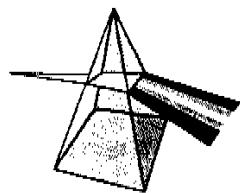


【技術報告】



解析的手法によるプラズマジェット トーチの最適化 ーデコミッショニング技術の開発ー

福井 康太 森下 喜嗣 谷本 健一

大洗工学センター 管理部

資料番号：104-11

Numerical Analysis of Plasma Jet Torch Shape
-Development of Decommissioning Techniques-Yasutaka FUKUI Yoshitugu MORISHITA Ken-ichi TANIMOTO
Administration Section, O-arai Engineering Center

核燃料サイクル施設のデコミッショニングに適用する解体技術として、金属及び非金属ともに切断可能なプラズマジェットトーチ開発を実施している。このプラズマジェットトーチの耐久性と切断性能の向上、小型化を目指したトーチの設計に反映することを目的に、電磁場や作動ガスの物性、流量、ノズル形状の影響により変化するプラズマ流の物理的挙動を明確にするプラズマ流解析コードを開発した。本コードを用い、ノズル形状をパラメータにシミュレーションを行い、その結果をもとに最適なトーチを試作し、このトーチが実用上十分な耐久性と切断性能を有することを確認した。

The Plasma jet torch to cut both metal and non metal has been developed, as the cutting technique for the decommissioning of nuclear fuel cycle facilities. "The Plasma fluid Analysis code" was developed to clarify how the physical behavior of plasma fluid is influenced by the electromagnetic field, material constant of neutral gas, flow rate and fluid velocity, shape of torch nozzle and so on. This code is applied for the design of smaller size plasma jet torch which has high endurance and cutting ability. The plasma fluid was analyzed by this code to investigate the influence of nozzle shape on the plasma. The most suitable nozzle shape of plasma jet torch was designed based on the results of numerical analysis. The plasma jet torch of which practicality was confirmed by experiment was made according to this design. The cutting ability and endurance of this plasma jet torch were found to be adequate.

キーワード

核燃料施設、デコミッショニング、プラズマ、プラズマジェット、シミュレーション、切断、解体、電磁流体、溶断、破砕

Nuclear Fuel Cycle Facility, Decommissioning, Plasma, Plasma Jet, Simulation, Cutting Dismantling, Magneto-fluid, Thermal Cutting, Thermal Break

1. はじめに

将来の核燃料サイクル施設等のデコミッショニング（解体撤去）作業を安全かつ合理的に行うため、デコミッショニングに用いる要素技術開発のひとつとして、解体技術の開発を進めている¹⁾。

デコミッショニングに適用する解体技術は、剪断や切削等による機械的切断法と、ガスやプラズマアーク等による熱的切断法の二種類に大別される。一般に熱的切断法は機械的切断法に比べ、切断性能が高く、自在性に優れるなどの特徴を有する。しかし、ガス切断のように炭素鋼には適するがステンレス鋼には適さないものや、プラズマ

アーク切断のように導電性の材質のみに適用可能など、材質により適用する機種が異なる。

これらの切断法は、主に金属を対象とした切断技術であるが、デコミッショニングを考えた場合、耐火レンガやコンクリートのような非金属の切断についても技術を確立しておく必要がある。核燃料サイクル施設の設備機器の材料厚さを考慮すると、金属に対して20mm、非金属に対して100mm程度の切断性能が要求される²⁾。

金属、非金属同時に切断可能な技術として、ユーティリティー等の付帯設備のコンパクト化が図れ、既設セルにも貫通孔を通じ容易に導入でき

るプラズマジェット切断技術の開発を進めている^{2),3)}。プラズマジェット切断法は、図1に示すように、電極と切断対象物（陽極）との間で放電を行う従来のプラズマアーク切断法とは異なり、電極とノズル部（陽極）との間で放電を行い、作動ガスをプラズマ化させ、ノズルから出射した高温、高速のプラズマで対象物を熱的に切断する技術である。プラズマアーク切断法は、切断対象物が導電性のある金属のみに限られるが、ノズル部を陽極としたプラズマジェット切断法は、金属のみならず導電性のない非金属でも切断できる特徴がある。またピアッシング（局所的な入熱による開孔）による熱衝撃作用で耐火物を破碎できる特徴もある。

これまでに金属及び非金属に対して20mm厚の切断性能と、耐火物に対して100mm厚の破碎性能を有し、プラズマアークトーチと同等の寸法及び形状、重量のプラズマジェットトーチを開発した³⁾。しかし、開発したプラズマジェットトーチは、ノズル先端でプラズマ流が拡散し、3,000K～8,000Kの高温プラズマがノズル先端部に接触し、接触した部分が30分程度で溶融して出射できなくなるなど、耐久性の面で課題を有していた。またセル内等の遠隔操作機器を用いた切断作業には、溶融したノズルを頻繁に交換する作業が強いられ、適用できない現状にあった。

このため、電磁場や作動ガスの物性、流量、ノズル形状の影響により変化するプラズマ流の物理的挙動の明確化、プラズマジェットトーチの耐久性の向上、切断性能の向上とトーチの小型化を目指したプラズマジェットトーチの設計に反映することを目的に、「プラズマ流解析コード」を開発した。

本報では、本コードを用い、ノズル形状をパラメータにシミュレーションを行い、この結果をも

とに最適なプラズマジェットトーチを試作し、このトーチが緊縮したプラズマ流（拡散しない）を出射でき、実用上十分な耐久性と切断性能を有することを確認したので報告する。

2. プラズマ流の物理モデル

プラズマジェット切断におけるプラズマの発生及び流動をシミュレートするには、電極の先端からノズル部出口付近までの物理現象をモデル化する必要がある。

プラズマジェット切断装置は、図2に示すように、作動ガス（Ar：N₂=2：1の混合ガス）をプラズマ化させ切断対象物に出射するプラズマジェットトーチ、トーチに電源及び作動ガスを供給するプラズマ発生装置、トーチのノズル部に冷却水を供給する循環式冷却装置で構成される。プラズマジェットトーチは、電極（陰極）部、プラズマ流を拘束し陽極の役目をするノズル部、作動ガス供給部、ノズル部に冷却水を循環させる冷却部から成る。

電極部の先端からノズル部出口付近までの間で起きるプラズマの形成過程を図3の二次元円筒モデルに示す。まず、プラズマジェットトーチ内部の電極から熱電子が発生し、陽極であるノズル部に向かって加速する際、上部から流れてきた作動ガスの中性原子と衝突し電離反応を起こす。電離反応により、中性原子からはイオンと二次電子が発生する。二次電子が連鎖的に中性原子と衝突を繰り返し、電離反応を起こすことにより、イオンと電子の数が増加し高温のプラズマが形成される。プラズマはノズル部で加速され、高速のプラズマ流として出射される（幾つかの電子は陽極に吸収される）。

したがって、プラズマの形成過程における物理現象を以下の①～⑥のとおりモデル化する。

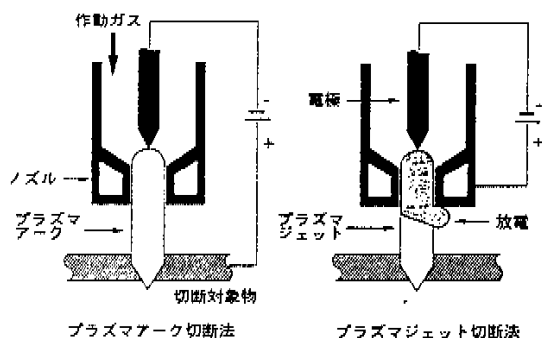


図1 プラズマ切断の原理

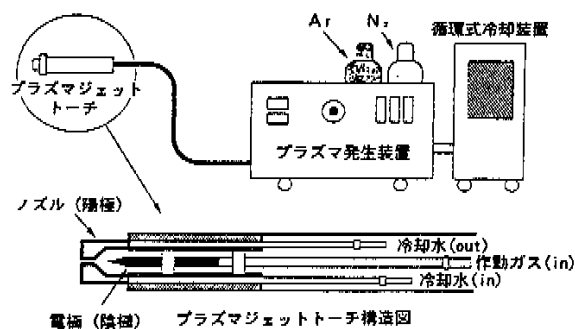


図2 プラズマジェット切断装置

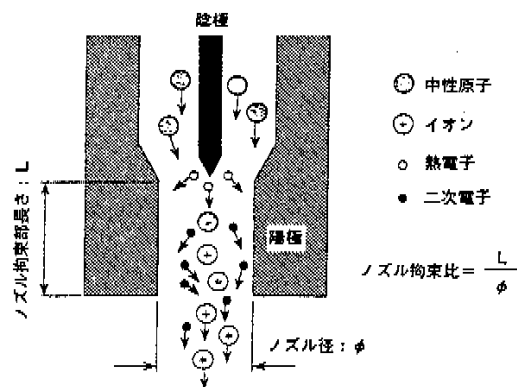


図3 プラズマ形成の物理モデル

- ①電極での熱電子の発生量は、電流値から計算し既値として与えることができ、熱電子の発生箇所は、電極間距離が最短となる電極の先端部で起きる。
- ②電子と中性原子との衝突は、電子の速度に応じたある定まった確率で起き、確率はマクスウェル分布に従う。
- ③中性原子のイオン化は、第一イオン化のみとする。発生したイオンと電子の衝突により第二イオン化は生じないものとする。
- ④イオンと中性原子の衝突、イオンと陽極との衝突は生じないものとする。
- ⑤陽極に吸収される電子の数は、プラズマ射出中のプラズマ発生装置の電流値が一定であることから、電極で発生した熱電子と同数である。
- ⑥ノズル内の作動ガスは乱流として取り扱う。

3. シミュレーションコードの開発

3.1 プラズマ流の流体方程式

イオン、電子、中性原子の3つの粒子からなるプラズマ流の流体方程式は、気体または液体の流

体方程式と同様に、以下の(1)～(3)式に示す運動量保存の法則、質量保存の法則、状態方程式からなる⁴⁾。

・運動量保存の法則 (運動方程式)

$$m_j n_j \left[\frac{\partial v_j}{\partial t} + (v_j \cdot \nabla) v_j \right] = q_j n_j (E + v_j \cdot B) - \nabla p_j - m_j n_j v_j (v_j - v_i) \quad (1)$$

・質量保存の法則 (連続の式)

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla (n_j v_j) = \nu_s n_j \quad (2)$$

・状態方程式

$$\begin{aligned} p_j (m_j n_j)^{-\gamma} &= \text{const} \\ p_j &= n k_B T_j \\ \gamma_j &= (2 + N) / N \end{aligned} \quad (3)$$

m : 質量, n : 密度, v : 速度, t : 時間, q : 電荷,

E : 電場, B : 磁場, p : 圧力, ν : 衝突周波数,

ν_s : 電離周波数, k_B : ボルツマン定数, T : 温度,

γ : 状態変数, N : 自由度

添字 j : 粒子, i : イオン, g : ガス

運動量保存の法則は、図4に示す粒子 j が単位時間に微小な距離を移動する運動量、粒子の電荷 q 、電磁場の強度 E と B 、圧力差 ΔP 、移動途中で他の粒子と衝突周波数 ν の確率で衝突し減少する速度変化の項で表される。

質量保存の法則は、図4に示すように電離反応で粒子 j の密度変化が生じることから、電離周波数 ν_s という確率で変化するものとする。

状態方程式は、プラズマ流を圧縮性の流体と考え、この時のパラメータは温度のみとなり、圧力と密度の関数となる。

また(1)～(3)式は、荷電粒子を取り扱うことから、電場及び磁場を計算するため、マクスウェルの方程式(4)式及び(5)式を加えて差分化する。

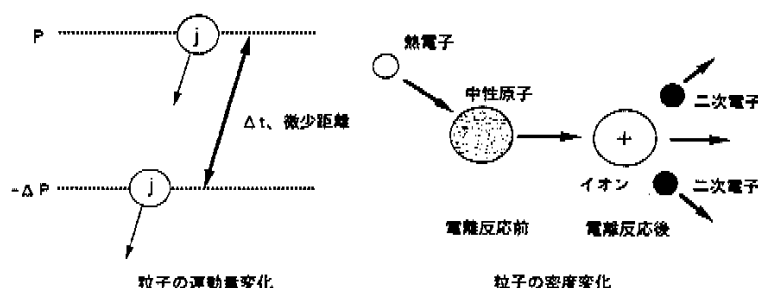


図4 粒子の運動量及び密度変化

・マクスウェルの方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (5)$$

μ_0 : 真空の透磁率, $\mathbf{j}$: 電流密度, c : 光速

3.2 シミュレーションコードの構成

粒子の運動をシミュレートするには、陽解法流体粒子法⁵⁾を用いた。陽解法流体粒子法とは、流体を流体要素に分割し、流体要素の動きにより流体の運動をシミュレートする方法である。

陽解法流体粒子法は、図5に示すように、まずプラズマジェットノズル部の形状をX、Zの円筒二次元モデルで近似し、メッシュ分割する。次にメッシュ上の運動量を流体要素に割り振り、各々の運動量に従い流体要素を移動させる。移動後は、逆に流体要素から物理量をメッシュ上に割り振る。メッシュ上の新たな電荷密度で電磁場の計算を行い、運動方程式で流体速度を計算する。このような過程を時間ステップにより繰り返し計算を行い、プラズマ流の運動をシミュレートする。

本プラズマ流解析コードからは、最終的な計算結果として、中性原子、イオン、電子の密度及び速度分布、プラズマ流の温度分布が求められる。

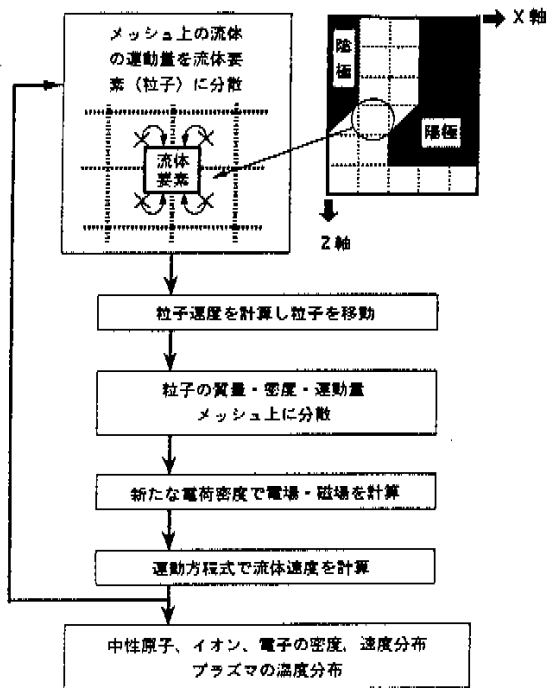


図5 計算処理フロー

3.3 流体方程式の差分化

(1)~(5)式に示すプラズマの流体方程式を陽解法流体粒子法により差分化すると以下の(6)~(13)式になる。

$$\frac{x_{i0}^{(n+1)} - x_{i0}^{(n)}}{\Delta t} = v_{i0}^{(n+1/2)} \quad (6)$$

$$m_i n_{i0} \frac{v_{i0}^{(n+3/2)} - v_{i0}^{(n+1/2)}}{\Delta t} = q_i n_{i0} \left\{ E^{(n+1)}(x_{i0}^{(n+1)}) + v_{i0}^{(n+1)} \times B^{(n+1)}(x_{i0}^{(n+1)}) \right\} - \frac{\nabla p_{i0}^{(n+1)}}{\Delta x_{i0}} - m_i n_{i0} v_{ij} (v_{j0}^{(n+1/2)} - v_{i0}^{(n+1/2)}) \quad (7)$$

$$\frac{n_{j0}^{(n+1)} - n_{j0}^{(n)}}{\Delta t} + \nabla \cdot (n_{j0}^{(n)} v_{j0}^{(n+1/2)}) = v_{ij} n_{j0}^{(n)} \quad (8)$$

$$j_{i0}^{(n+1/2)} = n_{i0}^{(n)} q_i v_{i0}^{(n+1/2)} + n_{e0}^{(n)} q_e v_{e0}^{(n+1/2)} \quad (9)$$

$$\frac{B^{(n+3/2)} - B^{(n+1/2)}}{\Delta t} = -\nabla \times E^{(n+1)} \quad (10)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{E^{(n+1)} - E^n}{\Delta t} = \nabla \times B^{(n+1/2)} - \mu_0 j^{(n+1/2)} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot E^{(n)} = \frac{\rho^{(n)}}{\epsilon} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot B^{(n+1/2)} = 0 \quad (13)$$

x : 粒子要素, ρ : 微視的電荷密度, ϵ : 誘電率
上付添字(n): 計算のタイムステップ
下付添字(i): メッシュ番号, e : 電子

ここで、(12)式と(13)式はシミュレーションを進めていく上で、電磁場の初期条件を求める際に用いる式である。

(6)~(13)式において、中央差分スキームでは物理量 X 、 E 、 n は整数時刻、 v 、 B 、 j は半整数時刻で定義する⁶⁾。また(6)~(13)式は閉じられた系であり、初期条件としてすべての位置での流体密度、速度、電磁場に初期値が設定されれば、時間ステップに従い解くことができる。

図5に基づく差分式の解法手順は以下の①~④の通りとなる。

- ① (6)式において速度 $v_{i0}^{(n+1/2)}$ を用いて流体要素の位置を $x_{i0}^{(n)}$ から $x_{i0}^{(n+1/2)}$ に進める。
- ② (9)式において $x_{i0}^{(n+1/2)}$ 、 $v_{i0}^{(n+1/2)}$ より電流密度 $j_{i0}^{(n+1/2)}$ を求める。
- ③ (10)式及び(12)式を用い、電磁場を $E^{(n)}$ から $E^{(n+1)}$ 、

$B^{(n+1/2)}$ から $B^{(n+3/2)}$ に進める。

- ④ 流体要素を $x_{ij}^{(n+1/2)}$ から $x_{ij}^{(n+1)}$ に進め、(7)式により速度を $x_{ij}^{(n+1/2)}$ から $v_{ij}^{(n+3/2)}$ に進める。

シミュレーションでは、計算の簡略化のため円柱対象なプラズマジェットトーチを2次元円筒モデルで近似する。(1)～(5)式を円柱座標系に書換え、(6)～(10)式の差分を当てはめ計算を行う。

4. 計算条件

プラズマ流の挙動は、電流、電圧、作動ガスの流量と物性及びプラズマジェットトーチノズル部の形状、特にノズル拘束比（ノズル径と拘束部長さの比）などの各パラメータに依存する。プラズマジェットトーチの最適化を図るためには、各々のパラメータとプラズマ流の挙動との相関を明確にしておく必要がある。しかし、初期段階からすべてのパラメータについて条件を設定し、計算を行うことは解析作業を煩雑化させることになる。これまでに実施した開発試験の成果では³⁾、プラズマジェットトーチノズル部の溶融は、ノズル拘束比に大きく影響すると思われる。解析作業の煩雑化を避けるため、計算条件は表1に示すとおり、可変パラメータをノズル拘束比のみとし1.0～5.0まで変化させた。メッシュ径はノズル屈曲部での流動を精密にシミュレートできるようX、Z軸方向ともに0.1mmに設定し、他の条件は現状の装置に合致させた。

5. 計算結果

5.1 プラズマ流の温度分布

ノズル拘束比が1.0、3.0、5.0の場合のプラズマ流の温度分布を図6に示す。

ノズル拘束比が1.0の場合、ノズル出口付近のプラズマ流の中心温度は、8,000K程度と非常に高温となる。また4,000K以上の高温部がノズル径よりも広く分布し、プラズマ流が拡散する傾向にあり、ノズル先端部に大きな熱負荷を与えている。

ノズル拘束比が3.0の場合は、ノズル出口付近のプラズマ流の中心温度が5,000K程度と低くなる。しかし4,000K以上の高温部が、ノズル径と同程度の幅で分布しており、プラズマ流は緊縮したシャープな形状となり、ノズル先端部への熱負荷が軽減されるようになる。

ノズル拘束比が5.0の場合は、ノズル出口付近で高温のプラズマ流が拡散する傾向は全く見られなくなる。しかしプラズマ流は、ノズル出口付近に達するまでに温度が低下し4,000K程度になる。

表1 計算条件

ノズル拘束比	1.0～5.0 (at 1.0)
メッシュサイズ	X軸方向=0.1mm Z軸方向=0.1mm
作動ガス成分	Ar : N ₂ = 2 : 1
作動ガス圧力	圧力=3.5kg/cm ²
プラズマ発生装置電源	電流=250A 電圧=65V

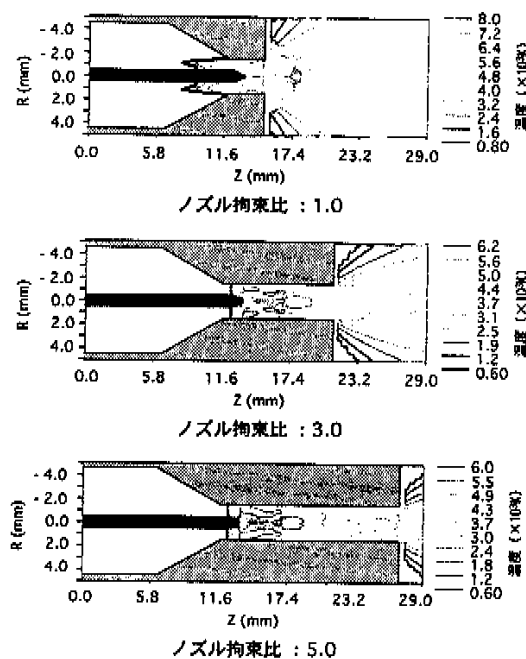


図6 プラズマ流の温度分布

5.2 電子密度の分布

ノズル拘束比が1.0、3.0、5.0の場合の電子の密度分布を図7に示す。

ノズル拘束比が1.0の場合、Z=13mm付近のノズル内壁部に電子密度が $7.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 程度の大きい部分があり、放電箇所が一部分に集中し、放電負荷が大きいことを示している。

ノズル拘束比が3.0の場合は、ノズル内壁部に電子密度が極端に大きい部分は見られなくなり、 $9.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度に均一分布し、放電箇所が分散されるようになる。

ノズル拘束比が5.0の場合でも、ノズル内壁部に電子密度が極端に大きい部分は見られず、放電箇所が分散され、放電負荷が小さいことを示している。また、Z=23mm付近の中心部に、電子密度

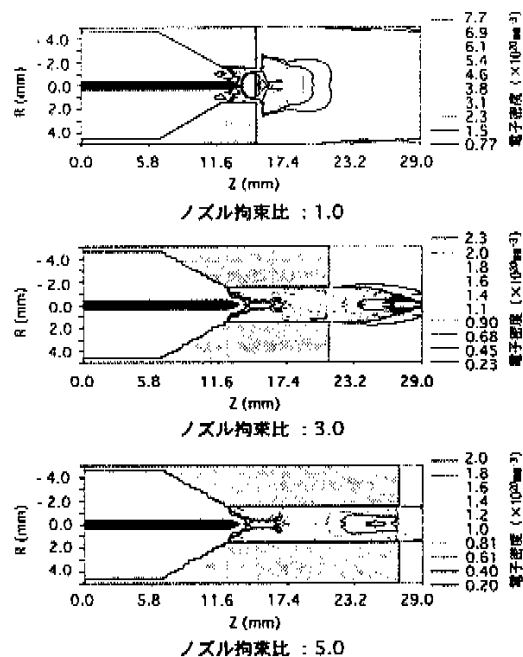


図7 電子密度分布

が極端に小さい箇所が存在している。

5.3 ノズル拘束比とプラズマ温度

ノズル拘束比とノズル先端部における径方向のプラズマの温度との関係を図8に示す。 $R=0$ の位置におけるプラズマ流の中心温度は、ノズル拘束比の増加にともない低下する傾向が見られる。同様に $R=2.0$ 、 4.0 の位置におけるプラズマ温度も低下する。

このことから、ノズル拘束比が小さいほど、プラズマ流の中心温度は高く、切断性能も高くなる。しかし、同様にノズル先端部に接触するプラズマ温度も高くなる。

6. 考察及び検証試験

6.1 プラズマ流の温度低下

ノズル先端部のプラズマ流の温度は、ノズル拘束比の増加に伴い低温化する。これは、図6に示すノズル拘束比が3.0及び5.0の場合のプラズマ流の温度分布において、プラズマ流の中心部($R=0$ 付近)の温度が、 $R=0$ 、 $Z=23.0\sim 25.0$ mm付近で1,000K程度低下するためである。プラズマ流の温度低下は、流体中のプラズマ密度(イオン密度及び電子密度)が減少することを示す。プラズマ密度の減少は、図7に示すノズル拘束比が3.0及び5.0の場合の電子密度の分布において、電子密度が $Z=23.0\sim 25.0$ mm付近で $2.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 程度低下していることから裏付けられる。

このようなプラズマ流の温度低下が生じる理由としては、イオンと電子の再結合によるプラズマ密度の減少が考えられる。プラズマの形成過程は、図3に示すように電極から発生した熱電子が陽極に向かって加速する際、中性原子と電離反応を起こし、電離反応により生じた二次電子が連鎖的に中性原子を電離し、プラズマが発生する。発生したプラズマがノズル内を移動する間に、電子は陽極に吸収され、イオンは陽極の電場によりノズル中心部に拘束される。電子速度が十分に大きい場合、電子は陽極の吸収から逃れ、ノズル内を移動する途中で、ノズル中心部に拘束されたイオンに引き寄せられ、イオンと再結合する。電子とイオンの再結合により、プラズマの密度が減少し、プラズマ流の温度低下が生じる。

6.2 ノズル拘束の選定

ノズル拘束比の選定にあたっては、ノズル先端部への熱負荷と放電負荷の軽減、プラズマ流の温度低下を考慮する必要がある。計算結果から、ノズル拘束比が小さい場合、プラズマ流は高温とな

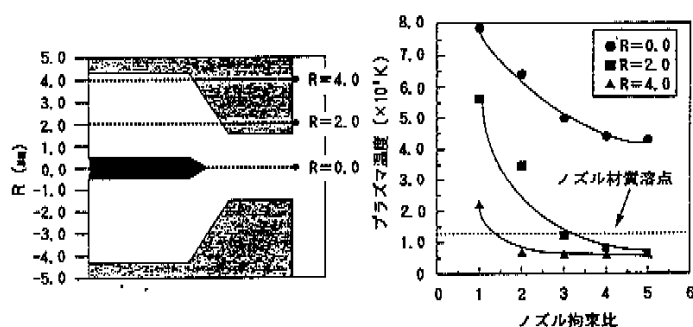


図8 ノズル先端部のプラズマ温度

り、切断性能が向上する。しかし、ノズル先端での拡散と放電箇所の集中により、ノズル先端部が溶融し耐久性が悪くなる。逆にノズル拘束比が大きい場合、プラズマ流の緊縮と放電箇所の分散によりノズル先端部への熱負荷が軽減され、耐久性は向上するが、プラズマ流の温度が低下し、切断性能が劣化する。切断性能を劣化させず、かつノズルの耐久性を向上させるために、ノズル拘束比は、図8においてノズル先端でのプラズマ流の温度がノズル材質(Cu-Zr合金)の溶融温度(1,253K)を下回る3.0に選定した。

6.3 検証試験

シミュレーションにおけるノズル拘束比とプラズマ流の緊縮性、ノズルの耐久性及び切断性能の関係を裏付けるため、図2に示すプラズマ切断装置を用い、実際にプラズマジェットトーチのノズル拘束比を変化させ、プラズマ流の射出及び切断試験を実施した。作動ガスの成分、圧力、流速、プラズマ発生装置の電流、電圧は、表1に示すとおりである。

(1) プラズマ流の観察

ノズル拘束比を変化させた際の、プラズマ流の発生状況を図9に示す。ノズル拘束比が1.0の場合は、ノズル先端でプラズマ流が拡散する傾向にある。ノズル拘束比の増加にともない、緊縮効果が現れ、プラズマ流は槍のようにシャープな形状

ノズル拘束比	ノズル径 (mm)	拘束部長さ (mm)	プラズマ流形状
1.0	3.0	3.0	
2.0	3.0	6.0	
3.0	3.0	9.0	
4.0	3.0	12.0	
5.0	3.0	15.0	

図9 プラズマ流の発生状況

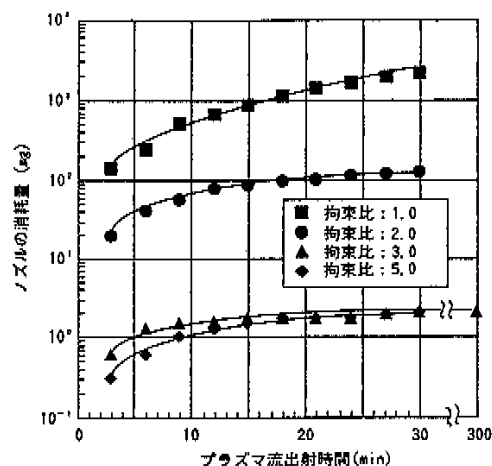


図10 ノズルの消耗量

となる。このようなプラズマ流の発生状況からもシミュレーションによるノズル拘束比とプラズマ流の緊縮性の関係を裏付けることができた。

(2) ノズルの消耗量

プラズマ流の射出時間経過とノズルの消耗量との関係を図10に示す。ノズル拘束比が1.0の場合、時間経過とともにノズルの消耗は増加し、30分で2,000mgに達し、射出できなくなった。ノズル拘束比が3.0及び5.0の場合は、5時間以上射出してもノズルの消耗量は2mg程度である。

プラズマアークトーチのノズルの消耗量も2mg程度であり³⁾、ノズル拘束比が3.0以上のプラズマジェットトーチは実用上十分な耐久性を有していることを確認した。

(3) 切断性能

切断性能を確認する試験には、図11に示すように切断対象物にSUS304のテーパ材(0~50mm厚)を用いた。ノズル拘束比が1.0~5.0のプラズマジェットトーチをスタンドオフ(トーチと切断

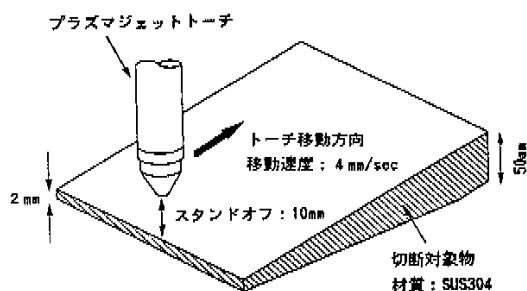


図11 切断性能確認試験

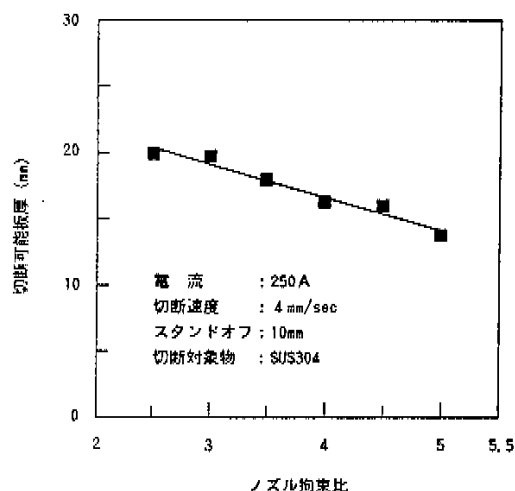


図12 プラズマジェットトーチの切断性能

対象物との距離) 10mmに保ち、4 mm/secの速度で移動させ、その際の切断性能を比較した。試験結果は図12に示すように、シミュレーションによるノズル拘束比と切断性能の関係と同様に、ノズル拘束比が小さいほど切断性能が向上する傾向を示した。シミュレーション結果に基づき選定したノズル拘束比が3.0のプラズマジェットトーチは、20mm厚のSUS板を切断することができ、設備機器の切断に十分な性能を有することを確認した。また、写真1は板厚45mmのSUS板と重コンクリートと同時に切断した状況であり、図13はそれぞれに対する切断性能を示したものである。ノズル拘束比が3.0のプラズマジェットトーチは、重コンクリートのような遮蔽材に対しても金属と同程度の切断性能を有することを確認した。

(4) 耐火物の破砕性能

プラズマジェットトーチの非金属に対する切断

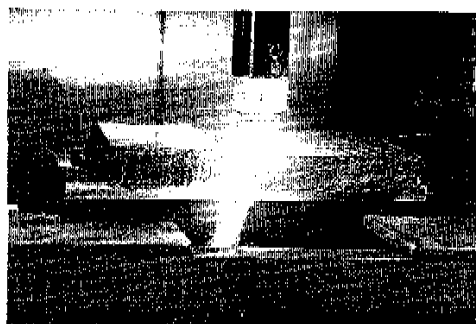


写真1 金属及び重コンクリートの切断状況

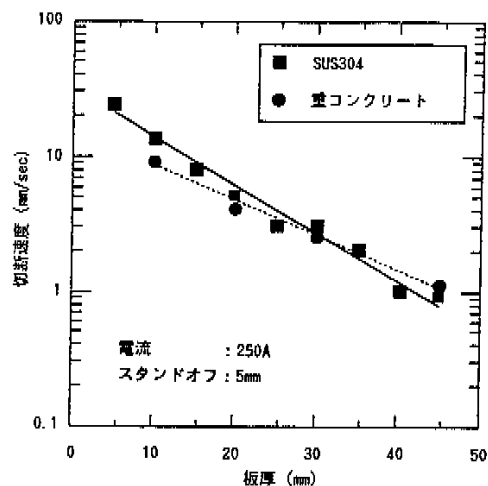
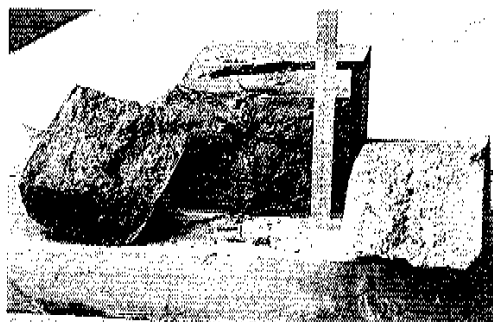


図13 SUS及び重コンクリートに対する切断性能

性能の目標は100mm以上である。シミュレーションにより選定したノズル拘束比3.0のプラズマジェットトーチにより、耐火レンガに対する破砕性能を確認した。試験では、ガラス溶融炉の構成材料で最も硬い150mm厚のK-3電鍍レンガを試験



耐火レンガへの熱衝撃



破砕した耐火レンガ

写真2 耐火レンガの破砕状況

片に用い、ピアッシングによる熱衝撃作用での破碎を試みた。写真2に示すとおり、30秒程度のピアッシングにより150mm厚の電鍍レンガを破碎することができ、ノズル拘束比3.0のプラズマジェットトーチが耐火物に対しても十分な破碎性能を有することを確認した。

7. おわりに

電磁場や作動ガスの物性、流量、ノズル形状の影響により変化するプラズマ流の物理的挙動の明確化、プラズマジェットトーチの耐久性の向上、切断性能の向上とトーチの小型化を目指したプラズマジェットトーチの設計に反映することを目的に、プラズマ流解析コードを開発し、プラズマジェットトーチノズル部の形状をパラメータにシミュレーションを行った結果、ノズル拘束比を3.0に選定することで、ノズルの熔融を低減させ、かつノズル先端で拡散しない(緊縮した)プラズマ流が得られることを見いだした。このシミュレーション結果に基づき、実際にプラズマジェットトーチのノズル拘束比を変化させ、プラズマジェットの出射及び切断試験を実施した。この結果、選定したノズル拘束比3.0のプラズマジェットトーチは、核燃料サイクル施設内の設備機器の切

断を行うために、十分な耐久性と切断性能等を有することを確認した。

今後、プラズマ流解析コードは、物理モデルにおける境界条件をさらに詳しく整備するとともに、プラズマ流とノズル壁面との熱伝達、ノズル壁面と冷却水との熱伝達についてもコード化し、シミュレーションコードとしての充実を図る。またプラズマジェットトーチは、本解析コードにより電流、電圧、作動ガスの流量及び物性等の各パラメータに対するプラズマ流の物理的挙動を更に明確にし、プラズマジェットトーチの性能向上と、狭隘部を有する設備機器の解体にも適用が可能なようトーチの小型化を図る予定である。

参考文献

- 1) 谷本健一, 照沼誠一: “核燃料サイクル施設のデコミッショニング技術に関する研究開発 (動燃大洗工学センターの技術開発)”, デコミッショニング技報 11号, P37, (1994).
- 2) 菅谷敏克, 他: “原子力学会「1992年秋の大会」予稿集”, II-46.
- 3) 福井康太, 他: “原子力学会「1995年春の年会」予稿集”, I-25.
- 4) 橋 輝雄, 他: “実用真空技術総覧”, (財)産業技術サービスセンター.
- 5) 林 泉: “プラズマ工学”, 朝倉書店, (1989).
- 6) 田中基彦, 西川恭治: “高温プラズマの物理学”, 丸善, (1991).