

プラズマの特徴と鉄鋼業への応用

武田 紘一
Kouichi Takeda

秋田県立大学 システム科学技術学部
機械知能システム学科 教授

Characteristic Properties of Thermal Plasma and Applications of Plasma Technology to Iron and Steelmaking

1 はじめに

かつて、プラズマ状態を利用すれば今まで出来なかったいろいろなことがうまく行くかもしれないという過剰な期待が寄せられていた時期があった。その時期、多くの研究者・技術者が様々な応用を試みたが、実用化されたプロセスは少なかったという現実がある。バブル的なブームは去って、いまは、正常な状態に戻っているのではないかと思われる。試行錯誤で行われた種々の応用研究を振り返り、プラズマの特徴、利用の得失を整理して、再度応用を考えなおしてみることは意義あることであろう。

プラズマ利用技術について述べるにあたり、明確にしておかねばならないことはプラズマとアークとの関係である。プラズマとアークはあたかも別物であるかのように金属工学の分野では扱うことが多いがこれは混乱のもととなる区別である。プラズマとは原子がイオンと電子に分解して混在する粒子集団であり、プラズマ状態を実現する代表的な手段としてアーク放電がある。アーク放電で作られるアークの中は典型的なプラズマ状態である。したがって、いわゆるアーク炉をプラズマ炉と呼ぶことは学術用語上間違いではない。最近、このような意味のない区別は取り払うべきであるという意見があるが、慣習を変えようとなると問題が多く、なおこの区別が存在する。しかし本来区別できないものを区別しているので、いろいろな混乱が生じている。慣習では炭素電極を用いた電気炉はアーク炉でありプラズマ炉とは言わない。しかし、炭素電極ながら、従来形態とは異なる中空の炭素円筒を電極としたアーク炉を、従来アーク炉とは異なることを強調したいがために、開発者はプラズマ炉と名付けている例などがある。電気炉以外でもアーク溶接とプラズマ溶接の違い、アーク切断とプラズマ切断の違いを明確に述べることは困難である。筆者も意味のない区別はやめるべきであるとの意見に賛成で

あるが、慣習に逆らって誤解が生じても困るので、本稿では、炭素電極のアークを利用したものは何であれプラズマ応用技術から除くこととする。

なお、本解説に関連した文献として、鉄鋼協会のプラズマ利用研究会が中心となり編纂し1996年に刊行した「熱プラズマ材料プロセッシングの基礎と応用」がある¹⁾。鉄鋼業におけるプラズマの利用を含め詳述されており、プラズマ利用について詳しく知りたい方は一読されることをお勧めする。本解説は、上記刊行本の要約のようなものである。全体を読み通す時間に余裕のない方々のための解説と理解いただきたい。ただ、編纂後時間がたっているのものでその後に現れた、萌芽的技術についても紹介し上記刊行本の補足的意味合いも加えている。

2 プラズマの分類とプラズマ応用の利点

2.1 熱プラズマと低温プラズマ

原子が電子と正イオンに分解することを電離という。気体が電離して電子と、正イオンとの集団になった状態がプラズマである。もともと中性の原子が分離してできた集団であるから、プラズマ状態は、正の電荷と、負の電荷がほぼ同数存在し、全体としては電気的に中性である。空間に強電界の場を作り電子を加速し原子(あるいは分子)に衝突させると電離が起こる。自然界にわずかに存在する電子を加速し電離を起こし、電離してできた新たな電子をまた電界で加速し他の原子に衝突させ、さらに電子の数を増やし、この過程を雪崩的に進行させ、空間を電子と正イオンの集団で満すことを放電という。放電では、電気エネルギーをまず電子集団が受け取る。電界中を動くのは主に電子だからである。電子のエネルギーは衝突により重い粒子であるイオンや原子に伝わる。放電雰囲気圧力が高く電子が正イ

オンあるいは原子と高頻度で衝突する場合は電子からイオンあるいは原子へのエネルギーの流れは円滑で電子と正イオンあるいは原子との間に温度差は生じない。一方、放電雰囲気圧力が低く、衝突頻度が小さくなるとイオンや原子集団への電子集団エネルギーの流れが小さくなり、集団間の温度に差が生じ電子集団のみが高温でイオンや原子集団は低温のままといった状態になる。衝突が十分に起こり、電子とイオンあるいは原子と温度が等しく、熱的に平衡状態になっているプラズマを熱プラズマあるいは平衡プラズマという。衝突頻度が小さく、電子だけが高温で他の重たい粒子は室温に近いようなプラズマは非平衡プラズマあるいは低温プラズマと呼ばれる。放電雰囲気圧力が 10^4 Pa以上であれば、熱プラズマとなり、 10^3 Pa以下であれば非平衡プラズマになると言われている。鉄鋼関連分野では熱プラズマを熱源として利用する事が多い。本稿では熱プラズマに焦点を絞り、以下にその特徴や応用について解説する。

2.2 熱プラズマの特徴

(1)高温・高エネルギー密度：化石燃料の燃焼では単位質量あたりの発熱量は決まっているので、得られる温度の上限は3,000K程度である。プラズマでは電力による加熱であるので、原理的には到達温度に上限は無い。10,000K以上の実現はそう困難なことではない。物質がプラズマ状態になるためには固体から液体に変態するための溶融潜熱、液体から気体に変態するための蒸発潜熱、気体分子が原子に分解する解離エネルギー、原子が電子とイオンに分かれる電離エネルギーなどを必要とする。プラズマ状態はこれらのエネルギーを蓄えているのでエネルギー密度の高い媒質である。図1は代表的なガスの温度とエネルギー密度(エンタールピー)の関係を表した図である。Arガスの例で見ると温

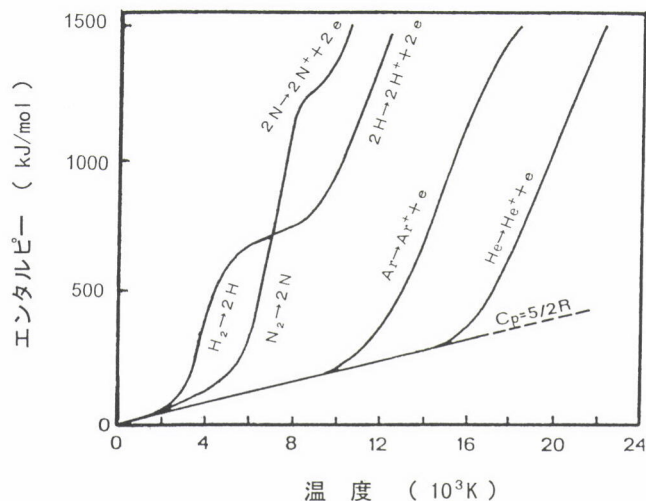


図1 高温領域での粒子集団の温度とエネルギー密度の関係

度が低い領域ではエネルギー密度は温度に対し比例関係で(比熱一定)で上昇するが10,000Kを超えるあたりから比例関係が崩れ、エネルギー密度が急激に大きくなる。電離エネルギーが蓄えられ始めるからである。常温で2原子からなる窒素や水素のような多原子分子ガスでは3,000Kあたりから比例関係が崩れ始める。この温度領域で分子が単原子に分解され、解離エネルギーが蓄えられる。さらに温度が高くなり、8,000Kを超えると電離エネルギーが加わり、エネルギー密度はさらに高くなっていく。図に示されるように、多原子分子ガスは、Arのような単原子ガスに比べて、解離エネルギーが加わるため、プラズマ状態でのエネルギー密度は高い。

(2)高熱伝導媒体：上に述べたように、プラズマ状態の粒子は熱運動のエネルギーを保有するだけでなく、解離および電離の状態変化のエネルギーも保有している。冷たい物質とプラズマが接触すると、解離や電離の逆反応である再結合により、これらの状態変化のエネルギーを放出し、冷たい物質にエネルギーを与える。このエネルギーはプラズマ粒子の熱運動エネルギーに比べ格段に大きい。図2は一気圧の水素ガスの熱伝導率を温度の関数として示したものである。3,000Kあたりで熱伝導率が高くなるのは解離の逆反応である再結合によるエネルギーの放出のためである。15,000Kあたりでまた熱伝導率が高くなるのは電離逆反応である再結合によるエネルギーの放出による。これから明らかのように、プラズマの熱伝導率は通常の気体よりはるかに高い。大きな温度差による熱移動の大きな駆動力だけでなく熱伝導率そのものも大きいので、プラズマは加熱能力が高い。

(3)反応活性・雰囲気制御：高温状態にあるので、分子や原子は励起状態にあり、化学的に活性である。例えば溶鉄に窒素プラズマを吹き付けると図3に示されるように、鉄中に平衡溶解度の100倍の窒素がとけ込むことが観測されて

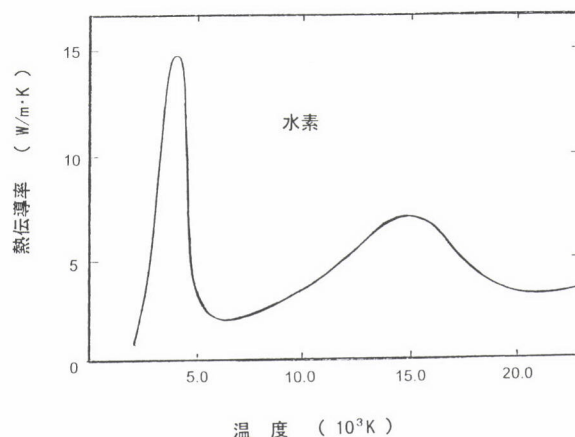


図2 高温領域での水素の熱伝導率と温度の関係

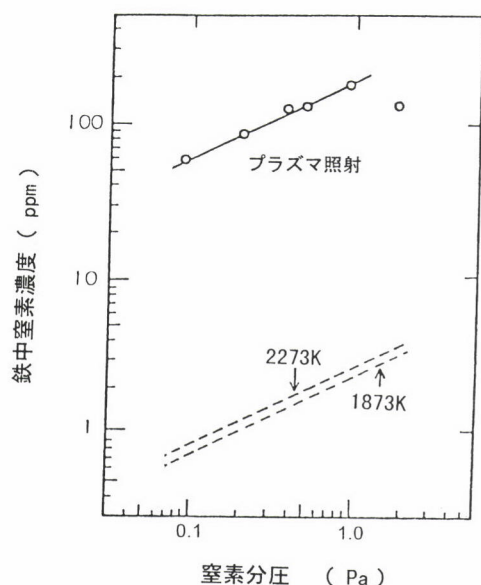
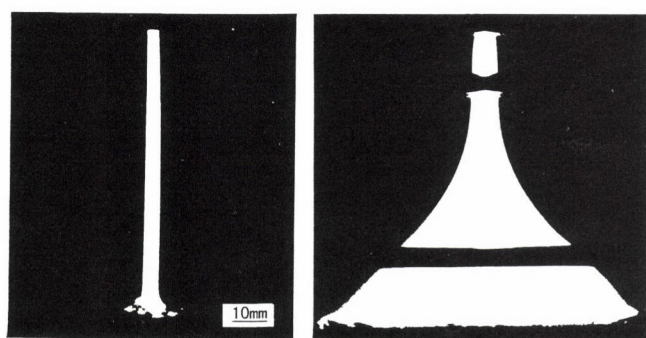


図3 窒素プラズマ照射による溶鉄中への窒素の異常溶解

いる²⁾。プラズマを用い、従来法では実現困難な反応を期待することができる。不活性なArやHeをプラズマガスとして用いれば不活性できれいな高温雰囲気を得られる。

(4)電磁流体：荷電粒子の集団であるので電磁場に反応する電磁流体である。目的に応じてプラズマの形状、振る舞いを磁場で制御することができる³⁾。たとえば、図4に示すように、本来柱状のプラズマアークを磁界により扇形にアークに変えることができる。また、電気化学的なプロセスへのプラズマの利用も、種々考えられる。

(5)空間的非平衡：プラズマ炎では中心から外縁に向かい空間的に急峻な温度勾配が存在する。たとえば、図4(a)に示される直径1cmの柱状のアークでは中心軸上での温度は 10^4 K程度であるが、中心軸から1cm離れた光る領域の外では数百Kにまで温度が下がっており、空間的な温度勾配は 10^6 K/m程度の大きな値となる。固体や液体とプラズマ状態が接している界面近傍ではさらにきつい勾配の温度境界層が形成されている。この温度勾配を利用して、高温



(a) 外部磁場なし

(b) 外部磁場印加形状制御

図4 外部磁界によるプラズマアーク形状の制御

領域で作られた反応生成物を急冷して、非平衡状態で取り出すことができる⁴⁾。非平衡構造による特殊機能の発現が期待できる。プラズマプロセッシングの重要な特徴である。

(6)高粘性：気体の粘性は温度の上昇とともに高くなる。プラズマは高温ガス体であるので必然的に高粘性である。ただし、電子の存在は粘性を低くするので、気体の粘性は電離が始まる温度近辺で最大となり、電離が進み電子の密度が高くなり始めると急激に下がってくる。通常利用される低電離度のプラズマガスは常温の気体に比べて10倍程度粘性が高い。高粘性であるためプラズマジェット中に吹き込まれた粉体は、プラズマ流により、効率良く加速される。

(7)光放射：熱プラズマは原子やイオンの温度が高く、励起状態にあるので多量のエネルギーを光放射の形で放出する。光の波長は紫外から赤外まで広い領域に及ぶ。光源としての応用の他に、放射光はプラズマの温度や元素密度などの物理量の情報を持つのでプラズマ診断に利用される。

3 熱プラズマの発生技術

熱プラズマ発生のための主要な構成装置は、放電用電源とプラズマ発生部であるプラズマトーチとである。放電用電源としては直流電源、商用周波数の交流電源、高周波電源あるいはマイクロ波発生電源などが用いられる。直流あるいは交流の放電電源を用いて作られるプラズマはアーク放電による。高周波電源を用いて作られるプラズマは高周波プラズマとよばれる。高周波プラズマ発生用プラズマトーチは高周波電流コイルからなっている。高周波電流を流してコイル内部の空間に誘導起電力を発生させて、この起電力で気体を電離状態とする。アーク放電と異なり高周波放電では電極が存在しない。マグネトロンによるマイクロ波発生電源で作られるマイクロ波を導波管で放電空間まで導き気体を電離させる方法もあるが一般的ではない。代表的なプラズマ発生法の概念図を図5に示した。以下、直流アークプラズマ発生法、高周波プラズマ発生法について簡単に説明する。

3.1 直流アークプラズマ発生法

アーク放電とは陰極・陽極の二つの電極間で生じる気体放電で電流値の大きい(1A程度以上)定常放電であり、陰極からの電子の放出が多量で放電維持電圧が低い(数十ボルト以下)のが特徴である。

用いる放電用電源は定電流電源である。定電流電源とは電流値のみを調整の対象とする電源で、電流値を設定すると、電圧がどう変わろうと回路に流れる電流は設定した一定値に保たれる。アーク放電では電圧値に対し電流値が一

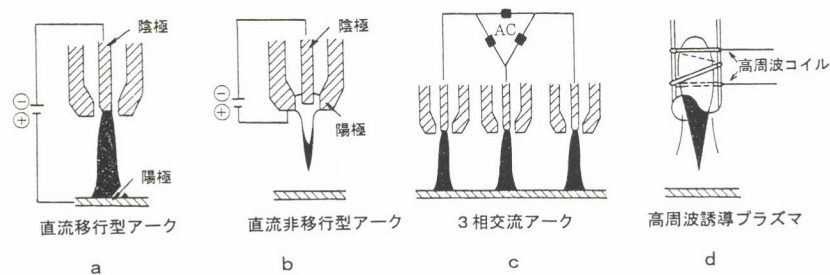


図5 熱プラズマ発生法

義的に決まらない場合があり、電圧を固定すると電流値が定まらないため不安定になる。

加熱対象物をアーク放電の電極とするか、電極としないかによりプラズマトーチの構成が異なる。加熱対象物をアーク放電の電極として作られたアークを移行型アークといい、加熱対象物を電極とせずに作られたアークを非移行型アークという。トーチ内の電極がタングステンのような熱陰極を含むか、水冷銅の中空円筒が電極かで区別する分類の仕方もある。

(1)移行型アークと非移行型アーク：移行型アークと非移行型アークの概念的構成をそれぞれ図5の(a)、(b)に示す。移行型アークはプラズマトーチ内の電極とトーチ外の電極(通常は被加熱物)との間にアークを形成する。トーチ内電極を直流電源の負極側に接続し陰極とし、加熱対象物を電源正極側に接続し、陽極とする接続法が一般的である。アークが直接加熱対象表面上にできるので加熱効率が60～80%と高いが、加熱対象が導電性である場合のみ可能な接続法である。これに対し、トーチ内のノズルをもう一方の電極としてトーチ内でアーク回路が完結して、アークがトーチ外で形成されることがなく、トーチ内部アークによりプラズマ化したガスがノズルからプラズマジェットとなり吹き出す形のものを非移行型アークという。加熱対象物が非導電性の物質ではこのタイプとならざるを得ない。加熱効率は30～50%程度ある。

(2)熱陰極アークと冷陰極アーク：アーク放電における陰極の役割は電子を空間に放出してアークを維持することである。電子の放出機構として、電極を高温にして、熱的に電子を放出する熱電子放出型と、電極は低温のままにし、高電界の場を電極表面近傍に作り電界により電子を引っ張り出す電界型電子放出型がある。熱電子型では電極材料としてタングステンやタンタルが使われる。高融点材料で高温まで安定な金属であるからである。熱電子放出型の陰極を用いた放電で作られるアークが熱陰極アークである。電界放出型アーク放電では水冷された円筒の銅を電極として用いる。このタイプの陰極を用いて得られるアークが冷陰極アークである。熱電子放出タイプのアーク維持電圧は電

界放出型アークの維持電圧より低い。アークの電力はアーク電流とアーク電圧の積で表されるので、アーク電圧の低い熱電子陰極では出力を大にするにはアーク電流を大にせねばならない。一方、電界放出型ではアーク電圧が高い分、電流値を下げて操業できる。大電流での運転はどうしても電極の損耗が激しくなるので大電力での運転をするプラズマトーチは電界放出型の水冷銅陰極構造のことが多い。ただし、水冷した銅電極であってもアーク点が電極表面の一角所にとどまると電極は溶損する。これを防ぐため、水冷銅電極タイプのトーチではアーク点が水冷された銅円筒の内表面を高速で動き回るよう、磁場を外部より作用させたり、プラズマ作動ガスに強い旋回をかけたりしている。熱陰極タイプのトーチでは6 MW出力までのものが⁵⁻⁷⁾、水冷円筒電極タイプでは10 MW出力までのものが⁸⁻¹¹⁾市販されている。

3.2 高周波誘導プラズマ

高周波誘導プラズマトーチの基本的な構成は図5(d)に示す様にガラスあるいはセラミックスのチューブとこの外側に巻かれたコイルとからなっている。このコイルに高周波電流を流しチューブ内の空間に誘導電磁界を発生させ、これにより気体を電離させプラズマ状態を作り出す。このプラズマ発生法の利点は、プラズマ発生空間に電極が存在しないので電極物質蒸発などの電極起因の汚染がないこと、電極とプラズマガスとの反応を恐れ直流や交流のアーク放電では利用しにくい、酸素や炭化水素、塩素などの反応性ガスも利用できること、広い空間に誘導電磁界が発生するので体積の大きいプラズマが作れることなどがあげられる。電源が高価であり、効率が50%程度と高くない。1.2 MW出力までの装置が作られている¹²⁾。

4 鉄鋼関連プロセスへの応用

鉄鋼プロセスへの応用に関し、これまでに、国内外で検討されている熱プラズマの利用について、上工程を中心にまとめたものが図6である。プラズマを鉄鉱石還元を利用

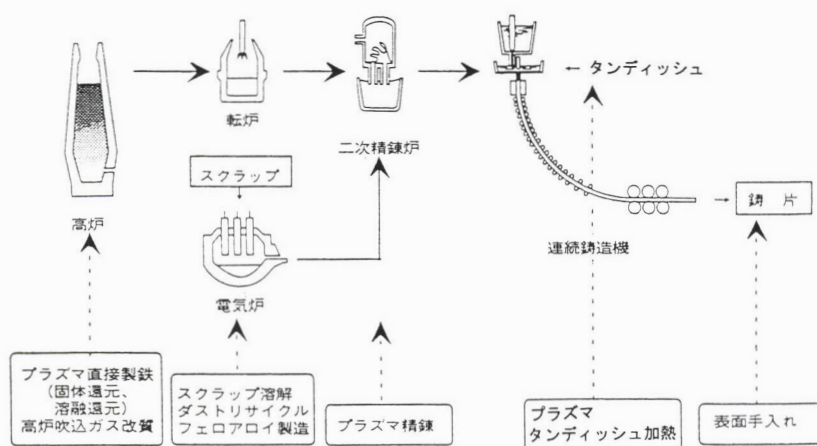


図6 鉄鋼製造プロセスにおける熱プラズマ応用研究

しようとする試みは電力が安価な北欧で古くから精力的になされている¹³⁻¹⁵⁾。しかしながら、熱源としての石炭燃焼エネルギーをプラズマへの電力で置き換えることは、鉄鋼プロセスでの二酸化炭素発生低減にはなるが、大型高炉をプラズマ炉で置き換えるには100万kW規模の電力設備が必要となり、我が国はもとより、外国でも経済的な合理性を持たせることはなかなか困難である。現行プロセスの全体的な置き換えではなく、現行法の大枠は残しながら、高炉送風ガスの改質や炉況微調整用熱源といった補助的な利用や、製鉄プラントで発生するダストからの有価金属の回収¹⁶⁾といった小規模設備で対応可能な応用を考えることのほうが現実的であると思われる。鋳物銑を作るキューボラで、送風ガスをプラズマで昇温して、コークスの消費量を低減しつつ生産性を高め操業をしている実例がフランスにある。

スクラップ溶解の電気炉で従来の消耗型炭素電極を非消耗プラズマトーチに変えようとする試みがなされている^{5,7)}が、現状の技術では、プラズマトーチの電力容量は、炭素電極に比べ1/10程度にとどまっており、力不足で炉容量は50トンを超えない。炭素汚染がないこと、雰囲気制御が容易で、有価金属の酸化損失が少ないこと、アークが安定しており、電力ノイズの発生がないことなどの利点を活かし、小容量の特殊鋼溶解に現在利用されている。我が国ではプラズマトーチと誘導加熱とを組み合わせた2t容量の小型溶解炉が開発されている¹⁷⁾。

直接的な製鉄プロセスへの応用ではないが、製鉄設備の信頼性向上、長寿命化のためにプラズマ溶射技術が広く利用されている。セラミックスや金属粉体をプラズマジェットの中に吹き込み、ジェットで加速しつつ、瞬間的に溶融状態にして部材表面に吹き付け成膜する技術である^{18,19)}。加熱炉内ロールや精整ロール、ガイドロール、めっきロール、線引部品など様々な設備部品表面は耐熱、耐摩耗、耐

酸化、耐食、焼付き防止等の目的で種々のコーティングが施されている。

清浄で、溶融金属の汚染がない熱源であることから、連続鋳造設備のタンディッシュ溶鋼の温度調整への利用が近年急速にひろまっている。二次精錬炉の熱源としての利用もなされている。以下に、これらの技術について説明を加える。最後に、アーク陰極点を利用した鋼材表面のクリーニング技術について簡単に紹介する。アーク陰極点は金属表面の酸化物を除去するクリーニング作用においてインテリジェント熱源とでもいえるような興味深い振舞いをする。プラズマの応用を考える上で新しい観点があることを感じていただけるのではないかと思います。

4.1 タンディッシュ内溶鋼プラズマ加熱

近年、連続鋳造のタンディッシュ内溶鋼温度の制御にプラズマ加熱法が広く用いられている。この技術は1980年代後半に我が国で開発され²⁰⁾、世界に広まったものである。タンディッシュ内溶鋼の温度は、取鍋交換から次の交換まで20～30℃の変動がある。温度が適正範囲からはずれると、鋳片の偏析が激しくなりまた介在物が多量に内部に存在するようになり、品質が劣化し鋳片歩留まりが低下する。また、温度が低下し過ぎるとノズル詰まりを起こすので、これを避けるためには、製鋼炉出鋼温度を高め維持せねばならない。このことは製鋼炉耐火物の補修コストの上昇、脱リン効率の低下につながり好ましくない。タンディッシュ部で溶鋼加熱ができればこれらの問題は解決される。この加熱手段としてプラズマが採用されている。図7にプラズマ加熱設備の一例を示した。図8はプラズマ加熱による溶鋼温度の変動改善の例を示している。種々のプラズマ加熱方式が考案されており、直流方式の他に交流方式がある²¹⁾。交流方式は複数のトーチで構成され、それぞれが交流周期内に陽極になったり陰極になったりを繰り返す。溶

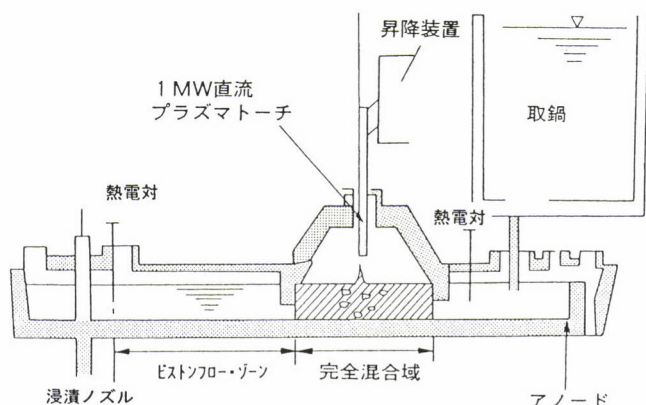


図7 タンディッシュ内溶鋼のプラズマ加熱法

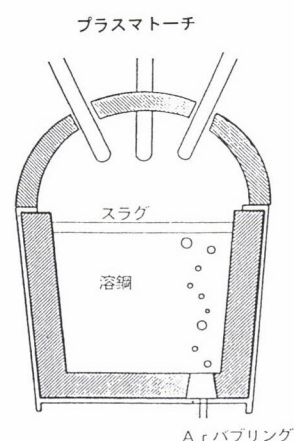
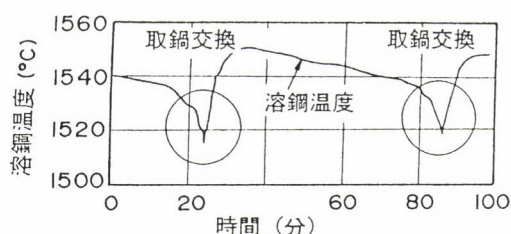
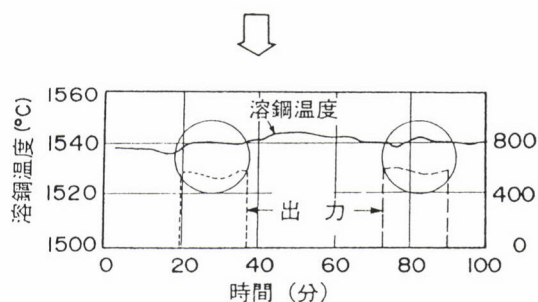


図9 三相交流プラズマ取鍋精錬炉



(a) プラズマ加熱無し



(b) プラズマ加熱有り

図8 プラズマ加熱によるタンディッシュ溶鋼温度の平準化

鋼内に電極を設置する必要がない利点があるが、加熱効率は熱陰極の直流タイプより若干劣る。直流方式の中でもプラズマトーチを陰極として、溶鋼を陽極とする熱陰極タイプと、中空の水冷銅電極をプラズマトーチに用い、これを陽極として、溶鋼を陰極とする水冷電極トーチタイプのものがある。熱陰極タイプはプラズマガスとしてのArの使用量を抑えることができ、アークが安定で、騒音が少ない。しかし、アーク電圧が低いため、大電流操作をせねばならず、付帯設備が大電流仕様となる。水冷銅電極タイプは多量のArを使用し、高いアーク電圧で操作するので、電流値は熱陰極タイプに比べ小さくできる。しかし、騒音が大であり、加熱効率が熱陰極タイプに比して低い。このほか同じ直流方式であるが、溶鋼内電極を無くすために、熱陰極トーチと対で陽極トーチを設置し操作するツイントーチタ

イプも開発されている。

4.2 プラズマ二次精錬

転炉や電気炉などの製鋼炉から出鋼し鑄造工程に入るまでの間に行われる精錬が二次精錬である。二次精錬では、成分調整と温度調整機能が求められる。温度調整のためには、従来はAlを投入し酸化発熱を利用する方式かまたは炭素電極を挿入する電気加熱方式が採用されてきた。しかしこれらの方法ではアルミナ介在物の発生による汚染や炭素溶解による汚染などの問題を避けることが難しい。汚染のない熱源としてプラズマの利用がいろいろ検討されている。我が国では三相交流プラズマトーチによる100 t 精錬炉が稼働している²²⁾。図9はこの精錬炉の概念図である。プラズマ出力は4.4MWである。この精錬炉でのプラズマ加熱の主な目的はスラグの組成調整である。製鋼炉(転炉)から取鍋内に流出してくる出鋼スラグは鋼中の介在物生成の原因となるので通常CaO、SiO₂、Al₂O₃などのフラックスを取鍋内に投入して改質をし、介在物発生源とならないようにしている。プラズマ加熱により、投入フラックスを急速に熔融させ混合しやすくする。プラズマ加熱ではアークからの輻射が主要な伝熱機構であるので、本質的に表面加熱である。フラックス・スラグ相は溶鋼の上に浮いて存在しているので、プラズマからのエネルギーは優先的にスラグ相の加熱につかわれ、効率的にスラグ改質が進行する。プラズマ加熱により、改質に必要なフラックス添加量の低減が可能になったこと、および改質に必要な時間が短縮されたことが報告されている。溶鋼の加熱目的のためには現状のプラズマ出力は不十分でより大容量のトーチの開発が必要である。

4.3 アーク陰極点による表面クリーニング²³⁾

鉄鋼の加工や表面処理工程では酸化膜を除去する工程が

不可欠である。溶射や塗装では表面の錆びや酸化膜を除去し、活性な表面を作る前処理を行わないと皮膜の密着性が確保できない。この前処理は、従来は硬い粒子を吹き付け機械的に研磨するブラスト法や、酸溶液を用い化学的に除去する方法などで行われてきた。これらの方法で処理された部材の表面は一見清浄で活性になったように見えるが、実際はブラスト粒子が表面に数多く残存したり、あるいは酸溶液が表面に残ったりし、清浄ではない表面を作っている。いずれの方法も粉塵や、廃液の発生があり環境に負担の大きい工程であった。筆者はアークの陰極点を処理部品の表面に発生させることで金属表面から酸化膜をドライな方法で除去する技術開発に取り組んでいる。アーク陰極点によるクリーニング方法の概念図を図10に示した。酸化物除去を行おうとする対象部材を電源の負極につなぎ、雰囲気気を真空(100Pa程度)に保ちアークを発生させる。真空雰囲気では複数のエネルギー密度のきわめて高い小さなアーク陰極点が処理対象物の表面に形成される。酸化物除去の機構は単純で、陰極点の高エネルギー密度で表面層が薄く蒸発することによる。これまでの研究で興味深い次の様な陰極点の振舞いが明らかになっている。すなわち(1)陰極点は金属表面上の酸化物の位置を自動的に見つけ出し酸化物上に優先的に形成される。(2)酸化物上に形成された陰極点は、酸化物を蒸発させ除去する。陰極点の下に酸化物が除去され金属表面が現れると陰極点は新しい酸化物を探して他の場所に移動する。このことの繰り返しで表面から酸化物が取り除かれていく。(3)表面から酸化物がなくなるとアーク電圧が上昇する。言い換えるとアークは電圧変化によりクリーニング作用の完了を知らせてくる。

クリーニング速度はアーク電流に比例し、酸化膜の厚みに反比例する。薄い酸化膜であれば大電流で処理するときわめて短時間でクリーニングが完了する(たとえば $0.1\mu\text{m}$ の薄い酸化膜で覆われたステンレススチール鋼板をアーク

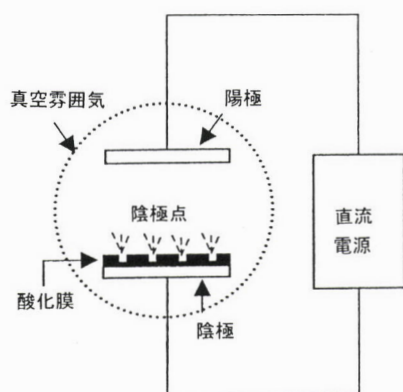


図10 アーク陰極点による酸化物除去クリーニング法

電流200Aで処理すると1秒あたり 300cm^2 程度の面積の酸化膜を除去する。)この速度は鋼種にあまり依存しない。上述した陰極点の選択性は金属より酸化物の方が仕事関数が小さく、酸化物からの電子放出が金属表面からの電子放出より容易であることに起因している。スケール除去の新しい手段として、いろいろな応用展開が考えられる。

5 終わりに

エネルギー多消費産業である鉄鋼業では様々な形態でエネルギーが消費されている。様々な形で存在するエネルギー・熱源の特徴をよく把握し、多様なもののうちから、目的にあわせ、特徴を十分に活用するよう選択していかなければならない。上に述べたようにプラズマは他の熱源には見られない特徴を有しており、今後も、鉄鋼プロセスの中のいろいろな場面で登場することと思われる。基礎的な研究がさらに進めば、熱源としてのプラズマの新しい特徴が見いだされ、利用の仕方についても、新しい見方が加わってくるであろう。

鉄鋼プロセスとは現在直接結びついてはいないが、プラズマ技術は、難処理有害物の分解無害化に有用であると考えられている。熱プラズマによるフロン分解無害化プロセスが開発され、プラズマの有効性が実証されている。昨今、産業活動と環境との調和が強く要請されるようになっている。鉄鋼業においてもこの観点からプラズマの特徴を見直すことも重要であろうと思われる。本稿が今後の鉄鋼業のあり方を考えている方々にいささかなりともお役にたてば幸いである。

最後に、鉄鋼業におけるプラズマ利用に関する情報をいろいろ教えていただいた新日本製鐵(株)の関和己氏、磯上勝行氏に御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 熱プラズマ材料プロセッシングの基礎と応用, 日本鉄鋼協会熱プラズマプロセッシング研究会編, 信山社サイテック, (1996)
- 2) K. Takeda and Y. Nakamura: Trans. ISIJ, 18 (1978), 641.
- 3) 武田紘一: 高温学会, 16 (1990), 357.
- 4) K. Takeda, M. Ito, S. Takeuchi, K. Sudo, M. Koga and K. Kazama: ISIJ International, 33(1993), 976.
- 5) G. Schrf: Proc. 7th ICVM, (1982), 1068.
- 6) C. P. Heanly and P. M. Coux: Proc. Electric Furnace Confer. ISS-AIME, 40 (1982), 257.
- 7) H. J. Bebbler, D. Neuschütz, H. O. Rosner and K. H.

- Heine : Proc. 8th ISPC, (1987), 2253.
- 8) M. G. Fey, T. N. Meyer, W. H. Reed and W. O. Philbrook : Industrial Energy Conversion Technology Conf., (1982)
- 9) G. N. Liu and T. F. Foster : Proc. 7th ICVM, (1982), 1060.
- 10) S. L. Camacho : Plasma Energy Corp, パンフレット
- 11) M. Labot : Industrial Application Plasma Arc Torches, Aerospeciale Co., Tech. Rept., (1984)
- 12) P. H. Dundas and M. L. Thorpe : Chemical Engineering Progress, 66 (1970), 66.
- 13) H. G. Herlitz, B. Johansson and S. Santen : Iron and Steel Engineer, 61 (1984), 39.
- 14) P. H. Collin and H. Stickler : Iron and Steel Engineer, 57 (1980), 43.
- 15) R. Gold, W. Sandal, P. Cheplick and D. MacRae : Ironmaking and Steelmaking, 1 (1977), 10.
- 16) H. G. Herliiz : Metal Bulletin Monthly, May (1986), 267.
- 17) C. Asda, I. Eguchi and T. Adchi : Proc. 7th Int. Electro-Melting Congress, (1972), N123.
- 18) 井藤三千寿, 武田紘一 : 製鉄研究, 336 (1990), 40.
- 19) 武田紘一 : 溶射, 35 (1998), 4.
- 20) 平岡照祥, 斉藤芳夫, 溝口良平, 横井真一, 三村満俊, 梅沢一誠, 中尾安幸 : 鉄と鋼, 73 (1987), S690.
- 21) 藤本英明, 斉藤 忠, 清水基良, 清川雅充, 入谷英樹, 西 誠治 : 鉄と鋼, 77 (1991), 1649.
- 22) 磯野貴宏, 大貫一雄, 梅沢一誠, 延本 明, 亀井浩一, 平岡照祥 : CAMP-ISIJ, 6 (1993), 270.
- 23) 武田紘一, 竹内 順 : 日本金属学会会誌, 63 (1999) 41.

(1999年9月6日受付)