150^\circ\text{C}$ 低下、熱保存帯温度 $300^\circ\text{C}$ 低下、固体燃料 $250\text{kg/l}$ 吹き込みなどの必要条件、ならびに送風量、酸素富化など送風条件を明らかにした、⑤微粉炭やプラスチックの燃焼に及ぼす吹き込みランス本数、純酸素の噴射等を検討し、固体粒子と酸素の接触・混合強化が燃焼効率を向上させることを明らかにした、⑥多流体モデルによる3次元非定常モデルの開発を進め、基本的モデルを完成させた。

エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究

第1期 研究目標と方法

研究目的

攻め方・方法

反応高速化    カップリング、気孔設計  
                  溶融還元機構、高速ガス化

低温溶融        溶融機構、固体浸炭、  
                  脈石低融点化、低粘性化

性状最適化    接合現象、強度推定、組織  
                  形成、高温性状、石炭接合

モデル化        多流体モデル、静的モデル  
                  低燃費溶解、溶融モデル

探査－基礎－応用－開発の研究4段階  
の中で、第1期を探査研究、第2期を  
基礎・応用研究と位置づけた。

第1期 主な成果

新高炉を示唆する成果

- ◎ガス化反応とカップリング  
で平衡制約から解放
- ◎ガス化速度は非構造炭  
素が大きい
- ◎固体浸炭で低温溶融
- ◎炭材内装鉱石で熱保存  
帯温度が低下
- ◎石炭接合で高強度塊成  
化可能

基礎的成果

- ◎鉄の遅れ融解現象
- ◎溶融還元は対流律速
- ◎多成分系状態図の解明
- ◎粒子粉化機構の理論化
- ◎多流体モデルの構築

第2期 目標

探査研究から基礎研究へ

- 研究方針
- ◎第1期の枠組みを踏襲
  - ◎探査研究を掘下げプロセ  
スを意識した基礎研究に
  - ◎データの理論化、定式化
  - ◎物性値整備を強化
  - ◎界面現象の掘り下げ強化
  - ◎新高炉の提案を前提に  
炭材内装鉱石に注力

変更点

- ◎研究資源の傾斜配分を強化
- ◎研究機関の配置を適正化
- ◎一部応用段階の研究へ移行
- ◎一部は純系から実用系へ  
シフト

# 第一分科会

第一期 還元とガス化反応の高速化に関する研究

定性的、現象論的探査研究

カップリング反応の機構と速度論

○カップリング現象の確認、機構の考察

ガス化反応の高速化と開始温度の低温化

○ガス化速度と吸着量の因果関係実証

熔融還元の微視的機構

○熔融還元の直接観察実現、現象解明

気固還元の中メゾ機構と細孔デザイン

○双峰型気孔径分布が還元最適

還元の中メゾ機構から見た酸化鉄成分の設計

○還元鉄の成長核を電顕で始めて観測



第二期 還元とガス化反応の高速化に関する研究

定量的基礎研究とプロセス化への探索

カップリング反応の機構解明と高速化

○カップリング条件の理論化、ナノリアクター設計

ガス化反応の高速化機構と炭材設計

○炭材の構造と組織の設計、触媒効果の理論化

熔融酸化鉄の固体炭素還元の中メゾ機構

○反応機構解明と低温熔融還元の実現

中温領域における気固還元の中メゾ機構

○サブミクロン気孔の表面分析による機構解明

還元最適に及ぼす第3成分添加効果の中メゾ機構

○重原子注入による添加元素効果のナノスケール解析



## 第二分科会

第一期 鉬石・石炭原料の性状最適化に関する研究

第二期 石炭・鉬石性状最適化への組成および構造設計に関する研究

相変化を考慮した接合速度の定式化

- 鉬石-スラグ界面相の組織と生成物の同定
- 融液の生成・浸透・拡散速度の定量化

酸化物溶融相の組織形成と強度解析

- 酸化物溶融相の状態図作成
- 多孔質脆性体の強度予測モデルの開発

最適な脈石成分と気孔構造の解析

- 実機原料の還元性、溶融性の解析と評価
- 脈石成分と気孔構造の最適条件の検討

石炭と鉬石接合体の高強度化・高密度化

- 高強度・高密度接合法の基礎技術開発
- 石炭の物理化学特性と接合強度の関係づけ

酸化鉄溶融接合の速度機構と接合組織

- 凝固組織の強度支配因子の決定
- 非平衡状態での酸化物組織の形成と相選択

多孔質多相複合体の組織制御と強度予測

- 空孔構造の強度・剛性への影響評価と破壊基準の理論的予測
- 多成分系解析モデルの開発と最適構造の決定

還元性と溶融性に優れた高強度鉬石接合体の組成と構造設計

- 制御された組成、組織をもつ原料酸化物の試作と実炉条件評価

石炭と鉬石接合体の性状と実現方法の最適化

- 高炉条件下での還元性と溶融性の最適化
- 石炭・鉬石接合体の製造設計と最適使用条件

# 第三分科会

第一期 還元鉄とスラグの溶融温度低下に関する研究

第二期 還元鉄とスラグの溶融温度低下に関する研究

溶融温度低下に関するマクロ現象解明

溶融現象の微視的解明とプロセス化への探索

溶融現象の微視的機構

○鉄の浸炭・溶融速度の律速因子解明

スラゲーメタル分離温度低下の熱力学

○多元系スラグの効率的分離を図る化学組成と酸素ポテンシャル域の決定

製鉄スラグ物性値の計算法

○浸炭・溶融・分離挙動を支配する物性値の計算法

還元鉄の高速浸炭と界面現象

○鉄鉱石の還元・浸炭溶融反応の低温化に与える不純物の影響

熱力学・物性・状態図データベースの構築

○還元反応の低温化・浸炭・溶融・分離挙動を支配する物性値のデータベース化

浸炭溶融現象のミクロ機構

○表界面活性化と異相界面の接触による溶融機構の微視的解明

製鉄系スラグの低融点化と相平衡

○低温溶融プロセス用スラグ組成の探求  
○高炉系スラグお平衡する複数固体相の熱力学

溶鉄と溶融スラグ物性値の高精度推算

○溶融スラグの流動性、濡れ性、反応性お関連する表面・界面揚力、粘性の計算モデル構築

高速低温浸炭溶融のプロセスシミュレーション

○還元鉄表面の活性制御尾浸炭促進条件の解明  
○溶融鉄粒の凝集機

製鉄系の熱力学・物性・状態図データベース

○高炉反応の低温化に重要なスラグに関する普遍的なデータベースの構築

## 第 四 分 科 会

第一期 新製鉄法のモデル化および  
反応解析に関する研究

第二期 新製鉄法のプロセスイメージの確立と  
波及効果の定量化に関する研究

エネルギー半減プロセスの影響因子解析

- ✓ 炉内物流確保の構造的要因の明確化
- ✓ 新多流体モデルに基づく充填層反応プロセス解析法の開発

熱移動と相変化連成系のミクロ反応解析

- ✓ 伝熱・相変化・化学反応・機械的過程連成系支配要素の抽出

高酸素高水蒸気燃焼域のマクロ反応解析

- ✓ 高温高酸反応場の燃焼特性定量化
- ✓ 熱物質収支モデルによる燃料比削減、低温化条件の検討

充填層における広域・低温・高速燃焼場の解析

- ✓ 広域・低温・高速燃焼場解析構成要素の構築（粒子間相互作用・運動解析）
- ✓ 燃焼場の安定性に及ぼす諸要因抽出

革新的製鉄プロセスの成立要件解析

- ✓ 炉下部物流確保の動力学要因の解明
- ✓ 新プロセスの制約および成立要件明確化
- ✓ 波及効果予測

熱移動と相変化連成系の反応モデル解析

- ✓ 接合過程の連成系解析法確立
- ✓ 低エネルギー接合法開発
- ✓ プロセス効率への影響度評価

革新的高炉の静的モデルによる仮想操業

- ✓ 高温高酸条件下の高負荷燃焼技術開発
- ✓ 新プロセスの操業・設備検討
- ✓ システム運転条件の実現性評価

革新的高炉の適正燃焼条件の解明

- ✓ 広域・低温・高速燃焼場成立条件解明
- ✓ 新プロセスにおける適正燃焼条件解明

研究成果公表等の状況<課題全体>

課題名（研究代表者）：エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究（石井邦宜）

【研究成果発表等】

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	41(3) 件	24 件	80(3) 件	145(6) 件
国外	39(4) 件	10 件	23 件	72(4) 件
合計	80(7) 件	34 件	103(3) 件	217(10) 件

（注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと）

【特許出願等】 0 件 （国内 0 件、国外 0 件）

【受賞等】 6 件 （国内 6 件、国外 0 件）

電気化学会溶融塩賞	（平成13年2月）	豊技大	川上正博
日本金属学会功績賞	（平成13年3月）	阪大	田中敏宏
日本鉄鋼協会学術功績賞	（平成13年3月）	東北大	日野光兀
日本鉄鋼協会澤村論文賞	（平成13年3月）	NKK	有山達郎
日本鉄鋼協会西山記念賞	（平成13年3月）	北大	柏谷悦章
日本鉄鋼協会西山記念賞	（平成13年3月）	NKK	有山達郎他

【主要雑誌への研究成果発表】

Journal	Impact	サブテーマ	サブテーマ	サブテーマ	サブテーマ	合計
	Factor	1	2	3	4	
ISIJ International	0.578	15(1)		4(1)	3	22(2)
鉄と鋼	0.362	2		4	3	9
Metallurgical Trans. B	0.557	6(1)				6(1)
Z. Metallkunde	0.704			3(1)		3(1)
Mater. Trans. JIM	1.069	1(1)				1(1)
金属学会誌	0.333	1				1
Material Sci. & Eng. A	0.943		1			1
Scan. J. Met.	0.122		1			1
Steel Res.	0.551			1		1
High Temp. Mater. Proc.	0.322	1		2	1	4
Electrochemistry	0.365			1		1
Applied Phys. Letters	3.072	1				1
J. Microscopy	1.377	1				1
J. Mater. Sci. letters	0.474	2				2
熔融塩および高温化学	-	1				1
Iron and Steelmaker	0.434	1				1
電気製鋼	-	1				1
主要雑誌小計		33(3)	2	15(2)	7	55(5)
発表論文合計		45(3)	9(1)	15(3)	11	80(7)