

## 第1章

# アークプラズマに関わる 当研究所の取り組みと現状

---

1-1	アークプラズマに関わる当研究所の取り組み	6
1-2	アークプラズマ応用技術の現状	7
1-2-1	アークプラズマとその発生方法	
1-2-2	アークプラズマ応用技術の発展	
1-2-3	アークプラズマ応用技術の特長	

---

## 1-1 アークプラズマに関わる当研究所の取り組み

当研究所が蓄積してきたアークプラズマに関わる技術体系は図 1-1 の通りで、技術の実用化のための課題の解決などを通して、社会や電気事業へ貢献することを目的とした応用研究、応用研究に先立ち共通な課題を先取りして進めてきた基礎研究、さらに、研究を深化拡大し成果の質を向上するため不可欠な基盤研究に分類できる。また、研究の年度展開は図 1-2 の通りである。

応用研究では、低レベル放射性廃棄物の処分コストの低減を目指し、プラズマ加熱技術がその熔融・減容処理へ適応できることを示した。さらに、技術の水平展開を図り超ウラン元素を含む放射性廃棄物へ処理対象を拡大できることを示した。これらの成果を2章にまとめた。次に、熔融技術を活用して、アスベスト廃棄物の無害

化・再資源化を実証した。この成果は3章にまとめた。これらの研究開発では、超高温を容易に発生できるという特長を活かし、廃棄物を全て熔融している。

これに対し、加熱対象を部分的に熔融する応用として、放射性の金属廃棄物の乾式表面除染技術と熱伝導率の高いセラミックスの超微粒子を創製する技術を開発した。アークが電極と接する電極点は、特にエネルギー密度が高く、さらに、減圧下では陰極上の電極点が、金属より酸化皮膜に形成されやすいというユニークな特長を有している。この特長を活かして、金属の表面だけを熔融除去する乾式表面除染技術を確立した。この成果は4章にまとめた。また、セラミックの合成では、超微粒子の合成やミクロンサイズのセラミックス表面に超微粒子を付着させたナノ構造複合粒子の創製に成功し、これを充填したエポキシ樹脂の熱的・電気的特性も明らかにした。ナノ構造複合粒子の創製では、原材料の表面のみを熔融

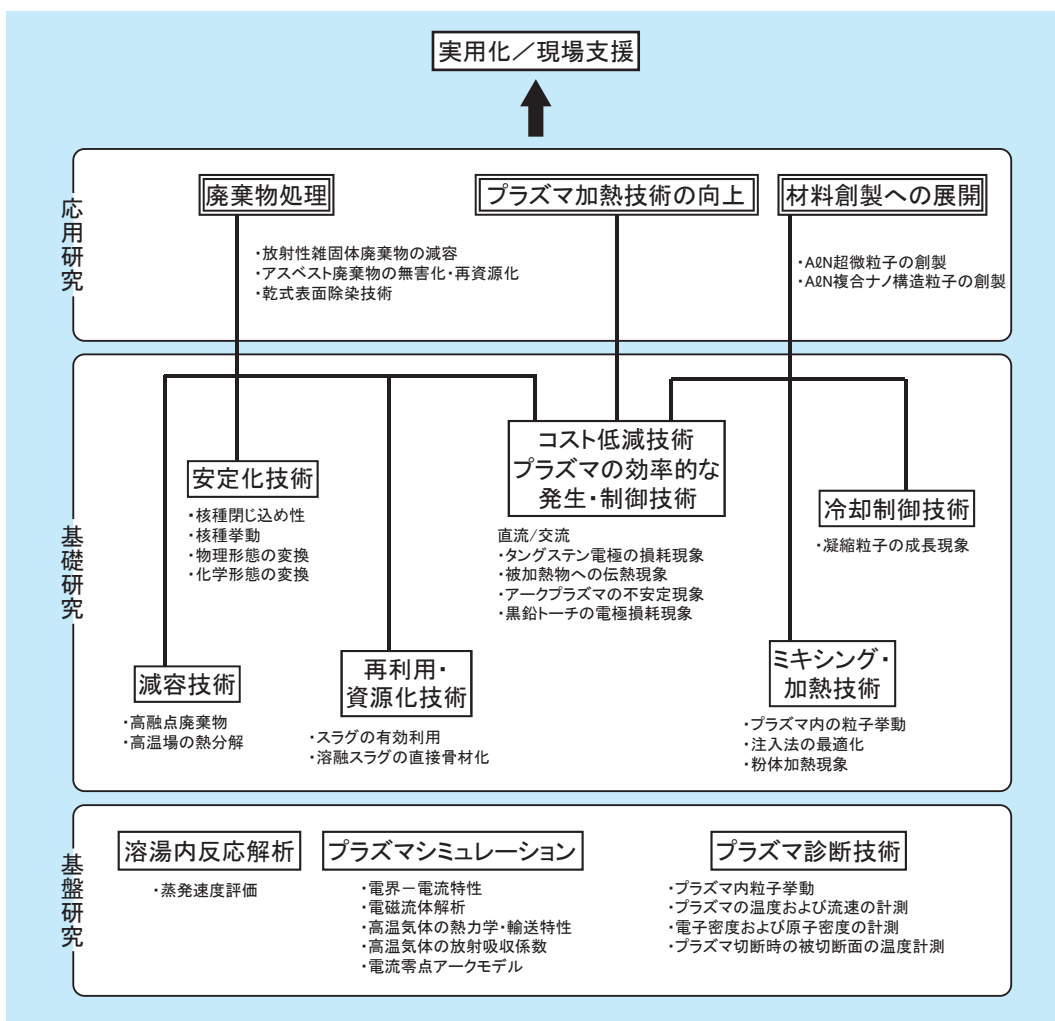


図1-1 当研究所のアークプラズマ応用研究の技術体系

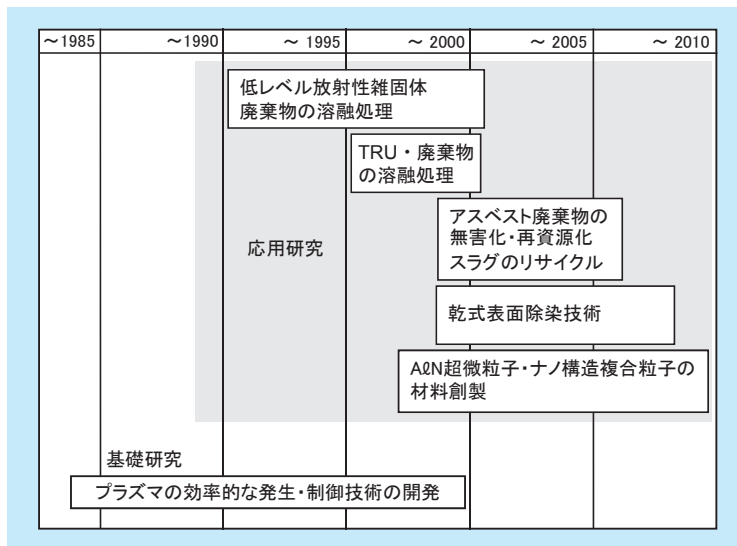


図1-2 当研究所のアークプラズマ研究の展開

蒸発させている。本成果については、5章にまとめた。これらの応用研究に先立ち、あるいは、並行して、アークプラズマの効率的な発生・制御技術の開発に関わる基礎研究を推進した。これらの成果は6章にまとめた。

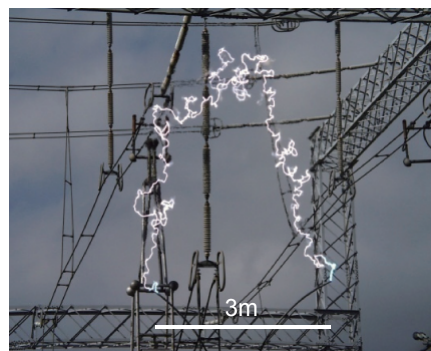
## 1-2 アークプラズマ応用技術の現状

### 1-2-1 アークプラズマとその発生方法

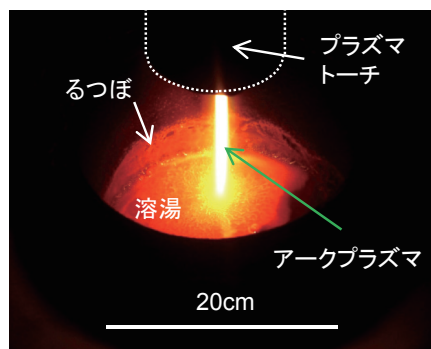
#### (1) アークプラズマとは

アーク放電は、金属の切断や溶接、スクラップ鉄の熔融など、高温の必要な金属・冶金の分野において古くから産業的に利用されている。また、アーク放電は輝度が高いため、既に19世紀にはアーク灯が街路灯として用いられ、現在では、自動車のヘッドランプにも用いられている。

アークプラズマは、アーク放電で発生させたプラズマであるが、本レビューでは、アーク放電をノズルやガス流で拘束し、熱ピンチ効果によって一層の高温と高い指向性をもったものをアークプラズマと限定的に定義している。アーク放電には、自身が作る磁場による電磁力や浮力が作用する。このため、ノズルやガス流による拘束がない場合には、これらの力によりアーク放電は移動し複雑な形状となる。これに対し、ノズルやガス流で拘束したアークプラズマは、真っ直ぐに伸び、加熱など工学的応用において取り扱いが容易である。図1-3にガス流



(a) フリーアーク



(b) プラズマトーチから噴出するアークプラズマ

図1-3 ガス流による拘束のないアークプラズマ(フリーアーク)と拘束されたアークプラズマ

による拘束のないアークプラズマ(フリーアーク)とガス流に拘束されたアークプラズマの写真を示す。また、数10Pa～数kPaの減圧下で発生させたアーク放電(以下、減圧アーク)を用いた乾式除染技術に関する研究成果についても紹介する。

## (2) アークプラズマの発生方法

アークプラズマをノズルやガス流で拘束する装置をプラズマトーチと呼ぶ。プラズマトーチは、運転形態によって、非移行形と移行形に分類できる。非移行形は、電流をプラズマトーチの電極とノズル間に流し、高温のプラズマガス流を利用する運転形態であり、移行形は、プラズマトーチ内の電極と被加熱物の間に通電する運転形態である。また、プラズマトーチは、電極材料とその形状によっても分類される。円柱状のタングステン系の合金や黒鉛を電極とするものをロッド形、中空の銅を電極とするものをホロー形と呼んでいる。ロッド形では、電極の先端に電極点が形成され、ホロー形では電極の内面に電極点が形成される点に違いがある。なお、黒鉛電極のトーチでは、電極の内部に穴が設けられ、そこからプラズマガスを噴出しているものもある。また、ホロー形の場合では、円筒形の電極の内面に接するアーク（電極点）を磁場やガス流によって駆動し、電極内面を均一に損耗させることによって、電極の寿命を延ばす工夫がされている。さらに、電極やノズルの冷却が必要であり、これはエネルギーの損失となる。特に、非移行形の場合、ノズルにも電極点を形成するため、ノズルの冷却損失も大きくなる。しかし、溶融炉などに用いる場合には、炉底に電極を設ける必要がないため、設備が簡素化できる。また、電流経路がプラズマトーチの内部にあるため、外部からの擾乱を受けにくい安定なアークプラズマを発生できる。

プラズマトーチは、直流を用いるものと交流を用いるものがある。直流を用いる場合には、電源に整流装置が必要であるが、アークプラズマを安定に発生させやすい。交流を用いる場合には、電流が零となるところでアークプラズマを消弧させないための工夫が必要である。例えば、電流零点での電流の時間変化率を大きくする電源装置が開発されている。当研究所は、電流零点にパルスを重畳することにより、安定に交流のアークプラズマを発生する技術を開発した。交流プラズマトーチの利点として、例えば、複数のプラズマトーチを用いることにより、炉底電極を省略することが可能となり、既存の溶融炉へ取り付けることが容易になることが挙げられる。

## 1-2-2 アークプラズマ応用技術の発展

プラズマトーチを産業規模での加熱に利用したもので最も古いと思われるものは、黒鉛電極の代替として用いたスクラップ鉄の溶解<sup>(1)</sup>、あるいはアセチレンの合成<sup>(2)</sup>であろう。文献<sup>(1)</sup>によれば、黒鉛電極とスクラップ鉄の接触を繰り返しながらアークを発生させ溶融するアーク炉に比べて、アークプラズマの高い指向性によって、電圧と電流が安定するため入力エネルギーを容易に制御できること、電極の損耗が少ないため品質の高い製品ができることなどの利点が指摘されている。その後、1980年代に入り、超高温を活かして、金属・冶金の分野での産業応用に関する研究開発が多数実施された<sup>(2)</sup>。これらの研究開発の中から、プロセスの技術的・経済的な成立性の評価を経て成功裡な商業運転へと発展した事例がある。さらに、1990年代に入ってから、環境問題への関心の高まりとともに、廃棄物処理の分野での産業応用が拡大してきた。我が国においては、連続製造プロセスにおける溶融鉄の温度制御や都市ごみ焼却灰の溶融処理など<sup>(3)</sup>へ応用されている。

また、アーク放電の照明への応用では、アーク灯が1800年代後半に街路灯に利用されて以降、1900年代中頃には水銀灯が開発されている。その後、メタルハライドランプ、高圧ナトリウムランプなどのHID（High Intensity Discharge）ランプが開発され普及している。HIDランプでは、発光管の管壁負荷（発光管の内表面積あたりのランプの入力電力）が $3\text{W}/\text{cm}^2$ 以上に達している。

その後、単体のアークランプで大きな光束を発生させるために電極や発光管を強制冷却するなどの改良を加え、従来と比べ輝度や光出力が格段に大きい大容量・高輝度アークランプが市販された。その連続光出力は一般の光源や工業用レーザーに比べて10～100倍程度高い120kWで、電気から光への変換効率は約40%が達成されている。このときの放射照度は $2\text{kW}/\text{cm}^2$ に達し、15mm×100mm以上の領域を、数秒以上連続的に照射する能力を有している。

### 1-2-3 アークプラズマ応用技術の特長

アークプラズマ加熱技術の産業応用への事例から、以下に示すようなアークプラズマ加熱技術が有する特長と、それらによってもたらされるプロセス上の利点をまとめることができる。

#### ①超高温を容易に発生できる。

燃焼加熱で達成できる温度は、3,000K 程度までである。これに対し、アークプラズマを用いれば、5,000K を超える超高温を容易に発生させることができる。このため、以下のプロセス上の利点が得られる。

- ・ 被加熱物への伝熱を促進でき速い処理速度を達成できる、言い換えれば、プラントを小型化できる。
- ・ 融点の高い物質も加熱対象となり得る。
- ・ 吸熱量の大きな化学反応や活性化エネルギーの大きな化学反応を促進することができる。

#### ②エネルギー密度が高い。

アークプラズマ加熱では、加熱対象物への熱流束が非常に高い。例えば、金属の切断用のプラズマトーチでは、アークプラズマの中心軸上の熱流束は、300A の電流で  $50\text{kW}/\text{cm}^2$  にも達する<sup>(4)</sup>。このため、局所的な領域に大きなエネルギーを与えることができる。しかし、加熱が局所的になるために、炉全体を効率よく加熱する場合には、プラズマトーチを旋回する、あるいは、炉を回転する、複数本のプラズマトーチを用いるなどの工夫が必要になる。

アークプラズマ加熱も電気加熱の一種であり、その一般的な特長を以降に示す。

#### ③加熱エネルギーが、加熱の場で進行する化学反応に影響されにくい。

燃焼加熱のように化学反応を利用する場合には、加熱は反応熱によって供給される。したがって、反応熱を供給する化学反応を阻害する要因があれば、加熱エネルギーを安定に供給することが難しくなる。一例として、塩化ビニルのようにハロゲンを含む有機材料の燃焼処理が挙げられる。塩素などハロゲン系の元素は燃焼を阻害

するため、燃焼時のエネルギーの発生が不安定になる。

これに対し、電気加熱は、加熱エネルギーを電力で供給するため、加熱エネルギーが場で進行する化学反応の影響を受けにくい。この特長によって、加熱対象物の物理・化学的性質に左右されにくい安定な加熱が達成できる。また、加熱場の雰囲気や酸化性、不活性、あるいは還元性とプロセスの要求に応じて自由に選択できる。

#### ④排ガスが少ない。

この特長は、以下のプロセス上の利点につながる。

- ・ 排ガス処理設備をコンパクトにできる。
- ・ 加熱の場の流速が小さいため、ダストのような粉体や金属加工で発生する切り粉のような微細なものも処理できる。

#### ⑤加熱エネルギーの管理と制御が容易である。

この特長によって、加熱処理の状況や廃棄物の性状に応じた最適な加熱条件の設定などの運転管理が容易になる。

#### ⑥クリーンな加熱ができる。

この特長によって、不純物の濃度を抑制する必要がある材料開発、金属の精錬のように材料製造の最終工程に近いところへも適用できる。

一方、アーク放電の照明への利用では、高輝度、太陽光と色温度が近い、などの特長がある。近年では、放電管に封入する発光物質に工夫がなされ、商業施設や舞台などの照明用のランプだけでなく、光化学反応などに利用する紫外線ランプ、赤外域の波長を利用した加熱用ランプなども普及している。

### 参考文献

- (1) R. J. Mcculough: Plasmarc furnace, a new concept in melting metals, J. Metals, vol. 14, p907 (1962)
- (2) UIE Plasma Processes WG: Arc plasma processes - A maturing technology in industry -, UIE (1988)
- (3) (社) 日本鉄鋼協会 熱プラズマプロセッシング研究部会：熱プラズマ材料プロセッシングの基礎と応用、信山社サイテック (1996)
- (4) (社) 日本溶接協会：プラズマ切断の基礎と実際、廣済堂産報出版、p16 (1983)