

新日本製鐵ツイントーチ式タンディッシュプラズマ加熱装置 “NS-Plasma II”

Twin Type Tundish Plasma Heater of Nippon Steel “NS-Plasma II” for Continuous Caster

橋高節生^{*(1)} 脇田修至^{*(1)} 佐藤孔司^{*(2)} 宮下昌幸^{*(2)}
 Setsuo KITAKA Shuji WAKIDA Tadashi SATO Masayuki MIYASHITA

抄 録

連続鋳造プロセスの生産性向上、コスト削減を実現する大出力長寿命のツイントーチ式のタンディッシュプラズマ加熱装置“NS-Plasma II”を開発した。この設備の特徴と効果について紹介する。

Abstract

In continuous casting, Nippon steel developed the twin type tundish plasma heater “NS-Plasma II” which has the high power output and long life. The features and effects of this system are outlined.

1. 緒 言

近年、連続鋳造プロセスは急速な高級グレードの鋼材需要増を背景に、国内において既存設備の生産能力の向上ニーズが高まっている。また、国際的な環境改善ニーズへの適応からもエネルギーの効率的な活用、鋼の歩留りの向上が急務になっている。これらのニーズに適応して生産性の向上、省エネルギーおよび高級鋼の歩留り向上を同時に実現できるプロセスとして、連続鋳造設備の溶鋼鍋 - モールド間に配置されたタンディッシュ内の溶鋼温度を制御するタンディッシュ内プラズマ加熱装置が新たに注目されている。

新日本製鐵では従来からこれらのニーズに対応して、シングルトーチ式のタンディッシュプラズマ加熱装置“NS-Plasma I”を開発し、数多くの生産設備にて安定的な操業により効果を発揮してきた¹⁻³⁾。更に高生産量のミルのニーズに応えるため、トーチの高出力、長寿命化およびタンディッシュの熱間回転操業にも適したツイントーチ式タンディッシュプラズマ加熱装置“NS-Plasma II”を開発した。本稿ではその特長について述べる。

2. タンディッシュプラズマ加熱装置の特長

新日本製鐵のタンディッシュプラズマ加熱装置は、タンディッシュ溶鋼上に設置したプラズマトーチと溶鋼間にプラズマアークを発生させ、プラズマ出力を制御することでタンディッシュ内の溶鋼温度を最適に制御可能にしている。プラズマ加熱は高温熱源であるアルゴンプラズマを用いており、プラズマ中心部の推定温度は10 000 以上に達する。また、不活性ガスであるアルゴンを用いたクリーンな雰囲気での加熱が可能となるため、燃焼ガスによる加熱等に比べ、溶鋼の酸化、窒化、炭化等を極限的に抑制することができる⁴⁾。

3. プラズマ加熱の適用効果

図1に示すように、タンディッシュ内の溶鋼温度は耐火物への吸熱や溶鋼表面からの放熱の影響を受け、鍋交換前の温度低下が避けられない⁵⁾。プラズマ加熱ではこのような温度低下を防止することが可能となり、鍋交換時の溶鋼温度変動幅を約1/3に制御することが可能となる。プラズマ加熱による適用効果を図2に示し、以下に説明する。

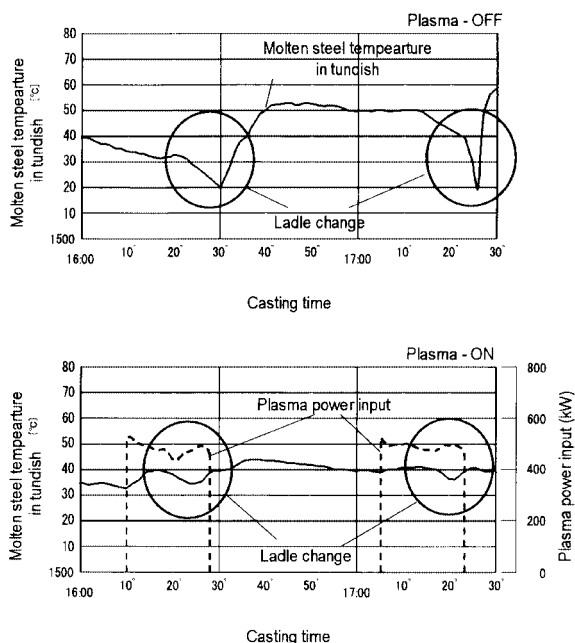


図1 溶鋼温度制御例
 Molten steel temperature control (example)

^{*(1)} プラント・環境事業部 製鉄プラント第二部 マネジャー
 福岡県北九州市戸畑区中原46-59 〒804-8505 TEL:(093)872-6986

^{*(2)} プラント・環境事業部 製鉄プラント第二部

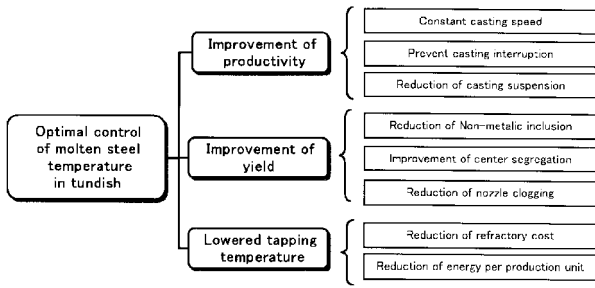


図2 プラズマ加熱適用効果
Effects of plasma heating

3.1 生産性向上

タンディッシュプラズマ加熱では溶鋼温度の制御が可能となるため、鑄造初期及び鍋交換後の高温側の適正温度外れ時に行っていた鑄造速度調整(鑄造速度低下)を最少にでき、また、低温側の適正温度外れにより生じていたノズル詰りによる鑄造中断や鑄造中止を低減することができる⁸⁾。これらの効果によって生産性の向上が可能となる。

2002年に愛知製鋼に納入した新日本製鐵シングルトーチ式タンディッシュプラズマ加熱では、鑄造温度を安定することで鑄造速度一定化が可能になり、生産性を5%向上したと報告されている⁷⁾。

3.2 歩留まり向上

図3に示すように鑄片品質を確保(中心偏析と非金属介在物を同時に低減)するために適正な温度にて鑄造することが必要となる⁸⁾。タンディッシュ内溶鋼温度が高温側に外れた場合には中心偏析が増大する。同時に内部割れを発生しやすくなるのが分かっている。また、低温側に外れた場合には非金属介在物の浮上機能が低下するため、非金属介在物が凝固シェルへ捕捉され表面欠陥を生じ、更に浸漬ノズル詰りが発生しやすくなる。

タンディッシュプラズマ加熱は、タンディッシュ内の溶鋼温度を適正な温度に制御可能であり、品質異常材の発生を抑えることが可能となり歩留まり改善に繋がる。

3.3 転炉，電気炉からの出鋼温度低下

溶鋼加熱機能を持たない連続鑄造機では鑄造中の溶鋼温度低下を

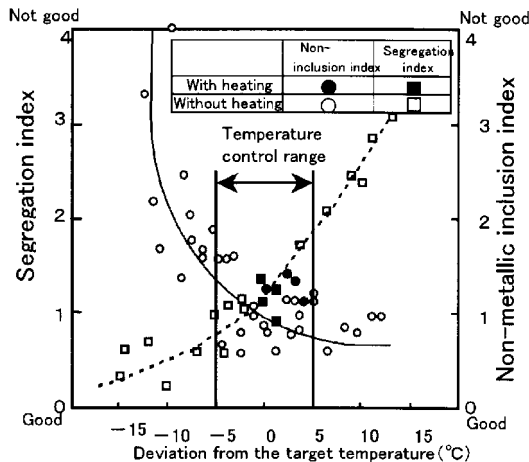


図3 最適な溶鋼温度範囲

Improved cast strand quality by the molten steel temperature control

考慮して転炉や電気炉の出鋼温度を高温にして操作している。タンディッシュプラズマ加熱装置を設置することでタンディッシュ内の温度低下を防止できるため、転炉や電気炉からの出鋼温度を下げる事ができ、炉や鍋における耐火物コスト、転炉，電気炉における投入エネルギーの削減が可能となる。

これらの適用効果を考慮した概算のメリット試算例を図5に示す。年産120万ton連続鑄造機にツイントーチ式を導入した場合のメリット試算では、プラズマ加熱装置の効果は約180円/tonと見込める。この場合のメリットの内訳は生産性向上50%，歩留まり向上30%，出鋼温度低下によるものが20%となる。

3.4 新連続鑄造プロセスへの適用

新しい連続鑄造プロセス技術である双ドラム式ストリップキャスターでは、鑄造温度低下に伴うサイド堰下部への地金生成・付着が発生しやすく、これにより操業トラブルを生じる可能性が高い⁹⁾。同様に、薄スラブ連続鑄造機においても溶鋼温度低下に伴うパウダー溶融不良起因の操業トラブルが発生しやすい。このようなトラブル防止のため溶鋼温度の制御が必須となる¹⁰⁾。

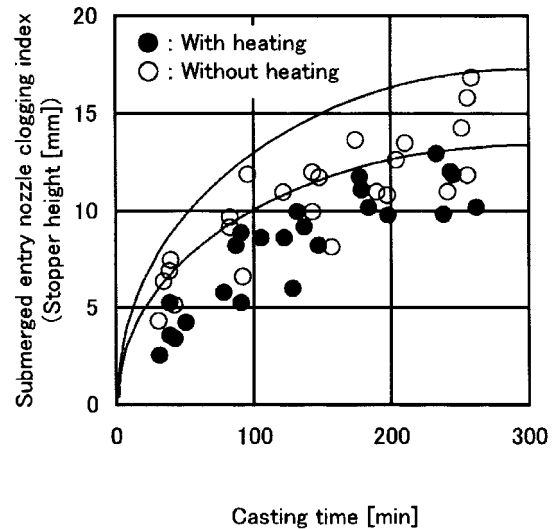


図4 プラズマ加熱適用によるノズル詰まり低減効果
Reduction of submerged entry nozzle clogging

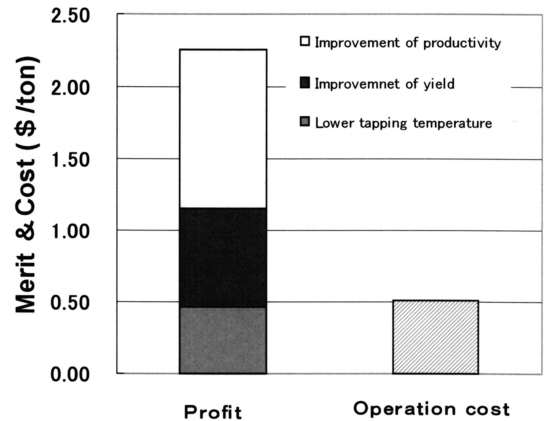


図5 導入メリット
Merits of plasma heating

4. 連続鋳造機に適したプラズマトーチ仕様の選定

表1に新日本製鐵タンディッシュプラズマ加熱装置のトーチの特長を示す。プラズマトーチには、カソード電極(陰極)、アノード電極(陽極)の位置によってシングルトーチ式とツイントーチ式の2種類がある。

シングルトーチ式はタンディッシュ上面に設置した陰極(カソード)トーチと、タンディッシュ耐火物内に埋設された鉄板を陽極(アノード)としたものであり、プラズマ放電のための電子放出には熱電子放出による熱陰極型トーチを採用している¹¹⁾。

またツイントーチ式は、タンディッシュ上面に設置した2本のトーチそれぞれをカソード電極とアノード電極としたものである。その特長は、トーチによって生じるプラズマアークが溶鋼との間で2本形成するためシングルトーチ式に比べ高出力を得ることができること。および、タンディッシュのアノード鉄板の耐火物への埋設、配線の敷設等の改造が不要となることである。更に熱間回転作業を行うタンディッシュの場合にはシングルトーチ式の制約になるタンディッシュ内に埋設されたアノード電極の補修が不要となり、タンディッシュ整備性が向上する。

また、図6に示すようにカソード、アノードトーチを隣接させて設置するため電源装置から両電極までの配線ケーブルを近接して並列した配線が可能となり、両ケーブルに生じる磁界が相殺され周辺機器への磁界影響(計装機器へのノイズ)が少なくなる。

図7に連続鋳造機の規模に対する各プラズマトーチのメリットを示す。その特性として必要加熱能力の低い小～中規模(ピレット、

ブルーム等)の連続鋳造機においては、トーチ本数が1本のため狭いスペースに適用しやすく、アルゴンの消費量、トーチ消耗品の交換量が少ないシングルトーチ式(NS-Plasma I)が望ましい。一方、高い加熱能力を必要とする中～大規模(多ストランド大断面ブルーム、スラブ等)の連続鋳造機では1つの電源装置により高出力を得られ、トーチ寿命の長いツイントーチ式(NS-Plasma II)が適している。

新日本製鐵では中～大規模の連続鋳造機向けにタンディッシュ加熱装置のニーズに応えるべくツイントーチ式タンディッシュプラズマ加熱装置“NS-Plasma II”を開発した。

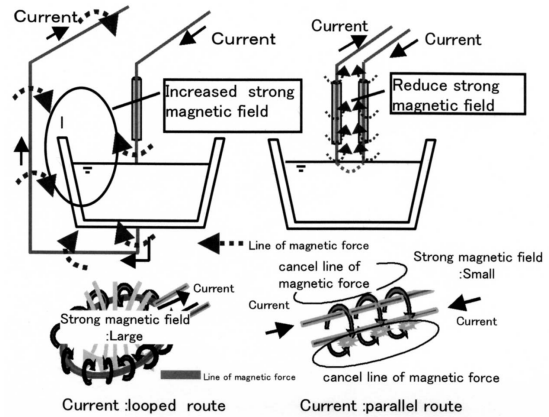


図6 トーチ別磁界発生特性
The feature of generating magnetic field by plasma heating type

表1 プラズマ加熱方式比較
Comparison of the plasma heating type

Plasma torch type	NS-Plasma I	NS-Plasma II
	Single torch	Twin torch
Composition	Cathode torch (Anode: TD)	Cathode and Anode torch
	DC	
Composition		
Maintainability of torch	An external diameter: 1.1 (Type of separated nozzle)	An external diameter: 1.0
Power	0.2 ~ 0.7MW Recommend 0.5MW	0.3 ~ 0.8MW
Heating efficiency	60 ~ 70%	60 ~ 70%
Plasma gas noise	1.0 noise: Low	2.4 noise: a little low
Lifetime of torch	Cathode: 1.0 Anode: 1.0	Cathode: 2.0 Anode: 2.0 Nozzle: 2.0
Electric noise	Generated noise: a little	Generated noise: little
Revamp	Heating chamber Anode plate in tundish	Heating chamber
Maintainability of refractory in tundish	Need to maintain anode plate in tundish Adapted TD heat recycle: difficult	Only general maintenance Adapted TD heat recycle: possible
Equipment layout	Small (Because of one torch)	Middle (Because of two torches)

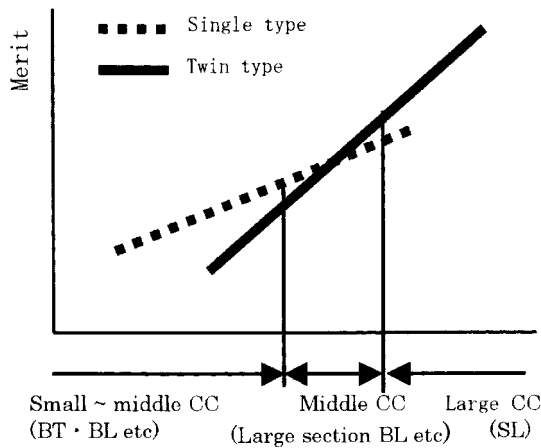


図7 プラズマトーチタイプ別メリット
Merits by the plasma heating type

5. NS-Plasma IIの特長

NS-Plasma IIのシステム構成を図8、表2に示す。NS-Plasma IIはアノード電極、カソード電極共にトーチを採用した構造となる。2本のトーチは一つの駆動装置に設置されるため機器の構成はNS-Plasma Iと同様となる。

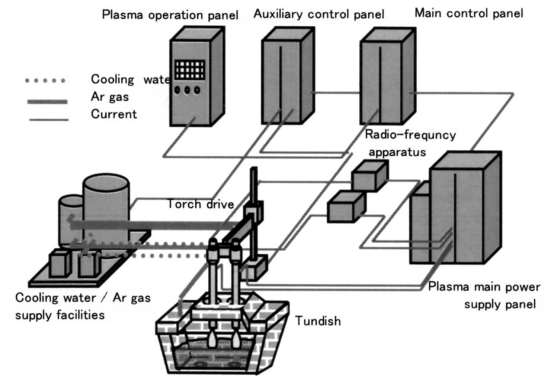
5.1 トーチの長寿命化

プラズマアークはカソード(陰極)からアノード(陽極)に向けてプラズマ媒体である気体分子と電離した電子の衝突が繰り返され、衝突により放出されるエネルギーにより高温となる。この時、プラズマアークのエネルギー分布は陰極に比べ陽極付近が大きくなる。このためアノード電極表面の高い熱負荷によって電極面が膨張し表面が凸状態となり、溶鋼からのプラズマアークが一箇所に集中しやすくなり、アノードトーチの電極破損につながる。新日本製鐵ではアノード電極表面の形状を最適化し、数値解析や実験室試験より適正な独自の電極形状、更には熱耐久性にすぐれた材質を開発することで電極表面における熱負荷を分散させ約10倍の寿命延長(カソード電極同等レベル)を実現した(図9参照)。

5.2 タンディッシュ熱間回転への対応

シングルトーチ式タンディッシュプラズマ加熱装置(NS-Plasma I)ではタンディッシュ耐火物にアノード鉄板(陽極)を埋設するため、

タンディッシュ耐火物の改造やタンディッシュへのケーブルの付設(ケーブルチェーン等)が必要であり、アノード電極補修を行う際には電極廻りの耐火物整備が必要となるため、タンディッシュ(TDと略す)熱間回転作業時にタンディッシュの整備性上の制約があった。新日本製鐵ではタンディッシュ耐火物に埋設していたアノード電極をトーチ方式にしたアノードトーチを開発し、2本のトーチ(カソード・アノード電極)を一つの駆動装置に配置することによって大出力でコンパクトなツイントーチを採用している。これにより従来必要であったアノード電極廻りのタンディッシュ内耐火物の改



NS-Plasma II (Cathod :Torch Anode :Torch)

図8 NS-Plasma IIの構成
Composition of NS-Plasma II

表2 NS-Plasma IIの主仕様
Main specification of NS-Plasma II

トーチ型式	タイプ	直流移行型プラズマトーチ	
	電極	陰極	特殊タングステン
		陽極	特殊合金
電流	DC 5,000A (max)		
電圧	約200 ~ 250V (雰囲気により変動)		
トーチ作動ガス	Ar		
トーチ冷却水	種類	飲料水	
	水質	導電率 < 50 μ S/cm	
	水温	< 40	

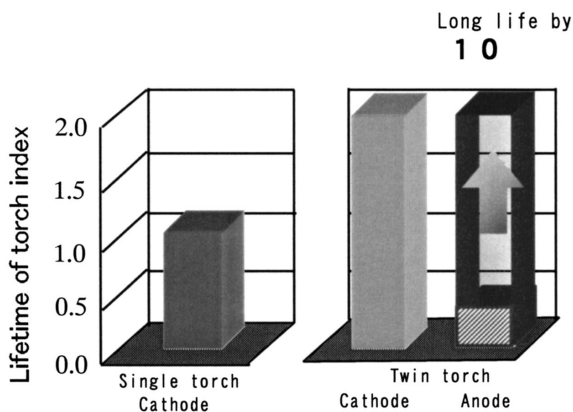
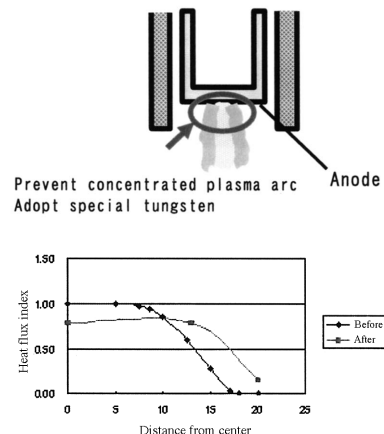


図9 陽極電極長寿命化
Long life of anodic electrode



造，整備が不要となるため，TD熱間回転操業時の整備性が格段と改善された。

6. エンジニアリング技術

6.1 タンディッシュ内の堰配置設計

10 000 以上に達するプラズマアークからの溶鋼への加熱は主に輻射熱により行われるため溶鋼表面のみが加熱される。このためタンディッシュ内の溶鋼流動が不適正な場合には溶鋼淀みを生じるため温度低下を招き，モールドへ流出する溶鋼の温度を上昇できない場合がある。図10に示すように堰配置を適切にするとタンディッシュから，モールドへ流出する溶鋼温度を常に一定に上昇させることができる。

新日本製鐵ではタンディッシュ内の溶鋼流動解析より，タンディッシュ形状やトーチの設置位置に対して適切な堰配置を決定し，タンディッシュ内の溶鋼流動を最適化する技術を保有している。これによりモールドへ流出する溶鋼温度を安定的に制御できる。

6.2 最適トーチレイアウト設計

タンディッシュプラズマ加熱装置のレイアウトは操業床において各種装置(レールドカー(ターレット)，タンディッシュカー，ダミーバ収容装置等)の相互の取り合いや操作性を考慮した設計を行う必要がある。また，トーチ設置位置は溶鋼のモールドへの流出時の温度を確保でき，加熱室内の耐火物への影響を考慮した設計を行っている。また，ツイントーチ式タンディッシュプラズマ加熱装置はカソードおよびアノードトーチが隣接する構造であるため，トーチ間の短絡電流を防止するトーチ設置位置の最適設計およびトーチ表面の絶縁対策も配慮している。新日本製鐵ではこれらの蓄積されたエンジニアリング技術により最適トーチレイアウトの設計を行っている。

6.3 加熱室設計

加熱室内壁はプラズマアークの輻射熱により高温となるため，耐火物の損耗が課題となる。新日本製鐵では，温度シミュレーションを行い，プラズマアークと耐火物間に一定の距離を確保することで，耐火物の上限温度以下になるように加熱室を設計している(図11参照)。

また，加熱室は外部から酸素，窒素が混入すると，トーチ電極，ノズルの寿命を低下させ，プラズマ着火不良やアークの不安定等を引き起こす。新日本製鐵では加熱室内上堰とタンディッシュ内溶鋼表面にてアルゴンガスを充填し，加熱室とトーチ挿入口をシールすることによって高いアルゴン濃度を保持し安定操業を実現している。

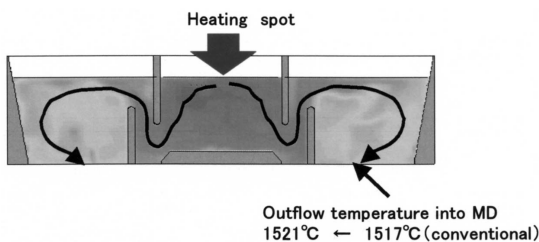


図10 タンディッシュ内溶鋼流動解析例
Fluid analysis of the molten steel in tundish (example)

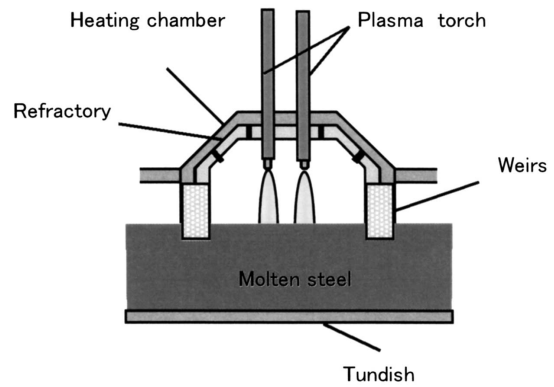


図11 加熱室設計技術
Design of heating chamber

7. 結 言

新日本製鐵にて開発したツイントーチ式のタンディッシュプラズマ加熱装置NS-Plasma IIは以下の特長を有する。

- (1) 大生産量のミルでは製鋼工程出鋼から連続鑄造機へ搬入した溶鋼の温度に応じたそれぞれの鋼種の鑄造条件に適用させるために鍋待機時間の調整および溶鋼温度に応じた鑄造速度の制約がなくなり，大幅な生産性向上が実現できる。
- (2) 非金属介在物，中心偏析の低減により鑄片品質改善およびタンディッシュ～モールド間の浸漬ノズルの閉塞が防止できるため歩留り向上が実現できる。
- (3) 出鋼温度の低下が可能になり耐火物コスト，エネルギーコストを削減できる。
- (4) シングルトーチ式では必要であったアノード電極のタンディッシュ内耐火物への埋設が不要となり，タンディッシュの整備性が向上する。特にタンディッシュ熱間回転操業時の耐火物整備が簡素化できる。
- (5) タンディッシュ内の堰配置，トーチレイアウト，加熱室形状を含めた最適設計によりトータルエンジニアリングが実現できる。
- (6) 新日本製鐵では加熱源を含む独自に開発した高出力長寿命トーチの供給から，豊富な操業経験をベースにしたユーザーミルの操業に適したレイアウト設計等の幅広いエンジニアリングの対応が可能である。

参考文献

- 1) 脇田修至 ほか：新日鉄技報 (345) 23(1992)
- 2) 橋高節生 ほか：新日鉄技報 (375) ,145(2001)
- 3) Kittaka, S. et al.: 2003 Conference & Exhibition. Bangkok, 2003-8, SEAIS
- 4) 篠田強志 ほか：省エネルギー 36(10) 33(1987)
- 5) 桑原達朗 ほか：材料とプロセス 73(2) 691(1987)
- 6) Matsumoto, K. et al.: Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress. 1990, ISIJ, p.222
- 7) 山本昇二郎 ほか：材料とプロセス 17(4) 757(2004)
- 8) 菅原健 ほか：材料とプロセス 1(1) 299(1988)
- 9) 竹内友英 ほか：材料とプロセス 15(1) 209(2002)
- 10) Brimacombe, J.K. et al.: Near-Net-Shape Casting in the Minimills Proceedings of the International Symposium. Canada. 1995-8, p.33
- 11) 井上衛他：伝熱研究 133(130) ,11(1994)