

# 廃棄物処理用 ICP トーチ

片桐 源一(かたぎり げんいち)

榎原 康史(さかきばら やすし)

## ① まえがき

プラズマとは、固体、液体、気体に続く第四の状態といわれ、分子や原子が電離して電子とイオンが電気的中性に存在する状態である。身近な工業製品では、蛍光灯などの照明への利用、LSI (Large Scale Integrated circuit) 製造過程で利用される P-CVD (Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition) など成膜装置としての利用、アーク溶接・溶断などの加工機としての利用などが知られており、プラズマの応用は多岐にわたっている。

近年、環境保全分野において廃棄物減容処理、有害物の無害化・安定化の要求が高まっており、従来からの電気加熱や燃焼熱エネルギー利用に加えて、プラズマエネルギーの利用が注目されている。これらの分野で利用されるプラズマは熱プラズマと呼ばれる性質のもので、中性粒子の温度が電子やイオンの温度とほぼ同じ超高温電離気体である。熱プラズマの特徴の一つは、温度レベルが高く、解離・電離エネルギー移動があり、加熱能力が高いことである。<sup>(1)</sup> 従来から熱プラズマは、大気圧程度の圧力下で、電極間に発生するアーク放電として作られ、利用してきた。例えば溶融装置では、黒鉛電極を用いた交流アーク式溶融炉、銅などの中空円筒電極を用いた水冷電極式プラズマ溶融炉などがすでに実用化されている。しかしこれらのプラズマ装置には、電極が損耗し寿命が短い、雰囲気に合わせた電極材料の選択が必要であるなどの問題点があった。

ICP とは Inductively Coupled Plasma の略称で、プラズマへの電気エネルギー供給を、高周波電流を通電するコイルによって誘導結合的に行うもので、無電極でプラズマ生成を行える点が最大の特徴である。基本的な構成要素は非常にシンプルで、プラズマ容器、ワークコイル、ガス供給機構、高周波電源である。

これまでの ICP の工業的利用には、LSI 製造過程で利用されるドライプロセス装置<sup>(4)</sup>、減圧下でフロンを分解する装置などが知られているが、分析光源以外の熱プラズマ利用例はあまり知られていない。本稿では、廃棄物処理に向けた熱プラズマ利用を目的として開発中の ICP トーチの

概要と環境分野への応用例について述べる。

## ② ICP トーチの原理

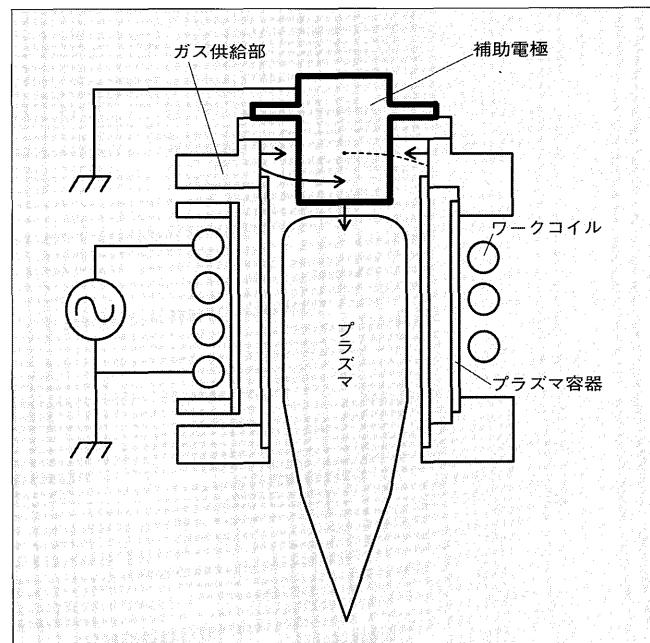
図 1 において、ワークコイルに通電された高周波電流は、時間  $t$  で交番する磁界を発生し、磁束密度  $B$  の変化に従つた式(1)で表される誘導電界  $E$  を生ずる。この電界により電子を加速すると、プラズマが加熱・維持される。プラズマへの供給エネルギーは、式(2)に示すプラズマ導電率と印加電界で決定されるが、導電体であるプラズマへの電界浸透は、式(3)に示す周波数とプラズマの性質で決まる表皮深さに依存する。

$$\text{ICP を加熱する電界の発生} : \text{rot } E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$\text{プラズマへの供給電力} : P = \sigma E^2 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$\text{表皮深さ} : \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

図 1 ICP トーチの概略構成



片桐 源一

イオン注入装置、ECR プラズマ CVD 装置など、放電プラズマ応用技術の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所応用装置研究所プロセス技術グループ副主任研究員。



榎原 康史

スペッタリング装置、ECR プラズマ CVD 装置など、放電プラズマ応用技術の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所応用装置研究所プロセス技術グループ。

$\omega$  : 角周波数  
 $\mu$  : 透磁率  
 $\sigma$  : 導電率

### ③ 4 MHz 駆動 ICP トーチ

#### 3.1 トーチの構成

図1において、ICP装置の基本構成に加えて太線で示した水冷補助電極を備えているのがこのトーチの特長であり、プラズマ容器内へのガス供給構造を内装している。このたび開発した4MHz ICPトーチのプラズマ生成状況写真を図2に示す。主要構成は次のとおりである。

- (1) 石英放電管：内径  $\phi 60\text{ mm}$
- (2) ワークコイル：巻径  $\phi 90\text{ mm}$ , 卷数3回, ピッチ24mm
- (3) 補助電極：外形  $\phi 40\text{ mm}$
- (4) ガス供給：フランジ部－径方向( $r$ )，旋回方向( $\theta$ )  
補助電極部－軸方向( $z$ )
- (5) 高周波電源：4MHz/75kW(真空管方式)

#### 3.2 大気圧自動プラズマ点火

大気圧空間では、電離作用を支配する電子の寿命が非常に短いため放電が起こりにくい。開発中のICPトーチでは、補助電極とヘリウムガスを利用した点火プロセスにより、大気圧下でも容易に熱プラズマ点火を可能としている。

図2 4MHz ICPトーチのプラズマ生成状況

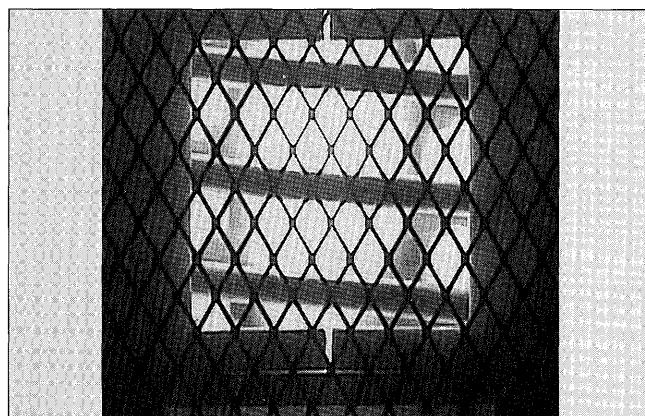
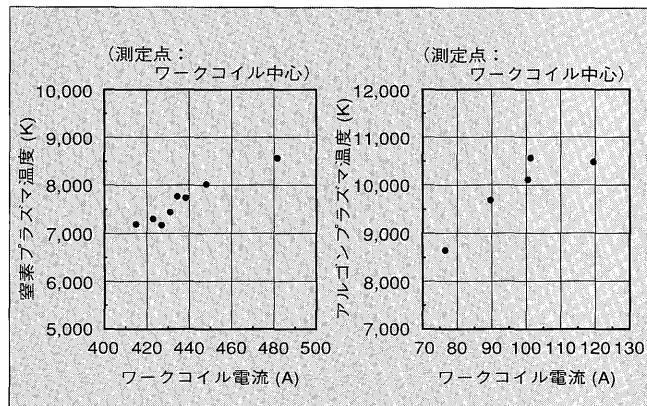


図3 プラズマ温度のワークコイル電流依存性



- (1) ヘリウムガスの初期放電点火
- (2) ヘリウムガス+アルゴンガス混合放電
- (3) アルゴンガス放電に置換
- (4) 高周波電流増加→アルゴン熱プラズマへ移行
- (5) アルゴン熱プラズマ+所望ガス
- (6) 所望ガスに置換→所望熱プラズマを得る

開発中のトーチでは、高周波電流とガス種、ガス量のシーケンス制御による自動点火を実施しており、さらに信頼性を増すために、プラズマ発光モニタを加えた自動点火プロセス監視を可能としている。

また、補助電極はICP維持・安定化に寄与し、ワークコイルとの位置を最適化することで、点火性能を維持しつつ損失を抑えることができる。<sup>(6)</sup> ICPの維持は、ワークコイルの形成する誘導電界によって行われるので、補助電極の消耗がDCトーチのように急速に進展することはない。

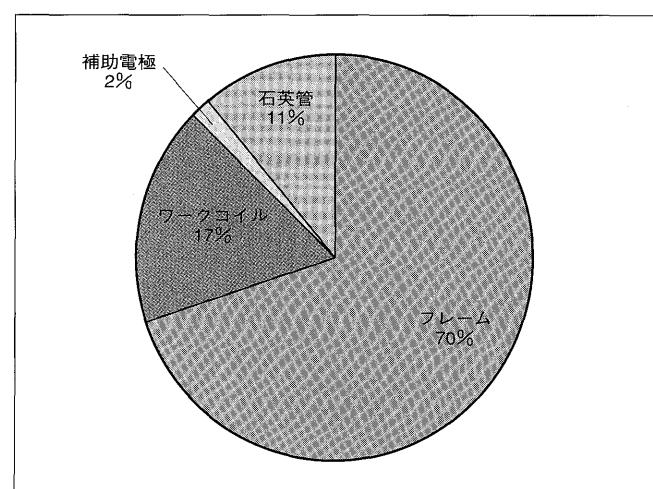
#### 3.3 プラズマ特性の概要

プラズマ発光を使用した線スペクトル強度測定法<sup>(7)</sup>で求めた、アルゴンと窒素の放電管中心プラズマ温度を図3に示す。プラズマの温度は、ワークコイルに起因する電界強度とガスの電離特性でおおむね決定される。窒素は二原子分子のため、電離に至る前に種々の励起状態を持ち励起状態でエネルギーを蓄積するので、アルゴンに比べて温度は低いが、プラズマ維持エネルギー=コイル電流が大きくなっている。そのためアルゴンプラズマに比べて窒素プラズマは大きな熱量を輸送することができる。

ICPの主な熱出力は、プラズマを同伴した高温ガス流であり、トーチから放出された高輝度のガス流をフレームと称している。フレームは高周波電流と、径方向( $r$ )、旋回方向( $\theta$ )の二つの方向に供給しているプラズマガスの割合で制御している。特に $\theta$ ガスは、プラズマとプラズマ容器間の流れを制御して、熱ピンチの作用により放電管の保護を行うとともに熱輸送効果を高めている。

開発したトーチでは、このような基本制御ガスに加えて、補助電極中心からプラズマに向かう軸方向( $z$ )ガス供給制御を行っている。空気をプラズマガスに使用した場合の

図4 トーチ部熱量割合



トーチ部熱量割合を図4に示す。ワーカコイル、補助電極、プラズマ容器の熱量は各部の冷却水量とその温度上昇によって、フレーム熱量はトーチ出口に配置した水冷円筒形熱量測定管を使って同様にして求めた。上記熱量の合計をトーチ入力=100%とすれば、フレーム熱量は70%を占める。現在、空気プラズマで17kWの出力を得ている。

### 3.4 ICP の解析

熱プラズマは超高温かつ高密度であるため、直接計測評価は非常に困難である。そこで、シミュレーションを用いた解析評価を実施している。4MHz大気圧窒素プラズマを生成した場合の、プラズマ温度分布シミュレーション結果を図5に示す。印加磁界強度（実機では高周波電流で制御）を増加させることでプラズマ温度が上昇し、その分布が変化していく様子が把握できる。

シミュレーション環境は、誘導プラズマを軸対称、かつ $\theta$ 、 $z$ 方向ではプラズマ諸量は一定と仮定し、円筒座標系を適用した一次元問題とした。ここで、熱プラズマを熱の発生とその移動として考えると、このプラズマ空間におけるエネルギー保存式および質量保存式は、それぞれ式(4)、式(5)のようになる。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_p V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - W_{\text{rad}} + \sigma E^2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) = 0 \quad (5)$$

$\rho$ ：プラズマ密度

$c_p$ ：比熱

$T$ ：プラズマ温度

$V_r$ ： $r$ 方向の流速

$\lambda$ ：熱伝導率

$E$ ：電界強度

$\sigma$ ：導電率

$W_{\text{rad}}$ ：熱放射損

ここで、 $\rho$ 、 $c_p$ 、 $\lambda$ 、 $\sigma$ などの熱力学定数はプラズマ温度 $T$ の関数である。式(4)において、左辺は単位時間あたりの熱エネルギーの変化を表し、右辺は第1項からそれぞれ径方向に生じている対流による損失、径方向の熱伝導による損失、熱放射による損失、および誘導電流によるジュークル加熱で発生する熱エネルギーを表している。ここで、径方向の対流損は式(5)の質量保存式から得られる $V_r$ を用いて求めている。これは、プラズマ内圧力が一定に保たれていると仮定しているので、圧力を一定にするための密度変化によって生じる径方向の対流を表している。また、式(4)におけるプラズマ入力項 $\sigma E^2$ の電界 $E$ については、マックスウェルの電磁界方程式（円筒座標系）から導出される以下の式(6)～(9)を解くことによって求めている。

$$\frac{dE}{dr} = -\frac{E}{r} - \mu_0 \omega H \sin(\phi_H - \phi_E) \quad (6)$$

$$\frac{d\phi_E}{dr} = \frac{\mu_0 \omega H}{E} \cos(\phi_H - \phi_E) \quad (7)$$

図5 プラズマ温度分布シミュレーション結果

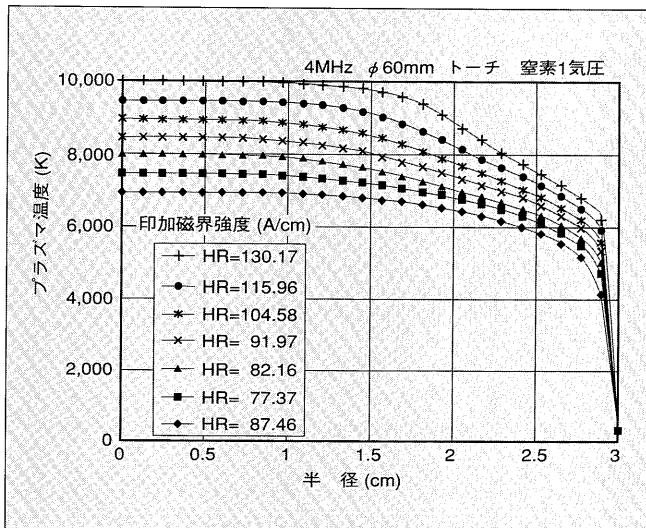
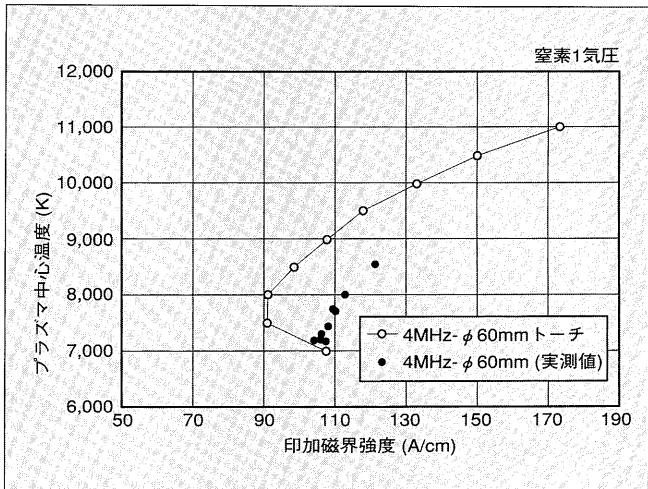


図6 シミュレーション結果と実測結果の比較



$$\frac{dH}{dr} = -\sigma E \cos(\phi_H - \phi_E) \quad (8)$$

$$\frac{d\phi_H}{dr} = \frac{\sigma E}{H} \sin(\phi_H - \phi_E) \quad (9)$$

$\phi_E$ ：電界の位相

$\phi_H$ ：磁界の位相

$E$ ：電界強度

$H$ ：磁界強度

シミュレーション結果と線スペクトル強度法で実測した結果の比較として、プラズマ中心温度と印加磁界強度の関係を図6に示す。実測結果が高磁界強度側にシフトしている原因として、シミュレーションでは考慮されていない軸方向のエネルギー移動分の影響が考えられる。現在、軸方向成分を考慮できるよう、二次元シミュレーション技術の検討を行っている。

## 4 ICP トーチの応用例

### 4.1 焼却灰・雑固体廃棄物溶融への応用

一般・産業廃棄物処理分野では最終処分場不足の問題か

ら焼却灰・飛灰に対して、また、原子力廃棄物処理分野においてもストックヤード建設が困難なことから、金属、コンクリート、アスベストなど雑固体に対して、減容化、有害物の無害化、安定・固定化、再資源化が可能な、溶融固化処理が求められている。<sup>(2)</sup>

溶融への応用は、プラズマを熱源として灰や被溶融物の溶融する温度を作り出し、これらを溶解するものである。また、溶解後の冷却速度や冷却雰囲気を制御することで、ガラス状あるいは岩石状に固化することが可能で、溶融スラグの再資源化が期待できる。

このような背景において、次のような ICP の特徴を生かした応用システムの開発に着手している。

- (1) 無電極で寿命が長く、種々雰囲気の調整が容易  
→長寿命、長メンテナンスサイクル
- (2) 熱プラズマ生成が被処理物の影響を受けない  
→運転安定性拡大、被処理物物性調整不要
- (3) 加熱面積が大きく、雰囲気が穏やか  
→メタル分離性良好、良質スラグ生成

一般焼却灰を ICP によって溶融、その後急冷しガラス状に固化した結果を図 7 に示す。体積は約1/5に減容でき、含まれていた金属も同時に溶融固定化することができた。

#### 4.2 難燃物焼却への応用

炭酸ガス発電形原子炉では、燃料スリープや原子炉の減速材、反射材などに黒鉛が使用されており、運転あるいは廃止措置に伴いこれらの黒鉛が廃棄物として多量に排出される。黒鉛は難燃性で多量に処理することが難しいことから、迅速に焼却処理を可能とする技術が求められている。

ICP による黒鉛燃焼実験状況を図 8 に示す。ICP は無電極放電のため、黒鉛焼却に必要な高温と高い酸素濃度を同時に供給することが可能であり、高速燃焼処理が期待できる。この実験は、大気圧アルゴン ICP をベースに酸素濃度約 50 % の高温出力を作り、流動床による燃焼を行った例で、難燃性の黒鉛が良好に燃焼できた。

#### 5 あとがき

熱プラズマを廃棄物処理など、環境保全において応用するには、エネルギー効率の改善が最も重要な課題である。現在使用している真空管方式の電源は、MHz 以上の高周波発振を数百 kW の大容量で供給でき、プラズマ点火時のような大きな負荷変動に対して高耐力であるが、電力変換効率が非常に低いという問題がある。一方、ソリッドステート方式の電源は電力変換効率が高く、システム効率向上の期待がもたれるが、発振周波数が数百 kHz と低周波である。現在、シミュレーションによる周波数とトーチ径の最適化検討を進めている。

ICP 技術の応用展開にあたっては、トーチ本体を含め利用対象に合わせたシステム全体の最適化を図ることが重要である。今後は、実用化に向けた大出力・高効率化の開発

図 7 ICP トーチによる焼却灰溶融結果

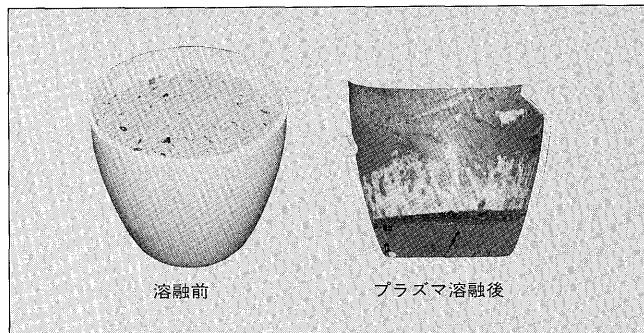
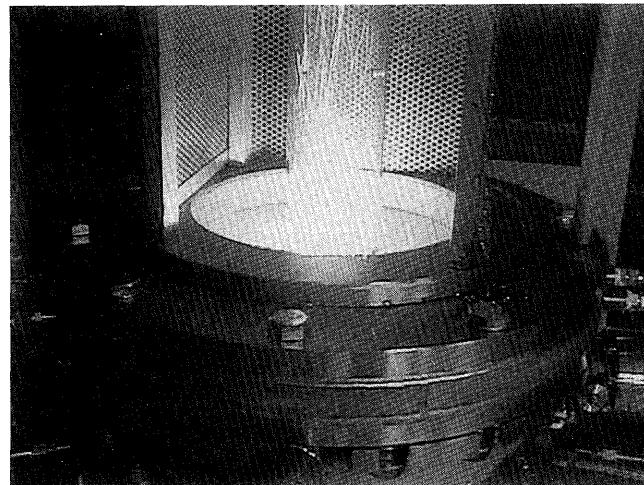


図 8 ICP トーチによる黒鉛焼却状況



を進めると同時に、応用システムの開発を行う予定である。

最後に、ICP の検討を進めるにあたりシミュレーションと解析に多大なご支援をいただいた金沢大学工学部電気情報工学科作田忠裕教授に深謝する次第である。

#### 参考文献

- (1) 神沢淳：熱プラズマの環境技術への利用とプラズマ溶融炉の動向——熱プラズマの環境技術への適用——、ノウハウサポートセンター主催セミナー資料、I-1 (1995)
- (2) 志垣政信：廃棄物の焼却技術、オーム社、p.115-124 (1995)
- (3) 木下勝雄：焼却灰・ばいじんの高度処理技術、エヌ・ティー・エス、p.119-145 (1994)
- (4) 菅井秀郎：低圧力・高密度プラズマの新しい展開、応用物理、Vol.63、No.6、p.559-567 (1994)
- (5) 浦野紘平ほか：フロン分解技術の現状と方向、資源環境対策、Vol.30、No.7、p.609-617 (1994)
- (6) 柳原康史ほか：大気圧高周波誘導結合プラズマの特性とその応用、電気学会閉保護・高電圧合同研究会資料、SP-96-32、p.55-62 (1996)
- (7) 神沢淳：プラズマ伝熱、信山社サイテック、p.132-134 (1992)
- (8) 柳原康史ほか：大気圧高周波誘導結合プラズマの熱収支、電気学会全国大会資料、p.4-464 (1997)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。