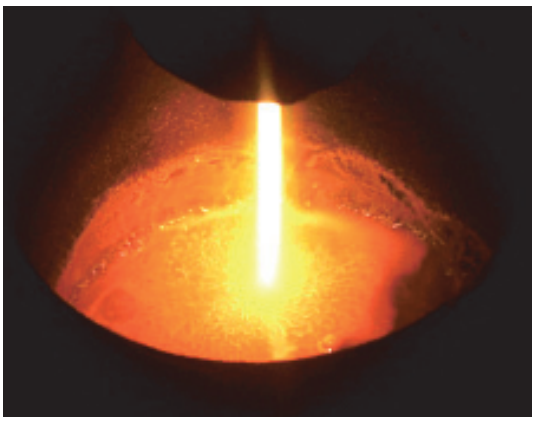
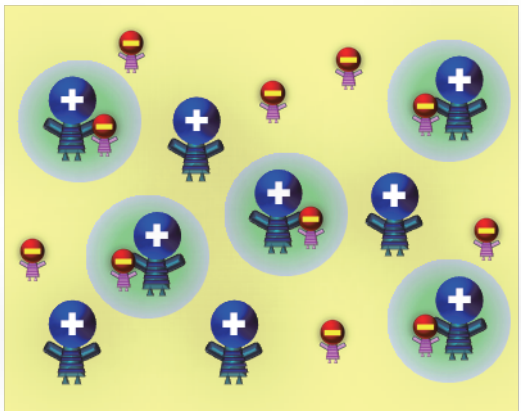
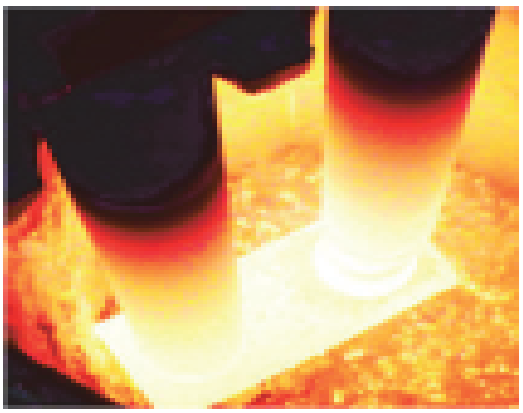
機関誌「エレクトロヒート」連載

『プラズマ技術とその適用分野』

の解説







一般社団法人
日本エレクトロヒートセンター
JAPAN ELECTRO-HEAT CENTER
JEHC

目 次

第１章 『プラズマ技術とその適用分野』の解説 ……1

１．プラズマとは……1

２．加熱・溶解プロセス……9

３．溶接プロセス ……11

４．プラズマ切断 ……13

５．大気圧プラズマ適用事例 ……15

６．プラズマ式ワンショット溶解システム ……18

第２章　機関誌連載講座『プラズマ技術とその適用分野』……19

１．プラズマ技術の総論 ……19

２．鋳造工場におけるアーク式取鍋加熱装置の導入事例……22

３．プラズマ溶接機……24

４．プラズマ切断機……26

５．超高密度大気圧プラズマユニット「Tough　Plasma」の適用事例と新型ヘッドの紹介 ……28

６．プラズマ式ワンショット溶解システム ……31

序

アーク・プラズマ加熱技術部会では、プラズマ加熱技術の普及活動の取り組みの一環として、2015 年度の機関誌エレクトロヒートに 6 回連載した「プラズマ技術とその適用分野」を束ねて概要解説を付した解説冊子を制作しました。

機関誌エレクトロヒートはこれまでに、アーク加熱や誘導加熱による鋼材溶解の高温度域から、ヒートポンプによるマイナス温度を含めた低温熱利用まで、さらには電化厨房機器も含み、広範な温度域や多様なプロセスに活用される「エレクトロヒート技術」を紹介してきました。また、エネルギーや環境、あるいは産業界全般の時評記事なども適宜掲載することで産業界の関心を喚起し、エレクトロヒートの普及、拡大の促進に寄与してきました。しかし、機関誌のバックナンバーや記事単独での抜き刷りの販売はしているものの、当該号が発行されると概ね一過性の購読となっているのが実情です。

機関誌に掲載された記事は、前身の「電気加熱技術情報」が発行された 1980 年 7 月の第 1 号から 2018 年 3 月号の第 218 号までで 2700 件近くに上り、これはエレクトロヒートの普及・拡大活動にとっての大変大きな財産です。一部は全く過去のものとなって顧みることが不要な記事もありますが、珠玉の記事を埋もれたままにしておくことは大変残念なことです。その中には、その技術に詳しくない読者に敬遠された記事も決して少なくないと推察されます。

その様な中、今回の解説冊子制作活動が、読者の技術の理解と認識を促す架け橋となり、機関紙に関して「ある技術分野やプロセス領域でこれまでの財産を編集して解説する」といった活動の先駆けになればと考える次第です。

最後に、本書の執筆、編集に関わっていただいた方々に対しまして、この場を借りて御礼を申し上げます。

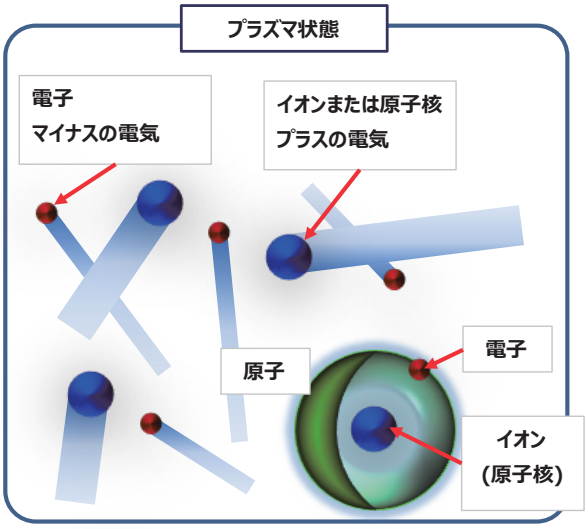
平成 30 年 3 月

日本エレクトロヒートセンター
技術委員会　アーク・プラズマ加熱技術部会

部会長　池田　弘一

第１章 『プラズマ技術とその適用分野』の解説

１．プラズマとは



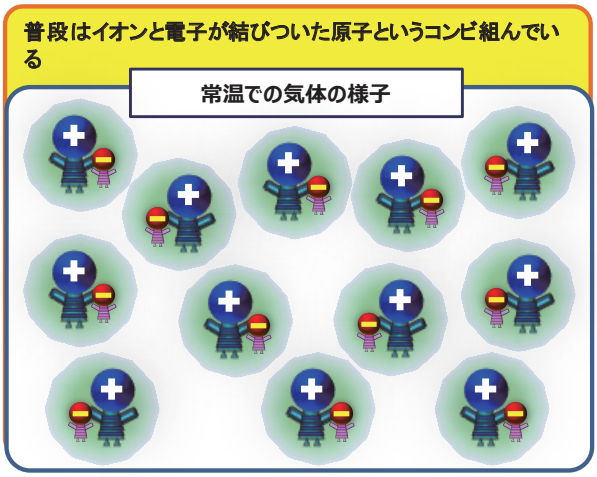
１．１ プラズマの様相（プラズマに出てくる粒子）

【原子】

原子は、原子核の中にあるプラスの電気を持つ陽子と原子核を取り巻くマイナスの電気をもつ電子が同数でコンビを組んでおり、普段はプラスとマイナスが相殺して電気を帯びていないので、電気的に中性な粒子です。

ところが、電子が不足したり余ったりすると、原子（あるいは原子同士がコンビを組んだ分子を含む、以下同様）は電気を帯びた状態のイオンになります。いくつかの電子が陽子とのコンビを解消して原子から出て行くと、電子が不足してプラスの電気を帯びた状態の「陽イオン」になります。逆に、いくつかの電子がコンビに新たに加わって原子の中に入ってくると、電子が余ってマイナスの電気を帯びた状態の「陰イオン」になります。

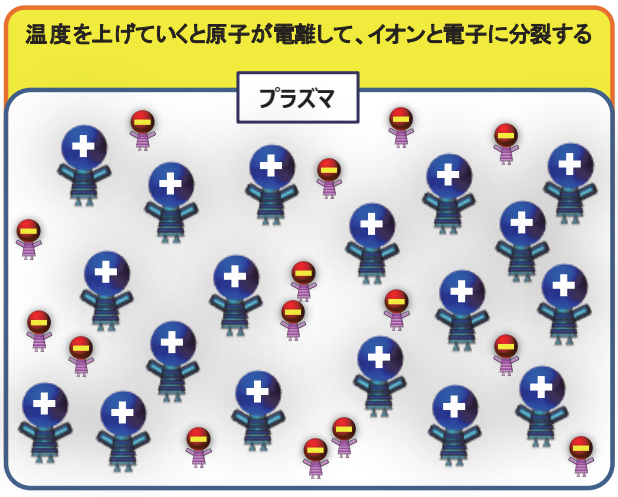
厳密さに欠けますが、これから原子、電子、およびイオンをそれぞれラグビーの選手になぞらえて、プラズマの様子を描いてみることにします。



【電離およびプラズマ】

試合のない状態に相当する常温では、選手はリラックスしている原子あるいは分子です。ここで、温度は選手の運動量を表します。

試合前の控室で準備していた選手は、試合が始まるとフィールド内での動きが活発になり、展開もフィールド全体に広がっていきます。ボールから離れた選手はプレーに関与せずに静観し、ボールを持っている、あるいはボールを取ろうとする選手は激しく動きますが、やがて選手同士が連携するようになると、チームとして機能するようになります。この過程が物質の温度上昇に相当し、粒子の運動量が増えると、分子は原子に、原子はイオンと電子に、徐々に分裂していきます。



このような温度上昇などをきっかけに、プラスチーム（陽イオンの集団）とマイナスチーム（電子あるいは陰イオンの集団）に分かれることを電離といいます。そして、プラスチームおよびマイナスチームのそれぞれの選手は荷電粒子と呼ばれ、これらの荷電粒子が混在している状態をプラズマといいます。このときのプラスの電気量とマイナスの電気量は同じで、遠く離れたところから見ると電気的に中性な固まりですが、原子レベルまで近づくと、イオンと電子（あるいは陰イオン）から成る荷電粒子が入り乱れています。つまり、競技場レベルで見ると、プラスとマイナスのチームの選手の数が同じなので電気的には互角ですが、フィールド内はプラスとマイナスの選手がそれぞれ動き回っているので、電気が流れやすい状態になっています。

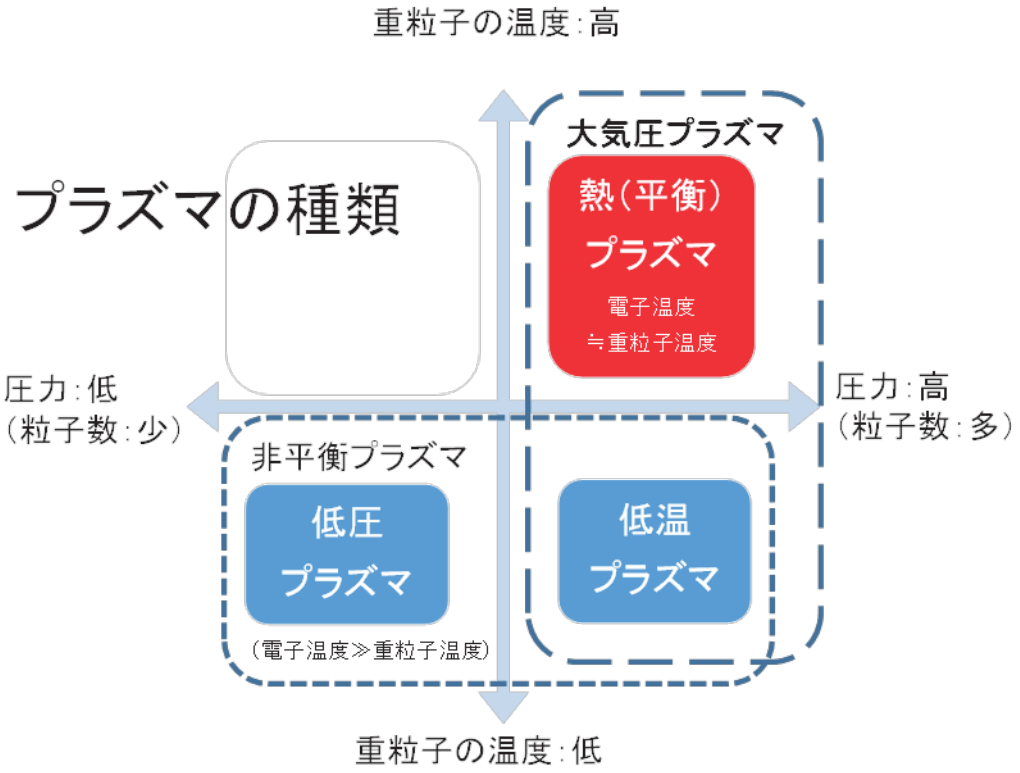
やがて試合が終了してノーサイドになれば、プラスおよびマイナスのチームのそれぞれの選手はプレーを止めて敵味方無く、なかよく原子あるいは分子に戻ります。もはや外部からエネルギーを与えられず、常温に戻る状態を指します。

１．２　プラズマの種類

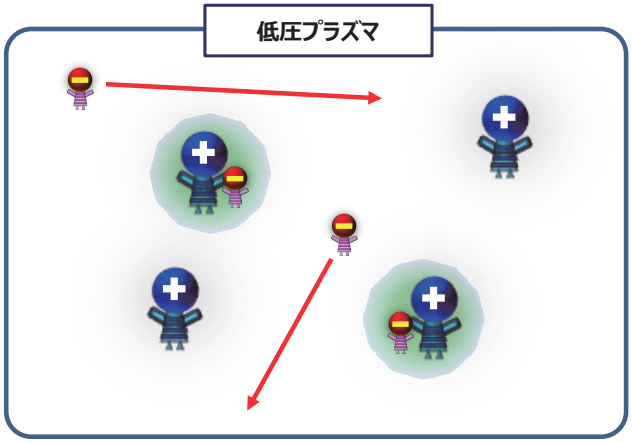
【プラズマの種類】

さて、プラスとマイナスのチームの戦術は異なります。イオンと電子は電気量としては等価ですが、質量としては大きく異なり、電子がパチンコ玉ならばイオン（あるいは原子）はボウリングの球ぐらいの違いがあります。したがって、超重量級のプラスチームはスクラムが強く、超軽量級のマイナスチームは足が速いという特徴があります。動きの鈍いプラスチームが、マイナスチームの再三にわたる連続攻撃を跳ね返す展開となります。このとき、プラズマの性質に相当するフィールドの状態やチーム編成で試合の形勢が変わります。

フィールドの状態は図に示すように、低圧プラズマ、低温プラズマ、熱プラズマの 3 種類があります。



【低圧プラズマ】



低圧プラズマに関しては、選手に対してフィールドが広いので、マイナスチームが広大なスペースを駆け回り、すり抜けられたプラスチームが追いつけない展開となります。これはマイナスチームの運動量だけが多く、マイナスチームの良さだけ目立つ展開です。

低圧の場合、電子および重粒子（今後特に断りが無ければ、原子や分子等の中性粒子を含む）の数が少ない、すなわち電子密度および重粒子密度が低いため、電子と重粒子が衝突する頻度も相対的に少なくなります。その結果、重くてゆっくりとしか動けない重粒子の間を、軽い電子が高速ですり抜ける、すなわち電子温度が高く、重粒子温度が低温のままとなります。

低圧プラズマは、電子温度と重粒子温度が一致しない非平衡プラズマです。それゆえ、軽い電子がいくら束になってかかっていっても、材料全体を加熱するまでには及びません。代表例として蛍光灯があり、電子温度は約 1 万℃になりますが、重粒子温度はせいぜい 50℃程度ですので、蛍光灯を触っても火傷までには至りません。

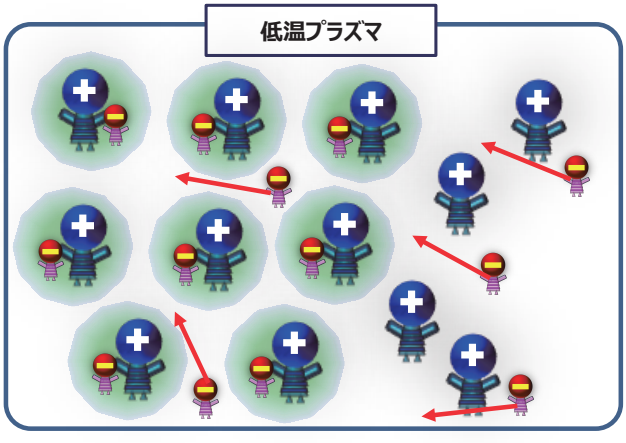
補足ですが、重粒子温度が高い低圧プラズマは、素粒子の研究設備やオーロラを出現させる太陽風のような特殊な環境でしか存在しません。

【大気圧プラズマ】

大気圧プラズマに関しては、フィールドが見えないほど選手がひしめき合っているので、プラスチームは壁の如く立ちはだかり、マイナスチームがわずかな隙間に果敢にトライをかける展開となります。

大気圧の場合、低圧に比べて相対的に電子密度および重粒子密度が高くなります。その結果、ラッシュアワーの満員電車のように密着してストレスが高まります。大気圧プラズマを重粒子温度に着目して分類すると、電子温度が高くて重粒子温度が低温のままの低温プラズマと、電子温度および重粒子温度が両方とも高温になる熱プラズマの 2 種類になります。

【低温プラズマ】



低温プラズマに関しては、マイナスチームが次から次へとタックルを仕掛けるのですが、プラスチームはびくともせず、ほとんど体力を消耗しない状況に当たります。マイナスチームの突進力はたいしたことがありませんが、低圧プラズマと違って電子の数が多いので、プラスチームを挑発してかすり傷を負わすことができます。

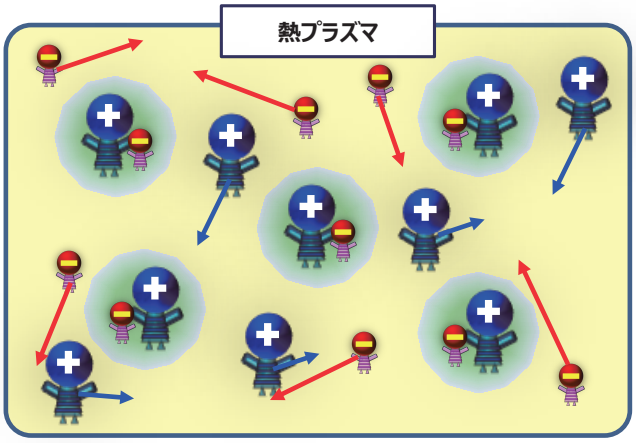
低温の場合、低圧と同様に電子温度が高く、重粒子温度が低いのです。しかし、低圧と違って数が圧倒的に多いため、高密度なラジカル（不安定な原子、分子、イオン）

を生成することができます。それゆえ、表面処理等への適用が注目されています。

低温プラズマは、低圧プラズマと同様に高温の電子と低温の重粒子の温度差が大きいため、温度の観点からは非平衡プラズマです。

【熱プラズマ】

熱プラズマに関しては、フィールド内のすべての選手が躍動する総力戦です。



熱プラズマの場合、すべての粒子がお互いに激しくぶつかり合うため、温度は 5 千度を軽く超えます。このときの電子温度および重粒子温度はともに等しくなるので、熱平衡プラズマとも呼ばれます。勿論、熱プラズマの大きさは有限なので、外界と接する周辺部の状況は異なりますが、中心部では平衡状態が成立しているとみなせます。このことを、局所熱平衡が成立しているといいます。蛍光灯と違い、大量の重粒子が激しく衝突するので、金属の鋳造や廃棄物処理を始め、溶融・溶接や切断が簡単に行えます。

1．3　プラズマのつくりかた

ラグビーの試合で選手を動かす原動力の一つに、報酬があります。これらを安定して容易に与えるのに手っ取り早いのは、プラズマの場合は放電です。敢えて比喩を用いるならば、直流放電では大量に報酬を与え、誘電体バリア放電では小出しに与え、その中間が高周波放電やマイクロ波放電といえるかもしれません。ここから先はパチンコを例にして、実態に近い形で解説していきます。

【直流放電】（ブラウン管の電子銃のように電子を加速してプラズマを生成）

プラスとマイナスの電極の間に電圧をかけて発生する直流電界（電圧の勾配）によって、原子から電子を引き離し、引き離された電子（自由電子）を加速し、自由電子を中性粒子と衝突させて電離を引き起こします（イオンの動きは、電子のそれよりも鈍重なので、無視しています）。電子やイオンが電界の坂を転げ落ちながら電極の間を移動する際に、他の粒子と数多くぶつかることで、粒子の一部が電離してプラズマが生成されます。200 年以上前から多用されてきた簡易な手段です。

直流放電をパチンコに例えると、鋼球（電子）が多数の釘（原子やイオン）にぶつかりながら盤面を落下し、特定の入賞口に入ると、得点または賞球が得られる（電離してプラズマができる）ことに相当します。この場合、プラズマの電界はパチンコ台の傾き、電流は鋼球の数に匹敵することになります。

【交流放電（高周波、マイクロ波、誘電体バリア）】（電子を揺さぶってプラズマを生成）

電極の間に交流の電圧をかけて発生する交流電界（繰り返し電圧の勾配が変わる）によって電子を振動させ、中性粒子と衝突させて電離を引き起こします。電極間の電子を揺さぶる際に、他の粒子と数多くぶつかることで、

粒子の一部が電離してプラズマが生成されます。

電極が放電によってできたプラズマに触れなくて済むので、電極を放電管の外に出しても、あるいは電極を絶縁物（誘電体）で覆ってもよく、電極物質の混入が無い、きれいなプラズマが得られます。そのため、不純物の混入を避けたい材料開発等に使われます。

交流放電をパチンコに例えると、実際にはあり得ませんが、パチンコ台を通常の状態とひっくり返した逆さまの状態を交互に繰り返してプレーすることに相当します。

【高周波放電、マイクロ波放電】（電子を揺さぶる回数の違いで決まる方法）

放電電圧（電源）が大きくなると、イオンまたは電子が電極に到達する前に電界によって向きが変わり、電極間で振動することになります。この周波数が低い方が高周波放電（kHz～MHz）、高い方がマイクロ波放電（MHz～GHz）となります。そのため、高周波とマイクロ波では電源および回路の構成が大きく異なります。

特にマイクロ波の波長は、伝送線路（電源とプラズマ発生部を結びつけるもの）の長さに比べて短いため、伝送線路内でのエネルギーの損失や反射をできる限り小さくするように電源と回路を調整する必要があります。マイクロ波放電は高周波放電に比べて電子を速く揺さぶる関係上、マグネトロン（発振器）によってマイクロ波をつくり、それを導波管で導き、石英などでつくった容器内にそのマイクロ波を注入すると、プラズマが発生します。

パチンコ台を目に見えない速さでひっくり返したり、元に戻したりするので、打ち出された鋼球は真上から真下まで移動できず、鋼球の盤面上の位置は周囲の釘や入賞口にぶつかりつつもほとんど変わらないことに相当します。

【誘電体バリア放電】（電気を流しにくいものを挟むことで、小電力で穏やかなプラズマを生成）

電極の間に絶縁物（誘電体）を挟んだものが誘電体バリア放電となります。誘電体には、ガラス、アルミナ、ポリマーフィルムなどに加えて、純水や電解質液などの溶液を用いることができます。溶液と相性が良いのが大気圧プラズマの特徴で、低圧プラズマでは不可能なプラズマ反応系を構築できます。

誘電体バリア放電は、誘電体を挟んだコンデンサに交流電圧をかけるものとみなせます。例えば、電極間距離が数 mm の誘電体バリアを大気圧の空気中で 10kV（ピーク）の交流電圧をかけると、髪の毛の太さぐらいの多数の放電柱（ストリーマ）がランダムに生成と消滅を繰り返します。このとき、誘電体があることで電流が抑制され、1～10 ナノ秒（10～100 億分の 1 秒）の極短時間でストリーマは消滅しますので、アーク放電にまで発展することはありません。低温プラズマを生成するのに適しているため、材料に熱を与えずに反応性の高い表面処理を行えることから注目が集まっています。

パチンコ台を上記のように高速で揺さぶっているのに加えて、釘の位置が狭まる（誘電体を挟んだとみなせる）ので、鋼球は少しずつしかすり抜けられません（鋼球の動きがストリーマとみなせる）。

１．４　プラズマガスの影響

【プラズマの性質に与えるガス種の影響（その１）】

プラズマに利用するガスは、処理対象との反応性、入手や取り扱いのしやすさ等を考慮した上で使い分けており、熱プラズマに採用する代表的なガスとして、アルゴン、ヘリウム、水素、窒素をここでは取り上げます。私たちが住む環境では、アルゴンおよびヘリウムは原子１個単独で、水素および窒素は原子が２個結びついてできた分子で存在しています。

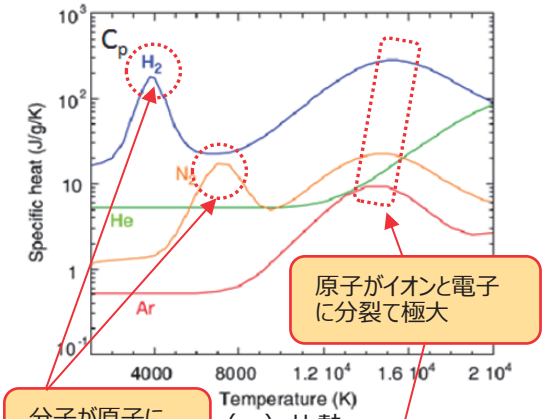
まず、水素や窒素のような分子で構成されるガスがプラズマになるためには、まず分子結合を解いて原子に分かれる（解離）のためのエネルギーを必要とします。そのため、放電によって数千度の温度が与えられると、ガスの比熱が極大となり、大量のエネルギーを抱え込んだかのように振舞うことになります。原子になった水素や窒素は活発に動き回るので、自由な状態にしておくと、どんどん散らばってしまいます。エネルギーの散らばり具合を示す熱伝導率も同じように極大を示します。アルゴンやヘリウムは元々原子なので解離せず、数千度の温度では極大を示しません。

次に１万度以上の温度を与え続けると、原子が陽イオンと電子に分かれ始め（電離）、プラズマらしい振る舞いを示すようになります。電子の数を示す電気伝導率は、温度上昇に伴い、急激に増えます。但し、原子から１個の電子を引き剥がすのは、分子を原子にする以上に莫大なエネルギーを必要とします。

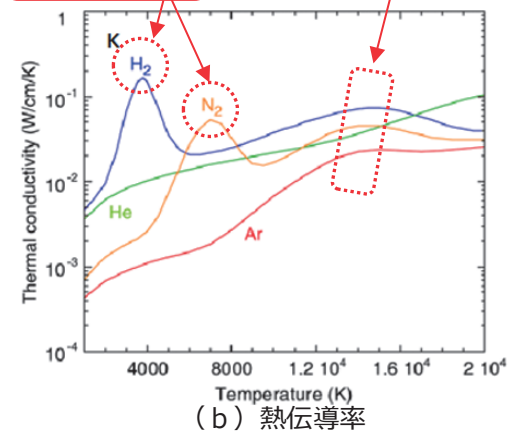
その結果、1～2万度にかけて比熱や熱伝導率が再び極大を示すことになります。イオンと電子は原子以上に過激な状態なので、比熱や熱伝導率は一桁大きくなります。ただ、身近で使われている熱プラズマの中を見ると、9 割以上の大部分が原子で、イオンと電子に分かれる原子はせいぜい数%しかありません。それでも実用上は十分プラズマとしての特性を満足しています。

同じように、数万度で原子から 2 個の電子を引き剥がす際に、比熱や熱伝導率の極大が見られるはずです。このように温度を高くすると、比熱、熱伝導率、電気伝導率は大きくなりますが、その増え方は緩慢となります。

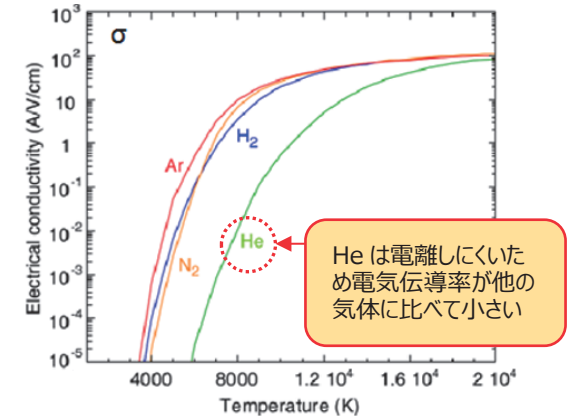
熱プラズマの中では、電離が起きる一方で、イオンと電子との再結合も盛んに起きて光や熱を放出するため、熱プラズマを維持するのは並大抵のことではありません。これまで人間が作り出した熱プラズマの最高温度は 3～5 万度とされていますが、太陽のような特殊な環境では数千万度に達します。



（ａ）比熱



（ｂ）熱伝導率



（ｃ）電気伝導率

各種熱力学輸送特性

【プラズマの性質に与えるガス種の影響（その２）】

同じ原子でもガスの種類によってプラズマの状態が変わるのは、原子構造の違いです。

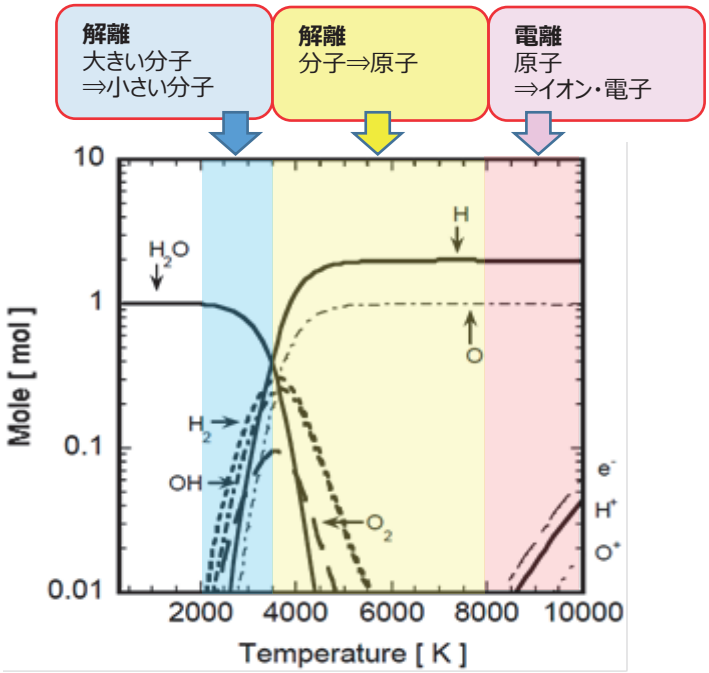
質量に着目した場合、水素原子を基準にすると、ヘリウム原子は４倍、窒素原子は 14 倍、アルゴン原子は 40 倍も重くなります。したがって、同じエネルギーを与えられれば、軽い原子は速く動き回ることができるので比熱や熱伝導率は大きくなり、動きが相対的に鈍い重い原子のそれらは小さくなります。

原子から１個の電子を引き剥がすエネルギーは、正確には陽子と電子の数、原子核と最も外側を回る電子との距離（原子半径）、束縛された電子が動ける軌道などの原子構造によって決まりますが、アルゴン、水素、および窒素はほぼ同じくらいで、ヘリウムだけが３者よりも２倍近いエネルギーを必要とします。したがって、同じエネルギーを与えられた場合の電気伝導度は、アルゴン、水素、および窒素は同じ程度となり、最も電離にしくいヘリウムは極めて小さくなります。

ヘリウムのイオン化エネルギーは 24.5 eV（エレクトロンボルトというエネルギーの単位の一つです） と全ての気体の中で最も高い値を持つのに、何故プラズマに使われるのでしょうか。それは、約 20 eV の辺りに長寿命の準安定状態が存在するために、連続した放電ではイオン化のためには、たかだか約 4 eV 程度のエネルギーしか必要としないのです。登山に例えると、頂上にたどり着くのに１合目から登るより、９合目の山小屋に宿泊して山頂を目指すのが楽なのと同じです。特性が多少悪くなるものの、アルゴンも同様の特性を持っており、価格が安いために広く用いられています。

１．５　補足

【粒子組成の温度依存性の見方】



水蒸気プラズマの粒子組成

〈単位の説明〉

K（ケルビン）：摂氏（℃）で示す温度に 273 を足した温度（例：0℃＝273K、100℃＝373K）

mol（モル）：粒子の数。1mol＝6.0×10^{23} 個（現在の日本の国家予算を 100 兆円とすると、約 60 億年分の 1 円玉を集めたぐらいの膨大な数です）

〈グラフの見方〉

＊水蒸気

①1mol の H_2O（水）分子を 250 K から 2000 K まで温度を上げても、数は同じです。

＊解離（一つの（水）分子→2 つ以上の分子[水素分子、酸素分子、OH 分子]）

②さらに 4400 K まであげると、H_2O（水）分子は 100 分の 1 の 0.01mol に減少します。

③一方、2000 K より高くなると、H_2O が H_2（水素）や O_2（酸素）の分子に分かれます。

④3500～4000 K で H_2 が約 0.3mol、OH および O_2 が約 0.1mol と最も多くなります。

＊解離（分子→原子）

⑤5000 K を超えると O_2 が、5500 K を超えると OH および O_2 が 0.01mol 以下に減少します。

⑥一方、3000 K より高くなると H および O が急速に増加し、4000 K を超えると約 2mol の H と約 1mol の O の原子に分かれ、水分子はほぼバラバラになります。

＊電離

⑦8000 K を超えると H と O のそれぞれの原子が徐々に電子（e-）とイオン（H^+、O^+）に分かれ、10000 K で原子全体の約 2%がプラズマになります。

【熱的ピンチ】（連載講座「図 3」の解説）

プラズマの中を流れる電流（電子群の流れ）が大きくなると、プラズマを取巻く強い磁場が発生し、電流と磁場の相互作用でプラズマが締めつけられ、中心部に圧縮されます。これによって、プラズマの中心部は、電流が流れることで生じるジュール熱（プラズマは電気回路の抵抗とみなせる）に、プラズマを締め付けるローレンツ力が加わって温度がさらに高くなるため、柱状または環状などの高温プラズマをつくるのに利用されます。これをピンチ効果と呼びます。濡れた雑巾をプラズマに例えると、磁場という名の両手で雑巾の両端を持って絞ることで、雑巾に染み込んだ水を取り除くことがピンチ効果に相当します（雑巾が乾くほど高温プラズマとみなせます）。

連載講座では陰極から陽極に向かって作動ガスがプラズマ（アーク）を取り囲むように流れる様子が示されています（連載講座第 3 回図１、図４および連載講座第４回図２を参照）。このような場合、プラズマ（アーク）の外側が冷えて電流が流れにくくなる分、その中心部に電流が集中して温度が高くなる現象が起きます。これはピンチ効果の一種で、熱的ピンチ（熱ピンチ効果）と言います。真冬に裸でいると寒くて縮みこみますが、体をぶるぶる震わせて体温を上げることに相当します。

2．加熱･溶解プロセス

加熱･溶解分野で用いられる加熱源として、 設備導入が容易なことからガス火炎を使用する場面は多く見られます。

しかし、 ガス火炎の場合には、 燃焼排ガスが熱を持ち去るために熱損失が多いという課題や、 燃焼空気中の酸素や周辺から侵入してくる空気により酸化物(廃棄物)を生成してしまうといった課題がありました。

取鍋(溶融金属を保持する容器)を予熱する装置でも、一般的にはガスバーナーが用いられますが、予熱に寄与する熱量は 8%に留まり、排気による熱損失は 86%にもなっていました。

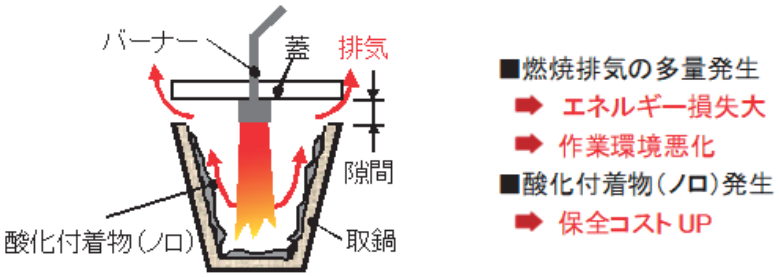
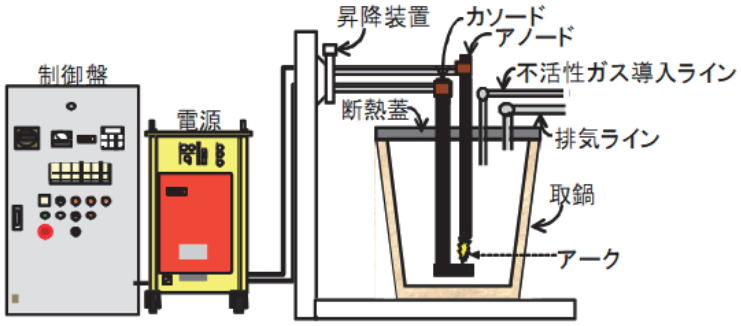
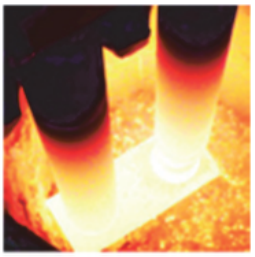


図 1　ガスバーナー加熱の課題

一方プラズマの特徴として、 エネルギー密度が高い ・ 排ガス損失が少ない(そもそも排気ガスが発生しない) ・ 酸化物などを生成しないクリーンな加熱が可能となっています。

これらの特徴を生かし、 取鍋予熱装置にプラズマ･アーク式予熱が適用されています。





項目	テスト機の仕様
電源	3相200V／210A
定格出力	61kW
電極	カーボン　φ80×1800mm
ユーティリティ	電気、不活性ガス
加熱能力	800℃／h（at 300kg取鍋）

図 2　アーク式取鍋加熱装置概略図

アークは中心温度が 5000℃以上に達します。この放射熱および対流伝熱により取鍋内部を短時間で予熱することが可能となり、排ガス損失がガスバーナー式の 86%に比べ 7%にまで大幅に低減出来ており、有効熱量は67%にも達します。

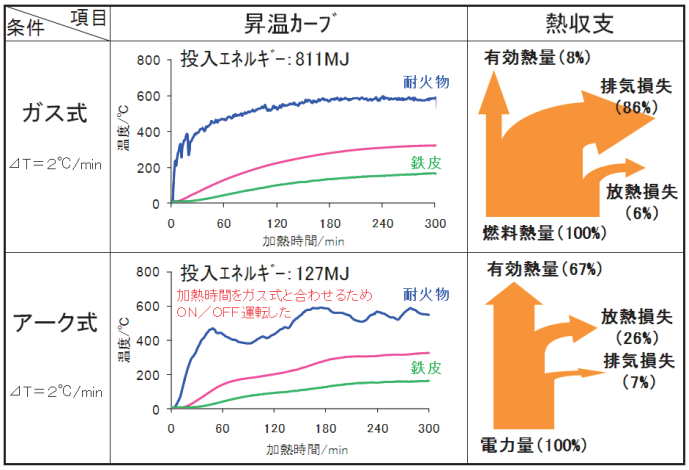


図３　温度データ及び熱収支比較

この事例では、 アークの高温加熱による予熱時間短縮や熱効率向上の他にも、予熱装置周辺 1m の距離での騒音や雰囲気温度もガスバーナー式に比べ良好な結果が得られました。

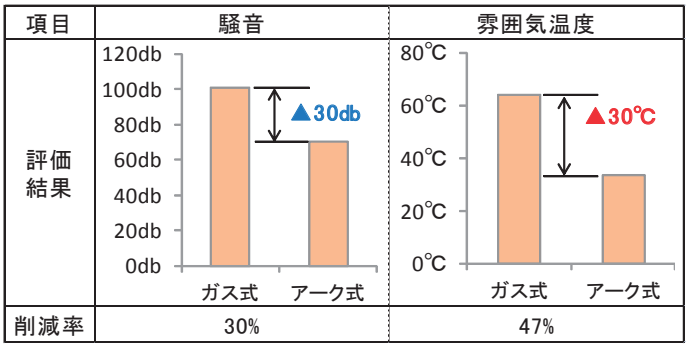


図４　作業環境改善効果

以上のようにアーク式の予熱装置を使用することで予熱時間短縮・熱効率向上・CO_2 排出量低減、周辺騒音や周辺温度の低減といった作業環境改善も見込むことができます。

現在は 2,200kg までの取鍋へ対応していますが、今後大型取鍋への適応が可能になれば、広く普及していくと思われます。

３．溶接プロセス

熱プラズマを用いた溶接プロセスは、金属同士を加熱して融解させ液体にし、それが冷却されて凝固することで完結します。

溶接の際には、溶接材料と呼ばれる添加材料を連続的に供給し、この融液が金属母材の融液と一体化して凝固することで溶接金属が形成されます。

熱プラズマの生成には、主に直流放電が用いられ電極の種類により、溶極式と非溶極式の２種類に大別されます。

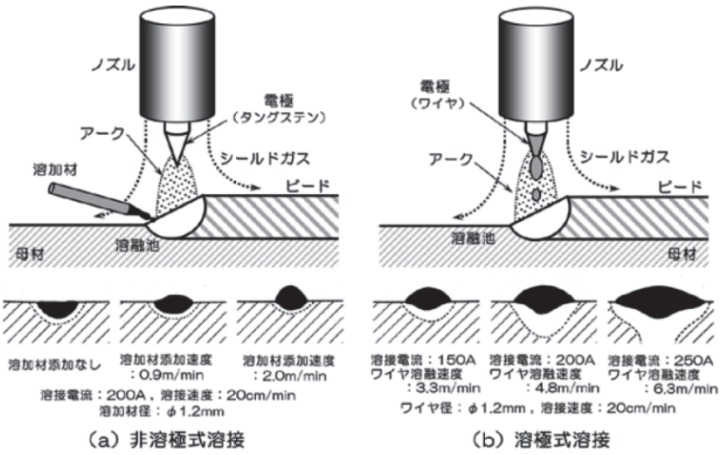


図１　溶極式溶接と非溶極式溶接
(国立科学博物館技術の系統化調査報告書 Vol23 2016 より)

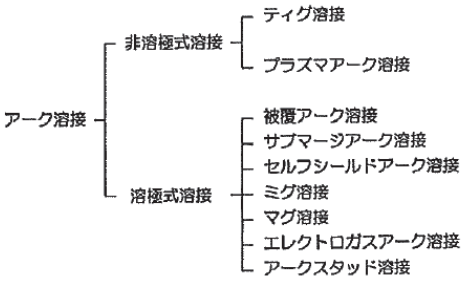


図２　アーク溶接の分類
(国立科学博物館技術の系統化調査報告書 Vol23 2016 より)

溶極式では、溶接ワイヤ（溶接材料）を陽極に母材を陰極として用いています。

また、直流放電の陽極側では、熱プラズマからの熱伝導に加え電子流入に起因した付加的な加熱が生じるため、これを利用して溶接ワイヤを融解し、母材の融液に移行させることにより溶接を行ないます。

溶極式は、高能率な溶接が可能な点に加え、構造が単純で自動化・ロボット化に適している長所があります。

非溶極式では、高融点物質であるタングステンを陰極に、母材を陽極として用いています。

母材の融液にフィラーワイヤ（溶接材料）を直接挿入し溶接を行います。

非溶極式の代表例として、プラズマ溶接と Tungsten Inert Gas 溶接（TIG 溶接）を紹介します。

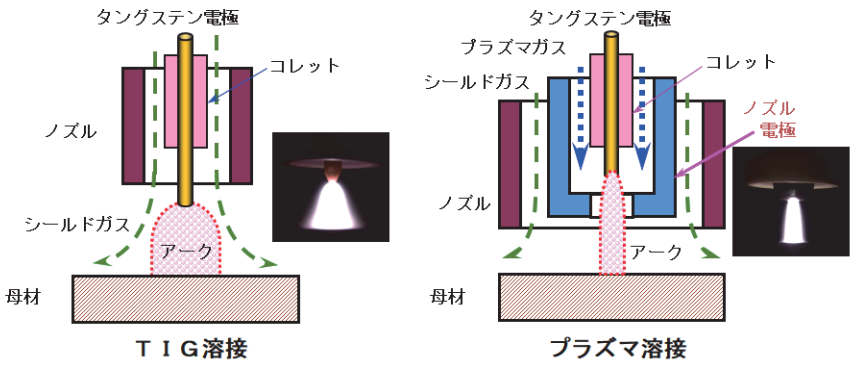


図３　TIG 溶接とプラズマ溶接の比較

熱プラズマによる母材の融解とフィーラーワイヤの送給とを独立制御できることから、熱プラズマの安定性を確保し易く、極めて高い溶接品質を実現できますが、能率は溶融式と比較して低くなります。

プラズマ溶接の主な適用分野は、自動車分野では板厚の違うプレス成型鋼板の接合やエンジンの吸排気系パイプやマフラー部品等の接合に多用されています。製管分野では円柱や角柱パイプの繋ぎ目の接合に用いられています。家庭分野では各種容器の溶接やナイフや包丁の柄と刃の溶接、医療分野では注射針の溶接に使われています。

表１　プラズマ溶接の主な適用分野

自動車、車両分野
触媒マフラー、マニホールド、テーラードブランク、気化器、
ピストンロッド、カーエアコン用バルブ部品、圧力センサー、
電気自動車用モータコア、電気自動車用コイル部品端子接続(銅)
計測器部品、ブレーキなど
製管分野
シームパイプ、管同士の接合など
家庭用品
魔法瓶、温水タンク、缶、ナイフ、洋包丁、冷蔵庫(コンプレッサ)など
医療機器
注射器、温度計部品など

プラズマ溶接の今後の課題は、既存の適用分野では高能率、高品質、高機能、省力化、低コストなど多種多様です。自動車、製管、家庭、医療分野の様々なニーズに応えて、さらなる技術開発を行うと共に、レーザー溶接の進歩に合せた、使い分けを模索する必要があります。

４．プラズマ切断

金属の切断については、熱的な切断方法としてガス切断、プラズマ切断、レーザー切断の 3 種類が実用化されています。

切断可能な材料と板厚の関係は以下の通りですが、レーザー切断が最も品質が高く、プラズマ切断は切断速度が速いことが特徴です。またガス切断は鉄鋼材料であればかなりの厚物まで切断することが可能です。これは鉄の酸化反応を利用したものです。

表１　切断可能な材質と板厚

切断法	金属材料		非金属材料	
	切断適用材料	切断適用板厚	切断適用材料	切断適用板厚
ガス切断	軟鋼	4.5～4000mm		
プラズマ切断	軟鋼 ステンレス鋼 アルミニウム 銅など	0.5～　75mm 0.5～180mm 0.5～100mm	（非移行式のみ） 樹脂 木材など	5mm程度
レーザ切断	軟鋼 ステンレス鋼 アルミニウム 銅など	～40mm ～16mm ～10mm ～　5mm	樹脂 木材 セラミック 紙など	50mm程度

次にプラズマ切断の特長について述べると、プラズマ切断には被切断材料が導電性か非導電性かで、電源装置の電極の接続方法が異なります。

導電性のある金属では、金属に通電させることで比較的厚板も切断することが可能となります。逆に非導電性の材料では通電できないためジェット気流で吹き飛ばして切断するため切断可能な厚さに限界があります。

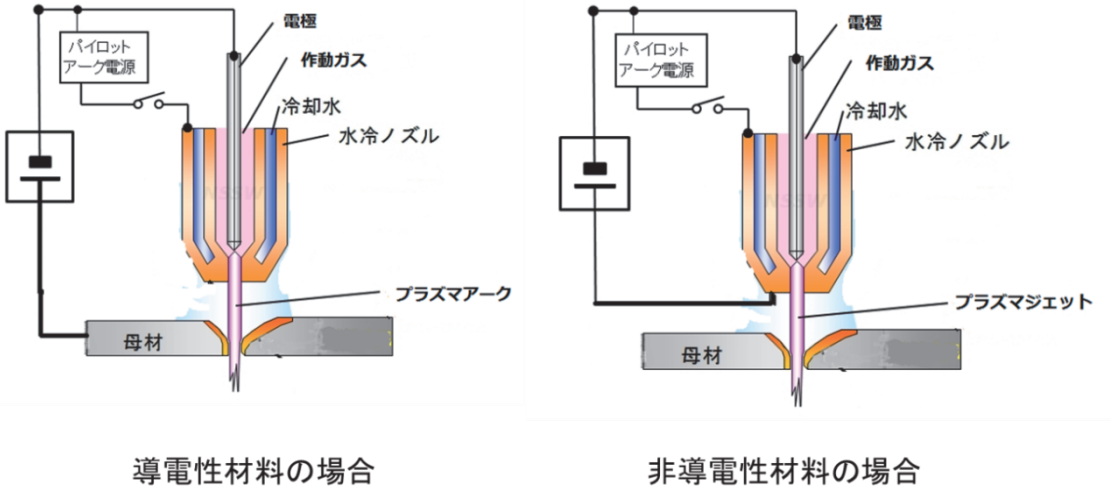


図１　導電性材料と非導電性材料の切断原理の違い

最近では様々なガスを作動ガスとして活用することで切断品質をあげる試みが進められています。目的に応じて作動ガスを選択することで切断可能厚さや速度、品質を改善することが可能となっています。

表２　軟鋼の作動ガスと切断品質の例

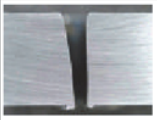
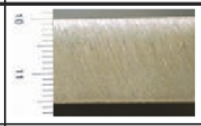
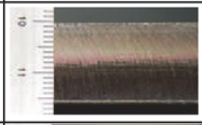
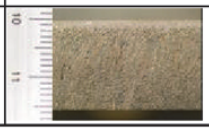
作動ガス／アシストガス	切断速度（切断電流）	切断面	切断溝形状
酸素／空気	2,500mm/min（300A）		
空気／空気	2,500mm/min（300A）		
窒素／窒素	1,500mm/min（300A）		

表３　ステンレスの作動ガスと切断品質の例

作動ガス／アシストガス	切断速度（切断電流）	切断面	切断溝形状
窒素／水	1,900mm/min（400A）		
アルゴン＋水素／なし	700mm/min（150A）		
酸素／空気	1,900mm/min（230A）		

今後の課題

プラズマ切断に期待されることは、安価な装置で高速・高品質に切断が可能になるということです。そのためにはプラズマ現象を解明し、ノズルの最適化によってどこまでプラズマアークを絞れるかということへの挑戦や、コストダウンのため切断電極の長寿命化などがあります。こういうことがクリアされた場合には、レーザー切断との棲み分けを進めつつ、普及していくことと思われます。

５．大気圧プラズマの適用事例

５．１　大気圧プラズマについて

プラズマは大気圧で定常的な放電を行うと、電子温度とガス、イオンの温度が一致する熱平衡プラズマになります。熱平衡プラズマは一般に高温となるので、熱プラズマ（アーク放電）とも呼ばれています。

また、プラズマ発生では一般に電界を印加し放電させますが、電界の印加を間欠的にパルス状に印加すると、電子のみが選択的にエネルギーを受ける状態にすることができ、 電子温度（電子エネルギー）がガス温度よりも高い状態を作り出すことが出来ます。

この状態を、大気圧非熱平衡プラズマ、あるいは大気圧低温プラズマ（グロー放電）といいます。

この大気圧プラズマは、従来は真空プロセスが必要であった「プラズマ」を大気圧下で安定して発生させる技術で、極めて活性なため低温での処理（親水化、接着性向上、殺菌、コーティング等）が可能です。プラズマ処理以外の他の薬液等を使用しないため、大気圧プラズマの応用技術は環境にやさしく生産性に優れた表面改質方法のひとつとして実用化されています。

更に最近ではプラスチックや半導体だけでなく、金属・繊維・紙へと適用が可能となり医療分野への応用も始まっています。またガス種を変えると生成される活性種も変わるので、処理効果や速度にバリエーションが大きく変わる事がわかってきています。

５．２　大気圧プラズマによる表面改質効果

一般的に大気プラズマで使用するのが「酸素プラズマ」です。

プラズマによって酸素ラジカルを生成しこれを照射する事で以下の表面処理効果が得られます。

① 表面洗浄：

酸素ラジカルによる酸化反応により表面に付着した有機物を CO_2 に分解除去します。

② 親水性の向上：

酸素ラジカル照射により樹脂材料の有機結合が切断され親水性を高めます。

これらの効果から、さらに「接着力の向上」も得ることができます。

５．３　超高密度大気圧プラズマユニット「Tough Plasma」について

製品ラインナップと基本仕様は表 1 のとおりです。

表 1 「Tough Plasma」の製品ラインナップと基本仕様一覧

型式			FPB20	FPE20
ﾀｲﾌﾟ			N2 標準ﾀｲﾌﾟ	N2 ﾊｲﾊﾟﾜｰﾀｲﾌﾟ
照射幅		mm	20 ｽﾎﾟｯﾄﾀｲﾌﾟはｵﾌﾟｼｮﾝ対応	20 ｽﾎﾟｯﾄﾀｲﾌﾟはｵﾌﾟｼｮﾝ対応
ﾌﾟﾛｾｽｶﾞｽ	種類		N2+Air	N2+Air
	流量	L/min	5	30+20
電源		V	AC100 (50/60Hz)	AC200 (50/60Hz)
消費電力		W	270	1550
寸法	ﾍｯﾄﾞ	mm	W60×H150×D50	W89×H198×D148
	ｺﾝﾄﾛｰﾗｰ	mm	W215.2×H178.6×D380.2	W465×H1220×D475
質量	ﾍｯﾄﾞ	kg	0.5	1.5
	ｺﾝﾄﾛｰﾗｰ	kg	11.5	112
	駆動電源	kg	1.5	

電気ダメージに弱い電子部品、耐熱温度が低い樹脂材料、複雑な形状部品において使用可能です。具体的な製品特長は以下のとおりです。

① 電気的に中性：
対象物に電気的ダメージを与えない（表面電位は±30V 以内）

② 低温処理が可能：
対象物に熱による影響が低い（30 分の連続照射でも表面温度は 100℃以下）

③ 高い処理能力：
表面改質を短時間で実現（反応性の高いラジカルによる効果が高い）

④ 対象物に合わせた最適照射：
様々なタイプのノズルを選択する事で最適照射が行えます

5．4　適用事例

大気圧プラズマの使用分野は表 2 のとおりです。

具体的適用例の紹介：

・ガラス繊維入りポリプロピレンの接着強度向上：
プラズマ処理で引っ張りせん断強度が 20 倍向上（図 1 ）

・AFC（異方性導電性フィルム）接合強度の向上：
プラズマ処理で引きはがし強度が 4 倍向上（図 2）

・アンダーフィル（集積回路の封止に用いる液状硬化性樹脂）の浸透性向上：
浸透性、充填性が向上し製品品質が安定（図 3 ）

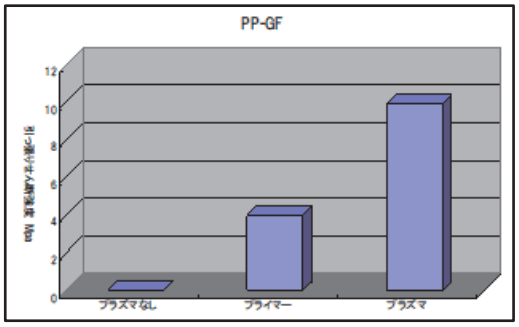


図 1　PP-GF の接着強度

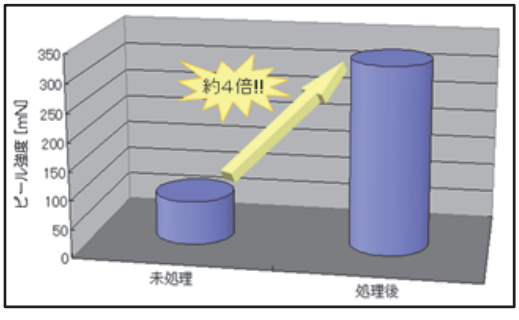


図 2　ACF 接合のピール強度

表 2　大気圧プラズマの使用分野

分野	対象物	主な用途
基板実装関連	・電子基板 ・ＦＰＣ基板 ・パッケージ基板	基板洗浄 封止樹脂接着強度向上 アンダーフィル浸透性向上
電子部品関連	・電子部品電極 ・サブストレート ・リードフレーム	接着力向上 親水性向上
ディスプレイ関連	・ＡＣＦ、ＡＣＰ接合 ・タッチパネル	接合強度向上 パターン印刷前処理
電池関連	・各種電極材料 ・セパレータ	電極の親水性向上 セパレータの親水性向上 接着力向上、密着力向上
自動車関連	・エンジン ・ドアフレーム ・外装部品、 内装部品	各種材料（金属、樹脂）の 接着力向上 接着前処理の 従来工法の置き換え 塗装前処理
メディカル関連	・カテーテル ・内視鏡 ・コンタクトレンズ	コーティング前処理 接着前処理 接着力向上、密着力向上 親水性付与
その他 各種材料	・樹脂系フィルム ・高分子材料 ・ゴム、金属	洗浄、接着力向上 親水性向上 印刷・塗装前処理 各種表面改質

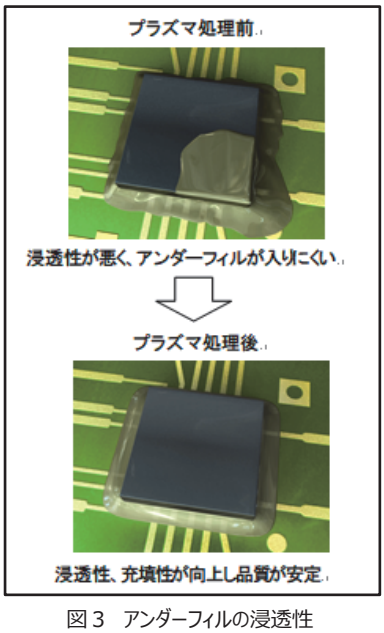


図 3　アンダーフィルの浸透性

５．５　新型ヘッドの紹介

今後は自動車・航空産業においてさらなる「軽量化」が必須とされます。この要求に対して金属材料から樹脂材料への移行が行われており、その中で樹脂の接着という要素技術が重要となりつつあります。

そのため、従来ヘッドと比較しプラズマ生成能力の向上を狙った「Type2」のヘッド開発を行っています。（図４参照）

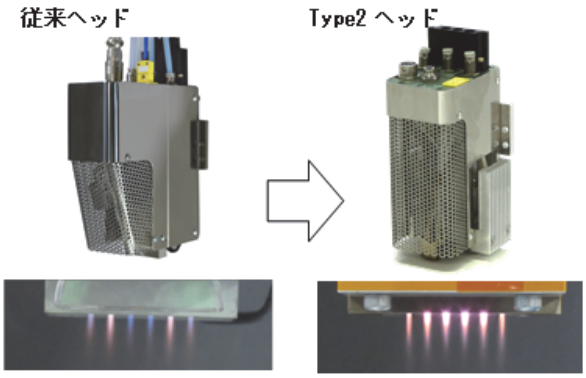


図４　従来ヘッドと Type2 ヘッド

５．６　まとめ

大気圧プラズマはラジカルによる化学反応効果を応用し以下のようなプロセスに用いられ、その用途は拡大しています。

・樹脂接着の前処理や接着強度を高めるための処理

・様々な物質の表面洗浄や表面改質

６．プラズマ式ワンショット溶解システム

６．１　プラズマ式ワンショット溶解システムとは

プラズマ式ワンショット溶解システムとは、アーク・プラズマの溶解能力とロボットの自由度を利用してシステムとして一体化したものです。このことにより、高品質要求、生産変動追従性そして省エネルギーを実現しています。

６．２　アルミダイカスト製造における従来方式とワンショット溶解システムの比較

アルミ鋳造工程における、従来方式（図１）とプラズマ式ワンショット溶解システム（図２）を比較すると表１となります。

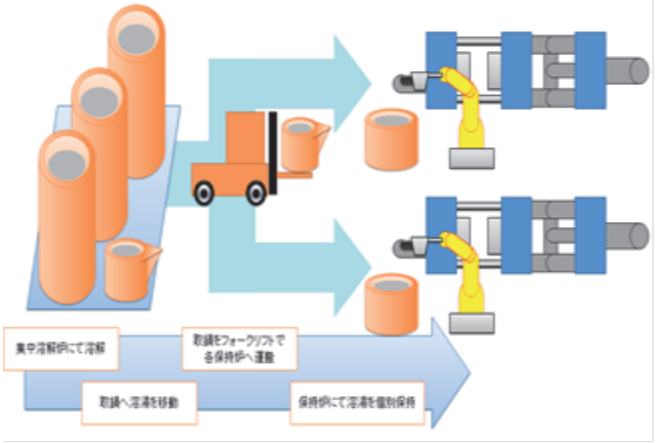


図１　従来の溶湯アルミ供給方式

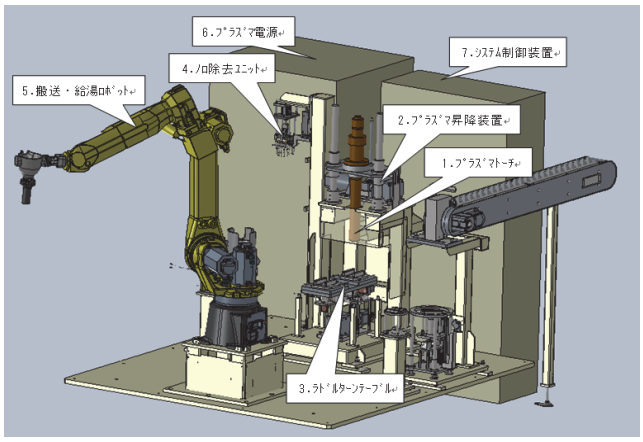


図２　プラズマ式ワンショット溶解システムの構成図

表１　比較表

項目	従来方式	プラズマ式ワンショット溶解システム
・待機エネルギー	炉を一定温度に維持する必要があり停止時でもエネルギー消費が発生する。	必要な分のアルミ材料を都度溶解するため、保持エネルギーは殆ど必要ない。
・熱効率	上記の保持エネルギーや坩堝からの排熱があり 40%程度。	保持エネルギーを必要とせず、アークが直接アルミ材料を加熱するため 60%程度。
・運搬・保持の危険度	保持炉への運搬や、溶湯の管理にはリスクが伴う。	600℃以上の溶湯の運搬・保持は必要なく、危険源は最小限となる。
・原料切替の手間	保持アルミを排出したり、材料毎に保持炉を用意する必要あり。	常温のインゴット材料の取扱いと溶解ラドルの切替のみ。
・K 値による清浄度	0.1 以下（フラックス処理で対応可能）	0.2 以下（清浄な溶湯）
・特長	大量生産に最適	多品種、少量生産に最適

連載講座　プラズマ技術とその適用分野　第１回

プラズマ技術の総論

田代　真一　（たしろ　しんいち）大阪大学　接合科学研究所　助教
田中　　学　（たなか　まなぶ）　大阪大学　接合科学研究所　教授

プラズマとは、中性粒子（原子や分子）とその一部が分かれる事で生じるイオンおよび電子が自由に飛び交う状態を指す。超高温が発生する、エネルギー密度が高い、加熱雰囲気に影響されにくい、排ガスが少ない、運転管理がしやすい、クリーンな加熱であるなどの特徴を持つので、様々な分野や製品に活用されている。本連載では、プラズマ技術の総論からプラズマ技術を活用した各種製品まで、全６回の講座でプラズマ技術に関する包括的な解説を行う。

1.　はじめに

大気圧プラズマは最高数万度にも及ぶ超高温気体であり、加熱源として種々の極めて優れた性質を有していることから、材料加工プロセスや表面処理プロセス、廃棄粒処理、ナノ粒子合成プロセス等の様々な用途で用いられている。

大気圧プラズマは、分子や原子等の中性粒子ならびにイオンから成る重粒子の温度が電子温度に匹敵するレベルにまで上昇する熱プラズマと、電子温度は高温となるが重粒子温度は最高でも数百℃程度である低温プラズマに大別される。

例えば、大気圧プラズマを熱プラズマとして材料加工プロセスに対して適用する場合、プラズマのもつ高いエネルギー密度により被加熱材料の微小面積に対して大きな入熱を施すことが可能となることに加え、プラズマを生成するための作動ガスの適切な選択により、不活性雰囲気や酸化雰囲気、還元雰囲気等を任意に選択することもできる。また、電気的に迅速なプラズマ制御を行える点も長所として挙げられる。

一方、低温プラズマとして表面処理プロセスに適用する場合、プラズマ中には高密度の重粒子と高温となった電子が存在するため、低圧プラズマと比較して非常に高密度のラジカルを生成することができる。

本連載講座では大気圧プラズマに関する技術の基礎について解説するとともに、プラズマ技術を導入した各種製品の詳細について説明し、実際の導入事例等についても併せて紹介していく予定である。ここで紹介されるプラズマ技術に関する知見が、今後の技術開発の一助となることを期待する。

連載講座第一回目となる本稿では、プラズマの基本的性質や生成方法等について述べるとともに、作動ガスが熱プラズマによる加熱に及ぼす影響についても考察し、最後にプラズマ技術の適用分野の一例についても簡単に紹介していきたい。

2.　プラズマの基本的性質

2. 1　プラズマの定義

物質はその温度が上昇していく過程で固体状態、液体状態、気体状態と次々に遷移していく。最も身近な水を例として考えると、大気圧下では沸点である100℃にて水から水蒸気、すなわち液体状態から気体状態へと遷移する。

図１は水蒸気プラズマが熱プラズマであり、後述の様に電子と重粒子が熱的及び化学的に平衡状態であることを仮定した局所熱平衡近似[1]を満足するものとして計算された、粒子組成の温度依存性である[2]。

この水蒸気を加熱していくと、2,000 K 程度までは水分子の熱速度が増加するだけであるが、これ以上の温度となると水分子間の衝突時の運動エネルギーが分子内の結合エネルギーを上回り、水分子はより小さい構成分子や原子とへと解離していく。

さらに温度が上昇すると、約 8,000 K 以上において衝突時の運動エネルギーが電離エネルギーを上回り、電離により水素原子や酸素原子のイオンならびに電子のペアが生成され、温度とともにこれが顕著に増加していくことがわかる。

この様に、気体状態からのさらなる温度上昇により得られることに加え、イオンと電子から成る荷電粒子が数多く存在するため、通常の気体状態とは異なり高い導電性を示す様になることから、プラズマは第４の状態と言われている。

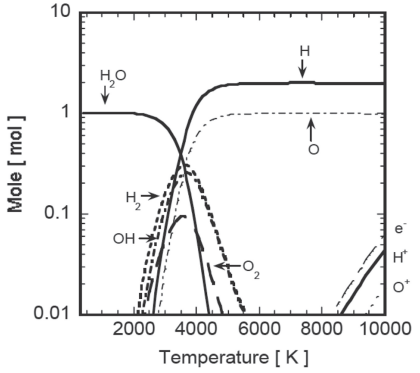


図１　水蒸気プラズマの粒子組成[2]

2. 2　熱プラズマと低温プラズマ

前述の様に、大気圧プラズマは熱プラズマと低温プラズマに大別され、いずれのプラズマの生成にも主として放電が用いられている。

放電空間に作動ガスを導入したのちに電圧を印加すると、質量の小さい電子が電圧によって加速された後、電子間のクーロン衝突を介して電子温度が上昇していく。ここで、電子密度が高い場合、電子は重粒子と高頻度で衝突し、重粒子にも十分にエネルギーを伝達するため、プラズマ中では電子及び重粒子はともに等しい温度となり、化学的にも平衡状態に達する。これを熱プラズマまたは熱平衡プラズマといい、局所的に熱平衡が保たれているという意味で、局所熱平衡プラズマ（Local Thermodynamic Equilibrium plasma）とも呼ばれている。熱プラズマは重粒子の数密度及び温度が高いためエンタルピーが大きく、材料物質の加熱に非常に適している。

一方、低温プラズマは非平衡プラズマとも呼ばれている。一般的に低圧下で生成されるプラズマの場合、電子及び重粒子の数密度が低く、双方の衝突を介したエネルギー伝達が不十分なため、電子温度だけは非常に高いが重粒子は低温のままである非平衡プラズマとなることが知られている。定常的な放電により大気圧プラズマを生成すると、電子温度と重粒子温度が一致する熱プラズマとなり易いが、後述の様に電圧を間欠的にパルス状に印加する等の工夫を施すことにより、電子のみを選択的に加熱することができ、低圧下の様に低温プラズマを得ることが可能となる。この低温プラズマは大気圧下のため高密度のラジカルを生成できる他、重粒子温度が低いため被処理物への熱的ダメージを低減することができる。

3.　プラズマの生成

前章ではプラズマの定義及び大気圧プラズマの分類について述べた。気体からプラズマを生成するためには種々の方法があるが、多くの場合放電が利用されている。宇宙線等の影響により、室温の大気中においても通常 10～20 個 /cm^3/s 程度の荷電粒子のペアが電離により自然発生している。これらを電磁場の印加を通じて加速し、中性粒子を電離することにより、放電を形成することができる。本章ではそれらの中から代表的な幾つかの方法について簡単に紹介する。

3. 1　直流放電

放電空間に直流電圧を印加することによるプラズマ生成方法である。被加熱材料を陽極とすることにより、電流中の電子が陽極に流入する際に持ち込まれる電子エンタルピーや凝縮熱等も利用でき、効率的な加熱が可能である。最も簡単な方法であり装置や運用技術が確立していること、設備費用が廉価であること、プロセスの高出力化が容易であることなどの利点があり、非常に多くのプロセスに用いられている。

3. 2　高周波放電

高周波放電は無電極放電の一種であり、プラズマが直接電極に接触しないため、電極物質が蒸発等により不純物としてプラズマ中に混入しないという利点があり、化学反応用やナノ粒子合成用等の熱源として広く用いられている。

高周波放電によるプラズマは容量結合プラズマ及び誘導結合プラズマに大別される。容量結合プラズマでは放電容器外側に配置された電極間の電界により、誘導結合プラズマでは容器外側に巻きつけられたソレノイドコイルの作り出す電磁誘導電界により、容器内で衝突電離が生じ放電が維持される。周波数には通常 RF と呼ばれる 13.56 MHz が使用される。

3. 3　マイクロ波放電

300 MHz 以上のマイクロ波を利用し、空洞共振器を用いてマイクロ波の定在波領域にプラズマを生成することによる放電であり、低温プラズマの生成に適している。

3. 4　誘電体バリア放電

無声放電とも呼ばれる。金属電極の表面に誘電体板をバリアとして配置し、交流高電圧を印加するもので、ナノ秒オーダーのストリーマを繰り返し発生させることで、大気圧においても重粒子温度の上昇の抑制した低温プラズマの発生が可能となる。

4.　作動ガスが熱プラズマによる加熱に及ぼす影響

熱プラズマによる材料加工プロセスにおいて、加熱の大部分は高温となった重粒子からの熱伝導により賄われている。前述の様に、熱プラズマは重粒子の数密度及び温度が高いことからエネルギー密度が高く、この特徴を生かして材料加工プロセス用の熱源として広く用いられている。このエネルギー密度は用いる作動ガスの熱力学輸送特性に強く依存する。

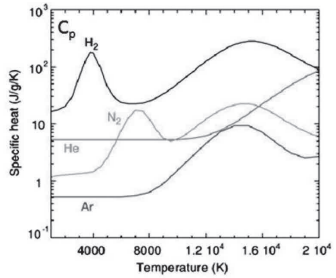
熱力学輸送特性は熱力学特性と輸送特性から成る。熱力学特性とは熱や物質の巨視的性質を扱う物理量であり、質量密度、比熱、エンタルピー等がこれに相当する。一方、輸送特性とは分子衝突を通じた物理量の輸送現象の総称であり、例えば質量、運動量、エネルギー、電荷がそれらの空間勾配に比例して輸送される時、その比例係数は拡散係数、粘性率、熱伝導率、電気伝導率で定義される。

最も一般的な直流放電によって熱プラズマが生成される場合を例にとって考えてみる。放電電流が流れる時、作動ガスのもつ電気伝導率に応じてジュール加熱が生じる。発生した熱は比熱に応じてプラズマ温度を上昇させるとともに、一部は熱伝導率に応じて周囲に拡散する。

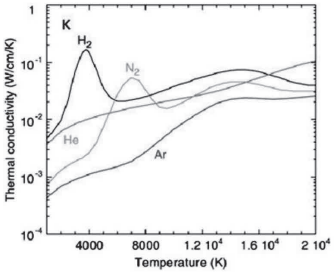
ここでは、材料加工プロセスに一般的に用いられているアルゴン、ヘリウム、水素、窒素を作動ガスとした場合の、基本的な熱力学輸送特性を比較し、それらが熱プラズマの温度分布やエネルギー密度に及ぼす影響について、数値シミュレーションにより検討した一例を紹介したい[3]。

図 2 にアルゴン、ヘリウム、水素、窒素の熱力学輸送特性の一例として、比熱（Cp）、熱伝導率（κ）、電気伝導率（σ）の温度依存性を示す。

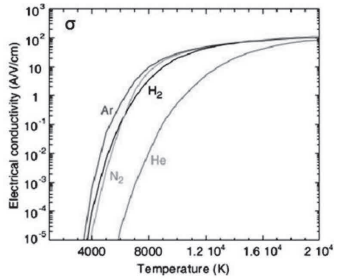
まず比熱に注目すると、各ガスとも温度が上昇していく過程で幾つかのピークがみられるが、これらは分子の解離ならびに分子や原子、イオンの電離に要するエネルギーを表している。多原子分子である水素や窒素の場合、5,000 K 前後においてこの解離によるピークが生じるため、低温域での比熱が高くなる。また、



(a)　比熱



(b)　熱伝導率



(c)　電気伝導率

図 2　各種熱力学輸送特性

10,000 K 以上で生じるピークは電離によるもので、電離エネルギーの大きいヘリウムの場合、低温域では電離度が低くピークの生じる温度は 20,000 K 以上と高温になる。

次に熱伝導率を見ると、特に電離度が低い低温域では、質量の小さいガスほど熱速度が大きく、熱伝導率が高くなることがわかる。また、熱伝導率においても比熱と同じ温度でピークがみられるが、これは、解離や電離が生じると、そのエネルギーが拡散によって輸送され、見かけ上の熱伝導率が大きくなるためである。

電気伝導率では、ヘリウムを除いた各ガスはほぼ同程度の大きさをもつことが確認できる。この電気伝導率は電子密度と密接な関係があり、ヘリウムは上述の様に他のガスと比較して高い温度でのみ電離が生じるため、電気伝導率は特に低温で非常に低い値となる。

続いて、これらの作動ガスの違いが熱プラズマの温度やエネルギー密度の分布に及ぼす影響について述べる。ここでは、タングステンを陰極、被溶接材料を陽極としたガスタングステンアーク溶接を例に取って検討する。電流値は直流 150 A とし、電極間距離は 5 mm とした。また、タングステン陰極の先端角度は 60 度、被溶接材料は簡単のため水冷された銅板としている。

図 3 に各作動ガスを使用した際の熱プラズマの温度分布（右図）及び流速分布（左図）を示す。アルゴンを基準として他の作動ガスの場合と比較していく。アルゴンでは、電圧、熱プラズマの最高温度及び最大流速及び陽極表面の最高温度はそれぞれ 10.8 V、17,000 K、217 m/s 及び 600 K となった。上記の熱プラズマの最高温度及び最大流速は、局所的なジュール加熱量とローレンツ力の大きさに依存し、熱プラズマ中での電流密度の大きさに強い影響を受けている。

これに対して、他のガスではこれらはすべて高い値となることがわかる。なかでも水素は特に大きく、電圧は 35.5 V、熱プラズマの最高温度及び最大流速は 27,000 K 及び 4,332 m/s に達している。また、陽極表面温度は最高 2,500 K に及び、その一部が融解してい

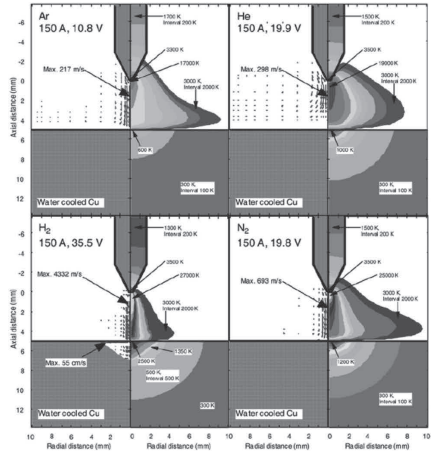


図 3　熱プラズマ温度分布及び流速分布

る。一方、ヘリウム及び窒素の値はアルゴン及び水素の中間的なものとなっている。

また、**図 2** に示される様に、ヘリウムは比熱が小さい一方で熱伝導率が高いため、周囲空間へと熱が輸送され易く、熱プラズマのフレームは丸みを帯びた形状となっている。一方、水素は後述する様に高い比熱に起因した熱的ピンチ効果の影響が大きく、熱プラズマは中心軸付近に緊縮する。

図 4 に陽極への熱流束分布及び全入熱量を示す。アルゴンの熱流束及び全入熱量は、他のガスのものと比較して低いことがわかる。ヘリウム及び窒素における陽極への全入熱量は、アルゴンと比較して 2 倍となり、水素では約 4 倍となる。これはアルゴンに比べて電圧が高いことから投入電力が増加し、陽極へ輸送される熱量が多くなるためと考えられる。これに対して、ヘリウム及び窒素の熱流束は、中心軸上でアルゴンの約 3.5 倍となり、水素アークでは約 8 倍となる。これは全入熱量の変化分を考慮すると、入熱が中心軸近に集中していることを示唆している。

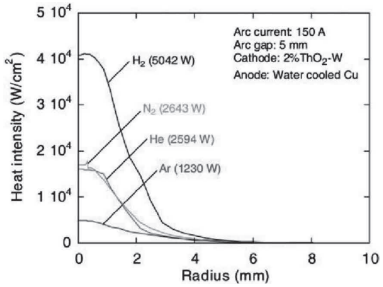


図 4　陽極への熱流束分布及び全入熱量

特に電離の生じにくい低温域において、ヘリウムの電気伝導率はアルゴンと比較して著しく低い値となる。このため、ヘリウムでは電流経路は電気伝導率の高い高温域に制限され、中心軸上において電流密度が増加した結果、熱流束が高くなったものと考えられる。

一方、水素及び窒素の熱流束の増加は、熱的ピンチ効果により生じる、熱プラズマの緊縮に起因するものと推測される[4]。熱プラズマの中心軸付近では陰極から陽極へと向かうプラズマ流が存在し、これにより生じる熱流束は、熱の通過断面上における、質量密度とエンタルピー（$=\int c_p dT$）の積についての面積分値に概ね比例する。**図 2** に示される様に水素及び窒素の比熱はアルゴンと比較して大きくエンタルピーは大幅に増加するため、この通過断面積は小さくなり、熱

プラズマは緊縮し中心軸付近での熱流束が増加することとなる。

以上の様に、作動ガスのもつ熱力学輸送特性の違いを理解することにより、材料加工プロセスにおいて重要な熱プラズマのエネルギー密度等の特性を制御し得ることがわかる。

5. プラズマ技術の適用分野の一例

プラズマ技術の適用分野は多岐に渡る。ここではそれらの一例を簡単に紹介していく。具体的な各種製品の詳細や実際の導入事例等については連載講座二回目以降に譲る。

5. 1 加熱・融解プロセス

熱プラズマによる材料の加熱・融解プロセスには、直流放電または低周波数の多相交流放電等が用いられる。多相交流放電では放電空間周囲に多数の電極を等間隔で配置し、これらの間で交流放電を発生させることにより、体積が大きく均一性の高い熱プラズマを生成することができる[5]。

一般的に加熱源として用いられているガス炎等と比較した場合、熱プラズマは高温であるため高速での処理が可能である。また、熱の利用効率が高いため省エネ・省コストであり、また作動ガスの選択により酸化物を生じないクリーンな加熱・融解も可能という長所ももつ。

鋳造において金属材料の融液を搬送するために用いられる耐火容器の加熱や金属材料の融解に用いられる他、均一性の高い組成を得ることが可能なガラスの気相融解、有害物質の分解が可能な廃棄物処理等、用途は多岐にわたる。

5. 2 溶接プロセス

熱プラズマを用いた溶接プロセスでは、金属同士を融解し一体化させることで溶接を行う。溶接の際には溶接材料と呼ばれる添加材料を連続的に供給し、この融液が母材（被溶接材料）の融液と一体となって凝固することで溶接金属が形成される。熱プラズマの生成には主に直流放電が用いられ、電極の種類により溶極式と非溶極式に大別される[6]。

溶極式では溶接ワイヤ（溶接材料）を陽極、母材を陰極として用いる。また、3.1で述べた様に直流放電の陽極側では、熱プラズマからの熱伝導に加え電子流入に起因した付加的な加熱が生じるため、これを利用して溶接ワイヤを融解し、母材の融液に移行させることにより溶接を行う。溶極式は高能率な溶接が可能な点に加え、構造が単純で自動化・ロボット化に適しているという長所ももつ。

非溶極式では、一般的に高融点物質であるタングステンを陰極、母材を陽極として用いる。母材の融液にフィラーワイヤ（溶接材料）を直接挿入し溶接を行う。熱プラズマによる母材の融解と、フィラーワイヤの送給とを独立制御できることから、熱プラズマの安定性を確保しやすく、極めて高い溶接品質を実現できるが、能率は溶極式と比較して低くなる。

5. 3 切断プロセス

プラズマ切断プロセスでは、電極を陰極とし被切断材料を陽極とした直流放電により熱プラズマを生成する。電極の前面には水冷された銅製の拘束ノズルが配置され、熱プラズマの断面積を絞り込んで高エネルギー密度化するとともに流速を高速化することができる。この高エネルギー密度・高速の熱プラズマ流を吹き付けることにより、被切断材料を融解させるとともにその融液を吹き飛ばし切断する方法である[6]。

作動ガスとして酸素を用いることにより、被切断材料の燃焼効果も利用して加熱を促進することができる。これは被切断材料が鉄の様に酸化により融点が低下する場合にのみ有効であり、アルミニウムやステンレス鋼の様に高融点の酸化物が生成される場合には適用できないため、この場合には作動ガスとして窒素やアルゴン、水素等が用いられる。

5. 4 ナノ粒子合成プロセス

ナノ粒子合成プロセスでは熱プラズマの生成に主として高周波放電や直流放電が用いられる。高周波放電は設備が高価ではあるが、前述の様に不純物の混入が少ないことに加え、最大で直径10 cm 程度にも及ぶ大体積の熱プラズマを生成することが可能である。また、プラズマ流速が直流放電と比較して１桁程度低いことから、プラズマ内でナノ粒子の原料物質に対して十分な加熱時間を確保し、蒸気化することができる[7]。

熱プラズマ中でのナノ粒子合成プロセスでは、核生成に始まり、凝縮、ナノ粒子間の凝集と続く一連の現象が極めて短時間（ミリ秒オーダー）で進行するため制御が難しく、現在大量合成の実現を目指した研究開発が盛んに行われている。

5. 5 表面処理プロセス

表面処理プロセスにはマイクロ波放電や誘電体バリア放電により生成される低温プラズマが用いられる[8]。

大気圧下で低温プラズマを発生させることにより反応性の高いラジカルを高密度に生成でき、熱に弱い樹脂等の素材の変質を起こすことなく、表面の洗浄や改質等を行うことができる。表面の洗浄により濡れ性が向上し、部材間の接合強度を向上させることができるほか、コーティング・塗装をはがれにくくすることも可能である。

6. おわりに

本稿ではプラズマの基本的性質や生成方法等について述べるとともに、作動ガスが熱プラズマによる加熱に及ぼす影響についても考察し、最後にプラズマ技術の適用分野の一例についても簡単に紹介した。

連載講座第二回目以降では、ここで紹介したプラズマ技術を導入した各種製品の詳細について説明するとともに、実際の導入事例等についても併せて紹介していく予定である。

参考文献

1） M. I. Boulos, P. Fauchais and E. Pfender: Thermal plasmas : fundamentals and applications, New York, Plenum (1994)

2） T. Watanabe, T. Tsuru, and A. Takeuchi: Water Plasma Generation under Atmospheric Pressure for Effective CFC Destruction, Proc. 17th Inter. Symp. Plasma Chem., Paper ID:399 (2005).

3） M. Tanaka, S. Tashiro, T. Satoh, A. B. Murphy and J. J. Lowke : Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.13, p.225 (2008)

4） 田中　学，田代真一：溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察，溶接学会論文集，Vol.25，p.337（2007）

5） T. Watanabe, Y. Liu, and M. Tanaka: Investigation of Electrode Phenomena In An Innovative Thermal Plasma for Glass Melting, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.34, p.443 (2014)

6） 溶接学会：新版溶接・接合技術入，産報出版（2008）

7） N. Kodama, Y. Tanaka, K. Kita, Y. Uesugi, T. Ishijima, S. Watanabe and K. Nakamura: A method for large-scale synthesis of Al-doped TiO2 nanopowder using pulse-modulated induction thermal plasmas with time-controlled feedstock feeding, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.47, 195304, (2014)

8） Claire Tendero, Christelle Tixier, Pascal Tristant, Jean Desmaison: Atmospheric pressure plasmas, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Vol. 61, p.2 (2006)

連載講座　プラズマ技術とその適用分野　第２回

鋳造工場におけるアーク式取鍋加熱装置の導入事例

永田　雄大　（ながた ゆうだい）特殊電極株式会社 環境技術室

プラズマとは、中性粒子（原子や分子）とその一部が分かれる事で生じるイオンおよび電子が自由に飛び交う状態を指す。超高温が発生する、エネルギー密度が高い、加熱雰囲気に影響されにくい、排ガスが少ない、運転管理がしやすい、クリーンな加熱であるなどの特徴を持つので、様々な分野や製品に活用されている。本連載では、プラズマ技術の総論からプラズマ技術を活用した各種製品まで、全６回の講座でプラズマ技術に関する包括的な解説を行う。

1.　はじめに

鋳造工場では、**図１**のように金属を溶かす溶解炉から鋳型を造る造型ラインへ「取鍋（とりべ）」と呼ばれる耐火容器を用い溶湯を運搬し、鋳型に溶けた金属を流し込む注湯の工程を経て、製品（鋳物）を造っている。この際取鍋は溶湯搬送時の溶湯の温度低下を防ぐため、溶湯を注ぐ前に内部を予熱する必要がある。しかしながら一連の鋳造プロセスの中で、取鍋の予熱は**図２**に示すようにエネルギーコストが比較的高いにもかかわらず、熱効率が低い。

取鍋の予熱は、通常ガスバーナーが用いられるが、有効熱量の割合は８%に留まり、特に排気による熱損失が85%と大きく、膨大なエネルギーロスと予熱作業の長時間化が課題となっていた。さらにこの排熱によって取鍋の周辺温度が60℃以上の高温になることや予熱時の騒音など作業環境悪化の一因になっていた。また、ガスバーナーによる加熱では取鍋内部にノロと呼ばれる酸化物（廃棄物）が付着し、定期的な除去作業が必要であり、保全コスト増加の原因となっている。これらの課題を**図３**にまとめて示す。

これらの課題を解決するため、各種加熱方式の中で熱源温度が最も高く、加熱性能や温度制御性で優位性が見込まれるアーク加熱を選定し、トヨタ自動車株式会社殿、中部電力株式会社殿、特殊電極株式会社により「アーク式取鍋加熱装置」を共同開発した。

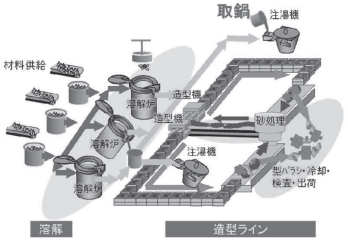


図１　取鍋使用状況概略図

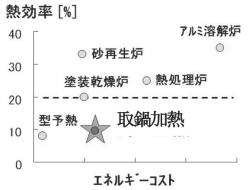


図２　鋳造工場におけるエネルギー使用状況

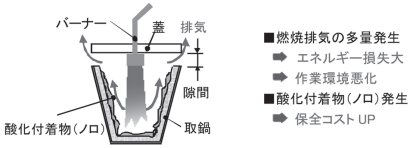


図３　ガスバーナー加熱の課題

2.　アーク式取鍋加熱装置概要

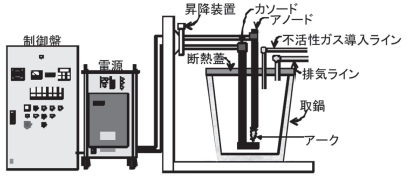
2. 1　装置概要

アーク式取鍋加熱装置の概略図を**図４**に示す。

本装置は電源・昇降装置・断熱蓋・不活性ガス（アルゴンガス）導入ライン・排気ラインで構成される。取鍋設置後に昇降装置と一体になっている断熱蓋と電極（アノードおよびカソード）が所定の位置まで下降した後にアークが発生する。

アークは、アノードおよびカソード間に電圧を印加することで発生し、中心温度は5000℃以上まで上昇する。この放射熱および対流伝熱により取鍋内部の耐火物を加熱する。

従来のガスバーナー式に対する本アーク式の効果を2.2～2.4に示す。



項目	テスト機の仕様
電源	3相200V／210A
定格出力	61kW
電極	カーボン　φ80×1800mm
ユーティリティ	電気、不活性ガス
加熱能力	800℃／h（at 300kg取鍋）

図４　アーク式取鍋加熱装置概略図

2. 2　省エネルギー効果

本アーク式と従来のガスバーナー式で加熱した際の温度データおよび熱収支比較を**図５**に示す。

加熱はアーク式とガスバーナー式で同等の温度まで同等の時間で実施した。結果、熱収支はガスバーナー式では排気損失の割合が86%となり、取鍋耐火物の加熱に要する熱量の割合が8% に留まった。これに対しアーク式では、熱源温度が高いことや断熱蓋の設置による効果で排気損失の割合が7% に抑えられ、有効熱量の割合は67% に達した。

また、**図５**の試験では、加熱能力の大きいアーク式においてはガスバーナー式と同時間での加熱とするために、ON ／ OFF 制御をあえて実施しており、アーク式で連続運転を行えば、更に加熱時間を短縮することが可能な結果となった。**図６**は ON ／ OFF 制御を実施せずに加熱した際のアーク式とガスバーナー式の加熱時間の比較を実施した結果であるが、大幅な加熱時間の短縮が実現可能と判る。

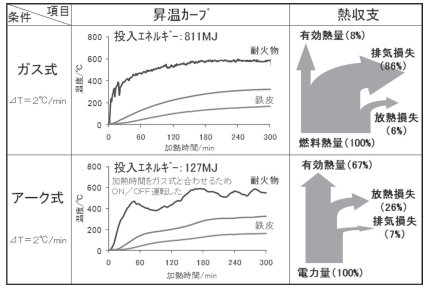


図５　温度データ及び熱収支比較

2. 3　作業環境改善効果

断熱蓋の効果により、ガスバーナー加熱のような化石燃料の燃焼に伴う排気を工場内に放出しないことから、取鍋周辺の温度上昇および騒音が抑えられた。取鍋予熱時の周辺１m の距離で、雰囲気温度と騒音値を測定したところ、**図７**に示すように、ガスバーナー式に対して各々30℃と30dB低下する結果が得られた。

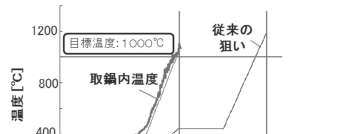


図６　加熱時間の短縮効果

2. 4　酸化物の低減

アーク式ではほぼ密閉状態での加熱が可能で、取鍋内部への酸素供給が少ないことから、内部に残留する

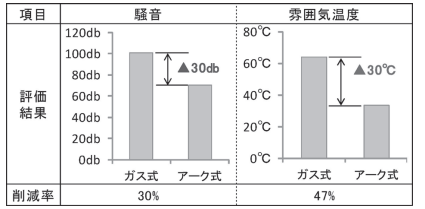


図７　作業環境改善効果

鉄の酸化を防ぎ、ノロと呼ばれる酸化物（廃棄物）の生成を抑制できると考えられる。そこで**図 8** に示す通り取鍋内部に鉄のテストピースを設置し、ガス式とアーク式で取鍋を加熱した際の重量変化および、酸化物の膜厚測定を実施した。

その結果、**図 9** に示す通りテストピースの酸化物の膜厚が、ガス式の 400 μm に対しアーク式は 130 μm となった。また、加熱後の重量変化から想定される酸化物生成量はガス式に対し 69% 抑制できた。

これらの評価結果より、ノロの除去作業頻度低下による保全コストの低減も可能と想定される。

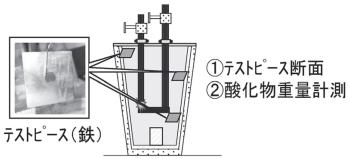


図 8　酸化物生成の定量試験方法

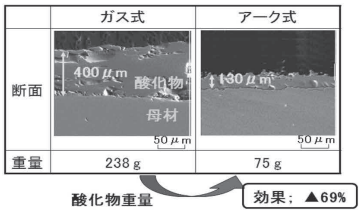


図 9　ノロの抑制効果

3.　導入事例

3. 1　アイシン高丘㈱殿 2,200 kg 取鍋の予熱事例

アーク式を採用後、電圧・電流の制御やアーク発生位置の適正化により加熱時間の短縮とエネルギーロス低減を実現した。**図 10、11** に示すように加熱時間は従来の 540 分から 240 分にまで、56% の短縮を達成することができた。有効熱量においては従来の 8% から 67% にまで向上させることができた。エネルギー消費量は一次エネルギー換算で 75% の低減を実現できた。

また、作業環境に関しては、騒音、作業環境雰囲気温度の改善、および CO_2 排出量の削減効果が確認された。

3. 2　トヨタ自動車（株）殿 100 kg 取鍋の乾燥

アーク式の採用により、**図 12** に示すように加熱時間を 42% 短縮し、有効熱量においては従来の 13% から 70% まで向上させることができた。エネルギー消費量は一次エネルギー換算で 89% の低減を実現できた。

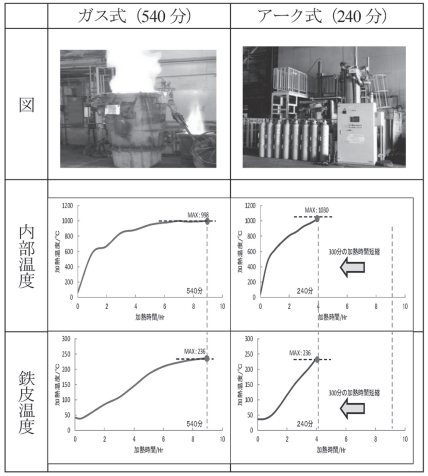


図 10　ガス式とアーク式の比較

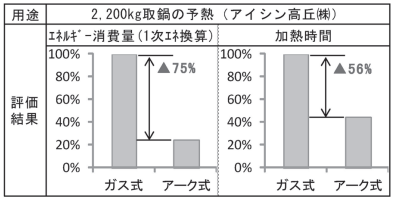


図 11　アーク式導入による省エネ効果（予熱）

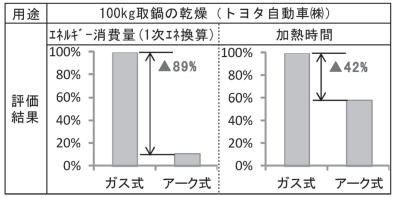
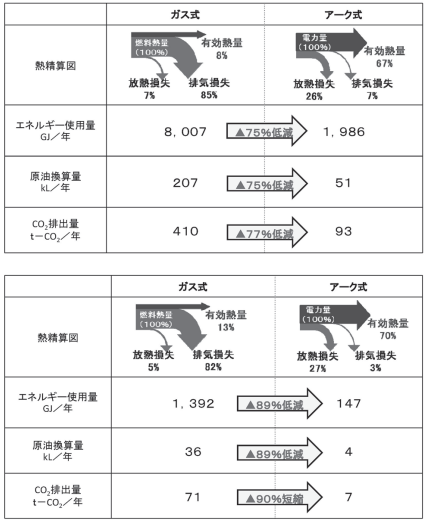


図 12　アーク式導入による省エネ効果（乾燥）

4.　まとめ

ガス式からアーク式に変更することによるエネルギー低減率や CO_2 排出量低減率等は、取鍋の使用環境や、取鍋サイズ・形状等により変動するが、本導入事例では、**図 13** に示すようにアイシン高丘（株）殿



※1）発熱量換算係数：都市ガス 46. 04655MJ/m3、電気 9. 97MJ/kWh

※2）CO_2 換算係数　：都市ガス 2. 36kg-CO_2/m3、電気 0. 469t-CO_2/kWh

図 13　導入前後のエネルギー

の 2,200 kg 取鍋においてはエネルギー使用量が従来のガスバーナーに比べ、75% 低減、更に CO_2 排出量が 77% 減少する効果が得られた。

トヨタ自動車（株）殿の 100 kg 取鍋ではエネルギー使用量は 89% 低減、CO_2 排出量も 90% 減少する効果が得られた。

5.　おわりに

本アーク式取鍋加熱装置導入における省エネルギー、省 CO_2 効果が確認された。また作業環境の改善や保全コストの削減も見込まれる結果も得ることができた。

現在本装置は、基本的に最大 2,200 kg までの取鍋に適応可能となっている。今後は、本装置の更なる展開により、省エネルギーや作業環境の改善等に貢献していきたい。

6.　謝辞

本装置を開発するに当たり、開発を共に推進いただいた、トヨタ自動車株式会社様および中部電力株式会社様に厚く御礼致しますと共に、導入事例をご紹介いただいたアイシン高丘株式会社様に深い謝辞を表明致します。

プラズマ溶接機

上園　敏郎　（うえぞの としろう）ダイヘン溶接メカトロシステム株式会社 技術営業部 部長

プラズマとは、中性粒子（原子や分子）とその一部が分かれる事で生じるイオンおよび電子が自由に飛び交う状態を指す。超高温が発生する、エネルギー密度が高い、加熱雰囲気に影響されにくい、排ガスが少ない、運転管理がしやすい、クリーンな加熱であるなどの特徴を持つので、様々な分野や製品に活用されている。本連載では、プラズマ技術の総論からプラズマ技術を活用した各種製品まで、全６回の講座でプラズマ技術に関する包括的な解説を行う。

1.　はじめに

熱プラズマを用いた溶接プロセスは、溶接箇所を加熱して溶融させ液体金属状態にし、それが冷却されて固体の金属になると接合が完了する。この時、直流放電する電極自体が、溶接中に連続的に溶融し、溶接金属を補充するように供給される溶極式と、溶接中は電極がほとんど溶融しない非溶極式の２種類に大別される。溶極式は電極が溶接対象物とほぼ同じ金属成分で、連続供給可能なワイヤの形状をしており、溶接中はワイヤをモータにより連続で供給している。一方、非溶極式は、数千度にもなる熱プラズマの近傍においても電極が溶融しない特別な電極が使用される。非溶極式の放電電極は、タングステンを主成分とし、これを電極がマイナス極性になるように接続して使用する。そうすると、電極が電子を放出する極性になり、電子を放出すると電極表面を冷却する作用が生じるため、高温化でも電極が溶融しない状態が得られる。1）

2.　非溶極式におけるプラズマ溶接の特徴

非溶極式の溶接プロセスにも種類があり、今回紹介するプラズマ溶接と Tungsten Inert Gas 溶接（以下 TIG 溶接とよぶ）が代表的である。**図１**にプラズマ溶接と TIG 溶接の違いを示す。いずれもタングステンを用い、電極がマイナス極性になるよう接続して使用する点は同じであるが、タングステンの電極を覆うノズルの構成に違いがある。プラズマ溶接は、タングステン電極の周りにプラズマの通り道となる細い穴の開いた水冷銅のノズルが配置され、更にその周りを囲うように、溶接中に液化する金属部を大気から遮蔽保護するシールドガスを流すためのノズルが備えられている。これに対して TIG 溶接は、タングステン電極の周りはシールドガスを流すためのノズルのみである。TIG 溶接では放電が起きるとタングステン電極から釣鐘型の放電形状となり、溶接物に接する部分は末広がりの熱分布を持つことになる。それに対してプラズマ溶接は、細い穴の開いた水冷銅のノズルを通過する際、プラズマが集中拘束されて、広がらない真っ直ぐに近い形状になる。この熱プラズマの形状の違いが、プラズマ溶接がもつ集中した熱源による深溶け込みの特徴を生むこととなる。

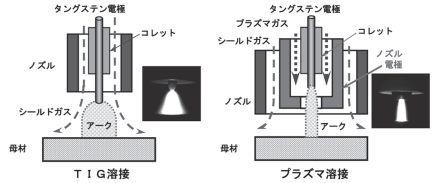


図１　ＴＩＧ溶接とプラズマ溶接の原理

図２に溶接部との距離を徐々に遠ざけた時の溶込み深さの違いについて示す。TIG 溶接は、放電の形状が釣鐘型で末広がりである。そのため距離が長くなると溶接部と接する裾野部分が更に広がる。すると、高温の熱プラズマも分散することで、溶接物に接する部分の金属を溶融させる温度に到達する範囲は逆に狭くなる。これが**図２**の８mm の距離まで遠ざけた場合に TIG 溶接の溶込み深さが浅くなる理由である。一方プラズマ溶接は、絞られたプラズマ形状であるが故に、距離が多少遠ざかっても広がらず溶接部まで到達するため、溶込み深さが維持される。

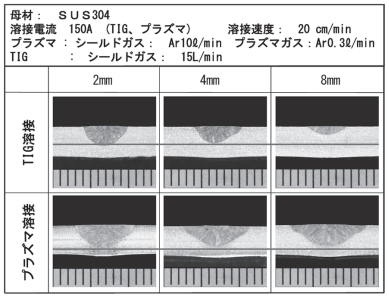


図２　ＴＩＧ溶接とプラズマ溶接の溶込の比較

3.　ダイヘン製プラズマ溶接機の特徴

図３に最新のダイヘン製プラズマ溶接電源であるウェルビーインバータ溶接電源 F300P と、独自の２重ノズル構造で、自動溶接にとって重要な長時間の安定稼働が可能なプラズマ溶接トーチの外観を示す。溶接電源 F300P は、ダイヘンが溶接電源用途に特化して設計した専用 CPU である Welbee を搭載した最新型のプラズマ溶接電源である。この溶接電源の主な特徴を**表１**に示す。プラズマ溶接電源は溶接対象物が薄い金属であるか、厚い金属であるかに応じて、使用する電流範囲が大きく異なる。そのため従来電源は、使用電流範囲を３つに分けてそれぞれを異なる容量の電源でカバーしていたが、最新の溶接電源は 0.5Ａ～300Ａまでの広範囲を１台でカバーできる高性能な電源である。熱プラズマを発生させる溶接トーチは使用したい電流によって選定し接続するが、溶接電源はトーチが接続されると種類を自動で認識し、トーチの種類に合わせた定格電流に自動設定するなど利便性が向上している。プラズマ溶接にとって溶接結果に与える影響が大きいガス流量の調整は、アナログのフローメータ方式から、デジタルで設定可能な高性能なマスフローを２つ搭載して制御管理できるようになっているなど、様々な特徴を備えている。

図３　ＴＩＧ溶接とプラズマ溶接の原理

表１　ＴＩＧ溶接とプラズマ溶接の原理

	従来電源	Welbee Inverter F300P	特徴
出力電流範囲	3機種でカバー 0.5～15A 10～135A 10～200A	1機種で全対応可能 0.5～300A	最大電流も200Aから300Aまで拡大。従来、電安法対象の15A機は対象外となり通常の溶接電源と同様の扱い。
トーチ自動認識と接続端子	自動認識なしトーチ電源ごとの接続	自動認識対応トーチ共通接続	トーチの最大電流に電源の出力を自動制限。トーチ損傷を防ぐ新機能。
ガス流量調整	アナログ式	デジタル式	正確な流量管理とガス不足の検知とエラー表示。
フィラ制御装置	外付け別置き	電源内臓式（オプションで追加）	コンパクト設置に可能。

プラズマ溶接は、熱プラズマをトーチの内部に備えたノズルにより絞る仕組みであることは先ほど述べた。プラズマ溶接トーチは溶接性能を決める最も大きな要素であるため、ダイヘンでは一般的な１重ノズルと独自の２重ノズルの２種類を用意している。この構造を**図４**示す。これらの一般的な使い分けは、１重ノズルは比較的構造が簡単な分、構成部品を熱に耐えられるサイズにし、高電流で使用することを主な目的とする。２重ノズルは構造が複雑な分、高電流に対応できないが、内部に配置されたタングステン電極を保護する能力が高い為、より長時間の溶接や、外部からタングステン電極を消耗させやすい材質の溶接に用いることが出来る。この２重ノズルの優位点を示すために、自動車の防錆鋼板として用いられている合金化溶融亜鉛めっき鋼板を用いて 30 分間繰り返し溶接した後の状態を**図５**に示す。このような亜鉛めっき鋼板を溶接すると、２重ノズルでは、その名のとおり２重のノズルに守られているため、最奥のタングステン電極までめっきの蒸気が侵入しにくく、30 分経過しても電極にはめっきの付着や消耗、変形は生じておらず、溶接ビードも安定状態を維持していることがわかる。これに対し図示はしていないが一般的な１重ノズルの場合、多量に発生しためっきが蒸気の一部がトーチ内部にまで侵入して、タングステン電極に付着堆積し、消

耗、変形を引き起こし、電極寿命を大幅に短くしてしまう。

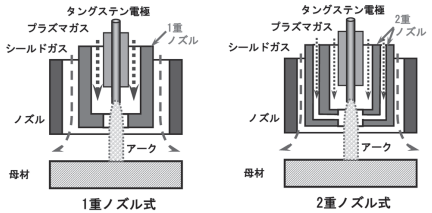


図４　１重ノズルと２重ノズルのトーチ構造の違い

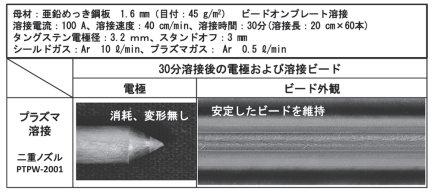


図５　亜鉛めっき鋼板溶接における２重ノズルの効果

4.　プラズマ溶接の適用事例

プラズマ溶接は集中した熱源であり、狭く深い溶込み形状が得られる。プラズマ溶接の主な適用分野を**表２**に示す。自動車分野では、板厚の違う鋼板を接合して後にプレス成型するためのテーラードブランク材の溶接や、エンジンの吸排気系のパイプ、マフラーの構成品を製作するときに多用されている。製管分野では円柱や角柱のパイプ製作するにあたり、機械的に丸めたり、折り曲げ、目的の形状を先に作り、最後につなぎ目を接合するために用いられている。その他、家庭で使用する製品は、各種容器の溶接や、ナイフや包丁の柄と刃の溶接、医療機器分野では注射針の溶接にも使われている。

表２　プラズマ溶接の主な適用分野

自動車、車両分野
触媒マフラー、マニホールド、テーラードブランク、気化器、
ピストンロッド、カーエアコン用バルブ部品、圧力センサー、
電気自動車用モータコア、電気自動車用コイル部品端子接続（銅）
計測器部品、ブレーキなど
製管分野
シームパイプ、管同士の接合など
家庭用品
魔法瓶、温水タンク、缶、ナイフ、洋包丁、冷蔵庫（コンプレッサ）など
医療機器
注射器、温度計部品など

図６は実際に用いられている溶接サンプルの例である。ステンレス容器は厚さ0.35 mm で、容器の胴体と底の溶接をしている。形状に歪みが生じると製品にならないが、プラズマ溶接を用いる事で、集中した熱源で必要な溶込みを確保しつつ、溶接速度を速めて単位長さあたりの入熱を抑え、溶接後の歪みを低減している。次にベローズの溶接である。ベローズは液体や気体等を扱う配管系における蛇腹構造を持った伸縮管で、伸縮するために非常に薄い鋼板が使用される。今回の例は伸縮部の厚さは0.1 mm である。この蛇腹部分に厚さ1.5 mm の端部を接合して製品形状になるが、両者の板厚の差が大きく大変難しい溶接である。プラズマ溶接は集中した熱が得られるため、0.1 mm の鋼板を溶融させる溶接電流で、板厚の厚い1.5 mm の鋼板側も狭い範囲であるが同程度溶融させることができる。その結果、通常溶接が困難な板厚差の大きな溶接を可能としている。次は数ミリ～10 数ミリの軟鋼やステンレスを特別な開先加工無しで完全溶込み溶接するために溶接である。**図７**に TIG 溶接との比較にてその違いを示す。ステンレスの板厚６mm のⅠ型突合せ継手において、両者とも溶接電流170 A で溶接を行った。TIG 溶接は集中した熱源ではないため、板厚の30％程度の浅い溶込みとなっている。これに対しプラズマ溶接は、集中した熱源で深く溶融させることができ、溶融が裏側まで到達する完全溶け込み（裏波溶接ともいう）ができている。そこで TIG 溶接においても完全溶け込みを目指して溶接電流を２倍近い300 A まで増加させてみた。結果、溶融範囲は大幅に広がるものの、横方向へ溶融範囲が大きく広がり、裏まで溶込みは到達できなかった。このように同じタングステン電極から放電する非消耗電極であっても溶込み深さは大きく異なる。プラズマ溶接を用いたⅠ型突合せ継手の完全溶込み溶接の事をキーホール溶接とも呼ぶ。キーホールとはプラズマ溶接によって接合部の金属が溶融し、円形の孔が貫通してプラズマが裏まで抜けたまま溶接が進む状態である。この溶接状態をキーホール溶接と呼んで完全溶込みが出来ていることを示し、プラズマ溶接の代名詞となっている。Ⅰ型突合せは継手の端部を垂直にカットし隙間がないように合わせた状態である。この継手形状は溶接前の機械加工が少なくてすみ、加工費の低減と廃棄される金属も低減できるため環境にも優しい溶接である。**図８**は板厚３mm のステンレスを溶接速度45 cm ／ min で完全溶込み溶接を行った。完全溶込みの証として裏波ビードも示している。図示はしてないが TIG 溶接で完全溶け込み溶接を行うと裏波が出るように開先加工を事前に行って溶接を行うが、溶接速度はおおむね半分で、プラズマ溶接の方が高能率である。

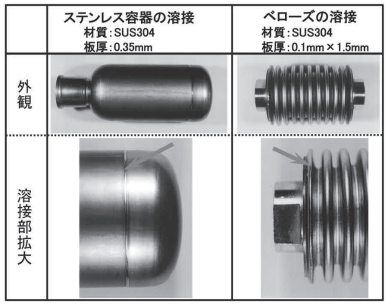


図６　ステンレス容器とベローズの溶接

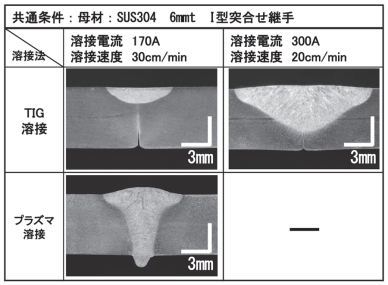


図７　Ⅰ型突合せ溶接の溶込みの比較

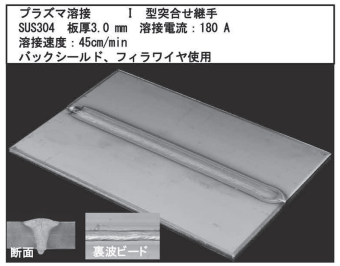


図８　Ⅰ型突合せ継手の完全溶込み溶接

最後に電極（電線）の端部の接合について**図９**に示す。この溶接サンプルは1.6 mm の電線端部を溶融して接合した物である。溶接時間は0.1 秒と短時間で多点の接合を行わないといけない場合に有効である。昨今のモータの小型、高出力化に伴って細い撚り線よりもやや太いサイズの銅線や端子のようなものを短時間で接合ニーズに合致しており、実際の使用例も増えてきている。

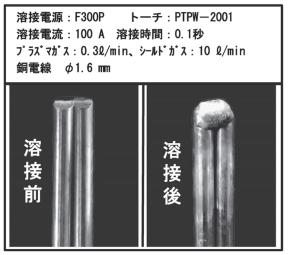


図９　電線端部の接合

5.　おわりに

金属を接合し、構造物や製品部品を製造する技術はメーカーにとって品質とコストの面で非常に重要である。場合によっては特定の接合技術を有しているため、競合他社にはできない商品や製品を実現している場合もある。今回はプラズマ溶接について、比較的原理が近い TIG 溶接との比較をもって、その特徴と有効性を示しつつ、最新のプラズマ溶接機の紹介と実際の溶接物への適応事例をご紹介させて戴いた。本報が少しでも皆様のお役にたてれば幸いである。

参考文献

1）「プラズマ技術の総論」エレクトロヒート　No.201 2015　P78～83

連載講座　プラズマ技術とその適用分野　第４回

プラズマ切断機

石井　幸二　（いしい こうじ）　日酸 TANAKA 株式会社 生産・技術本部 開発部 部長
伊原　大輔　（いはら だいすけ）日酸 TANAKA 株式会社 生産・技術本部 開発部 プラズマ加工技術開発グループ チーフ

プラズマとは、中性粒子（原子や分子）とその一部が分かれる事で生じるイオンおよび電子が自由に飛び交う状態を指す。超高温が発生する、エネルギー密度が高い、加熱雰囲気に影響されにくい、排ガスが少ない、運転管理がしやすい、クリーンな加熱であるなどの特徴を持つので、様々な分野や製品に活用されている。本連載では、プラズマ技術の総論からプラズマ技術を活用した各種製品まで、全６回の講座でプラズマ技術に関する包括的な解説を行う。

1.　はじめに

切断は、多くの製造業において製造工程の第一番目の工程に位置し、切断加工により得られた部材精度や品質が、後工程となる溶接や組み立て作業に影響するため、精度や品質の向上、自動・省力化による効率向上といった要求が高く、用途に応じた様々な切断方法が開発され実用化されている。

熱エネルギーを利用した熱切断は、せん断や切削などの機械切断と比べると切断速度が速く、材料に直接接触しないで熱源を移動することができるため、切断形状の自由度が高いことから、造船や橋梁、建設機械分野における製造現場で必要不可欠な技術となっている。熱切断には、ガス切断、プラズマ切断、レーザ切断の三種類が実用化されている。各切断方法の適用材料と板厚の関係を**表１**に示す。

軟鋼の切断を例に各切断方法の適用について整理する。最も適用板厚範囲が広い切断方法はガス切断である。プラズマ切断の上限板厚 75 mm やレーザ切断の板厚 40 mm と比べ、ガス切断は板厚 4,000 mm もの極板厚の切断実績があり、板厚が厚い軟鋼の切断は昔から現在に至るまで、ガス切断が主に適用されている。

単位時間あたりの切断長となる切断速度は、生産性の観点からは欠くことができない重要な要素である。各切断方法の切断速度を**図１**に示す。最も切断速度が速い切断方法はプラズマ切断である。板厚が薄くなるに従い切断速度は飛躍的に速くなる傾向を示し、最大出力電流 500 A のプラズマ切断は、板厚に応じて切断速度 1,000～6,000 mm/min で切断することができる。レーザ切断も同様に切断速度は速い傾向となるが、プラズマ切断とレーザ切断では材料に投じられる熱エネルギーの違いが切断速度の差となって表れている。一方、ガス切断は板厚による切断速度変化は少なく、全体的に切断速度は数百 mm/min と遅い傾向となる。

表１　切断可能な材質と板厚

切断法	金属材料		非金属材料	
	切断適用材料	切断適用板厚	切断適用材料	切断適用板厚
ガス切断	軟鋼	4.5～4000mm		
プラズマ切断	軟鋼 ステンレス鋼 アルミニウム 銅など	0.5～ 75mm 0.5～180mm 0.5～100mm	（非移行式のみ） 樹脂 木材など	5mm程度
レーザ切断	軟鋼 ステンレス鋼 アルミニウム 銅など	～40mm ～16mm ～10mm ～ 5mm	樹脂 木材 セラミック 紙など	50mm程度

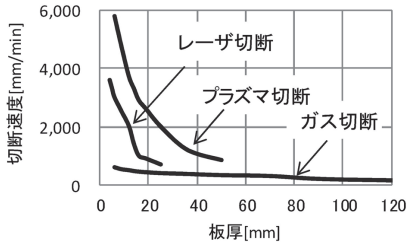
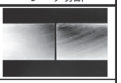


図１　軟鋼の切断速度

各切断方法における切断品質の比較を**表２**に示す。レーザ切断は切断溝が 0.6 mm と非常に細く、切断面の傾きや上縁の溶けもない高品質な切断面を得ることができる。一方、プラズマ切断は切断溝が 3.0 mm と広く、上縁の溶けや製品の傾きもレーザ切断やガス切断には及ばず、唯一面粗さは小さく滑らかである。

表２　軟鋼の切断品質

切断法	ガス切断	プラズマ切断	レーザ切断
切断溝			
	1.5mm	2.5～3.0mm	0.4～0.6mm
傾き	0°	±1°	0°
上縁の溶け	なし	R1.0mm	なし
面粗さ	50 μm	20 μm	50 μm

切断工程では、構造物を部品単位に展開し型抜きする必要がある。板厚の種類や部材の数量、切断品質の要求も含め、効率よく進めるための切断方法の選択や運用方法の検討が欠かせない。以降、プラズマ切断機の詳細について紹介する。

2.　プラズマ切断の切断能力

プラズマ切断は、電極と材料間のアーク放電による熱エネルギーを利用した切断方法である。アークの周囲から冷却すると緊縮して高温になる性質（サーマルピンチ効果）を利用し、細径ノズルで高密度に拘束されたプラズマアークを用い、効率的にかつ高品質な切断が可能となる。

プラズマアークの発生原理を**図２**に示す。アーク放電の開始には、パイロットアークと呼ばれる電極とノズル間の小さなアークを放電してから、電極と材料間にアークを発生させる。放電の最中は作動ガスを電極側から材料に向けて噴出し、プラズマアークの維持と材料の溶融、溶融した金属の排出が行われる。

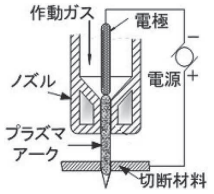


図２　プラズマ切断の原理

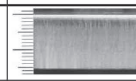
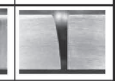
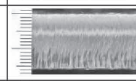
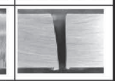
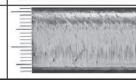
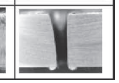
作動ガスはアークを安定させるため旋回させている。現在は、作動ガスの周囲に更に旋回させたアシストガスを流す二重旋回方式が主流となっており、切断進行方向の片側についてプラズマトーチを傾けることなく垂直で切断することが可能となっている。作動ガスには、軟鋼の切断では空気や酸素を、ステンレス鋼やアルミニウムの切断では、窒素やアルゴンと水素の混合ガスなどが用いられる。プラズマ切断の適用範囲を**表３**に示す。

表３　プラズマ切断の適用範囲

切断対象	作動ガス	切断可能板厚
軟鋼	酸素・空気	0.5～ 75mm
ステンレス鋼	アルゴン、水素、窒素	0.5～180mm
アルミニウム		0.5～100mm

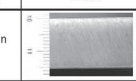
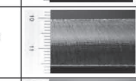
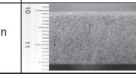
軟鋼板厚 16 mm を例に、作動ガスに酸素、空気、それに窒素を用いて最良の切断品質が得られる条件で切断した場合の比較を**表４**に示す。切断面品質および切断溝形状は、アシストガスに酸素を用いた場合が最も良好で、続いて空気、窒素の順となる。また、空気や窒素を用いた場合は、切断面の表面付近が窒化して溶接時に不具合を発生する場合がある。

表４　各種作動ガスによる軟鋼切断品質

作動ガス／アシストガス	切断速度（切断電流）	切断面	切断溝形状
酸素／空気	2,500mm/min（300A）		
空気／空気	2,500mm/min（300A）		
窒素／窒素	1,500mm/min（300A）		

同様に、板厚 16 mm のステンレス鋼について、作動ガスに窒素、アルゴン＋水素、酸素を用いて最良の切断品質が得られる条件で切断した場合の比較を**表５**

表５　各種作動ガスによるステンレス鋼切断品質

作動ガス／アシストガス	切断速度（切断電流）	切断面	切断溝形状
窒素／水	1,900mm/min（400A）		
アルゴン＋水素／なし	700mm/min（150A）		
酸素／空気	1,900mm/min（230A）		

に示す。作動ガスに窒素を用いた場合は、切断面が灰色に、アルゴン＋水素は茶褐色に、酸素は黒くなる。切断溝形状は、アルゴン＋水素を用いた場合が最も良好である。

3. プラズマ切断機の特徴

プラズマ切断機本体の主な構成を**図3**に示す。プラズマ切断機は、平行に敷設したレールの上を走行する。切断機本体にはプラズマトーチが横行可能な移動台が配置され、開先切断に対応した機種では、プラズマトーチを任意の角度に傾ける機構を持った開先トーチブロックも搭載される。これらの機器はNC装置の指令により任意の形状が切断できるよう制御可能な構成となっている。なお、プラズマ切断は切断中に大量の粉塵が発生するため、集塵装置の設置が必要となる。

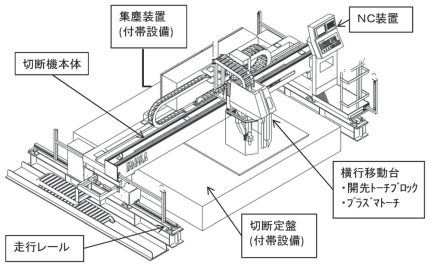


図3　プラズマ切断機の主要構成

日酸 TANAKA 製プラズマ開先切断機 KT-790PJX を**図4**に示す。プラズマ切断は切断速度が速いため、部材の形状切断に時間を要する大板の切断に適している。切断された大きな部材のほとんどは、後工程となる溶接や組み立て作業で必要な開先形状への二次加工や、溶接線や部材名称等を部材に記載するマーキング作業が行われる。これらの追加作業の実施は、部材の移動や位置決め等の段取り作業の増加や二次加工専用の作業スペースを確保する必要もあることから生産性を損なう。そこで、形状切断の作業の一環として開先加工や印字・マーキングを行える機能がプラズマ切断機に搭載されることで効率化が図られている。切断品質を安定的に維持するためには、切断材とプラズマトーチの高さを常に一定に保たなければならない。しかし、切断材は全ての領域を平坦に設置することは物理的に適わないため、切断中のアーク電圧の変化によって高さを検出するアーク倣い機能を利用して切断する。なお、材料の跳ね上がりや操作ミス等による不意のトーチ接触に対しては、マグネット着脱式のトーチホルダやノズルと切断材の短絡検出機能により、切断機のダメージ軽減にも配慮している。

プラズマ切断は高い出力電流を常に印加し続けているため、プラズマトーチに配置された電極やノズルは時間とともにダメージを受け消耗する。消耗の程度は使用する電流や点弧回数により異なるが、おおよそ1～2時間で交換が必要になる。そのため、作業者はピアシング回数や切断時間から予測される消耗時間をアナウンスする電極寿命管理機能や電極破壊時のアーク電圧の変化、或いは冷却水の温度上昇変化で検出する電極消耗検出装置を用いて消耗の状況を把握している。

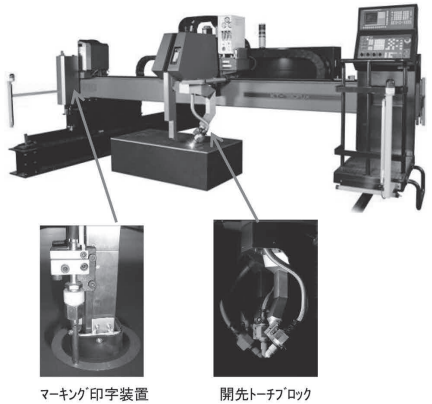


図4　KT-790PJX 開先プラズマ切断機

次に、プラズマ切断装置の機器構成を**図5**に示す。プラズマトーチと中継ボックスは切断機に搭載しプラズマ電源や冷却水循環装置は大きく重いことから切断機から離れた場所に設置する。また、安全の観点からガス容器も離れた場所に設置される。これら主要な機器は、切断機に組み込まれた操作ボックスによりプラズマアークの ON/OFF が実行される仕組みとなっている。プラズマ電源からは電気、ガス容器からは作動ガスやアシストガスが供給されると、切断機に搭載した中継ボックスでプラズマアーク発生に必要なガスの調整が行われプラズマトーチに供給される。なお、中継ボックスは、他にもパイロットアークのための高周波の発生や冷却水循環装置からプラズマトーチへ送水される冷却水の中継点としての役割も担っている。

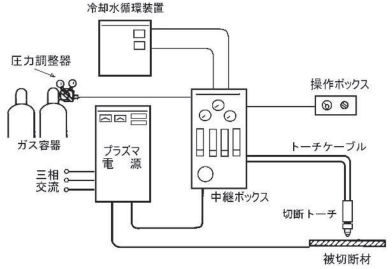


図5　プラズマ切断装置の主要構成

軟鋼の切断で使用される日酸 TANAKA 製ベガサス 500Ⅲ-O プラズマ切断装置の主要構成品を**図6**に示す。酸素プラズマは、電気エネルギーに加え酸化反応熱も利用しているが、それでも多くの電力を消費している。このプラズマ切断装置はプラズマアークを高密度化し従来機の切断電流よりも少ない電流で、従来並みの速度を維持した切断が可能となっている。このプラズマ切断装置が切断に必要とする電力を試算すると、従来機に比べ、約 17% の低減が得られている。また、プラズマアークの高密度化は切断溝の低減にも寄与しており、切断溝の断面積で従来比およそ 12% の低減が得られている。切断溝の低減は、材料の歩留まりの向上だけでなく、切断定盤のサナ板の傷みや切断で発生するノロや粉塵も減ることになり付帯設備の保守作業のコスト低減にも貢献する。

また、プラズマ切断では、電極やノズルが一定時間で消耗するため交換が必要になる。このプラズマ切断装置はプラズマ電源とガス流体回路を日酸 TANAKA 独自にアーク制御することで消耗品寿命の向上も図られている（当社従来比約2倍）。

図6　ベガサス 500Ⅲ-O プラズマ切断装置

4. プラズマ切断の適用事例

プラズマ切断機の適用分野としては、造船の切断現場があげられる（**図7**）。船の材料は板厚 6～30 mm 前後で表面に錆止めが塗装された軟鋼が使用される。部材は一辺が 10 m を超える大きいものを扱うため、1 枚の部材を切断するにはそれなりの時間が必要になる。次の工程に対して部材供給の遅れを発生させないために複数のプラズマ切断機を設備し運用されている。

図7　造船の切断現場

船の部材は多くの場合、部材と部材を溶接して構造物へと加工されるため、切断面形状は表 V 開先や裏 V 開先、或いは Y 開先への加工が望まれる。また、造船向けの特殊な要求として垂直切断面の角を丸く加工する R 面取り切断を上面限定ではあるが切断することができる。プラズマ切断の切断事例を**図8、9**に示す。

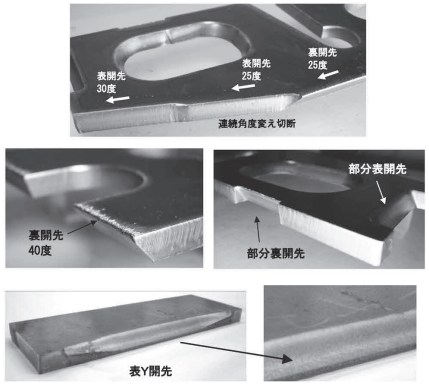


図8　造船向けの開先切断事例

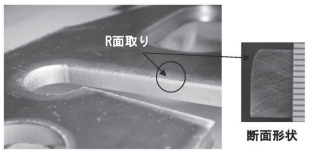


図9　R 面取り切断

近年では切断電流を絞って高品質な切断に特化した高品質プラズマ切断装置が開発され、シャーリング業や建設機械の部材切断にもプラズマ切断が利用されるようになってきた（**図 10**）。

図 10　シャーリング工場の切断現場

建設機械の材料は軟鋼と一部に高張力鋼が使用される。板厚は 1～30 mm 前後の黒皮材が中心で切断する部材の大きさは一辺の長さが数 m 以下であり、比較的、小さい部材で複雑な形状のものが多く、切断材から如何に多くの部材を切断できるかが重要となる。高品質プラズマ切断による切断例を**図 11** に示す。切断電流を 200 A 以下に抑えて、専用の細径ノズルでプラズマアークを高密度に絞ると、切断溝が細くなり切断品質が向上する。また、切断溝が細くなると ϕ15 mm 程度の小孔も切断することが可能となっている。

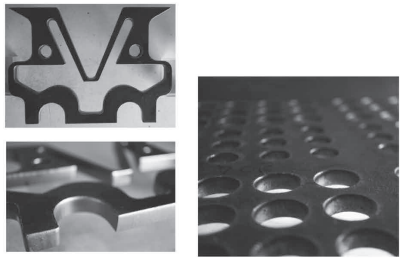


図 11　高品質プラズマ切断

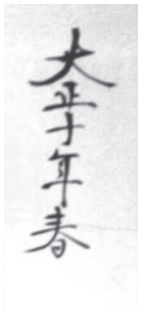
5.　おわりに

プラズマ切断についての特徴と最新のプラズマ切断とその切断品質を紹介した。溶接や組み立て工程の精度向上に伴い、切断工程でも様々な取組みがなされている。取り分け切断では早く無駄なく部材を提供するスピードが要求される。プラズマ切断の適用範囲を広げてお客様の要求に合った商品を提案していきたい。

宝物

あるジャンルの絵画が好きで、関係の書籍や文献をよく読んでおりました。ある日、私の認識の中では歴史的にも貴重と思われる六曲半双の屏風をネットオークションで発見。「これは絶対に散逸させてはいけない」と間の抜けた責任感から家族の冷たい視線を覚悟のうえ落札。到底、狭い部屋で広げることもできず、立てかけたまま何年かが経過。大正10年の作品で保存状態はボロボロ。うっかりすると猫が爪を研いだりと・・・。考えた末、関係博物館に連絡。写真で確認をしていただき、その後に寸尺の調査。結果的に引き取っていただくことになりました。搬出に際しては学芸員の方がプチプチで何重にも梱包し専門の運搬業者に。家では無碍に扱われていた絵が「美術品」へと変貌しました。みなさんの趣味の収集品。宝物が眠っているかもしれませんね。

ボロボロとなった屏風の裏面



作品製作年

（一社）日本電気協会 関東支部　児玉 順一（こだま じゅんいち）

超高密度大気圧プラズマユニット「Tough Plasma」の適用事例と新型ヘッドの紹介

濱 根　　剛　（はまね つよし）富士機械製造株式会社 ハイテック事業本部 FA 開発部第 2 設計課 課長

プラズマとは、中性粒子（原子や分子）とその一部が分かれる事で生じるイオンおよび電子が自由に飛び交う状態を指す。超高温が発生する、エネルギー密度が高い、加熱雰囲気に影響されにくい、排ガスが少ない、運転管理がしやすい、クリーンな加熱であるなどの特徴を持つので、様々な分野や製品に活用されている。本連載では、プラズマ技術の総論からプラズマ技術を活用した各種製品まで、全 6 回の講座でプラズマ技術に関する包括的な解説を行う。

1.　はじめに

当社、富士機械製造株式会社は革新的なロボット技術を核として、時代に先駆けた製品開発、市場開拓に挑み、新しいビジネスの創造にチャレンジしており、主力製品は電子部品実装ロボットと工作機械である。

当社では、産業機械に必要な高品質・高精度化のための要素技術として、2004 年に名古屋大学の堀研究室と共同研究を開始し、2008 年 11 月には、大気圧中でも超高密度で低温なプラズマを生成できる「超高密度大気圧プラズマ装置」を開発した。窒素ガスへの対応や、ヘッドの小型化、スリット幅の拡大など顧客ニーズに即した FPB20 を 2011 年 3 月に発売し、また、2013 年 8 月には、処理能力を大幅に強化し、照射可能距離の延長にも対応した最新機種 FPE20 の販売を開始した。

本稿では、当社製品である「超高密度大気圧プラズマユニット　Tough Plasma」およびその適応事例を紹介すると共に、更なる能力向上を実現した新型ヘッドについても紹介する。

2.　大気圧プラズマによる表面改質

「Tough Plasma」の紹介をする前に、大気圧プラズマによる表面改質の効果について説明する。

大気圧プラズマで一般的に使用するのは「酸素プラズマ」による処理である。プラズマにより酸素ラジカルを生成し、これを対象物に照射する事で各種効果を得る事が可能となるが、主な表面処理効果としては次の 2 つがある。

①表面洗浄

酸素ラジカルによる酸化反応により、物質表面に付着した汚れ（有機物）を CO_2 に分解除去する事で、

物質の表面を洗浄する。

これにより、物質表面はクリーンな状態になり、材料表面の濡れ性が改質する。

②プラズマによる親水基の付与

酸素ラジカル照射により樹脂材料の有機結合が切断され、親水性の官能基が表面に付与される。

これは、物質表面の親水性を高めるだけでなく、接着力の向上にもつながる。

このような大気圧プラズマによる処理効果（酸素ラジカルによる酸化処理）を利用して、接着力の向上、親水性の向上、コーティング、塗装の前処理、有機物の除去等の表面改質効果を得る事が可能となる。

3.　超高密度大気圧プラズマユニット「Tough Plasma」

「Tough Plasma」の製品ラインナップと基本仕様一覧を**表 1** に、また装置外観については**図 1**、**図 2** に示す。

表１「Tough Plasma」の製品ラインナップと基本仕様一覧

型式			FPB20	FPE20
タイプ			N2 標準タイプ	N2 ハイパワータイプ
照射幅		mm	20 スポットタイプはオプション対応	20 スポットタイプはオプション対応
プロセスガス	種類		N2+Air	N2+Air
	流量	L/min	5	30+20
電源		V	AC100（50/60Hz）	AC200（50/60Hz）
消費電力		W	270	1550
寸法	ヘッド	mm	W60×H150×D50	W89×H198×D148
	コントローラー	mm	W215.2×H178.6×D380.2	W465×H1220×D475
質量	ヘッド	kg	0.5	1.5
	コントローラー	kg	11.5	112
	駆動電源	kg	1.5	

図１　装置外観「FPB20」

図２　装置外観「FPE20」

「Tough Plasma」の特徴は以下の通りである。

①電気的に中性

「Tough Plasma」は一般的なプラズマ装置よりも対象物に電気的ダメージを与えない事が大きな特徴である。

実際にプラズマを照射した際の対象物の表面電位は「FPB20」「FPE20」の両機種とも±30V 以内となる。

②低温処理

「Tough Plasma」は一般的なプラズマ装置よりも対象物への熱による影響を与えにくい事が特徴である。

図３はプラズマを連続固定照射した状態での対象物の表面温度を測定したものであるが、「FPB20」では 30 分の連続固定照射に対して 100℃を超えることはなく、また「FPE20」では最大でも 200℃を超えることはない。

そのため「Tough Plasma」は、各種樹脂材料やフィルム状などの熱影響を受けやすい材料についても使用可能である。

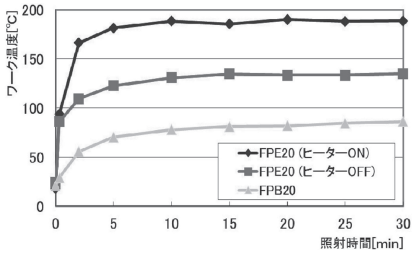


図３　対象物の表面温度

③高処理能力

反応性の高いラジカルにより高い処理能力を有している。

特に「FPE20」については、「FPB20」と比べ約 18 倍のラジカル生成を実現しており、表面改質の更なる短時間処理が可能となっている。

④対象物に合わせた最適照射の実現

標準の 20mm スリットタイプノズルのほか、φ10mm 以下のスポットタイプノズル、照射幅 40mm の幅広スリットタイプノズルなど、様々な形状の対象物に対して最適な照射ノズルの選択が可能である。

また高い処理能力を生かし、凹凸のある対象物に対してもプラズマ照射を容易に行う事が可能である。

以上、超高密度大気圧プラズマユニット「Tough Plasma」は、電気ダメージに弱い電子部品や、耐熱温度が低い樹脂材料、複雑な形状の部品など、様々な分野において使用可能なプラズマ処理装置であると言える。

4.　適用事例

大気圧プラズマは、**表２**のように様々な分野および用途にて活用されている。

表２　大気圧プラズマの使用分野

分野	対象物	主な用途
基板実装関連	・電子基板 ・FPC基板 ・パッケージ基板	基板洗浄 封止樹脂接着強度向上 アンダーフィル浸透性向上
電子部品関連	・電子部品電極 ・サブストレート ・リードフレーム	接着力向上 親水性向上
ディスプレイ関連	・ACF、ACP接合 ・タッチパネル	接合強度向上 パターン印刷前処理
電池関連	・各種電極材料 ・セパレータ	電極の親水性向上 セパレータの親水性向上 接着力向上、密着力向上
自動車関連	・エンジン ・ドアフレーム ・外装部品、内装部品	各種材料（金属、樹脂）の接着力向上 接着前処理の従来工法の置き換え 塗装前処理
メディカル関連	・カテーテル ・内視鏡 ・コンタクトレンズ	コーティング前処理 接着前処理 接着力向上、密着力向上 親水性付与
その他各種材料	・樹脂系フィルム ・高分子材料 ・ゴム、金属	洗浄、接着力向上 親水性向上 印刷・塗装前処理 各種表面改質

以下にその具体的な使用例を紹介する。

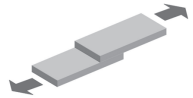
4. 1　PP-GF（ガラス繊維入りポリプロピレン ）の接着強度向上

プラズマ処理を施した PP-GF 材にウレタン系接着剤で接着した試験片について、プラズマ処理の効果を確認するため、引張せん断強度試験で評価した。

プラズマ処理なしと比較すると約 20 倍強度が向上した。また、従来使用されてきたプライマーを使用した場合よりも、約 3 倍強度が向上し、プライマーの代用に十分なりうる事も判明した（**図 4**）。

4. 2　PPS-GF（ガラス繊維入りポリフェニレンスルファイド ）の接着強度向上

プラズマ処理を施した PPS-GF 材にウレタン系接着剤で接着した試験片について、プラズマ処理の効果を確認するため引張せん断強度試験で評価した。



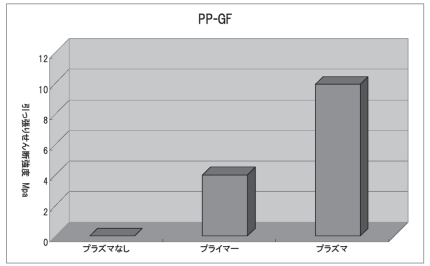


図４　PP-GF の接着強度

プラズマ処理なしと比較すると約 3 倍強度が向上した。また、従来前処理として使用されてきたサンディングよりも約 2 倍強度が向上した。また、サンディングとプラズマ処理を併用する事により、更に接着強度は向上した（**図 5**）。

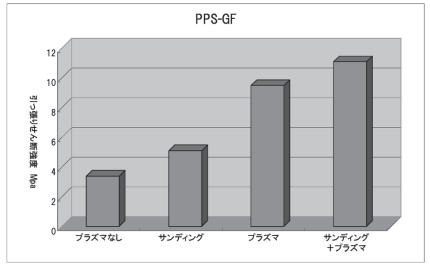


図５　PPS-GF の接着強度

4. 3　ポリイミドシートの親水性の向上

プラズマ処理後は、水の接触角が 71.1 度から 9.5 度に変化し、ポリイミド表面が十分に親水化されたことがわかる（**図 6**）。

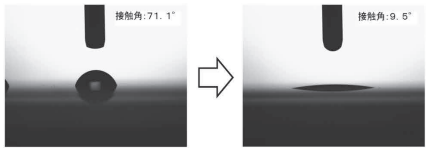


図６　ポリイミドシートの接触角

4. 4　ACF 接合強度の向上

樹脂基板にプラズマ照射後 ACF 接合を行い、未処理のものとピール強度を比較した。

プラズマ処理後は接着強度（ピール強度）が約 4 倍に向上した。これにより接着信頼性の向上および接着タクト短縮による生産量の向上も可能になる（**図 7**）。

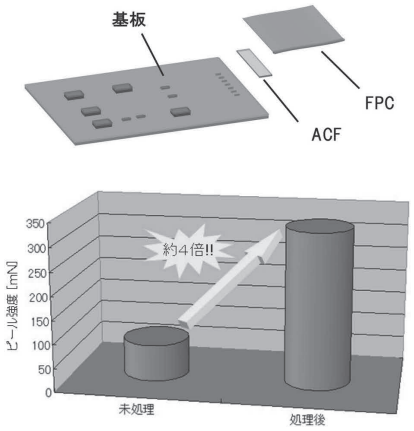


図 7　ACF 接合のピール強度

4. 5　封止樹脂接着強度の向上

樹脂基板上にプラズマ処理後、封止樹脂を接着し、未処理のものとシェア強度を比較した。

プラズマ未処理の場合には、樹脂界面で剥離が起きているのに対し、プラズマ処理後は基板表面の破壊が発生している。この事からも、プラズマ照射により封止樹脂のシェア強度が向上したことがわかる。接合力が向上すれば、製品の品質安定にもつながる（**図 8**）。

4. 6　アンダーフィル浸透性能の向上

フリップチップと基板の間の微小な空間にアンダーフィルを充填させるには、有機物の除去や、親水性の向上が必要になる。

プラズマ処理後は、アンダーフィルの注入性・基板やダイへの濡れ性が共に向上した。この結果、不良品の発生率が低減し、製品の歩留まりも向上した（**図 9**）。

5.　新型ヘッドの紹介

現在、樹脂材料においてはあらゆる分野で接着というものを用いる事が非常に増えてきている。

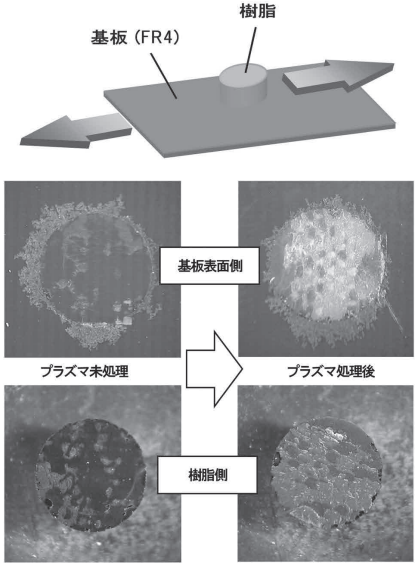


図 8　封止樹脂のシェア強度

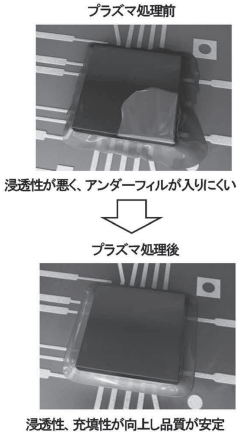


図 9　アンダーフィルの浸透性

特に自動車・航空産業においては、今後は「軽量化」が必須とされる事から、従来多用されてきた金属材料から樹脂材料への移行が行われており、その中で接着は非常に重要な工程となりつつあり、また、接着強度についても非常に強いものが要求されている。

これらの市場要求に対し、当社では、更なる処理能力向上として新型プラズマ照射ヘッド「Type2 ヘッド」の開発を行っている。

本ヘッドは、従来ヘッドに対して、プラズマ生成部の機構改善によりプラズマ生成能力自体の向上を行うと共に、従来までのヒータ機構についても改善を行い、プラズマガス減衰速度を低減する事で、大幅な能力向上を実現した（**図 10**）。

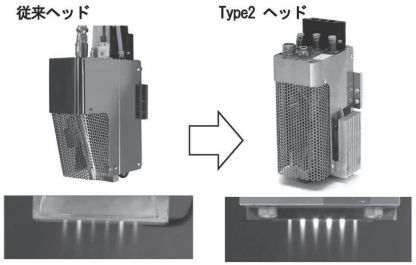


図 10　従来ヘッドと Type2 ヘッド

「Type2 ヘッド」の特徴としては、前述のプラズマ能力向上だけでなく、ドライエアによるプラズマ生成も可能であること、ロボットケーブルに標準対応していること、既存ユーザに対してもヘッド交換のみにて工程での能力向上が可能であること、などの特徴があり、今後多様化する市場要求にも柔軟に対応していきたいと考える。

6.　おわりに

大気圧プラズマはラジカルによる化学反応を主な効果として、接着の前処理や接着強度をより高めるための処理として、様々な物質の表面洗浄や表面改質に多く用いられるようになってきており、また。樹脂材料の増加がプラズマの用途を拡大し続けている。

当社としても、自動車・航空産業はもとより、電子基板や液晶関連機器、更には医療機器等の成長市場を視野にいれ、現行の製品に留まらず、市場の要望を取り入れた新たな製品の開発を推し進め、新規需要の開拓を進めてゆきたいと考える。

近所散策

休日にジョギングを楽しまれる方は多いことと思います。

大体、コースは固定化される傾向にありますが、時として脇道にそれて、新しい発見をしたり、季節によって驚く光景に出合うことがあります。

自宅の近くに「ひまわり畑」のイベントがあるのを知ったのは、現在の住居に越してきて、しばらくしてからでした。

いつもどおり、足の向くままに汗をかいていたところ、目の前に現れたのが写真の光景。

毎年のイベントなので、今では驚くことはありません。夏の時期になりますと、見頃、満開のタイミングを見計らうようになりました。

みなさんのご近所はいかがでしょうか。

（一社）日本電気協会 関東支部　児玉 順一（こだま じゅんいち）

プラズマ式ワンショット溶解システム

成瀬　雅輝　（なるせ まさてる）株式会社豊電子工業

プラズマとは、中性粒子（原子や分子）とその一部が分かれる事で生じるイオンおよび電子が自由に飛び交う状態を指す。超高温が発生する、エネルギー密度が高い、加熱雰囲気に影響されにくい、排ガスが少ない、運転管理がしやすい、クリーンな加熱であるなどの特徴を持つので、様々な分野や製品に活用されている。本連載では、プラズマ技術の総論からプラズマ技術を活用した各種製品まで、全６回の講座でプラズマ技術に関する包括的な解説を行う。

1.　はじめに

アルミダイカストは自動車の軽量化要求に伴い多く使用されており（**図 1**）、ダイカスト鋳造工程は今後更に注目されるものとなっている。しかしながら600℃以上の高温で素材を溶解する為、多くのエネルギーを消費すると共に危険を伴う工程とも認識されている。また、さらなる高品質要求、生産変動追従性など高度化に対応するための技術革新も同時に要求されている。アークプラズマの溶解能力とロボットの自由度を利用して、これらの問題を総合的に解決することを目的として、中部電力株式会社殿、株式会社豊電子工業が共同で「プラズマ式ワンショット溶解システム」（以下、本システム）を開発中である。

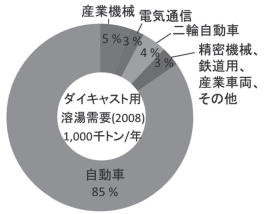


図１　分野別ダイカスト用溶湯需要

2.　従来方式の課題

アルミダイカスト鋳造工程に於けるダイカストマシン各々へのアルミ溶湯供給方式として、集中溶解炉より保持炉への運搬、外部にて溶解された溶湯の保持炉への運搬、溶解保持炉に大別される（**図 2**）。

これら従来方式の供給に於いての課題に次の３点がある。

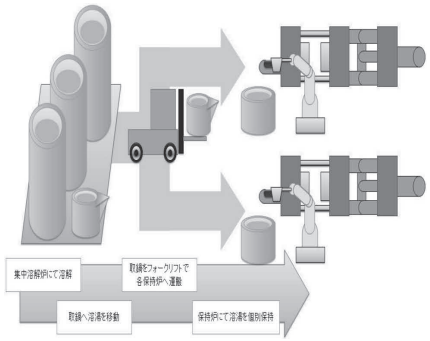


図２　従来の溶湯アルミ供給方式

2. 1　待機エネルギーの消費

集中溶解炉や溶解保持炉は一定の温度に保持する必要があり工場が長期停止する場合以外、エネルギー消費を停止することが容易には出来ない。この為、生産活動していない間にも多くのエネルギー消費が行われこれらはコスト増加および CO_2 排出となる。最近の自動車生産工程の流れである、在庫を全く持たない“1個流し”生産に逆行する象徴とも言える。

2. 2　運搬・保持による危険源の発生

溶湯の保持炉への運搬と多量の溶湯の保持は常に危険源となり、第一に経営上の大きなリスクとなる。又、そのリスク低減のための処置は、生産活動に多くのロスを招くとともに、少なからぬ投資と維持費も必要となる。

2. 3　原料切り替えの手間

常に多量の保持を必要とすることが多く、原料切り替えに手間がかかり多品種少量生産に向かない。

上記課題を解消するには、ダイカストマシンへのアルミ供給を“必要なときに必要な量だけ”ワンショット毎に溶解・供給させることが必要となる。これを実現させるシステムが「プラズマ式ワンショット溶解システム」である。

3.　設備構成

本システムの構成を**図 3** に示す。

1. プラズマトーチ
2. プラズマ昇降装置
3. ラドル（ルツボ）ターンテーブル
4. ノロ除去ユニット
5. 搬送・給湯ロボット
6. プラズマ電源
7. システム制御装置
8. アルミ供給ステーション

4.　システム動作フロー

図 4 に本システムの動作フローを示す。

1. テトラ形状のアルミインゴット（塊）を加熱用ラドルへ投入する。この時、投入したアルミ量を計量し、規定量で停止させるとともに、プラズマ溶解時の出力補正へフィードバックする。
2. 計量されたアルミインゴット入りラドルをターンテーブルへロボットが搬送する。
3. 搬送されたラドルはプラズマトーチ側へ回転しプラズマ溶解が開始される（**図 5**）。
4. アルミ溶解が完了したラドルはターンテーブルで回転しロボット側へ搬送される。
5. アルミ溶解済のラドルをロボットが把持しノロ掻きユニットへ移動する。
6. ロボットがラドルを保持したままラドル内の酸化物を除去する動作をする。

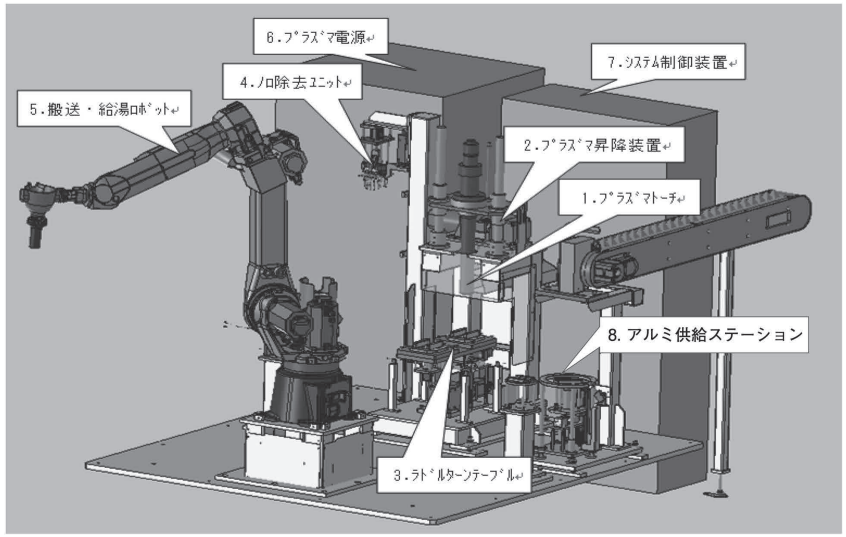


図３　プラズマワンショット溶解システムの構成図

7. 給湯量を安定させる為、余分に溶解した溶湯を次回溶解の為に準備したラドル内に配湯する。
8. ダイカストマシンへ移動し注湯動作を実行する。
9. 空のラドルをアルミ供給ステーションへ返却し1サイクル完了となる。

図4　システム動作フロー

5.　「プラズマ式ワンショット溶解システム」による課題解決

5. 1　省エネルギー効果

従来の溶解システムでは、溶解に必要な加熱エネルギーのほかに、一定の溶解量を保持する為の加熱エネルギーを必要としている。本システムでは必要最低限のアルミ溶湯を都度溶解してダイカストマシンへ注湯する為、保持エネルギーをほとんど必要としない。

一般的な従来の溶解炉の熱効率はおよそ21％[*1]である。

一方、本システムでは保持エネルギーを必要としないため熱効率が高くおよそ60％であり、1次エネルギー換算で溶解原単位としてもほぼ同等である。

従来の溶解炉の場合、ダイカストマシンが稼働していない土日や休憩時間、長期休暇など、生産活動していない時間もエネルギー消費する。それらは不必要な損失エネルギーとなる。これに対して本システムは前述した通り、保持エネルギーが不要である。ダイカストマシンが稼動していない時は、溶解・保持ともにエネルギーを使わない為、これを考慮すると従来炉よりエネルギー消費が大幅に少ないといえる。

＊1　参考文献　デンソーテクニカルレビュー Vol.14 2009

5. 2　危険源の低減

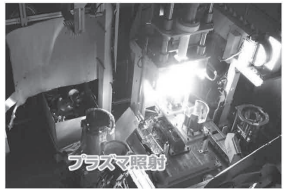
従来の溶解システムでは、運搬に伴う危険が存在するのみでなく、600℃以上の高温物質を多量に保持する事自体が危険を伴う状態と認識できる。

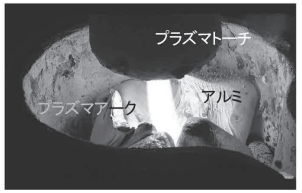
本システムは前述のとおり、保持をせず最低量の溶解量が設備内に滞留するのみの為、危険源も最小限となる。

5. 3　原料切り替えの簡易化

最近では生産部品に適した特性のアルミ合金原料を使用していく傾向がある。しかし従来の溶解システムでは、原料切り替え時にすべての保持アルミを排出しきらなければならないうえ、坩堝の交換するもしくは保持炉を2つ持つ等が必要であり、原料切り替えは容易ではない。

本システムに於いては常温の供給インゴットの切り替えおよび溶解ラドルの切り替えのみで原料の切り替えが可能であることより、少量多品種の生産に寄与できる。





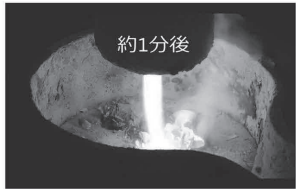


図5　プラズマ溶解の様子（左：プラズマ照射、中：溶解直前、右：溶解直後）

表1　溶解後アルミ試料中の不純物分析結果の例

（ADC12）　（単位：wt％）

成分	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Sn	Ti	Ca	Pb	Cr	W	評価
溶解試料	1.83	10.6	0.257	0.382	0.767	0.158	0.083	0.031	0.098	0.003	0.047	0.036	0.009	◎
JIS規格	1.5～3.5	9.6～12	0.3以下	1.0以下	1.3以下	0.5以下	0.5以下	0.2以下	－	－	－	－	－	－

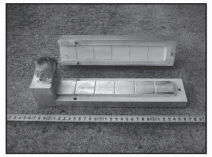
（AC4C）　（単位：wt％）

成分	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Sn	Ti	Ca	Pb	Cr	W	評価
溶解試料	0	6.54	0.283	0.06	0.29	0.039	0.009	0	0.037	0.001	0	0.018	0	◎
JIS規格	0.2以下	6.5～7.5	0.2～0.4	0.3以下	0.5以下	0.6以下	0.05以下	0.005以下	0.2以下	－	0.05以下	－	－	－

5. 4　溶湯品質の確保

溶湯品質の確保に関しては、1ショット毎の溶解都度に酸化物の除去が可能な機器構成となっており、確実に酸化物を除去する事が出来る。

溶解品質について、ラボ試験における溶湯中の不純物および介在物の分析を行った結果の一例を**表1**、**図6**に示す。不純物濃度については、**表1**より、ダイカスト用ADC12アルミ試料および鋳造用AC4Cアルミ試料ともに不純物濃度はJIS規格内の良好な結果であった。また**表2**より介在物についても酸化物を除去しておけばADC12アルミ試料および鋳造用AC4Cアルミ試料とも良好な品質であった。



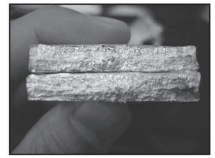


図6　Kモールド試験用試料

表2　Kモールド試験結果の例

アルミ試料	K値	清浄度評価	評価
ADC12 試料（ダイカスト用）	＜0.2	清浄な溶湯	◎
AC4C 試料（鋳造用）	＜0.2	清浄な溶湯	◎

6.　おわりに

本プラズマ式ワンショット溶解システムにおける省エネルギー効果や危険源排除が確認された。そのほかにも作業効率改善や品質確保の向上も見込まれる。

本システムでは、これら多くのメリットがみられる事より長期信頼性の確保やタクトタイムの向上などの課題解決を図って早期実用化を目指す計画である。

一般社団法人
日本エレクトロヒートセンター
JAPAN ELECTRO-HEAT CENTER

〒103-0011
東京都中央区日本橋大伝馬町 13-7　日本橋大富ビル　6F
TEL:03-5642-1733　FAX:03-5642-1734
http://www.jeh-center.org/

本書は「著作権法」により著作権等の権利が保護されています。
無断での転載・複写、また電子的装置への入出力は行わないで下さい。