

# 新世紀における高炉操業の進展と研究開発

清水 正賢\*・内藤 誠章\*2

Technological Progresses and Researches on Blast Furnace Ironmaking in The New Century

Masakata SHIMIZU and Masaaki NAITO

**Synopsis :** Philosophy and business circumstances of Japanese steel industry have drastically changed in the new century. New standpoint of steel industry has to be in responsible consideration for raw material resources, energy and environmental protection. With ratification of the Kyoto Protocol, Japanese Steel Federation has set a voluntary reduction plan of CO<sub>2</sub> emission by 10.5% to the one in 1990. Therefore, new process developments and researches for CO<sub>2</sub> reduction have been promoted in the ironmaking field as a major contributor of energy consumption. Furthermore, recycling use of waste materials, such as blast furnace dust, mill scale and waste plastic, were proceeded in the ironmaking process for construction of the materials recycling system. Advanced process developments and research results were introduced and future prospects of the basic research have been discussed to reinforce ironmaking technology.

**Key words:** ironmaking; blast furnace; CO<sub>2</sub> emission; energy saving; reduction reagent ratio; environmental control; carbon composite iron ore; new ironmaking process.

## 1. 緒言

21世紀に入り、鉄鋼業を取り巻く環境は大きく変貌している。中国をはじめとする鉄鋼生産の急進、製鉄原料の劣質化、資源・エネルギーの高騰、CO<sub>2</sub>問題、さらに、安全・安心というもの作りに対する新しい価値観と理念の台頭など、鉄鋼製造の様々な部分において厳しさが増している。新世紀における製鉄技術の展望は、こうした環境変化への適応にあり、資源、エネルギーから環境問題にわたって総合的に対応可能な技術とシステムが不可欠となっている。その中心的な課題に「環境保護および物質循環の促進」があり、その具体的な行動指針として「CO<sub>2</sub>の削減」ならびに「資源リサイクル」が求められている。膨大な資源とエネルギーを使用している鉄鋼業にとって、この課題への役割と責任は非常に大きい。新時代における鉄鋼業への期待は、資源、エネルギー、環境が最適に調和した物質循環型社会における「核」としての存在であり、この確立が鉄鋼業の持続的な発展を支える重要な鍵になるとも予想される。その中心に位置している製鉄分野にとって、21世紀はまさに「変革の世紀」といえる。このような視点と認識から、新世紀における日本の高炉操業の展開と研究開発の状況ならびに将来に向けた鉄鋼製錬技術の可能性について述べる。

## 2. 製鉄分野の環境変化と省エネルギー

2002年以降、世界の粗鋼生産量は中国を始めとする生産拠点の拡大により、2004年に10億トン台に、2005年には11億トンを記録、さらに2006年度末には13億トンを超える情勢にある。この急速な増大に連動して鉄鉱石の世界的な需給環境も大きく変化し、鉱山会社の合併と寡占化、良質なヘマタイト鉱の枯渇、高結晶水鉱石の増加など鉱石資源の安定確保が厳しくなっている。石炭資源においても高品位炭の需給は逼迫しており、こうした原料事情の悪化の中で鉱石や強粘結炭の価格はこれまでにない価格に上昇している。

一方、環境問題に対しては、京都議定書の発効に伴い、製鉄所から排出するCO<sub>2</sub>ガス量を対1990年度比で10.5%削減することが日本鉄鋼連盟の自主行動計画として設定された。製鉄用エネルギーの約70%が製鉄工程で消費されていることから、当該分野でのCO<sub>2</sub>削減は喫緊の課題である。こうした背景の中、高炉各社では高炉の熱効率、還元効率の向上、微粉炭吹込み、廃プラスチック吹込み、未利用排熱回収など、CO<sub>2</sub>削減に向けた様々な取り組みがなされてきた。Fig. 1<sup>1)</sup>に1990年からのエネルギー消費量の推移を、Fig. 2に国内鉄鋼各社の高炉の還元材比、出鉄比の推移を示す。1990年から2001年までは省エネルギーは順調に進んだものの、2001年より世界的な鉄鋼需要の増大により、

平成18年7月13日受付 平成18年8月21日受理 (Received on July 13, 2006; Accepted on Aug. 21, 2006)

\* 九州大学大学院工学研究院材料工学部門 (Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 744 Moto-oka Nishi-ku Fukuoka 819-0395)

\*2 新日本製鐵 (株) 環境・プロセス研究開発センター製鉄研究開発部 (Ironmaking R & D Division, Environment and Process Technology Center, Nippon Steel Corporation)

高炉の還元材比は低下傾向にあるものの、エネルギー消費の総量は上昇に転じ、2004年時点での対1990年度比削減量は4.4%に留まっている。原料ソースの劣質化や旺盛な粗鋼需要を想定すると、2010年に向けて格段の省エネ技術が必要である。

### 3. 高炉操業技術の進展

#### 3.1 高炉への微粉炭多量吹込み

原料の直接利用、コークス不足への対応、原燃料のコスト削減を目的に、高炉への微粉炭吹込みが1981年に新日鐵・大分1高炉で開始された。以来多くの高炉に導入され、Fig. 3に示すように1998年には国内高炉の平均吹込み量は約135 kg/thmに達した。2000年以降、鉬石、石炭の低品位化が進行する中で吹込み量は120~35 kg/thmを維持しているが、大型の吹込み設備を持つ高炉では200 kg/thmを超える多量吹込みが実施された。吹込み量の増大に対しては、中心ガス流の低下、炉頂ガス温度と圧損の上昇、融着帯の通気性悪化、未燃チャーやコークス粉の増大による炉芯の不活性化などを回避するため、コークス中心装束法<sup>2)</sup>を活用したガス流分布制御<sup>3)</sup>、微粉炭の燃焼性制御<sup>4)</sup>、鉬石の高温還元性状改善<sup>5)</sup>等が実施された。Fig. 4にはJFE福山に

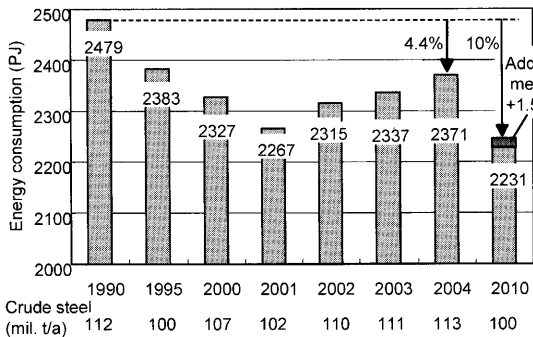


Fig. 1. Energy consumption of Japanese steel mills.<sup>1)</sup>

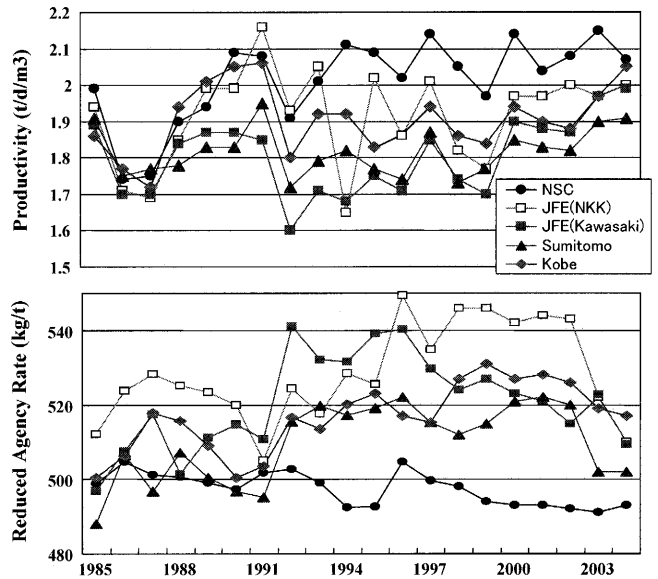


Fig. 2. Transition of average RAR and productivity in each company of Japan.

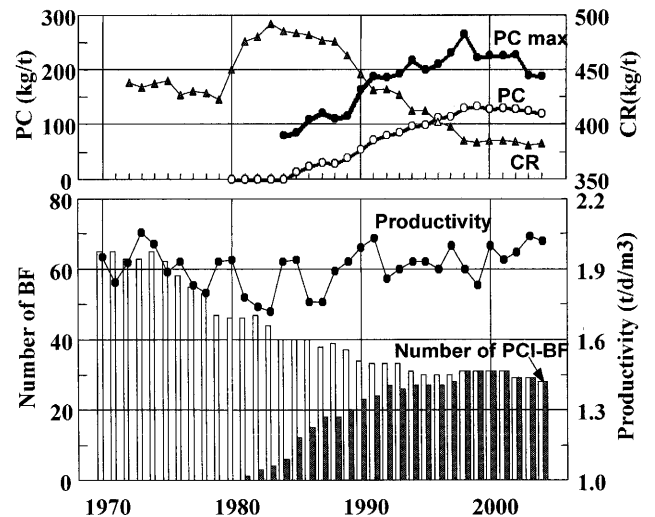


Fig. 3. Transition of average PCR, CR, Productivity and Number of PCI-BF in Japan.

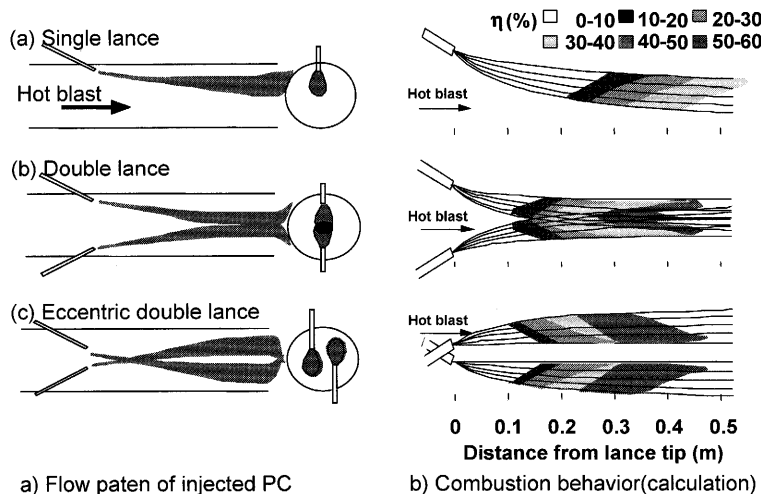


Fig. 4. Flow pattern and combustion behavior of PC in single, double and eccentric double lance.<sup>4)</sup>

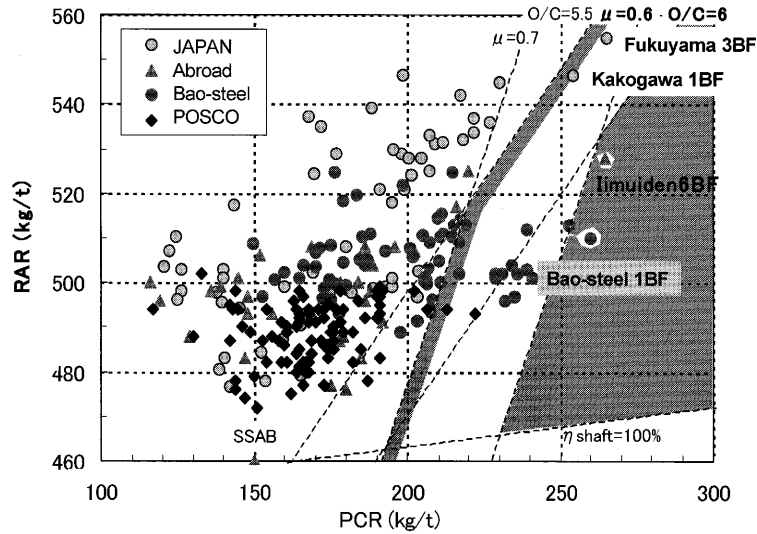


Fig. 5. Relationship between RAR and PC rate in the world.<sup>5)</sup>

における微粉炭の燃焼性制御技術<sup>4)</sup>を示す。最大の特徴は、羽口内に設置された2本のランスをクロスさせ、微粉炭と燃焼空気との混合を高めた点にあり、これにより微粉炭の燃焼率を大幅に改善し、1998年に微粉炭比265.5 kg/thmの世界記録を達成した。Fig. 5に国内高炉の還元材比と微粉炭比(PCR)との関係を海外での実績と比較して示す<sup>5)</sup>。PCR>200 kg/thmの操業は神鋼加古川1BF, JFE福山3BF, 上海宝山1BF, 浦項3BFで実施されているが、特に上海宝山1BF, 浦項3BFでは、これまで限界と考えられた過剰酸素比0.6, Ore/Coke 6.0の操業を達成している。各高炉とも、出銑比, 還元材比レベルは異なるが、多量吹込みにおいては、強度の高い(高DI)コークスおよび高温還元性の良好な低SiO<sub>2</sub>・低Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>焼結鉱を採用している。

### 3.2 高炉への廃プラスチック吹込み

高炉のCO<sub>2</sub>削減, 環境保護, 資源リサイクルの一環として高炉への廃プラスチック吹込みが1996年10月にJFE京浜において開始された。廃プラスチックの高炉利用に際しては、羽口前での燃焼挙動, 炉頂からの炭化水素系ガスやタールの排出<sup>6)</sup>, 造滓材添加による炉下部通気性維持<sup>7)</sup>などが詳細に検討された。Fig. 6に羽口前での燃焼挙動, Fig. 7に高炉炉頂からの炭化水素系ガスの排出状況をオールコークス操業, 微粉炭吹込み操業と比較して示す。ここでの廃プラスチックおよび微粉炭の吹込み量はそれぞれ59.0 kg/thm, 78.4 kg/thmである。廃プラスチックは粒度が微粉炭より大きいため、レースウェイ内の酸素濃度の低下が小さく燃焼速度は遅い。しかしながら、微粉炭のように1パスでレースウェイを通過せずコークスと共に旋回しながら燃焼するため、最終的な燃焼率は高くなることが判明した。また、炉頂からの炭化水素系ガスの排出も微粉炭と大差なく、使用上大きな問題はないと評価されている。現在、国内での廃プラスチック吹込みは、JFE京浜2高炉, 福山3高炉, 4高炉(3基合計の能力12.7万トン/年), 神

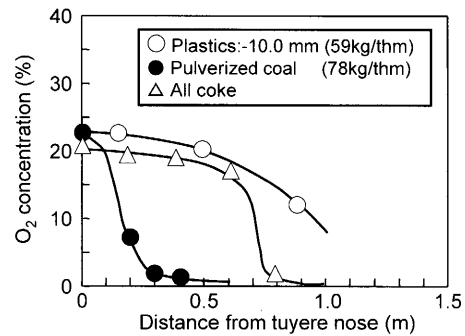


Fig. 6. Change in O<sub>2</sub> concentration in raceway during plastics injection in actual blast furnace.<sup>6)</sup>

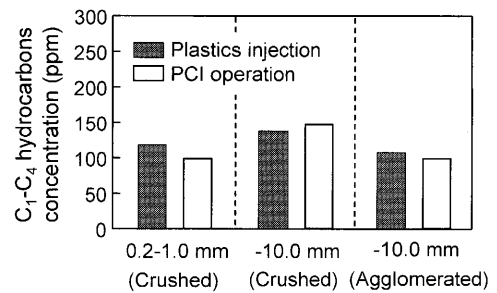


Fig. 7. C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> hydrocarbons in blast furnace top gas during plastics injection.<sup>6)</sup>

鋼加古川3高炉(能力1.0万トン/年)で実施されている。

### 3.3 鉱石・コークスの混合装入技術

低還元材比操業時の通気性維持には融着帯領域の圧損低減が重要であるが、その手段としてJFE千葉6高炉では、コークス, 鉱石同時切り出しによる多量混合装入技術を開発した<sup>8,9)</sup>。この混合装入において、渡壁ら<sup>8)</sup>はFig. 8に示すように混合率10%までは融着帯の通気改善効果があること, また、鉱石の還元性も向上し、焼結鉱比の上昇と同様な効果があることを見出している。装入方法についてもコークスの偏析に及ぼす各種要因の影響を定量化し、Fig.

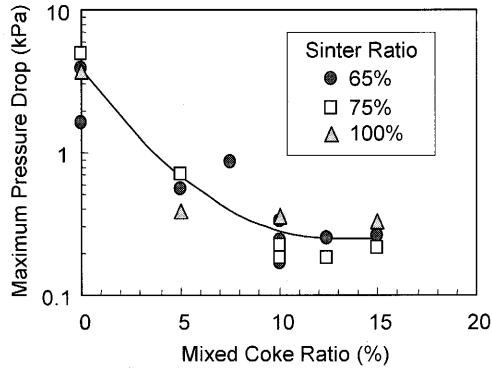


Fig. 8. Effects of mixed coke ratio and sinter ratio on high temperature gas permeability.<sup>8)</sup>

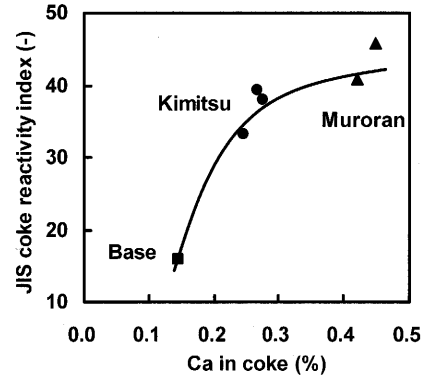


Fig. 10. Relationship between Ca content in coke and JIS coke reactivity index.<sup>10)</sup>

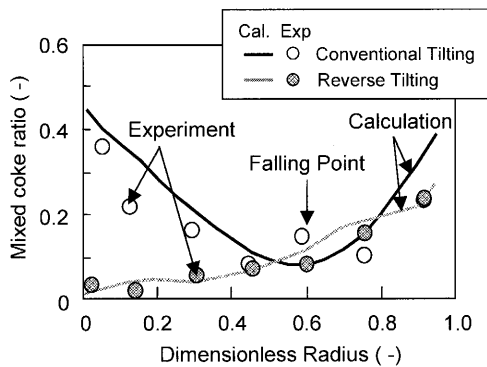


Fig. 9. Comparison of mixed coke ratio between conventional and reverse tilting charge.<sup>8)</sup>

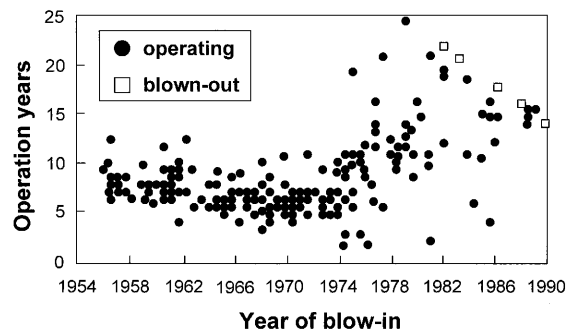


Fig. 11. Prolongation of blast furnace life in Japan.

9に示すように、コークスの偏析を制御する技術を確立した。この技術は、JFE千葉6高炉で実用化され、低処理鋅比での高出鋅比、低還元材比操業に寄与している。

### 3.4 高反応性コークスの開発と高炉使用

高炉の還元材比低減には、コークスの反応性を高め、800~1000°C域での還元反応を律速しているブドワー反応を活性化させる必要がある。一般に、コークスの反応性(CRI)を上昇させると熱間強度(CSR)が低下するため、強度を維持した上での反応性向上が最大の課題であった。この課題に対し、野村ら<sup>10)</sup>は劣質炭および石炭中のCaO成分を効果的に利用した高強度・高反応性コークスの製造法を開発した。この技術の特徴は、コークス強度に対しては乾燥炭使用によって石炭粒子間の稠密な溶着(強度の上昇)を促進させるとともに、過度な強度上昇は劣質炭の配合量増大によって制御すること、反応性の向上に対しては、高CaO炭配合によってCaをガス化反応の触媒として作用させることにある。Fig.10に実機適用時のJIS反応性とコークス中CaO量の関係を示す<sup>10)</sup>。この間冷間強度(DI<sup>150</sup><sub>15</sub>)は85~86とほぼ一定に維持された。僅かなCaO添加量でも触媒効果が大きく、反応性を大幅に向上させることに成功している。このコークスを使用した室蘭2高炉では、還元材比10kg/thmの低減を達成した。

### 3.5 高炉の寿命延長

高炉の安定操業や炉体管理技術の進展により、一定の出銑比を確保しつつ15年を超える長寿命高炉が増加している。Fig.11に大型高炉の寿命実績を示すが、既に20年を超える高炉も出現している。この長寿命化には、(1)高炉炉体形状の適正化<sup>11)</sup>、(2)操業管理技術、(3)炉体の延命・補修技術、(4)耐火物の品質改善等が大きく寄与している。特に1990年以降は炉床壁の耐蝕性向上<sup>12,13)</sup>が最重要課題であるとの認識から、カーボンレンガ材質の改善と冷却強化が図られた。カーボンレンガについては熱伝導率の向上、気孔径の微細化による溶銑の浸透防止を、冷却については、冷凍機による水温低下や銅製ステーブの炉底側壁への採用が進められている。

### 3.6 資源リサイクル技術

製鉄各社では資源リサイクルによるゼロエミッション化が大きく進展した。所内で発生する、銅片、ダスト、スラッグ、スラッジなど副産物のほぼ100%が再資源化されるに至っている。高炉部門の新しいリサイクル技術として、新日本製鉄では所内発生ダストやスラッジの再資源化を促進するため、世界に先駆けて回転炉床式還元炉(RHF設備)を君津製鉄所(Fig.12)<sup>14)</sup>および広畑製鉄所に導入した。ダストおよびスラッジは、石炭等の還元材と混合してペレットやブリケットに成形し、RHF内で加熱還元することにより、脱亜鉛を促進しつつ、製造された金属鉄は高炉

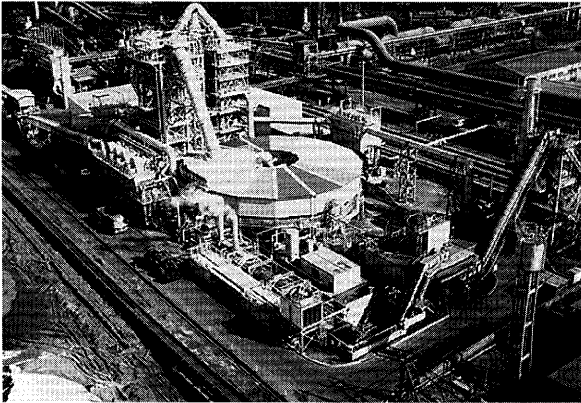


Fig. 12. Rotary hearth furnace in KIMITSU works.<sup>14)</sup>

やスクラップ溶解炉で有効に利用している。

#### 4. 鉄鋼製錬研究の展開と技術萌芽

最重要課題である高炉のCO<sub>2</sub>削減を目的に、高炉操業の安定化や製錬反応の抜本的な改革を目指した研究会活動、また数々の研究が展開されている。2000年以前の研究会活動については鉄と鋼特集号「製鉄プロセスの機能強化と新展開」(Vol.87 (2001),No.5)に詳しく紹介されているので参照されたい。ここでは、2000年以降の高炉に関連した研究会活動および技術的萌芽について述べる。

##### 4.1 高炉の限界現象制御に関する研究会活動（日本鉄鋼協会研究会）

この研究会は、1997年から実施された高炉炉下部機能強化研究会（主査：東北大 八木順一郎）を引き継ぎ、「CO<sub>2</sub>発生量ミニマムを目指した高炉の限界現象制御に関する研究会」（主査：九大 清水正賢）として2002年4月に活動を開始した。この研究会では、CO<sub>2</sub>10.5%の削減を可能とする還元材比450 kg/thmの実現を目標に据え、低還元材比操業の壁となっている高炉シャフト部、炉芯部、炉床部における棚吊り、スリップ、フラッシング、出銑滓不良などの異常現象に焦点を当て、その発生機構と要因の解明および動力学的な発生限界の緩和と制御技術の開発が目的に掲げられた。

研究活動は、グループA「移動層での棚吊り、スリップの発生要因の解明と制御技術」、グループB「ガスの偏流にともなう融体の流動化現象の解明」、グループC「炉芯の充填構造変化とガス・融体の偏流および非定常伝熱機構の解明」の三つのWGを設置して進められた。その主な研究成果を以下に示す。

(1) グループA（新日鐵・松崎，神鋼・松井，室工大・高橋，同大・日高，九工大・湯）

高炉レースウェイの周期的崩壊と圧力変動との関係 (Fig.13)<sup>15)</sup>、充填構造制御による棚吊りの防止法<sup>15)</sup>、離散要素法 (DEM)を用いた高炉内の粒子運動解析<sup>16)</sup>、レース

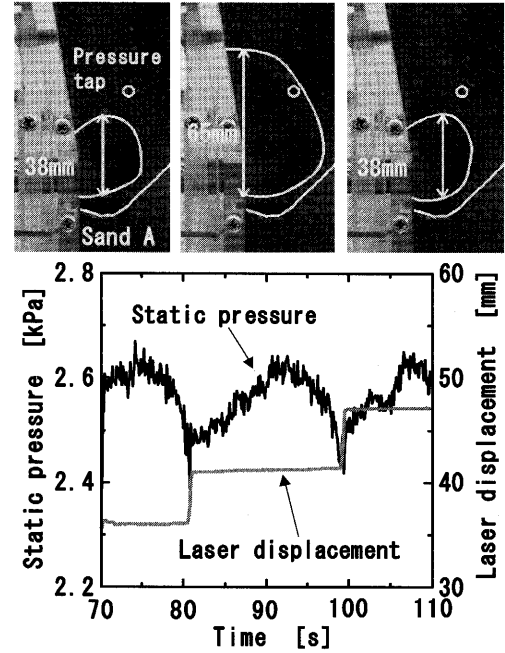


Fig. 13. Correspondence between raceway size and discontinuity.<sup>15)</sup>

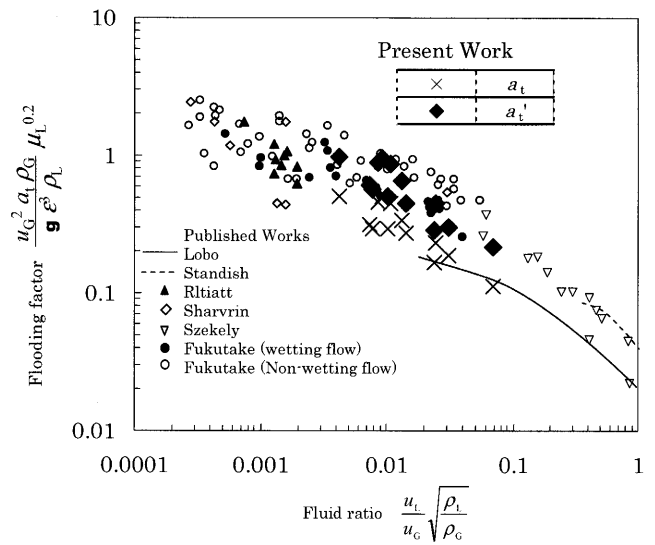


Fig. 14. Plots of flooding data on Sherwood diagram.<sup>20)</sup>

ウェイ上部域のガス・固体流れおよび空間率の周期変動<sup>17)</sup>について検討され、装入物の安定した降下を得るには、レースウェイの安定維持、中心ガス流の確保、炉腹部、朝顔部での炉壁付着物の形成防止が重要であることが明らかにされた。また、マイクロ波を用いた実炉のレースウェイ調査より、炉芯形状およびレースウェイ深度が装入物の安定降下に大きく影響していることが示された<sup>18,19)</sup>。

(2) グループB (JFE・佐藤，新日鐵・篠竹，名大・坂東，阪大・碓井)

高炉滴下帯での充填構造に対するフラッシング、ローディング限界を定量化した (Fig.14)<sup>20)</sup>。また、液滴の力学解析よりホールドアップ量の推算式を導出し、その妥当性

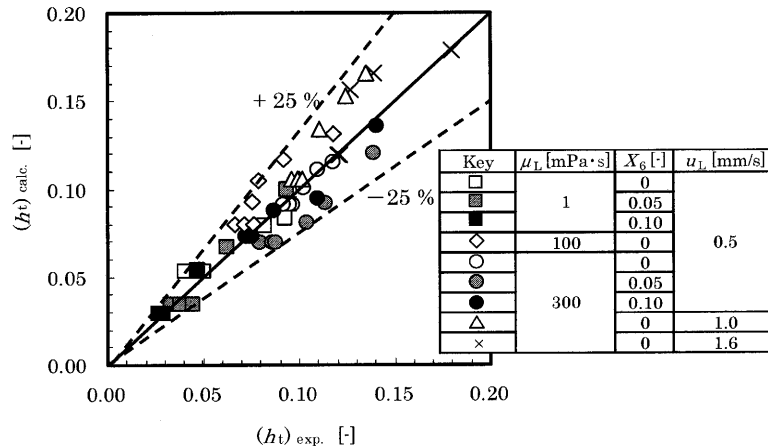


Fig. 15. Comparison of total Liquid holdup between experimental data and calculated results.<sup>20)</sup>

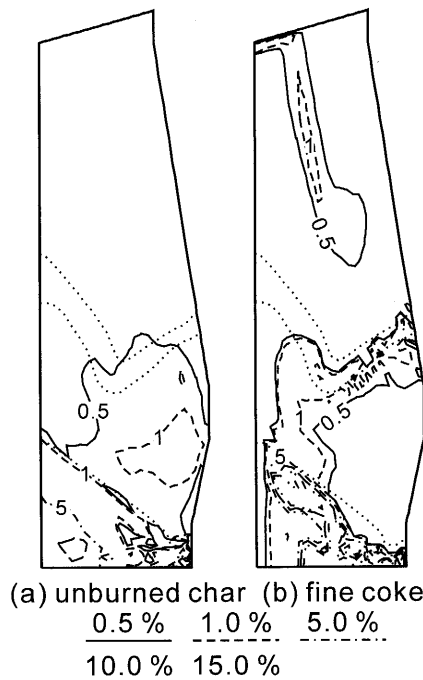


Fig. 16. Volume fraction of static unburned char and fine coke.<sup>23)</sup>

を確認した(Fig.15)<sup>20)</sup>。さらに、低還元材比操業下での滴下帯での液のチャネリング(偏流)、フラッシングに及ぼす粒子径、粒子の濡れ性、充填構造の影響を明らかにした<sup>21,22)</sup>。

(3) グループC(住金・宇治沢, JFE・渡壁), 東北大・埜上, 九大・西岡)

炉芯の通液性に大きな影響を与えるレースウェイ発生粉の蓄積挙動を高炉数学モデルによって解析した(Fig.16)<sup>23)</sup>。また、炉床部における融体の流動、伝熱、反応モデルを開発し、還元材比低減時のメタル・スラグ流動、残銹滓量、温度変化について解析するとともに、安定な出銹・出滓を維持するための制御方法を明らかにした(Fig.17)<sup>24,25)</sup>。

以上、高炉内での異常現象という定量化が難しい問題について始めて系統的な研究が実施され、実験手法や現象の

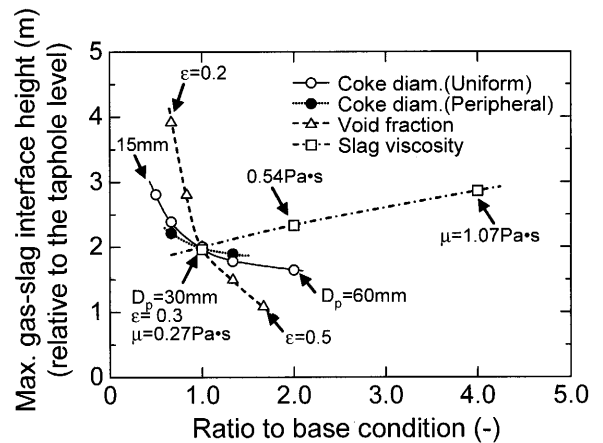


Fig. 17. Effect of various in-furnace conditions on the maximum gas-slag interface height relative to the taphole level.<sup>24)</sup>

モデル化、解析方法など、高炉の機能強化に向けた新しいアプローチの手法が開発された。また、炉況変動の力学的要因についても重要な知見が得られており、これを基礎とする更なる展開が要望される。

#### 4.2 革新的コンパクト高炉を目指した研究活動(科技厅プロジェクト)

1998年より5年間にわたって、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における革新的製鉄反応に関する研究」(研究代表者: 北大 石井邦宜(現JFEスチール))の大型プロジェクト研究が推進された。このプロジェクトでは、以下に示す四つの研究分科会を設け、鉄鋼製鉄反応の基礎に立って新しい高炉製鉄技術を創出するための研究を進めた。第1分科会では「還元とガス化反応の低温高速化」、第2分科会では「石炭・鉍石性状最適化への組成および構造設計」、第3分科会では「還元鉄とスラグの熔融温度の低減」、第4分科会では「革新的高炉製鉄法のプロセス評価」について研究した。各分科会での個々の研究成果については、*ISIJ Int.*, Vol. 44 (2004), No.12に特集号として公表されているのでこ

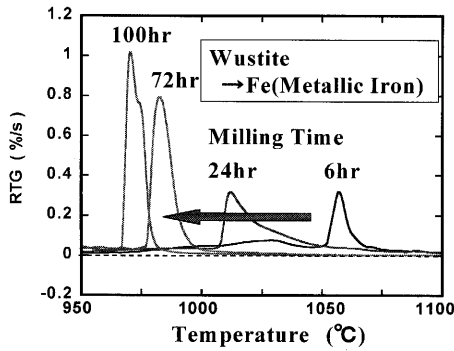


Fig. 18. Decrease in reduction temperature by the milling of wustite and carbon powder mixture.<sup>26)</sup>

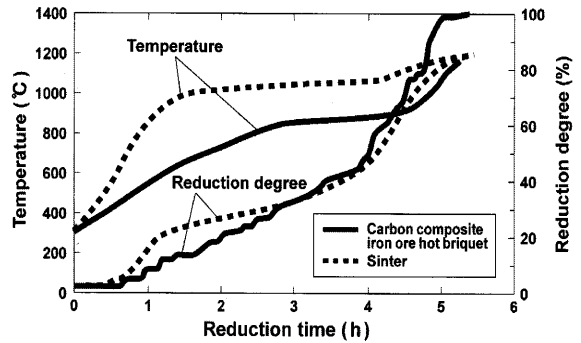


Fig. 20. Lowering of thermal reserve zone temperature in blast furnace by using carbon composite iron ore briquettes.<sup>30)</sup>

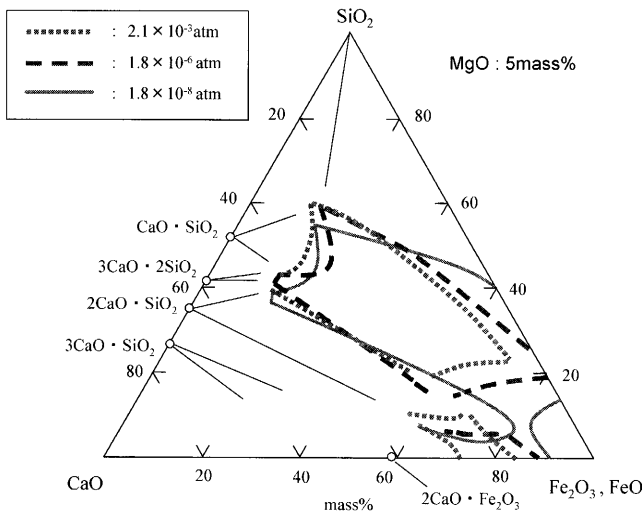


Fig. 19. Comparison of liquidus for the CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO<sub>x</sub>-MgO system with various  $P_{O_2}$ .<sup>28)</sup>

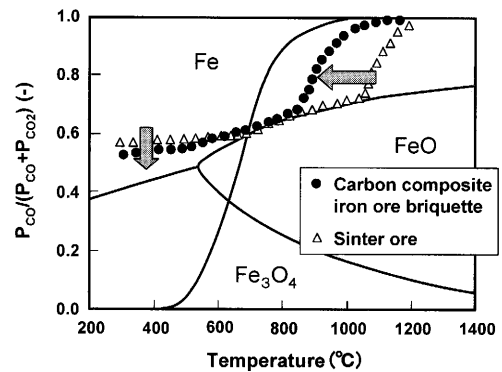


Fig. 21. Relationships between temperature and CO potential.<sup>30)</sup>

ここでは省略し、研究代表者によって総括されたプロジェクト全体の成果概要および鉄鋼製錬の革新が期待される研究成果を以下に挙げる。

(1) 還元とガス化反応の低温高速化

還元とガス化反応の低温化技術として、Fig.18 に示す鉱石と炭素の近接共存による還元反応とガス化反応の相互作用の利用<sup>26)</sup>を新規提案した。この相互作用はカップリング反応あるいは固体炭素との直接的反応として現れ、高温で生起する熔融スラグを介した反応（熔融還元）においても発現して重要である。これを効率よく生起させるには反応性の高い炭材が必要で、それらを実現するための基礎として、ラマン分光法による炭素構造とガス化特性との関係が明らかにされた<sup>27)</sup>。

(2) 低温高速製鉄への原料性状の性状最適化

高速・低エネルギー・低接合助剤で塊成鉱を製造する基本原理について、塊成化の基本となる SiO<sub>2</sub>-CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>-CaO-FeO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・MgO 系酸化物の高酸素分圧下での状態図(Fig.19)<sup>28)</sup>、融液生成速度・浸透・拡散・濡れなどの物理化学特性、および凝固組織の強度予測法が明らかにされた。また、還元と熔融に優れたスラグ成分と気孔構造

の究明、鉱石と石炭の高密度・高強度接合技術<sup>29)</sup>など、エネルギー半減に向けた革新的な塊成化方法が検討された。その画期的成果として、石炭の熱可塑性を利用して炭材と鉱石を高密度に接合、塊成化することにより、高炉の熱保存帯温度（還元平衡領域）を約 150~200°C 低減できることを明らかにした(Fig.20, Fig.21)<sup>30)</sup>。この成果は、高炉のエネルギー効率においてこれまでの限界を打ち破る可能性を秘めた革新的技術として期待される。

(3) 還元鉄とスラグの熔融温度の低減

熔融温度を支配している浸炭反応について、従来の固体浸炭、ガス浸炭に加え、熔融スラグを介した浸炭も生じることが明らかにされた(Fig.22)<sup>31)</sup>。また、還元鉄の浸炭開始温度はスラグの融点と密接な関係があり、低融点のスラグほど浸炭開始温度が低下することが示された。さらに、スラグの熱力学的検討から、CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 系では 2つの組成領域において低融点域が存在することが明らかになり、粘性などの動力的物性値についても理論と実験の両面から調査された<sup>32)</sup>。これら物性値は既往文献値と共に鉄鋼物性値便覧・製鉄編としてデータベース化された。

(4) 革新的高炉製鉄法のプロセス評価

以上の成果をベースに、高炉内で生じる多元系多相反応と個々の影響因子の関連、また、高炉のエネルギー効率に及ぼす各種操作パラメータの影響を定量的に評価するた

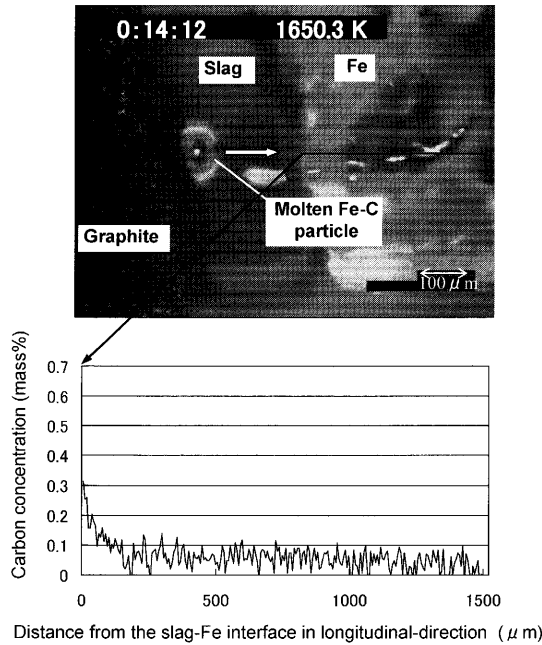


Fig. 22. Carbon transfer from graphite to iron rod (Fe) passing through the molten slag containing FeO.<sup>31)</sup>

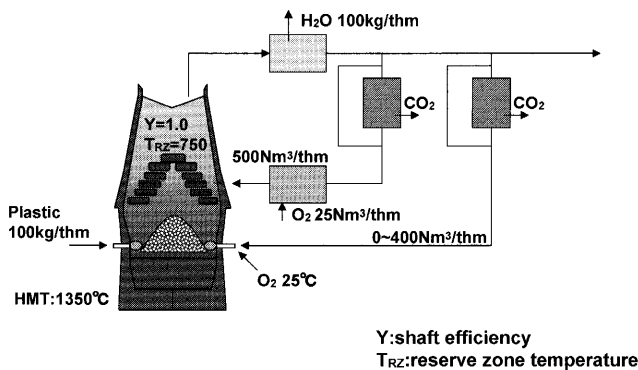


Fig. 23. Schematic drawing of optimized innovative blast furnace with top gas recycling.<sup>33)</sup>

め、種々のプロセスデザインが可能な3次元非定常数学モデルを開発した。このモデルを用いて、Fig.23, Table 1に示すような仮想製鉄システムに対する数値実験を行い、エネルギーミニマムのプロセスイメージと操業条件を提案した<sup>33)</sup>。

## 5. 今後への展望

### 5.1 高炉製鉄反応の更なる機能強化と技術的萌芽

高炉のエネルギー削減においては高 ore/coke 操業の実現が基本であるが、このためには最大の障害である高炉の物理的、熱的限界点の緩和および反応効率の抜本的な改善が必要である。動力学的な限界点の緩和については「高炉限界現象制御研究会」での成果を踏まえ、実操業における問題点の見直しと課題の抽出、実炉適用を考慮した実的な

Table 1. Operational conditions of conventional and optimized innovative blast furnace.<sup>33)</sup>

	Conventional B.F. (Base)	Optimized innovative B.F. (Compact B.F.)
Inner volume(m <sup>3</sup> )	4288	4288
Production(t/d)	8576	15000
Productivity(t/dm <sup>3</sup> )	2.0	3.5
Blast volume (Nm <sup>3</sup> /t)	(Air+O <sub>2</sub> )	957
	(Recycle)	0
Blast composition (%)	O <sub>2</sub>	29.0
	N <sub>2</sub>	71.0
	CO	0.0
	CO <sub>2</sub>	0.0
	H <sub>2</sub>	0.0
Blast temperature(°C)	1200	25
TFT(°C)	2000	1750
PCR(kg/t)	250	0
PLA(kg/t)	0	100
Coke rate(kg/t)	270	245
Carbon emission (kg/t)	379	286(▼25%) (Excluded CO <sub>2</sub> :52(▼86%))
Slag rate (kg/t)	300	189

研究の展開が必要である。一方、反応効率の改善については、①鉱石と炭材の最適配置による低温、高速還元、②触媒添加によるブドワー反応の高速化、③鉱石原料の成分、組織の最適化、④部分還元鉱の製造<sup>34,35)</sup>と高炉使用、が上げられる。①~③は高炉塊状態での還元とガス化反応の高速連鎖を目指すもので、熱力学的には還元平衡温度の低減に帰結する。炭材内装法によって既にその可能性が見出されており、今後は、その最適化、具現化に向け、平衡点制御のメカニズムと制御因子の解明、鉱石・炭材混合体の構造および組織設計、新塊成体の創製とプロセスイメージの構築、高炉での使用技術、等に関する研究開発が必要である。

また、④については、既にパイロットプラント試験において還元率約60%が達成されていることから<sup>34)</sup>、生産性、還元材比の更なる改善に向けた技術開発が望まれる。

### 5.2 水素の活用技術

H<sub>2</sub>利用については、炭化水素系ガスの高炉シャフト吹込みの有効性<sup>36)</sup>、低温還元の向上による融着帯領域で通気性改善<sup>37)</sup>など、CO<sub>2</sub>削減のみならず高炉の機能強化にも寄与すると予想される。水素成分に富む有機系廃棄物やバイオマスの製鉄燃料化など、未利用な水素源を有効活用する道もあり、製鉄用エネルギーの多様化、需給も含めた総合的な検討が必要である。

### 5.3 資源の劣質化対策、資源リサイクル、新プロセスへの展開

難焼結性鉱石の使用が可能な非焼成炭材内装塊成鉱、炭材-鉄鉱石-金属の複合塊成化(フェロコックス)による資源劣質化への対応、含炭塊成鉱へのミルスケールやダストの最適利用、スクラップとの併用処理、有機系廃棄物およびバイオマス等の製鉄燃料化、これら革新的な塊成化物や新エネルギーの高炉あるいは熔融炉での利用など、資



源・エネルギー・環境問題に寄与する多くの研究テーマが考えられる。いずれの技術においても、鉄鉱石-炭素間の反応が深く関っており、製錬反応の基礎に立った取り組みが望まれる。

## 6. 結言

2000年以降の高炉操業技術の進展および研究会活動を中心にした研究成果と技術萌芽についてまとめた。新世紀に入り、資源、エネルギー、環境という総合的な視点に立った新しい技術の創出に多くの努力が注がれている。最高の熱効率を誇る高炉において、今後の目標とされる10.5%のCO<sub>2</sub>排出量の削減は非常に高いハードルであり、その実現には従来法を超えた斬新な発想とアプローチが必要である。熱力学および速度論に基づく高炉製錬反応の最適化がその基本となるが、すでに将来につながる革新的な技術シーズも生まれており、それらを育て、具現化していく取り組みが急務と思われる。産学の有機的な連携、分野を挙げての一層の努力と挑戦に期待したい。

## 文 献

- 1) 日本鉄鋼連盟ホームページ: <http://www.jisf.or.jp/business/on-danka/joukyo/syohi.html>, (July, 2006).
- 2) T.Uenaka, H.Miyatani, R.Hori, F.Noma, M.Shimizu, Y.Kimura and S.Inaba: *Iron Steel maker*, (1988), November, 34.
- 3) Y.Matsui, K.Shibata, Y.Yoshida and R.Ono: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **55**, (2005), No. 2, 9.
- 4) A.Maki, A.Sakai, N.Takagaki, K.Mori, T.Ariyama, M.Sato and R.Murai: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 650.
- 5) 内藤誠章: 第179回西山記念技術講座, (2003), 87.
- 6) Asanuma, T.Ariyama, M.Sato, R.Murai, T.Nonaka, I.Okochi, H.Tsukiji and K.Nemoto: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 244.
- 7) R.Murai, M.Asanuma, Y.Kashiwabara, M.Sato, T.Ariyama, Y.Fukamoto and M.Sakurai: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 97.
- 8) S.Watakabe, K.Takeda, H.Nishimura, S.Goto, N.Nishimura, T.Uchida and M.Kiguchi: *ISIJ Int.*, **46** (2006), 513.
- 9) H.Okuyama, N.Nishimura, M.Takeshita, S.Goto, T.Uchida, M.Kiguchi, S.Watakabe, A.Murao and K.Takeda: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 181.
- 10) S.Nomura, H.Ayukawa, H.Kitaguchi, T.Tahara, S.Matsuzaki, M.Naito, S.Koizumi, Y.Ogata, T.Nakayama and T.Abe: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 316.
- 11) T.Inada, K.Takatani, K.Takata and T.Yamamoto: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1143.
- 12) A.Shinotake, H.Nakamura, N.Yadoumaru, Y.Morizane and M.Meguro: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 321.
- 13) A.Shinotake, H.Nakamura, H.Otsuka, N.Sasaki and Y.Kurita: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 750.
- 14) H.Oda: *Shinnittesu Giho*, **376** (2002), 28.
- 15) H.Takahashi, H.Kawai, M.Kobayashi and T.Fukui: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1386.
- 16) N.Katsura, T.Mitsuoka, Y.Shirakawa and J.Hidaka: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1396.
- 17) S.Yuu, T.Umekage and T.Miyahara: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1406.
- 18) Y.Matsui, R.Tadai, K.Ito, T.Matsuo, N.Nagai and T.Imai: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1439.
- 19) Y.Matsui, M.Tanaka, M.Sawayama, S.Kitano, T.Imai and A.Goto: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1445.
- 20) Y.Bando, S.Hayashi, A.Matsubara and M.Nakamura: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1461.
- 21) H.Kawabata, Z.Liu, F.Fujita and T.Usui: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1466.
- 22) H.Kawabata, K.Shinmyou, T.Harada and T.Usui: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1474.
- 23) H.Nogami, S.Pintowantoro and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1489.
- 24) K.Nishioka, T.Maeda and M.Shimizu: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1496.
- 25) K.Nishioka, T.Maeda and M.Shimizu: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1506.
- 26) Y.Kashiwaya and K.Ishii: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 1981.
- 27) M.Kawakami, H.Tagata, T.Takenaka and S.Yokoyama: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 2018.
- 28) H.Kimura, S.Endo, K.Yajima and F.Tsukihashi: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 2040.
- 29) A.Kasai, Y.Matsui, F.Noma, H.Iwakiri and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 313.
- 30) A.Kasai and Y.Matsui: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 2073.
- 31) K.Ohno, T.Miki and M.Hino: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 2033.
- 32) M.Nakamoto, T.Tanaka, J.Lee and T.Usui: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 2115.
- 33) Y.Murai, M.Sato and T.Ariyama: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 2168.
- 34) H.Sato, S.Machida, K.Nushiro, M.Sato, K.Takeda and T.Ariyama: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 21.
- 35) T.Kawaguchi, S.Kamikawa, E.Kasai and T.Otomo: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 25.
- 36) H.Nakazato, Y.Tsubone, Y.Takagi and T.Usui: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 116.
- 37) M.Nagayoshi, S.Hasegawa, H.Tsukiji, A.Shimomura, H.Nishimura, Y.Kashiwabara, K.Sato and M.Sato: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 136.