

タンディッシュ内溶鋼加熱用交流プラズマ トーチの電力特性と溶鋼加熱特性

© 1991 ISIJ

技術報告
////////////////////////////////

藤本 英明*・斎藤 忠*²・清水 基良*²
清川 雅充*²・入谷 英樹*²・西 誠治*³

Characteristics of Electric Power and Heating of Molten Steel of AC Plasma Torch for Arc Heating of Molten Steel in Tundish

Hideaki FUJIMOTO, Tadashi SAITO, Motoyoshi SHIMIZU,
Norio KIYOKAWA, Hideki IRITANI and Seiji NISHI

Synopsis:

The single A. C. plasma arc heating system was adopted in the new No. 4 continuous caster at Kakogawa works in 1989 to keep molten steel temperature constant during casting. By using this system, the effect of atmosphere on plasma arc voltage and the heating characteristics of molten steel were investigated. The obtained results are as follows:

Plasma arc voltage in the case of using molten steel is lower than that of using carbon block because of existence of metallic fume. Plasma arc voltage is affected by the gas composition more than the dust quantity in the tundish and it increases with increasing the content of gas molecules such as O₂ and N₂ gas in the Ar atmosphere. It is possible to keep molten steel temperature constant in the tundish by the suitable plasma arc heating condition.

Key words: A. C. plasma; continuous casting; tundish; plasma electric power; arc voltage; heat balance.

1. 緒 言

近年、連続铸造では铸片品質の向上および操業の安定化をはかるため、铸造中の溶鋼温度を一定にコントロールすることが必要となってきた。1989年6月から稼動した加古川製鉄所4号連铸機（以下、4 CC と略す）¹⁾は、少量多品種の高品質スラブを効率良く製造することを目的とした1ストランドの垂直曲げ型連铸機であり、铸造時の溶鋼温度の均一化をはかるためタンディッシュ内に単相交流プラズマアーク加熱装置（2本トーチ）を設置している。ここで、溶鋼の加熱方法としては直流プラズマ加熱法²⁾、誘導加熱法³⁾、黒鉛電極によるアーク加熱法などがあるが、交流プラズマ加熱法は他の方法と比較すると、溶鋼への汚染がない、対極の設置が不要で設備構造が比較的簡易である、溶鋼がない場合でも耐火物の加熱が可能であるなどの特長を有している。

本稿では、連铸タンディッシュ内での交流プラズマ

アーク加熱において、プラズマ電力特性に及ぼす雰囲気組成の影響および溶鋼加熱特性について報告する。

2. 実 験 方 法

2・1 4 CC および交流プラズマ加熱設備

4 CC では、タンディッシュの熱間繰返し使用⁴⁾により高い経済性を確保するとともに、連铸機本体は高速铸造による高生産性と高品質スラブの製造を可能とするため、垂直曲げ型とし、純水を用いた強冷却铸型、均一ミスト冷却、高剛性稠密ロールスタンドなどの最新技術が織り込まれている。Fig. 1 にその設備概要を、Table 1 にその仕様を示す。

タンディッシュおよびプラズマトーチ・ハンドリング装置の取合いを Fig. 2 に示す。プラズマ加熱装置は、トーチの昇降・傾動機能を有しており、プラズマ加熱時にはタンディッシュの上に移動し、タンディッシュ内にトーチを挿入して、2本のトーチ間距離および溶鋼-トーチ

平成元年4月本会講演大会にて発表 平成2年10月23日受付 (Received Oct. 23, 1990)

* (株)神戸製鋼所生産技術部 (Technology Administration Department, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakino Hamacho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

*³ (株)神戸製鋼所材料研究所 (Materials Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

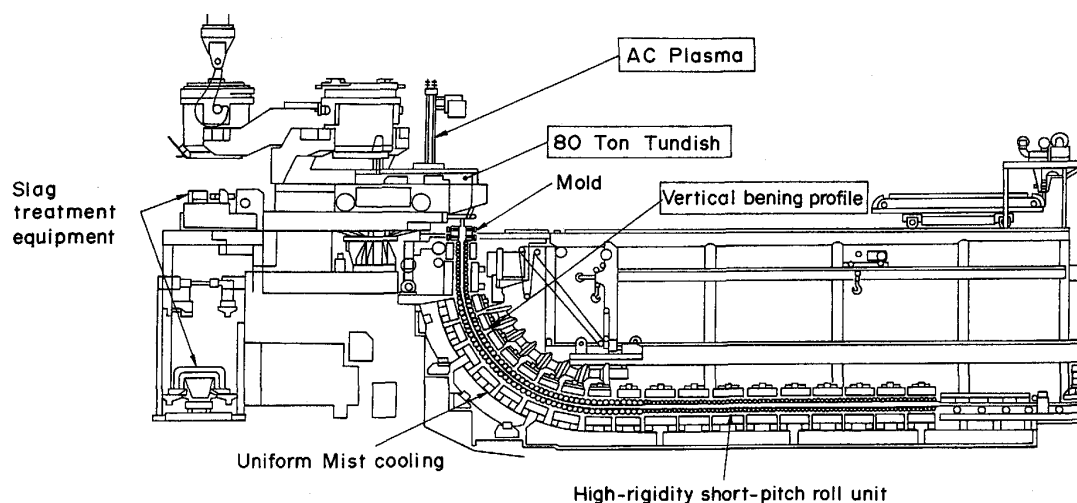


Fig. 1. Schematic diagram of No. 4 CC.

Table 1. Specification of No. 4 CC.

C. C machine	Type	V-B slab caster	
	Capacity	100 000 t/month	
Casting equipment	Slab size	230×650~1 800 mm	
	Machine length	39.0 m	
	Vertical length	2.95 m	
	Bending radius	8.8 m	
	Number of strand	1	
	Casting velocity	2.0 m/min	
	Mold oscillator	Motor drive cam mechanism	
	Roll device	Segment type multi-drive roll	
	Secondary cooling	Mist cooling	
	Dummy bar	Solid link type	
Casting equipment	Ladle turret	Independent two arms type	
	Tundish	Capacity	80 t
		Molten steel depth	2.0 m
		Insulator	Sealing pipe
Plasma arc heating equipment		Sealing of tundish	Ar sealed type with water cooling cover
	Type	AC 1Φ	
	Capacity	Two torches Maximum 2.4 MW	

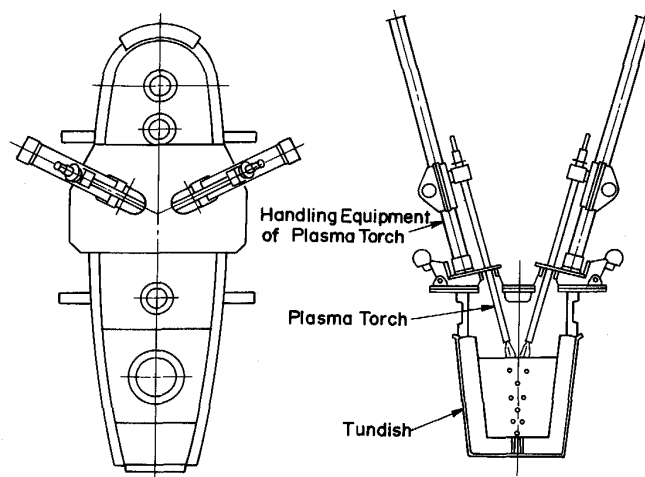


Fig. 2. Single phase A.C. plasma heating equipment.

チ間距離を任意に調整できる。

また、プラズマ加熱装置は、プラズマトーチ電力供給装置、冷却水供給装置、ガス供給装置から構成されており、その構成図を Fig. 3 に示す。トーチへの電気、ガス、および冷却水の供給はケーブルベアによって行われる。電力供給装置は、遮断器、負荷時タップ切替え装置付きのトランスおよび過飽和リアクトルによって構成され、アーク電流制御を行う。

プラズマ加熱装置の仕様は、Table 2 に示すとおりであり、最大出力は2.4 MW である。

2.2 カーボンブロックによる予備実験

交流プラズマの基本的な電力特性を把握するため、タンディッシュ内に被加熱体としてカーボンブロックを設置し、プラズマトーチとカーボンブロックの間でプラズ

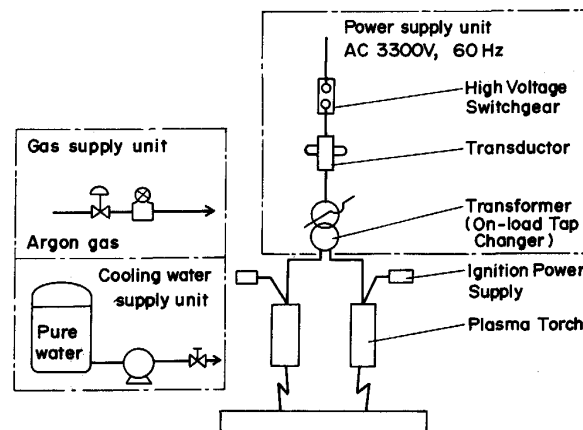


Fig. 3. Configuration of A.C. plasma heating system.

Table 2. Specifications of A. C. plasma torch.

Type	Transferred arc/Non-transferred arc
Diameter	108 mm
Working length	4.2 meters
Type of current	Single phase (2 torches)
Arc current	Maximum 7.5 kA
Arc voltage	Maximum 350 V
Power	Maximum 2.4 MW
Argon gas	9~20 Nm ³ /h (per torch)
Cooling water	30 m ³ /h

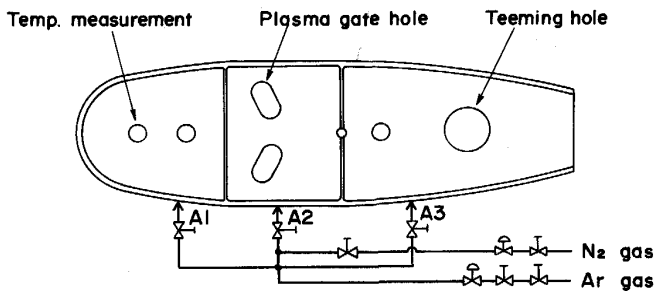


Fig. 4. Sealing gas route in tundish cover.

マークを発生させた。

また、Fig. 4 に示すような経路より Ar ないし N₂ ガスをタンディッシュ内に吹き込み、プラズマアーク電圧に及ぼす雰囲気ガスの影響を調査した。その際、雰囲気中のガスのサンプリングは中央ドームの小孔から行い、分析に供した。

2.3 溶鋼による加熱実験

溶鋼を用いた場合のプラズマアーク電圧特性について、特に雰囲気の影響という観点から調査した。雰囲気中のダストについても前述のガスと同様にサンプリングを行い、分析を行った。

また、プラズマによる溶鋼の加熱特性およびプラズマアーク加熱時の熱バランスについても調査した。

3. 実験結果および考察

3.1 予備実験結果

カーボンブロックを被加熱体として用いた場合の交流プラズマの電圧特性としてアーク電圧とアーク電流の関係を Fig. 5 に示す。アーク電圧は電流値にはほとんど依存せず、安定なプラズマアークが得られることがわかった。

一般に、プラズマアークの電圧降下は、陽極での電圧降下、陰極での電圧降下およびアーク柱内での電圧降下の三つの領域に分けられる。この中で、アーク長や雰囲気ガス組成などの条件の変化は特にアーク柱内での電圧降下に影響を及ぼす。

このアーク柱内での電位傾度 E は、気体の組成およ

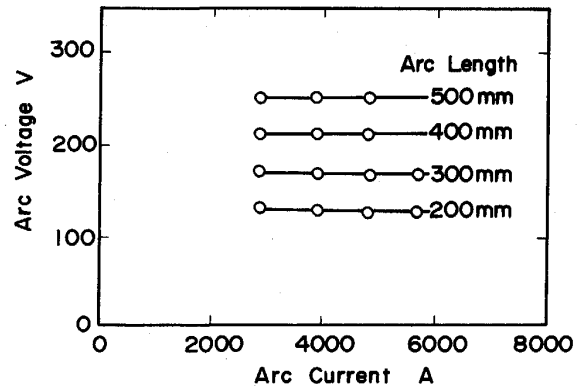


Fig. 5. Arc voltage as function of arc current for different arc lengths.

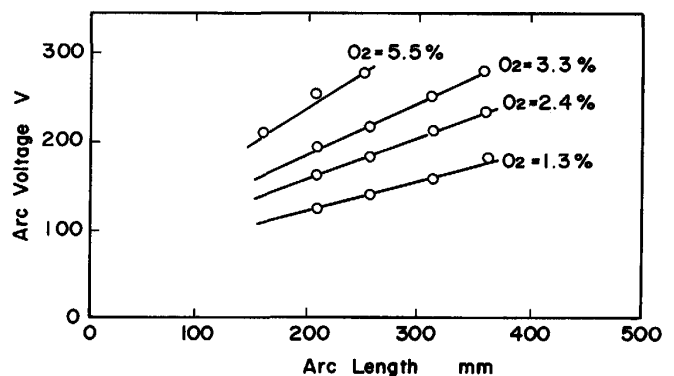


Fig. 6. Arc voltage as function of arc length for different oxygen contents.

び圧力が一様であるとする、次式で表される⁵⁾。

$$E = I / \sigma \cdot A$$

$$= I / e \cdot \mu \cdot n \cdot A \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 I は電流、 σ は気体の電気伝導度、 e は電子の電荷、 μ は電子の移動度、 n は電子密度、 A はアーク柱の断面積である。アーク電流の増加は(1)式において同時に電子密度 n や断面積 A の増加をもたらすため、電位傾度は増加せず、電圧は変化しないと考えられる。

Ar ガスの導入方法を変えることにより酸素分圧を変化させた場合のアーク電圧とアーク長の関係を Fig. 6 に示す。アーク電圧は雰囲気ガス組成に大きく影響を受け、雰囲気中の酸素及び窒素濃度が上昇すると電位傾度は増加するが、これは2原子分子ガスの解離エネルギーが必要になるためと考えられている。

次に、カーボンブロックとトーチとの距離および2本のトーチ間の距離と傾度について実験した結果を Fig. 7 に示す。2本のトーチ間距離がアーク長 L よりも長い場合、プラズマアークは被加熱体を通して発生し、2本の移行型アーク (TR アーク : Transferred Arc) が形

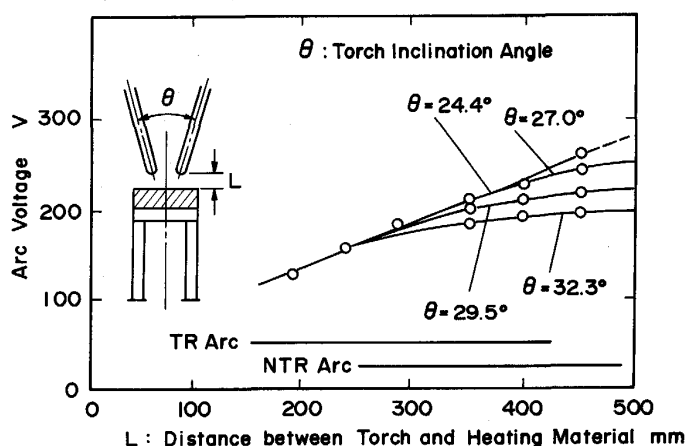


Fig. 7. Arc voltage behaviour in transition range between transferred and non-transferred operation mode.

成される。しかし、アーク長またはトーチの傾斜角を大きくすることにより、アーク長がトーチ間距離より大きくなると、被加熱体を通さずに2本のトーチ間でプラズマアークが発生する部分が生じるようになり、電圧の上昇が緩やかになり、直線関係から外れる傾向が認められる。ここで、さらにアーク長やトーチの傾度を増していくとトーチ間で直接プラズマアークが発生する傾向が強まり、ついには被加熱体を通さずに2本のトーチ間で一つのアークが形成される非移行型アーク (NTR アーク: Non-Transferred Arc) となる。しかし、非移行型アーク加熱を行うと溶鋼への伝熱効率は約5%低下する。

このように、トーチの設定条件により移行型および非移行型のプラズマアークが選択できるため、例えば、溶鋼が無い場合でもプラズマアークによる耐火物の加熱が可能である。

3.2 溶鋼でのプラズマアーク特性

被加熱体として溶鋼を用いた場合のアーク電圧とアーク長の関係をカーボンブロックの場合と比較して Fig. 8 に示す。同じ Ar ガスシール条件下で、ほぼ同一の酸素、窒素濃度においても、溶鋼を用いた場合、アーク電圧は50~100 V 程度低くなる。この原因として、高温のタンディッシュ内雰囲気では Ar ガスの熱伝導度が増加し、電離エネルギーが減少するため電圧が低下することもあるが、溶鋼から発生する金属蒸気の影響もきわめて大きいのではないかと考えられる。そこで次に、アーク電圧特性に及ぼすタンディッシュ内雰囲気中のガス、ダスト組成の影響について考察する。

シール用 Ar ガス流量を変化させた場合のタンディッシュ内のガス組成を Fig. 9 に、ダストの組成を Fig.

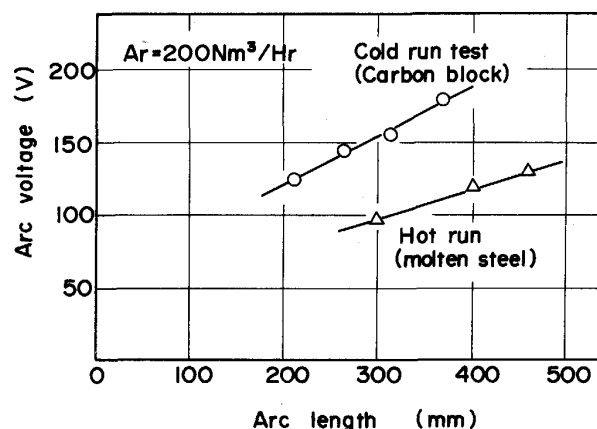


Fig. 8. Relation between arc voltage and arc length.

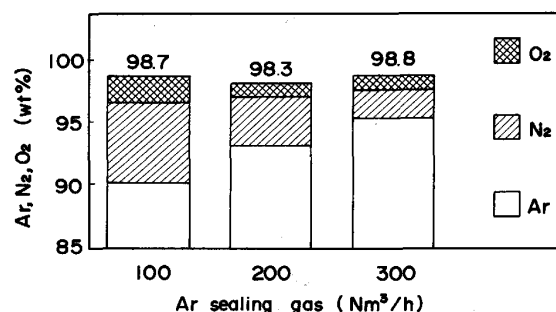


Fig. 9. Relation between atmosphere in TD and Ar sealing gas.

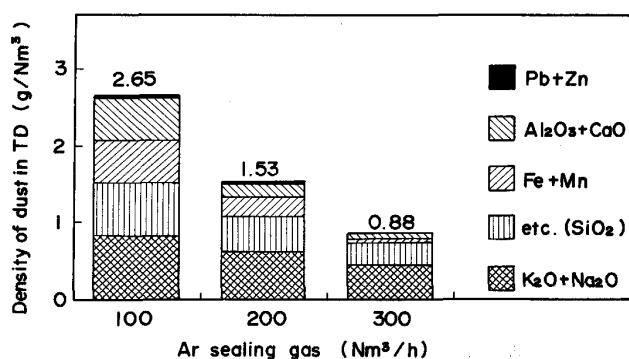


Fig. 10. Change of density of dust in TD on plasma heating.

10 に示す。Ar ガス流量が増加するにしたがって雰囲気中の酸素および窒素濃度は減少し、また Ar ガスで薄まる結果、ダスト濃度は低下する。ここで、ダストには金属 Fe の他に Fe, Zn, Na 金属等の酸化物も含有されている。

これらの結果を踏まえて、シール用 Ar ガス流量を変化させた場合のアーク電圧への影響を Fig. 11 に示す。この図では、シール用 Ar ガス流量を低減するとアーク

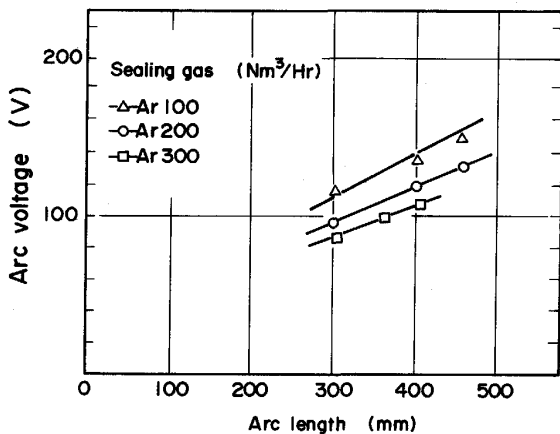


Fig. 11. Relation between arc length and voltage (Hot run test).

電圧は増加する傾向がある。ダスト濃度の影響から考えると、シール用 Ar ガス流量が少ないほうがダスト濃度が増え、金属蒸気の影響によりアーク柱内の抵抗が下がり、アーク電圧は低下すると予想されるが、実際は逆の結果となっている。ここで溶鋼から発生するダスト量が一定とすると、アーク電圧特性に及ぼすダストの影響としては、その濃度よりもむしろダストの存在そのものの影響が大きく、Fig. 8 に示す結果となる。しかし、溶鋼を加熱し、ダストが存在する場合でも Fig. 11 に示すように、Ar ガスシール条件で変化させた酸素、窒素ガス組成の影響は無視できないことがわかる。

以上のことから、溶鋼加熱におけるプラズマアークに関して次のように考察できる。溶鋼加熱時のプラズマアークは、電極からある距離の範囲内では Ar ガスでシールされ、指向性をもったアークとなっているが、それより遠い領域では、溶鋼から発生する金属蒸気の影響を受けやすくなっていると考えられる。これを模式的に表すと Fig. 12 のようになる。また、アーク電圧 V は次式のように表される。

$$V = V_e + E_g \cdot l_g + E_f \cdot l_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V_e は両極での電圧降下の和、 E_g はガスシール領域における電位傾度、 l_g はガスシール領域の長さ、 E_f は金属蒸気存在領域における電位傾度、 l_f は金属蒸気存在領域の長さである。

電位傾度 E は (1) 式に示したように、電気伝導度に反比例する。したがって、Table 3 に 5 000 K における各元素の電気伝導度を示すように⁶⁾、Ar ガスに対し、Fe や Na のような金属元素はその値が非常に大きく、これらがアーク柱内に混入することにより、(1) 式にしたがって E_f は E_g に比べ非常に小さな値となり、アーク電圧は金属蒸気存在領域を持たないカーボンブロック

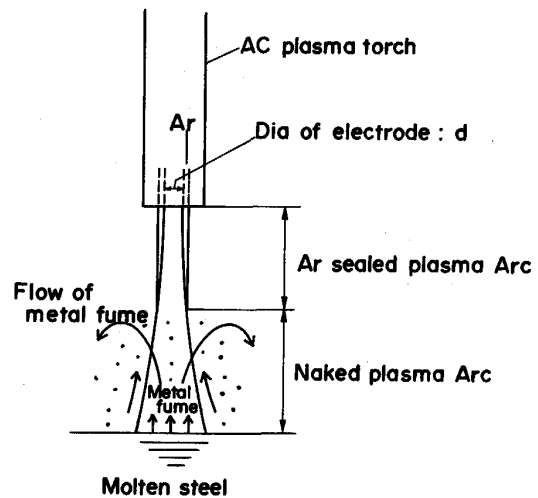


Fig. 12. Schematic diagram of plasma arc influenced by metal fume.

Table 3. Electric conductivity of elements (5 000 K).

Element	Ar	C	Fe	Na
$\sigma (\Omega^{-1} \text{m}^{-1})$	4	30~40	500	1 300

M. ABBAOUI *et al.* : J. Phys. D, Appl. Phys., 18 (1985), L159

の場合に比較して大きく低下する。

また、ガス組成はどちらの場合にも影響を及ぼすが、Fig. 6 と Fig. 11 を比較すると、カーボンブロックを用いた場合のほうがその影響は大きい。これは、溶鋼を用いた場合、金属蒸気を含むガスの電気伝導度が大きいため、 $E_f \approx 0$ となり、ガス組成の影響を受けるのは l_g の領域のみであるのに対し、カーボンブロックを用いた場合には、金属蒸気が存在しないため、(2) 式の l_f の領域が存在せず、Fig. 12 の $l_g + l_f$ に相当する領域で影響を受けるためである。

ここで、Fig. 8 のカーボンブロックおよび溶鋼を用いた場合のアーク電圧をそれぞれ V_e 、 V_m (V) とするとアーク長 L (mm) を用いて次式のように表すことができる。

$$V_e = 53 + 34/100 \cdot L \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$V_m = 32 + 22/100 \cdot L \quad \dots\dots\dots (4)$$

(3) 式の 34/100 (V/mm) がこの雰囲気条件における E_g であり、 $E_f \ll E_g$ と仮定すると、 V_e 、 V_m の電位傾度の比から、(4) 式は次式のように表すことができる。

$$V_m = 32 + E_g \cdot 0.65 L + E_f \cdot 0.35 L \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって、この場合には金属蒸気存在領域の長さは全アーク長 L の約 1/3 と見積もることができる。

すなわち、溶鋼を加熱する場合には、カーボンブロッ

クの場合と比較すると、溶鋼近傍に金属蒸気により電気抵抗の低いプラズマアーク領域（全アーク長の約 1/3）ができるためアーク電圧は大きく低下し、また、ガス組成についてもその影響を受ける領域が小さくなるため、電位傾度の変化は、カーボンブロックの場合と比較して小さい。

プラズマ出力を増大させる場合、電流値は電極の許容電流密度に制約があるため、アーク電圧の上昇が必要となる。上に述べた知見から、アーク電圧を増加するには、金属蒸気の影響を抑制することおよびガス組成を適切にすることが重要である。

溶鋼表面から発生する金属蒸気の抑制の効果を確認するため、タンディッシュ内の溶鋼上のスラグ厚みを変化させてアーク電圧を調べた結果を Fig. 13 に示す。スラグ厚を 20 mm 以上とすることにより、金属蒸気の発生が抑制され、アーク電圧は増加する。

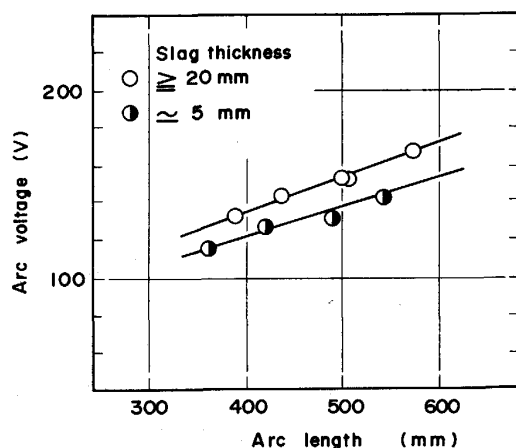


Fig. 13. Influence of slag thickness on arc voltage in TD.

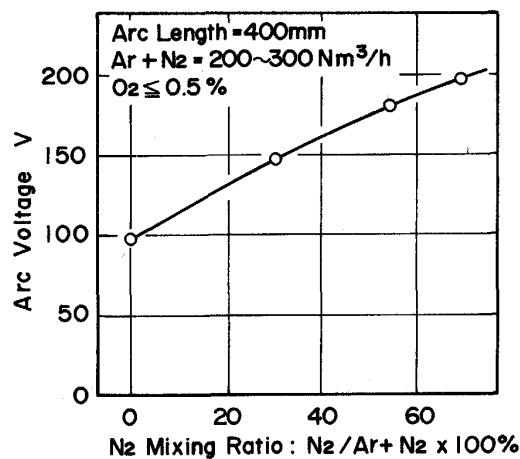


Fig. 14. Influence of N_2 gas addition on arc voltage.

また、2原子分子である窒素ガスをタンディッシュ内シールガスとして混合添加した場合の結果を Fig. 14 に示す、アーク電圧の上昇に対する窒素ガス添加の効果は著しく、窒素混合比が 30~50% で 180~200 V の電圧が得られ、その結果、2.4 MW の出力が可能となる。この場合の溶鋼の窒素濃度の増加は 2~5 ppm と比較的少なく、極低窒素鋼を除く低窒素鋼への適用も可能である。

3.3 加熱特性と熱バランス

取鍋からタンディッシュへ溶鋼を約 80 t 溜め、その後取鍋から溶鋼の供給がない状態で、プラズマ加熱を行った場合とプラズマ加熱なしの場合のタンディッシュ内溶鋼の温度変化を Fig. 15 に示す。プラズマ加熱のない場合、溶鋼温度は 1.2 K/min で低下するのに対し、プラズマ加熱の適用により溶鋼温度はほぼ一定に保持される。また、その後タンディッシュから造塊铸型へ溶鋼を注入中もプラズマ加熱を行ったが、プラズマアークはタンディッシュ内溶鋼面の低下により、TR アークから自然に NTR アークとなり、その NTR 加熱により注入温度の低下も抑えることができる。ここで、注入温度はタンディッシュから铸型への注入流を測定した温度である。なお、4 CC 実機では、取鍋からタンディッシュへの溶鋼の供給があるため、プラズマ加熱がない場合でもその温度降下は 0.3 K/min と小さく、Fig. 16 に示すように約 1 MW の出力で溶鋼温度の保持が可能である。

タンディッシュ内溶鋼及びトーチ冷却水の温度変化を測定して調査したプラズマアーク加熱時の熱バランスを Fig. 17 に示す。溶鋼への伝熱効率は 65% であり、トーチの冷却水損失が 22% と比較的大きいため、トーチ表面の断熱材コーティングなどによる熱損失の低減が今後の課題である。

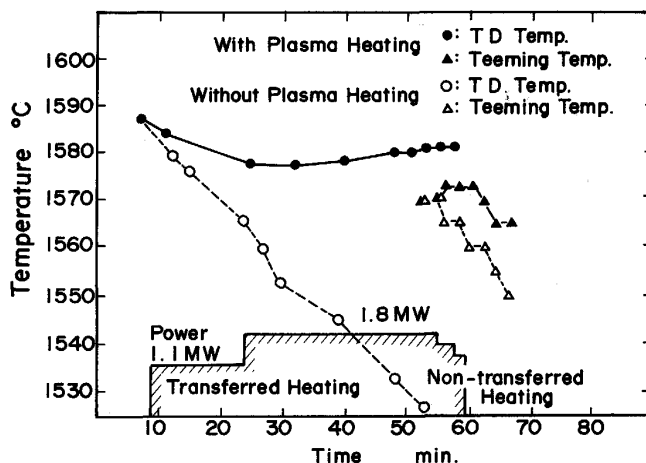


Fig. 15. Influence of plasma arc heating on molten steel temperature in tundish.

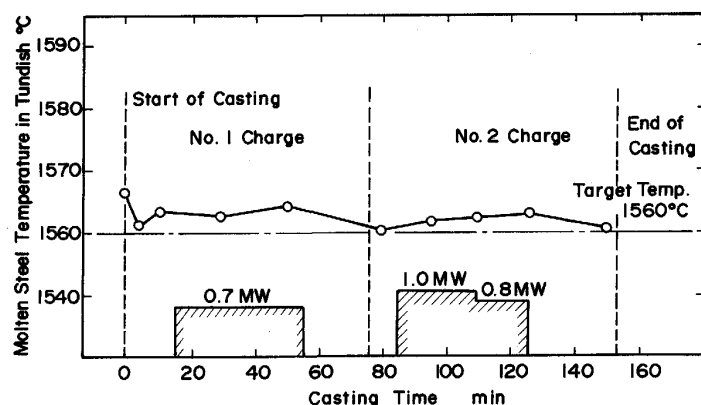


Fig. 16. Temperature control of molten steel in tundish by plasma arc heating.

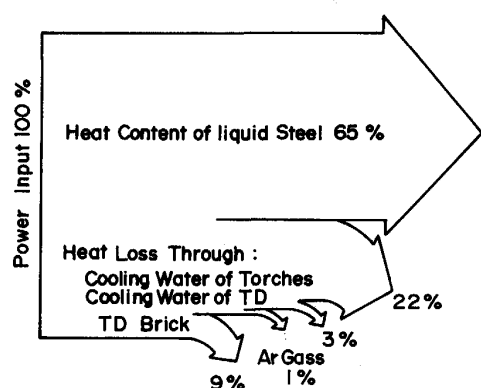


Fig. 17. Heat balance of plasma arc heating.

4. 結 言

加古川製鉄所 4 号連铸機において、铸造中の溶鋼温度を一定に保持することを目的として、タンディッシュ内に交流プラズマ加熱装置を設置し、プラズマの電圧特性および溶鋼加熱特性について調査し、以下の結果が得られた。

(1) プラズマアーク電圧は、溶鋼を加熱する場合、カーボンブロックの場合に比べて、金属蒸気の発生により大きく低下する。

(2) プラズマアーク電圧は、雰囲気中のガス組成により大きく変化し、特に酸素や窒素などの 2 原子分子ガスの添加により増加する。この効果は、金属蒸気の発生を

伴う溶鋼の場合には、カーボンブロックを用いた場合に比べて、小さい。

(3) 交流プラズマ方式では、トーチの設定条件により移行型および非移行型のプラズマアークが選択でき、例えば溶鋼がない場合でも加熱が可能である。

(4) プラズマ加熱によりタンディッシュ内溶鋼温度の一定保持が可能である。

(5) プラズマ加熱時の溶鋼への伝熱効率は、65%であり、トーチ冷却水への熱損失低減による効率の改善が課題である。

最後に、本研究に対して貴重な助言をいただいた、大阪大学工学部牛尾誠夫教授に感謝いたします。

文 献

- 1) T. ISHIKURA, T. SAITO, T. YASUI, K. MATSUO, H. YOKOYAMA and H. FUJIMOTO: 9th AIME "Start up of New Slab Caster with Advanced Technology for Tundish" (1990)
- 2) T. KUWABARA, T. HIRAOKA, T. OHASHI, K. TAKEDA, K. ICHIKAWA and K. UMEZAWA: 1986 TMS Annual Meeting "Plasma for Metallurgical Applications" (1986)
- 3) 吉井 裕, 野崎 努, 垣生泰弘, 上田典弘, 針田 彬, 桜井美弦: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1474
- 4) 前田昌宏, 斎藤 忠, 江波戸紘一, 松尾勝良, 横山秀樹, 藤本英明: 材料とプロセス, 3 (1990), p. 199
- 5) 日本分析化学会: 原子スペクトル分析 [上] (1979) [丸善]
- 6) M. ABBAOUI, B. CHEMINAT and P. ANDANSON: J. Phys. D, Appl. Phys., 18 (1985), L159