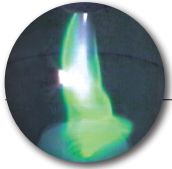


# 電中研 レビュー

DENCHUKEN REVIEW



## アークプラズマとその応用技術

廃棄物処理と材料創製への適用



<b>巻頭言</b> .....	
中央大学工学部教授 稲葉 次紀 ...1	
<b>電中研「アーキプラズマに関する研究」のあゆみ</b> .....	2
<b>はじめに</b> .....	
常務理事 新田 明人 ...3	
<b>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</b> .....	5
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	
<b>第2章 放射性廃棄物の減容処理への応用</b> ...11	
2-1 低レベル放射性廃棄物の減容処理への応用 .....	12
2-1-1 低レベル放射性雑固体廃棄物の発生状況	
2-1-2 アークプラズマ熔融技術の適用性評価 の視点	
2-1-3 熔融固化体の物性	
2-1-4 熔融時の核種挙動	
2-1-5 Csのslag層への捕捉率の推定手法	
2-1-6 研究成果の電気事業への貢献	
2-2 TRU廃棄物処理への応用.....18	
2-2-1 TRU廃棄物の現状	
2-2-2 耐火系るつぼを用いた逐次熔融法の提案	
2-2-3 熔融時の核種挙動	
<b>第3章 アスベストの無害化と再資源化への 応用</b> .....	25
3-1 アスベスト廃棄物の法規制.....26	
3-2 アスベスト廃棄物の無害化.....26	
3-3 アスベスト廃棄物の熔融slagの再資源化 .....	28
<b>第4章 放射性廃棄物乾式表面除染技術への 応用</b> .....	31
4-1 プラズマを用いた除染技術とその特長...32	
4-2 酸化皮膜の除去と推奨処理条件.....33	
4-2-1 適用可能な酸化皮膜種類	
4-2-2 減圧アークの推奨処理条件	
4-3 Co-60含有腐食生成物皮膜に対する除染 性能.....	34
4-3-1 配管形状小試験片を用いた場合における 評価	
4-3-2 Coの汚染形態に対する依存性	
<b>第5章 超微粒子やナノ構造複合粒子など 材料創製への応用</b> .....	37
5-1 電気事業における超微粒子の利用.....38	
5-2 AlN超微粒子の合成.....38	
5-2-1 AlNの高純度化方策	
5-2-2 原材料Al粒子の注入条件	
5-3 AlN球状ナノ構造複合粒子の合成.....39	
5-3-1 複合粒子の円形度	
5-3-2 ミクロンオーダーの粒子と超微粒子 の体積比	
5-3-3 ミクロンオーダーの粒子と超微粒子 の粒径比	
5-4 AlN複合粒子を充填したエポキシ樹脂 の熱伝導率と絶縁破壊強度.....	41
5-4-1 複合粒子を充填したエポキシ樹脂	
5-4-2 全固体変圧器用絶縁材料への適用性	
<b>第6章 応用技術の展開を支える基礎・ 基盤的研究成果</b> .....	43
6-1 アークプラズマの数値解析.....44	
6-1-1 アークプラズマの物性	
6-1-2 アークプラズマの数値解析技術	
6-2 アークプラズマの発生・制御技術.....49	
6-2-1 直流プラズマトーチにおける発生・ 制御技術	
6-2-2 交流プラズマトーチにおける発生・ 制御技術	
6-3 アークプラズマの計測診断技術.....60	
6-3-1 輝線スペクトルの自己吸収を考慮した 温度計測技術	
6-3-2 プラズマの流速計測技術	
<b>第7章 まとめと今後の展望</b> .....	67
<b>おわりに</b> .....	
理事 電力技術研究所長 藤波 秀雄 ...70	
<b>執筆分担</b> .....	71

## アークプラズマとその応用技術



「アークプラズマ」とは何か。自然界では夏の風物詩として「雷」が有名である。「雷」はアークプラズマの一種であり、数千度に達する超高温を有しているものの、時間的には十万分の数秒という超短時間の世界である。瞬間的なインパクトを電気系統に与えるもの

の、エネルギーという仕事量から見ると、僅かなものである。この「雷」を長時間安定的に維持・制御したものが「アークプラズマ」と言えよう。

水を加熱してゆくと、水、水蒸気と相変化し、更に高温に加熱すると、酸素・水素原子に分解し、更に、電子を放出して「物質の第4の状態」である「プラズマ」となる。「アーク」は、一般的に「プラズマ現象」の電気事業における呼称といえる。「アーク」と「プラズマ」の区別が難しいため、「アークプラズマ」と合成して使用する場合が多い。

この「アークプラズマ」には「大気圧熱プラズマ」や、「低気圧高周波プラズマ」など各種の「アークプラズマ」があるが、この内、「熱プラズマ」の特徴としては、「雷」に見られるように、その超高温性、高エネルギー性、高輝度性などが挙げられ、電流を制御することで、ms（ミリ秒）級の高制御性も可能である。これらの特徴を有効に活用して、溶接・切断・溶射などの加工や、金属の還元・精錬などの冶金、化学工業、大規模照明や、超微細なナノテクノロジーなど様々な分野に応用が図られている。

十年ほど前のCOP3京都大会以来、地球温暖化対策を含めた環境対策が世界規模で社会問題化し、環境改善技術の進展が顕著となっている。その一翼として、「アークプラズマ」による廃棄物の処理や減容化が注目されている。特に、土地の狭い日

本では、減容化の効果は甚大であり、医療廃棄物や有害物の無害化・低害化処理にも、その本領を發揮している。

本レビューでは、電気事業における具体的な研究・開発例として、放射性廃棄物の減容処理・乾式表面除染処理、優秀な断熱材ながら発ガン性が発見されたアスベストの無害化と再資源化処理、超微粒子などの新材料創製などに言及している。さらに、これらの研究・開発を支える「アークプラズマ」の基礎特性も解明している。

「アークプラズマ」は、材料の溶融処理の展開技術として、新材料の創製にも如何無くその性能を發揮している。その一例が、本レビューでも紹介されているAlN（窒化アルミ）超微粒子の創製である。本微粒子は、電氣的に絶縁性が高く、しかも熱放散性がよく、エポキシ固体絶縁材に混入させることで、電力機器のコンパクト化に大きく貢献し得る優れものである。また、「アークプラズマ」は、基材表面の洗浄化にも適しており、原子炉解体で生じた放射性廃棄物の表面層を薄く除染することも可能である。さらには、基材表面を凹凸に粗面化し、その表面に溶射膜を密着させることで、基材に対する密着強度を従来の3～4倍に向上させることにも成功しており、「アークプラズマ」の応用範囲はますます拡大している。

この様な「アークプラズマ」応用の発展時期に本レビューが発刊されることは、電気事業のみならず、一般社会への貢献という意味からも、誠に喜ばしい次第である。今後とも、電力輸送を担う送配電系統における絶縁機材の性能向上から原子力発電所廃止措置という広範囲にまたがる高付加価値を持つ技術革新にますます貢献することが期待される。

中央大学 理工学部 教授

稲葉 次紀

## 電中研「アークプラズマに関する研究」のあゆみ

西暦 (元号)	当研究所の状況	国内外の状況
1980年代		・プラズマキューボラ、タンディッシュ加熱など冶金分野への応用研究が内外で活発化
1982 (S58)		・不燃性雑固体廃棄物を対象としたプラズマ溶融処理の電力共通研究終了
1984 (S59)	・アークプラズマの高温物性のプログラム開発に着手	
1985 (S60)		・フラーレンの発見
1986 (S61)	・アークプラズマの電界 - 電流特性の解析プログラムの開発に着手	・旧日本原子力研究所、JPDR(わが国初の発電用原子炉)の解体着手
1987 (S62)		・新日本製鐵(株)(広畑)でタンディッシュ加熱にプラズマトーチが採用
1988 (S63)	・プラズマトーチの長寿命化を目指し、電極の損耗現象に関する研究開始 ・プラズマトーチの大容量化を目指し、新日本製鐵(株)との共同研究開始(~ H2)	
1989 (H元)	・交流アークプラズマの研究開始	・(株)神戸製鋼所(加古川)で交流プラズマトーチをタンディッシュ加熱へ適用
1990 (H2)	・プラズマ溶融炉(1号)の設置 ・低レベル放射性雑固体廃棄物の溶融処理の研究開始 ・第1回 EPRI-CRIEPI 合同国際シンポジウムの開催	
1991 (H3)	・アークプラズマからの放射に関する研究に着手	
1992 (H4)		・日本原燃(株)六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センターの操業開始(均質固化体の最終処分)
1993 (H5)	・100 k W 級プラズマ溶融処理設備の設置 ・第2回 EPRI-CRIEPI 合同国際シンポジウムの開催	・東京電力(株)、川崎製鉄(株)、川崎重工(株)、千葉市が都市ごみ焼却灰のプラズマ溶融の実証試験を開始
1994 (H6)		・松山市南クリーンセンター、都市ごみ焼却灰のプラズマ溶融炉が稼働開始 ・ナノコンポジットの研究が活発化
1996 (H8)	・アークプラズマから被加熱物への伝熱機構の解明に関する研究開始	・イナータム社(仏)がアスベスト廃棄物のプラズマ溶融処理を商業化
1997 (H9)	・TRU 廃棄物のプラズマ溶融処理技術の研究開始	
1998 (H10)	・プラズマ加熱を用いた低レベル放射性雑固体廃棄物の溶融処理に関する総合報告書を発刊 ・アスベスト廃棄物の無害化・再資源化の研究開始	・日本原子力発電(株)、東海発電所を停止
1999 (H11)	・解体廃棄物の処理・再利用に向けたプラズマ溶融技術の研究開始 ・減圧アークによる乾式表面除染技術の研究開始 ・アークプラズマによる材料創製の研究開始	・原子力安全委員会、「主な原子力施設におけるクリアランスレベルについて」を策定 ・ダイオキシンが大きな社会問題となる。 ・PCB 廃液の移動式プラズマ処理装置(カナダ、ラプカナル)の実証試験
2000 (H12)	・超微粒子創製用プラズマ実験装置の設置	・日本原子力発電(株)、東海発電所廃止措置開始 ・六ヶ所低レベル貯蔵センター2号埋設施設(固体状廃棄物)受入開始
2001 (H13)	・減圧アーク除染実験装置の設置	・都市ごみ焼却灰のプラズマ溶融処理施設数が増加(2001-2003年度に国内で16施設が稼働開始)
2002 (H14)	・スラグのリサイクル技術の研究開始 ・回転式溶融スラグ骨材化装置の設置	・中部電力(株)がプラズマ加熱を組み込んだ医療廃棄物処理設備の実証試験を終了
2003 (H15)	・Cs 捕捉率推定手法に関する総合報告書を発刊	・新型転換炉「ふげん」運転終了
2004 (H16)	・配管用減圧アーク除染実験装置の設置	
2005 (H17)		・日本原子力発電(株)、敦賀発電所のプラズマ溶融炉(雑固体減容処理設備)の運用開始 ・クリアランス制度法制化 ・アスベストが大きな社会問題となる。
2008 (H20)		・中部電力(株)、浜岡原子力発電所1号機、2号機の廃止措置を表明
2009 (H21)	・廃止措置で発生する放射性廃棄物を対象とした研究開始	
2010 (H22)	・100kW 級プラズマ溶融処理設備の更新・増強	

# はじめに

常務理事 新田 明人



電気加熱は、①局所加熱ができる、②急速加熱ができる、③かなり自由に加熱雰囲気を選べる、④高温加熱が安定にできる、⑤所要電力の制御と管理が容易である、⑥オン・オフが容易である、⑦加熱対象物を汚染しない、

また、⑧快適な作業環境を維持しやすい、などの優れた特長を有している。これらの特長をうまく活かせば、燃焼加熱を電気加熱に置き換えることによって、1次エネルギー換算で比較して加熱のエネルギー効率が改善されている事例もある。電気加熱の一種であるアークプラズマ加熱では、これらの電気加熱の特長の中で、特に、超高温での加熱・制御を安定に行える点に最大の特長がある。この特長を活かせば、様々な廃棄物処理への適用による環境負荷低減、付加価値の高い新材料創製による技術革新、エネルギー効率の向上による低炭素社会の実現などに貢献できるものと期待される。

当研究所は、原子力発電所の運転や定期点検に伴って発生する金属や無機物などの低レベル放射性雑固体廃棄物の溶融・減容処理へアークプラズマ加熱技術を適用することにより、大幅な減容による処分コストの低減が可能になることを明らかにし、電気事業における本技術の実用化に貢献した。また、アークプラズマ加熱技術を用いて、原子力発電所の廃止措置や老朽化した火力発電所の改修などで発生するアスベスト廃棄物を溶融することで無害化・再資源化できることを実証した。さらに、原子力施設などから発生する金属廃棄物を対象に、大気圧より

低い圧力で発生させたアークを用いる乾式表面除染技術を開発した。

また、黒鉛減速炭酸ガス冷却型炉である東海発電所の廃止措置が進む中、2008年には軽水炉である浜岡原子力発電所1号機、2号機の廃止措置が発表された。このように何れ実施されることになる廃止措置では、これまで研究の対象としてきた運転中の廃棄物とは異なった組成の廃棄物の発生が予想されている。したがって、当研究所では、新たな視点から、このような廃止措置時の廃棄物処理へプラズマ溶融技術を適用するに当たり、その高温による溶融の利点を最大限引き出せるように検討していくこととしている。これにより、引き続き、エネルギー供給を支える原子力発電に貢献していく所存である。

一方、当研究所でのアークプラズマを用いた新材料の創製に関しては、次世代の電力機器用絶縁材料として、熱伝導率が高いセラミックス粉の合成に成功し、その機能・性能の評価を終え、現在、防災性や環境性に優れた全固体変圧器の開発など新たな研究展開を図っている。

以上のような研究の節目にあたり、原子力分野の廃棄物処理のみならず次世代電力機器の開発にいささかでも貢献できることを願いながら、当研究所が20年以上に亘り推進してきたアークプラズマに関する応用開発研究や基礎基盤研究の成果をレビューとして取り纏めた。関係各位のご参考になれば幸いである。

最後に、今後も、アークプラズマ加熱技術の有する優れた特長を活かし、社会や電気事業へ貢献できるよう努力を重ねて参りますので、弊所へのご支援・ご鞭撻の程よろしくお願い申し上げます。



## 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

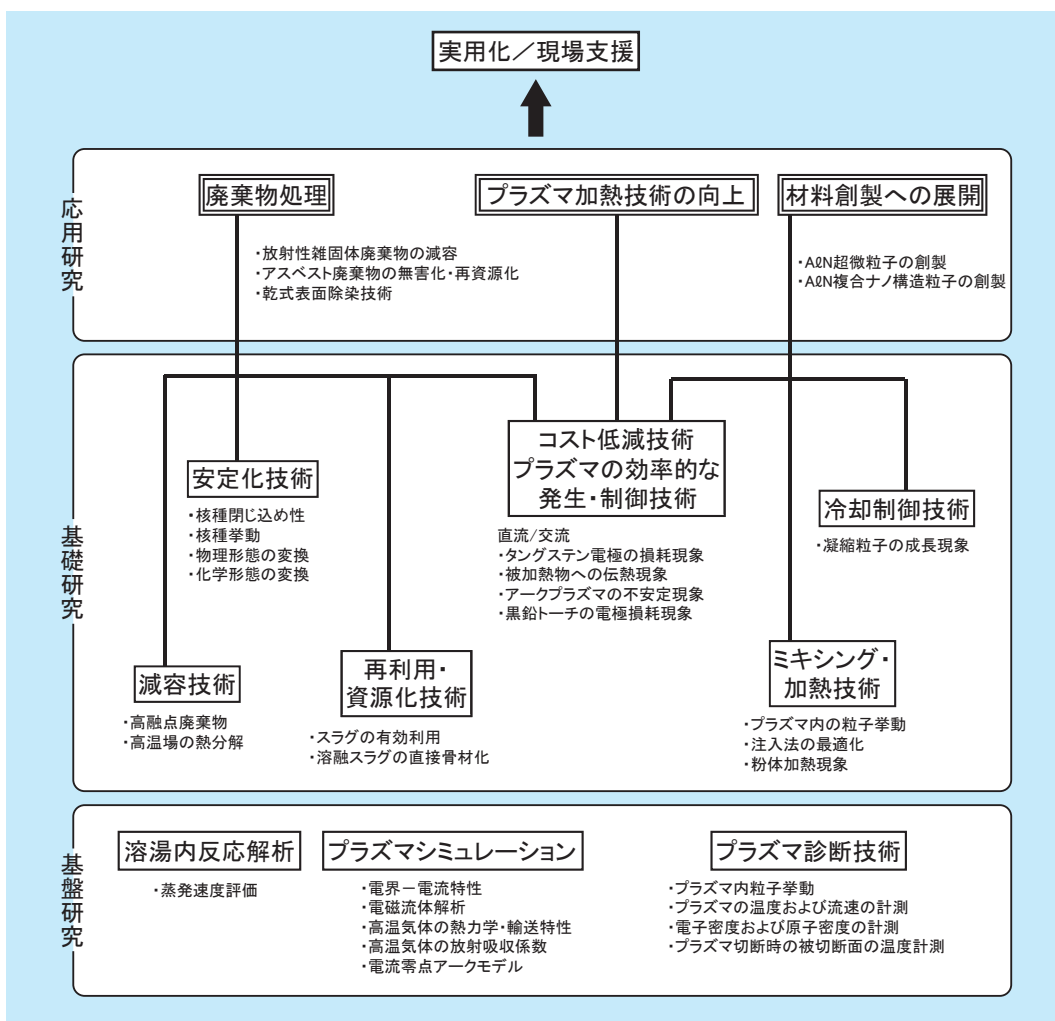


図1-1 当研究所のアークプラズマ応用研究の技術体系



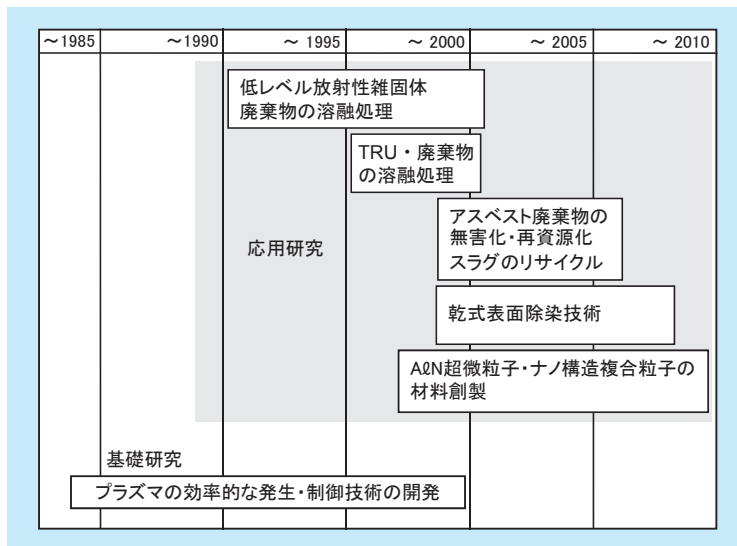


図1-2 当研究所のアークプラズマ研究の展開

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。

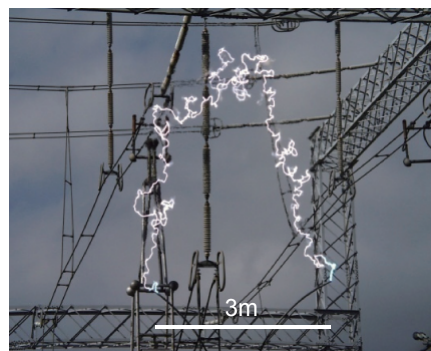
## 1-2 アークプラズマ応用技術の現状

### 1-2-1 アークプラズマとその発生方法

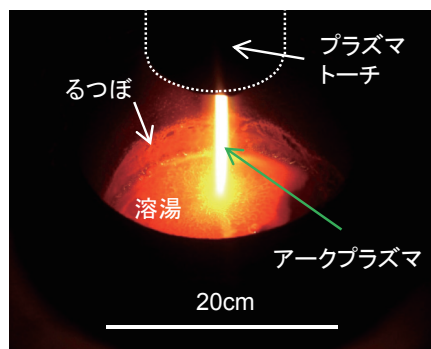
#### (1) アークプラズマとは

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、太陽光と色温度に近い、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. McCullough: 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)



## 第2章

放射性廃棄物の  
減容処理への応用

---

2-1 低レベル放射性廃棄物の減容処理への応用	12
2-1-1 低レベル放射性雑固体廃棄物の発生状況	
2-1-2 アークプラズマ溶融技術の適用性評価の視点	
2-1-3 溶融固化体の物性	
2-1-4 溶融時の核種挙動	
2-1-5 Csのスラグ層への捕捉率の推定手法	
2-1-6 研究成果の電気事業への貢献	
2-2 TRU 廃棄物処理への応用	18
2-2-1 TRU 廃棄物の現状	
2-2-2 耐火系るつぼを用いた逐次溶融法の提案	
2-2-3 溶融時の核種挙動	

---

## 2-1 低レベル放射性廃棄物の減容処理への応用

アークプラズマ加熱は、廃棄物の物理・化学的性質に左右されずに超高温を容易に発生できる。当研究所は、この特長に着目し、低レベル放射性雑固体廃棄物の一括処理へのアークプラズマ溶融技術の適用できることを明らかにした<sup>(1)～(12)</sup>。さらに、最終処分前の放射能量評価に重要なセシウム (Cs) が、溶融固化体に捕捉される割合を推定する手法を確立した<sup>(13)～(15)</sup>。また、これらの処理におけるアークの安定性に関する研究を推進した<sup>(16) (17)</sup>。

### 2-1-1 低レベル放射性雑固体廃棄物の発生状況

原子力発電所から固体状で発生する低レベル放射性廃棄物には、液体廃棄物を固型化処理したもの、発電所の運転や定期点検に伴って発生する金属、保温材などの雑固体廃棄物などがある。最近では雑固体廃棄物の溶融固化設備も順調に稼働しており、雑固体廃棄物を溶融固化した廃棄体も含まれる。低レベル放射性固体廃棄物の年間発生量は、2002年度以降は5～6万本前後で推移し、2007年度の累積保管量は約60万本に達している<sup>(18) (19)</sup>。

また、低レベル放射性雑固体廃棄物の種類別発生割合の調査結果<sup>(20) (21)</sup>によれば、1992年度末で、金属類が最も多く、体積割合で48%、重量割合では70%以上を占めている。次いで体積割合では、塩化ビニル・ゴム類の難燃物、保温材の不燃物、フィルタ類が多い。これらの種類以外に、工事などに伴うコンクリートや、可燃物を焼却処理した後の焼却灰などが発生している。

雑固体廃棄物の特徴としては、その種類が多岐に亘っていること、また、厳密な分別が難しいこと、融点の高い廃棄物も含まれていることが挙げられる。分別が難しい理由として、気体フィルタやケーブル類のように、廃棄物そのものが金属、不燃物あるいは可・難燃物の複数の種類から構成されている場合や、金属部品などが養生用のシートで包まれてドラム缶に収納されている場合があることが挙げられる。また、融点の高い廃棄物の例としては、焼却炉の除塵設備で用いられている濾材（セラミックフィルタ (C/F) エレメント）や土砂などが挙げられる。

### 2-1-2 アークプラズマ溶融技術の適用性評価の視点

本研究を開始した1990年頃では、液体廃棄物を固型化処理した廃棄体の第1次埋設処分事業が許可されたところであり、関連法規制などの整備が行われ、廃棄体の技術基準などが定められていた<sup>(22)</sup>。この技術基準を参考に、低レベル放射性雑固体廃棄物を模擬した試料を溶融する実験を通し、雑固体廃棄物の一括処理へのアークプラズマ溶融技術の適用性を評価するため、次のように適用性を評価する基準を設定した。

#### (1) 溶融固化体の物性

作製した溶融固化体が最終処分に適することを評価するために、以下の物性に対し評価基準を設定した。

##### ①機械的強度

第1次埋設処分では、200ℓドラム缶に固型化された廃棄体は、処分場で鉄筋コンクリートのピット内に積み重ねられた後、モルタルで空隙を埋め覆土される。埋設時には自重などで破損しないだけの強度が廃棄体に要求される。溶融固化体は、比重の違いから下部が金属層、上部がスラグ層の2層構造となり、このうちの脆いスラグ層について一軸圧縮強度を明らかにした。評価の基準は、第1次埋設処分に用いられているセメント均質固化体の一軸圧縮強度（20～50MPa程度）と同等以上であることとした。

##### ②均質性

廃棄物を200ℓドラム缶に直接もしくは圧縮減容して収納しモルタルを充填する固型化方法に比べ、溶融固化体を200ℓドラム缶に収納しモルタルを充填する固型化方法は、比重や核種の分布が均一になりやすいという特長を持つ。このため、廃棄体に含まれる放射能量の評価が容易になる。つまり、廃棄体に含まれる放射能量の確認には、計測の比較的容易なCo-60（コバルト）とCs-137の放射能量を実測し、他の核種については予め定めた適切な係数を乗じて求めるスケーリングファクタ (SF) 法<sup>(23)</sup>などが適用される。この際、比重やCoとCsの濃度の分布が均一であれば、計測結果の誤差評価などが容易になる。均質性の評価基準は、高周波誘導加熱<sup>(24)</sup>や誘導加熱など<sup>(25) (26)</sup>による報告を参考にして、溶融固化体の金属層とスラグ層の各々について、比重と

模擬核種の濃度の変動係数（標準偏差を平均値で除した値）が10%より小さいこととした。

③核種閉じ込め性

最終処分場では、廃棄体はモルタルを通過した環境水に接する。廃棄体から環境水への核種の溶出率は、処分場の設計などに重要である。ここでは、熔融固化体の脱イオン水中での模擬核種の溶出率を、高レベル放射性廃液のガラス固化体の結果<sup>(27)</sup>と比較した。また、処分場の環境水を模擬した溶出液での溶出率も取得し、核種閉じ込め性を評価した。

(2) 熔融時の核種挙動

熔融処理では廃棄物を融点以上に加熱するため、飽和蒸気圧の高い元素は揮発しやすい。熔融時の核種挙動を明らかにしておくことは、処理時の放射線防護と廃棄体に含まれる放射エネルギーの確認の観点から重要である。後者の観点については、SF法が雑固体廃棄物の埋設処分においても適用される場合、飽和蒸気圧の高いCsが熔融固化体に捕捉される割合を明らかにしておくことが重要である。これは、Csの熔融固化体への捕捉率が100%に満たない場合には捕捉率を考慮してCsをキー核種とする他の難測定核種の放射エネルギーを補正する必要があるためである。

(3) 低レベル放射性雑固体廃棄物の模擬方法

低レベル放射性雑固体廃棄物の発生状況から、これを模擬する試料として、炭素鋼などの金属、コンクリート、保温材、飛灰、土砂などの不燃物、木材やポリエチレンなどの可燃物を選んだ。また、放射性核種を模擬する元素には、第1次埋設処分の申請書記載核種を参考に<sup>(23)</sup>、Co、ニッケル(Ni)、レニウム(Re)、ニオブ(Nb)、セリウム(Ce)、ストロンチウム(Sr)、Csの非放射性の7元素を選んだ。ReとCe以外の元素は、申請書記載核種の非放射性同位元素である。ReとCeは、それぞれ、テクネシウム(Tc)とα核種の代替として用いた。これらの模擬試料を模擬核種と共に、当研究所の100kW級プラズマ熔融処理設備を用いて熔融し、上述の熔融固化体の物性や熔融時の核種挙動から、アークプラズマ熔融技術の適用性を評価した。

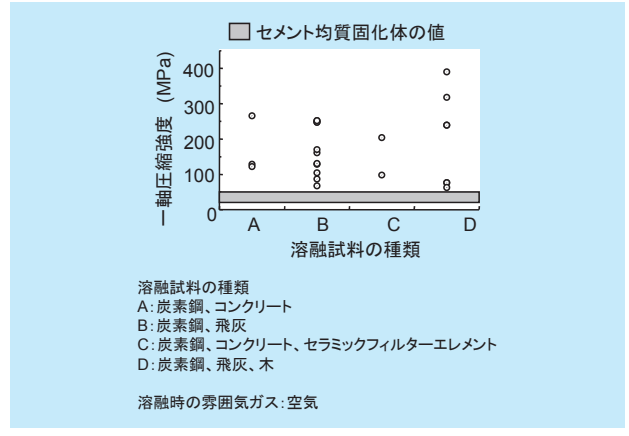


図2-1-1 スラグ層の一軸圧縮強度

2-1-3 熔融固化体の物性

(1) スラグ層の一軸圧縮強度

スラグ層の一軸圧縮強度は、JISR1608に準拠し計測した。試験片の大きさは5mm×5mm×15mm(高さ)である。図2-1-1に熔融試料の種類を変えた場合のスラグ層の一軸圧縮強度を示す。いずれの試料でも、スラグ層の圧縮強度は、ばらつきがあるものの第1次埋設処分に用いられているセメント均質固化体の圧縮強度(20~50MPa)と比較して高い値である。また、図には示していないが、第1次埋設処分に用いられているセメント均質固化体の技術基準<sup>(22)</sup>である1.5MPaと比較しても十分高い値である。なお、ばらつきは、作製した試験片の圧縮面の平行度が加工上ばらついたことなどが原因と考えられる。

(2) 均質性

炭素鋼、飛灰、木片を空気比2で一括熔融して得られた熔融固化体中のスラグ層と金属層のそれぞれについて、模擬核種の濃度と比重の分布を図2-1-2に示す。分析用の試料は、それぞれの層の中心軸上の上下2箇所と、円周方向上の2箇所から採取した。なお、空気比とは、可燃物を完全燃焼させるために必要な理論的な空気量に対し、炉内へ注入している空気量の比を表す。すなわち、空気比2の条件では、完全燃焼に必要な空気量の2倍の量の空気を炉内へ注入した条件である。図に示した結果では、金属層の比重、金属層中の模擬核種(Co)の変動係数は、それぞれ、2.8%、1.6%である。また、スラグの比重とスラグ層中の模擬核種(Cs)の変動係数は、

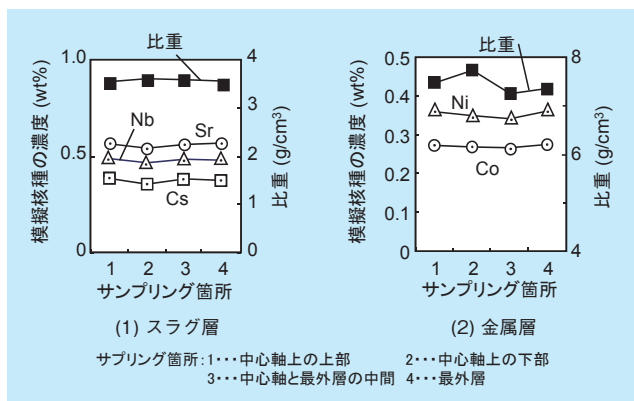


図2-1-2 溶融固化体の金属層とスラグ層の比重と各層中の模擬核種の濃度の分布

それぞれ、0.9%、3.4%である。

上述以外の溶融試料についても、SF法を適用する際に重要な比重、CoとCsの濃度変動係数は、ばらつきの指標とした10%以下であり、均質な溶融固化体が作製できると判断した。均質な溶融固化体が作製できるため、廃棄体の放射能濃度や放射能量の確認が容易になる。

### (3) 核種閉じ込め性

#### ①金属層の核種閉じ込め性

得られた溶融固化体の金属層に捕捉された模擬核種は、Co、Ni、Reであった。金属層から試験片を切り出し、MCC-IP法（静的溶出試験法）に準拠し、これらの模擬核種の溶出試験を実施した。その結果、溶出溶液に検出された模擬核種はNiとReで、Coは検出下限以下であった。また、Reの溶出率は、NiやCoの場合に比べて高く $10^4 \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 未満で、NiやCoの溶出率は $10^5 \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 未満であった。Reの溶出率が他の元素に比べて若干高い理由は、Re以外の金属は、その水酸化物が水に溶けにくいいため沈殿物を形成しやすいのに対し、Reは水中の溶存酸素に酸化され可溶性の過レニウム酸が生成されたためと推測している。Reの溶出率の溶出期間に対する変化を図2-1-3に示す。図には、空気飽和水中での定常状態での鉄の腐食速度も示した。この値は、pHが4～10の範囲ではほぼ一定で、 $(1.0 \sim 2.5) \times 10^4 \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ である<sup>(28)</sup>。図に示したReの溶出率は、溶出期間が28日以上で、ばらつきがあるもののこの値より若干小さい値である。難溶性の水酸化物を形成するRe以外の金属の溶出率は、沈殿物の形成のために鉄の腐食速度よりさらに小さくなったと判断できる。

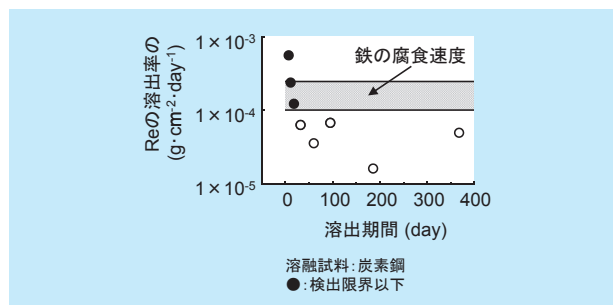


図2-1-3 脱イオン水に浸漬した金属層からのReの溶出率の経時変化

以上から、金属層からの模擬核種の溶出率は、 $10^4 \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 未満で、母層の主要な構成元素である鉄の腐食速度より小さいことを明らかにした。

#### ②スラグ層の核種閉じ込め性

得られた溶融固化体のスラグ層に捕捉された模擬核種は、Sr、Nb、Cs、Ceであった。スラグ層から試験片を採取し、MCC-IP法（静的溶出試験法）に準拠し、これらの模擬核種やスラグの主要構成元素に着目して溶出試験を実施した。脱イオン水中での溶出試験の結果、脱イオン水中で検出された模擬核種はSrのみで、その溶出率は $10^8 \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 未満であった。検出限界以下であった他の核種を含め、検出下限値を用いて求めた溶出率は $10^7 \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 未満であった。

#### (A) 溶出液がスラグ層の核種閉じ込め性に及ぼす影響

高レベル放射性ガラス廃棄物の溶出に関する研究において、ガラスを構成する酸化物や珪酸塩のモル分率と水和反応の自由エネルギーの積を求めその総和が小さい程、ガラスの溶出率が大きくなることが報告されている<sup>(29)</sup>。そこで、スラグ層の主要な構成成分の中で水和反応の自由エネルギーの大きな $\text{SiO}_2$ に着目し、スラグ層の $\text{SiO}_2$ （二酸化ケイ素）の含有量に対しSrの溶出率をプロットして図2-1-4に示す。溶融試料の組成の影響を受けスラグ層中の $\text{SiO}_2$ の含有量の低下とともに、Srの溶出率は増加した。また、処分場の環境水を模擬したモルタル平衡水中での溶出率は、脱イオン水中の場合と比較して小さい。これは、モルタル平衡水では、脱イオン水に比べてSiなどの元素が溶出試験の開始時点で既に溶け込んでいるため、脱イオン水に比べ短時間でSiの濃度が飽和し、母層の溶解を制限したと考えられる。この結果は、



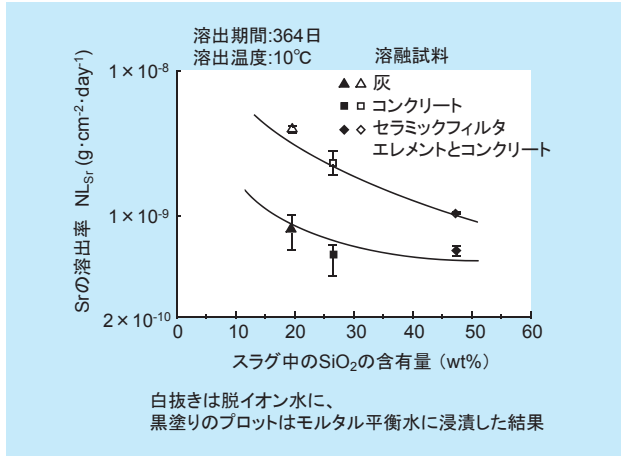


図2-1-4 スラグ層のSiO<sub>2</sub>の含有量とSrの浸出率

脱イオン水を用いた溶出試験を行えば、溶出率を過小評価しないことを示している。

(B) スラグ層の核種閉じ込め性の高レベルガラス固化体との比較

低レベル放射性雑固体廃棄物の組成が広範囲に亘っていることや、炉内の酸素濃度などの溶融処理条件により、スラグ層は、ガラス質から岩石質まで幅広い性状を呈する。このようなスラグ層に対し、溶出率を決定する変数を確定できれば、廃棄物の種類が変動した場合でも溶出率を推定でき核種閉じ込め性を評価できる。一方、スラグ層中の核種は、スラグの網目構造を構成するSiなどの原子やOなどと結合して、網目構造の中に閉じ込められている。このため、スラグ層からの核種の溶出は、スラグ層中を拡散して溶出するような機構ではなく、母層の溶解と共に溶出する機構に支配されていると考えられる。

スラグ層を構成する酸化物は、網目構造を構成する酸性酸化物と、それを切断する塩基性酸化物に分類できる。酸性・塩基性の違いは、スラグを構成する陽イオンと酸素イオンの相互作用の強さによって判断することができ、相互作用が強いほど酸性を、弱いほど塩基性を示す<sup>(30)</sup>。酸性・塩基性酸化物を含むスラグの性質（正確にはスラグ中の酸素イオンの活量）を便宜的に表す指標として、塩基度が用いられる。工業的には塩基度としてCaO/SiO<sub>2</sub>の重量比がよく用いられている。しかし、これ以外にも、それぞれの酸化物の重量比の総和の比やモル分率の総和の比、などいくつかの定義がある<sup>(31)</sup>。

スラグが水に接した場合、ガラスに含まれるアルカリ金属やアルカリ土類金属が、水に含まれる水素イオンとの電荷交換により選択的に溶け出す過程が報告されている<sup>(32)</sup>。そこで塩基性の酸化物が多いほど母層の溶解が進みやすいと考え、得られたスラグの主要な構成成分(SiO<sub>2</sub>: 15 ~ 51wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 2 ~ 26wt%, CaO: 0 ~ 14wt%, FeO: 0 ~ 56wt%, MgO: 0 ~ 40wt%) から、いくつかの塩基度を定義した。スラグ層からの溶出試験結果とこれらの塩基度との相関性を評価した結果、これらの5つの酸化物のモル分率を用いた塩基度で溶出率が予測できることが明らかになった。結果を図2-1-5に示す。図ではスラグの網目構造を形成するSiの溶出率について示した。図から、塩基度が高いほど溶出率は大きくなることが分かる。これは、塩基度の高いスラグほどイオン結合性が高く、誘電率の大きな水によってその結合が切断されやすくなるためと考える。

次に、プラズマ溶融で得られたスラグ層からのSiの溶出率を高レベル放射性廃棄物のガラス固化体のそれと比較し表2-1-1に示す。表の注に示したように、溶出試

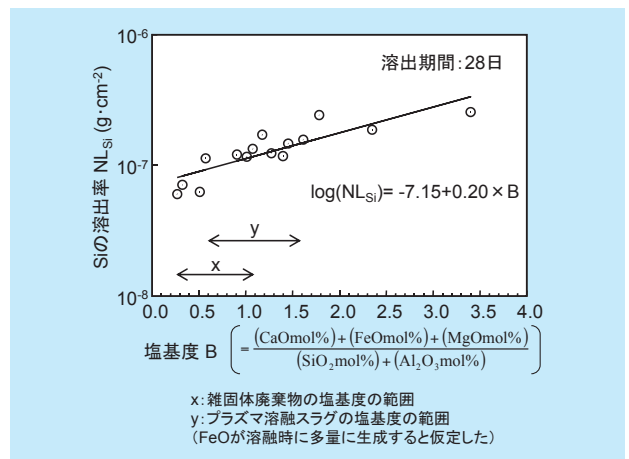


図2-1-5 Siの溶出率の塩基度への依存性

表2-1-1 プラズマ溶融スラグと高レベルガラス固化体のSiの溶出率の比較

固化体の種類	溶出率 (g·cm <sup>-2</sup> )	溶出条件		
		期間 (日)	温度 (°C)	SAV <sup>a</sup> (cm <sup>-1</sup> )
プラズマ溶融スラグ	2×10 <sup>-7</sup>	91	10	100
高レベルガラス PNL76-68 (アメリカで開発)	3×10 <sup>-6</sup>		10 <sup>b</sup>	100
高レベルガラス ABS39 (スウェーデンで開発)	1×10 <sup>-8</sup>		10 <sup>c</sup>	100 <sup>d</sup>

\*a: (試験片の表面積) / (溶出液の容積)  
 \*b: 活性化エネルギーを15kcal/mol<sup>(33)</sup>として90°Cの結果<sup>(34)</sup>を外挿  
 \*c: 活性化エネルギー<sup>(27)</sup>を用いて90°Cの結果<sup>(35)</sup>を外挿  
 \*d: SAVと溶出量の関係<sup>(34)</sup>から推定

験条件の違いを考慮した。図 2-1-5 から、低レベル放射性性固体廃棄物の熔融時に FeO が多量に生成されることを想定すると塩基度の最大値は 1.6 と推定されるため、スラグ層からの溶出率は、91 日の溶出期間で  $2 \times 10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  となる。このことからスラグは、ガラス固化体と比較して遜色の無い核種閉じ込め性を有していると判断できる。

以上から、スラグ層の溶出については、脱イオン水を用いた試験を実施すれば、過小評価しないことが分かった。また、スラグ層は、高レベルのガラス固化体と比較して遜色のない核種閉じ込め性を有していることが分かった。

### 2-1-4 熔融時の核種挙動

図 2-1-6 に、炭素鋼、飛灰と木片を一括熔融処理した場合の核種挙動の結果を示す。Co と Ni は安定に金属層へ、Sr、Nb と Ce は安定にスラグ層へ捕捉された。また、飽和蒸気圧が高い Cs と Re については、それらの一部がダストへ捕捉された。ただし、Re は、実験に用いた酸化物の形態では、その沸点が低いため揮発しやすいものの、熔融時に金属へ還元されやすく、金属の沸点は  $3,000^\circ\text{C}$  以上と高いため、比較的安定に金属層へ捕捉されやすい。

金属層へ捕捉されるか、スラグ層へ捕捉されるかを判断する目安として、図 2-1-7 に示す酸化物の標準生成自由エネルギーがある。すなわち、溶湯の主要な構成要素である鉄に比べ、酸化物の標準生成自由エネルギーの小さな元素は、酸化されやすくスラグ層へ捕捉されやすい。逆に、標準生成自由エネルギーの大きな元素は金属層へ

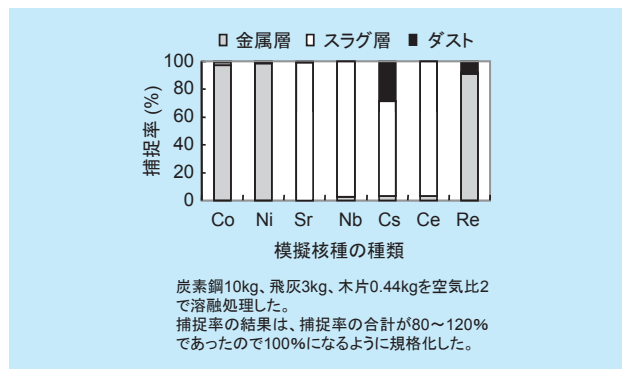


図2-1-6 模擬核種の熔融時の挙動

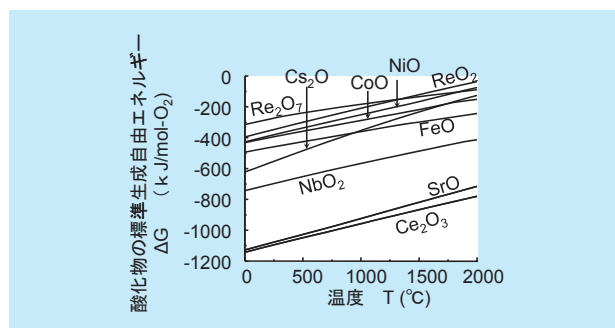


図2-1-7 酸化物の標準生成自由エネルギー

捕捉されやすい。このため、Co、Ni と Re は金属層へ、Sr、Nb と Ce はスラグ層へ捕捉されたと考える。また、Cs については、酸化物の標準生成自由エネルギーは、 $900^\circ\text{C}$  付近より高温側で鉄に比べて大きい。しかし、Cs の沸点が  $678^\circ\text{C}$  と低いために金属層では安定に存在できないと考えられる。さらに、Cs の酸化物は、 $350 \sim 400^\circ\text{C}$  で分解するため高温では不安定である。しかし、 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$  ガラスにおいて、 $\text{Na}_2\text{O}$  のモル分率が低い場合に Na が  $\text{SiO}_4$  の無秩序な 3 次元の網目構造の中に捕捉されているという機構<sup>(36)</sup>と同様の機構によりスラグ層に捕捉されたと考えられる。

次に、SF 法 (p12 参照) のキー核種である Cs の捕捉率に対し、熔融試料や熔融時の炉内のガスの種類の影響を調べた。その結果、炉内が空気や不活性なガスなら不燃性廃棄物の種類を変えても、50%以上がスラグ層に捕捉された。しかし、図 2-1-8 示すように、炉内を連続的な還元性の雰囲気とすると Cs の捕捉率は低下した。な

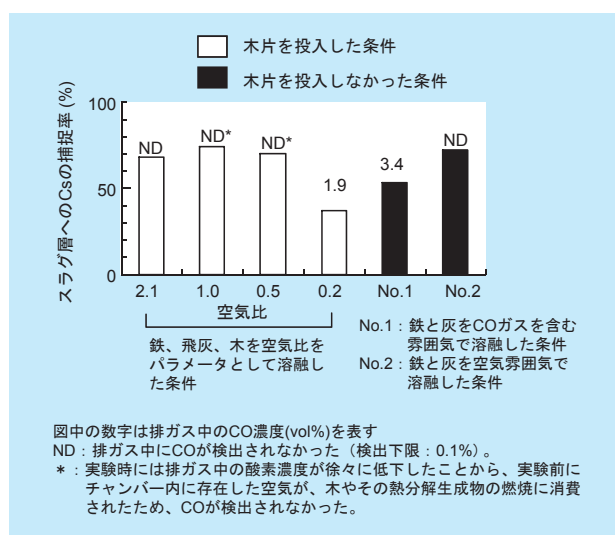


図2-1-8 Csのスラグ層への捕捉率

お、空気比が小さい場合には、酸素が不足した状態で可燃物を処理している状態になり、CO、H<sub>2</sub>、すななどが発生し還元性の雰囲気になる。逆に空気比が大きい場合には酸化性の雰囲気となる。

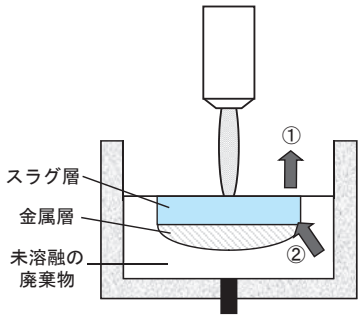
以上のようにCsの挙動の観点から、炉内が定常的に還元性の雰囲気とならない溶融条件を設定する必要があることを明らかにした。

**2-1-5 Csのslag層への捕捉率の推定手法**

**(1) Cs捕捉率を推定するモデル**

Csは、廃棄物の放射能評価に用いられるSF法(p12参照)のキー核種で、廃棄体に一定割合以上捕捉される必要がある。しかし、前節に示したように、沸点が低いためその一部が溶融処理時に揮発する。そこで、廃棄物の組成や処理時間などが変わった場合にもCsの捕捉率を適切に予測するため、Csの捕捉率を推定する手法を確立した。

Csの捕捉率を推定するために構築した溶融処理時のCsの挙動モデルを図2-1-9に示す。本モデルは、溶融時にslag表面からCsが揮発しslag中のCs濃度が減少すること(同図①)、同時に、廃棄物の溶融によって廃棄物中のCsがslagへ流入しslag中のCs濃度が増加すること(同図②)を示している。slag表面からのCsの揮発は、廃棄物が完全に溶融した後のslag中のCs濃度の経時変化を計測することによって、slagの単位体積あたりの表面積とslag中のCs濃度に比例すること、すなわち、1次の反応速度式で表せることを明らかにした。このモデルに基づき、溶融時のCs濃度の経時変化は、(2-1-1)式で表すことができる。



①溶融したslag層表面からCsが揮発する。  
②未溶融の廃棄物が溶融されCsがslag層へ流入する。

図2-1-9 溶融処理時のCsの挙動のモデル

同式の右辺の第1項がslag表面からのCsの揮発によるCs濃度の減少を、第2項が廃棄物の溶融によるCs濃度の増加を表している。

$$\frac{dN}{dt} = -k \cdot \frac{A_s}{V_s} \cdot N + \frac{\Delta w}{W_s} \cdot (N_0 - N) \tag{2-1-1}$$

Nはslag中のCs濃度、tは時刻、kはCsの蒸発速度定数、A<sub>s</sub>はCsが蒸発するslagの表面積(気中と接している面積)、V<sub>s</sub>はslagの体積、Δwは廃棄物の溶融速度、W<sub>s</sub>はslag重量、N<sub>0</sub>は廃棄物中のCs濃度である。

廃棄物の溶融が完了した時点でのCsの捕捉率Ne(%)をより簡便に求める方法として、(2-1-2)式を用いることもできる。この導出にあたっては、以下を仮定している。

- ・溶融が進み溶融したslagが溶融炉の全域を覆っている(A<sub>s</sub>が溶融炉の断面積Aと等しくなる)。
- ・廃棄物の溶融速度は一定とする(Δwが一定)。
- ・slag表面からCsが揮発する速度と廃棄物の溶融によってCsがslagに流入する速度がバランスするように、slag中のCs濃度が決定される(dN/dt=0)。

$$Ne = 1 / \left[ 1 + \frac{k \cdot A}{\frac{\Delta w}{\rho_s}} \right] \cdot 100 \tag{2-1-2}$$

ρ<sub>s</sub>はslagの密度である。

**(2) Csの蒸発速度定数**

**①slag組成の影響**

Csの蒸発速度定数は、溶融する廃棄物の組成が変動した場合、次式で定義した塩基度Ki'で、図2-1-10に示すように一義的に表せることを明らかにした。

$$Ki' = \left( X_{CaO} + \frac{i_{MgO}}{i_{CaO}} X_{MgO} + \frac{i_{FeO}}{i_{CaO}} X_{FeO} \right) / \left( X_{SiO_2} + 2 \cdot \frac{i_{SiO_2}}{i_{Al_2O_3}} X_{Al_2O_3} + 2 \cdot \frac{i_{SiO_2}}{i_{Fe_2O_3}} X_{Fe_2O_3} \right) \tag{2-1-3}$$

X<sub>RmOn</sub>は酸化物のモル分率を表す。また、i<sub>RmOn</sub>は酸化物の結合のイオン度を表し、Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Si<sup>2+</sup>のそれぞれに対し、78、65、57、75、63、51の値を用いた<sup>(37)</sup>。

## ②プラズマの電極点近傍の高温領域の影響

プラズマ溶融では、電極点近傍の高温領域がCsの蒸発速度定数に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、るつぼの内径を変えて溶融スラグの表面積を変えてCsの蒸発速度定数を明らかにした。その結果、溶融スラグの表面積を大きくすると電極点近傍の高温領域の影響度は急激に小さくなり、Cs蒸発速度定数も小さくなった。実機では、るつぼ断面積がさらに大きいので、電極点近傍の高温領域の影響がさらに小さくなり、Cs蒸発速度定数は、図2-1-10に示した結果より小さい値になると考えられる。蒸発速度定数が大きいほど、Csの捕捉率は低下するので、図2-1-10の結果を用いれば、Csの捕捉率は、実機の場合でも過大に評価しないと考えられる。

## ③酸化鉄の価数の影響

炉内に酸素が存在する雰囲気中で鉄を含む廃棄物を溶融すると酸化鉄が生成される。この時、酸化鉄の価数によって、(2-1-3)式で定義したスラグの塩基度 $K_i'$ が変化する。すなわち、 $Fe^{3+}$ であれば蒸発速度定数が小さくなり、 $Fe^{2+}$ であれば蒸発速度定数が大きくなる。そこで、炭素鋼と種々の組成の不燃性廃棄物模擬試料を溶融し、スラグ中の $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ の組成比を調べた。その結果、この値は0.2以上であり、また、スラグの塩基度が小さいほど大きくなった。この結果から、スラグ中の酸化鉄の組成として、 $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ を0.2とすれば、Csの蒸発速度定数を小さく見積もらず、捕捉率を過大に評価しないことが明らかになった。

以上のように、(2-1-1)式、または、簡易的に(2-1-2)式を用い、実機と実験炉との相違や溶融時のスラグ組成

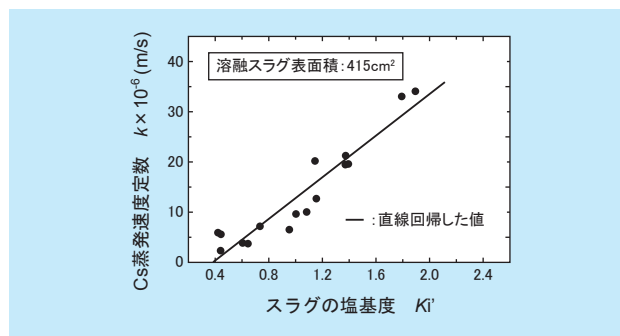


図2-1-10 スラグの塩基度 $K_i'$ とCsの蒸発速度定数

の変化などを考慮して、Cs捕捉率を推定する手法を確立した。

## 2-1-6 研究成果の電気事業への貢献

上述の研究を開始した頃は、低レベル放射性雑固体廃棄物の処理方法として高周波溶融法の研究開発が先行していた。同時に、電気事業として、技術の選択肢を増すために他の技術が模索されていた。そのような状況下で、プラズマ溶融法が低レベル放射性雑固体廃棄物の処理へ適用できる可能性を示した当研究所の研究成果は、電気事業におけるプラズマ溶融技術の実用化進展やその後の技術基準の策定などへ貢献した<sup>(38)~(40)</sup>。さらに、高周波溶融法における技術基準の策定などにも役立っている<sup>(41)</sup>。

## 2-2 TRU 廃棄物処理への応用

## 2-2-1 TRU 廃棄物の現状

原子力発電所の使用済み燃料の再処理工程では、半減期の長いTRU (transuranic) 核種を含む廃棄物が発生する。これらから高レベルの廃棄物を除いたものをTRU核種を含む放射性廃棄物 (TRU廃棄物) と呼ぶ。TRU核種とは、原子番号がウランより大きい (超ウラン) 元素を指し、特に、 $^{237}_{93}\text{Np}$ 、 $^{239}_{94}\text{Pu}$ 、 $^{241}_{95}\text{Am}$ の相対的な毒性が強い<sup>(42)</sup>。また、TRU廃棄物の特徴として、以下が指摘されている<sup>(43)~(45)</sup>。

- ①高レベルの廃棄物に比較して発生量が多いことに加え、その種類が、廃液、雑固体、金属、可燃物、不燃物、燃料棒の被覆管に相当するハル、燃料集合体の端部に相当するエンドピースなど多岐にわたっている。
- ②廃棄物に含まれる放射能濃度が、ハル・エンドピースのように比較的高いものから、核燃料サイクル機構の再処理工程から発生している雑固体廃棄物のようになり低いものまで範囲が広い。

TRU廃棄物は、核種閉じ込め性の向上と処分場の確保の両面から、圧縮、破碎や溶融などによる減容処理をして処分することが適切である。このうち溶融法は、高い減容率が達成できる。しかし、年間に約260t発生すると推定されているハル・エンドピースの主な成分であ

るジルカロイは、その融点が高く、化学的活性も強い  
ため、溶融自体が困難であること、また加熱に伴う放射  
性核種の蒸発の可能性が圧縮法に比較して高いことなど  
の課題がある。

これらの課題に対し、アークプラズマによる加熱処理  
は、高温を容易に発生でき、また高融点材料の溶融に  
対する適度なエネルギー密度を有することから、ジルカ  
ロイ廃材の有望な方法の一つであると考えられる。しか  
しハル・エンドピースを模擬したジルカロイ廃材のアーク  
プラズマによる溶融は、海外で実験的に行われた例<sup>(46)</sup>  
があるが、国内の実情と異なるため、その適用性を詳細  
に検討することは困難である。また TRU 核種は非放射  
性の同位体が存在しないため、溶融時の核種挙動の検討  
例が少ない。

当研究所は、溶融条件の最適化に関連した加熱条件と  
溶融状態の関係の解明、および、溶融時の核種挙動の推  
定を目的とした研究を実施した。その研究成果として、ま  
ず、融点の高いジルカロイを、エネルギー効率が高くダ  
ストの発生量も抑制できるプラズマ溶融方法（逐次溶  
融法）を提案した<sup>(47)</sup>。さらに、TRU 核種を模擬する元素  
をその熱力学特性から選定し、プラズマ溶融時には TRU  
核種はスラグ層へ捕捉されることを明らかにした<sup>(48)</sup>。

## 2-2-2 耐火系るつぼを用いた逐次溶融法の提案

共晶材を添加したり（ジルコニウムは約 20wt% の鉄  
やニッケルと共晶し融点が 1,000 ~ 1,200℃ 程度まで低  
くなる）、長時間加熱したりすることにより、ジルカ  
ロイの溶融は促進され、溶融固化体の均質性は高まると考  
えられるが、一方でダストの発生や揮発成分の蒸発も促  
進され、るつぼ材の溶け込みも増えることから、何らか  
の形で少量ずつ短時間加熱することが溶融システム最適  
化の一手段として考えられる。

このため、図 2-2-1 に示すように、ジルカロイ廃材を  
少量投入し、新たに投入された部分だけを短時間加熱し、  
その部分の溶融が完了した時点で次の投入を行い、同様  
な加熱を繰り返す溶融法（耐火系るつぼを用いた逐次溶  
融 SMRC : Successive Melting with Refractory Cruci  
ble）を試みた。金属材料を製造するような場合は、る  
つぼ材料の溶融対象への微量な溶け込みを抑制するため  
に水冷銅るつぼを用いることが望ましい。しかし廃棄物  
の溶融固化体を作製する場合は、減容比の低下や核種挙  
動への影響がなければ、溶融対象への少量のるつぼ成分  
の混入は問題がない。非水冷の耐火物系るつぼを用いる  
ことには、むしろ、①万が一の水漏れの危険性を避ける

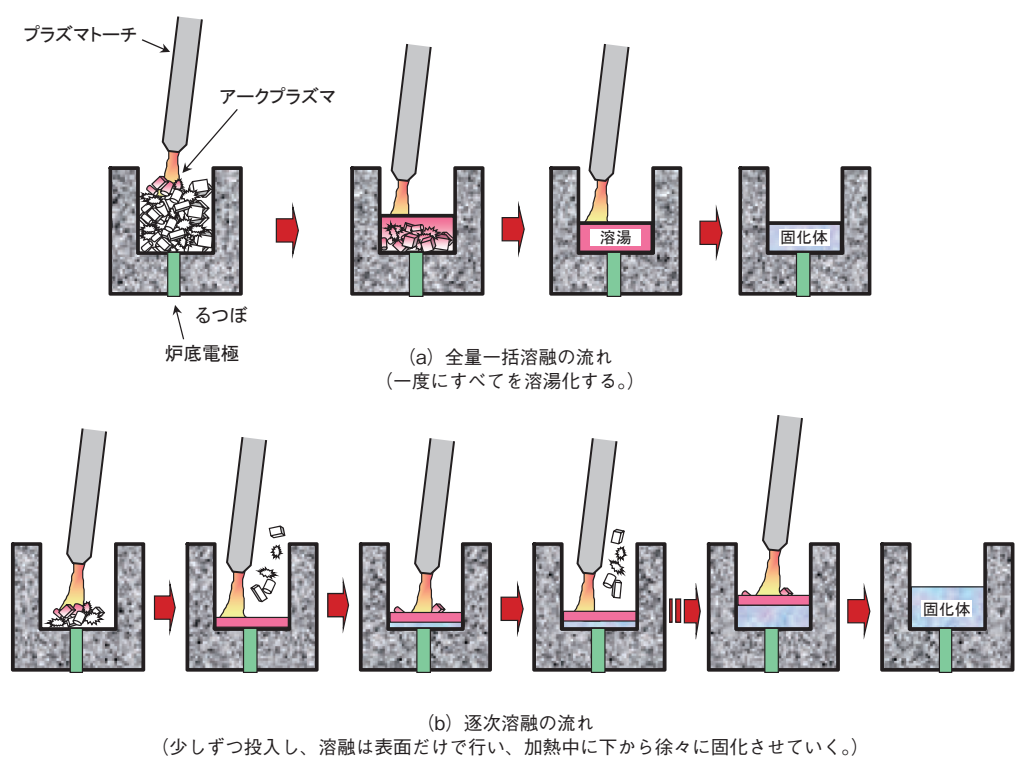


図2-2-1 溶融方法の比較

ことができる、②るつぼ温度を高く設定できるため、るつぼへの熱伝達が少なく加熱効率が上昇する、③場合によっては、るつぼごと廃棄体とすることも可能である、などのメリットがある。

また、非水冷のるつぼを用いた全量一括溶融の場合、るつぼ内に高温の溶湯を比較的長時間保持する必要があるため、損傷を避けるために、るつぼの材質や形状に制約が生じるが、SMRCを用いた場合、るつぼの損傷を低減できるため、るつぼの材質や形状の選択肢が広がり、同時にるつぼ寿命も長くなると考えられる。

図2-2-2に、SMRCにより作製した溶融固化体を示す。僅かな空隙が見られるものの、ほぼ全量一括溶融時と同様の溶融固化体が得られている。本例では、共晶材なしで、合計2kgのジルカロイ廃材を溶融している。

SMRCによって500gのジルカロイ廃材を溶融するために必要な加熱エネルギーと、その際のダスト発生量を、全量一括溶融の場合と比較して図2-2-3に示す。図に示すように加熱エネルギーを1/9に低減できた。また、少

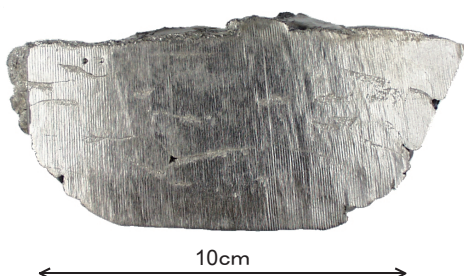


図2-2-2 逐次溶融で作製した溶融体断面 (ジルカロイ廃材 2kg、41MJ)

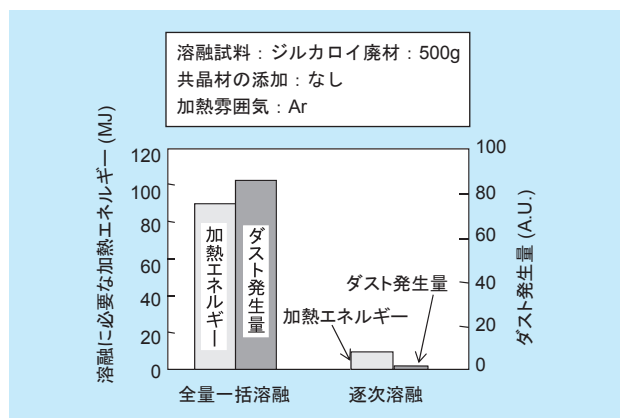


図2-2-3 全量一括溶融および逐次溶融での加熱エネルギーとダスト発生量の比較

ない電力で短時間に溶融が完了するため、ダスト発生量も1/100以下と大幅に低減することができた。特にジルカロイ廃材のみを溶融した場合、排ガス経路、チャンバー内面ともに、計測限界以下のダスト発生量となった。

### 2-2-3 溶融時の核種挙動

TRU核種には非放射性の同位元素が存在しないため、核種挙動の推定に重要な元素の熱力学的特性に着目し、非放射性の模擬核種を選定した。次に、TRU廃棄物を模擬した(1)ジルカロイ廃材とステンレス鋼、および(2)金属と不燃性の廃棄物(炭素鋼と飛灰)を、模擬核種と共に溶融し溶融時の核種挙動を解明した。以下にその概要をまとめる。

#### (1) 模擬核種を選定

溶融時の核種挙動に影響を与える熱力学的な特性として、核種の飽和蒸気圧と酸化物の標準生成自由エネルギーに着目した。これは、飽和蒸気圧の高い核種ほど溶融時に揮発しやすくダストへ捕捉されやすいこと、また、雑固体廃棄物を溶融すると金属と酸化物の溶湯が形成され、酸化物の標準生成自由エネルギーの小さい核種ほど酸化されやすくスラグ層へ捕捉されやすいこと、が理由である。さらに、化学的な性質にも着目し、TRU核種やウラン(U)と周期表で同属になるランタノイド系の元素の中から模擬核種を選定した。TRU核種(Np、Pu、Am)やUについて、飽和蒸気圧<sup>(49)</sup>と酸化物の標準生成自由エネルギー<sup>(50)</sup>を調査した結果を表2-2-1に示す。表に示すように、TRU核種やUのこれらの熱力学特性を挟むように、ユーロピウム(Eu)、ツリウム(Tm)、エルビウム(Er)、プラセオジウム(Pr)、ランタン(La)の5種類の元素を選定した。

表2-2-1 模擬核種とTRU核種の熱力学特性の比較

熱力学特性	比較結果	核種挙動への影響
飽和蒸気圧	(Eu, Tm) > Am ≒ Er > Pr > Pu > La > U	飽和蒸気圧の高い元素ほどダストへ捕捉されやすい。
酸化物の標準生成自由エネルギー	(例えばFe, Siなど) > Np > U ≒ Eu > Am ≒ (La, Pr) > Pu ≒ (Er, Tm)	金属層やスラグ層の主要な構成元素(Fe, Siなど)と比較し、酸化物の標準生成自由エネルギーの小さな元素は、スラグ層へ捕捉されやすい。

注：TRU核種とUに\_を付けた。

(2) プラズマ溶融時の核種挙動

TRU 廃棄物を模擬した試料を模擬核種と共に、20～30kW のアークプラズマ加熱により、黒鉛系のるつぼを用いて溶融した。なお、溶融には、加熱効率が高くダストの発生量が少ない逐次溶融法を採用した。

①ジルカroi廃材とステンレス鋼を溶融した時の核種挙動

ダストへの捕捉率の実験結果を、図 2-2-4 に示す。図は、ステンレス鋼や模擬核種を投入する際に用いた銅細線に由来する Ni、Mn や Cu についても結果を示した。また、U、Pu、Am の飽和蒸気圧も示した。図に示したように、ダストへの捕捉率は、元素の飽和蒸気圧で整理できる。このことから、U、Pu と Am は、ダストへは捕捉されず溶融固化体へ捕捉されやすいと判断できる。また、Np の沸点は La より高いことから、Np もダストへは捕捉されず溶融固化体へ捕捉されやすいと判断できる。

②金属と不燃性廃棄物を溶融した時の核種挙動

模擬核種の金属層、スラグ層、ダストへの捕捉率は、それぞれ 0.2% 未満、79.1～98.8%、0.7% 未満であった。金属層とダストへの移行はほとんどなく、模擬核種の大部分はスラグ層に捕捉されている。これは、模擬核種の酸化物の標準自由エネルギーが金属層やスラグ層の主要

な構成元素 (Fe や Si など) に比べて小さいためである。TRU 核種と U の酸化物の標準生成自由エネルギーも、金属層やスラグ層の主要な構成元素に比べて小さいことから、TRU 核種と U はスラグ層に安定に捕捉されると判断できる。

以上の結果から、ハル・エンドピース、または金属および不燃性の TRU 廃棄物をアークプラズマで溶融しても、Pu、Np、Am の TRU 核種および U はダストへ捕捉されにくく、溶融固化体に安定に捕捉されることが明らかになった。核種挙動の観点から、これらの廃棄物の溶融処理へアークプラズマ加熱を適用できると考えられる。特に、金属および不燃性の廃棄物を溶融処理すると、金属層を除染できる可能性がある。

参考文献

- (1) 天川正士、足立和郎、安井晋示：プラズマ加熱を用いた低レベル放射性雑固体廃棄物の一括溶融処理技術、電力中央研究所総合報告、W12 (1998)
- (2) 天川正士、足立和郎、安井晋示：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その 1) - 排ガスに含まれるダストの性状と集塵装置の選定 -、電力中央研究所研究報告、W92012 (1993)
- (3) 安井晋示、天川正士、足立和郎：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その 2) - 可燃物の熱分解ガス生成特性 -、電力中央研究所研究報告、W92022 (1993)
- (4) 足立和郎、天川正士、安井晋示：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その 3) - 溶融固化体の諸特性 -、電力中央研究所研究報告、W92043 (1993)
- (5) 安井晋示、天川正士、足立和郎：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その 4) - C/F エLEMENT、ステンレス、アルミニウムのプラズマ溶融特性 -、電力中央研究所研究報告、W94018 (1995)
- (6) 足立和郎、天川正士、安井晋示：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その 5) - 鉄と木片の溶融体の均質性 -、電力中央研究所研究報告、W94041 (1995)
- (7) 安井晋示、天川正士、足立和郎：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その 6) - 加熱雰囲気の影響 -、電力中央研究所研究報告、W94017 (1995)
- (8) 天川正士、足立和郎、安井晋示：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その 7) - 空気雰囲気で作製した溶融固化体のモルタル平衡水中での浸出率 -、電力中央研究所研究報告、W95005 (1995)
- (9) 天川正士、足立和郎、安井晋示：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その 8) - 鉄と灰と木を一括溶融処理した溶融固化体の特性 -、電力中央研究所研究報告、W95019 (1996)

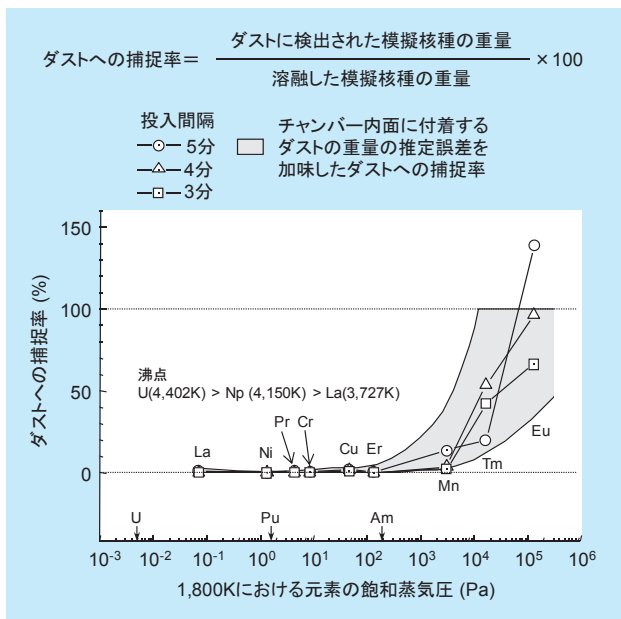


図2-2-4 逐次溶融法の投入間隔を代えた場合の元素のダストへの捕捉率

- (10) 安井晋示、天川正士、足立和郎：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発（その9）－可燃物の炉内燃焼処理方法の検討－、電力中央研究所研究報告、W95032（1996）
- (11) 安井晋示、天川正士、足立和郎：低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発（その10）－廃棄物の組成がCsの蒸発挙動に与える影響－、電力中央研究所研究報告、W96015（1997）
- (12) 天川正士、安井晋示：低レベル放射性雑固体廃棄物のプラズマ溶融固化体の核種閉じ込め性－スラグ組成の影響－、電力中央研究所研究報告、W00004（2000）
- (13) 安井晋示、天川正士：低レベル放射性雑固体廃棄物のプラズマ溶融処理におけるセシウム捕捉率推定手法、電力中央研究所総合報告、W18（2003）
- (14) 安井晋示、天川正士：低レベル放射性雑固体廃棄物のプラズマ溶融時のセシウム蒸発挙動、電力中央研究所研究報告、W98016（1999）
- (15) 安井晋示、天川正士：低レベル放射性雑固体廃棄物のプラズマ溶融時のセシウム蒸発挙動（その2）－セシウムを捕捉するための溶融条件－、電力中央研究所研究報告、W00009（2001-3）
- (16) 足立和郎、天川正士、安井晋示、古川静枝：ゴムを含む雑固体廃棄物のプラズマ溶融処理－アークプラズマの電圧に及ぼす可・難燃物の影響－、電力中央研究所研究報告、W97034（1998）
- (17) 足立和郎、天川正士：不燃性粉体の注入による安定化アルゴンアークの電圧変化とその機構、電力中央研究所研究報告、W99036（2000）
- (18) 経済産業省 原子力安全・保安院 原子力安全技術基盤課：平成19年度原子力施設における放射性廃棄物の管理状況及び放射線業務従事者の線量管理状況について、（2008年6月）
- (19) (独) 原子力安全基盤機構：原子力施設運転管理年報平成18年度版（平成17年度実績）
- (20) 松村勝秀、平井輝幸、北島英明、林勝、金川裕、谷口俊夫、岡本道明：原子力発電所雑固体廃棄物の廃棄体作成技術と課題、放射性廃棄物研究、vol. 2、p153（1996）
- (21) 菅井研自、小堆忠雄、林勝、松村勝秀、泉田龍男：型式設定方式による固体状廃棄物固化技術の研究（1）固体状廃棄物の組成と特徴、原子力学会1997年秋の大会、J46（1997）
- (22) 火力原子力発電技術協会：やさしい原子力Ⅳ.放射性廃棄物の処理・処分、火力原子力発電、vol. 40、p107（1989）
- (23) 鈴木祐、赤川吉寛、大野弘雄：低レベル放射性廃棄物の輸送および廃棄体確認技術、火力原子力発電、vol. 44、p57（1993）
- (24) 小畑政道、手嶋孝弥、倉橋隆文、金川裕、林勝、刈込敏、赤川吉寛：高周波誘導加熱方式による溶融体の核種挙動、日本原子力学会1996年秋の大会、L30（1996）
- (25) 中村寿、金沢勝雄、佐藤孝幸、山手一記、藤木和男：放射性金属の溶融基礎試験、デコミッションング技報、No.9、p41（1993）
- (26) 隅谷尚一、天野治、菊池恂、堀内進、千野耕一：放射性廃棄物のセメントガラス固化技術、火力原子力発電、vol. 40、p447（1989）
- (27) 横山速一：高レベル廃棄物固化体の浸出性（その8）－浸出性に及ぼす浸出層の影響（動的試験条件）－、電力中央研究所研究報告、T86049（1988）
- (28) H.H. ユーリック他：腐食反応とその制御（第3版）、産業図書（1994）
- (29) C. M. Jantzen and M. J. Plodinec：Non-Crystalline solids, vol. 67, p207（1984）
- (30) 大谷正康：鉄冶金熱力学、日刊工業新聞社、p142（1986）
- (31) 日本金属学会編：講座・現代の金属学 精練編1 鉄鋼精練、p33（1991）
- (32) A. Barkatt et al.：Mechanisms of defense waste glass dissolution, Nuclear Technology, vol. 73, p140（1986）
- (33) 佐々木憲明：高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の化学的耐久性、セラミックス、vol. 18、p592（1983）
- (34) L. R. Pederson, C. Q. Buckwalter, G. L. McVay and B. L. Riddle：Glass surface area to solution volume ratio and its implications to accelerated testing, Symposium on Scientific Basis for Nuclear Waste Management（6th）Boston, 47（1983）
- (35) 塚田毅志、横山速一：高レベル廃棄物固化体の浸出性（その6）－浸出性に及ぼす固化体表面層の影響（脱塩水中の静的試験）－、電力中央研究所研究報告、285054（1986）
- (36) 作花済夫、境野照雄、高橋克明著：「ガラスハンドブック」、p905、朝倉書店（1991）
- (37) ベ・ハ・ハン他：鑄造石の製造技術、日ソ通信社（1974）
- (38) 日本原子力発電株式会社：敦賀発電所原子炉設置変更許可申請書（1号及び2号原子炉施設の変更）本文及び添付書類（1997年8月）
- (39) (財) 原子力安全技術センター：平成9年度放射性廃棄物処理処分対策調査研究 調査報告書 雑固体廃棄物の確認方法に関する調査研究（1998年）
- (40) 原子力安全基盤機構：平成15年度放射性廃棄物処分安全技術調査等報告書（2004）
- (41) 原子力安全基盤機構：日本原子力発電（株）東海発電所の充填固化体に係る廃棄体確認方法について、JNES-SS-0613（2006）
- (42) 大江俊昭、満木泰郎、田中博、河西基：高レベル放射性廃棄物地層処分時の人工バリアの予備的検討、電力中央研究所研究報告、T88002（1988）
- (43) 辻野毅：燃料リサイクルにおけるTRUに関する研究、第20回記念原子力安全性研究成果報告会要旨集（日本原子力研究所）、p6（1992）
- (44) 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会：TRU核種を含む放射性廃棄物の処理処分について、原子力資料、vol. 249、p1（1991）
- (45) 森山昇：TRU廃棄物の処理処分、保健物理、vol. 23、p343（1988）
- (46) R. D. Peters and W. A. Ross：Plasma Melting of Non-Irradiated Fuel Assembly Hardware: Initial Testing



- and Evaluation, Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle, Vol. 11 (4), pp.333-345, (1989)
- (47) 足立和郎、古川静枝、天川正士：アークプラズマによるジルカロイ廃材の溶融、電力中央研究所研究報告、W97029 (1998)
- (48) 天川正士、足立和郎：TRU 廃棄物のプラズマ溶融時における核種挙動、電力中央研究所研究報告、W98010 (1999)
- (49) J. L. Margrave ed. : The characterization of high-temperature vapors, John Wiley & Sons, Inc., p.478 (1967)
- (50) Outokumpu Research Oy : Chemical reaction and equilibrium software with extensive thermochemical database ver.3.0 (1997)



## 第3章

アスベストの無害化と  
再資源化への応用

---

3-1	アスベスト廃棄物の法規制	26
3-2	アスベスト廃棄物の無害化	26
3-3	アスベスト廃棄物の溶融スラグの再資源化	28

---

### 3-1 アスベスト廃棄物の法規制

老朽化した火力発電所の改修工事や原子力発電所の廃止措置などでは、アスベストを含む保温材が発生する可能性がある。保温材のような飛散性アスベスト廃棄物の処分については、1992年7月に施行された廃掃法（廃棄物の処理および清掃に関する法律）の改正で、二重梱包または固型化し管理型最終処分場で処分すること、または、高温溶融処理し安定型最終処分場で埋立処分することが定められた。この時点では、中間処理としては高温による溶融のみが認められていた。また、溶融炉の要求温度が概ね1,500℃以上で、アスベストの中で最も融点の高いクリソタイル<sup>(注1)</sup>の有害な繊維構造を消滅させることを前提としていた<sup>(1)</sup>。その後、アスベストが大きな社会問題となり、廃掃法が改正された。すなわち、2006年10月には、アスベスト廃棄物の基準が厳格化（アスベストの含有量が1%を超えるものから0.1%を超えるものへ改正）され、これとほぼ同時の同年8月には、高温の溶融などによる高度技術による無害化処理の確保を促進・誘導するため、特例制度（無害化処理認定制度）が創設された。この制度は、国が個々の施設の安全性を確認して、廃棄物処理施設の設置許可及び処理業の許可なしに、高度な技術を用いて無害化する処理を行う者を個々に国が認定するものである。しかし、この制度が発足し2年が経過した2008年度末では、認定を受けた事例はない。

(注1)：アスベストは、繊維状の天然の鉱石で6種類ある。この中で、保温材としては、クロシドライト（融点：1,193℃、比熱：0.84 kJ/(kg・K)）、アモサイト（融点：1,399℃、比熱：0.81 kJ/(kg・K)）とクリソタイル（融点：1,521℃、比熱：1.1kJ/(kg・K)）が用いられていた。

### 3-2 アスベスト廃棄物の無害化

当研究所は、1998年度に、アスベスト廃棄物に加えて、アスベスト除去作業時に発生する金属やコンクリートなどを一括溶融でき、かつ大幅な減容比も得られるアークプラズマ加熱を用いて、アスベスト廃棄物を溶融無害化し、さらに、下層路盤材として再利用できることを確認した<sup>(2)(3)</sup>。また、溶融状態にあるスラグから、直接、骨材を製造する技術開発を進めた<sup>(4)</sup>。

#### (1) 実験方法

アスベストを含む保温材として表3-1に示す6種類を選定した。市販の保温材にはアスベストが含まれていないため、当時、入手可能であったクリソタイルを混入し試料とした。クリソタイルは融点、比熱ともアスベストの中で最も高いため、溶融しにくいと考えた。また、アスベストが規制される前の保温材に含まれたアスベストの使用実績から、重量割合で5～10%を混入した。その他に当時市販されていた石綿クロスおよび石綿スレートも選定した。さらに、建築廃材などの混在を想定して、炭素鋼やコンクリートを加えた実験も行った。また、表中でスチール缶と記載したケースでは、アスベスト試料を十数個のスチール缶に分けて封入し炉内へ間欠投入した。試料番号gの条件では、溶融試料の全量を予め炉内に装荷した。

溶融実験を行う際には、空気を炉内へ注入し（1m<sup>3</sup>N/h）、炉内圧力が微負圧一定となるように排ガス吸引量を制御することで、プラズマ炉からアスベストが飛散しないよう安全に配慮した。

クリソタイルの無害化を評価する方法として、スラグのSEM（走査型電子顕微鏡）写真による繊維構造の消失の観察と、X線回折分析による結晶構造の消失から確

表3-1 溶融試料

試料番号	炭素鋼 [kg]	スチール缶 [kg]	コンクリート [kg]	アスベスト	
				[kg]	種類
a	-	1.00	-	3.14	水練り保温材+クリソタイル(10%)
b	-	2.81	-	3.00	パーライト保温材+クリソタイル(5%)
c	-	3.28	-	3.04	ケイ酸カルシウム保温材+クリソタイル(10%)
d	-	1.70	-	3.00	石綿クロス
e	-	0.85	-	2.94	石綿スレート
f	-	1.31	-	3.00	クリソタイル
g	10.1	-	1.50	1.50	ケイ酸カルシウム保温材+クリソタイル(10%)

認した。また、スラグを再利用するための化学的安定性を「環境庁告示 46 号」に準拠した溶出試験により評価した。

(2) 実験結果

まず、アスベストの繊維構造と結晶構造が、アークプラズマ溶融により消失することを確認した。アークプラズマで溶融した各試料について、図 3-1 に溶融前後の SEM 写真と、溶融後のスラグの外観を示す。SEM 写真による観察から繊維構造が完全に消失していることが確認された。スラグの外観として、水練り保温材およびパーライト保温材を溶融した場合のスラグはガラス状となり、それ以外は結晶質の岩石状となった。スラグがガラス質になるか結晶質になるかは化学組成に依存する。水練り保温材およびパーライト保温材はシリカ (SiO<sub>2</sub>) の濃度が高くて塩基度が低いため、ガラス質のスラグとなった。一方、ケイ酸カルシウム保温材および石綿スレートはカルシア (CaO) の濃度が高く、石綿クロスおよびクリソタイルはマグネシア (MgO) の濃度が高い。また、一括溶融試験では、溶融固化体の酸化鉄の濃度が高い。これらは塩基度が高いため、結晶質のスラグになった。

次に、スラグの X 線回折分析結果から、いずれの試料を溶融したスラグでもクリソタイル特有のピークが検出されないことを確認した。一例として水練り保温材の結果を図 3-2 に示す。この溶融固化体は、スチール缶に由来する金属層の上部に、保温材に由来するスラグ層が形成された 2 層構造となっている。スラグ層について、内部、金属との界面、るつぼとの界面、上面の 4 箇所から分析用の試料を採取した。図 3-2 にはこれらの結果を示している。

さらに、環境庁告示 46 号に準拠したスラグの溶出試験では、すべてのスラグについて規定されている重金属類<sup>(5)</sup>は表 3-2 に示すようにすべて溶出液中で検出されず、一般廃棄物の溶融固化物に係わる目標基準を満足した。以上から、溶融で得られたスラグの化学的安定性を確認した。

最後に、アスベスト保温材などの溶融前後の比重から、溶融による減容比を求めたところ、約 5% ~ 40% となり、大きな減容比が得られた。

以上から、アスベストは、その組成や溶融条件によら

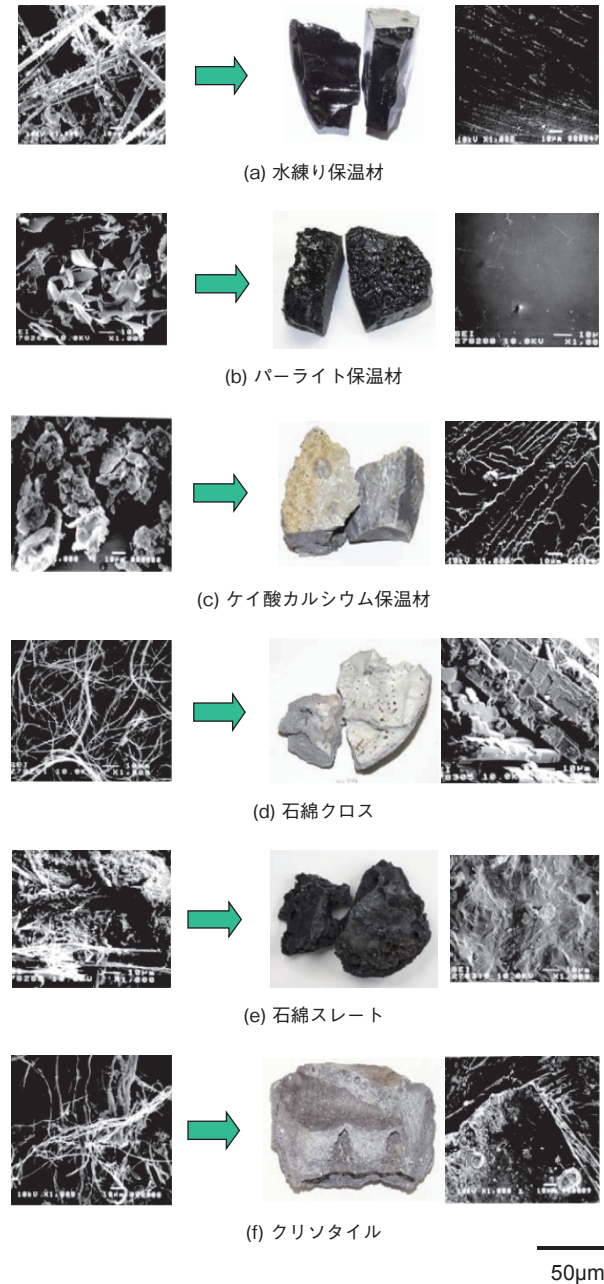


図3-1 溶融試料のSEM写真とスラグの外観およびSEM写真

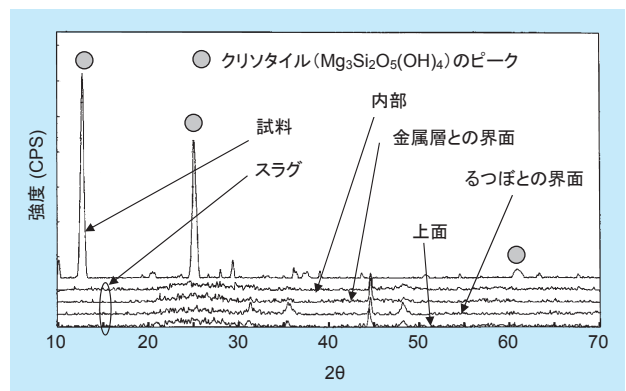


図 3-2 X 線回折結果 (試料：水練り保温材)

表3-2 スラグの溶出試験結果

項目	溶出基準(mg/l)	溶出試験結果 <sup>1</sup>	検出限界値(mg/l)
カドミウム	0.01以下	ND	5×10 <sup>-4</sup>
鉛	0.01以下	ND	5×10 <sup>-3</sup>
六価クロム	0.05以下	ND	5×10 <sup>-2</sup>
砒素	0.01以下	ND	2×10 <sup>-3</sup>
総水銀	0.0005以下	ND	5×10 <sup>-4</sup>
セレン	0.01以下	ND	2×10 <sup>-3</sup>

注)溶出試験の方法は、環境庁告示46号に定める方法とした。  
\*1:全ての溶出試験で、重金属類は溶出液中から検出されなかった。

ず、プラズマ溶融処理することによりアスベストとしての特質が消滅し、化学的に安定なスラグとなることを明らかにした。

### 3-3 アスベスト廃棄物の溶融スラグの再資源化

アスベスト廃棄物は、比重が小さく特別管理廃棄物であるため最終処分場まで運搬して埋め立て処分するには、運搬費も処分費も非常に高い。そのため、アスベスト廃棄物の溶融スラグの再資源化は経済的にも成立する余地が十分にある。一方スラグは、路盤材やコンクリート用骨材などとしての需要が期待されている。

クリソタイル含有水練り保温材を溶融したスラグは一番強度の低いガラス質であるものの、JISに準拠したそのスラグの路盤材試験は、表3-3に示すように修正CBR以外を満足した。修正CBRは、比較的入手が容易な碎石ダストを30%以上混合することで下層路盤材料の規定値を全て満足することを確認している。

表3-3 路盤材試験結果

項目	道路用路盤材材料の規定値			溶融スラグ
	表層・基層	上層	下層	
表乾比重 (g/cm <sup>3</sup> )	≥2.45	—	—	2.62
吸水率 (%)	≤3.0	—	—	0.06
すり減り減量 (%)	≤30	≤50	≤50	35.9
安定性 (%)	—	≤20	≤20	0.0
修正CBR (%)	—	≥80	≥20	12.8

表乾比重：骨材が吸収できる水分を全て吸収し、かつ、表面が湿潤していない状態での骨材の比重。  
吸水率：表乾比重と絶乾比重の差の絶乾比重に対する割合。  
絶乾比重：骨材が含水していない状態での比重。  
すり減り減量：摩耗による耐久性を確認する試験。ロサンゼルス試験機と呼ばれる鋼製円筒容器内に、鋼球と骨材を入れて回転させ、回転の前後での骨材の質量の減少量を回転前の質量で除して求められる。  
安定性：骨材の凍結融解に対する耐久性を評価する試験。  
修正CBR：締め固められた時の支持力を評価する試験。

下層路盤材のように、比較的大きな塊状で利用する場合と異なり、スラグを骨材として利用するには、何度も粉砕・摩砕して粒度調整を行う必要があり、時間とコストがかかる。そこで、溶湯を冷却された回転漏斗に出湯し、溶融スラグを斜面上に分散・滑落させることで、20mmアンダーの球状の骨材を直接製造する研究を実施した。

図3-3に回転式溶融スラグ骨材化装置を示す。100kW級プラズマ溶融処理実験設備に合わせ、数十秒間出湯したスラグ（出湯速度30g/s相当）を骨材にする規模で、回転漏斗、骨材回収機構、冷却機構、分散機構などから構成される。

プラズマ溶融処理実験設備で加熱溶融した珪酸カルシウム系保温材を骨材化する実験では、アークを消弧後、手動制御でつぼを傾動させて、溶融スラグを骨材化装置に出湯した。炉内に設置した骨材化装置は、出湯直前

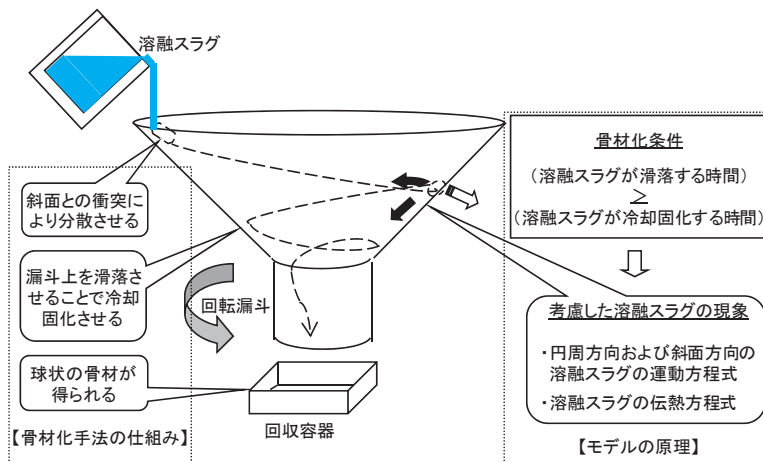


図3-3 溶融スラグ直接骨材化手法および骨材化条件を計算するモデルの概要

に所定の循環冷却水流量と回転速度に設定して運転し、必要に応じて空気吹き付けや水噴射を行った。図3-4に得られた球状のスラグを示す。図に示すように比較的球状に近いスラグを得ることができた。

現在は、出湯方法や分散機構を改善することで、骨材の回収率向上を検討している。引き続き、熔融スラグの組成変動時の対応とその際の骨材の品質確保、連続運転時の信頼性検証、骨材生成に最適なプロセスの確立などの課題を克服することで、最終的には処分場の延命や循環型社会の構築に貢献していきたい。



回転式熔融スラグ骨材化装置の運転条件  
 回転速度 : 3 rps  
 背面冷却水 : 50 l/min  
 噴霧冷却水 : なし

図3-4 作製した骨材の一例

当研究所が進めてきた無害化に関する研究成果は、1,500℃以上の熔融法として、NEDOが実施した「アスベスト含有建材等安全回収・処理等技術開発」の中で、最新の技術動向として紹介されている<sup>(6)</sup>。

### 参考文献

- (1) 廃石綿等処理マニュアル、特別管理廃棄物シリーズⅡ：厚生省生活衛生局水道環境部 作業廃棄物対策室監修、(財) 廃棄物研究財団編、化学工業日報社 (1993)
- (2) 安井晋示、天川正士：アスベスト廃棄物のプラズマ熔融無害化・再資源化技術、第15回電熱大会予稿集、p49 (2000)
- (3) 安井晋示、天川正士、山崎克男、門井英一：再利用化に向けたアスベスト廃棄物のプラズマ熔融処理技術、電気学会論文誌、Vol.120-A、p335 (2000)
- (4) 池田弘一、天川正士、安井晋示：プラズマ熔融によるスラグ再資源化技術の開発－アスベスト廃棄物のスラグ直接骨材化手法の提案と基礎的検討－、電力中央研究所研究報告、W03005 (2004)
- (5) 通達文書「生衛発第508号」、厚生省生活衛生局水道環境部、(平成10年3月)
- (6) 山下勝、今西信之：アスベスト対策の現状とNEDOにおける対策技術の最新動向、資源環境対策、Vol. 44、No. 3、pp. 30-35 (2008)





## 第4章

# 放射性廃棄物乾式 表面除染技術への応用

---

4-1	プラズマを用いた除染技術とその特長	32
4-2	酸化皮膜の除去と推奨処理条件	33
4-2-1	適用可能な酸化皮膜種類	
4-2-2	減圧アークの推奨処理条件	
4-3	Co-60含有腐食生成物皮膜に対する除染性能	34
4-3-1	配管形状小試験片を用いた場合における評価	
4-3-2	Coの汚染形態に対する依存性	

---

## 4-1 プラズマを用いた除染技術とその特長

原子力施設などで行われる除染は、様々な目的や対象があり、これらに合わせ多くの種類がある<sup>(1)</sup>。このうち、主な既存の技術は、化学除染液を使用するものと、プラスト処理によるものがある。比較的新しい除染技術として、レーザーを用いた方法<sup>(2)(3)</sup>やプラズマを用いた方法<sup>(4)(5)</sup>がある。

原子力発電所の冷却水系統に化学除染液を循環させ行う系統除染は、数週間に及ぶ大規模な除染工程であるが、その効果も大きい。しかし、除染工程によって発生する二次放射性廃棄物として化学除染液が発生するという課題が指摘されてきていた。この様な中で、炭酸ガスと水に分解できるCORD法<sup>(6)</sup>などのように二次廃棄物を低減した除染方法も開発されており、浜岡原子力発電所などに適用されている<sup>(1)</sup>。一方、プラスト除染に関しては、美浜発電所における蒸気発生器への適用例がある<sup>(1)</sup>。プラスト除染に対する二次廃棄物低減対策としては、耐磨耗性に優れたプラスト材を用い、除染後に付着物を除去後、再利用したり、氷、ドライアイスといったプラスト材を用いた除染方法が開発されたりしている<sup>(7)</sup>。これらの除染技術に関しては、その技術の向上は目覚ましい<sup>(1)</sup>が、依然として二次廃棄物の低減が課題になっている。

プラズマを用いた除染技術は、化学除染液やプラスト材が必要ないため潜在的に二次廃棄物を低減できる、熱的な作用により除染を行うため比較的处理対象の性状を選ばない、発生方法が多様であるので除染原理として様々な種類がある、といった特長がある。図4-1に種々のプラズマを用いた除染の分類を示す<sup>(8)</sup>。高温で熱的に除染する方式のものは、処理速度が速い反面、対象物への熱負荷などが大きく、例えば、表面組織の変化や凹凸などの影響が現れると予想される。一方、プラズマ中のラジカルを利用するような方法は、プラズマの重粒子(中性の分子や原子、イオン)の温度が相対的に低く、処理速度が遅いが、対象物への熱負荷が少ない。

減圧アークは、図4-1における気中アーク法の一種で、減圧下で処理対象を陰極(逆極)とした直流の移行形

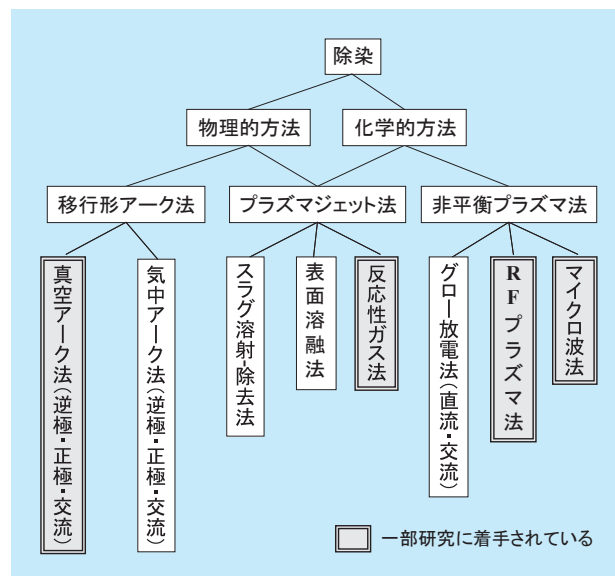


図4-1 プラズマを用いた表面除染技術の分類

アークプラズマを指す。図4-2(a)に減圧アークの写真を示す。その内部に輝度が高い陰極点が観察できる。また、図4-2(b)に減圧アーク除染原理の模式図を示す。表面に酸化皮膜を持つ金属基板を陰極とすると、酸化皮膜を選択的に溶融・蒸発させ、熱的に効率良く除去する特長を持つことが古くから知られている<sup>(9)</sup>。陰極点が酸化皮膜を求めて動く現象が起こる理由は、酸化皮膜に覆われている箇所からは電子が効率良く放出されるため、陰極点がここを探し動き回るからと推定されている<sup>(9)</sup>。一方、酸化皮膜で覆われた陰極からの電子の放出のメカニズムに関しては様々なものがあり<sup>(10)</sup>、また、仕事関数の厳密な測定が困難であることなどからその詳細は不明であると考えられる。また、酸化皮膜を除去するのが得意な減圧アークであるが、酸化皮膜が除去された後の金属基板上に対しても形成し得る。このため、母材金属中に存在するコバルト(Co)も、その母材金属と共に溶融・蒸発、除去することができる。ただし、電子放出のメカニズムは、酸化皮膜で覆われた金属基板を陰極としている場合と酸化皮膜が除去された金属基板を陰極としている場合とで異なっていると考えられる<sup>(10)</sup>。

本章では、減圧アークが、原子力発電所の高温・高压の冷却水環境下で形成される放射性腐食生成物皮膜の乾式表面除染技術へ適用できることを示す。

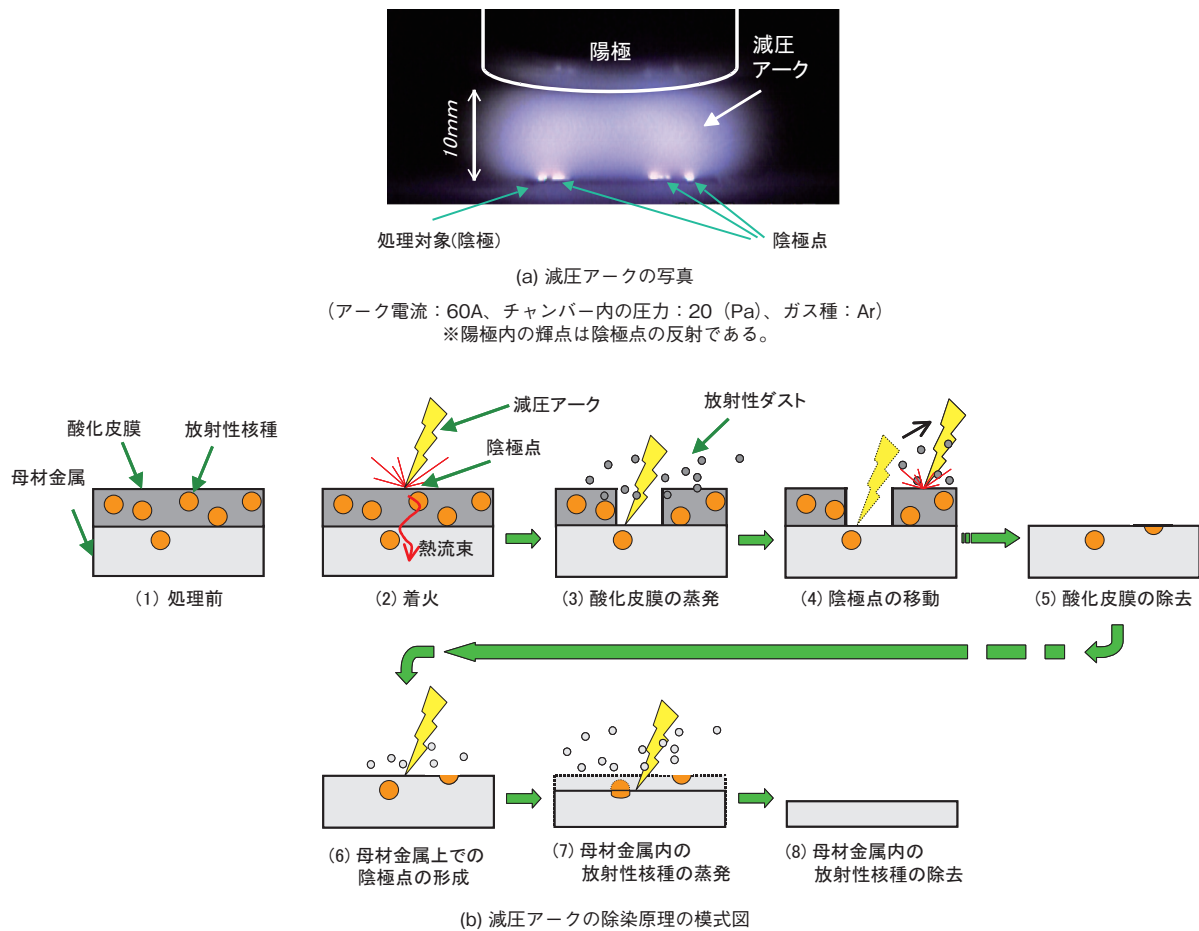


図4-2 減圧アークとそれを用いた除染技術の原理

## 4-2 酸化皮膜の除去と推奨処理条件

### 4-2-1 適用可能な酸化皮膜種類

供試試料は、Co-60 を含む腐食生成物皮膜試験片とした。この他に、実験の目的に合わせ、黒皮付き炭素鋼

板、非放射性 Co 付き熱酸化皮膜試験片を併用した。

はじめに、減圧アークを腐食生成物皮膜に適用しこの除去を試みた。

実験後の試験片の写真例、SEM 写真例を処理条件と共に図 4-3 に示す。図に示すように除去後の試験片の表面には、何れも腐食生成物特有の黒色が消失しており、

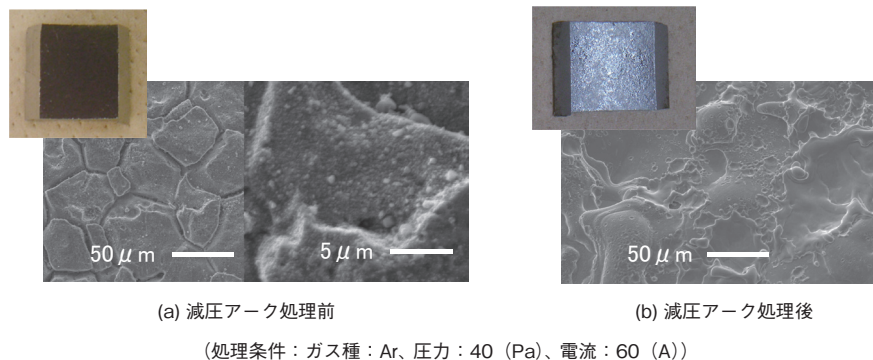


図4-3 減圧アークの適用前後の試験片の写真およびSEM画像

表4-1 酸化皮膜の除去を確認した模擬放射性廃棄物試験片

形状	平板 10×20mm～100mm角 配管 φ39×100mm～φ114×200mm
母材の金属材料	SUS304、SUS316L、SUS430 インコネル 600、S50C、SS400
酸化皮膜の種類 (組成、膜厚)	Co-60含有腐食生成物皮膜 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> など、1～2μm) 熱酸化皮膜(FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> など、1～2μm)、黒皮(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 、7μm)

金属光沢が観察された。SEM 写真において、試験片表面の様相を除去前後で比較すると、除去後には試験片表面の数ミクロンオーダーの結晶粒界が消失している。その他の X 線回折法、オージェ電子分光分析などの表面分析結果を併せ、腐食生成物が除去されたことが確認できた。

当研究所において、酸化皮膜除去の実績がある試験片を表 4-1 にまとめる。

#### 4-2-2 減圧アークの推奨処理条件

減圧アークの処理条件としては、減圧アークのガス種類などがある。これらは、処理速度などに影響を及ぼす。これらのパラメータに対して、実験的に見出した推奨処理条件を表 4-2 に示す<sup>(11) (12)</sup>。例えば、Co 除去率の減圧アークのガス種に対する依存性としては、腐食生成物皮膜を除去した時点で比較すると、圧力 50Pa 程度では、いずれのガスの場合も大差なかった。しかし、その後、減圧アークの繰返し処理により母材金属表面に残留した Co を除去する際には、H<sub>2</sub> が最も処理速度（ここでは、単位クーロン量当たりの Co 除去率）が速く、Ar はほぼ同程度であった。単位クーロン量あたりの母材金属の蒸発量を高くできたガス種が同じクーロン量に対してよ

表4-2 減圧アークの推奨処理条件

項目	推奨条件	備考
ガス種	Ar	Arに加え、エンタルピーが高いなどの特長を持つH <sub>2</sub> 、Coとの化学反応による除染効果が期待されるCOとCF <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> 混合ガスを選択した。H <sub>2</sub> が最も処理速度が速く、Arはほぼ同程度である。ただし、不活性であるため、工学的にはArの方が使い易い。
電流	60A	除染性能は40～60Aの範囲では電流に依存しない。処理量はほぼクーロン量に比例するので、電流値が大きい方が処理時間を短くできる。
電極-試験片距離	1～20mm	短い方が、減圧アークの陰極点が極端に分散せず、集中した処理領域が得られる。
雰囲気ガスの圧力	50Pa	低圧の方が陰極点がよく動き回り、処理速度が速い。

り高い Co 除去率を達成できた。ガスと Co との化学反応による除染効果は確認できなかった。

### 4-3 Co-60 含有腐食生成物皮膜に対する除染性能

#### 4-3-1 配管形状小試験片を用いた場合における評価

放射性廃棄物には、配管形状の廃棄物も多く発生する。例えば、軽水炉の解体廃棄物では、金属廃棄物のうち約 2 割が配管形状であり、このうち 100A (φ 114) 以上の内径のものが 9 割以上を占める。特に内径が小さい配管の場合、陽極の掃引などと共に、除染時に発生するダストが既に処理済みの表面に付着する再汚染などの懸念がある。

そこで、Co-60 を含む腐食生成物をその内面に持つ配管形状試験片 (内径 φ 39 × 100mm) を選択し、これを用いて Co-60 に対する除染性能を評価した<sup>(13)</sup>。この時の処理条件は、表 4-2 にまとめた推奨処理条件を参照した。陽極は、配管内面を広く処理できる様、掃引した。

図 4-4 に減圧アーク繰返し処理時における Co 除去率の向上の様相を示す。図内の括弧付きの番号は、図 4-2 (b)中の番号に対応する。腐食生成物皮膜除去時における Co 除去率は 60% 程度であった。この理由は、処理前の試験片の母材金属表層内に試験片全体の約 30% の Co が含まれていることと、酸化皮膜除去時に酸化皮膜内の Co の一部が母材金属内に移行し残留するためである<sup>(14)</sup>。すなわち、酸化皮膜内の Co-60 に対する割合としては、85%程度が除去でき、15%程度が母材金属内に移行したこととなる。この後、減圧アークの繰返し処理により Co 除去率は向上し、最終的に Co 除去率 90% 以上を達成することができた。

配管の形状としては、この φ 39 × 100mm に加え、非放射性 Co を含む熱酸化皮膜をその内面に付与した φ 114 × 200mm の試験片によっても Co 除去率を評価し、約 90% の除去率を確認した。処理過程では、一度除染された箇所が別の箇所の処理時に再汚染されている可能性があるが、再汚染された Co も含めて除去でき、最終的に約 90% の除去率を達成できたことが確認できた。

また、この時に要した電荷量は、Co-60 含有腐食生成

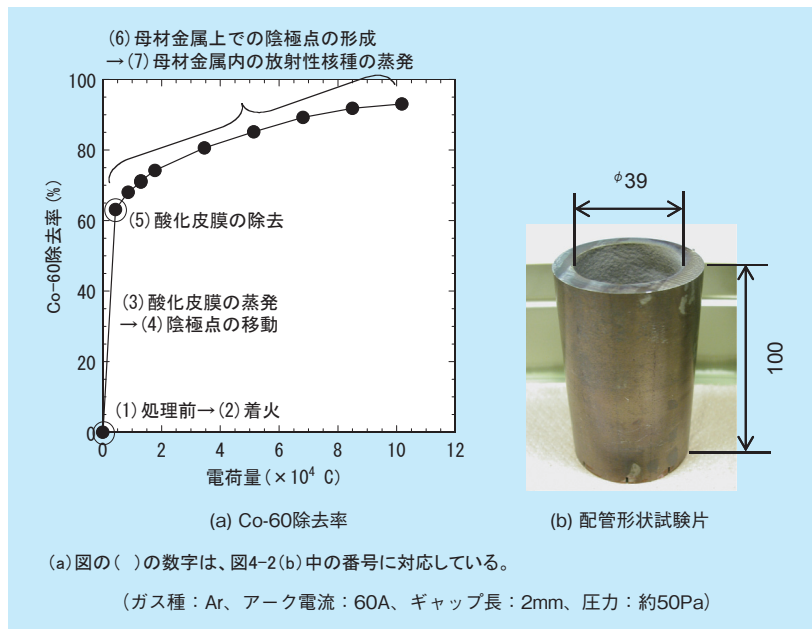


図4-4 Co-60含有腐食生成物皮膜付き配管に対する減圧アークの除染性能

物皮膜試験片に対して、単位面積あたり  $310\text{A} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$  であった。これは  $1 \sim 2\text{cm}$  角の平板形状の小試験片の場合の  $400\text{A} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$  に比較して、同等もしくは小さくなる方向であった。これらの結果から、本除染技術の大型廃棄物への適用に際して、処理に必要な電荷量は、小試験片に対して必要な電荷量から予測できると考えられる。

### 4-3-2 Coの汚染形態に対する依存性

例えば、腐食生成物皮膜などの場合のように、Coが酸化皮膜内に深く分布している場合と、定期点検などで使用する工具などのようにその表面のみが汚染されている場合では、放射性核種による処理対象の汚染の状況は顕著に異なっている。そこで、これらの相違を想定し、Coの汚染形態が除染性能に及ぼす影響を調べた<sup>(12)</sup>。

この結果、図4-5に示す様に、酸化皮膜内でCoが分布している深さが母材金属との境界付近まで深く分布している汚染形態であると、酸化皮膜除去時の母材金属表面へのCoの移行が顕著になることがわかった。ただし、このような場合でも、図4-4に前述した様に、母材金属表面内のCoを除去できることから、最終的に処理可能であると判断できる。

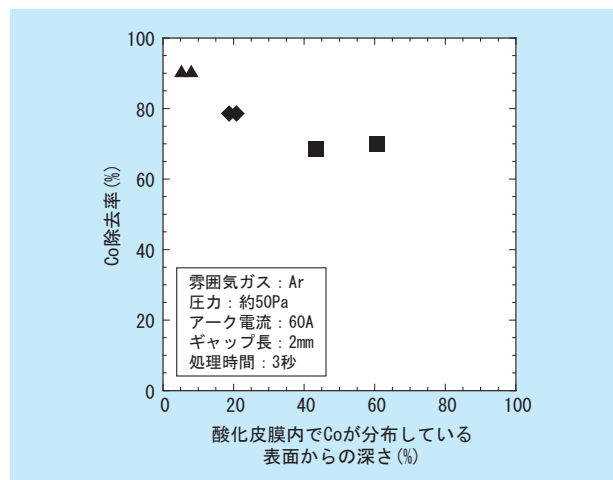


図4-5 減圧アーク除染性能の酸化皮膜内のCo分布深さに対する依存性 (酸化被膜の厚みは  $1 \sim 2\mu\text{m}$ )

### 参考文献

- (1) 社団法人 日本原子力学会 編、原子炉水化学ハンドブック、コロナ社、(2000)
- (2) 上原実、伊藤俊行、豊田正三郎、岩崎行雄、原邦男、宮尾英彦：B205 パルスレーザーによる表面除染、日本機械学会第7回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集、p341 (2000)
- (3) 小川竜一郎、福井康太、谷本健一：レーザー除染技術の開発、サイクル機構技報、vol. 15、No. 6、p59 (2002)
- (4) 中澤修、田代清、須藤収、「真空アーク放電による除

- 染技術の開発」、日本原子力学会「2000年秋の大会」、J5 (2000)
- (5) M.Suzuki, H.F.Windarto, T.Matsumoto, K.Sakagishi, 'Microwave plasma decontamination of radioactive material operated at atmospheric pressure', 15<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry, II-623 (2001)
- (6) 山内章義、高木敏夫、佐藤義雄、加藤裕明、藤田剛：浜岡原子力発電所1号機における原子炉再循環系システム化学除染Ⅱ－除染方法と適用結果－、日本原子力学会「1994年秋の大会」、Q52 (1994)
- (7) 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、デコミッショニング技報、vol. 18、No. 11、p37 (1994)
- (8) 足立和郎、天川正士、古川静枝、藤原和俊、神戸弘巳：プラズマを用いた放射性廃棄物表面除染技術に関する調査、電力中央研究所調査報告、W00030 (2001)
- (9) 安藤弘平、長谷川光雄：溶接アーク現象 増補版、株式会社産報、(1962)
- (10) 武田進：気体放電の基礎、東京電機大学出版局、(1990)
- (11) 古川静枝、足立和郎、藤原和俊、天川正士、神戸弘巳：プラズマを用いた放射性廃棄物の表面除染技術の開発－減圧アークを用いた非放射性腐食生成物の除去に関する基礎検討－、電力中央研究所研究報告、W01004 (2001)
- (12) 古川静枝、神戸弘巳、天川正士、足立和郎：プラズマを用いた放射性廃棄物の表面除染技術の開発（その7）－減圧アーク乾式表面除染技術における除染能力の総合評価－、電力中央研究所研究報告、H08001 (2007)
- (13) 古川静枝、神戸弘巳、天川正士、足立和郎：プラズマを用いた放射性廃棄物の表面除染技術の開発（その6）－減圧アーク除染技術の配管形状廃棄物への影響－、電力中央研究所研究報告、H05012 (2006)
- (14) 神戸弘巳、藤原和俊、足立和郎、古川静枝：プラズマを用いた放射性廃棄物の表面除染技術の開発（その3）－減圧アークによる放射性腐食生成物の除染性能－、電力中央研究所研究報告、T02026 (2003)

## 第5章

# 超微粒子やナノ構造 複合粒子など 材料創製への応用

---

5-1 電気事業における超微粒子の利用 .....	38
5-2 AlN 超微粒子の合成 .....	38
5-2-1 AlN の高純度化方策	
5-2-2 原材料 Al 粒子の注入条件	
5-3 AlN 球状ナノ構造複合粒子の合成 .....	39
5-3-1 複合粒子の円形度	
5-3-2 ミクロンオーダーの粒子と超微粒子の体積比	
5-3-3 ミクロンオーダーの粒子と超微粒子の粒径比	
5-4 AlN 複合粒子を充填したエポキシ樹脂の熱伝導率 と絶縁破壊強度 .....	41
5-4-1 複合粒子を充填したエポキシ樹脂	
5-4-2 全固体変圧器用絶縁材料への適用性	

---

## 5-1 電気事業における超微粒子の利用

電気事業においては、より一層のコスト低減が求められており、機器の更なる高効率化や寿命延伸などによる設備およびメンテナンスコストの低減が望まれている。また、発電・送配電の全般において環境適合性が求められており、このようなニーズに対応していくために種々の新材料を利用してることが不可欠である。材料の製造法のうちアークプラズマを用いる方法は、電気事業においてこれまでも溶射による耐食・耐磨耗コーティングや遮熱コーティングなどに用いられてきたが、近年、実験室規模では、将来、電気事業への適用が期待される高付加価値の材料の創製にも用いられるようになってきている。その中でも超微粒子はサイズが100nm以下と小さく、その比表面積が大きいなどの特徴を持つため、発電プラントにおける反応吸収剤や触媒などへの利用<sup>(1)</sup>や、温度、圧力、振動、ガスなどを感知する各種センサーへの適用<sup>(2)</sup>が検討されている。また、最近では、電力ケーブルやエナメル線の絶縁材料への適用も検討され始めている<sup>(3)</sup>。これらの超微粒子の実機器への適用の際の課題として、製造コストの低減<sup>(1)</sup>、超微粒子の大量創製技術の開発などが挙げられる。

一方、当研究所では、電力流通設備の中の変電所に着目し、絶縁油や地球温暖化係数の高いSF<sub>6</sub>ガスに代えて固体絶縁を全面的に活用した全固体変電所を提案している<sup>(4)</sup>。また、この変電所の中の主要機器である変圧器に注目し、変圧器の固体絶縁材料として、熱伝導率の高い窒化アルミニウム(A<sub>l</sub>N)の粒子を充填したエポキシ樹脂について検討を進めてきた<sup>(5)(6)</sup>。このA<sub>l</sub>N粒子を超微粒子として利用することを考え、超微粒子の低コストかつ大量の創製が期待できるアークプラズマ法を使用し、A<sub>l</sub>N超微粒子などの合成を試みた<sup>(7)~(9)</sup>。また、合成したA<sub>l</sub>N粒子をエポキシ樹脂に充填してその熱伝導率および絶縁破壊強度の評価を行った<sup>(10)</sup>。

## 5-2 A<sub>l</sub>N超微粒子の合成

本節では、移行形アークプラズマを用いたA<sub>l</sub>N生成特性について検討し、高純度A<sub>l</sub>N超微粒子を得る条件を明らかにするとともに、原材料Al粒子の大量蒸発が期待できるプラズマへの注入条件を選定した。

### 5-2-1 A<sub>l</sub>Nの高純度化方策

まず、Alと反応ガス(窒素(N<sub>2</sub>)とアンモニア(NH<sub>3</sub>)の混合ガス)からA<sub>l</sub>Nを合成するプロセスに関して化学平衡計算を行い生成条件について解析した。その結果、AlからA<sub>l</sub>Nへの転換率を高くするにはA<sub>l</sub>Nの生成温度と未反応のAlが凝縮する温度の間でAlとNを反応させる必要があり1,800~2,000℃の温度領域に反応ガスを吹き込むことが必要であることが分かった。次に、図5-1に示す実験装置において、圧力30~50kPaのチャンバー内に発生させたプラズマに反応ガス(トーチガス、回収筒内の反応・急冷ガス)と原材料Al粒子を吹き込みA<sub>l</sub>N超微粒子の生成実験を行った。トーチガス種および回収筒内の反応・急冷ガス種のA<sub>l</sub>N生成特性への影響を調べた。その結果、図5-2に示すように、トーチガスをN<sub>2</sub>、反応・急冷ガスをNH<sub>3</sub>

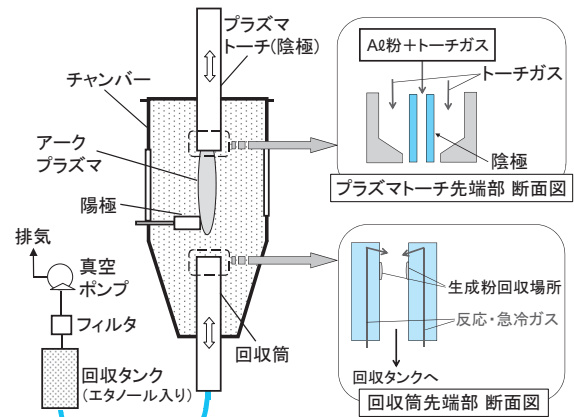


図5-1 粉体制御プラズマ基礎実験装置

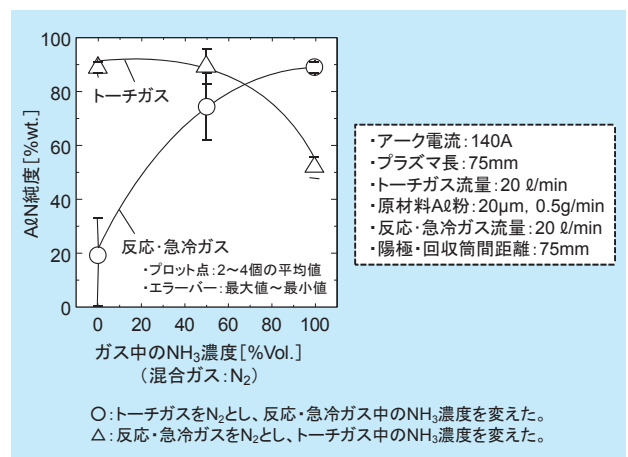


図5-2 生成粒子中A<sub>l</sub>N純度のトーチガス種および反応・急冷ガス種依存性



とすることにより、AlN 純度 90wt. の超微粒子が得られた。なお、このときの超微粒子の平均粒径は 30nm 程度であった。

また、エタノールが AlN とは反応せずに Al と反応することを利用して、上記の超微粒子を高純度化させる検討を行った。回収筒の下流側にエタノール入りタンクを設置し、それを通過した粉をフィルタで回収することによって、AlN 純度が 99wt. 以上と高い超微粒子が得られた。

### 5-2-2 原材料 Al 粒子の注入条件

原材料の Al 粒子のプラズマ場への適切な注入条件を明らかにするために、数値解析による Al 粒子注入条件の選定を試みた。図 5-3 において代表的な注入位置 A ~ D を選択し、Al 粒子の注入角度と搬送ガス流量を変え、プラズマの電磁流体方程式および Al 粒子の運動と Al 粒子への伝熱を解析することにより Al 粒子の蒸発挙動を求めた。この結果、アークプラズマ内における十

分な熔融・蒸発が得られた条件として、注入位置 C、注入角度 0 度、搬送ガス流量 1 ~ 15 l/min を選定した。

選定したこの条件で Al 粒子注入実験を行った結果、Al 蒸発による Al 原子の輝線（波長 396nm）の観測領域が、数値解析で求めた Al 粒子の蒸発領域（図 5-3 のグレーの領域）とほぼ一致し、また生成粉はその平均粒径が 100nm 以下であった。このことから Al 粒子の蒸発・凝縮により生成されたと推定できる。さらに Al 注入量を 10 倍程度に増加させた場合も生成粉の平均粒径が 100nm 以下であったため、上記で選定した注入条件は Al 注入量増加時にも妥当と考えられた。

### 5-3 AlN 球状ナノ構造複合粒子の合成

5-1 節で述べたように、当研究所では、環境性や防災性の観点から全固体変圧器の開発研究を推進している。この絶縁材料にはエポキシ樹脂よりも高い熱伝導率、エポキシ樹脂と同等の絶縁破壊強度が必要である。熱伝導性に優れた AlN の異種サイズの球状粒子を混合しエポキシ樹脂に高充填することによりその実現が期待できる。このためには、球状のマイクロオーダーの粒子の表面に 100nm 以下の超微粒子が付着した複合粒子（AlN 球状ナノ構造複合粒子；以下、複合粒子と記す）を利用することが考えられるが、より簡易な合成プロセスの開発が望まれている。また、その合成プロセスでは、複合粒子の形状、マイクロオーダーの粒子と超微粒子との体積比および粒径比などの粒子寸法条件を制御する必要がある<sup>(11)</sup>。これらの課題を解決するためには、当研究所が超微粒子の大量合成ツールとして着目している移行形アークプラズマを利用し、プラズマ中の原材料粒子の蒸発挙動および原材料蒸気の凝縮挙動を制御する合成法が有望と考えられる。

本節では、絶縁材料用充填材として適切な粒子寸法条件を明らかにするための第 1 段階として、移行形アークプラズマを用いて複合粒子の合成を試み、その複合粒子の円形度、マイクロオーダーの粒子と超微粒子の体積比および粒径比を制御する操作条件を明らかにする。なお、円形度は、2 次元の粒子の写真から求めた面積  $S$  と周囲の長さ  $L$  から  $4\pi S/L^2$  で定義される。円であればこの値は 1 で最大となり、円から歪んだ形になるほど周囲長が大きくなるので小さい値になる。

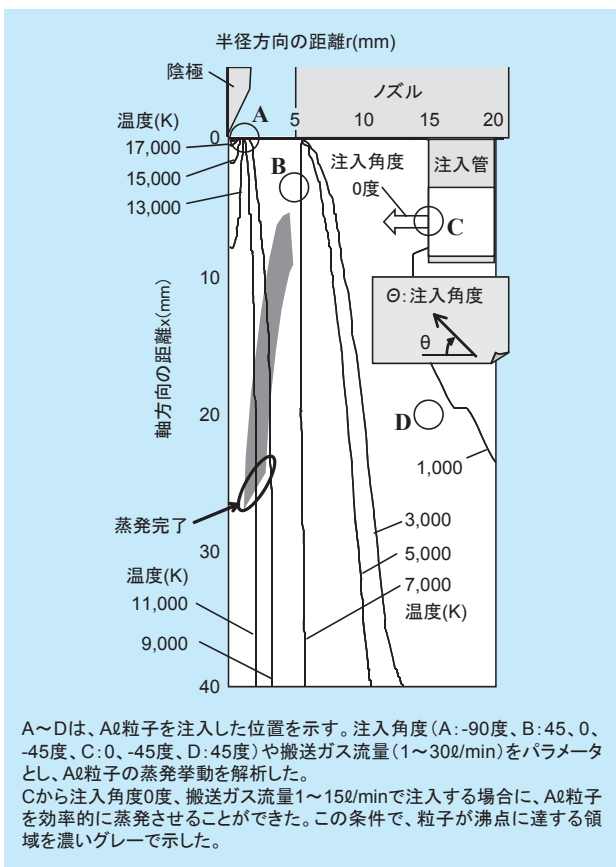


図5-3 Al 粒子の蒸発挙動の数値解析結果

前掲の図5-1と類似の実験装置を用いて、減圧下チャンバー内の窒素プラズマに原材料としてAlN 破碎粒子を注入し、プラズマ中の滞留時間およびプラズマ下流部の反応・急冷ガスの流量を変化させて、以下の結果を得た。

### 5-3-1 複合粒子の円形度

図5-4に、原材料粒子および合成した複合粒子のSEM写真を示す。また、図5-5に、複合粒子の円形度に及ぼす原材料粒子のプラズマ中の滞留時間の影響を示す。これらの図から、円形度が0.75程度の原材料粒子をプラズマ中に2ms以上滞留させることにより、その円形度を0.9程度まで向上でき、ほぼ円形の粒子の表面

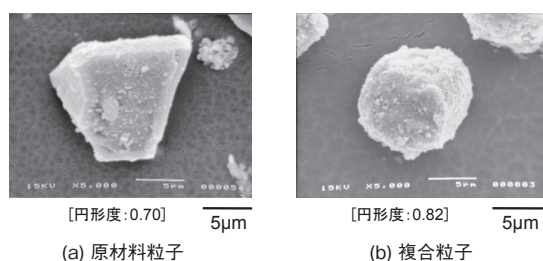


図5-4 粒子の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真

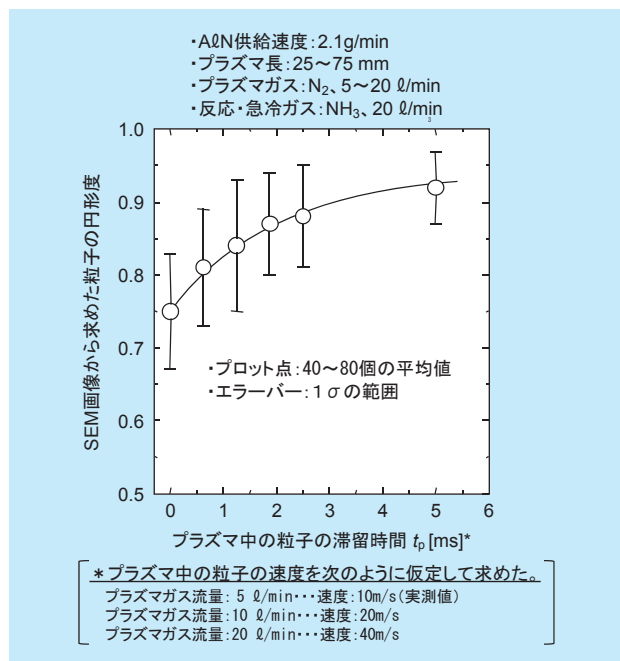


図5-5 プラズマ中の原材料粒子の滞留時間が合成粒子の円形度に及ぼす影響

に超微粒子が付着した複合粒子が得られることが分かった。

### 5-3-2 ミクロンオーダーの粒子と超微粒子の体積比

プラズマ中の原材料粒子の滞留時間を2~5msとすることにより、ミクロンオーダーの粒子と超微粒子の体積比を8:2から5:5程度まで制御できた(図5-6の○印)。また、プラズマ中の粒子の直径の減少を考慮した蒸発挙動計算を行った結果、実験結果と概略一致し(図5-6の破線)、プラズマ温度、原材料粒子の直径およびプラズマ中の滞留時間を用いて、ミクロンオーダーの粒子と超微粒子の体積比を予測できることが明らかになった。

### 5-3-3 ミクロンオーダーの粒子と超微粒子の粒径比

プラズマ中に原材料粒子を2~5ms程度滞留させ、反応・急冷ガス流量を5~20 l/minと変化させることにより、ミクロンオーダーの粒子と超微粒子の粒径比を30:1から250:1程度まで制御できた。

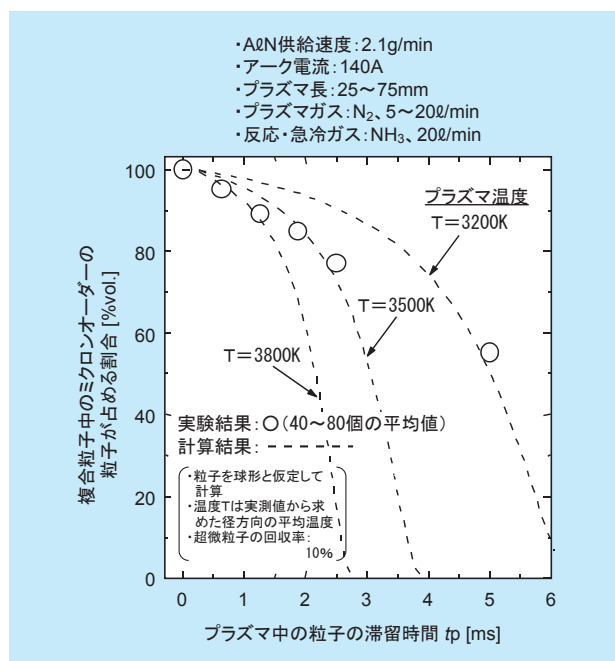


図5-6 複合粒子中のミクロンオーダーの粒子が占める割合

## 5-4 A<sub>2</sub>N 複合粒子を充填したエポキシ樹脂の熱伝導率と絶縁破壊強度

合成した A<sub>2</sub>N 複合粒子をエポキシ樹脂に充填し、その全固体変圧器用絶縁材料への適用性を明らかにするために、その熱伝導率および交流絶縁破壊強度を評価した。

熱伝導率を高くするために A<sub>2</sub>N 純度が 99% 以上と高く、絶縁破壊強度を高くするためにミクロン粒子の円形度が 0.9 程度と高い複合粒子を合成し、その複合粒子をエポキシ樹脂に充填し、その熱伝導率および交流絶縁破壊強度をそれぞれ常温で計測し、以下の結果を得た。

### 5-4-1 複合粒子を充填したエポキシ樹脂

複合粒子をエポキシ樹脂に充填した結果、図 5-7 に示すように、ミクロン粒子どうしの中にナノ粒子が分散している様子が観察された。これにより、エポキシ樹脂に 40vol.% まで充填でき、同形状を持つ市販の球状化粒子に比べて高充填化できた。

### 5-4-2 全固体変圧器用絶縁材料への適用性

全固体変圧器用絶縁材料に必要とされる熱伝導率と交流絶縁破壊強度の計算結果（図 5-8 の実線）に、常温における熱伝導率および交流絶縁破壊強度から推定した高温での値を併せて示す。複合粒子および破碎粒子は全固

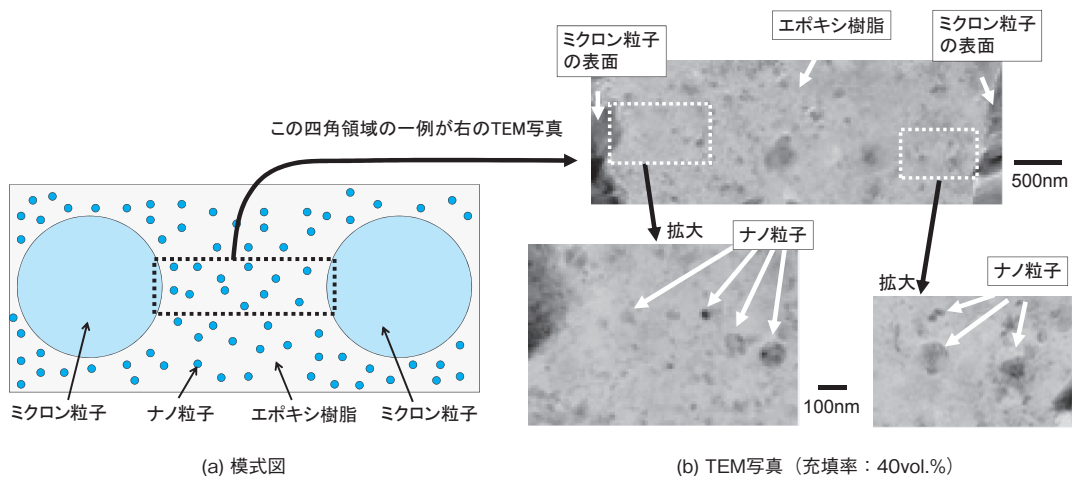


図5-7 A<sub>2</sub>N複合粒子を充填したエポキシ樹脂のTEM (透過型電子顕微鏡) 写真

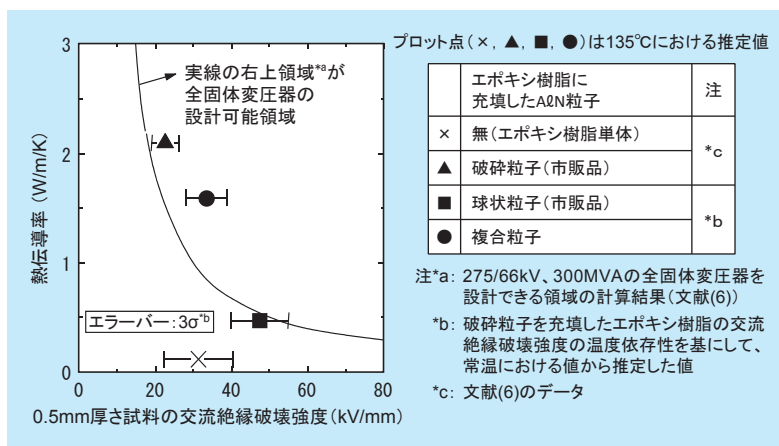


図5-8 全固体変圧器用絶縁材料に必要とされる熱伝導率と交流絶縁破壊強度の関係

体変圧器設計可能領域に含まれており、さらに破碎粒子に比べて複合粒子は、より高い設計裕度を確保できることが明らかになった。

## 参考文献

- (1) 伊藤茂男：超微粒子の利用と粉体の機能化に関する調査、電力中央研究所調査報告、W94039 (1995)
- (2) 先端材料事典編集委員会：先端材料事典、産業調査会、pp.158-166 (1995)
- (3) 電気学会 ナノコンポジット材料の誘電・絶縁応用技術調査専門委員会：ポリマーナノコンポジット材料の誘電・絶縁技術応用、電気学会技術報告 1051 号 (2006)
- (4) 渋谷正豊、岡本達希、葛間泰邦、合田豊、岩田幹正、門裕之、堀康彦、土田秀一、金神雅樹、高橋紹大、武田敏尚、田中慎一、古川静枝、水谷嘉伸、鈴木寛：全固体変電所の提案、電力中央研究所調査報告、W00047 (2001)
- (5) 水谷嘉伸、岩田幹正、堀康彦、岡本達希：全固体変圧器の要素技術の開発—絶縁材料と巻線構造の熱特性—、電力中央研究所研究報告、W01024 (2002)
- (6) 水谷嘉伸、岩田幹正、堀康彦、岡本達希：全固体変圧器の要素技術の開発（その2）—AlN 微粒子を充填したエポキシ樹脂の初期絶縁破壊強度と機械強度—、電力中央研究所研究報告、W02024 (2003)
- (7) 岩田幹正、足立和郎、古川静枝、天川正士：移行形アークプラズマを用いた高純度窒化アルミニウム超微粒子の生成特性、電力中央研究所研究報告、W02012 (2003)
- (8) 古川静枝、岩田幹正、足立和郎、天川正士：移行形アークプラズマを用いた窒化アルミニウム超微粒子の合成—原材料アルミニウム粒子の注入条件—、電力中央研究所研究報告、W02022 (2003)
- (9) 岩田幹正、古川静枝、天川正士、足立和郎：移行形アークプラズマを用いた窒化アルミニウム球状複合粒子の新しい合成法、電力中央研究所研究報告、W03031 (2004)
- (10) 岩田幹正、古川静枝、水谷嘉伸、足立和郎、天川正士：全固体変圧器の要素技術の開発（その4）—AlN 球状ナノ構造複合粒子を充填したエポキシ樹脂の熱伝導率と絶縁破壊強度—、電力中央研究所研究報告、H05008 (2006)
- (11) K. Sawai: The technical trend of epoxy molding compounds for surface mount device, *SEMI Technology Symp.*, pp.473-483 (1989)

## 第6章

# 応用技術の展開を支える 基礎・基盤的研究成果

---

6-1	アークプラズマの数値解析	44
6-1-1	アークプラズマの物性	
6-1-2	アークプラズマの数値解析技術	
6-2	アークプラズマの発生・制御技術	49
6-2-1	直流プラズマトーチにおける発生・制御技術	
6-2-2	交流プラズマトーチにおける発生・制御技術	
6-3	アークプラズマの計測診断技術	60
6-3-1	輝線スペクトルの自己吸収を考慮した温度計測技術	
6-3-2	プラズマの流速計測技術	

---

## 6-1 アークプラズマの数値解析

本節では、アークプラズマの数値解析に必要な物性の計算結果と、アークプラズマから被加熱物への伝熱現象を数値解析によって解明した成果をまとめる。

### 6-1-1 アークプラズマの物性

アークプラズマの電磁流体解析には、アークプラズマの比熱、エンタルピーなどの熱力学特性、粘性率、導電率、熱伝導率などの輸送特性、さらにアークプラズマからの放射特性など、アークプラズマの物性が必要になる。ここで、熱力学特性とは、物質を巨視的に捉えた物理量で、質量密度、エンタルピー、比熱などを指す。また、輸送特性とは、分子衝突によってある物理量が運ばれる現象を総称したものである。質量、運動量、エネルギー、電荷が、粒子の衝突によって移動する場合、それぞれの物理量の移動のしやすさを、拡散係数、粘性率、熱伝導率、導電率で表す。

局所的な熱平衡状態にあるアークプラズマを対象として、これらの物性を求めた研究成果の概要を以下に示す。

#### (1) 熱力学特性

熱力学特性の一例として、アルミナの混入したアルゴンの比熱を図6-1-1に示す<sup>(1)(2)</sup>。計算は、圧力 $10^5\text{Pa}$ 、温度 $4,000\sim 20,000\text{K}$ の範囲で、アルミナの混入率を $0\sim 100\%$ として計算している。純粋なアルゴンの場合（アルミナ混入率 $0\%$ ）には、 $14,000\text{K}$ 付近に比熱の極大が存在する。これは、この温度領域でアルゴン原子の電離が進行するためである。一方、アルミナの混入率が

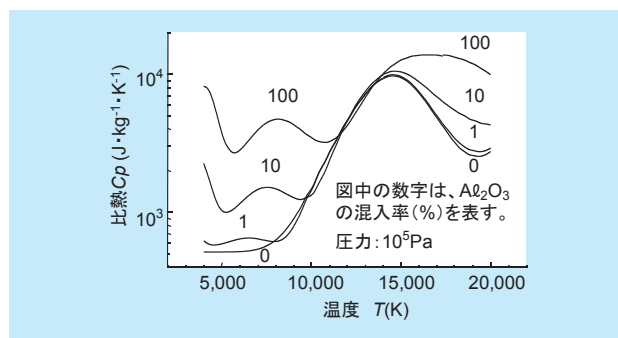


図6-1-1 アルミナの混入したアルゴンの比熱

増加していくと、 $4,000\text{K}$ 、 $8,000\text{K}$ 、 $16,000\text{K}$ 付近に極大が出現する。これらの極大は、それぞれ、 $\text{AlO}$ の解離、 $\text{Al}$ 原子の電離、 $\text{O}$ 原子の電離に対応している。

#### (2) 輸送特性

輸送特性の一例として、鉄蒸気が混入したアルゴンの導電率を図6-1-2に示す<sup>(3)(4)</sup>。同図から、 $15,000\text{K}$ 以下の温度領域では、わずかな鉄蒸気の混入により導電率が著しく増加すること、それ以上の温度領域では、鉄蒸気の混入により導電率が低下することが分かる。これは、次のように説明できる。すなわち、導電率は電子密度に比例し、電子が衝突する粒子の密度と衝突断面積との積の総和にほぼ反比例する。 $15,000\text{K}$ 以下の温度領域では、鉄の電離エネルギー（ $7.90\text{eV}$ ）がアルゴンの電離エネルギー（ $15.755\text{eV}$ ）に比べて小さいため、鉄の混入により電子密度が著しく増加するため導電率が増加する。一方、 $15,000\text{K}$ 以上の温度領域では、大きなクーロン衝突断面積を持つ $\text{Fe}^{2+}$ が出現するため導電率は低下する。

当研究所は、上述のアルミナが混入したアルゴンガス<sup>(1)(2)</sup>、鉄蒸気が混入したアルゴンガス<sup>(3)(4)</sup>の他に、鉄、銅、アルミニウムが混入した空気<sup>(5)</sup>について、熱力学特性や輸送特性を計算するプログラムを開発している。

#### (3) 放射特性

大気圧以上の気体において、数A以上の電流によって生成されるアークプラズマは、温度が $10,000\sim$

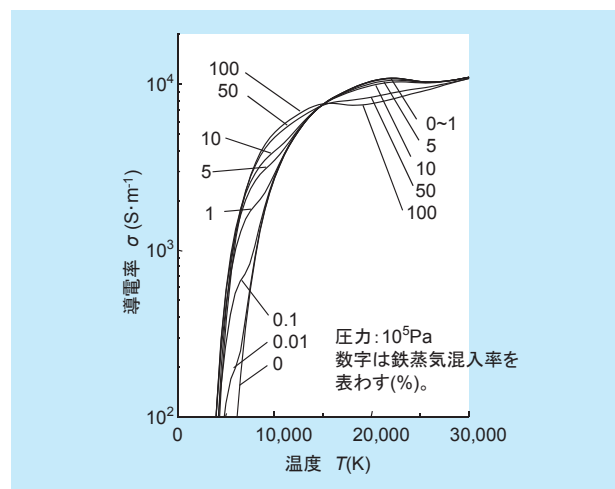


図6-1-2 鉄蒸気が混入したアルゴンの導電率

30,000Kに達し、強い光が放射される。この放射光は、主としてアークプラズマ中の電子が関与しており、アークプラズマを構成する元素に固有の波長を示す線スペクトルや、広い波長範囲で連続的な強度分布をもつ連続スペクトルからなる。

一般に、原子やイオン、分子の周りに束縛されている電子には、安定に存在できる離散的なエネルギー準位が存在する。線スペクトルは、安定なエネルギー準位からより高いエネルギー準位へ励起された電子が、安定なエネルギー準位へ再び遷移する際に、これらの準位のエネルギー差に応じた波長の光を放射することによって発生する。一方、アークプラズマ中の自由電子が、原子やイオンなどと衝突しエネルギーを失う場合や、自由電子がイオンと再結合する場合には、自由電子が持つエネルギーが一意に決まらないので、放出されるエネルギーは連続的なものとなり、波長に対し連続的な分布を持つ光が放射される。

アークプラズマから放射される光のスペクトル分布やその強度が放射特性と呼ばれる。放射特性は、アークプラズマの（電子）温度や（電子）密度などの非接触な計測診断に利用されている。また、放射輝度（アークプラズマの放射エネルギーの出力密度）、放射効率（エネルギー変換効率）、分光分布（放射エネルギーの波長分布）に代表される光源の特性評価に重要である。

当研究所では、アークプラズマからの放射光がアークプラズマ自身に吸収されるプロセスを考慮して、基幹送電線の故障電流を想定した50kA級アークの温度<sup>(6)</sup>（6章3節）などの特性を解明している。また、アークプラズマからの放射光を利用し、金属表面の非晶質化による耐摩耗性、耐食性、耐熱性を向上させることを目指した研究<sup>(7)</sup>を推進した。これらの研究の中で、分光放射輝度を計算するプログラムを開発している<sup>(8)</sup>。

ここでは、アークプラズマの放射輝度などの放射特性に与える電流などの影響を基礎的な実験を通して解明した研究成果<sup>(9)</sup>と、開発した分光放射輝度を計算するプログラムを用いた解析結果の一例を紹介する。

①電流などがアークプラズマの放射輝度に与える影響

局所熱平衡状態が成立するアークプラズマの放射光を連続スペクトルとみなし、アークプラズマの半径で規格化した電界-電流特性を用いて、アークプラズマの放射

輝度、アークプラズマの半径、および電流との関係を解析的検討から導出した。この関係から、放射輝度はアークプラズマの半径に反比例し、アークプラズマの電界と半径が一定の場合の放射輝度は電流の2乗に比例することが示唆された。そこで、水冷した石英管（内径15mm）内に、電流が直流20～60A、電極間隔が15～44mmの範囲でアルゴンのアークプラズマを発生させ、放射輝度はガス流量や電極間隔にはほとんど依存せず、電流の2乗に比例することを確認した。この結果から、適用範囲を考慮すれば、アークプラズマの放射輝度は便宜上、電流および半径から予測できることがわかった。

②自己吸収を考慮した分光放射輝度計算プログラムの開発

局所熱平衡状態が成立するアークプラズマにおいて、幅広い温度域や圧力域で計算できる分光放射輝度計算プログラムを開発した。このプログラムでは、アークプラズマの線スペクトル放射、再結合放射、および制動放射の放射機構ならびに光学的厚さ（粒子による光の吸収）を考慮した三次元でのシミュレーションが可能である。図6-1-3に計算結果の一例を示す。アークプラズマの直径を1cmとし、高压高温のアルゴンのアークプラズマについて、圧力、および温度の空間分布の依存性を考察した結果、アークプラズマによる光の吸収を考慮しない場合の放射輝度は、考慮する場合と比べて最大で約10倍も過大評価することが示された。

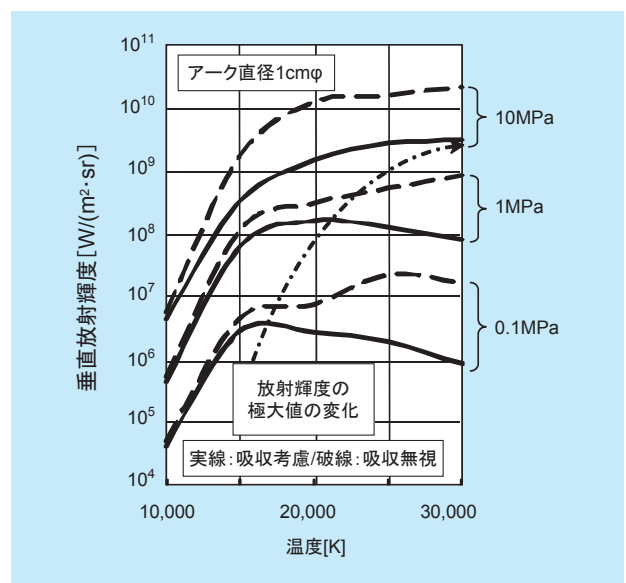


図6-1-3 アルゴンのアークプラズマの放射輝度

## 6-1-2 アークプラズマの数値解析技術

アークプラズマを用いた廃棄物の溶融処理などにおいて、アークプラズマから被加熱物への伝熱に関する知見は、溶融処理工程の加熱シーケンスの確立や、高効率・安定な加熱といった観点から重要である。アークプラズマから被加熱物への伝熱に影響を及ぼす因子としては、熱伝導率などのアークプラズマの物性を始め、ガス流量などのプラズマトーチの運転条件、また溶湯が形成される場合は溶湯蒸気の混入状況、溶湯の形状やアークプラズマを構成している元素と溶湯との化学反応などが挙げられる。このため、当研究所では、これらの影響因子が及ぼす影響に関して、電磁流体解析技術を用い解明してきた。

本節では、電磁流体解析の概要を纏めた後、当研究所が行ってきた数値解析のうち、陽極点現象に関する研究成果とアークプラズマから被加熱物への伝熱現象に関して述べる。

### (1) アークプラズマの数値解析手法（電磁流体解析）

流体解析では、質量、運動量、エネルギーの各保存則を解くことによって、場の圧力、速度、温度を決定する。これらの保存則は一般形では次式のように表される<sup>(10)~(12)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S \quad (6-1-1)$$

$t$ : 時間、 $\rho$ : 密度、 $\phi$ : 単位体積当たりのある物理量（質量、運動量、エネルギー）、 $\mathbf{u}$ : 速度場、 $\Gamma$ : 輸送係数、 $S$ : 生成項、である。ただし、輸送特性と生成項は、着目している物理量によって決まる。例えば、エネルギーに着目した場合、 $\phi$  は温度（エンタルピー）、 $\Gamma$  は熱伝導率、 $S$  は単位体積当たりの発熱量になる。

この式の物理的な意味は、ある微小な領域内で着目している物理量  $\phi$  の時間変化（左辺第1項）は、物理量  $\phi$  の領域の境界を通じた出入り（左辺第2項と右辺第1項）とその領域内部での発生（右辺第2項）に等しいというものである。左辺の第2項は対流項で、物理量  $\phi$  が流れ場によって運び出される量を表している。また、右辺の第1項は拡散項で、物理量  $\phi$  の勾配によって領域に移動してくる量を表している。

アークプラズマの数値解析では、流体解析に加え電荷の保存則を解き、電荷の移動として電流を、さらに、マクスウェル方程式により電流を規定する電界や電位が求められる。また、電流が作る磁界から、磁場とアークプラズマの相互作用なども考慮できる。

さらに、アークプラズマの数値解析では、着目する現象に応じて保存則を分離・追加して解くことも行われている。例えば、アークプラズマの周辺や電極領域などでは、電子と重粒子（分子、原子、イオン）の温度が異なっている。このような場合には、電子と重粒子について、それぞれのエネルギー保存則を解くことが報告されている<sup>(13)~(14)</sup>。また、アークプラズマに注入された粒子とアークプラズマの相互作用を解析的に検討する場合など、化学種の生成や消滅に着目する場合には、アークプラズマを構成している化学種の保存則を解くことが報告されている<sup>(15)</sup>。

### (2) 陽極点現象の数値解析

大気圧の熱プラズマの陽極点には、2つの異なった形態があることが知られている<sup>(16)</sup>。すなわち、拡散モードと呼ばれるベル形に広がった形態および収縮モードと呼ばれる収縮した形態である。アルゴン（Ar）中での電流 50A のアークプラズマの拡散モードと収縮モードの一例を図 6-1-4 に示す。プラズマガスの流量以外は全て同一の条件である。同図(a)に示す拡散モードは、陽極に向かうガス流の影響を強く受けた場合に存在する。陽極へ向かうガス流は、プラズマトーチのように陰極周囲に流すガスなどによって生じる。同図(b)に示す収縮モードは、熱的な効果とアークプラズマの電流による自己磁場のピンチ力によって誘起される形態である。すなわち、

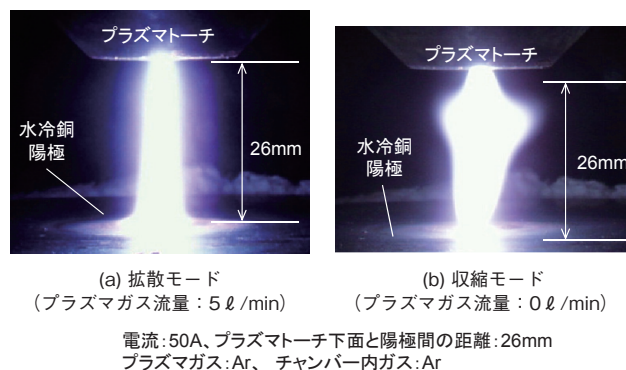


図6-1-4 拡散モードと収縮モードの一例



陽極の近くのアークプラズマの周辺は陽極によって冷やされるため、アークプラズマの断面積は、陽極に近づくほど小さくなる。このため、電流の流線は陽極から離れるにしたがって広がり、自己磁場と電流によってコラムの外側から中心方向へ作用するピンチ力は、陽極から遠ざかるにつれて弱くなる。この結果、コラム内部の軸方向への圧力勾配が発生し、陽極ジェットが観察される。器壁安定化装置の出口から陽極までの200Aのアークプラズマを対象として、プラズマガス流量を変え、これら2つのモードを解析した<sup>(17)</sup>。

拡散モードの解析結果として、プラズマガス流量を0.2、0.6、1.0g/sと変えた場合の電子温度12,000Kと7,000Kの等温線を図6-1-5に示す。同図から、器壁安定化装置の出口の下領域では、プラズマガス流量が増加するにつれアークプラズマの高温部分が下方に伸びることが分かる。これは、対流の寄与が大きくなるためである。一方、周辺の領域では、プラズマガス流量の増加とともに等温線は中心へ向かって移動していることが分か

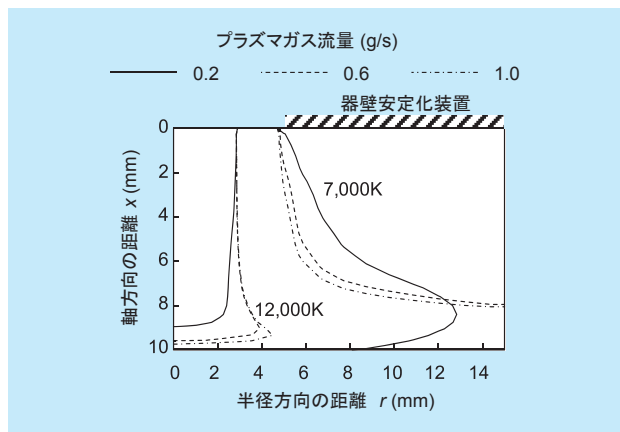


図6-1-5 プラズマガス流量を変えた場合の電子温度の等温線

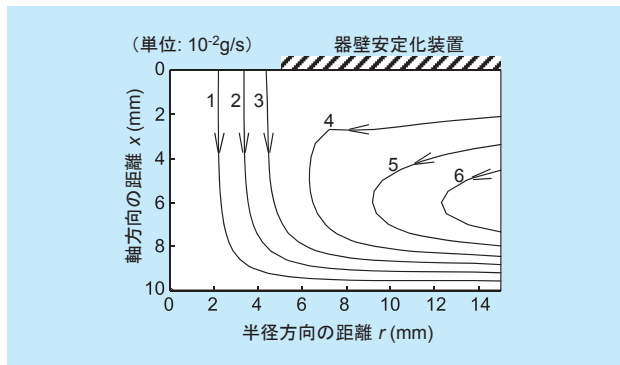


図6-1-6 プラズマガス流量が0.2g/sの場合の流線

る。これは、器壁安定化装置の下部においてアークプラズマに流れ込む冷たいガスの流量が増加するためである。プラズマガス流量が0.2g/sの場合の流れ場を図6-1-6に示す。同図から、器壁安定化装置から吹き出し陽極に衝突し外側へ吹き出すガスの流れと、器壁安定化装置の下部で、計算領域の外側から流入しアークプラズマに流れ込むガスの流れが観察できる。

次に収縮モードでの計算結果を示す。まず、プラズマガス流量を0.001～0.05g/sの範囲で変えた場合の電子温度の等温線を実験結果<sup>(18)</sup>とともに図6-1-7に示す。文献<sup>(18)</sup>では、プラズマガス流量が計測されていないが、今回の計算結果は、プラズマガス流量が0.02g/s以下で良い一致を示している。次に、図6-1-8に、プラズマガス流量が0.01g/sの場合の流線を示す。同図から、器壁安定化装置の出口から吹き出すプラズマの流れと陽極

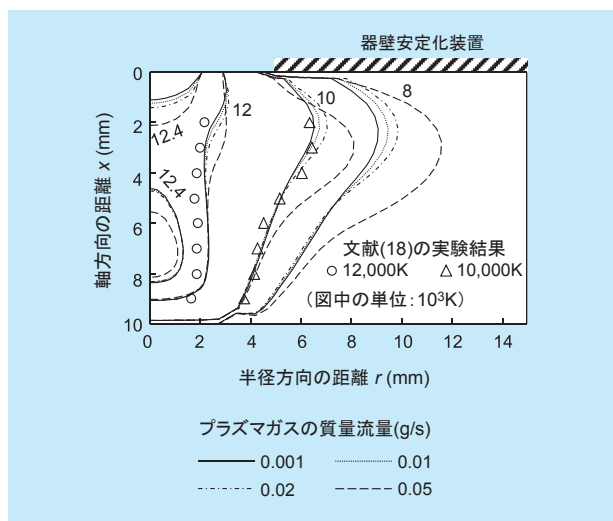


図6-1-7 収縮モードの電子温度の等温線

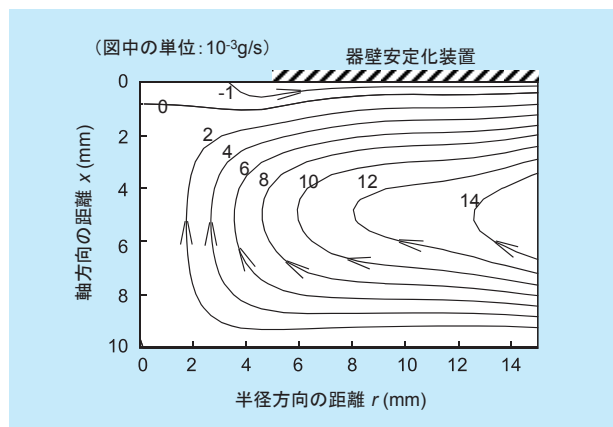


図6-1-8 プラズマガス流量が0.01g/sの時の流線

ジェットが衝突し、その結果、淀み層が器壁安定化装置の下約0.4～1mmの範囲に存在すること、器壁安定化装置の下面に沿って外側への流れが存在すること、さらに、陽極ジェットの発生により陽極前面では外側の境界からプラズマへ向かう流れが存在することが分かる。拡散モードの流れ場(図6-1-6)と様相が全く異なっている。

以上のように、拡散モードと収縮モードについて、陽極点現象を解析できるツールを開発した。

(3) 固体陽極への伝熱現象の数値解析

アークプラズマの物性値が、伝熱機構や伝熱に及ぼす影響を解明した<sup>(19)</sup>。

陽極は、溶湯からの蒸気の影響を受けないように固体水冷銅陽極とした。ガス種は、プラズマ溶融処理において用いられる代表的なガスであり、また、互いに特長的な物性値を持つアルゴン(Ar)および窒素(N<sub>2</sub>)とした。対象とするアークプラズマは2次元円筒座標で扱った。また、水冷銅陽極に隣接した微小体積を以ってシース領域を考慮した<sup>(20)</sup><sup>(21)</sup>。支配方程式として、質量、軸・径方向の運動量、エネルギー、電荷の各保存則を解いた。アークプラズマ<sup>(22)</sup>および銅<sup>(23)</sup>の物性値は温度依存性を考慮した。

移行形アークプラズマから固体水冷銅陽極への伝熱機構としては、放射は小さいため考慮せず、荷電粒子による

熱輸送としてアークプラズマから陽極への電子のエンタルピー輸送および電子のコンデンセーション、および熱伝導の合計3種の伝熱機構を考慮した<sup>(24)</sup>。

図6-1-9に(1) Ar プラズマ、(2) N<sub>2</sub> プラズマの温度分布を示す。5,000～13,000Kの範囲の等温線を比較すると、Ar プラズマの方が太く、N<sub>2</sub> プラズマの方が細い。また、中心部における13,000Kを超えると等温線はN<sub>2</sub>が太い。

また、図6-1-9の温度分布の計算結果を基に得た水冷銅陽極への伝熱量の計算結果を、実験結果<sup>(25)</sup>と比較し、図6-1-10(1)、(2)に示す。また、同図(3)は、水冷銅陽極への伝熱に強く影響するプラズマの物性を明らかにする

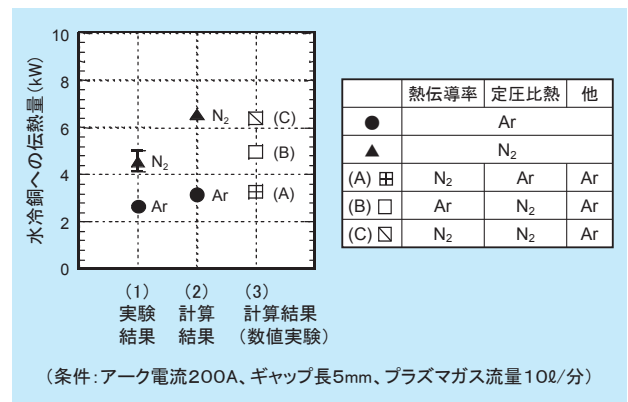


図6-1-10 水冷銅陽極への伝熱量に関する(1)実験結果と(2)計算結果との比較および(3)計算に用いた熱伝導率比熱をN<sub>2</sub>プラズマの物性とした計算結果

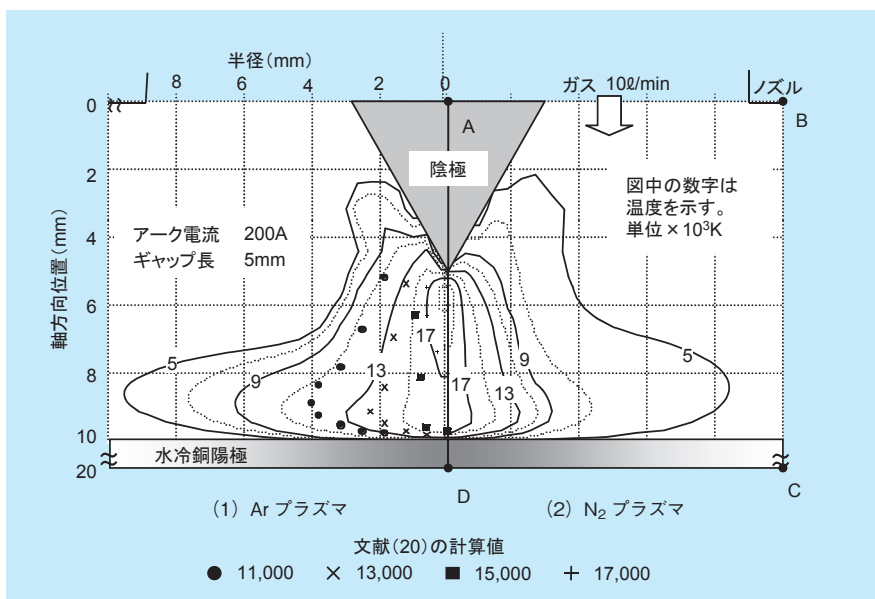


図6-1-9 (1) Ar、(2) N<sub>2</sub> プラズマの温度分布計算結果

ため、Ar プラズマの物性値の一部を N<sub>2</sub> プラズマの物性値に置き換えて伝熱量を計算した結果である。すなわち、(A)では熱伝導率のみを、(B)では定圧比熱のみを、(C)熱伝導率と定圧比熱の双方を N<sub>2</sub> プラズマの物性値とし、導電率などの他の物性値は Ar プラズマとした。このような手法は、実験では実施することができないため、数値解析の長所を活かしたアプローチである。図 6-1-10(1)(2)から、今回解析した水冷銅陽極への伝熱量は、定量的には N<sub>2</sub> プラズマの場合に差異が見られるものの、定性的には実験結果と同様の傾向を示している。また、同図(2)(3)から、(C)の熱伝導率と定圧比熱の双方を N<sub>2</sub> プラズマの物性値とした場合の水冷銅陽極への伝熱量の計算結果が、N<sub>2</sub> プラズマの値に近いことが分かる。この理由は、これらの物性値を N<sub>2</sub> プラズマの値とすることで、Ar プラズマの場合に比べて、水冷銅陽極との境界における温度が比較的高く、かつ熱伝導率も高くなるためである。

以上より結論を纏める。アークプラズマから水冷銅陽極への伝熱機構は、熱伝導機構による寄与が高い。また、水冷銅陽極への伝熱に影響を及ぼしている支配的な物性は熱伝導率と定圧比熱の両者であった。N<sub>2</sub> を用いた場合、窒素分子の解離反応に伴う熱伝導率と定圧比熱の値が共に高いことが効率良い伝熱を実現させている。これより、アークプラズマの被加熱物への伝熱量増大には、熱伝導率と定圧比熱が共に高いガスの選択が有効である。

(4) 溶湯陽極への伝熱現象の数値解析

本節では、陽極を溶湯陽極とし、溶湯からプラズマに混入する銅蒸気が伝熱量に及ぼす影響を数値解析手法により評価した結果<sup>(26)</sup>に関して述べる。

N<sub>2</sub> プラズマの導電率は、銅蒸気濃度が 10<sup>-1</sup>% 未満の領域で、なおかつ温度が 7,000K 以下でのみ銅蒸気濃度に依存する。一方、熱伝導率や比熱といった他の物性値は、ほとんど変わらない<sup>(27)</sup>。そこで、銅蒸気の混入による導電率の影響を数値解析手法により調べた。

窒素プラズマの導電率は、文献<sup>(4)(28)(29)</sup>から求めた。数値解析では、導電率の値のみをこれらの銅蒸気濃度の値に対応した値を入力し温度場などを計算した。

図 6-1-11 に銅蒸気が混入した場合のプラズマの温度分布の計算結果を示す。銅蒸気濃度は 10<sup>-1</sup>%、10<sup>-5</sup>% で全領域に一定濃度で分布しているとした。これらの銅蒸

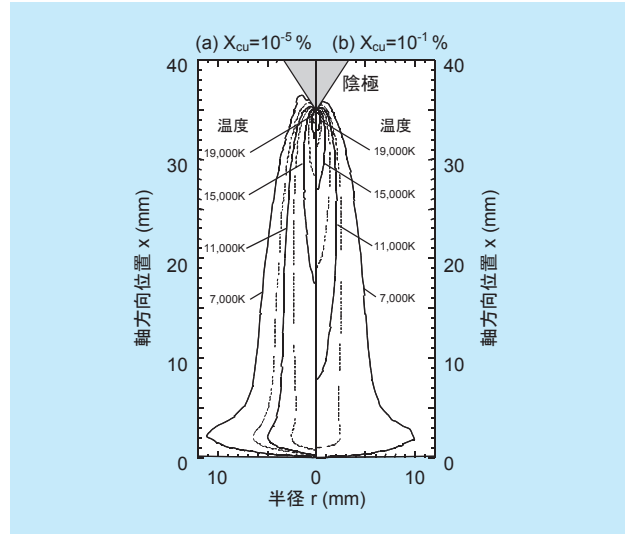


図6-1-11 それぞれの銅蒸気濃度下におけるアークプラズマの等温線の数値解析結果

気濃度はそれぞれ銅の溶湯陽極と水冷銅陽極を形成した場合において分光計測により測定した結果<sup>(26)</sup>を用いた。銅蒸気の混入に伴う導電率の上昇の結果、固体水冷銅陽極の場合に比較して中心軸周りの温度が低くなった。さらに、5,000K から 10,000K への温度領域においては、窒素プラズマの熱伝導率がプラズマの温度に強く依存するため、温度のわずかな低下が熱伝導率の顕著な低下を引き起こした。熱伝導率の低下は、陽極への伝熱量をさらに低下させる。

以上より、アークプラズマから溶湯陽極への伝熱量に関して、銅蒸気の混入に起因する導電率の上昇は、プラズマの温度の低下をもたらし、最終的に熱伝導率の低下をもたらすことが明らかとなった。したがって、金属蒸気のアークプラズマへの混入は、この被加熱物への加熱効率の低下を引き起こすことが明らかとなった。これらは、プラズマから被加熱物への伝熱現象の解明の一助となるだけでなく、実際の処理時における有効な知見である。

6-2 アークプラズマの発生・制御技術

6-2-1 直流プラズマトーチにおける発生・制御技術

(1) 直流プラズマトーチにおける電極損耗現象

アークプラズマ加熱技術は、その優れた特長から、金属の溶解や精練、廃棄物の減容、有害物質の熱分解・溶

融による無害化などへの応用が展開している。これらの応用技術の実用化やその高度化にあたっては、プラズマトーチの長寿命化と大容量化、運転コストの低減などを克服する必要がある。このため、当研究所は、まず、タングステン（W）系の合金を陰極とする直流のプラズマトーチについて、電極寿命を決定する電極損耗量に及ぼす添加材の種類の影響などを解明した<sup>(30)</sup>。次に、新日本製鐵株式会社（以下、新日鉄）との共同研究により、新日鉄が開発したプラズマトーチと当研究所の大容量電力短絡試験設備を用いて、世界トップレベルの10kA級のアークプラズマの発生に成功した<sup>(31)</sup>。さらに、プラズマガスをアルゴン（Ar）から安価な窒素（N<sub>2</sub>）に変えると、電極損耗量は増加するものの、運転コストを低減できることを明らかにした<sup>(32)</sup>。

#### ①タングステン電極のアークプラズマによる損耗

W電極へ添加する材料の種類が、電極の損耗に及ぼす影響を、実験用のプラズマトーチを用い明らかにした<sup>(30)</sup>。添加材としては、当時研究が行われていて<sup>(33)</sup><sup>(34)</sup> 比較的入手の容易な酸化ランタン（La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）、酸化セリウム（CeO<sub>2</sub>）、酸化トリウム（ThO<sub>2</sub>）、酸化イットリウム（Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）を選んだ。アークプラズマを10時間以上発生させた結果、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を添加した電極は、その損耗量と直径の減少量が少ないことから、電極材料として有望であることが分かった。

次に、プラズマトーチの運転条件として、電極損耗量の電流依存性やプラズマガス中の酸素濃度の影響を実験的に調査した。その結果、単位通過電気量あたりの損耗量（損耗率）は、電流の増加とともに急激に増加した。これは、電極の冷却能力は冷却構造や冷却水の流量などで決定されるため電流に関わらずほぼ一定と考えられるが、アークプラズマから電極への入力エネルギーは電流の増加により増加するためと考えられる。プラズマトーチの電極損耗量を低減し、その寿命を延ばすためには、電極の冷却が重要な要素となる。また、プラズマガス中に酸素がわずかでも存在すると、電極は酸化反応により著しく損耗する。電極周辺に酸素が混入しない構造にすることが重要である。

#### ②加熱用プラズマトーチの大電流化

大規模な産業加熱へアークプラズマ加熱を応用するた

めには、プラズマトーチの大容量化が重要である。ロッド形プラズマトーチでは、アークプラズマの電圧はアークプラズマの長さでほぼ決定される。このため、電圧で出力を大きくするためには、アークプラズマを長くする必要がある。しかし、アークプラズマを長くすると、放射エネルギーが大きくなり耐火物の寿命が短くなること、アークプラズマが不安定になりやすいこと、また、炉の大きさの制約を受けること、などが懸念されるため現実的ではない。このため、ロッド形プラズマトーチの大容量化のためには、大電流化が重要になる。

当研究所は、1988年度から1990年度にかけて、世界トップレベルの10kA級プラズマトーチの開発を目指し、新日鉄と共同研究を実施し、図6-2-1に示すリング形のタングステンを陰極に使用したプラズマトーチが、10kA級の大電流に対し必要な陰極面積を有し、その時に発生する熱応力に耐えることを明らかにした<sup>(31)</sup>。

プラズマトーチの電極材料には、電極損耗の実験結果を踏まえ、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、または、ThO<sub>2</sub>を添加した2種類のW陰極を準備した。実験では、0.1～11kAの直流電流を、60～300秒間通電しアークプラズマを発生させ、これを反復した。その結果、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陰極の場合には5.1kAで積算34分、11.4kAで積算3分のアークプラズマを、ThO<sub>2</sub>陰極の場合には5.7kAで積算10分のアークプラズマを安定に発生できた。この結果から、陰極は10kA級のアークプラズマの発生中に生じる定常的な熱応力や、陰極の温度分布が平衡に達する時間に比べ短い時間での5kA程度の電流の昇降により発生する過渡的な熱応力に耐えると判断した。

また、実験時には通電が終了する毎に、陰極の型を取ることで陰極の損耗量を計測した。その結果、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を添加したタングステン陰極の損耗率は、電流6kAで $(2\sim 3)\times 10^{-6}$  (g/(A・s))、10kAで $21\times 10^{-6}$  (g/(A・s))と、アーク電流の増加に対し急増した。損耗率の電流依存性は、小電流域で得られた結果と定性的に同じ傾向である。

さらに、実験時には望遠接写が可能な光学計測系を構築し、約10mほど離れた2か所の地点から陰極点の状況を高速ビデオ（400コマ/秒）などで観察した。その結果、陰極点は、電流3kA以下では1か所に安定に、3kAを超えると2～4箇所に分散して形成された。その状況を図6-2-2に示す。また、これらの画像から、陰

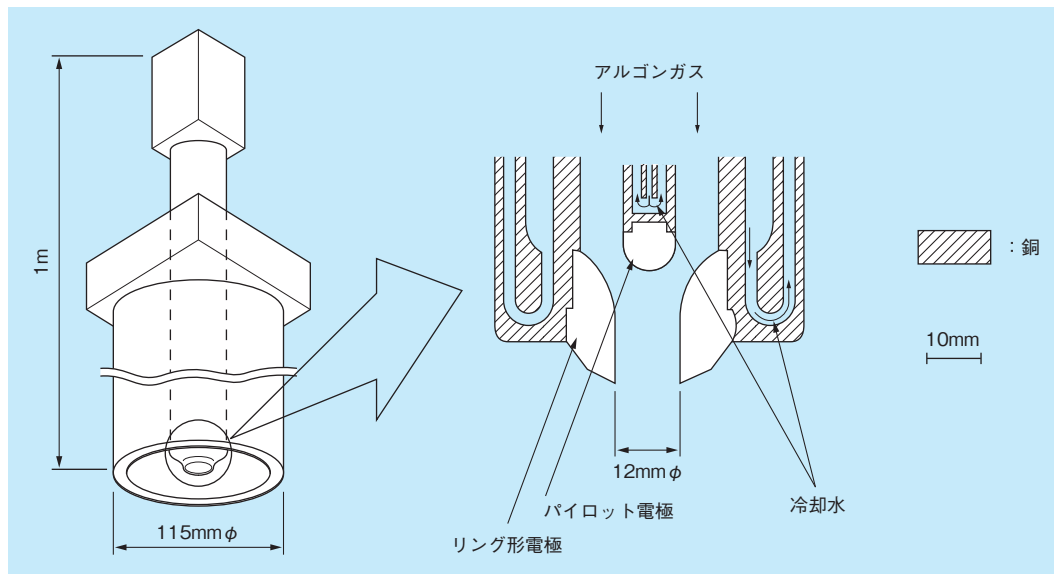


図6-2-1 プラズマトーチとその電極形状

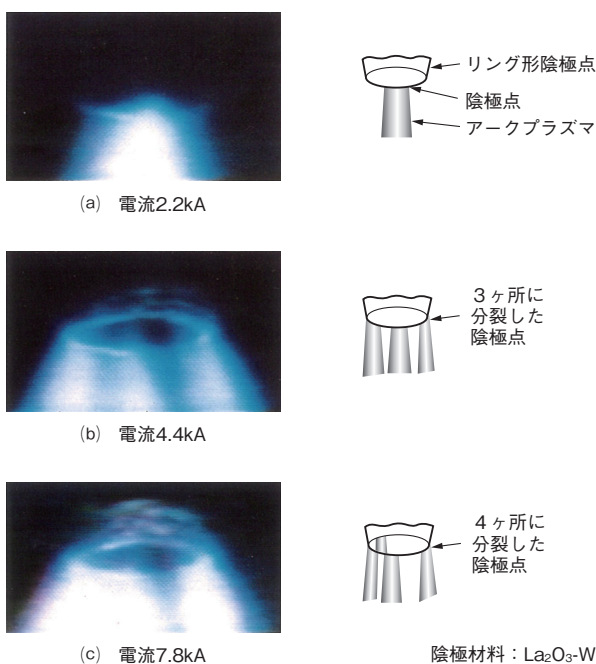


図6-2-2 高速度ビデオで観察したプラズマトーチ陰極におけるアークの発生状況

極点の面積はアーク電流に比例して増加し、陰極点での平均電流密度は  $6 \sim 9 \text{ kA/cm}^2$  の範囲にあった。

以上のように、大容量プラズマトーチの設計に資するデータを取得することができた。

### ③プラズマトーチの運転コストの低減

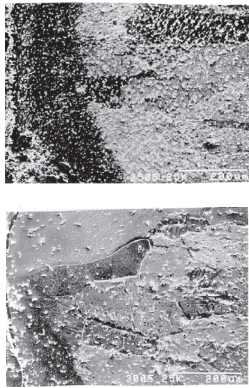
タングステン系の合金を陰極とするプラズマトーチで

は、通常プラズマガスとして Ar が用いられる。運転コストを低減するため、Ar に代えて安価な窒素 ( $\text{N}_2$ ) にすることが考えられる。しかし、この場合には、電極の損耗量が増加することが懸念される。そこで、プラズマガスを Ar から  $\text{N}_2$  に代えた場合の電極損耗現象を実験的に明らかにし、電極の損耗に伴うコストとガスのコストを比較評価した<sup>(32)</sup>。

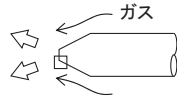
実験では、 $\text{La}_2\text{O}_3$  を添加した W を陰極とし、直流 400A の移行形のアークプラズマを積算で 100 時間まで安定に発生させ、電極損耗現象に関し以下を明らかにした。

まず、Ar に代え  $\text{N}_2$  を使用した場合、電極損耗量は、25 ~ 50 倍に増加する。これは、アークプラズマから電極に伝わる熱が増加し、損耗を防ぐ添加材  $\text{La}_2\text{O}_3$  が図 6-2-3 に示すように電極の先端で減少するためと考えられる。ここで、電極の冷却の効果を確認するため、電極の直径を 6mm から 7mm へと 2 割ほど太くすると（断面積で 1.4 倍）、電極損耗量を 0.3 ~ 0.6 倍に低減できた。電極の冷却能力は、電極の寿命に重要な因子であることが明らかになった。

次に、Ar と  $\text{N}_2$  を用いた場合について運転コストの比較を行った。運転コストには、ガス、電極と電力を考慮した。その結果、 $\text{N}_2$  を用いれば約 2 割のコストダウンが可能であることが明らかになった。



(1) Arガスの場合  
先端の0.2mm程度の領域で  
添加物(白い点)が減少している。



(2) N<sub>2</sub>ガスの場合  
Arガスの場合に比べ添加物  
(白い点)が著しく減少している。

200µm

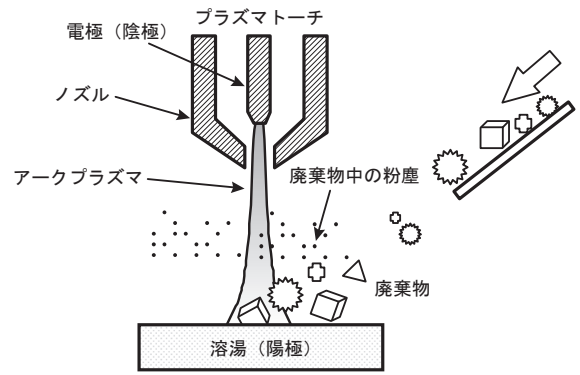


図6-2-3 電極先端部断面の組織の電子顕微鏡による拡大写真

## (2) 熔融処理時のアークプラズマの安定性

### ① アークプラズマの安定性を損なうメカニズム

移行形アークプラズマによる加熱は、非移行形アークプラズマによる加熱に比較して、ガス流量(排ガス量)が少ないという特長がある。しかし、低レベル放射性雑固体廃棄物などの廃棄物の処理では、保温材などの不燃物を金属と同時に処理する必要があるため、プラズマ溶融炉に不燃物などが投入されたとき、アークプラズマが不安定になり、消弧したり、加熱パワーが変化したりすることがある。このため、廃棄物が投入されたときのアークプラズマの変化について理解しておくことは重要である。

アーク電圧は、アークプラズマを形成している電極間の電圧であり、加熱対象が一方の電極となる移行形アークプラズマにおいては、プラズマトーチの電極と加熱対象間の電圧である。アーク電圧は、アークプラズマの安定性や加熱能力と密接に関わる重要なパラメータであり、計測が容易である。このため、アーク電圧は、アークプラズマの安定性の指標となり得る。

移行形アークプラズマで廃棄物を溶融中にアーク電圧が変化する機構は、概ね図6-2-4に示すとおり、4つである<sup>(35)</sup>。

まず、「1. プラズマの冷却による導電性の低下」について述べる。6-1-1項で述べたように、アークプラズマの導電率は温度に強く依存する。廃棄物の投入により、アークプラズマが冷却されるとアークプラズマの導電率は急速に低下し、アーク電圧は上昇する。正確にはアークプラズマは、周囲条件により形態や性質が変化するため、局所的な導電率の低下が常にアークプラズマ全体の

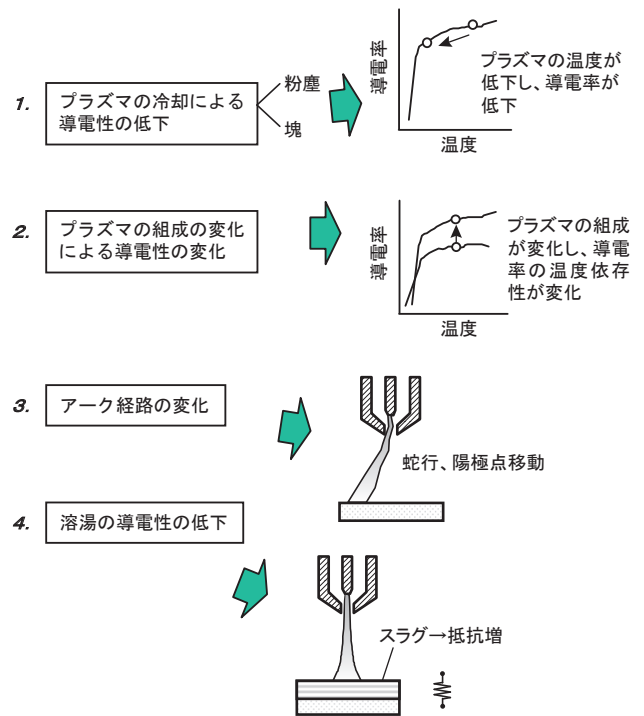


図6-2-4 廃棄物投入時のアーク電圧の変化の機構

抵抗を増加させるとは限らない。しかし、廃棄物がアークプラズマに接したときにアークプラズマ内で起こる現象は、上記のように単純には説明できないが、大筋では、このように理解しておいて差し支えない。

次に、「2. プラズマの組成の変化による導電性の変化」について述べる。投入された廃棄物は、アークプラズマから熱を奪いながら、急速に溶融・気化する。このとき、ガス化した廃棄物は、アークプラズマの内部に混入し、アークプラズマの組成を変化させる。この結果、アークプラズマを構成する高温気体の輸送特性が変化し、アーク電圧も変化する。ただし、廃棄物投入に伴うガス組成の変化が、アーク電圧を上昇させる方向に作用するのか、あるいは低下させる方向に作用するのかは、廃棄

物の成分により異なることに注意が必要である。一般的には、金属を多く含む廃棄物の場合、金属蒸気が混入することになり、6-1-1項に示したように、アークプラズマの導電性を向上させ、電圧を低下させる方向に作用し、後述のように、可燃物を多く含む場合、解離エネルギーの高い多原子分子の混入に伴う温度低下により、導電性が低下し電圧を上昇させる方向に作用する。

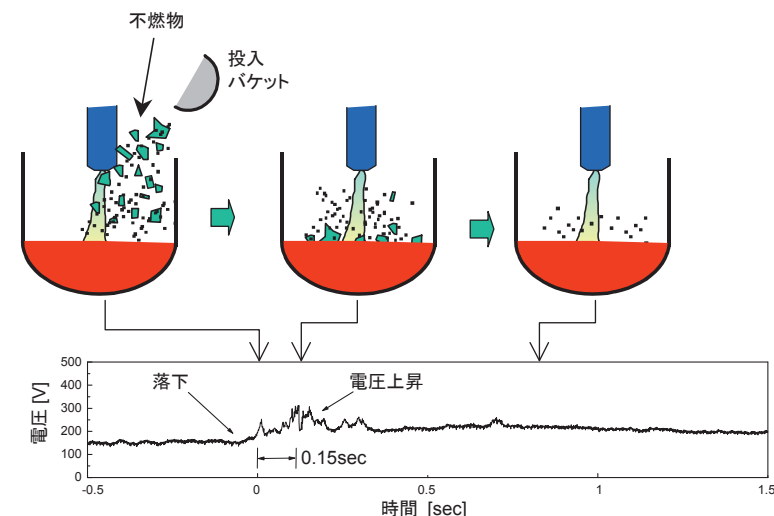
次の「3. アーク経路の変化」とは、特に低ガス流量で金属に比較して導電性の低いスラグを加熱している場合に起こりやすい現象で、炉内への廃棄物の投入に伴い、加熱対象表面の陽極点が移動し、アークプラズマが斜めになったり蛇行したりすることを指す。実質的にアークが長くなるため、電圧は上昇する。陽極点は急激に移動する場合があります、アークプラズマの消弧に至りやすいため注意が必要である。

最後に「4. 溶湯の導電性の低下」について述べる。

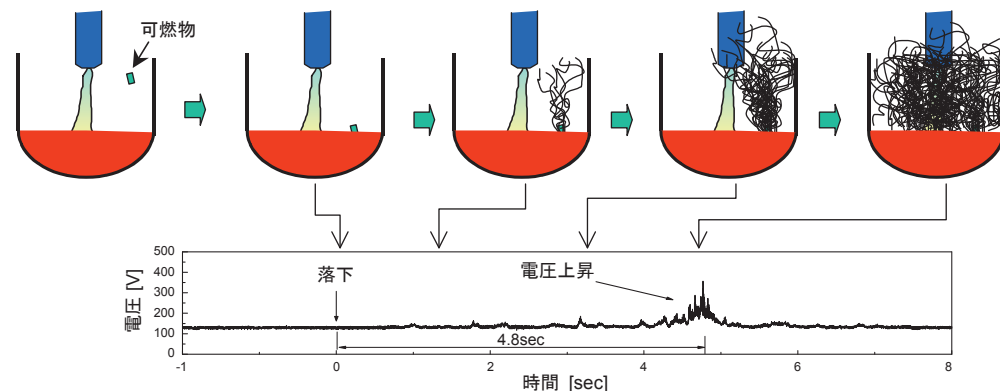
本来、アーク電圧に電極内の抵抗分に相当する電圧は含まれていない。また、通常の電極系ではこの抵抗は十分に小さいので無視できる。しかし、廃棄物溶融炉では、一方の電極となるスラグの抵抗が無視できない程度に大きくなることもあり、この場合、電極間電圧は真のアーク電圧とは言えない。しかし、この抵抗はスラグの組成、温度、体積などにより時々刻々変化し、その値を特定することは困難であるため、筆者らは、便宜的に、スラグの電圧降下を含む電極間電圧をアーク電圧と呼んでいる。当然ながら、スラグの抵抗分が増えるとアーク電圧も上昇する。

②可燃物や不燃物投入時のアーク電圧に生じる現象

投入する廃棄物の種類により、アーク電圧の上昇の様相が異なる例として、図6-2-5に(a)不燃物としてケイ酸カルシウム系保温材、(b)可燃物としてゴム手袋を炉内に



(a) 不燃物投入時のるつぼ内状況と電圧波形の例 (ケイ酸カルシウム系保温材 200g)



(b) 可燃物投入時のるつぼ内状況と電圧波形の例 (ゴム 2.5g)

図6-2-5 廃棄物投入時の電圧波形例

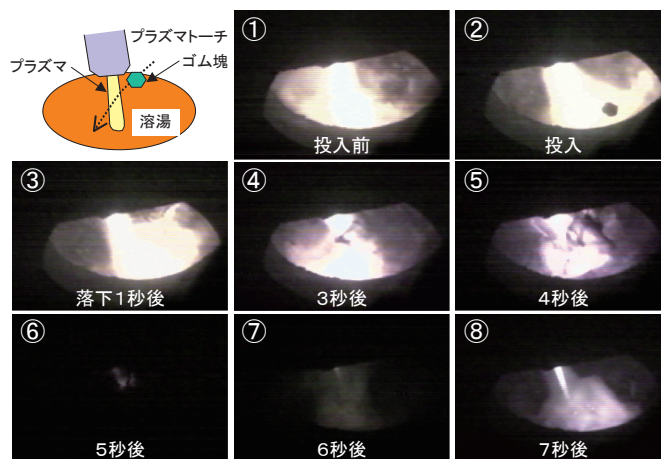


図6-2-6 ゴム塊投入時の炉内の様相

投入したときの電圧波形を、それぞれ示す<sup>(36)</sup>。同図(a)の場合、投入直後に急峻な電圧上昇が見られ、その後は緩やかな上昇が見られる。これは、主に前述の機構1、4が対応しているものと考えられる<sup>(37)</sup>。一方、同図(b)の場合、廃棄物が溶湯に落下してから、約4秒後から急激な電圧上昇が見られ、短時間に電圧上昇が収まっている。また、わずか2.5gの廃棄物で大きな電圧上昇をもたらしていることが分かる。図6-2-6は、図6-2-5(b)の電圧波形に対応する炉内の様相である。電圧上昇に対応する投入から4～5秒後に、炉内に熱分解生成物(すす)が大量に発生していることが分かる。このことから、図6-2-5(b)の電圧上昇の主要因が、熱分解生成物のプラズマへの混入によるものと考えられる。炉内での可燃物の熱分解の様相は、可燃物の種類により異なる。ゴムやプラスチックは急速に熱分解が進むため、少量でも電圧を上昇させる効果が高いが、熱分解しにくい木片の場合、熱分解が比較的ゆっくりと進行するため、電圧への影響が小さい。

- ③ 運転パラメータが可燃物の投入時のアーク電圧に及ぼす影響  
電圧上昇を抑制し安定な加熱を継続できる方策を検討

するため、表6-2-1に示すようにプラズマ炉の運転条件を変えて電圧上昇を調べた。まず、炉内へ注入する空気量を増加させると、すすの濃度が低下し、さらに、るつぽからすすの排出が促進されることがビデオで観察された。この結果から炉内の分解生成物の濃度が低下するため、電圧上昇は抑制される。また、一般的にプラズマガス流量を増加させるとアーク電圧は上昇する。これに加え、アークプラズマの流速が増し周辺の雰囲気のアークプラズマ内に巻き込む効果が強くなり<sup>(38)</sup>、分解生成物を内部に取り込みやすくなることにより、アーク電圧が上昇すると考えられる。さらに、アーク電流を増加させるとアークプラズマの保有熱量の増加により、分解生成物の混入による温度低下が抑制される効果、あるいは電流の増加に伴ってアークプラズマの粘性が高まり分解生成物のプラズマ内への混入が抑制される効果により、アーク電圧の上昇が抑制されたと推定される。

実用炉では、アーク電流は、炉の処理能力などで決定されるものと想定される。しかし、プラズマガス流量はプラズマトーチの仕様の範囲内なら、また、炉内へ注入する空気量は排ガス処理装置の処理能力の範囲内なら制御しやすい運転条件であるので、これらを制御することは、可燃物を処理する際にはアーク電圧の上昇を抑制

表6-2-1 可燃物投入時のアーク電圧上昇とプラズマ炉運転条件の関係

プラズマ炉の運転条件	増加させた時のアーク電圧の増減	原因
炉内注入空気量	電圧上昇が低減	炉内の分解生成物の濃度が低下するため。
プラズマガス流量	電圧上昇が増加	アークプラズマ内への分解生成物の混入量が増加するため。
アーク電流	電圧上昇が低減	アークプラズマの保有熱量が増加し、分解生成物による冷却が低減するため。



する有効な方法と考えられる。

## 6-2-2 交流プラズマトーチにおける発生・制御技術

### (1) 交流プラズマの特長および課題

6-2-1 項では直流プラズマに関する特性を述べた。この直流プラズマは主に導電性物質を加熱する際に利用される。直流プラズマを用いて非導電性物質のみを加熱する場合は、非移行形プラズマを利用するかもしくは複数本のプラズマトーチ間に発生させた移行形プラズマを利用することが考えられる。しかし、非移行形プラズマでは加熱効率が低い、移行形プラズマではトーチ内電極（陽極）の損耗が著しい、という課題がある。

一方、複数本のプラズマトーチ間に発生させた移行形の交流プラズマを利用する場合、それらのトーチ内電極の損耗量は直流プラズマトーチの陽極の損耗量より少ない。このため、交流プラズマは非導電性物質を加熱する際に利用されることが多い。例えば、廃棄物の焼却施設から排出される焼却飛灰の溶融・無害化<sup>(39)</sup>、ガラス屑の溶融・リサイクル<sup>(40)</sup>に利用されている。また、プラズマにガス（メタン、エチレン）を吹き込みカーボンブラックのナノ粒子を合成している例<sup>(41)</sup>もある。

また、上記のように複数本のトーチ間で発生させて利用できる交流プラズマには、直流プラズマ利用時に必要な炉底電極は不要となる。このため、大幅な改造を行わずに既存プロセスに取り付けやすく、現行加熱技術の代替技術として利用される場合もある。例えば、製鋼プロセスの一つのレードルまたはタンディッシュという装置に複数本のトーチを取り付け、そのトーチ間に形成された交流プラズマを用いて溶鋼加熱を行っている<sup>(42)</sup><sup>(43)</sup>。

しかし、この交流プラズマを利用する際には次の二つの課題がある。

#### ①交流プラズマトーチ内の電極が損耗しやすい

直流プラズマトーチ内の陽極に比べれば損耗量が少ないものの、陰極に比べれば損耗量が多い。

#### ②直流プラズマに比べてプラズマが不安定になりやすい

交流プラズマの電流は正極性と負極性が交互に流れるので、その切り替わる瞬間は電流が零になる。この時点でプラズマの導電性が低くなり不安定になりやすい。

本項では、これらの課題を解決するための具体的な方策について述べる。

### (2) 電極損耗現象と電極設計手法

交流トーチの電極損耗については、2,000～8,000Aの大電流領域における検討<sup>(44)</sup>～<sup>(46)</sup>が行なわれているものの、これらは実験的検討に終始している。このため、電極損耗現象を解明し、さらに、プロセスで要求される電流などの運転条件に応じ、電極損耗を低減できる設計手法を開発した。

#### ①電極損耗現象

電極損耗の低減化方策を明らかにするためには、電極材料および電極形状をパラメータとすることが考えられる。電極材料については、直流トーチにおいて電極損耗が少ないと報告されているタングステン合金を選定し、電極の直径や長さなどの形状をパラメータとして検討を行った<sup>(47)</sup><sup>(48)</sup>。

50Hzの移行形交流プラズマを大気中で1～3時間連続で発生させ、アーク電流および電極サイズをパラメータとした場合のトーチ電極の損耗量を図6-2-7に示す。いずれの電極サイズの場合も、アーク電流の増加とともに損耗量は増加した。また、電極径が8mmや10mmの場合は450～550Aで損耗量は急増したが、電極径が13mmの場合は550Aでも損耗量の急増は見られなかった。実プロセスを考慮すると、損耗量が急増しない範囲を把握する必要がある。以下、今回の実験条件において損耗量が急増しない範囲（5mg/h以下）について、電極先端温度に着目し考察する。

冷却水によるトーチ電極からの抜熱量（実測値）などを用いて電極における熱バランスを計算した。また、そ

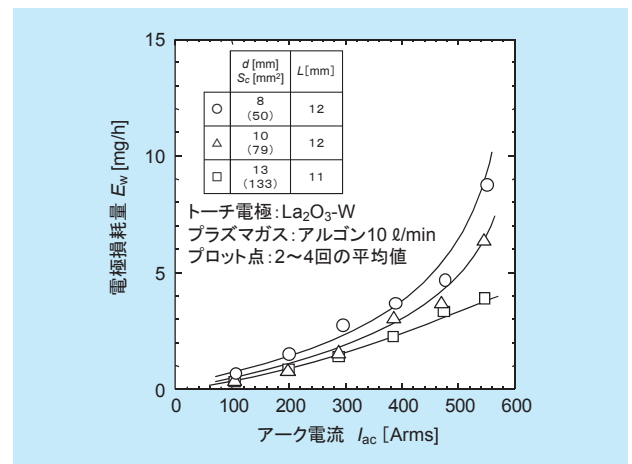


図6-2-7 電極損耗量のアーク電流依存性

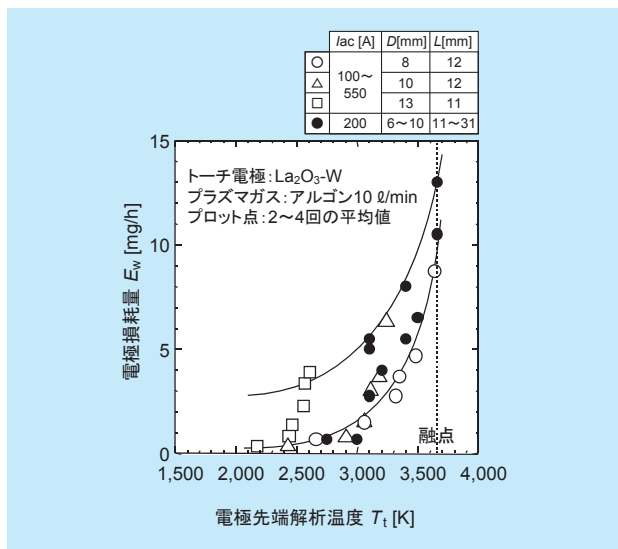


図6-2-8 電極損耗量の電極先端温度依存性

これらの結果と実験後の電極先端のアーケ痕跡面積を用いて電極内部の定常熱伝導解析を行い、電極先端温度を計算した。この電極先端解析温度と電極損耗量との関係を図6-2-8に示す。ばらつきはあるものの、電極先端温度が低いほど損耗量が低く抑えられている。また、損耗量の急増しない範囲を上述の5mg/h以下と仮定すれば、その範囲に抑えるためには電極先端解析温度を3,000K程度以下（融点：3,660K）に低減すればよいことが分かる。なお、電極損耗現象が電極蒸発現象である<sup>(49)</sup>と仮定して、タンゲステンの蒸発速度から電極損耗量を試算したところ、上記と同程度の3,000Kを超えるあたりから損耗量が急増した。

②電極設計手法

上述の結果から得られた知見を基にして、電極損耗量を低減できる適正な電極サイズを設計する手法を考案し、さらに大電流領域2,000Aの電極サイズの設計を試みた<sup>(48) (50)</sup>。

まず、電極サイズ設計手法について述べる。上述の電極における熱バランスの計算結果から、平均電極降下電圧（陰極降下電圧と陽極降下電圧の相加平均）の電極先端温度への依存性が図6-2-9のように求められる。この平均電極降下電圧と電極先端温度との関係と、前述の電極損耗量と電極先端温度との関係などを用いて電極サイズを設計する。そのフロー図を図6-2-10に示す。概略次の通りである。まず、図中の右上(a)の電極損耗特性

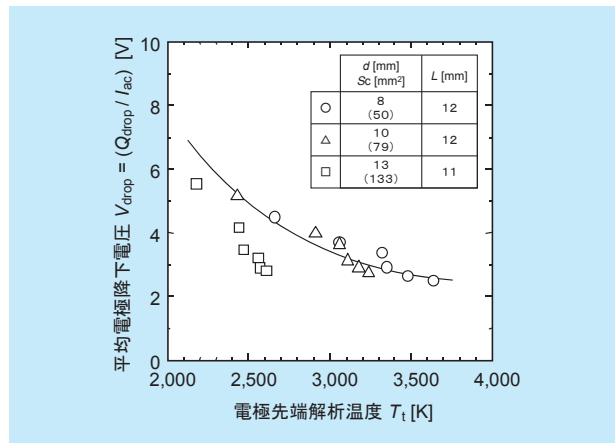


図6-2-9 平均電極降下電圧の電極先端温度依存性

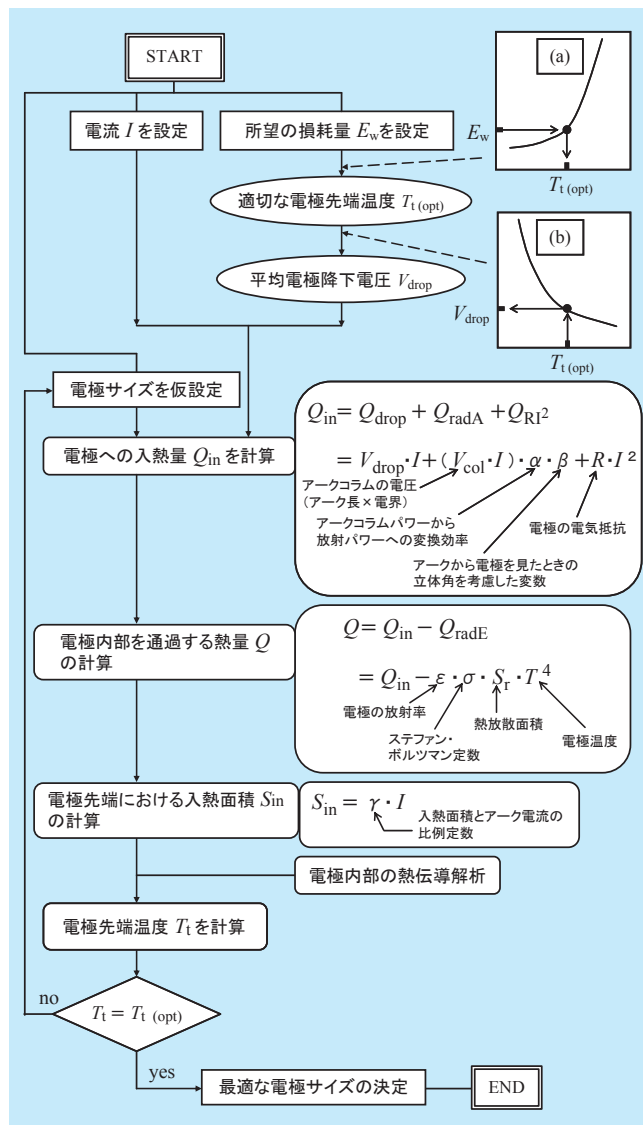


図6-2-10 トーチ電極サイズの設計手法フロー図

(例えば、図 6-2-8) を用いて、所望の損耗量にするための適切な電極先端温度  $T_{i(opt)}$  を選定する。次に、図中の右上(b)の特性 (例えば、図 6-2-9) を用いて、電極先端温度が  $T_{i(opt)}$  のときの平均電極降下電圧  $V_{drop}$  を算出する。また、あらかじめプロセスに必要なアーク電流値を設定しておき、また、電極サイズ (直径、長さなど) を仮に設定しておく。上記検討で得られた諸量を用いて電極への入熱量  $Q_{in}$  を求める。次に、電極先端から電極内部に入る熱量  $Q (= Q_{in} - Q_{radE})$  を求めるために、電極先端での出熱量として  $Q_{radE}$  を求める。ここで、 $Q_{radE}$  は、電極から放射によって失われる熱量である。熱量  $Q$  の電極先端における入熱面積  $S_{in}$  は、アーク電流値と比例定数の積として求める。これらの結果を用いて電極内部の熱伝導解析を行い、このときの電極先端温度  $T_i$  を計算する。この計算された電極先端温度  $T_i$  と最初に選定した電極先端温度  $T_{i(opt)}$  とが等しくなるまで、電極サイズをパラメータとした計算を続ける。以上により、プロセスに必要なアーク電流に対し、所望の電極損耗量以下とする電極サイズを決定できる。

次に、この考案した手法を用いて、大電流領域 2,000A の電極サイズの設計を試みた。ここでは所望の損耗量を 5mg/h とするが、この電極寿命は約 1,000 時間であり実用レベルと考えられる。仮の電極サイズとして電極径を 23mmφ および電極長を 6mm とし、電極先端は平坦状と設定した。この仮の設定値は、文献<sup>(51)</sup> でアーク電流が 2,000A の場合に用いられている電極サイズである。これらの諸量などを用いて、電極先端から電極内部に入る熱量  $Q$  は 8.5kW と算出された。なお、この熱量  $Q$  は電極内部を通過して冷却水により抜熱される。この冷却水による電極からの抜熱量は実測することができ文献<sup>(51)</sup> の結果は 9.7kW 程度であり、今回の算出結果 8.5kW とは 1 割程度の差異が認められるものの、概略同レベルの値と考えられる。これらの値を用いて、電極内部の熱伝導解析を行い、このときの電極先端温度  $T_i$  を計算し、この温度と今回選定した 3,000K とが等しくなるまで、電極サイズをパラメータとした計算を続けた。なお、パラメータである電極径 (電極断面積) および電極長の範囲はそれぞれ 15 ~ 35mmφ (177 ~ 962mm<sup>2</sup>) および 5 ~ 15mm とした。ここで、電極径および電極長を変化させると、前述の諸熱量が変化するため電極先端からの入熱量  $Q$  も変化するが、このことも考慮して

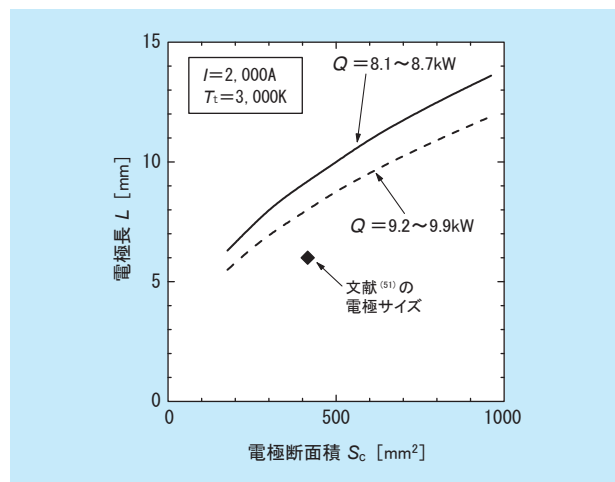


図6-2-11 電極サイズの設計例

計算を行った。なお、今回の計算の範囲では電極先端からの入熱量  $Q$  は 8.1 ~ 8.7kW であり、前述の 8.5kW から最大 5% 程度変化した。

以上のような解析を行い電極先端温度が 3,000K となるように電極サイズ (電極長  $L$ 、電極断面積  $S_c$  の組み合わせ) を求めたものを図 6-2-11 に実線で示す。この実線上の電極サイズを「最適な電極サイズ」と呼ぶことにする。この図の実線より下の部分の電極サイズ領域が、電極損耗の低減化という観点からは「安全領域」と考えられる。また、文献<sup>(51)</sup> での  $Q$  の実測値は前述の通り 9.7kW であるので、先程と同様に電極径および電極長の変化による熱量  $Q$  の変化 (9.2 ~ 9.9kW) も考慮に入れて、電極先端温度が 3,000K となるように電極サイズを求めたものを図 6-2-11 に破線で示す。この破線は実線よりも下方にあるので前述の安全領域が狭くなっていることが分かる。なお、比較のために文献<sup>(51)</sup> の電極サイズを同図中に◆印で示す。この◆印は同図の実線および破線よりも下方にあるので文献<sup>(51)</sup> の電極サイズは安全領域にあると考えられる。文献<sup>(51)</sup> では損耗量は明記されていないが、陰極として用いたときと同程度の損耗量と記述されているので、損耗量はかなり小さいと考えられ、◆印が今回求めた安全領域に存在することが理解できる。

### (3) 電流零点におけるプラズマの安定化技術

#### ①電流零点における不安定現象

電流零点において交流プラズマを安定化させる方策と

して、電流零点における電流の時間変化率を大きくして、電流零点直前のプラズマの導電性を高く維持しつつ、電流零点直後に電極間に急峻な過渡回復電圧を発生させてプラズマの再発弧を容易にすることが考えられる。これまで実規模のプロセスで使われている具体的な安定化方策は、交流電流を整流して一旦直流に変換し、これをサイリスタ制御により矩形波交流電流に変換するものである<sup>(46)</sup>。この場合、確かにプラズマは安定化するが高価な整流器などを用いるため設備費が高い。また、この場合の電源構成（例えば、交流電源の電源電圧など）については特に最適化検討を行っておらず、オーバースペックな部分があれば、さらにコスト高になる。

そこで、交流プラズマの簡易な安定化方策としてパルス重畳法<sup>(52)</sup>を提案し、その有効性を明らかにした。この方法は、**図 6-2-12**に示すように、電流零点だけにパルス電流を重畳し、電流零点付近だけの電流の時間変化率を高くする方法である。また、運転開始時の炉内は、常温（300K）であるが、運転時間の経過に伴い炉内はプラズマからの発生熱により 1,300K 程度<sup>(53)</sup>の高温雰囲気になる。このような場合のプラズマ安定化方策の最適化（例えば、設定電源電圧の最適化）を行うためには、プラズマの安定性に及ぼす雰囲気温度の影響の解明が必要である。ここでは、実プロセスで利用されることが多い移行形プラズマを対象として、雰囲気温度がプラズマ

の安定性に及ぼす影響について検討するとともに、その際のパルス重畳法の適用効果を明らかにした<sup>(54)</sup>。

雰囲気温度を制御できるチャンバー中でプラズマトーチと対向電極の間に電流 100 ~ 500A（実効値）、周波数 50Hz の移行形のアークプラズマを発生させた場合の、電流零点近傍のアーク電流・電圧波形の一例を**図 6-2-13**に示す。ここで、電流が零値から増えて図中の○印で再発弧して電流が急増しアーク電圧が急に低下するときの電圧を「再発弧電圧  $v_b$ 」とした。アーク電流の増大とともに再発弧電圧  $v_b$  が減少し、低い電源電圧でも安定に交流プラズマを発生できた。

また、アーク電流を 500A 一定とし、雰囲気温度が異なる場合の交流プラズマの安定性を**図 6-2-14**に示す。

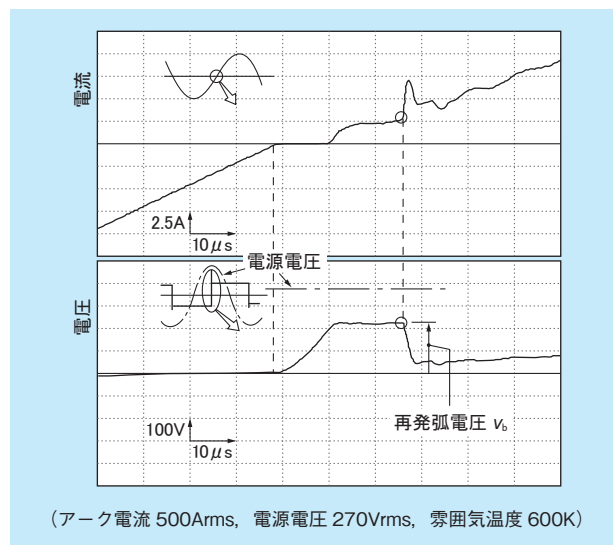


図6-2-13 アーク電流・電圧の波形例

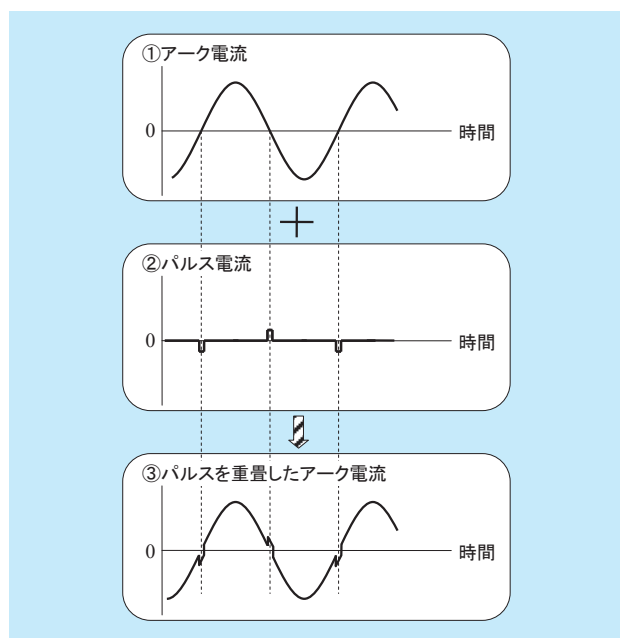


図6-2-12 パルス重畳法の模式図

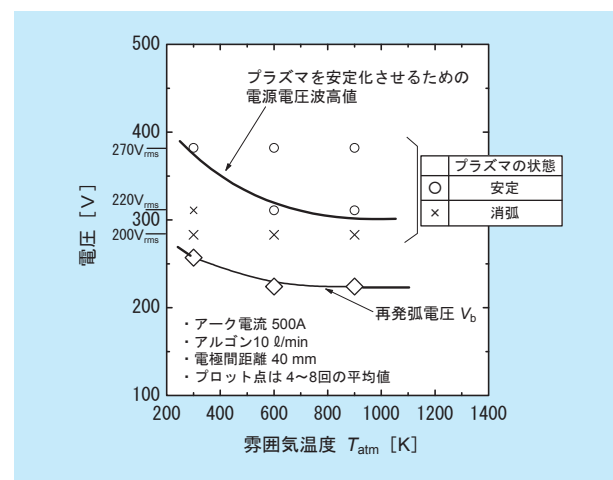


図6-2-14 移行形プラズマの安定性の雰囲気温度依存性

ここで、5分以上プラズマが継続した場合を安定とみなし、この時間未満で消弧したものを不安定とみなした。不安定と評価したほとんどのケースは数～数十秒で消弧した。雰囲気温度を600K程度まで上昇させるとプラズマ安定化に必要な電源電圧が8割程度に低下するが、それ以上の雰囲気温度では変化せず、実プラズマ炉内相当の1,300K程度でも同程度と推測される。このとき、再発弧電圧 $v_b$ も同様の傾向を示している。ここで、流れ始めているアーク電流 $I$ とアーク電圧 $V$ との積の時間積分値と損失 $N$ の時間積分値との差分がプラズマのアークコラムに注入され、アークコラムに蓄積されるエネルギーが増加して、あるレベルに達すると再発弧が起きると考えられる。このため、電流が流れ始めてから再発弧が発生するまでの電流・電圧実測値およびMayrアークモデル<sup>(55)</sup>を用いて、プラズマのアークコラムにおけるエネルギーバランスを求めた。その結果、雰囲気温度の上昇とともに蓄積エネルギーの増分 $Q$ （再発弧に必要なエネルギー）が減少することが明らかになった。これは、プラズマガスとして用いているアルゴンのエネルギー密度（単位体積当たりのエンタルピー）の温度依存特性に起因すると考えられる。

さらに、雰囲気温度の差がプラズマのアークコラムの蓄積エネルギーに与える影響を調べるため、Ha-Stark幅法<sup>(56)</sup>を用いて電子密度を算出した。電流零点近傍の電子密度はアークプラズマの安定性（消弧/再発弧）に多大な影響を与える物理パラメータである<sup>(57)</sup>。その結果、雰囲気温度が300Kの場合に比べて600Kの方が電子密度が若干高くなることが分かった。このことから、雰囲気温度が高くなると、電流零点におけるプラズマのアークコラムの蓄積エネルギーが高くなることが推測される。

## ②パルス重畳法の適用効果

パルス重畳法を適用した場合（パルス電流：5～15A）のプラズマの安定性について調べたところ、パルス重畳法を適用しない場合に比べて7～8割程度の低い電源電圧で安定化できた。例えば、アーク電流が500Aの場合、プラズマ安定化に必要な電源容量を110kVAから90kVAへと20kVA低減できた。これらのことから、パルス重畳法を適用することによって、パルス電源容量

（1～2kW）を考慮してもプラズマ安定化に必要な電源容量を低減できる。また、再発弧電圧、安定化に必要な電源電圧ともに雰囲気温度の影響はほとんど受けなかった。つまり、パルス重畳法を適用した場合、実プラズマ炉内相当の1,300K程度におけるプラズマ安定化に必要な電源電圧は、雰囲気温度が300Kの場合と同程度と推測される。このことから、実プロセスにパルス重畳法を適用すると、炉内温度が300K程度である運転開始時から、炉内温度が1,300K程度に高くなる運転定常期まで、常に低い電源電圧における運転が可能であり操業を簡易にできることが期待できる。

また、電流零点後再び電流が流れ始めてから再発弧が発生するまでのアークコラムの蓄積エネルギー増分を求めたところ、パルス重畳法を適用することにより、パルスなしに比べてアークコラムの蓄積エネルギー増分が減少し、また雰囲気温度の影響は受けなかった。これは、パルス重畳により電流零点におけるアークコラムの温度が高くアークコラムの蓄積エネルギーが高いためと考えられる。また、パルスを重畳すると、電流零点直前（～5 $\mu$ s程度）まで、電子密度が高い値を維持していることが分かった。

## ③材料創製への応用を想定した交流プラズマの安定性

交流プラズマは、上述のような高温の炉内で利用することに加え、非導電性のセラミックス粉の熔融や加熱への応用も期待される。当研究所でも5章で述べたように、アークプラズマの高温場での熔融蒸発などの熱的な現象と蒸発した原子の凝縮の過程での化学反応を制御した材料創製に関わる研究開発を推進している。そこで、物性値が既知のセラミックスであるアルミナ（平均粒径：15 $\mu$ m）を、70Aの交流プラズマに11～84g/minと比較的大きな注入速度で注入した時の安定性を調べた<sup>(58)</sup>。その結果、アルミナを注入すると電流零点直前でアークプラズマのエネルギー密度が高くなること、さらに、Al原子の電離により電子密度が高くなることにより、交流プラズマは、アルミナを注入しない場合より安定化することを明らかにした。

以上のように、高温場での利用や材料創製などへの応用においても、交流プラズマの安定性が確保できることを明らかにした。

## 6-3 アークプラズマの計測診断技術

### 6-3-1 輝線スペクトルの自己吸収を考慮した温度計測技術

#### (1) アークプラズマの温度計測技術

アーク放電の温度計測手法の中で、比較的多く利用される方法として二線強度比法<sup>(59)</sup>が挙げられる。これは、アークを分光観測して得られる原子などの異なる二本の輝線スペクトルの強度比から温度を計測する比較的簡易な手法である。しかし、アークが光学的に厚い場合には、観測する輝線スペクトルに自己吸収が生じるので、この現象を考慮する必要がある。例えば、数十kA級の超大電流領域のアークを対象とする際には注意を払う必要がある。超大電流であるため、アークの直径が太く、また、観測するスペクトル線の原子なども多く含んでいるためである。この自己吸収が無いと仮定して二線強度比法を用いて計測された温度（以下、見かけの温度と記す）は実際の温度とはかなり異なることが懸念される。本項では、当研究所が開発した輝線スペクトルの自己吸収を考慮したアークの温度計測技術<sup>(60)</sup>を紹介するとともに、

この手法を50kA級超大電流アークに適用した結果<sup>(60)~(62)</sup>についても述べる。

#### (2) 自己吸収を考慮したアークの温度計測技術および50kA級アークジェットへの適用結果

計測手法の原理図を図6-3-1に示す。「(a)自己吸収特性計算と見かけの温度の実測」と「(b)粒子組成の計算と電子密度の実測」を行うことにより、実温度と電極蒸気混入率を同時計測する。つまり、自己吸収がある時の見かけの温度は、真の温度と金属蒸気混入率の関数となるので、二線強度比法で見かけの温度が得られれば、これを与える真の温度と金属蒸気混入率の組合せ((a))が決まる。また、電子密度は真の温度と金属蒸気混入率の関数となるため、電子密度が実測できればこれを与える真の温度と金属蒸気混入率の組合せ((b))が決まる。これらの両者を満たすところが、真の温度と金属蒸気混入率となる。

次に、これを50kA級アークジェットに適用した結果について述べる。ここで、アークジェットとは、アークが点弧している電極表面から噴出する高速流の電磁流体である。アークジェットは、その周辺に存在する碍子装

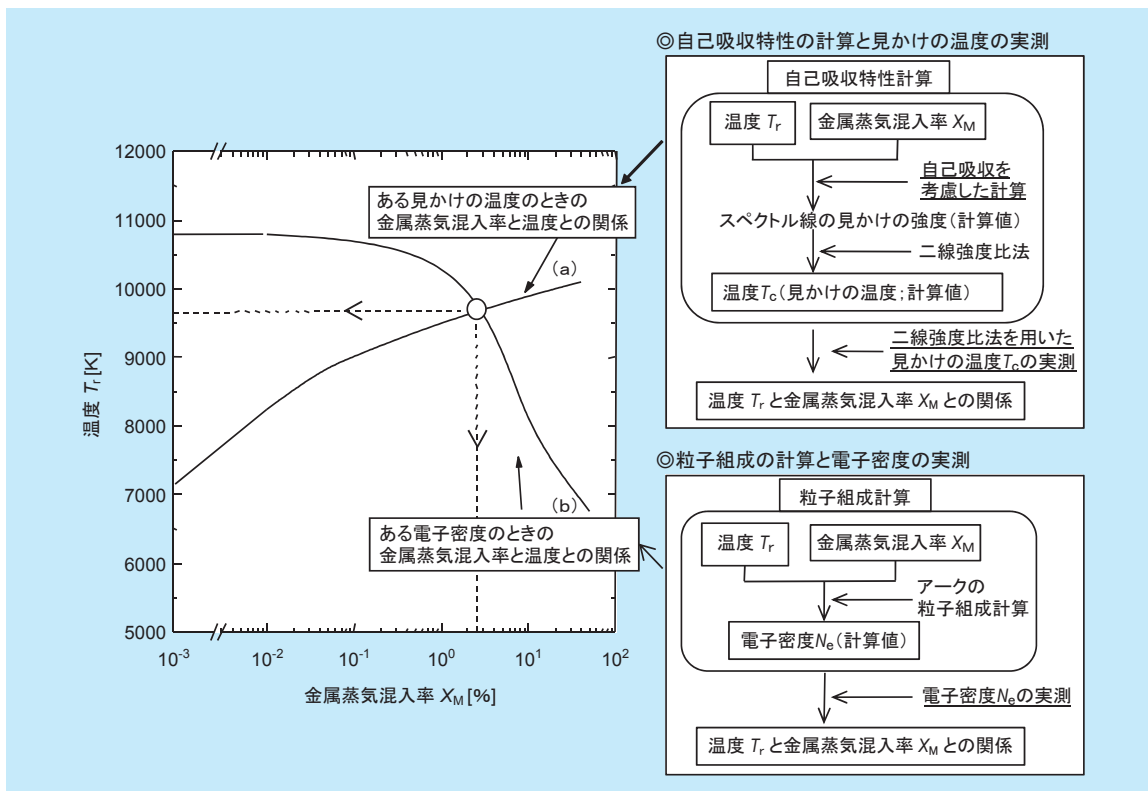


図6-3-1 計測手法の原理図

置などの電力機器に熱的ストレスを与えるため、大電流アークジェットの温度、流速、挙動などの基礎特性を解明することが望まれている。上述の計測手法を用いて、電力流通設備で使用されている鉄、銅およびアルミニウムの電極から噴出する50kA級アークジェット部（電極から10cmの位置）の温度測定を行った。アークジェットの温度および鉄電極蒸気混入率の測定結果を図6-3-2および図6-3-3に示す。アーク電流が10～20kAでは

温度は13,000～14,000Kであり、電流の増大とともに低下し50kAでは10,000～12,000Kである。また、これらの温度と見かけの温度との差は3,000～5,000Kであった。また、アーク電流が10kAでは鉄蒸気混入率は1%程度であり、電流の増大とともに急増し、50kAでは50%程度となった。

以上のように、大電流アーク放電にまで適用できる温度と電極蒸気の混入率を測定できる技術を確立した。この測定結果を用いれば、碍子装置などへの熱的ストレスを推定するために必要なアークのエネルギー密度も推定できる。

### 6-3-2 プラズマの流速計測技術

アークプラズマを加熱源として用いた高融点廃棄物の溶融処理や、超微粒子などの材料の製造において、アークプラズマ中の廃棄物や材料の溶融・蒸発挙動を把握することは重要である。溶融・蒸発挙動を検討する際に必要となるパラメータとしては、アークプラズマの温度分布の他、アークプラズマの流速と廃棄物や材料の飛行速度が挙げられる。

アークプラズマの流速や、注入された材料などの飛行速度の測定については、様々な手法が提案されているが、当研究所では、材料の蒸発挙動の観察も同時に行うことが可能な高速度ビデオカメラを用いた流速測定法を確立した。

画像を用いた流速分布の測定は、大きく、流れの可視化と画像からの流速の算出の2段階に分かれる。流れの可視化のためには、ガス流中にガス流への追従性の高い微粒子をトレーサーとして注入し、レーザー光などの強力な光を照射して、微粒子の反射光を記録するというものが一般的である。検討を開始した当時、既に燃焼炎程度までの温度のガス流の流速分布の画像を用いた測定法はほぼ確立されていた。このような方法をアークプラズマなどの熱プラズマの流速測定に適用するためには、トレーサーが蒸発・拡散してしまう、熱プラズマ自身の強い発光を上回る光源が必要であるなど、課題が多かった。そこで、高温の熱プラズマに適した流速測定法として、トレーサーの蒸発を前提とし、その発光を狭帯域のバンドパスフィルターを装着した高速度CCDカメラで撮影する方法を採用し、器壁安定化アークに注入したフライ

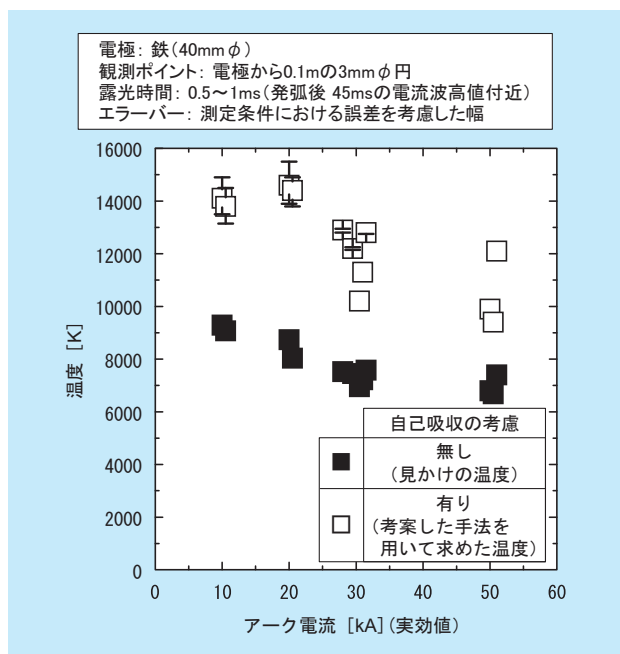


図6-3-2 温度のアーク電流依存性

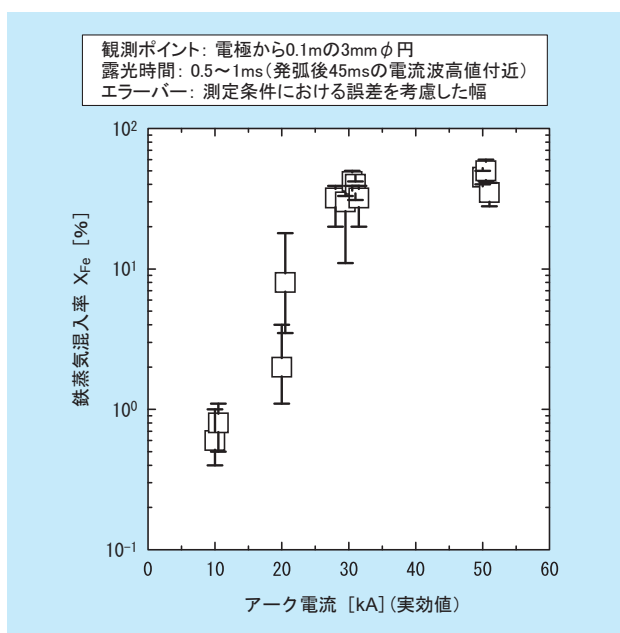


図6-3-3 鉄蒸気混入率のアーク電流依存性

アッシュ粒子の飛行挙動などを解明した<sup>(63)</sup>。

トレーサーは、大きく2種類を用いた。すなわち、フライアッシュ粒子などの固体微粒子と、水素などのガスである。前述の器壁安定化アーク中にこれらのトレーサーを微量注入し、可視化を行った。トレーサーに求められる要件としては、目印としての役割を果たすことに加えて、測定場を乱さないことが必須である。このため、極微量を単発的に注入する必要がある、固体粒子の注入のために、単発型微量粉体供給装置を製作した<sup>(64)</sup>。

この装置を用い、微量の微粒子として平均粒径 10  $\mu\text{m}$  のフライアッシュを単発的にプラズマガス中に注入し、その発光を、狭帯域バンドパスフィルターを装着した高速度 CCD カメラで捉えた画像を図 6-3-4 に示す。得られた画像より、発光部分の重心などの移動速度を算出することにより、微粒子の飛行速度を算出することが可能となる。ただし、微粒子の飛行速度は周囲のプラズマ流の速度より低いため、微粒子をプラズマ流の流速測定トレーサーとして用いる場合は速度差を仮定するなどの注意が必要である。

一方、固体粒子の代わりに微量のガスを使用することができれば、プラズマ流に対する追従性が高いため、優れたトレーサーとなる可能性がある。このため、Ar アークプラズマ流の中に微量の水素ガス (0.1cc/回) を注入し、その進展を観測した<sup>(65)</sup>。得られた画像を図 6-3-5 に示す。プラズマの流速に対し注入継続時間が長い時間、発光が带状に伸びた形になっているが、先端部

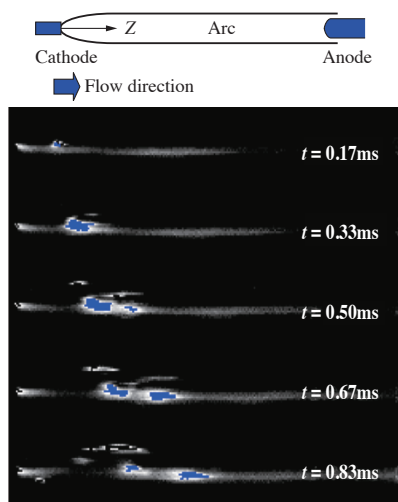


図6-3-4 Arプラズマ中のフライアッシュ粒子からの発光 (青い部分は強調のため着色)

が徐々に伸びている様子が確認できる。この先端部を適切な輝度値で定義し、その進展速度を求めることにより、プラズマの流速を推定できる。

気体をトレーサーとして用いる場合、いくつか注意する点がある。その代表的なものが、拡散である。すなわちトレーサーの物質移動には拡散と流れの両方が関与しているため、トレーサーの移動速度は、測定対象の流速にトレーサーの拡散速度が重畳されたものとなる。一般に流れが速いほど、拡散の寄与は相対的に低下する。筆者らは、高温アルゴン中の水素の拡散係数の温度依存性を用いて両者の寄与を比較し、今回の実験条件においては、拡散の影響をほぼ無視できることを確認した。

図 6-3-6 に同一条件下での微粒子を単発注入したときの微粒子飛行速度と、水素を微量注入したときの発光の進展速度を示す。水素の発光の進展の方が速く、両者ともプラズマガス流量の増加に、ほぼ比例して速度が増加していることが分かる。

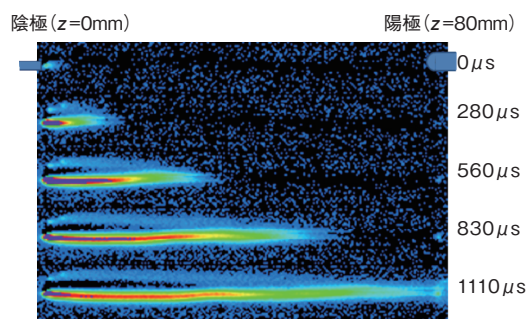


図6-3-5 Arプラズマに注入した水素の発光 (強調のため着色)

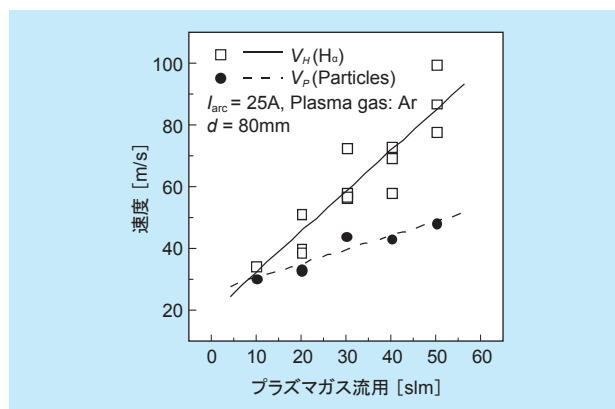


図6-3-6 プラズマガス流量と微粒子飛行速度および水素発光の進展速度の関係 (slm は標準状態でのガス流量 (ℓ/m) を表す。)



以上は、微量のトレーサーを用いた流速測定の検討であるが、実際に廃棄物や材料を熱プラズマ中で処理する場合、大量の物質が注入され、その蒸気がプラズマ全体に拡がるため、注入した物質そのものを同様の手法で目印とすることはできない。そこで、PIV (Particle Image Velocimetry) の手法のうち、画像の濃淡の移動から流速分布を測定可能な、相互相関法を用い、多量の微粒子が注入されたときのアークプラズマの画像から、流速分布の測定を試みた<sup>(66)</sup>。この手法で算出したフライアッシュ粒子多量混入時の流速は他の方法で測定した場合と同程度である。

本手法を適用するためには、画像に濃淡、すなわちプラズマの発光のむらが必要であること、また、濃淡の移動が物質移動によるものであると仮定できる必要があるため、常に適用できるものではないが、簡便に流速分布まで計測できるため、材料合成の際の材料注入条件の検討などに有用であり、筆者らは、第5章で述べた超微粒子、複合ナノ粒子の合成に際し、ツールとして活用した。

以上、当研究所におけるプラズマの流速計測技術の概要を述べた。熱プラズマは高温であるため、通常のガス流に用いられるトレーサーをそのまま適用することが困難であり、熱プラズマに適した流れの可視化手法を、計測場の制約や計測目的に応じ、取捨選択することが重要である。

## 参考文献

- (1) 岩田幹正、足立和郎、天川正士：セラミックス粉注入時の移行形交流プラズマの安定性とその機構、電力中央研究所研究報告、W00025 (2001)
- (2) 天川正士、岩田幹正、足立和郎：アルミナの混入したアルゴンの熱力学特性と輸送特性、電気学会論文誌 A、Vol. 122-A、pp. 288-294 (2002)
- (3) K. Adachi, T. Amakawa and T. Inaba, Voltage Transition of Low Current Argon Arcs by Mixing of Iron Powder, CRIEPI Report, EW91014 (1991)
- (4) 天川正士、足立和郎、渋谷正豊、稲葉次紀：鉄蒸気が混入したアルゴンの輸送特性、電気学会論文誌 A、Vol.113-A、pp. 321-329 (1993)
- (5) 天川正士：金属蒸気の混入した高温空気の輸送特性、電力中央研究所研究報告、W86009 (1986)
- (6) 岩田幹正、田中慎一、池田弘一、合田豊：50kA 級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性 - 分光計測時の機先スペクトルの自己吸収を考慮した温度測定手法の開発 -、電力中央研究所研究報告、W99027 (2000)
- (7) 池田弘一：金属表面の非晶質化条件の解析とそのための高輝度アーク光生成手法の提案、電力中央研究所研究報告、W98001 (1998)
- (8) 池田弘一、天川正士、渋谷正豊：高圧高温アルゴンアークの放射輝度の解析、電気学会論文誌 A、Vol. 120-A、No.4、pp. 414-419 (2000)
- (9) 池田弘一、足立和郎、稲葉次紀：光加熱に向けたアークの放射特性の検討、電力中央研究所研究報告、W93034 (1994)
- (10) 例えば、数値流体力学編集委員会編、「非圧縮性流体解析 数値流体力学シリーズ 1」、東京大学出版会 (1995年)
- (11) S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Taylor & Francis (1980)、水谷幸夫、香月正司、「コンピューターによる熱移動と流れの数値解析」、森北出版株式会社 (1988年) (邦訳)
- (12) S. V. Patankar, "Heat and mass transfer in boundary layers, 2nd ed.", Hemisphere Publishing Corporation (1970)
- (13) K. C. Hsu and E. Pfender: Two-temperature modeling of the free-burning, high-intensity arc, J. Appl. Phys., Vol. 54, No. 8, pp. 4359-4366 (1983)
- (14) D. M. Chen, K. C. Hsu and E. Pfender: Two-temperature modeling of arc plasma, J. Chemistry and Plasma Processing, Vol. 1, No. 3, pp. 295-314 (1981)
- (15) 渡辺隆行、田中康規：4. 熱プラズマによるナノ粒子の合成、プラズマ核融合学会誌、Vol. 82、No. 8、pp. 484-487 (2006)
- (16) N. A. Sanders: The effect of anode evaporation on the behavior of a high intensity arc, MS Thesis, University of Minnesota (1979)
- (17) T. Amakawa, J. Jenista, J. V. R. Heberlein and E. Pfender: Anode boundary layer behavior in a transferred, high intensity arc, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 31, p2826 (1998)
- (18) K. Etemadi: Investigation of high-current arcs by computer-controlled plasma spectroscopy, Ph.D. Thesis, University of Minnesota (1982)
- (19) 古川静枝、天川正士、足立和郎：移行形アークプラズマから水冷銅陽極への伝熱量に関する数値解析、電気学会論文誌 A、Vol. 120-A、No. 6、pp701-707 (2000)
- (20) P. Zhu, J. J. Lowke, R. Morrow, J. Haider: Prediction of anode temperatures of free burning arcs, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 28, p1369 (1995)
- (21) R. Morrow, J. J. Lowke: A one-dimensional theory for the electrode sheaths of electric arcs, J. Phys. D : Appl. Phys., vol. 26, p634 (1993)
- (22) M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, "Thermal Plasmas 1", Plenum Publishing Corporation (1994)
- (23) 日本機化学会、「伝熱工学資料 改訂第4版」、丸善 (1986)
- (24) H. A. Dinulescu, E Pfender: Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs, J. Appl. Phys.

- vol. 51, p3149 (1980)
- (25) 古川静枝、足立和郎、天川正士：アークプラズマ加熱における水冷銅への伝熱機構に関する実験的検討、電気学会論文誌 A、Vol.119-A、No.9、pp1209-1214 (1999)
- (26) S. Furukawa, T. Amakawa and K. Adachi: Effects of Copper Vapor on Heat Transfer from Atmospheric Nitrogen Plasma to the Molten Metal Anode, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.22, pp85-104 (2002)
- (27) H. Abdelhakim, J. P. Dinguirard and S. Vacquie: The influence of copper vapor on the transport coefficients in a nitrogen arc plasma, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 13, p1427 (1980)
- (28) J. M. Yos: Revised transport properties for high temperature air and its components, AVCO Corporation, Space System Division Report Z220, Wilmington, MA 1 (1967)
- (29) P. J. Shayler and M. T. C. Fang: The transport and thermodynamic properties of a copper-nitrogen mixture, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 10, p1659 (1977)
- (30) 天川正士、足立和郎、渋谷正豊、稲葉次紀：プラズマトーチ用タングステン電極の損耗、電気中央研究所研究報告、W88042 (1989)
- (31) 天川正士、足立和郎、安井晋示、渋谷正豊、廣津信義、篠田強志、田島伸夫：加熱用プラズマトーチの大電流化、電気中央研究所研究報告、W90012 (1991)
- (32) 天川正士、足立和郎、渋谷正豊、稲葉次紀：プラズマトーチ用電極の損耗現象－窒素ガスとアルゴンガスによる違い－、電気中央研究所研究報告、W90037 (1991)
- (33) 松田福久、牛尾誠夫、熊谷達也：アーク放電電極の研究 II、溶接学会全国大会講演概要、No.37、66 (1985)
- (34) 田中和士：大出力プラズマトーチ用熱陰極材料の開発とその特性についての基礎的研究、大阪大学学位論文 (1996)
- (35) 足立和郎、天川正士、安井晋示：プラズマ溶融処理時のアーク電圧の上昇－ケイ酸カルシウム系保温材を投入した場合－、電力中央研究所研究報告、W95028 (1996)
- (36) 足立和郎、天川正士、安井晋示、古川静枝：ゴムを含む雑固体廃棄物のプラズマ溶融処理－アークプラズマの電圧に及ぼす可・難燃物の影響－、電力中央研究所研究報告、W97034 (1998)
- (37) 足立和郎、天川正士：不燃性粉体の注入による安定化アルゴンアークの電圧変化とその機構、電力中央研究所研究報告、W99036 (2000)
- (38) E. Pfender, J. Fincke and R. Spores: Entrainment of cold gas into thermal plasma jets, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.11, No.4, pp.529-543 (1991)
- (39) H. Klein and H. J. Bebbler : Thermal processing of flue and filter dusts by AC plasma technology, Proc. of Int. Conf. of Recycling of Metalliferous Materials, pp.125-131 (1990)
- (40) UIE WG on plasma process : Plasma technology for a better environment, pp.97-98, UIE (1992)
- (41) F. Fabry, G. Flamant, B. Ravary and L. Fulcheri : Progress in the analysis of the 3-phase AC plasma reactor for carbon black production, Proc. of 13th Int. Symposium of Plasma Chemistry, pp.1925-1930 (1997)
- (42) D. Neuschütz, K. H. Schubert and H. J. Bebbler : Metallurgical results from a 30T AC plasma ladle furnace, Proc. of 6th Int. Iron and Steel Congress, pp.543-550 (1990)
- (43) H. Fujimoto, H. Tokunaga and H. Iritani : A High-Powered AC Plasma Torch for the Arc Heating of Molten Steel in the Tundish, Plasma Chem. Plasma Processing, Vol.14, No.3, pp.361-382 (1994)
- (44) D. Neuschütz, H. Rossner, H. J. Bebbler and J. Hartwig : Development of 3-phase AC plasma furnaces at Krupp, Iron and Steel Engineer, pp.27-33 (1985)
- (45) D. Neuschütz, H. J. Bebbler and K. Heinen : Heating molten steel in an inert-gas atmosphere using 3-phase AC plasma torches, Proc. of Japan - German Seminar on Fundamental Iron Steel Making, pp.151-66 (1987)
- (46) H. J. Bebbler : AC torches, Proc. of 1st Int. EPRI Plasma Symposium (EPRI CMP Report No.90-9) Palo Alto U.S.A., No.23 (1990)
- (47) 岩田幹正、安井晋示、渋谷正豊：交流プラズマトーチにおける電極の損耗現象－電極のサイズおよび先端面積の影響－、電力中央研究所研究報告、W91024 (1992)
- (48) 岩田幹正、渋谷正豊：交流プラズマトーチにおける電極の損耗現象（その2）－アーク電流の影響－、電力中央研究所研究報告、W94037 (1995)
- (49) H. Hackmann and H. J. Bebbler : Electrode erosion in high power thermal arcs, Pure & Appl. Chem., Vol.64, No.5, pp.653-656 (1992)
- (50) 岩田幹正、渋谷正豊：交流プラズマトーチ用タングステン電極の電極サイズ設計手法の検討、電気学会論文誌 A、Vol. 118-A、No. 9、pp. 965-970 (1998)
- (51) D. Neuschütz, A. Hauck and Y. Zhai : Effect of arc polarity on heat transfer and electrode wear during plasma-heating of steel melts, VDI Berichte Nr., pp.471-478 (1995)
- (52) 稲葉次紀：アークプラズマの利用、電中研レビュー No.18、pp.50-54 (1988) または、岩田幹正、安井晋示、渋谷正豊：交流プラズマの安定化手法－パルス重畳法に関する基礎的検討、電力中央研究所研究報告、W92016 (1993)
- (53) 渋谷正豊、天川正士、足立和郎、安井晋示、岩田幹正、山崎建利、木下勝雄、飯田久米男：不燃性廃棄物の溶融用プラズマ炉の開発－都市廃棄物の焼却灰溶融用 100kW 級プラズマトーチの開発－、電力中央研究所研究報告、W90038 (1991)
- (54) 岩田幹正、渋谷正豊：高温雰囲気場における移行形交流プラズマの安定化、電力中央研究所研究報告、W97026 (1998)
- (55) O. Mayr : Beitrage zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogen, Archiv fur Electrotechnik, Vol.37, pp.588-608 (1943)
- (56) H. R. Greim : "Spectral Line Broadning by Plasmas", Academic Press, New York and London, pp.236-257

- (1974)
- (57) Y. Yokomizu, T. Sakuta and Y. Kito : A novel approach to AC air arc interruption phenomena viewed from the electron density at current zero, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.22, pp.129-135 (1989)
- (58) 岩田幹正、足立和郎、天川正士：セラミックス粉注入時の移行形交流プラズマの安定性とその機構、電力中央研究所研究報告、W00025 (2001)
- (59) 例えば、宮地巖、鬼頭幸生、岡田勝男：電力アークにおける温度および電極蒸気密度分布のアークスペクトル線強度による決定、電気学会論文誌、Vol. 87、p235 (1967)
- (60) 岩田幹正、田中慎一、池田弘一、合田豊：50kA 級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性－分光計測時の輝線スペクトルの自己吸収を考慮した温度測定手法の開発－、電力中央研究所研究報告、W99027 (2000)
- (61) 岩田幹正、田中慎一、池田弘一、合田豊：50kA 級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性（その2）－鉄電極から噴出するアークジェット部の温度とエネルギー密度－、電力中央研究所研究報告、W00026 (2001)
- (62) 岩田幹正、田中慎一、池田弘一、合田豊：50kA 級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性（その3）－温度およびエネルギー密度の軸方向分布－、電力中央研究所研究報告、W01010 (2002)
- (63) 足立和郎、天川正士、古川静枝、岩田幹正：不燃性粉体の注入による安定化アルゴンアークの電圧変化とその機構、電力中央研究所研究報告、W99036 (2000)
- (64) K. Adachi, M. Iwata and S. Furukawa: Observations of hydrogen vapor propagation in wall stabilized argon arcs using high-speed CCS cameras, 14th International symposium on plasma chemistry, Czech Rep. (1999)
- (65) 足立和郎、岩田幹正：器壁安定化アルゴンアークに添加された水素の流速測定、電気学会論文誌 A、120、p.18 (2000)
- (66) 足立和郎：PIV によるアークプラズマ内金属蒸気の流速測定、平成 12 年電気学会全国大会、1-122 (2000)



## 第7章

# まとめと今後の展望



# まとめと今後の展望

電気加熱は、①局所的な加熱ができる、②急速な加熱ができる、③加熱の場の雰囲気を選択範囲が広い、④高温加熱ができる、⑤エネルギーの制御と管理が容易である、⑥起動・停止が容易である、⑦クリーンな加熱ができ、また、快適な作業環境を維持しやすい、などの優れた特長を有している。このため、1次燃料に換算しても加熱効率が燃焼加熱に比べて改善される場合もある。さらに、電気加熱でしか達成できない付加価値の高い応用もある。アークプラズマ加熱は電気加熱の一種であり、これらの優れた特長を有している。特に、超高温を容易に安定に発生できるという点が、他の電気加熱方式にない特長である。

本レビューでは、アークプラズマ加熱の優れた特長を活かし、当研究所が推進している廃棄物処理、表面処理、材料創製への応用に関する研究成果と、これらの応用研究を推進するために必要不可欠な基礎・基盤研究の成果の現状を取りまとめた。

以下に応用研究を中心に今後の展望を纏める。

まず、廃棄物の溶融処理技術については、放射性廃棄物の溶融・減容技術として電気事業で運転されているプラズマ炉や高周波誘導炉などの実用機の操作で明らかになってきた課題や、原子力発電所の廃止措置に伴って発生する放射性廃棄物の課題などを広く調査し、当研究所のこれまでの知見を活用した新たな研究展開を図る。特に、廃止措置ではこれまでの研究開発で対象としなかった廃棄物や放射性核種が発生すると想定されることから、溶融時の核種挙動の解明を中心に新たな研究を展開する。

次に、実験室規模での基本技術を確立した減圧アーク除染技術については、具体的な適用先として、例えば、放射性廃棄物のクリアランス検認時に検出された局所的な汚染箇所（スポット汚染）に対するスポット除染が挙げられる。これは、減圧アーク除染では、原則として汚

染レベルに比例した処理時間とすることができ、したがって、スポット除染といった局所的で短時間の処理時間で済む除染対象であれば、適用の簡易さや二次廃棄物の発生量などの観点から、減圧アーク除染技術の特長が活かせると考えるためである。このような本技術の特長を活かせる適用先に対し、外部動向を踏まえながら実用化展開を図りたい。なお、スポット除染技術を考えた際における課題としては、スポット汚染箇所の検出方法、除染を終了するタイミングの判断方法、といった工学的なシステム作りが挙げられる。

また、材料創製の分野では、熱を通しやすく電気を通しにくいという魅力ある次世代の絶縁材料の開発に向け、エポキシ樹脂の成型性を向上するための粒子条件の解明、AlN 複合粒子の大量合成技術の開発、AlN 複合粒子を充填したエポキシ樹脂を絶縁材料とするモールド型変圧器の開発を推進する。

当研究所がアークプラズマに関する研究を立ち上げた1980年代の初めでは、その大規模な応用技術は、海外において、金属・冶金分野を中心に研究開発が活発化し始めていた。一方、国内でも製鉄会社を中心にタンディッシュ加熱への応用が研究され、現在も連続製鉄プロセスの中で利用されている。その後、環境問題への意識の高まりとともに、国内では、法規制の強化などの背景もあって、都市ゴミ焼却灰の溶融処理施設にアークプラズマ方式が採用される事例が、2000年代前半に急増した。国内の施設数は、世界的に見ても非常に多い。電気事業に貢献した放射性廃棄物の溶融処理技術については、このような技術開発の流れに比べて数年ほど早く着手したことが大きなアドバンテージになっていると感じている。今後も、時期を逸せず課題を先取りし、アークプラズマ加熱技術に関わる研究開発を引き続き推進し、電気事業や社会へ貢献する成果を創造していきたい。

# おわりに

理事 電力技術研究所長 藤波 秀雄



アークプラズマは様々な分野で応用利用されているが、我が国では明治11年（1878年）にアーク灯としてその高輝度性を利用した光源としての応用が始めであり、また同時に電気の利用として

も記念すべきその3月25日が電気記念日となっている。

アークプラズマは高輝度性のほかに超高温場を比較的容易に作り出せる特徴も持ち合わせている。さらに局所的に高エネルギーを発生・制御できる特徴もあり、金属の切断や溶接、ガスタービンなどの遮熱コーティングに代表される溶射など古くから応用技術として定着している。ここ十数年を振り返れば、製鉄などの冶金プロセス中で溶融した金属の加熱・保温、さらには、高融点の材料創製など様々な分野に応用が図られてきた。最近では、特に環境問題や有害物質への対応が社会問題化されている中で、廃棄物

の処理・減容、無害化などへの応用も注目されている。例えば、我が国では都市ゴミ焼却灰の減容施設へ数多くの導入実績があり、また、温暖化ガスであるフロン分解装置なども商品化されている。

本レビューはアークプラズマの優れた特徴を廃棄物処理、表面処理・加工、材料創製へ応用した当研究所での研究成果を取りまとめたものである。これらの成果は、アークプラズマの基礎的研究のもとでの発生・制御技術や計測診断技術に支えられているもので、今後ますます重要となる環境問題への対応など発展応用の可能性が大きいと考えられる。紹介した内容はまだまだ応用技術の原理実証あるいは初歩的段階のものであるが、今後の本分野の発展や技術の確立に役立てていただければ幸いである。また、産業分野における大規模な加熱において、アークプラズマの優れた特徴を活かした応用が展開し、電化による低炭素社会の構築への一助となれば幸いである。



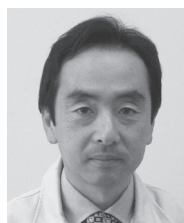
## 執筆分担

巻頭言：中央大学理工学部教授 稲葉 次紀

はじめに：常務理事 新田 明人

- 1章：天川 正士
- 2章：天川 正士、足立 和郎
- 3章：池田 弘一
- 4章：古川 静枝、足立 和郎、藤原 和俊
- 5章：岩田 幹正
- 6章：天川 正士、足立 和郎、岩田 幹正、池田 弘一、古川 静枝
- 7章：天川 正士

おわりに：理事 電力技術研究所長 藤波 秀雄



足立 和郎（1986年入所）  
電力技術研究所 上席研究員  
アークプラズマを用いた低レベル放射性廃棄物の溶融処理・乾式除染処理に関する研究に従事している。



天川 正士（1984年入所）  
電力技術研究所 上席研究員  
アークプラズマを用いた放射性廃棄物の溶融処理に関する研究に従事している。他に、アークプラズマの輸送特性や陽極現象のモデリングに携わってきた。



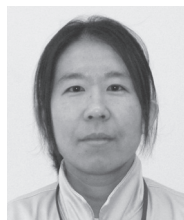
池田 弘一（1991年入所）  
電力技術研究所 主任研究員  
電力機器における大電流アーク現象や廃棄物の溶融無害化再資源化などのアークプラズマの応用技術に関する研究に従事してきた。最近では故障電流対策やアークプラズマを用いた放射性廃棄物の溶融処理の研究に取り組んでいる。



岩田 幹正（1990年入所）  
電力技術研究所 上席研究員  
アークプラズマを用いたナノ粒子の創製およびその応用に関する研究に従事している。他に、交流プラズマトーチにおける電極損耗・プラズマ不安定現象、大電流アーク放電の基礎特性や遮断現象に関する研究にも携わっている。



藤原 和俊（1994年入所）  
材料科学研究所 主任研究員  
軽水炉水化学管理の高度化に向け、構造材料の腐食抑制、腐食生成物の除去および蓄積低減に関する研究に従事している。ここ数年間は、流れ加速型腐食に及ぼす水化学因子の影響に関する研究に取り組んでいる。



古川 静枝（1996年入所）  
電力技術研究所 主任研究員  
アークプラズマを用いた放射性廃棄物の乾式除染技術や溶融処理等の研究に従事している。

## 編集後記

電中研レビュー第54号「アークプラズマとその応用技術 - 廃棄物処理と材料創製への応用 -」をお届けいたします。

本号では、「巻頭言」を中央大学教授 稲葉次紀様にご執筆いただきました。ご多忙中にもかかわらず快くご寄稿いただき、心からお礼申し上げます。

低炭素社会の実現が声高に叫ばれる中、二酸化炭素をほとんど排出しない原子力発電の役割がますます重要になっています。同時に、エネルギーを有効に利用する技術や省エネルギー技術も重要です。これらの社会的な潮流に対し、超高温という他の加熱源にない優れた長を有するアークプラズマが、少しでも寄与できれば幸甚です。

また、本レビューが、電力各社をはじめ関係諸機関の方々に少しでもお役に立てば幸いです。

本冊子についてのご意見をお待ちしております。

表紙絵：廃棄物の溶融・減容処理に用いた実験装置（2章、3章）と材料創製を行っている実験状況の写真（円内：5章）を配置しました。



## 編集後記

電中研レビュー第 54 号「アークプラズマとその応用技術 - 廃棄物処理と材料創製への適用 -」をお届けいたします。

本号では、「巻頭言」を中央大学教授 稲葉次紀様にご執筆いただきました。ご多忙中にもかかわらず快くご寄稿いただき、心からお礼申しあげます。

低炭素社会の実現が声高に叫ばれる中、二酸化炭素をほとんど排出しない原子力発電の役割がますます重要になっています。同時に、エネルギーを有効に利用する技術や省エネルギー技術も重要です。これらの社会的な潮流に対し、超高温という他の加熱源にない優れた特長を有するアークプラズマが、少しでも寄与できれば幸甚です。

また、本レビューが、電力各社をはじめ関係諸機関の方々に少しでもお役に立てば幸いです。

本冊子についてのご意見をお待ちしております。

---

**表紙絵：**廃棄物の溶融・減容処理に用いた実験装置（2章、3章）と材料創製を行っている実験状況の写真（円内：5章）を配置しました。



電中研 レビュー  
DENCHUKEN REVIEW

発行：(財)電力中央研究所 広報グループ

---

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 (大手町ビル7階)

TEL：03-3201-6601 FAX：03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>