

エアプラズマ切断法による 高精度切断加工の検討

広島職業能力開発促進センター 野原 英孝

Study on Cutting Condition for High Quality Cut Surface in Air Plasma Cutting
Hidetaka NOHARA

要約 適用可能な板厚と材料の種類が多く、圧縮エアと直流電源のみで切断できるエアプラズマ切断法は、簡便で経済的であることから主に中小規模の事業所を中心に急速に普及している。エアプラズマ切断では切断精度が劣るという欠点があり、一般的には切断面品質、特に切断溝のベベル角精度がWES 2級クラス程度といわれている。そのため、切断精度が厳しい業界への適用拡大が困難となっている。これを改善する方法には、プラズマ作動ガスに酸素を用いる酸素プラズマ切断法があり、WES 1級クラスの切断面品質が得られるが、①電極の耐久性が劣る、②アークのスタート性能が劣る、③適用が鋼材に限定される、④作動ガスのコストが必要になる、等の新たな問題点が生じる。

そこで、本研究では熱切断加工における生産性、作業性、コスト等を考慮し、汎用エアプラズマ切断機を用いて切断溝のベベル角精度の改善を目的に検討を行った。まず、国内で市販されているエアおよび酸素プラズマ切断機のトーチ仕様を調査し、その結果からプラズマアークの拘束条件に着目した。そして、メーカーが推奨する切断施工条件を再検討することで、従来のエアプラズマ切断では困難とされていたWES 1級クラスの高精度な切断加工を実現することができた。

I はじめに

エアプラズマ切断機が我国に導入されてから約30年になる。当初、切断電流が30A程度の小容量機で、ガス切断では良質な切断が困難である板厚2~3mm以下の薄鋼板の手動切断に適用されていた⁽¹⁾。1980年代半ばから切断機の大容量化が進められ、1990年代に入ると板厚の適用範囲も6~30mmに拡大し、それまではガス切断が主流であった領域にまで適用が拡大してきた。特に、特殊なプラズマ作動ガスを必要としないエアプラズマ切断機は、適用分野が広く、簡便で経済的であるため主に中小規模事業所を中心に普及している。

一方、エアプラズマ切断の欠点の1つであるベベル角精度の改善を主目的に、1980年代後半から切断電流が80A程度の高品位酸素プラズマ切断機が開発され、市場に導入されてきた⁽²⁾。そして、切断要求精度が厳しい自動車業界等にNC装置と組み合わせた自動

プラズマ切断装置として使用され、一部はレーザ切断の領域にまで拡大し、発展してきている。この切断法はプラズマ作動ガスに酸素を用いているためエアの場合と比較して、電極の耐久性やアークスタート性能が劣り、適用が鋼材に限定される等の問題点がある。

1990年代後半からは、板厚19~50mm程度の厚板を高速・高精度で切断加工ができるプラズマ切断用トーチの開発が主に進められ、国内メーカー各社におけるエアおよび酸素プラズマ切断機は、単一ガス旋回流方式を大幅に改良した二重シールド型酸化性雰囲気プラズマ切断法^(註1)へと発展している。また、現在までのところ、作動ガスにエアや酸素を用いた単一ガス旋回流方式の切断機には目立った開発の動きは見られない。

本報告は、熱切断加工における生産性の向上、作業性の改善、切断コストの低減等を目的に、汎用エアプラズマ切断機を使用し、メーカー推奨の切断条件を再検討して酸素プラズマ切断に匹敵する高精度な切断加工が可能な切断施工条件を検討した結果である。

II 高精度切断加工のための着眼点

一般に、エアプラズマ切断の切断加工条件は、被切断材の材質と板厚が決まれば、次の順序で設定される。

- 1) 切断電流 : I (A)
- 2) チップオリフィス径^(註2) : d (mm)
- 3) プラズマ作動ガス圧力 : p (MPa)
- 4) トーチスタンドオフ : L (mm)
- 5) 切断速度 : v (m/sec)

図1に、これらのパラメータを示す。このうち1)～4)のパラメータは、製造メーカーの仕様ですでに決定されており、作業者は必要とする切断能力や切断品質に応じて5)のパラメータを設定する。

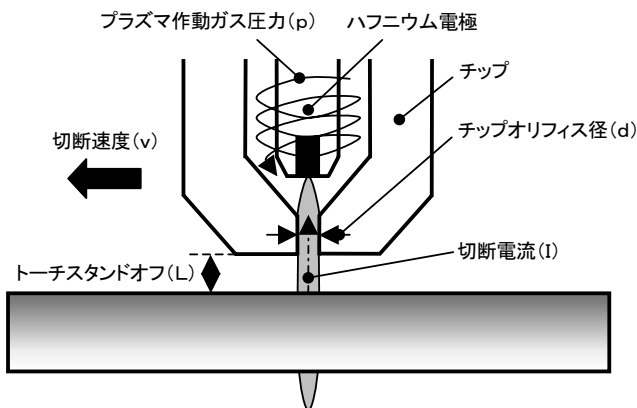


図1 エアプラズマ切断における切断条件パラメータ

本実験では、プラズマアークの特性に大きく影響し、プラズマの電流密度（以降、 i 値とする）を左右する上記の1)と2)のパラメータに着目した。 i 値は、下記の(1)式で定義している。

$$i = 4I / \pi d^2 \quad (1)$$

ここで、 I : 切断電流 (A)

d : チップオリフィス径 (mm)

図2は、市販のエアおよび酸素プラズマ切断機のトーチ仕様を調査し、チップオリフィス径（以降、 d とする）と切断電流（以降、 I とする）との関係を整理した結果である。また、図中には(1)式により算出した i 値も表示した。図から、メーカーが推奨する切断条件（以降、標準条件とする）については、酸素プラ

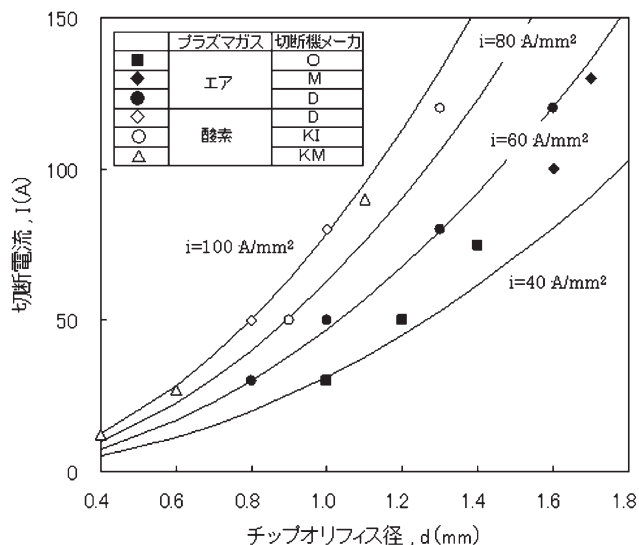


図2 市販のエアプラズマおよび酸素プラズマ切断のトーチ仕様

ズマ切断の i 値がエアプラズマと比べて高く、エアプラズマでは $i = 40 \sim 60 \text{ A/mm}^2$ 、酸素プラズマの場合には $i = 80 \sim 100 \text{ A/mm}^2$ の範囲であることが分かる。

一般に、酸素プラズマ切断では、鋼材の溶融がアークの熱と鉄の酸素ガスによる酸化反応で発生する熱の二つの熱源で生じ、特に後者が切断溝の表層部を適度に溶融燃焼させ、これが切断精度の向上に寄与していると考えられているが、図2を考慮すると酸素プラズマの切断精度には、高密度なプラズマアークによる影響も無視できないものと推察される。従って、プラズマアークの密度が切断品質に影響を及ぼすならば、エアプラズマでもプラズマ密度を増大させることで高精度な切断加工が可能と考えられる^(註3)。

そこで、本研究では上述したようにプラズマの高密度化に有効な I と d を主に変化させ、エアプラズマ切断における高精度な切断加工条件の検討を行った。

III 実験方法

1. 実験装置

実験には、市販のエアプラズマ切断装置（D社：TRGC-121）を使用した。電源の仕様は、定格出力120Aのサイリスタチョップ制御方式で、定格使用率は100%である。また、切断トーチは、水冷式（電極：直接水冷、チップ：間接水冷）であり、定格使用率は100%である。

図3は、実験装置の概略である。自動切断には走行速度を最大0.067m/sec. (400cm/min.) に改造した台



図3 実験装置

車 (D社: CRC-401) を用いて行った。また、台車には電源とのインターフェース回路が内蔵され、アークスタートと台車の起動とが同期する機構を有している。

2. 実験方法

供試材には、主に板厚12mmの一般構造用圧延鋼SS400材を用いた。また、必要に応じて同鋼種の板厚9mmと16mmを用いた。

切断については、走行台車にトーチを搭載して自動で行い、試験材の端面からプラズマアークを発生するスリット切断を実施した。実験に使用した切断チップの拘束長 (スロート長) とオリフィス径の比は、1.5~2.0の範囲である。

切断部の品質については、図4に示す上および下カーブ幅、左右ベベル角度を拡大投影機で測定するとともに、ドロス付着量を電子天秤にて測定し、社団法人日本溶接協会規格WES2801「ガス切断面の評価基準」に準拠して評価を行った^(注4)。

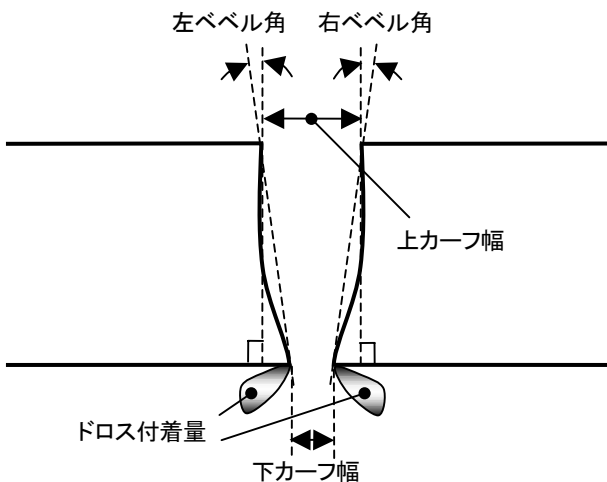


図4 切断品質の測定項目

IV 実験結果及び考察

1. プラズマアークの高密度化の検討

図5は、主アークとシリーズアークが共存して切断性能に悪影響を及ぼすダブルアーク発生限界について、切断電流とチップオリフィス径を変化させて調べた結果である。また、図中にはメーカーが推奨する標準仕様も表示した。図から、実験に使用したチップのダブルアークは、 $i = 130\text{A}/\text{mm}^2$ 以上で発生することが分かる。従って、 $i = 60\text{A}/\text{mm}^2$ の標準条件は、ダブルアーク発生限界値の約46%に設定されていることになる。これは、 i 値が大きくなるとチップ拘束部への熱的ダメージが増大し、チップの耐久性が低下するため、標準条件ではチップの耐用時間を考慮し、目的とする切断性能が得られる最小の i 値が採用されていると考えられる。

一般に、実際の切断作業現場では、溶融金属の吹き上げやスパッタリング、誤操作 (チップ-被切断材短絡) によるシリーズアーク発生等の外乱により損傷⁽³⁾した場合を除き、チップは電極と同時に交換される^(注5)。一方、電極の寿命は、作動ガスにエアまたは酸素を適用して同一条件で比較した場合、後者は前者の1/2~1/3と著しく劣ることが報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

そこで、本実験におけるチップ耐久性の基準は、酸素プラズマ切断と同等以上とした。すなわち、高密度なエアプラズマアークの条件下では、標準条件に比べて早期にチップが劣化するので、標準条件における耐久時間の1/3以上をチップ耐久性の合格基準とすれば、実用上の使用可能な時間として問題がないと考えられる。

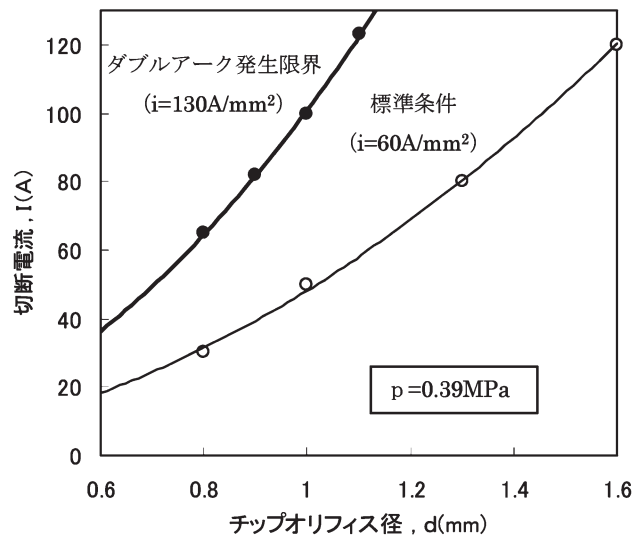


図5 ダブルアーク発生限界と標準条件の関係

図6は、板厚16mmのSS400材に $I = 80A$ で端面スタートによる繰り返し切断を行い、チップ使用限界を検討した結果である。チップ使用限界の評価については、切断毎にチップのオリフィス部の形状を詳細に観察し、その小孔部に变形が認められた時間を使用限界と判断した。図中には標準条件で実験した結果を比較のために示した。図から、 $d = 0.9mm$ 、 $i = 126A/mm^2$ のダブルアーク発生限界の近傍の条件では、切断可能な回数が切断時間20秒では15回と極めて短時間であり、この条件では実用に供し得ないことが分かる。一方、 $d = 1.0mm$ 、 $i = 102A/mm^2$ の条件では、チップ使用限界が破線で示された標準条件の1/3以上であり、上述したチップ耐久性の合格基準を満足していることが分かる。

これらの結果から、以後の実験では $d = 1.0mm$ 、 $i = 102A/mm^2$ のプラズマアークの拘束条件で検討を行った。

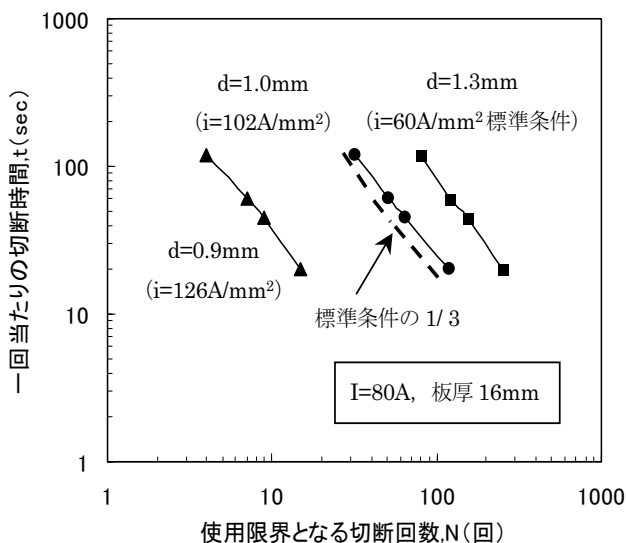


図6 チップの耐久性試験結果

2. プラズマ作動ガスの設定圧力の影響

作動ガスであるエアの圧力は、プラズマ切断の切断機構から材料の溶融・除去の切断能力を促進させるものと考えられる。

図7は、切断からガウジングに至る限界切断速度(以降、 V_{max} とする)とエア設定圧力(以降、 p とする)との関係を調べた結果である。 V_{max} は p の増加に伴って高速側へ推移し、この傾向は板厚が小さいほど顕著である。また、 $p = 0.54MPa$ 以上では V_{max} が飽和する傾向が認められる。これは、エア設定圧力の増加はプラズマ流の流速を増大させ、その結果、溶

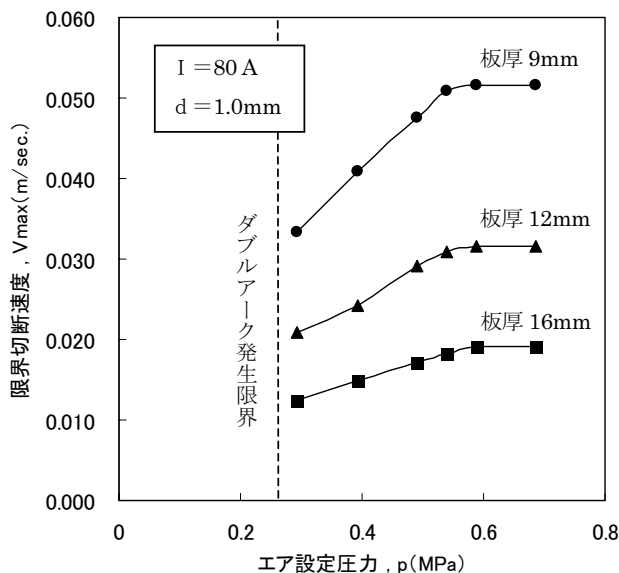


図7 限界切断速度に及ぼすエア設定圧力の影響

融金属の除去能力が向上するため、 V_{max} が高速になると考えられる。 $p = 0.54MPa$ 以上の条件ではプラズマ流の乱れが生じるために切断溝が傾き⁽⁶⁾、この現象の発生が V_{max} を制限させる原因と考えられる。さらに、作動ガスの設定圧力が高い条件では、アークのスタート成功率が低下し、作業効率が悪化する。本実験においても $p = 0.59MPa$ 以上で、アークの発生に支障が生じた。

以上の結果から、エア設定圧力の値は切断効率等を考慮して0.54MPaが適正であると判断した。

3. 切断速度とトーチスタンドオフの影響

図8と図9は、切断速度(以降、 v とする)とトーチスタンドオフ(以降、“スタンドオフ”と称する)が切断品質に及ぼす影響を調べた結果である。図中には、WES2801で規定されている切断面の板厚方向の傾きに相当するベベル角度が1級クラスの範囲も示している。

切断速度は、切断品質を大きく左右し、過度に遅いとドロス付着量が多くなり、その剥離性が低下する。逆に速くなれば、上カーフ幅に対して下カーフ幅が狭くなり、これに相まって左右両ベベル角ともテーパがつき、切断精度が悪化する。しかし、注目すべきはベベル角精度である。従来、エアプラズマ切断のベベル角精度は、少なくとも左右のどちらかはWES2級クラス($\pm 1.5^\circ$ を超え $\pm 5^\circ$ 以内)になることが知られており⁽⁶⁾⁽⁷⁾、左右ベベル角WES1級($\pm 1.5^\circ$ 以内)は困難とされてきた。しかし、本実験では、切断

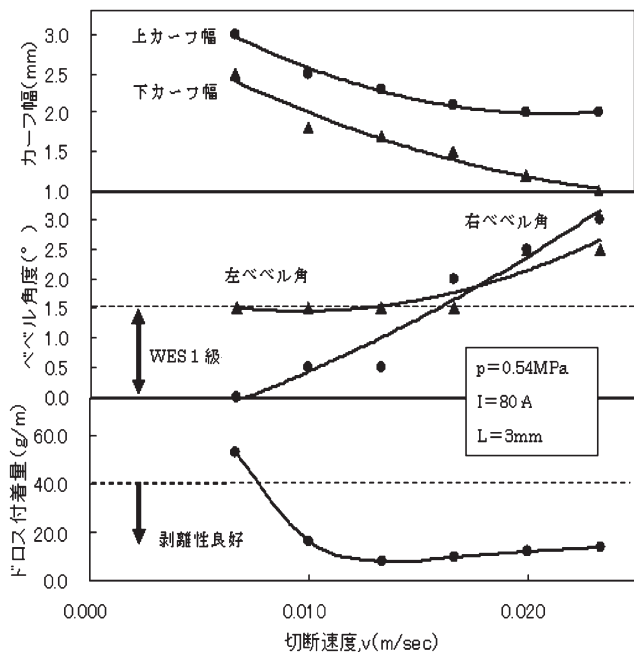


図8 切断品質に及ぼす切断速度の影響

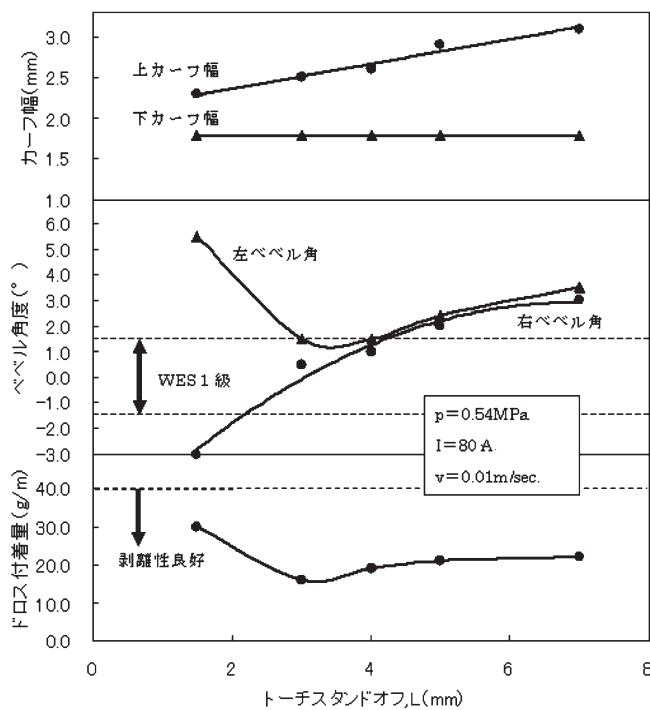


図9 切断品質に及ぼすトーチスタンドオフの影響

速度が0.008~0.013m/sec. (50~80cm/min.) で、ドロス付着量が少なく、左右ベベル角WES1級クラスの精度を満足しており、高精度な切断加工が可能であることが分かる。

また、スタンドオフも切断品質に強く影響し、短い条件ではカーフ幅は狭くなるが切断溝が傾くことで、長い条件では下カーフ幅に対して上カーフ幅が大きく広がることで、ベベル角度が大きくなる傾向が認めら

れる。本実験ではスタンドオフが3~4mmの範囲でWES1級クラスの切断品質が得られた。

このように、切断電流とチップオリフィス径や作動ガスの設定圧力、切断速度およびスタンドオフのプラズマ切断条件を適正に選択することで、切断品質を大きく改善することが期待できる。

4. 切断品質の改善効果

図10は、これまでの検討で得られた最適条件とメーカーが推奨する条件で板厚12mmの鋼材の切断を行い、両者で得られた切断溝の形状を比較した結果である。両者の共通切断条件は、I=80A, v=0.009m/sec. (55cm/min.) である。

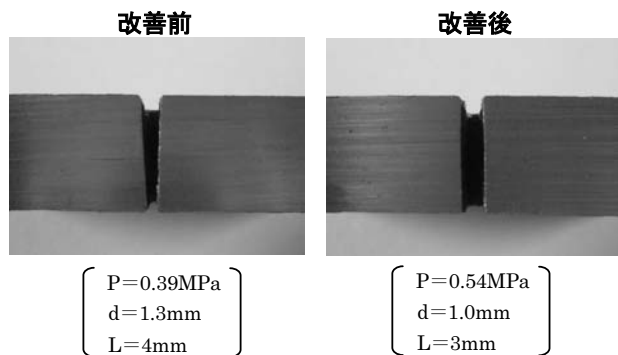


図10 切断溝形状の改善効果

ドロス付着は、いずれの条件でもほとんどなく、ドロスフリーの切断状態である。切断溝の形状には明らかに差異が認められ、左図のメーカー推奨条件では左右のベベル角度が3~4°の範囲で、切断品質がWES2級クラスである。一方、右図の今回の実験で得られた最適条件で切断した溝形状は、左右のベベル角度が±1.5°以内のWES1級クラスであり、切断品質の改善効果が確認できた。

V まとめ

本研究では、市販のプラズマ切断機を使用し、従来では困難であったWES1級クラスの高品質な切断面を形成するための切断条件の検討を行った。

国内で販売されている各種のプラズマ切断機のトーチ仕様を調査し、その結果、特にプラズマアークの電流密度を左右するプラズマアークの拘束条件に着目した。そして、切断電流とチップオリフィス径で決まるプラズマアークの電流密度や作動ガスであるエアの設定圧力、被切断材とチップ間の距離 (スタンドオフ)

等の各切断条件因子を、メーカー推奨条件とは異なる切断条件に選定することで、切断品質がWES 1級クラスの高精度な切断加工が可能になった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、実験装置の仕様変更に伴う改造に協力していただきました株式会社ダイヘンテクノス 中国サービスセンター 三善 効氏に深く感謝いたします。

また、本論文を執筆する際、御助言をいただきました、職業能力開発総合大学校 教授 安田克彦 博士に厚くお礼申し上げます。

[注]

- (注1) 二重シールド型酸化性雰囲気プラズマ切断法は、切断電流で120~600Aクラスの大容量の電源に、プラズマ作動ガス(旋回流)に酸素またはエアを、プラズマアークを覆うアシストシールドガス(旋回流または軸流)に酸素またはエアを使用する二重シールド型トーチで構成されている。主としてNC装置と組み合わせで自動プラズマ切断装置として使用する。現在、建築、橋梁、造船などの厚板分野での普及が期待されている。
- (注2) 国内の切断機メーカーでは、プラズマアークを拘束するためのノズルを「チップ」という呼称で呼ぶことが多い。本稿では、これに合わせて「チップ」と呼ぶことにする。チップオリフィス径とは、チップの穴径のこと。
- (注3) 厳密には、エアにも酸素が21%弱(容積比)含まれていることから、幾分か酸化反応熱が期待されるが、実際にはエアプラズマ切断における酸化反応熱は、切断溝形状の改善よりもむしろ切断速度の向上に寄与することが知られている。従って、本研究では「プラズマの高密度化」のみに着目して検討を行った。
- (注4) 鋼材のプラズマ切断の品質基準としては、近年制定されたISO9013 (Thermal cutting. Classification of thermal cuts. Geometrical product specification and quality tolerances.)があるが、まだ制定されてから歴史が浅いため、業界には十分普及されておらず、ここでは、古くからプラズマ切断の施工管理技術者、品質管理技術者、研究開発者が参考としているWES2801「ガス切断面の

品質基準」を採用した。

- (注5) 汎用プラズマ切断機では、多くの切断機メーカーが電極との同時交換を指示している。

[参考文献]

- (1) 山本：『最近のプラズマ切断法と機器』、配管技術誌, Vol.1 (1993), No.1, p.69
- (2) 野原：講習会テキスト『NCプラズマ切断システムPN4801について』、株式会社ダイヘン 溶接機事業部, No.T-F29511 (1995)
- (3) 野原：『エアプラズマ切断のトラブルシューティング』、溶接技術誌, Vol.47 (1999), No.8, pp.119~120
- (4) 山本, 内田, 吉川：『プラズマ切断におけるシールドガス』、社団法人溶接学会 溶接法研究委員会資料 (1994)
- (5) 株式会社ダイヘン 溶接機事業部編：『ガス切断—プラズマ切断ランニングコスト比較計算』、株式会社ダイヘン技術資料, No.R89-T35 (1989)
- (6) 山本, 原田, 内田：『小型エアプラズマ切断機による中厚板の切断性能と適用性』、社団法人溶接学会 溶接法研究委員会資料 (1992)
- (7) 山本, 原田：『厚板切断用エアプラズマ切断機の現状』、溶接技術誌, Vol.38 (1990), No.11, pp.107~114