U. D. C. 621.791.947.55

移行式水シールドプラズマジェット切断装置の特性

Characteristics of Transferred Type Water Shielding Plasma Jet Cutting Apparatus

伊藤隆清* Takakiyo Itô　鹿島孝之** Takayuki Kashima　藤岡敏則** Toshinori Fujioka

要　旨

移行式窒素プラズマジェット切断装置は切断速度が速く，しかも安価なガスを用いるので切断コストが低く効率のよい切断法である。移行式窒素プラズマジェット切断装置をさらに改良し，窒素プラズマフレームの周囲を水でシールドする新しい移行式水シールドプラズマジェット切断装置を開発した。移行式水シールドプラズマジェット切断装置は，切断面がなめらか，切り口部が直角，ドロスの付着が少ないなどのすぐれた特性をもち，従来の移行式窒素プラズマジェット切断よりもさらに良質な切断が得られる。

本稿では窒素プラズマフレームの特性と移行式水シールドプラズマジェット切断装置の特性を述べている。

1. 緒　　言

プラズマジェット切断は，おもに非鉄金属の切断に用いられているが，その切断法には移行式と非移行式がある。移行式プラズマジェット切断は陰極と切断材(陽極)との間に直流アークを発生させ，陰極を囲むように位置させたノズル内にガスを供給してアークを狭さくする。狭さくされたアークは高温高流速のプラズマフレームとなり，この高エネルギー密度プラズマを切断に利用する。一方，非移行式プラズマジェット切断はノズルを陽極とし，陰極とノズルの間に発生したプラズマフレームをノズルの小穴から噴出させ，これによって切断する方式である。したがって，非移行式は非金属の切断も可能であるが，移行式は金属の切断に限られることになる。しかし，移行式は切断材が陽極であることからアークの陽極降下による熱も切断に利用できるので効率のよい切断法である。

新しく開発した移行式水シールドプラズマジェット切断装置（図1に装置の外観写真を示す）は前述の効率のよい移行式窒素プラズマジェットの周囲を水でシールドしながら切断を行なう方式である。この装置は従来の移行式窒素プラズマジェット切断装置に比較して切断面がなめらかで切断部の切り口が直角である，ドロスの付着が少ないなどの特長をもっている。

以下，移行式水シールドプラズマジェットの発生源である窒素プラズマフレームの温度，流速などの特性と移行式水シールドプラズマジェット切断装置の特性について述べる。

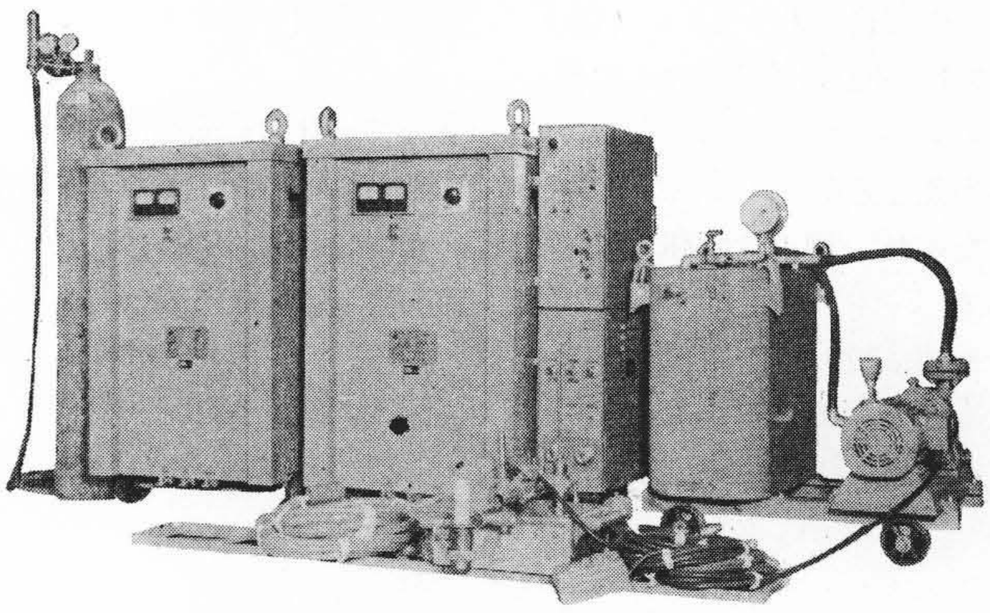


図1　100 kW 移行式水シールドプラズマジェット切断装置

2. 移行式窒素プラズマジェット切断装置のプラズマフレームの特性

2.1 熱損失とエンタルピー

移行式窒素プラズマジェット発生用ガンの陰極およびノズル部は水冷されている。この水流の温度上昇からガン内部での熱損失（陰極部の熱損失＋ノズル部の熱損失）を求めることができる。ガン内部での熱損失は 40～80 kW の電気入力（アーク電圧×アーク電流）に対して 9～12% となった[1][4]。また陽極側（切断材）の熱損失（陽極損失＋熱移行量）は切断材の形状を模擬したU字形切り口をもつ水冷銅製タンクにプラズマジェットを移行させ，そのときの水の温度上昇から測定した[1][4]。陽極側の熱損失は電気入力 40～80 kW に対して一様に 25% となった。

電気入力からガン損失と陽極側の熱損失を差し引いたものを正味の電気入力 P（プラズマフレームから大気中への熱放射は無視する）とするとエンタルピーは次式で求めることができる。

$$P=mh(T) \quad \cdots\cdots(1)$$

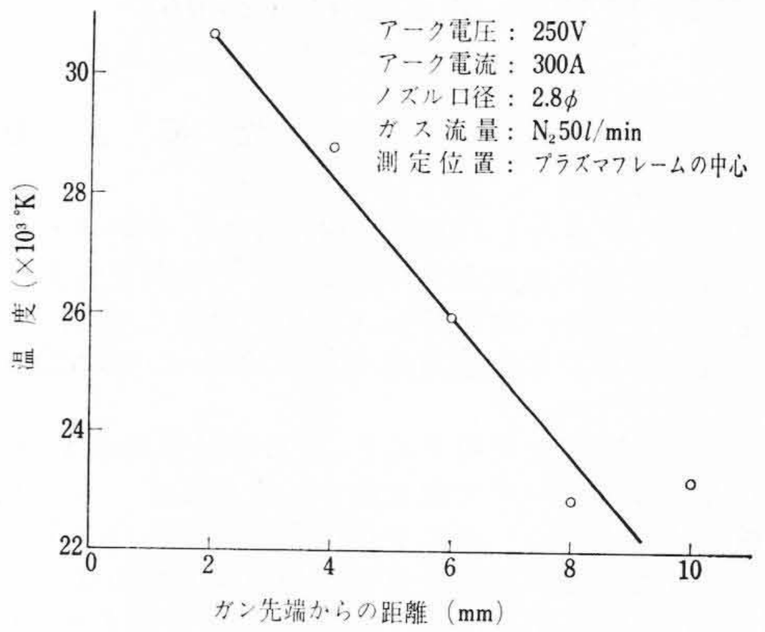


図2　ガン先端からの距離と温度

ここに，m：質量流量

$h(T)$：単位質量あたりのエンタルピー

たとえば，電気入力 80 kW，ガス流量 60 l/min で平均エンタルピーは約 10,000 cal/g であった。この計算において質量流量はノズル内に送り込んだ全ガス流量を使用した。実際にはこの送り込まれたガスが全部プラズマ化されるのではなく，このうちの一部は過熱気体としてノズルから大気中に放出される[4]。したがって，プラズマ化したガス体の質量流量(定量的に求めることは困難)は少なくなりエンタルピーは前述した値よりも大きくなっているはずである。

2.2 プラズマフレームの温度と流速

窒素プラズマフレームが局所的熱平衡になっていると仮定して，窒素プラズマフレームの温度を測定した[3][4]。測定には分光器を用い，窒素プラズマフレームから発する2本のスペクトル線(NII：1価の窒素イオン)の強度比から求めた。結果は図2に示すように，

* 日立製作所亀戸工場　工学博士
** 日立製作所亀戸工場

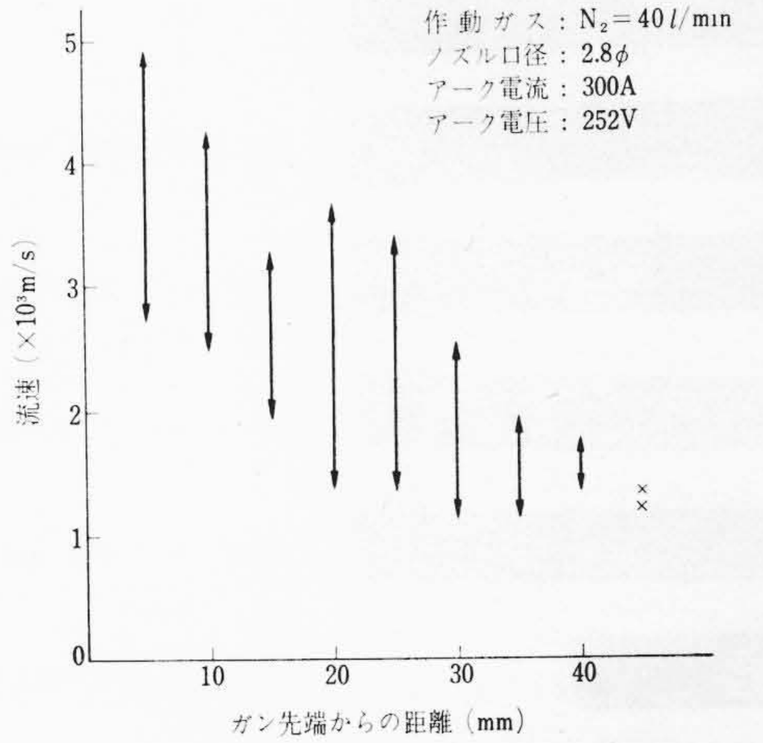


図3　プラズマフレームの流速

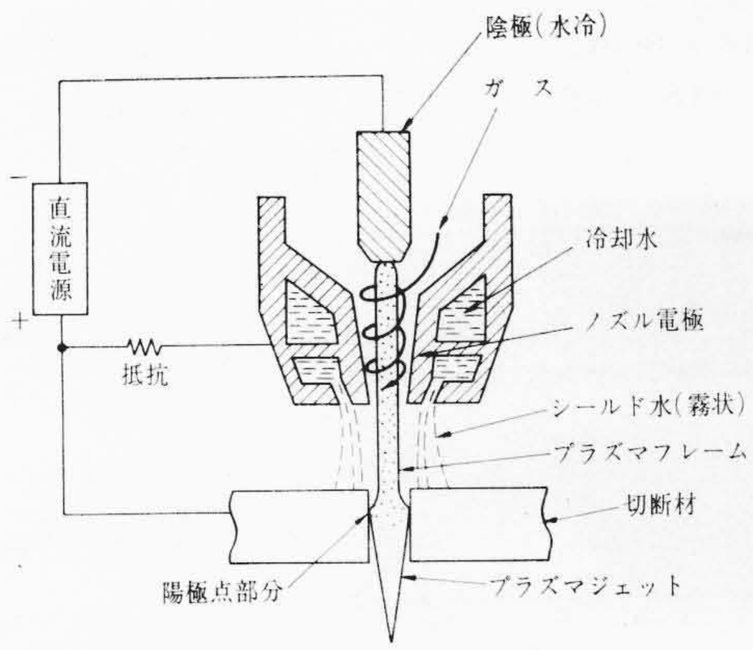


図4　移行式水シールドプラズマジェットの発生方法

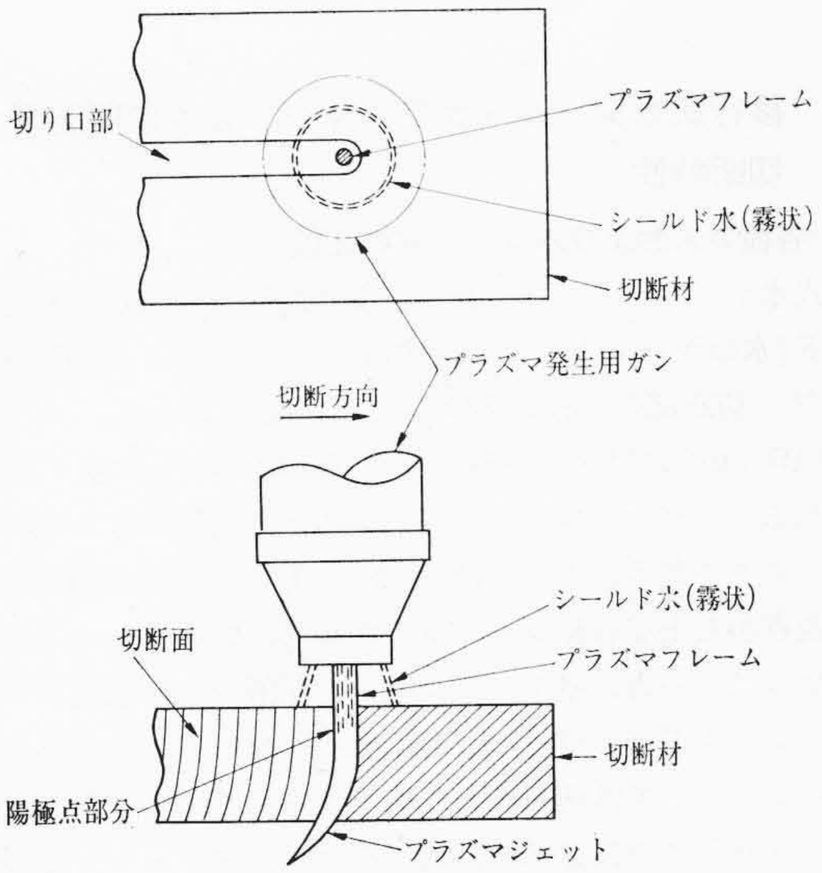
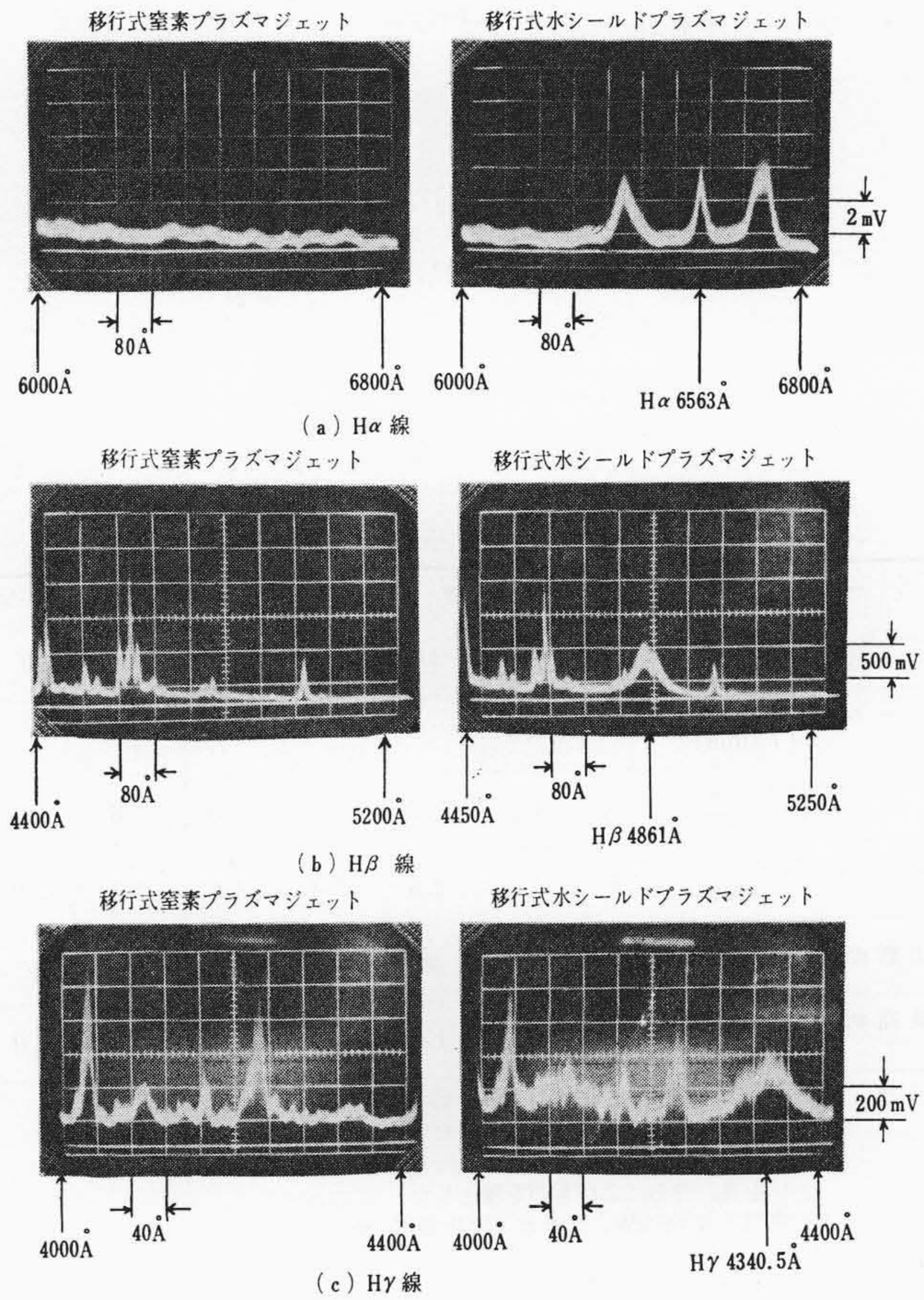


図5　移行式水シールドプラズマジェットの切断時の状況

窒素プラズマフレームの温度は最高約30,000°Kであり切断材上面付近（ガン先端から5mm）で約26,000°Kになった。

窒素プラズマフレームの流速は高速度流しカメラを用いて測定した[2][4]。結果は図3に示すとおりである。温度30,000°Kにおける窒素プラズマフレームの音速は7,500 m/s程度であるから，本装置の最高流速5,000 m/sは0.7マッハ程度となる[5]。したがって，本



実験条件
アーク電流：250 A
アーク電圧：230 V
ガス流量：N_2=40 l/min
シールド水量：0.3 l/min
切断材：SUS 27, 40 t
切断速度：0.2 m/min
観測点：切断部のフレームの中心（切断材上面からの距離3 mm）
分光器スリット：0.3×0.3 mm
結像倍率：n=0.4

図6　移行式水シールドプラズマジェットのスペクトル線（H_α, H_β, H_γ）

窒素プラズマフレームの流速は亜音速の領域にあり，撮影した流しカメラ写真によっても衝撃波は見られなかった。

3. 移行式水シールドプラズマジェットの特性

移行式水シールドプラズマジェットの発生方法は図4に示すように移行式窒素プラズマジェットの周囲から水を供給することによって得られる。移行式窒素プラズマジェットの発生方法は，ダブルアーク（陰極-ノズル-切断材の経路を通るアーク）を防止するために，作動ガスである窒素を強力な旋回流でノズル内に送り，アークがノズル壁に触れないように強く狭さくする方法をとっている。この旋回流ガスがノズル出口から噴出するとき，ノズルの周囲から供給された水を霧状にし，円すい形に広がった水霧がプラズマフレームをシールドする。図5は移行式水シールドプラズマジェット装置の切断時の状況を示したものである。霧状となった水はプラズマフレームを円筒状に包み，切断部を一様に冷却する。プラズマフレームは陽極点より下方ではジェット状となり，切断方向とは逆の方向へ曲がる（移行式窒素プラズマジェットも同様）。

水シールドなし（移行式窒素プラズマジェット）と移行式水シールドプラズマジェットのスペクトル線を観測すると図6のようになった。スペクトル線の観測は切断材上面から3 mmはいったところのフレームの中心軸上で行なわれた。移行式水シールドプラズマジェットでは水素のBalmer系列から輻射（ふくしゃ）されるH_α, H_β, H_γのスペクトル線が観測された。

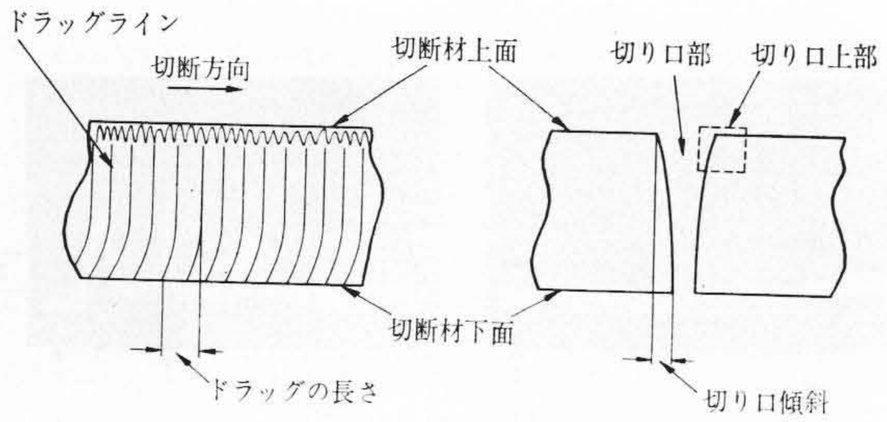


図7　切 断 部 名 称

表1　各種ガスおよび水シールドによるステンレス鋼25 mmの切断特性

シールド材	シールドなし	水	酸素	窒素	アルゴン	炭酸ガス	空気
シールドガス流量 (l/min)			30	30	30	30	30
シールド水量 (l/min)		0.3					
ドラックの長さ (mm)	4.8	4.8	3.5	6.0	6.0	5.6	5.7
切り口傾斜 (mm)	2.8	2.3	2.5	2.2	2.6	2.3	2.0
切断面の状況	並	優	並	良	良	並	並
最高切断速度 (m/min)	1.0	1.5	1.7	1.7	1.5	1.5	1.0

注：(1) ドラックの長さ，切り口傾斜は切断速度 1.5 m/min の値を示す。
(2) 最高切断速度はドロスの付着しない最高の切断速度を示す。
(3) 切断面の状況はシールドなしの面を並としそれよりもいくぶんよいものを良，さらによいものを優とした。
(4) 電気入力 60 kW，作動ガス流量 50 l/min

H_β 線 (4861.3 Å) の Stark 効果による広がりから次式を用いてイオン密度を求めることができる (J. Holtsmark の一次線形理論を用いる方法を使用している)[6][7]。

$$F_0=2.61en_i^{2/3} \quad \cdots\cdots(2)$$

F_0: 標準電場　e: 電子の電荷　n_i: イオン密度

理論から求めた H_β 線の強度分布曲線と観測した H_β 線の強度分布曲線を比較し，$F_0 \fallingdotseq 344$ (esu) を得た。

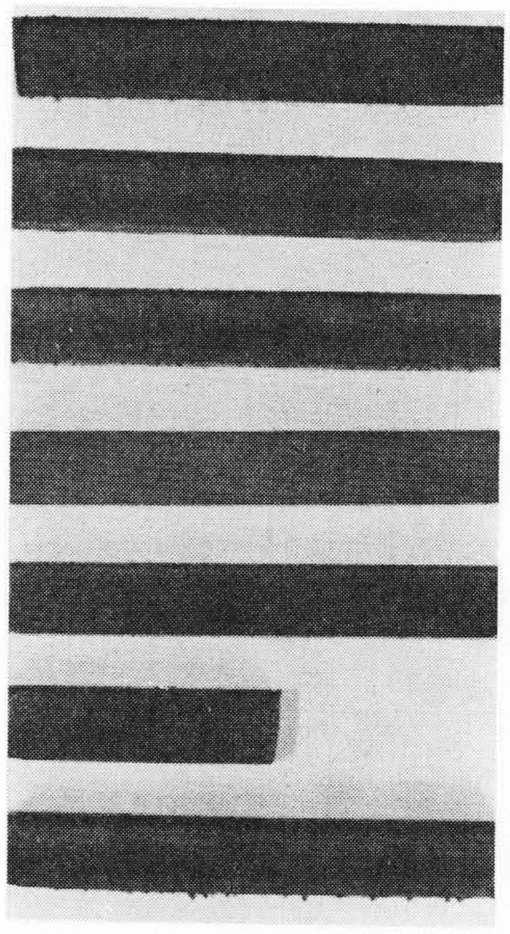
したがって(2)式より

$$n_i=1.4\times10^{17} \quad (cm^{-3})$$

いま，移行式窒素プラズマジェット外周部近傍で電離された水素のプラズマを中性と仮定できるならば，イオン密度と電子密度は等しい。この電子密度を用いて水素プラズマの電離平衡の文献[8]から温度を算出すると約 13,500°K となった。これは窒素プラズマフレームの中心部の温度 (26,000～30,000°K) に比べて低く，水素は窒素プラズマフレーム外炎部の比較的温度の低い部分に存在していると考えられる。

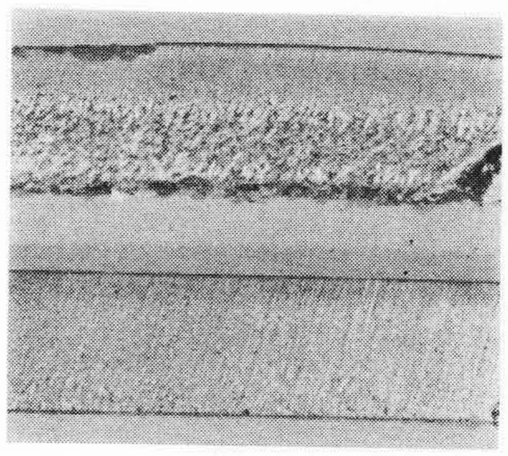
文献[6]によれば 1,000～30,000°K，1～30 atm の範囲における水の性質は H_2O, H_2, O_2, OH, H, O, e, H^+, O^+, O^{++}が存在すると述べている。

したがって，Balmer 系列から輻射される輝線スペクトルの本報告の観測結果からシールドした水が移行式窒素プラズマジェットによって H^+, e にまで分解していることが確認された。これらの事実から移行式窒素プラズマジェットは水の解離および電離エネルギーの補給のために熱を奪われ，ますますピンチされることが予想される。また，前述の文献[6]および測定結果から水素原子，酸素原子の存在が考えられる。水が解離し電離した部分は非常に複雑な現象であるが，発生した水素は切断面をなめらかにする効果があり，また酸素は鉄との酸化反応熱で切断速度を上げる効果があることなどが考えられる。



切 断 材：ステンレス鋼　25 mm
電気入力：60 kW
切断速度：1.5 m/min
作動ガス：N_2=50 l/min

図8　各種ガスおよび水シールド時の切断面



切 断 材：Al 板　40 mm
電 気 入 力：60 kW
切 断 速 度：0.6 m/min
N_2=50 l/min

図9　アルミニウム板の切断面

4. 移行式水シールドプラズマジェット切断装置の切断特性

4.1 各種ガスおよび水シールドの比較

移行式水シールドプラズマジェット切断装置を用いて数種のガスシールド(水の代りにガスを供給する)と水シールドの切断特性を比較した[9]。切断部の名称は図7のように定義される。ステンレス鋼(板厚 25 mm) に対する各種シールドの切断特性は表1に示すとおりである。ドロスが付着しても，とにかく切断できる条件においてはドラッグの長さは小さいほど切断能力は高い傾向がある。

この観点から上記各種シールドのなかでは酸素シールドの切断が良好であった。一方，窒素，アルゴン，炭酸ガス，空気のドラッグの長さはシールドなし(移行式窒素プラズマジェット)よりも大きくこれらのシールドでは切断能力の低下がみられた。また水シールドの場合のドラッグの長さは移行式窒素プラズマジェットと同等であった。切り口傾斜は各種シールド切断ではシールドなしの切断よりも小さく，より直角な切断が可能である。

空気を除いた各種シールドの最高切断速度 (ドロスの付着しない条件において) はシールドなしの 1.5～1.7 倍に増加している。この最高切断速度はドロスの付着しない最高の切断速度であるから，これらのシールド材を加えることによってドロスの付着が少なくなったことを示している。

ステンレス鋼 (板厚 25 mm) に対する各種シールドの切断面は図8に示すとおりである。これらのなかで移行式水シールドプラズマ

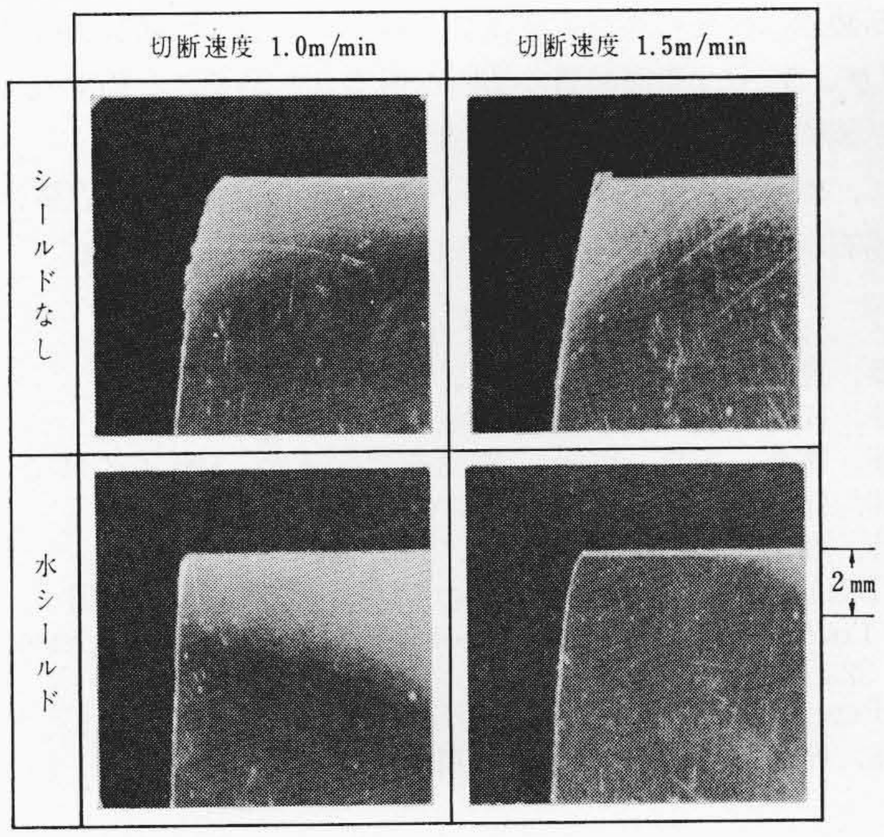


図 10　切り口上部の形状（SUS 27, 板厚 15mm）

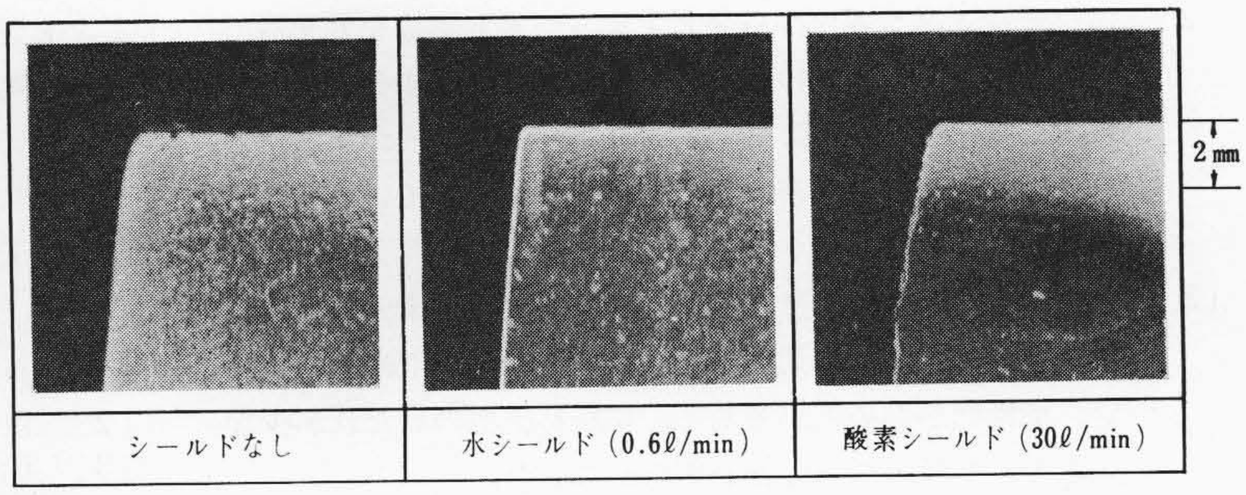


図 11　切り口上部の形状（軟鋼 板厚 25mm）

ジェット切断の切断面が最も平滑で美麗であった。ステンレス鋼の切断面の色は移行式水シールドプラズマジェット切断では黄緑色あるいは薄い緑色をしており，ほかのシールドやシールドなしの切断面は褐色を呈した。移行式水シールドプラズマジェット切断の切断表面の生成物は透過電顕法によれば Fe_3O_4 と CrO_2 が検出され，緑色系の生成物は CrO_2 であることがわかった。**図 9** はアルミニウム（板厚 40 mm）の切断例である。移行式窒素プラズマジェットの切断面は切断材下方の面が荒れているが，移行式水シールドプラズマジェット切断では下端までなめらかな切断面が得られた。移行式水シールドプラズマジェットはアルミニウムの切断においても非常に効果がある。

4. 2　切り口部の形状

図 10 はステンレス鋼（板厚 25 mm）のシールドなしと移行式水シールドプラズマジェット切断の切り口上部（**図 7** 参照）の形状である。水シールドの場合は肩だれ（切り口上部の丸味）は小さく，肩だれ防止に効果がある。切断速度が増加すると肩だれは大きくなる傾向を持つが，この場合にも移行式水シールドプラズマジェットがすぐれている。**図 11** は軟鋼（板厚 25 mm）の切り口上部の形状である。軟鋼においても肩だれの最も小さいのは移行式水シールドプラズマジェットで，次に移行式窒素プラズマジェット，酸素シールドプラズマジェットの順になっている。

移行式水シールドプラズマジェット切断の場合は，水が蒸発するとき吸収する潜熱によって切断材上面を冷却し肩だれを防止しているものと思われる。また，シールドガスとして空気，アルゴン，窒素を用いても水シールドの場合ほど顕著ではないが肩だれが小さくなった。これもシールドガスによって切断材上面が冷却されたためであろう。一方，酸素シールドについては窒素プラズマフレームにさらに酸素と鉄の酸化反応熱が加えられ，肩だれが大きくなったものと考えられる。

4. 3　切断部の硬度分布

移行式プラズマジェット切断による切断部の熱影響をみるため，ビッカース硬度計を用いて切断部の硬度を測定した。**図 12** はアルミニウムと銅の硬度分布である。アルミニウムの硬度分布は切断面からの距離および水シールド有無によって大きな変化はみられなかった。したがってプラズマ切断によるアルミニウムの熱影響はほとんどないといえる。銅の場合は切断面から 4 mm 付近まで硬度は低く切断材の軟化がみられた。

ステンレス鋼（SUS27）の硬度分布はシールドの種類（シールドなし，酸素シールド，水シールド），切断速度（1.0, 1.5 m/min），シールド水量（0.2, 0.5, 1.0 l/min）を変化させて測定した。これらのいずれの条件下においても硬度は 220～250 Hv の範囲にあり，移行式プラズマジェッリ切断による硬度の変化はみられなかった。**図 13** にステンレス鋼の硬度分布の一例を示した。

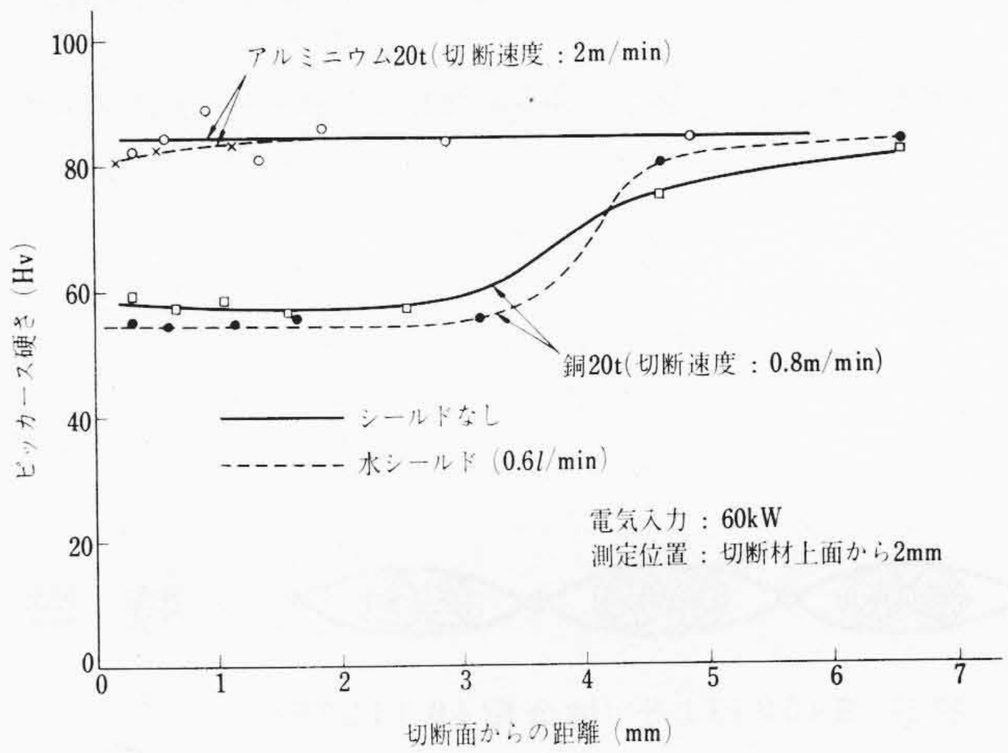


図 12　銅，アルミニウム板の硬度分布

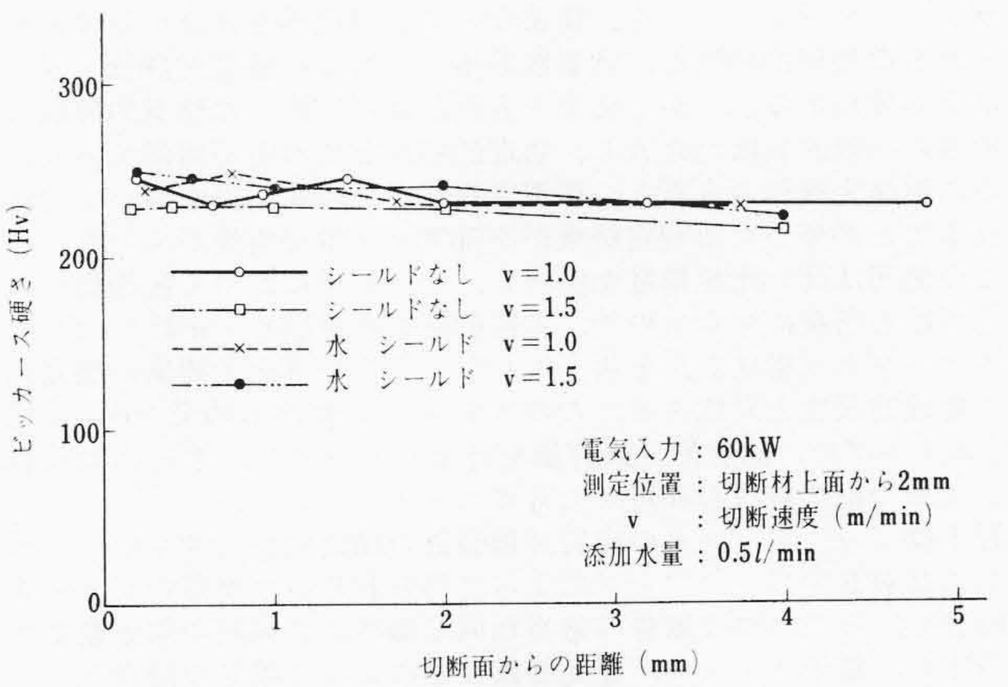


図 13　ステンレス鋼（板厚 25mm）の硬度分布

5.　結　　言

本稿では移行式窒素プラズマフレームの特性と移行式水シールドプラズマジェット切断装置の特性について述べた。おもな結果を要約すると次のとおりである。

（1）　窒素プラズマフレームの温度を分光学的に測定し，最高約 30,000°K を得た。また，窒素プラズマフレームの流速を高速度流しカメラで測定しガン先端部で最高約 5,000 m/s の結果を得た。

（2） 水シールドプラズマから発光するスペクトル線を分光器で観測した結果，水素の Balmer 系列から輻射する H_α, H_β, H_γ 線が観測され，窒素プラズマフレームの周囲から供給されているシールド用霧状の水が解離し電離していることを確認した。

（3） 移行式水シールドプラズマジェット切断は従来の移行式窒素プラズマジェット切断に比べてドロスの付着量が少ない，切断面がなめらかである，切断材上面の肩だれが少ないなどの長所のあることを明らかにした。

（4） ステンレス鋼，アルミニウム板の切断において移行式窒素プラズマジェットおよび移行式水シールドプラズマジェット切断両方法ともに硬度変化はみられないことを確かめた。

以上述べたように，新しく開発した移行式水シールドプラズマジェット切断装置は従来の移行式窒素プラズマジェット切断装置の性能を凌駕(りょうが)する高品質な切断を得ることができ，効率のよい金属切断装置としての利用が期待される。

終わりに，本研究の計画進行についてご指導いただいた日立製作所亀戸工場石垣副工場長はじめ関係各位に厚くお礼申しあげる。

参　考　文　献

（1） 伊藤，鹿島： 電気四学会連大，177（昭 43）
（2） 伊藤，鹿島，藤岡： 電気東京支大，8（昭 43）
（3） 伊藤，鹿島，藤原，藤岡： 電気四学会連大，196（昭 44）
（4） 伊藤，鹿島： 電学誌，90，164（昭 45-1）
（5） 伊藤，藤原： 電気四学会連大，182（昭 45）
（6） H. Edels, J. D. Craggs: Progr. Dielec, 5, 193 (1963)
（7） W. Lochte-Holtgreven: Reports of Progress in Physics, 21, 323 (1958)
（8） T. Peters: Z. Physik, 135, 573 (1953)
（9） 伊藤，鹿島，藤岡： 溶学会秋期全国大，93（昭 44）

特 許 の 紹 介

特許 第459411号（特公昭40-11876）

三 浦 種 敏

音　質　測　定　装　置

ラジオ，テープレコーダ，電蓄などの音響機器を設計する場合にはそれらの物理的特性を，音響機器出力の音質の感覚的評価と対応づける必要がある。しかし従来の音質評価の方法では感覚的評価に評価者の主観的判断が介入し，物理的特性との対応が困難であり，さらに被測定機器の音質と，標準音質とが長時間間隔をおいて比較されることが多いため判定結果が不確実となる可能性があった。

この発明は高い比較精度を実現し，その結果に基づく技術面への対応づけを密接にするもので，主観的評価の過程を「分析」「総合」のステップより構成し，「分析」のステップで3～4次元要素の感覚尺度で物理的尺度と対応させ，このステップにおける結果を次の「総合」ステップで，総合的主観評価を行なうようにし，さらに比較法として三つ組比較法を採用したものである。

図1はピックアップ系の音質評価装置の構成例を示すもので，標準および被測定ピックアップによって得られる再生信号をレコーダに録音し，その二つの録音の適当な同じ個所に小区間の部分数個所を選定し，電子スイッチ，遅延装置などによって第3の録音テープに図2のように録音する。さらにテープの制御パルス，テープリーダなどによって雑音発生回路，標準ひずみ回路から標準信号，比較信号，被測定信号などの物理的尺度を変えて順次時系列信号にして増幅，再生し，スピーカよりの音を総合主観的に評価できるようにする。（岸原）

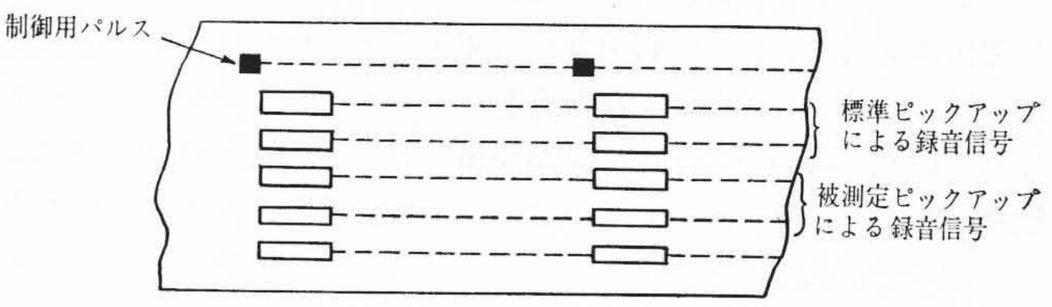


図　2

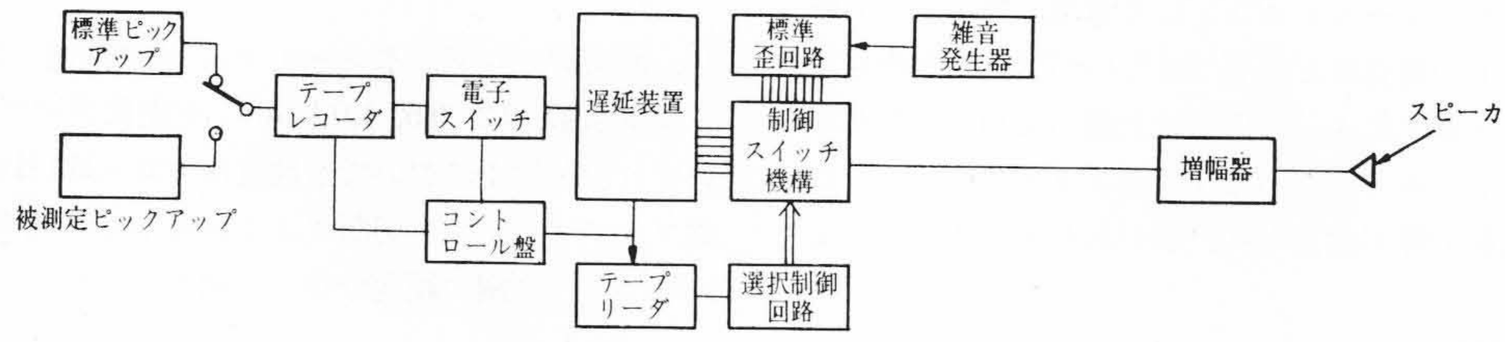


図　1