



## 小特集 材料プロセッシングを支える熱プラズマの新展開

# 7. 熱プラズマを用いた廃棄物処理の現状と新展開

岩尾 徹, 渡辺隆行<sup>1)</sup>, 天川正士<sup>2)</sup>, 稲葉次紀<sup>3)</sup>, 西脇英夫<sup>4)</sup>  
 武蔵工業大学, 東京工業大学<sup>1)</sup>, 電力中央研究所<sup>2)</sup>, 中央大学<sup>3)</sup>, シンワ工業<sup>4)</sup>

(原稿提出日: 2006年5月15日)

熱プラズマは、超高温・高エネルギー密度・活性な化学反応を得ることや迅速なプラズマ制御が可能であり、アルゴンやヘリウムを用いた不活性雰囲気、酸素を用いた酸化雰囲気、窒素や水素を用いた還元雰囲気などを自由に選択できるため、廃棄物処理には好都合である。本章では、熱プラズマを用いた廃棄物処理の現状と新展開として、焼却灰、放射性廃棄物、フロン、PCB、アスベスト、医療廃棄物等の各処理の現状と技術および課題に関しまとめた。近年、熱プラズマによる廃棄物処理技術は、実用化・大規模化が図られつつあり、本技術のさらなる発展が期待される。

### Keywords:

thermal plasma, waste treatment, incineration ash, nuclear waste, PCB, fron, asbestos, medical waste

## 7.1 はじめに

熱プラズマは、超高温・高エネルギー密度・活性な化学反応を得ることや迅速なプラズマ制御が可能であり、アルゴンやヘリウムを用いた不活性雰囲気、酸素を用いた酸化雰囲気、窒素や水素を用いた還元雰囲気などを自由に選択できる。このことは、廃棄物処理に好都合であるため、熱プラズマは環境問題の解決のための先端基盤技術の一つとして期待されている。本章では、熱プラズマを用いた廃棄物処理の現状と新展開として、焼却灰、放射性廃棄物、フロン、PCB、アスベスト、医療廃棄物等の各処理の現状と技術および課題に関し述べる。

## 7.2 熱プラズマによる廃棄物処理の現状

環境問題の解決のための先端基盤技術のひとつとして熱プラズマによる廃棄物処理技術[1,2]がある。廃棄物処理プロセスとして熱プラズマが適している理由は、熱プラズマ中では電子のみならずイオンや原子などの重い粒子も高温であり、かつエネルギー密度が大きいので、処理対象物質を短時間で高温にすることができることである。また、化学反応速度は温度に対して指数関数的に増大するので、熱プラズマ中や高温周辺部では反応速度が著しく大きくなる。さらに、高温状態の物質を急速に冷却することによって有害な副生成物の生成を阻止することができる。また、熱プラズマが関与する伝熱速度は速いので、プロセスのスタートアップやシャットダウンを迅速に行うことができ、さらにガスの使用量が少なく、概して排ガスシステムの処理容量が小さくてすむ。

熱プラズマの優位性は、雰囲気を自由に選べることにもある。燃焼反応を用いた高温プロセスでは、燃焼ガス中に

生じる物質によって目的反応が阻害されるが、プラズマではそのような作用を避けることができる。

特に水蒸気を用いたプラズマの生成が可能であることは、フロン分解において大きな利点となる。フロンは高温にすれば容易に分解できるが、そのままでは分解ガスは下流の低温領域においてCF<sub>4</sub>などの副生成物を合成してしまう。このような再結合反応を抑制するためには、水素と酸素が分解ガスとともに存在することが望ましい。フロン分解によって発生するCはOによってCOあるいはCO<sub>2</sub>となり、ClやFはHによってHClやHFにすることによって副生成物の発生を抑制することができる。プラズマ中に水素と酸素を直接供給することも可能であるが、安全性と経済性を考慮すれば水蒸気をプラズマガスとして用いるほうが有利である[3-8]。なお、詳細は7.5節で述べる。

この他に廃棄物処理としてすでに実用化されている熱プラズマ技術として灰溶融がある。熱プラズマによって、都市ごみ焼却炉から排出される焼却灰や焼却灰に含まれる重金属類を不溶化し、ダイオキシン類を分解して無害化することはすでに多くの自治体で用いられている。灰溶融と低レベル放射性廃棄物の減容に関しては各々7.3節と7.4節で取り上げる。また、プラズマ溶融技術は医療廃棄物処理としても実用化されている。このシステムでは廃棄物を無酸素状態で熱分解し、残った炭化物、注射針、ピン類等をプラズマ加熱により安定なスラグに溶融固化させるものである。医療廃棄物の処理に関しては7.8節で取り上げる。

熱プラズマを廃棄物処理システムとして実用化するのに重要な点はコストである。熱プラズマは従来からコストが高いものと扱われてきたが、熱プラズマが有する高温と高化学活性という特徴を活用すれば、廃棄物処理装置全体と

7. New Development and Recent Trend of Waste Treatment Using Thermal Plasma

IWAO Toru, WATANABE Takayuki, AMAKAWA Tadashi, INABA Tsuginori and NISHIWAKI Hideo

corresponding author's e-mail: toruiwao@iwa-net.com

してのコストを低減できる可能性がある。例えば、酸・アルカリ系の薬品を用いる湿式処理法を、熱プラズマを用いる乾式処理方法に代えることにより、廃液処理に必要なコストを低減できる効果がある[9,10]。従来、熱プラズマはその高温という特長を利用しているものがほとんどであるが、熱プラズマには高化学活性という魅力的な特徴がある。熱プラズマに存在している荷電粒子やラジカル（遊離基）を上手に利用して、高化学活性であるという特長を活用すれば、新しい廃棄物処理プロセスを開発することが可能である。

またコストの点だけではなく、熱プラズマにしか実現できないプロセスがあることも重要な点である。最近、焼却と灰溶解を一段のプロセスとして、熱プラズマによる都市ゴミのガス化を行うことが考えられている。また、半導体製造プロセスなどに用いられている各種のプロセスガスを分解することが要求されているが、この解決策として、反応性熱プラズマを用いる排ガス処理プロセスが考えられる。遮断器などで大量に使用されているSF<sub>6</sub>を完全に分解する技術の開発も望まれているが、反応性熱プラズマを用いる方法は、この解決策の候補のひとつである。

他にも実用化されている熱プラズマによる廃棄物処理技術に、製鉄・製鋼工場から大量に発生するダストのリサイクルがある[11]。電気炉ダストは鉛、亜鉛、クロムなどの有価金属を含んでおり、熱プラズマでこれらのダストを処理することにより、蒸気圧の高い鉛や亜鉛を炉頂部から、またその他の鉄、クロム、ニッケルなどの金属は炉底部から溶融状態で回収することができる。

さらに、放射性核種を吸着した廃イオン交換樹脂の処理[12]、プラズマアーク溶解により自動車の廃触媒からの白金族を回収するプロセス[13]、アークによってアルミニウムの溶解や鑄造過程で生じるドロスからアルミニウムを回収するプロセス[14]、熱プラズマによって廃タイヤを熱分解して燃料ガスを合成するプロセス[15]などが開発されている。

### 7.3 都市ごみ焼却灰の溶融処理

熱プラズマの一形態であるアーク放電を用いた廃棄物処理技術の内、国内で実用化が最も進展しているのは、都市ごみ焼却灰の溶融処理[16-19]である。エコスラグ利用普及センターが取りまとめた都市ごみ溶融施設数は、1997年から2001年の間に11施設から57施設と漸増し、2002年には120施設と急増している[20,21]。この内約半数の50施設がガス化溶融炉であり、残りは焼却灰を溶融する施設である。民間委託を除いた残りの68施設の半数の34施設が電気加熱を採用している。さらに、電気加熱方式の大部分が熱プラズマを利用したものである。施設数が急増した背景には、技術的な発展があることはもちろんであるが、1999年に成立、翌年に施行されたダイオキシン類対策特別措置法がドライビングフォース（駆動力）になっていることが指摘できる。しかし、立法をめぐっては、「利権の構図」を指摘する渡辺氏らの批判的な意見もあり[22]、有害な廃棄物の処理処分の費用負担の在り方が今後の課題であると考えられる。

技術的には、熱プラズマを用いた溶融炉は、アーク方式とプラズマ方式に大別でき、後者はさらに移行形または非移行形のプラズマトーチを用いる方式に分けられる[23]。アーク方式は、3本の黒鉛電極の間に三相交流アークを発生させ、その熱で灰を溶融する方式である。例えば、東埼玉資源環境組合第一工場では、80トン/日の処理能力を有する炉が稼働している。移行形のプラズマトーチを用いる方式は、中空の黒鉛を電極とし、その内部を貫通する穴から窒素ガスを噴出すことによってアーク放電を安定化している。また、札幌白石清掃工場では、70トン/日の処理能力を有する溶融炉が2基稼働している。この施設の溶融原単位は、800~1,000 kWh/トンを達成している[24]。非移行形プラズマトーチを用いる方式は、上述の2つの方式に比べて炉底電極が不要になるという利点がある。兵庫県の加古川新クリーンセンターでは、2 MWの出力を有するプラズマトーチにより30トン/日の処理を行える溶融炉が2003年4月から操業されている[25]。焼却後の灰を溶融する方式に対し、都市ごみのガス化溶融炉にプラズマトーチが用いられている事例もある[26]。

ガス化溶融炉では、都市ごみは、コークス・石灰石とともにシャフト炉の上部から投入され、充填層の下部へ移動する間に、乾燥、熱分解され溶融部に達する。溶融部では、熱分解残渣や不燃物が、コークス中の炭素の燃焼熱を主な熱源として溶融される。プラズマトーチは、シャフト炉の羽口に取り付けられ、高温の空気を吹き込んでいる。プラズマトーチを取り付ける利点は、炉内へ高温の空気が供給できるため、起動・停止を短時間でできること、スラグの連続出滓が可能となること、廃棄物の熱量が変動してもシステムの運転制御を行いやすいことなどである。

さらに、高周波熱プラズマを用いた溶融飛灰の処理に関する研究[27,28]も行われており、実用化に向けた検討が進められている。

### 7.4 放射性廃棄物の溶融処理

放射性廃棄物は、原子力発電所、原子燃料加工施設、研究施設、医療施設などから発生している。最終処分のコスト低減、また、貯蔵・保管施設の有効利用、場合により輸送コストの低減などの観点から、放射性廃棄物の減容は非常に効果的である。

原子力発電所の運転や定期点検などで発生する低レベル放射性廃棄物は、最終処分の前に固化化することが義務づけられている。液体状の低レベル放射性廃棄物は、固化化処理され平成4(1992)年から青森県六ヶ所村で埋設処分が行われている[29]。一方、固体状の廃棄物については、圧縮後にモルタルで固化化する方法と、溶融による固化化の方法が採用されており、ドラム缶に入れられ平成12(2000)年から埋設処分が行われている。溶融のための加熱源として、熱プラズマを用いる方法も採用されている。

日本原子力発電株式会社は、敦賀発電所にプラズマ溶融・減容処理設備を設置し[30]、処理を開始した。この設備では、金属、不燃物、可燃物などの廃棄物を、約600 kg/hの処理速度で溶融・減容処理できる[31]。この設備の大き

な特徴は、中心部に出湯口が設けられた炉床を回転させ、溶湯の保持や出湯を制御する構造により、出湯のための炉の傾動操作を不要としている点である。また、出湯口は水冷金属で構成されており、アークプラズマの着火が容易となっている。

国内における原子力発電所の運転廃棄物の溶融・減容処理への適用を目指した開発研究が、1980年代に電力会社を中心として実施されている[32]。この研究では、金属や不燃性の廃棄物を対象としたもので、可燃物を分別することを前提としていた。これに対し、アークプラズマを用いて金属や不燃物に加え可燃物も一括して溶融・減容し、ダストの性状や排ガス組成[33]、最終処分に適した固化体を作製できることや溶融時の核種挙動[34-36]、これらに及ぼす炉内雰囲気ガス条件の影響[37]、また、溶融時のアークプラズマの安定性などが解明されている[38]。

日本原子力研究開発機構(旧、日本原子力研究所)は、研究所内から発生する放射性廃棄物の減容処理施設を建設した。この施設では、可燃物や難燃物を焼却するための焼却施設、大型の廃棄物を解体し分別するための施設、原子炉系の金属廃棄物を圧縮減容する施設、金属廃棄物を溶融したり焼却炉の残渣や不燃性廃棄物を溶融する施設などから構成されている[39]。この中で、不燃性廃棄物を溶融するためのプラズマ炉は、1.3 MWの非移行形プラズマトーチが2本取り付けられ、約4トン/日の処理能力を有している[40]。

本システムの開発に関わる一連の研究では、高周波誘導加熱とプラズマ加熱を併用するハイブリッド加熱方式や高周波誘導加熱方式により、炭素鋼や保温材を溶融して得られた溶融固化体の均質性[41]、溶融固化体の化学的安定性[42]、溶融時の核種挙動[43]などが明らかにされている[44]。

## 7.5 フロンガスの処理

フロンは、冷蔵庫の冷媒、半導体部品の洗浄などに使われてきたが、特定フロン(CFC)はオゾン破壊係数、地球温暖化係数が高く、生産が中止された。対流圏で短時間に分解する指定フロン(HCFC)やオゾン破壊係数が低い第2世代フロン(HFC)が開発され、HFCが広く使用されている。また、半導体素子の製造過程においてはPFC(C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>やCF<sub>4</sub>)が用いられるが、これらも温暖化係数が高い。さらに、電気絶縁・消弧媒体でありながら温暖化係数がCO<sub>2</sub>の24,000倍というSF<sub>6</sub>も規制され、COP3京都議定書の規制は運用を開始し始めている。

フロンの分解方法[45,46]としては、液中燃焼法、ロータリキルン法、セメントキルン法、都市ごみ焼却法、超臨界水法、触媒法、プラズマ法があり、特にプラズマ法[47]では、約1万度の直流アークプラズマで分解するアークプラズマ法、フロンと水を高周波トーチへ導き、約1万度で分解する高周波プラズマ法、フロンと水をマイクロ波トーチへ導き、約6千度で分解するマイクロ波プラズマ法などに区別される。

高周波プラズマによる処理例では、千葉県市川市のク

リーンジャパンセンターに設置されていたフロン分解プラント[4,48]、北九州市のエコタウンで稼働しているフロン分解プラントなどがあり、約200 kW入力し、誘導電流によるジュール熱で励起された約1万度のプラズマ中でフロンと水蒸気が接触反応(加水分解)する。高周波プラズマでは電極の腐食問題が無く、一定のプラズマ形状が得られ、強度の紫外線の照射も加わって、十分に分解反応する。

フロンをプラズマにより分解すると、主として炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)、塩酸(HCl)、フッ酸(HF)になり、冷却塔等で水に吸収される。排ガスは苛性ソーダにより中和され、さらに還元された後、大気に放散される。排水は、中和処理され、蛍石を遠心分離機で除去した後、放流される。フロンの分解率は、99.99%以上を示している。プラズマ入力電力量/フロン重量比が約1.0 kWh/kg以上では、プラズマが安定し、分解率も高く十分に無害化処理できる。排ガス中の有害物質の濃度は基準値を大きく下回る。ダイオキシンおよびジベンゾフランの合計毒性等価濃度は0.04 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>であり、安全性を確認している。フロンはプラズマで完全に破壊され、さらにダイオキシン類は高温分解され、冷却塔等で瞬時に60℃前後にまで冷却され、ダイオキシン類は再合成されない。

マイクロ波プラズマによる分解例[5]では、フロンと水蒸気をガラス管に引き込み、約2,450 MHzのマイクロ波を当て、中心温度6,000 K以上のプラズマにする。生成ガスは、消石灰(CaOH)の水溶液に通す。生成されるCaClと蛍石はいずれも無害な安定物質である。CFC12を99.99%の高分解率で、1時間に2 kg処理し、10時間連続運転できる。小規模でも容易に設置でき、CFC11[49]やC<sub>4</sub>F<sub>8</sub>[50]の分解例もある。

直流放電によっても、フロン分解は行われているが、高温の水蒸気雰囲気での電極の耐久性の問題があるので、水蒸気のみを作動ガスとして用いている例は非常に少ない。このためアルゴンなどの通常的气体を作動ガスとして用いて、プラズマジェットの下流で水蒸気を噴射する方法がよく用いられている。このような水蒸気プラズマによってフロンを分解することでHFやHClが生成し、これらを水中に通し急冷することにより、HFやHClを水溶液として除去可能でダイオキシン類の生成を防ぐことが可能であり、水蒸気無しのプラズマ処理に比べ不均化反応や二量化反応による副生成物の発生、すすの生成等を防ぐことができる。水蒸気プラズマの例としてプラズマによる有機化合物分解技術(PLASCON)によるフロン、ハロン、PCB等の分解を行うシステムがある[6,7]。150 kWのプラズマジェットでCFC12を40 slm(NL/min)で分解しており、プラズマパワーに対する供給量の比を6 mol/kWh以下にすれば、副反応で生成するCF<sub>3</sub>Clを抑制することが可能である。また、6.3節で述べた直流放電によるスチームプラズマトーチが最近開発され、フロン類の分解への応用が研究されている[8]。

## 7.6 PCBの処理

PCB(ポリ塩化ビフェニル)[51]は、生体・環境への影響

が明らかになり、生産が中止され新規使用が禁止されている。熱媒体用は回収されたが、電気機器用は現在も継続使用もしくは保管されている。また、重電機器の中に微量のPCBが混入していることから、その処理が急がれている。PCBはビフェニル骨格に塩素が置換したもので、異性体が存在し、化学的に安定、難熱分解性、難腐食性、高電気絶縁性、不燃性等という特性がある。我が国では約59,000トンが生産され、熱媒体、トランス・コンデンサ用の絶縁油等に使用された。PCBは残留性有機汚染物質(POPs)で、環境中で分解されにくく、人の健康・環境への有毒性がある。塩素の数と位置によって毒性が異なり、コプラナーPCBと呼ばれる異性体には、ダイオキシン類:DXNsと同様の毒性があるとされ、毒性換算係数(TEF)が定められている。

OECD(経済協力開発機構)において、製造等の禁止、適正処理が決議され、UNEP(国連環境計画)はPCBトランスおよびコンデンサの管理・処分のガイド等を発行している。国際的にはストックホルム条約でPOPs, PCB, フロン類等に製造・使用の禁止や制限、排出の削減、廃絶を謳っており、PCBは2025年までに使用を禁止し、2028年までに廃絶することが勧告されている。日本において、PCB処理の研究例[51]や実績[52]があるものの、未だ多量のPCBが未処理のままであり、現在まで保管が義務づけられている。しかし、2001年に施行された通称「PCB特別措置法」により、日本においても、2016年までにPCB処理を行うことが決められ、現在、全国を5ブロックに分けて、大型処理プラントの建設が進められている。

現在、PCBのプラズマ分解法は、処分又は再生の方法として認定されている。PCBのプラズマ分解例としては、PCBをドラム缶ごと溶融スラグ池に投入し、プラズマとスラグ池の高温で溶融分解する実証試験が行われており、スラグのリサイクルが可能で、排ガス中のダイオキシンおよびPCBが規制値以下であることが確認されている[52]。また、前述のPLASCONシステムにより、オーストラリアにおいて1992年より処理を開始[7]しており、日本においても四日市市にある化学工場において1,000トン規模の実処理が行われている。

## 7.7 アスベストの処理

アスベストは、学校の天井や壁などで安価な断熱材として使用されてきたが、肺への有害針状物質であり、既に生産が禁止されている。しかし、現在、過去に製造していた施設周辺の住民への健康被害や既存の施設で未だに使用されている問題がクローズアップされており、早急な処理が課題となっている。このアスベストの処理方法の一つとして、アークプラズマにより溶融固化による無害化・再資源化する方法が提案されている。アスベストは、溶融することで岩石やガラス状の安全なスラグとなり、針形状が無くなることから、無害化することが可能である。処理後のスラグは、粒度5mm以下の入手が容易な砕石ダストと混合すれば、下層路盤材の規格を満たしている。また、モルタル用の骨材としてリサイクルしても、天然の陸砂と同等の

強度が出現する。したがって、路盤材料やコンクリート用細骨材などに有効にリサイクルが可能である[1, 18, 53-55]。

## 7.8 医療廃棄物の処理

旧厚生省の調べによると、1998年度の感染性廃棄物の医療関係機関からの排出量は全国で15万トンに昇り、年々増加しており、社会的に問題となっている。一方、医療機関から排出される感染性廃棄物は特別管理廃棄物に指定され、厳重な管理と処理が義務づけられている。また、2001年4月からは改正廃棄物処理法が施行となり、排出者責任の徹底が明確化されている。さらに、2002年12月からはダイオキシン類の濃度規制が強化された。したがって、既存処理施設において医療廃棄物は、一般的には焼却方法で処理されているが、注射針やビン類が残ることやダイオキシン発生等の環境問題が深刻化してきた。

現在、廃棄物処理センターでは多様化する廃棄物を素材ごとに分別した後、重油などの火炎を用いて燃焼させるが超高温のプラズマ溶融に比べて残滓の容積は大きく、処理センター迄の輸送コストと埋立地の確保が、廃棄物[56]の移動作業に伴う作業員への感染の危険とともに深刻な問題となってきている。さらに、小規模の医療機関の場合、廃棄物の収集が毎日ではないため、収集日までの間の廃棄物の安全保管が問題である。現在、医療廃棄物処理の外部委託率は97%を占め、遠路の処理施設に輸送している。感染性廃棄物の処理事業者は、収集運搬で約6,000社、処分業者で約300社が認可され、このうち感染性廃棄物の専業業者は20~30社である[56]。医療廃棄物処理の市場規模としては、1,000床規模の病院で委託業者に支払う費用は年間3億円であり、1996年で全国の総計では1500億円である。このように、全国で毎日医療廃棄物の運搬・処理が行われているが、もし、トラック輸送中の事故で感染性医療廃棄物が四散する事態を起こせばその汚染は深刻となる。廃棄物発生者側の立会いの下で現場にて安全、安価に短時間で即日完全処理できる装置が求められており、各々の病院では安全かつ確実に無害化し、かつ、減量することができる熱プラズマによる溶融処理方法が注目されている。

2001年から1年間名古屋にて、プラズマ溶融による医療廃棄物処理装置の実証実験[57, 58]が行われた。本装置は、従来の焼却処理では燃え残る金属やガラスを含む医療廃棄物を、プラズマ加熱により安定なスラグに溶融固化させるものである。特長としては、医療廃棄物を完全に無害化し、約1/200まで減容化でき、スラグは路盤材などに再利用が可能である。電気加熱により高精度の温度制御ができるため、排ガス処理が行いやすく、ダイオキシン値を現行基準値の1/50(0.1 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>)以下に大幅に抑制可能である。溶融された廃棄物はスラグ化し、容積は約1/250に減容化できる。非移行形プラズマトーチを用いた医療廃棄物処理として、ロシアにおいて行われている研究例[59]がある。150 kW非移行形トーチを利用し、かつ、チャンバーに水蒸気と空気を加え反応性を高めることで、非導電性物質の多い医療廃棄物の処理を行っており、排ガスはバグフィ

ルタとスクラバを用いて処理され、排ガスやスラグの成分も調査されている。

非移行形と移行形の特徴を持つV字アークプラズマ[60]による感染性医療廃棄物熔融処理[61]が、岸和田市や松山市で行われている。熔融処理量は、1日8時間運転で1,000 L可能であり、量に応じて24時間運転で、3,000 Lまで可能である。ダイオキシン類の排出量は基準値以下で、環境基準値の5 ng-TEQ/m<sup>3</sup>に比べ、0.00015 ng-TEQ/m<sup>3</sup>と極めて微量である。廃棄物は、1,600℃で熔融固化され、安全無害なスラグになる。熔融スラグは、火成岩に近い物質で、最終処分場に埋設処分が可能であり、一般産業廃棄物として処分できる他、路盤材などに再利用もできる。残留率は、体積比で3/1,000、重量比で5/100である。

また、同じ非移行形と移行形の特長を有する移動式小型廃棄物処理熔融炉の開発がされている[62, 63]。Fig. 1にマルチトーチプラズマアーク熔融炉を示す。本熔融炉は、ツイントーチプラズマ[64]と中間ノズルによる1万度以上の超高温を用いる熔融炉、直流電源、プラズマ制御盤、冷却水循環装置、排ガス集塵器などからなり、装置一式を5.7トン積みトラックに搭載して、病院、保健所といった医療機関および老人ホーム、在宅看護の個人住宅などの現場に出向き、感染性の医療廃棄物を即時に現地にて熱プラズマにより熔融固化する。熔融炉は、熱プラズマにより医療廃棄物を安定なスラグに熔融固化する。また、中間ノズルからの空気流で炉内の高温領域を拡大して熔融効率を高める。ツイントーチは移行形及び非移行形の特長を有しているため、非導電性物質の処理も可能であり、高熱により電源投入後の20～30秒間で医療廃棄物を完全熔融することが可能で、出滓容積は少量となることが期待される。さらに、ツイントーチからのエネルギーは、超高温[64]だけでなく紫外線による殺菌や赤外線による加熱処理[65-67]などに応用することが期待される。本熔融炉は、現在、アーク姿勢[68, 69]の制御や熔融効率の向上、排ガスの法律適合化、および、コストに関し研究開発が進められており、平成18(2006)年度に性能試験が実施される予定である。

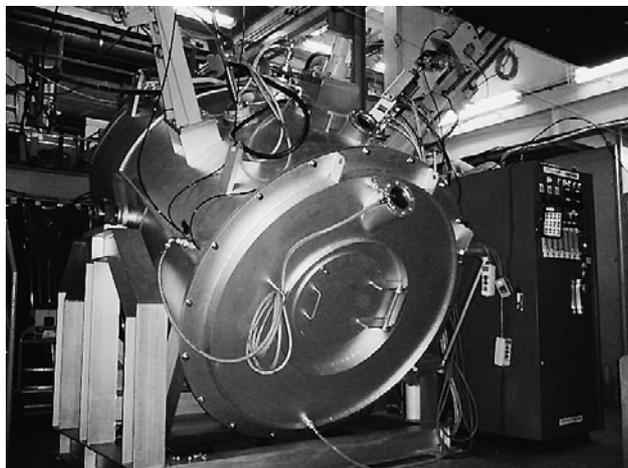


Fig. 1 マルチトーチプラズマアーク熔融炉[63].

## 7.9 まとめ

本章では、熱プラズマを用いた廃棄物処理の現状と新展開として、焼却灰、放射性廃棄物、フロン、PCB、アスベスト、医療廃棄物等の各処理の現状と技術および課題に関しまとめた。熱プラズマは、廃棄物処理に好都合な特長を持つため、環境問題の解決のための先端基盤技術の一つとして期待されており、プラズマによる廃棄物処理プロセスは、これからの資源循環型社会構築に対して一石を投じるものであると考えられる。近年、熱プラズマによる廃棄物処理技術は、実用化・大規模化が図られつつあり、本技術のさらなる発展が期待される。

## 参考文献

- [1] T. Inaba, T. Iwao, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 7, 684 (2000).
- [2] J.S. Chang: 電気学会誌 123, 89 (2003).
- [3] T. Watanabe and S. Shimbara, High Temp. Material Processes 7, 455 (2003).
- [4] S. Takeuchi, K. Takeda, N. Uematsu, H. Komaki, K. Mizuno and T. Yoshida, Proc. 12th Inter. Symp. Plasma Chem. (1995) p.1021.
- [5] 別所正博: 日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会第57回研究会資料, 29-35 (2002).
- [6] A.B. Murphy, T. McAllister, A.J.D. Farmer and E.C. Horgan, Proc. 15th Inter. Symp. Plasma Chem. (2001) p.617.
- [7] 産業廃棄物処理事業振興財団: 産廃振興財団 NEWS, Vol.10, No.28, p.6 (2002).
- [8] T. Watanabe, ASEAN Journal of Chemical Engineering 5, 30 (2005).
- [9] M. Sakano, M. Tanaka and T. Watanabe, Thin Solid Films 386, 189 (2001).
- [10] A. Takeuchi, S. Kato and T. Watanabe, Chem. Eng. Comm. 191, 1671 (2004).
- [11] H.G. Herlitz and P. Baumann, Industrial Heating 54, 15 (1987).
- [12] A. Nezu, T. Morishima and T. Watanabe, Thin Solid Films 435, 335 (2003).
- [13] R.K. Mishra and R.G. Reddy, Proc 10th Inter. Precious Metals Inst. Conf. (1986) p.217.
- [14] M.G. Drouet, Plasma Technology for Hazardous Waste Destruction 37, 77 (1993).
- [15] J.S. Chang, B.W. Gu, P.C. Looy, F.Y. Chu and C.J. Simpson, J. Environ. Sci. Health A31, 1781 (1996).
- [16] 久保祐也, 細井俊裕, 金子順恵, 大畑昌輝, 岩尾 徹, 古田直紀, 稲葉次紀: 電気学会論文誌 121-D, 493 (2001).
- [17] K. Matsumaru, H. Fukuyama, M. Susa and K. Nagata, Thin Solid Films 316, 105 (1998).
- [18] 稲葉次紀, 長野将美, 遠藤正雄: 電気学会論文誌 117-D, 831 (1997).
- [19] T. Inaba, Y. Watanabe, M. Nagano, T. Ishida and M. Endo, Thin Solid Films 316, 111 (1998).
- [20] 天川正士: エレクトロヒート 124, 31 (2002).
- [21] 坪井晴人, 在間勇二: 資源環境対策 42, 90 (2006).
- [22] 渡辺正, 林敏郎: 日本評論社 145 (2003).
- [23] 石川禎昭編: 日報アイビー 151 (2001).
- [24] 訪問調査 (2004年9月).
- [25] 訪問調査 (2003年11月).

- [26] 永田清, 加藤龍夫, 八木紳一郎, 田上敏郎, 萩原弘之, 広瀬勝則: 日立金属技報 7, 99 (2001).
- [27] 竹中伸也: 電気学会誌 119, 285 (1999).
- [28] 坂野美菜, 田中元史: プラズマ・核融合学会誌 76, 748 (2000).
- [29] 山崎誠一郎: 電気学会誌 123, 93 (2003).
- [30] 赤川吉寛: プラズマ・核融合学会誌 73, 946 (1997).
- [31] 辻行人: プラズマ・核融合学会誌 73, 949 (1997).
- [32] 宮川 稔, 大野弘雄, 小林邦英, 村上三郎, 北田俊信, 山下準二, 瀧口英樹, 熊田賦, 田村守孝: 火力原子力発電 35, 565 (1984).
- [33] 天川正士, 足立和郎, 安井晋示, 稲葉次紀: 電気学会論文誌 114-A, 597 (1994).
- [34] 天川正士, 足立和郎, 安井晋示: 電気学会論文誌 119-A, 357 (1999).
- [35] 安井晋示, 天川正士: 原子力バックエンド研究 6, 91 (1999).
- [36] 天川正士, 安井晋示: 原子力バックエンド研究 8, 45 (2001).
- [37] 安井晋示, 天川正士, 足立和郎: 原子力学会誌 41, 39 (1999).
- [38] 足立和郎, 天川正士: 電気学会論文誌 119-A, 977 (1999).
- [39] H. Higuchi, T. Monma, N. Nakashio, K. Kozawa, T. Touhei, T. Suda, M. Mitsuda, S. Kurosawa, K. Henmi, J. Ishikawa, M. Kato and M. Sato, *Proceedings of GLOBAL 2005*, Tsukuba, No. 277 (2005).
- [40] 東 康夫, 杉本雅彦, 藤富昌志, 能浦 毅: 神戸製鋼技報 53, 61 (2003).
- [41] 中塩信行, 中島幹雄, 平林孝罔: 原子力学会誌 46, 279 (2004).
- [42] 亀尾 裕, 原賀智子, 中塩信行, 星亜紀子, 中島幹雄: 原子力学会誌 46, 354 (2004).
- [43] M. Nakashima, N. Nakashio, Y. Kameo, T. Fukui, M. Isobe, A. Ohtake, T. Wakui and T. Hirabayashi, *Radiochim* 91, 45 (2003).
- [44] M. Nakashima, T. Fukui, N. Nakashio, M. Isobe, A. Ohtake, T. Wakui and T. Hirabayashi, *J. Nucl. Sci. Technol.* 39, 687 (2002).
- [45] 稲葉次紀, 岩尾 徹: 電気学会誌 123, 85 (2003).
- [46] 環境省地球環境局: フロン破壊処理ガイドライン (2006) p.2.
- [47] 渡辺隆行: 資源環境対策 41, 89 (2005).
- [48] 梶家 治: 電気学会誌 114, 719 (1994).
- [49] M. Josiaski *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, 2274 (2002).
- [50] R. Raju, D. Kudo, Y. Kubo, T. Inaba and H. Shindo, *JJAP* 42, 280 (2003).
- [51] 産業廃棄物処理事業振興財団: PCB 処理技術ガイドブック (改訂版), ぎょうせい (2005).
- [52] 田頭成能, 高橋正光, 村田光也, 永田守弘: 神鋼環境ソリューション技報 1, 21 (2005).
- [53] 池田弘一, 天川正士, 安井晋示: 電力中央研究所研究報告 W03005 (2004) p.24.
- [54] 安井晋示, 天川正士: エレクトロヒート 118, 42 (2001).
- [55] 天川正士: エレクトロヒート 129, 28 (2003).
- [56] 医療関連サービス振興会: 「医療関連サービスの現況と市場動向に関する調査」 (2002).
- [57] 田中和士: OHM 89, 86 (2002).
- [58] 田中和士: エレクトロヒート 124, 37 (2002).
- [59] G. Rutburg, A.N. Bratsev, A.A. Safronov, A.V. Surov and V.V. Schegolev, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 30, 1445 (2002).
- [60] 加藤嘉彦: OHM, 108 (2002).
- [61] 小池酸素工業株式会社: KS-05-09 (2005).
- [62] 西脇英夫, 中央大学第2回熱プラズマ研究シンポジウム (2006).
- [63] T. Iwao and M. Yumoto, *Transaction on Electrical and Electronic Engineering, IEEJ, Trans. Vol.1* (2006) p.163.
- [64] T. Iwao, H. Takizawa, T. Inaba and M. Yumoto, *ISIJ International* 45 (8), 1084 (2005).
- [65] 岩尾 徹, 宮崎宏和, 吉田秀幸, 山口慶高, 井上順恵, 水野仁一, 稲葉次紀, 電気学会論文誌 123-B, 866 (2003).
- [66] 岩尾 徹, 井上順恵, 山口慶高, 水野仁一, 稲葉次紀: 電気学会論文誌 123-A, 630 (2003).
- [67] T. Iwao, H. Miyazaki, T. Ishida, Y. Liu and T. Inaba, *Trans. ISIJ International* 40, 275 (2000).
- [68] T. Iwao, P. Cronin, D. Bendix and J. Heberlein, *IEEE TPS* 33 (3), 1123 (2005).
- [69] T. Iwao, A. Nemoto, M. Yumoto and T. Inaba, *IEEE TPS* 33 (2), 430 (2005).