

TODAY

## たたらの夢

東京工業大学大学院  
教授 永田和宏

2009年 は社会が大きく変わる年であろう。地球温暖化の原因物質である炭酸ガスの排出量の削減が本格的に始まるからである。京都議定書(COP 3)で国際社会に約束した削減目標の実施期限は2012年であり、その後の枠組みを決める期限は今年である。また、米国の大統領が1月にオバマ氏に交代し、グリーン・ニューディール政策が始まる。脱炭素社会の始まりである。人類は今まで生活や生産に使うエネルギーを木や木炭、石炭や石油などを燃焼させて得られる高温ガスに依存してきた。これ等は全て炭酸ガスを排出する。炭酸ガスの大気中への拡散はエントロピーを増大させることになり、その回収には多大なエネルギーを要する。炭酸ガスを発生させないことが重要である。現在、高温ガスエネルギー以外に人類が利用できるエネルギー源は電気である。電気は電力なので使わないとエネルギーにならない。需要が落ちる夜間電力の利用を喚起する必要がある。

製鉄4000年の歴史では製鉄エネルギーは木炭やコークスの燃焼による高温ガスが使われてきた。炉内の通気性を確保するため塊状の鉄鉱石やコークスが使われ、高炉では整粒や原料の挿入分布が生産性を決める重要な因子である。しかし、塊状の原料は反応時間がかかるので高炉の高さが増大し、粉化防止のため原料に強度が要求された。さらに送風圧を上げるため炉底温度が上昇し、酸素分圧が下がって銑鉄中の不純物濃度が上がった。

球の表面積の体積に対する比は直径に反比例するので、粉鉄鉱石を使えば銑鉄生成速度を格段に速くできるが、高温ガス流の中で飛散し通気路の目詰りを起すため高炉での利用は非常に困難である。世界で唯一、粉鉄鉱石から銑鉄を直接製造したプロセスは「たたら製鉄」である。たたら製鉄法は直径0.1mm程度の磁鉄鉱である砂鉄を原料とし木炭を燃焼させて熔融銑鉄を製造する方法である。反応は30~40分で終了し、炉高は1.2mで十分である。粉鉄鉱石の飛散を防ぐため人力により冷風を低送風圧で吹込み、1対の細い羽口から空気を噴出して木炭を燃焼し高温部を作る。そこに炉上部で還元した砂鉄が来て木炭から直接吸炭し、熔融銑鉄を生成した。大量生産炉は対向する羽口を多数並べるので箱型となった。羽口前で木炭の燃焼により生成した高温ガスは主に炉中央部を通り、壁際に装荷した砂鉄には高温ガスが強く当たらないようにした。ま



たたら操業

た、砂鉄は「軽目」(木炭比重量で1)に装荷し、吸熱反応による炉の温度低下を防止した。低送風圧のため炉内酸素分圧はFeOとFeの平衡酸素分圧近傍に維持され、脈石の還元が抑制されるので不純物濃度の低い銑鉄が得られた。

炭材内装ペレットは鉄鉱石粉と石炭粉との混合物で、回転炉床に装荷し反射炉による輻射熱で加熱して反応を起させる。原料挿入から約15分で還元鉄あるいは銑鉄ナゲットを生成する。この反応はたたら製鉄法の原理と同じで、間接製鉄法や直接製鉄法に対し「第3の製鉄法」と呼ぶ。輻射熱では影の部分が加熱できないので固体鉄鉱石から固体鉄を生成する反応では効率が悪い。炉床にはペレットを1層しか装荷できず生産効率に限界がある。

粉鉄鉱石に高温ガスは使えず、輻射熱は波長数 $\mu\text{m}$ の電磁波で陰の部分は加熱できない。長い波長の電磁波による加熱は電磁誘導加熱であるが、エネルギー密度が小さいので鉄鉱石の還元はできない。一方、マイクロ波は波長が1~10cm程度であり粉体に効率良く吸収される。影の部分も加熱でき、原料自身が発熱するので加熱効率が高い。新しい加熱方式としてのマイクロ波加熱高速銑鉄製造法の開発が求められる。

「たたら製鉄」から「マイクロ波製鉄」へ、粉鉄鉱石利用新製鉄法の夢が膨らむ。



20kw マイクロ波集中型加熱炉

平成 18 年度～ 20 年度  
 「革新的製鉄プロセス技術の先導的研究」3 年間の成果  
 新日本製鐵(株) 内藤 誠章(研究開発責任者)

1. はじめに

日本の鉄鋼業は世界のリーダーとして、種々の技術開発に取り組み、省エネ技術対応でも数兆円に及ぶ設備投資を実施してきました。ただ資源のない我が国の課題は多く、本プロジェクトでは原燃料の価格変動を吸収しうる資源対応力と CO<sub>2</sub>削減効果の期待できるオリジナルな製鉄プロセスの基盤開発(目標は表1)を目指しました。

表1 研究課題と目標

| 全体目標(主目標)                                | 達成目標(値)と設定理由  |   |
|--|---|---|
| 10%の省エネルギー                               | 高炉の熱保存帯温度: 1000℃ → 800℃への低減。800℃基準のシャフト効率: 90数%確保 → 10%の省エネルギーを達成する条件 |   |
| 研究課題目標                                   | 担当  | 達成目標(値)と設定理由  |
| ①革新的製鉄プロセスに関するシーズ技術の調査・整理                | JRCM  | EU調査等による本プロジェクト研究の位置付けの明確化および塊成化技術の整理                     |
| ②高炉低還元材比操業のメカニズム解明と制御手段の検証               | 新日鐵   | 熱保存帯温度を800℃以下に低減する手段とシャフト効率維持方法の提示(M, Fe触媒効果、カップリング反応定量化) |
| ③新塊成物への新規原料適用探索                          | JRCM  | 劣質炭材、劣質鉱石の適用性と使用上限比の提示                                    |
| ④革新的新塊成物の創製とプロセスイメージの構築                  | JFE   | 強度と反応性を同時に満足する塊成物の組織と構造の提示および製造プロセスの提案                    |
| ⑤炭材、鉱石のミクロ構造を考慮した高炉トータルモデルの構築と還元材比への影響評価 | 住金  | 革新的塊成物のモデル化と高炉モデルシミュレーションによる還元材比低減効果の提示                   |
| ⑥革新的新塊成物製造プロセスの総合評価                      | 新日鐵   | CO <sub>2</sub> 削減量の総合評価と10%の省エネルギー達成条件の提示                |

2006年12月から新日鐵、JFE、住金、JRCMに加え、再委託先である各大学・高専(北大、東北大、京大、阪大、九大、一関高専)、日新製鋼を交えた共同プロジェクト(図1)として発足し、2年弱の活動を通じ

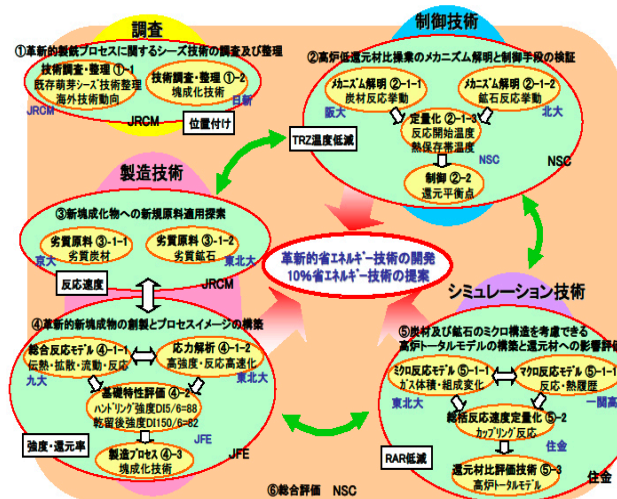


図1 先導的研究課題の共同プロジェクト連携図

て、酸化鉄・炭材・金属鉄の複合塊成物の創出という当初課題に対し多大な成果が得られました。

2. 三年間の成果

1) 革新的製鉄プロセスに関するシーズ技術の調査及び整理 (JRCM-日新製鋼)

欧州現地で第1次、2次調査を実施して、欧州のULCOSプロジェクトの内容と進捗とともに世界的に見た本プロジェクトの開発水準や

省エネ・環境対応における総合的な位置づけを確認し(図2)報告しました(JRCM NEWS No.251、262)。また、国内外の文献・特許調査により、成型炭及び炭材内装塊成化技術と実機使用の調査を完了し、「新塊成物製造技術検討に際して考慮すべき塊成化技術の調査報告書」としてまとめました。

2) 高炉低還元材比操業のメカニズム解明と制御手段の検証 (新日鐵-北大-阪大)

本課題は、新日鐵をリーダーとし



図2 CORUS社ULCOS技術チームとのディスカッション(2008.6)風景

て再委託先(北大(柏谷准教授)、阪大(碓井教授))と共同して研究を実施しました(図3)。

「炭材反応挙動の解明と反応速度の定量化(北大)」では、セルラーオートマトン法によるシミュレーションの結果、微細気孔がガス化反応に寄与することが、解明されました。さらに、マイクロX線CT解析、レーザー顕微鏡による直接観察の結果から、鉄触媒が反応にともって粗大化しながら移動し、高温では熔融FeOとなってRedox反応に寄与している、ことが解明されました。

「ミクロ、マクロ気孔構造を考慮した鉱石反応挙動の解明と反応速度の定量化(阪大)」では、反応速度に及ぼす、微細気孔や貫通気孔の影響が解明されました。特に、貫通気孔による900℃付近の低温域での還元促進効果、1200℃での還元停滞抑制効果が示されました。

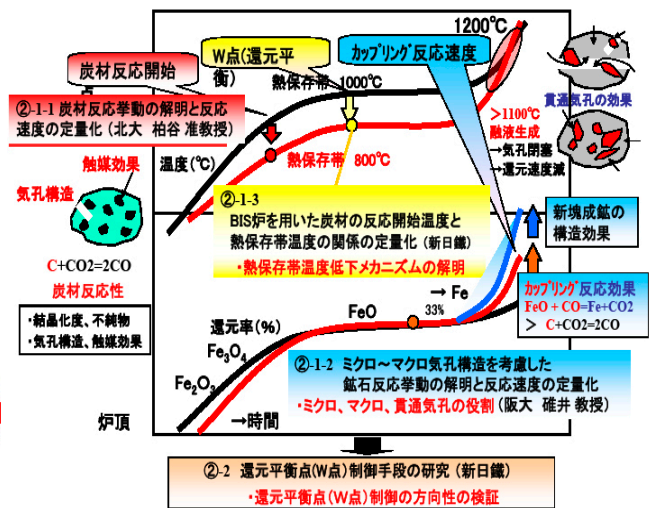


図3 「高炉低還元材比操業のメカニズム解明と制御手段の検証」研究スキーム

「BIS 炉を用いた炭材の反応開始温度と熱保存帯温度の関係の定量化（新日鐵）」では、鉄含有量の異なる新塊成物を試作し、その反応開始温度が高炉使用時の熱保存帯温度を決定することを解明しました。

これら成果の傍証として、「還元平衡点（W 点）制御手段の研究（新日鐵）」では、Fe=30%の新塊成物の最適配置などにより、熱保存帯温度 150℃低下、還元材比 35 kg/tp 削減が BIS 炉で得られ、ほぼ目標通り効果が得られることが確認されました。

### 3) 新塊成物への新規原料適用探索（JRCM- 京大 - 東北大）

本課題は、JRCM をリーダーとして再委託先（京大（岩瀬教授）、東北大（葛西教授））と共同して研究を実施しました。

「劣質炭材、劣質鉱石適用技術の探索（JRCM）」では、フェロコックスおよび炭材内装鉄源プロセスにおける劣質原料使用技術に関し参照すべき研究情報を抽出して、「革新的製鉄プロセス技術開発動向調査」と「石炭/鉄鉱石の複合塊成化プロセスの高炉における使用技術に関する調査」の 2 編の報告書にまとめました。

「劣質炭もしくはバイオマス由来炭素による反応高速化（京大）」では、「各種炭材 + 鉄鉱石混合物」の急速加熱による金属鉄の生成を伴う種々の反応を調査し、劣質炭材の特異性は浸炭反応において最も顕著に現れることを実証し、炭材の結晶性やガス組成の調整によって、劣質炭材の使用上限比は 100%に達することを明示し、「劣質鉱石を利用した酸化鉄の還元反応の高速化（東

北大）」では、炭材内装塊成物において、石炭の揮発成分による還元反応促進に対する劣質鉱石（図 4）多量使用の優位性を見出し、低温還元の見地からは全量使用が可能であることを明らかにしました。また、劣質鉱石を使用してフェロコックスを作製することにより、高品位へマタイト鉱石と比較してガス化開始温度を約 20℃低下できることを示すことができました。

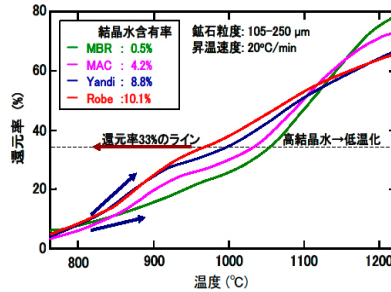


図 4 炭材内装鉄の還元率曲線に及ぼす鉱石中結晶水含有率

### 4) 革新的新塊成物の創製とプロセスイメージの構築（JFE- 九大 - 東北大）

本課題は、JFE をリーダーとして再委託先（九大（清水教授）、東北大（青木准教授））と共同して研究を実施しました。（図 5）

「強度と反応性を同時に満足する塊成物の組織と構造の提示（九大、東北大）」では、主に九大は反応性に優れる構造の提示を、また東北大は機械的強度に優れる構造の提示をそれぞれ担当しました。その結果、熱物性値、有効拡散係数の測定に基づいた総合反応モデルの構築による新塊成物の設計指針（九大）を、また、CO<sub>2</sub> 反応前後の微視的構造変化の観察によって構築した反応劣化モデルと均質化法に基づい

た応力解析シミュレーションから反応性と強度を両立する新塊成物構造指針（東北大）を提示する成果を得ました。

「高炉内を想定した塊成物の基礎特性評価（JFE）」では、上記成果を基に新塊成物の塊成化技術を具体化して工業的に製造し（図 6）、目標としたハンドリング強度 DI5/6=88（従来超え）とベンチ規模（48 時間の連続乾留試験）目標強度 DI150/6=82（従来同等）を達成し、反応性と強度を両立する新塊成物製造プロセスの実用原理を確認しました。



図 6 ブリケット成型後の新塊成物例

### 5) 炭材及び鉱石のミクロ構造を考慮できる高炉トータルモデルの構築と還元材比への影響評価（住友金属 - 東北大 - 一関高専）

本課題は、住友金属をリーダーとして再委託先（東北大（有山教授）、一関高専（桒上准教授））と共同して研究を実施しました（図 7）。

「炭材、鉱石のミクロ構造を考慮した新塊成物の物理特性調査と反応モデル展開（東北大）」では、新塊成物の反応挙動を把握するため、実験装置の製作と反応実験を実施し、反応解析に基づき、新塊成物の反応挙動を表現するミクロ反応モデルを構築しました。ならびに、

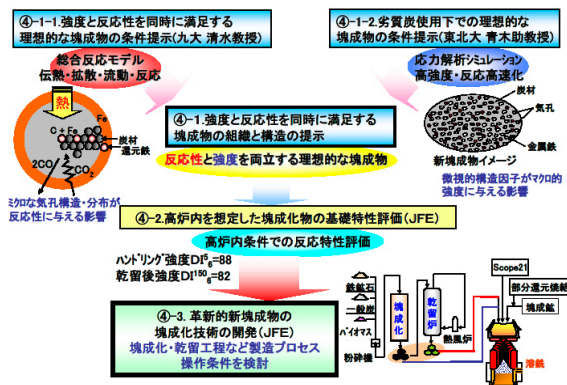


図 5 「革新的新塊成物の創製とプロセスイメージの構築」研究スキーム

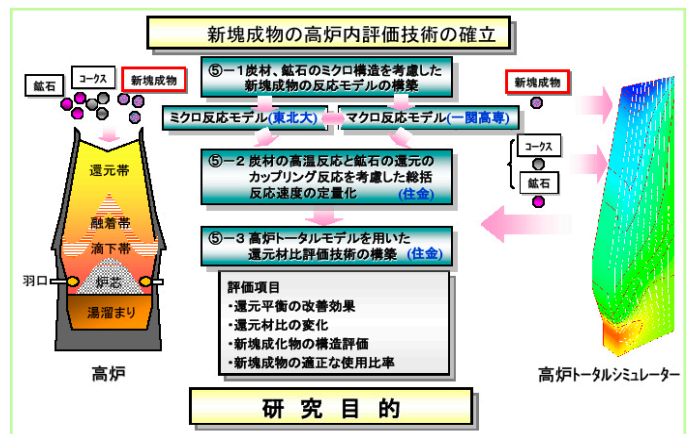


図 7 「炭材及び鉱石のミクロ構造を考慮できる高炉トータルモデルの構築と還元材比への影響評価」研究スキーム

高炉内を模擬した反応条件での反応特性を調査し、反応モデルの精度向上を図りました。

「新塊成物のマクロ反応モデルの構築とトータルモデルへの組み込みによる新塊成物効果の評価(一関高専)」では、前述の新塊成物のミクロ反応モデルを高炉トータルモデルへ展開可能なマクロ反応の基本構造を設計しました。

「炭材の高温反応と鉍石の還元のカップリング反応を考慮した総括反応速度の定量化(住友金属)」では、新塊成物の高炉内反応特性の評価基準となるコークス・鉍石のカップリング反応を定量的に評価できる高炉シミュレーション技術を構

築しました。

「高炉モデルを用いた還元材比評価技術の構築(住友金属)」では、新塊成物の高炉条件下での反応挙動をより正確に把握するため、高炉の反応ならびに荷重条件を模擬した高温荷重軟化試験に基づき、新塊成物を含む鉍石層の反応速度と高温物性(融着、溶け落ち性状)を調査した結果、新塊成物の反応速度の高速化と融着帯通気抵抗の大幅な改善を確認しました。

以上の成果を踏まえて、コークス、鉍石及び新塊成物の反応特性を評価可能な高炉トータルモデルを構築し、新塊成物の高炉使用による還元材比低減の効果予測を行って

いる。

### 3. おわりに

本プロジェクトの成果として、目標とする新塊成鉍については反応面からは触媒 MFe=30%が必要なこと、MFe 触媒型では新乾留プロセスが必要で、これを想定した製造検討により反応性と強度を両立できる新塊成鉍の製造原理を確認できたことは、資源対応力と CO<sub>2</sub> 削減にも寄与し、将来の実用化検討に弾みが付く大きな成果である。本活動は、海外からも注目されており、今後の省エネに役立つ日本発信のオリジナル技術として貢献できることを期待しております。

## 活動報告

### ■ 鉄鋼材料研究部 先進超々臨界圧 (A-USC) 火力発電 技術交流会開催

鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト「高温クリープ SG」と A-USC プロジェクト開発推進委員会「ボイラー分科会」との技術交流会を平成 20 年 12 月 25 日に開催した。「高温クリープ SG」より 13 名、「ボイラー分科会」より 10 名の研究者が参加し、両プロジェクトにおける研究内容の紹介・質疑応答および今後の協力課題につき検討を行った。両プロジェクトの主な取り組み内容は下記である。

(1) A-USC プロジェクト(第一期; 2008-2016 年度の 9 年間)のボイラー分科会の活動内容は、700℃級 A-USC 火力発電プラントを対象に、大径管、伝熱管用新材料開発・改良と、製造性の検証(2008-2012 年度)、及び高温長期材料試験(3~7 万時間; (2008-2016 年度)、さらには実缶試験・評価(2015-2016 年度)にて発電効率: 46~48%を目指す。

(2) 高温クリープ SG(2007-2011 年度)の活動目標は、700℃級 A-USC 火力発電プラントの実用化時の高効率・安定操業を実現できる、経済的・新耐熱鋼の開発・合金

設計指針の提示およびクリープ強度予測精度の高度化を目指す。

交流会では、耐熱材料の評価技術、クリープ強度(寿命)予測技術、溶接継手のクリープ強度向上技術等につき熱心に議論が交わされ、両プロジェクトにとって非常に有益であることが確認でき、また、協力できる研究内容等につき両者の理解が深まった。今後定期的に技術交流会を開催することで合意され、次回は H 21 年 4 月末に開催予定。

### ■ 非鉄材料研究部 ○アルミニウム圧延品製造プロセス 技術伝承・中核人材育成プロ ジェクトでの「ファーストステップ 座学テキスト」試行の実施

H 19~20 年度に、アルミニウム圧延メーカー 6 社と大学(京都大学、大阪大学、東京工業大学、同志社大学)にて作成したファーストステップ座学テキストについて、それを使用した講義の試行を京都大学吉田キャンパスで、参加者 57 名(企業 11 名、学生 34 名、プロジェクトマネージャー 12 名)で行った。

受講者のアンケート結果では、「冶金学と機械工学を系統的に学ぶことが出来そう」「数式・理論が持つ基礎的な意味が良くわかった」「計算式が多いのは理解しにくい」「アルミ材料の具体的な例をもっと入れて欲しい」「最新の理論や研究

内容をさらに盛り込んでほしい」など種々の意見をいただいた。

今回は、スケジュールの都合上、各テーマでの講義時間の制約があったものの、難易度、理解度、講義の質など、全般に評価は高く、「将来の自立化後の受講に期待をし受講を希望する」という意見が多かった。これらは今後のプログラムの評価修正に生かしていく予定。

### ○ nano tech 2009 出展のお知らせ

平成 19 年度からスタートした NEDO「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術の開発—窒化物物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発プロジェクト」で開発中の成果を nano tech 2009 に出展いたします。Na フラックス法で作製した GaN 基板、45 mm Φ 無極性 GaN 結晶、無極性 AlN 基板など、世界初の成果を多数展示しますので是非お立ち寄り下さい。

nano tech 2009 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議

- ・ <http://www.nanotechexpo.jp/>
- ・ 日時: 2009 年 2 月 18 日(水)~20 日(金) 10:00~17:00
- ・ 会場: 東京ビッグサイト東 3・4・5・6 ホール&会議棟
- ・ 主催: nano tech 実行委員会(後援: NEDO 技術開発機構)
- ・ 小間番号: N-01

The Japan Research and Development Center for Metals

## JRCM NEWS / 第 268 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。  
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2009 年 2 月 1 日

発行人 小紫正樹

発行所 財団法人 金属系材料研究開発センター

〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目 5 番 11 号 第 11 東洋海事ビル 6 階

T E L (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285

ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>

E-mail [jrcm@oak.ocn.ne.jp](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)