

特別講演

□第157回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演
(2009年3月30日)

高炉の固体運動とコークス中心装入理論 Solid Dynamics and Theory of Center Coke Charging for Blast Furnace

清水正賢

Masakata Shimizu

九州大学 大学院工学研究院
物質プロセス工学専攻 教授



*脚注に略歴

1 はじめに

いま高炉の操業においてCO₂の削減が最大の課題になっていますが、この問題は元来高炉操業が目指してきた本質的テーマであり、高炉の歴史をみてもその中心には常にエネルギー削減があったと思います。どの時代、どの時間においても高炉操業者は溶銑コストを下げるために、熱的、動力学的にぎりぎりの限界状態で高炉を運転してきました。少しでも熱的に余裕があればコークス量を減らしてその下限を追及するのが操業者の腕の見せどころでもあります。日常的高炉操業管理の実際を概念的にFig.1に示しますが、高炉の重要な管理指標は高炉から排出される溶銑の温度にあり、溶銑温度が目標より高い場合には装入するコークス量を削減する操作がとられます。その制御の下限は、溶銑温度の急低下や圧力変動、吹き抜け、スリップなどの異常現象の生起点になっており、この発生を検知した時点で送風温度の上昇やコークス比の増加などによる炉内温度の回復が図られます。高炉操業における省エネルギーの追求は、まさに高炉内での固体、気体、液体の動力学的な安定限界の追求でもあり、そのために高炉内での固体、ガス、液体の動力学に関する膨大な研究

が行われてきました¹⁻⁷⁾。

これまでの高炉研究において、高炉の安定操業のためには、高炉中心部でガス流を局所的に発達させて逆V型の融着帯を形成させるとともに、炉芯コークス層の通気性を高め、炉床内の温度を適正に維持することが重要とされてきました。特に、高炉中心部のガス流は炉内プロセスの良し悪しを判断する重要な指標であり、中心ガス流が弱くなると融着帯形状がW型化し、炉壁熱損失の増大や装入物の異常降下が見れるようになります。高炉操業において、中心ガス流の安定確保は共通した課題であり、その実現のために装入物分布制御を中心としたガス流分布の適正化が図られてきました。しかし、これらの方法のみでは常時安定した中心ガス流を得ることは困難な状況にありました。

こうした問題に対し、筆者らは高炉内における装入物の堆積挙動や降下特性⁸⁻¹⁰⁾、またこれらとガス流分布および軟化融着帯形状との関係を種々の模型実験によって基礎的に調べてきました。こうした実験の積み重ねから最終的に到達したガス流分布制御技術が「コークス中心装入法」^{11,12)}です。この技術は高炉の中心ガス流や軟化融着帯の制御だけでなく、これまで困難とされた炉芯コークス層の充填構造制御にも有効であることが見出され、高炉安定操業の基盤となる「高炉制御理論」として完成させることができました。ここでは、こうした理論構築までの取り組みについて紹介します。

2 高炉装入物分布の不安定性

「高炉制御の7割は装入物分布」と言われます。これは、高炉のような充填層型の反応器の性能は原料の充填状態に左右されるということを意味していますが、これと同時にもう

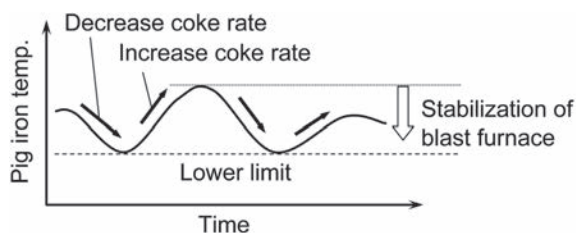


Fig.1 Transition of tapped pig iron temperature in blast furnace operation

* 昭和46年新潟大工学部化学工学科を卒業後、直ちに(株)神戸製鋼所に入社。中央研究所にて製銑研究に従事。61年主任研究員、63年工学博士(東北大学)、平成5年製銑研究開発室長を経て、12年4月九州大学教授に就任、現在に至る。

一つ、装入物分布制御の難しさを表した言葉のようにも思います。過去数十年にわたり高炉操業技術に関する論文や学会発表の内容を見ましても、装入物分布制御に関する研究が最も多いと思います。それほど多く取り上げられてきた最大の理由は、装入物分布の不安定性にあると思います。その不安定性を我々が身近で簡単に実感できるよい対象として「砂時計」が上げられます。砂時計を目の前に置き、粒子の堆積状態をじっと見ていれば、装入物分布制御が如何に難しいものか容易に理解できます。砂時計の砂には、その精度を維持するために粒子径が均一で硬い砂鉄などが用いられ、一定の速度で砂が下部に流出するように作られています。これほど高精度に作られたものでも、下に溜まっていく砂山の傾斜角(安息角)は時間的に一定ではありません。よく見ていると、山の上部に砂が溜まっては崩れ、溜まっては崩れ、これを繰り返しながら高くなっていきます。これは、斜面の角度は試料の供給量あるいは供給時間によって周期的に変化することを意味しています。高炉の装入物分布は、鉱石とコークスの堆積角の違いを利用して制御していますが、砂時計と同様に、原料の装入量や装入速度によって堆積傾斜角が変化していると想像されます。この観点から、実物大規模の装入物分布実験装置を作成し、堆積傾斜角に及ぼす装入量の影響を調べました⁹⁾。その結果がFig.2です。この図は鉱石の堆積傾斜角と装入量との関係ですが、砂時計と同様に傾斜角は装入量、装入方法、原料配合によって大きく変化することが検証されました。この知見は高炉制御や操業解析の重要な基礎といえます。日常の高炉操業では、炉況によって鉱石あるいはコークスの装入量を変えたり、感知できないところで粒度が変わったり、また装入装置の磨耗が進行したりします。これらの要因はすべて装入物分布に影響します。ここに装入物分布制御の難しさがあるように思います。より精度の高い分

布制御の実現をめざし、現在も高炉に装入される原料の粒度や配合割合、装入装置からの排出順位等を考慮した分布制御法が検討されていますが、これらのテーマは高炉操業の基本として一層の進展が望まれます。

3 高炉内の応力場

装入物分布の他に炉内ガス流分布に影響を及ぼす重要な因子として、堆積層の降下速度分布や炉下部に形成される炉壁滞留層および炉芯コークス層の形態が上げられます。これらの滞留層はその大きさや形成位置によって炉下部固体流れやガス流れに大きく影響します。その形成状態を土質力学的に推定するために、高炉模型を用いて炉内の応力分布を測定し、定常操業時の応力場を調べました¹⁰⁾。この測定で最も苦労したのが炉内応力の測定装置です。小型でかつ粉体層中に埋設できる土圧計は市販されておらず、実験では浅いプラスチックの容器を利用して自作しました。受圧面を四個の起重板で支え、起重板の振動をストレインゲージで検出するものです。炉内の応力振動が約80-100Hzであるのに対し、自作した土圧計の共振周波数は1300Hzで、変動の少ない非常にきれいな応力値を検出することができました。Fig.3に模型高炉内の応力測定から求めた最大主応力の方向線図を示します。この線図から炉内の応力場が始めて明らかになりました。装置内に粒子を充填した直後は最大主応力がすべて下方に向かう主働応力場になっていますが、装入物が降下運動を開始すると応力場が大きく変化し、シャフト部が主働応力場、ボッシュ部は応力線がアーチ状を呈する受働応力場となり、その間に遷移域が形成されます。また、ペリー壁部には応力場が主働状態から受働状態に急変するSwitch部が現れ、この部分に著しい集中応力が働くことも判明しました。

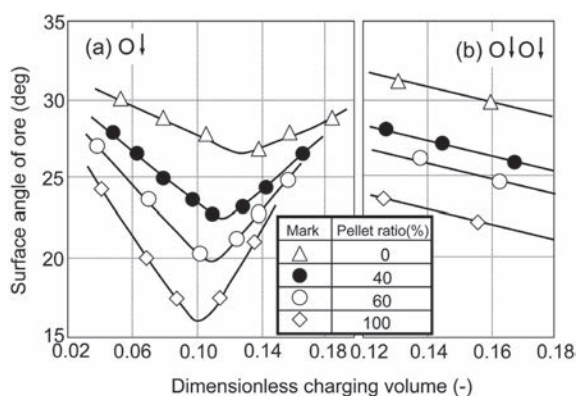


Fig.2 Relationship between charging volume of ore and the surface angle of ore layer. ((a): single charging of ore, (b): twice charging of halved ore, Dimensionless charging volume: charging volume / $\pi R_p^2 / R_i$)

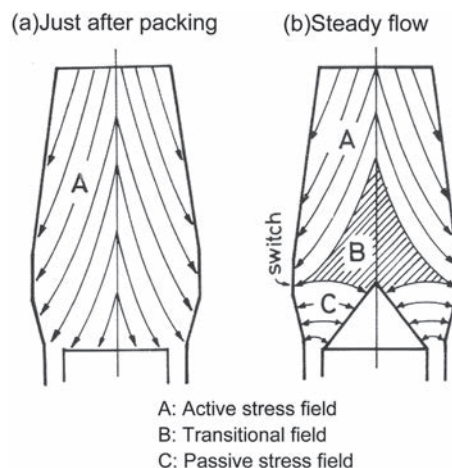


Fig.3 Direction of major principal stress and stress fields in the blast furnace

ここで明らかにした応力場は、炉芯コークス層の形状や炉壁滞留域を推算するための基本条件として不可欠であり、その後の炉内応力解析に重要な知見を提示できたものと思っています。

4 コークス中心装入理論の構築

高炉制御の重要な制御指針として、炉下部高温域に形成される軟化融着帯の形状が上げられ、安定操業にはその形状を逆V型に維持することが望ましいとされています¹⁴⁾。このためには、炉中心部の鉱石/コークス比(鉱石とコークスの堆積重量比、以下O/Cと記す)を低く抑えてガス流を強化させ、中心部の温度を他の領域より高く維持する必要があります。しかしながら、前述したように装入物分布の不安定性を考えると、中心部のO/Cは装入条件の僅かな変動によって容易に変化すると考えられます。また、これによって炉内の状況が大きく変化することも予想されます。この中心部O/Cの値が炉内温度分布や軟化融着帯の形状にどう影響するかを明らかにするために、鉱石の代わりに低融点樹脂を用いた高炉熱間模型実験を行ないました^{11,12)}。Fig.4にコークスの一部を炉口中心部に別装入して中心部のO/Cを局所的に低下させた際の融着帯形状の変化を示します。融着帯の形状は中心部のO/C(図中のRWcは中心部に別装入したコークスの重量割合)によって劇的に変化し、中心装入量の増加とともにM型→W型→逆V型へと大きく変化することが見出されました。中心部に別装入したコークス量は全体の数%という非常に僅かの量でしたが、これほどの影響は予想もしませんでした。しかし、この僅かな量であることが後の実炉試験を決断させる大きなポイントにもなりました。このモデル実験結果を受けて実高炉でのコークス中心装入テストが実施され

ました。Fig.5に流し込み型の垂直水平ゾンデ^{14,15)}で調べた炉内温度分布とコークス中心装入量(Wc)との関係を示しますが、模型実験と同様に僅かな量のコークス中心装入で炉内の温度分布が大きく変化することが確認されました。特に驚いたことは、100kg/chという僅かな中心装入量で理想とされる逆V型の温度分布が安定して得られたことで、中心部のO/Cが高炉操業の重要な制御ポイントであることを実証できました。

この中心装入法は、その後の研究において軟化融着帯の制御だけでなく炉芯コークス層の充填構造制御にも寄与する技術としてさらに大きく進展することになります。当時、軟化融着帯の制御に加え、炉体寿命の延長も大きなテーマでした。シャフト部の補修技術は既に大きく進歩しており、高炉の寿命は炉床耐火物の溶損度合いで決定されていました。したがって、炉体寿命延長のための技術課題は、炉床侵食の原因となる炉床湯溜まり内での溶銑流制御という問題でした。この課題に対し、炉床内の溶銑流れは炉芯コークス層の充填構造に依存するとの考えから、高炉冷間模型を用いて炉芯コークス層の充填機構を独自に考案した流線可視化法によって調べました¹⁶⁾。この方法によって捕らえられた高炉内の固体の流線と等時間線をFig.6(a)に示します。非常に美しい流線と等時間線の模様に感激しながら、ふと垂直方向に下りる固体流線に着目すると、充填粒子は炉頂部からレースウェイ部までほぼ決まった位置を降下し、炉芯表層部を流れる粒子は(b)図に示すように炉頂部の中心領域に充填されたものに限られることに気が付きました。このような流動特性のもとで炉芯がゆっくり下方に降下すれば、炉芯部に供給される粒子はそのほとんどが中心部を降下してきたものに限定され、この粒子によって炉芯が更新されることになります。この瞬間が炉芯充填機構の発見だったといえます。この機構を

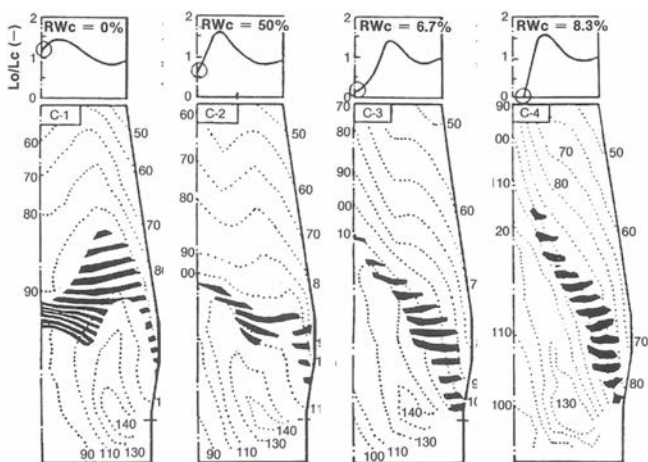


Fig.4 Effect of O/C ratio in central area on cohesive zone shape.
(RWc : Weight of center charged coke versus coke base)

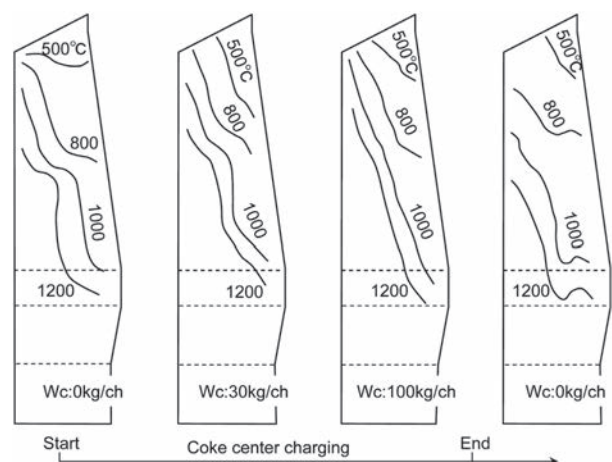


Fig.5 Effect of center coke charging on isotherms in actual blast furnace

立証するために炉底降下が可能な高炉炉床模型を作成し、炉芯の更新および炉芯充填構造制御に関するモデル実験を行ないました^{11,12)}。Fig.7は炉口中心部の半径 r_c の領域に白色のトレーサークークスを装入し、その装入領域を変化させた場合の炉芯内への流入状態を示したものです。炉口中心部に装入されたトレーサークークスは、炉芯頂上に至ると炉芯斜面に沿って羽口部へ放射状に降下していますが、その過程で一部のークスはゆっくり降下する炉芯内に取り込まれ、炉芯が次第にトレーサークークスによって更新されていくことがわかります。また、トレーサークークスによる炉芯の更新領域は、炉頂部におけるトレーサークークスの装入半径(r_c/R_t)に大きく依存し、その増大とともに更新領域も拡大しています。この実験から、炉芯全域のークスを所定の性状を持つークスで更新させるためには、そのークスを炉頂部の無元半径で0.12の領域に装入すればよいことが判明しました。この炉芯の充填機構を実炉において検証するために、トレーサークークス(石油ークス)を炉の中心部に装入し、炉芯ークスサンプリングによって炉芯内への流入状態を調べました。Fig.8に炉芯に流入したトレーサークークスの濃度分布を示しますが、ークス装入量の0.5%という僅かな中心装

入量でも炉芯中心部のークスが10%以上更新され、炉芯制御へのークス中心装入法の有効性が確かめられました。さらに、約一ヶ月間にわたるークス中心装入試験において、中心装入量の変化に対応して炉底中央部のれんが温度の上昇や炉芯サンプル中のークス粉率の低下が認められました¹²⁾。この結果は、ークス中心装入によって炉芯中央部の通気、通液性が改善されたことを示唆するものでもあります。

以上のような炉芯充填構造の変化は、この研究から構築されたFig.9のークス中心装入理論¹²⁾によって説明できます。通常、炉内に装入されたークスは、降下過程で鉬石の還元反応で生じた CO_2 ガスによりカーボンソリュージョンロス反応($\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$)を受けます。この反応を著しく受けたークスは気孔が増大して強度が低下し、多量の粉を発生しやすくなります¹⁷⁾。特に、炉芯を形成する中心部のークスがこの反応を受けると、炉芯内に大量の粉を持ち込み、炉芯

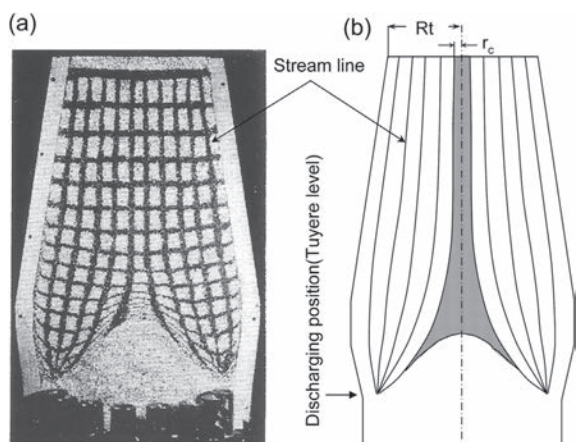


Fig.6 Stream- and time lines of solids in model blast furnace (r_c , R_t : Radius of center coke charging and throat, respectively)

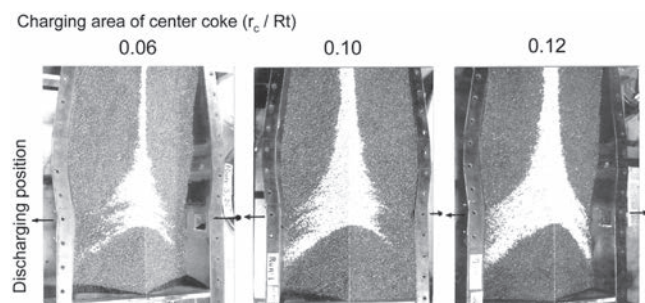


Fig.7 Appearance of deadman renewed by center charged coke. (r_c , R_t : Radius of center coke charging and throat, respectively)

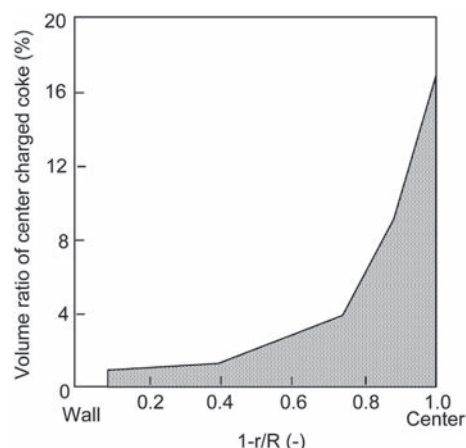


Fig.8 Radial distribution of volume ratio of center charged coke in deadman of actual blast furnace

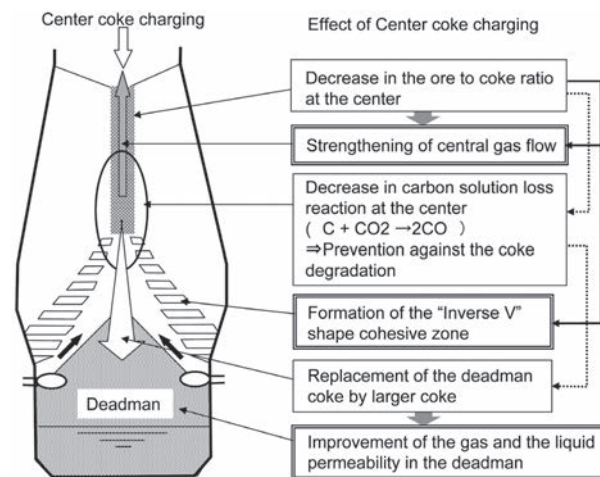


Fig.9 Theory of process control of blast furnace by using center coke charging method

の通気・通液性の悪化をもたらします。しかしながら、コークス中心装入によって中心部の鉬石量を局所的に減少させた場合には、中心部での CO_2 ガスの発生量が減少し、カーボンソリューションロス反応が抑制され、粉発生の少ない健全なコークスが炉芯に供給されることになります。実炉での炉況改善効果はこうした炉内反応挙動が反映されたものと推察され、コークス中心装入法が軟化融着帯のみならず炉芯の通気・通液性制御にも有効に寄与する技術であることが明らかとなりました。

この技術は、軟化融着帯あるいは炉芯制御用コークスを炉口中心部に少量別装入するという、従来の操業法とは異なる新しい高炉操業法で、今まで高炉の技術者にとって制御が困難と考えられていた課題を一挙に解決する指針を与えたことになり、高炉技術者や研究者から高い評価を受けました。コークス中心装入法をいち早く実用化した加古川 No.2 高炉では、操業の安定性と経済性が飛躍的に向上し、日本最高の補助燃料吹き込み（微粉炭＋重油）を達成しました。加えて、本技術は高炉操業全般にわたる技術的波及効果もあり、「微粉炭の多量吹き込み」や「低廉原料の多量使用」、「高炉寿命の延長」、さらには「低還元材比・高出鉄比高炉の実現」など、新しい高炉操業を支える基幹的技術として内外の多くの高炉に適用され、有効に活用されています。

5 おわりに

企業、大学を通じて約 40 年近く高炉制御にかかわる研究に携わってきました。その多くは装入物の運動特性に関するもので、研究手段もいろいろな模型実験装置を用いた実験研究が中心でした。高炉内での粒子運動について多くの特性を見出しはしましたが、いずれも理論的な理解までには至っていません。現在、不連続の粒子運動を DEM モデル等を用いたシミュレーション解析によって数学的に再現できる技術が開発されており、その精度も高くなっています。こうした技術によって高炉の理解や制御が大きく進むものと期待されます。一方、近年、炭材内装法など製錬反応の革新を目指した発想や研究開発も進められており、「技術は永遠に進歩する」ことを実感させられています。高炉研究にはまだまだ予測しない面白さや可能性が潜んでいるように思います。微力ではありますが、夢を持ってこれからも高炉研究に関与していきたいと思えます。最後になりましたが、この度の受賞に際し、ご支援、ご協力いただいた方々に感謝申し上げますとともに、今後も一層のご支援をお願い申し上げます。

参考文献

- 1) R.Nishida, S.Inaba, K.Okimoto, M.Shimizu, S.Tamura, T.Uenaka and Y.Maeda : Tetsu-to-Hagane, 58 (1972), S21.
- 2) K.Narita, S.Inaba, I.Kobayashi, K.Okimoto, M.Shimizu, K.Kuwano and K.Ikeda : Tetsu-to-Hagane, 65 (1979), 44.
- 3) H.Kamisaka, Y.Okuno, T.Irita, S.Matsuzaki and T.Isoyama : Tetsu-to-Hagane, 69 (1983), S728.
- 4) H.Kanoshima, I.Ogata, K.Kunitomo and T.Hino : Tetsu-to-Hagane, 69 (1983), S57.
- 5) K.Okimoto, S.Inaba, R.Ono and M.Takada : Tetsu-to-Hagane, 71 (1985), A9.
- 6) T.Izawa, M.Miura, H.Satomi, M.Saito, K.Miyamoto, T.Fukushima and T.Furukawa : Tetsu-to-Hagane, 63 (1977), S446.
- 7) K.Takeda, Y.Konishi, S.Taguchi, T.Fukutake and S.Yamazaki : Tetsu-to-Hagane, 71 (1985), S74.
- 8) K.Narita, S.Inaba, M.Shimizu, I.Kobayashi, K.Okimoto and A.Yamaguchi : Tetsu-to-Hagane, 66 (1980), 459.
- 9) K.Narita, S.Inaba, I.Kobayashi, K.Okimoto, N.Shimizu, T.Yabata and S.Tamada : Trans. ISIJ, 19 (1979), 667.
- 10) M.Shimizu, A.Yamaguchi, S.Inaba and K.Narita : Tetsu-to-Hagane, 68 (1982), 936.
- 11) M.Shimizu, Y.Kimura, S.Inaba, T.Uenaka, H.Miyatani, R.Hori and F.Noma : Iron & Steel Makers, I&SM, 15 (1988) 11, 34.
- 12) M.Shimizu, Y.Kimura, S.Inaba, R.Hori, K.Kuwano and F.Noma : R&D KOBE STEEL ENGINEERING REPORT, 41 (1991) 4, 11.
- 13) S.Sasahara, A.Yamaguchi, M.Shimizu, T.Sugiyama, S.Inaba, R.Ono and A.Hachiya : Tetsu-to-Hagane, 72 (1986), A5.
- 14) I.Nishida, M.Takami, S.Tada, R.Hori, M.Hosokawa and M.Takeuchi : Tetsu-to-Hagane, 67 (1981), S72.
- 15) I.Kobayashi, S.Inaba, M.Shimizu, R.Hori and T.Goto : Tetsu-to-Hagane, 73 (1987), 2092.
- 16) M.Shimizu, Y.Kimura, M.Isobe, D.Sya and S.Inaba : Tetsu-to-Hagane, 73 (1987), 1996.
- 17) A.Kasai, H.Iwakiri, T.Kamijo and M.Shimizu : Tetsu-to-Hagane, 83 (1997), 551.

(2009 年 5 月 8 日受付)