

## 中小企業庁長官賞

### 「大気圧ロングアークプラズマ式排ガス処理装置」

クリーン・テクノロジー株式会社

#### 1. 装置の詳細説明

##### (1) はじめに

近年、人間の活動が活発になることで放出される「温室効果ガス」による地球温暖化が大きな社会問題となってきている。良く知られている温室効果ガスは二酸化炭素であるが、フロンガスも温室効果ガスの1つであり、二酸化炭素の数百倍から数万倍の地球温暖化係数(GWP)があるとされており、地球温暖化の防止には排出量の抑制と共に削減にも積極的に取り組む必要がある。

半導体業界においてもフロンガスである PFC (パーフルオロ化合物の略) が多く使用されており、代表的な PFC ガスとして  $CF_4$ 、 $C_2F_6$ 、 $C_3F_8$ 、 $c-C_4F_8$  の 4 種がある。現在の京都議定書(2021年改正)ではこの 4 種の他に  $CHF_3$ 、 $SF_6$ 、 $NF_3$  を温室効果物質として指定しているため、半導体業界ではこれらの 7 種を PFC 等ガスと呼んでいる。PFC 等ガスの地球温暖化係数(GWP)は極めて大きく、最も小さい  $CF_4$  で二酸化炭素の 7,000 倍以上、最も大きい  $SF_6$  ガスでは二酸化炭素の 22,000 倍以上あり、半導体業界においてはこれら PFC 等ガスの排出量抑制としての排ガス処理装置が重要な役割を担っている。またこの排ガス処理装置は二酸化炭素の排出が少ない省エネルギー化が望まれる。

##### (2) 本装置の構成と原理

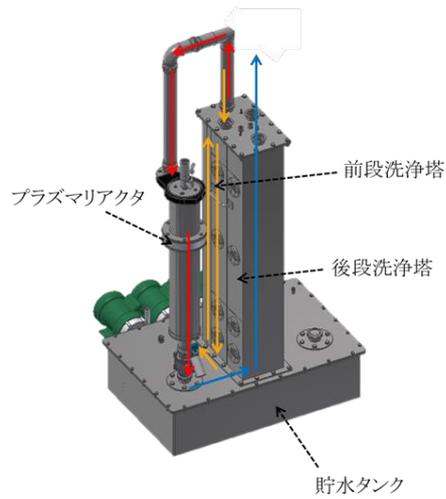
本装置は主に半導体製造工程で排出される有害なガス ( $Cl_2$ 、 $HBr$ 、 $HF$  など) と PFC 等ガスを無害化する排ガス処理装置である (図表 1)。PFC 等ガスは分子の結合が強く難分解性ガスであるため、分解には高いエネルギーを必要とすることから、本装置は大気圧下でプラズマ放電を行うプラズマリアクタを備える。プラズマは装置に搭載される DC 電源により発生させる。

本装置は前段洗浄塔、プラズマリアクタ及び後段洗浄塔から構成されており、ガスは前段洗浄塔からプラズマリアクタを通り、後段洗浄塔を抜けて排出される (図表 2)。PFC 等ガスを含む有害ガスが本装置に流入すると、まず前段洗浄塔で水溶性ガスは浄化される。その後、プラズマリアクタにて難分解性ガスを分解し水溶性ガスに変化させ、最後に後段洗浄塔にて浄化する。

本装置のラインナップはプラズマリアクタ 1 基を搭載したシングルタイプと、装置内のバックアップや受け入れガス量の増大に対応するためにプラズマリアクタを 2 基搭載したデュアルタイプがある (図表 3)。



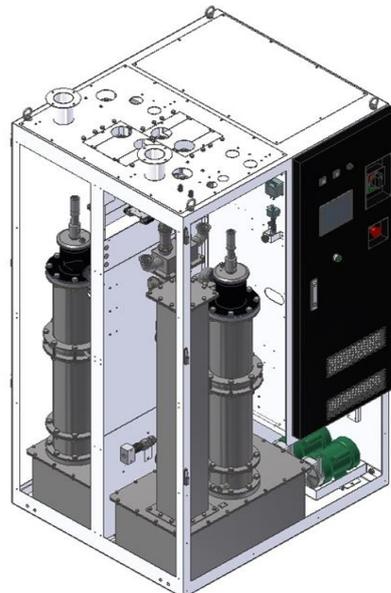
図表 1 国内最新半導体工場稼働中の装置



図表 2 装置内構成



サンダー (シングルタイプ)



デュアルサンダー (デュアルタイプ)

図表 3 シングルタイプとデュアルタイプ

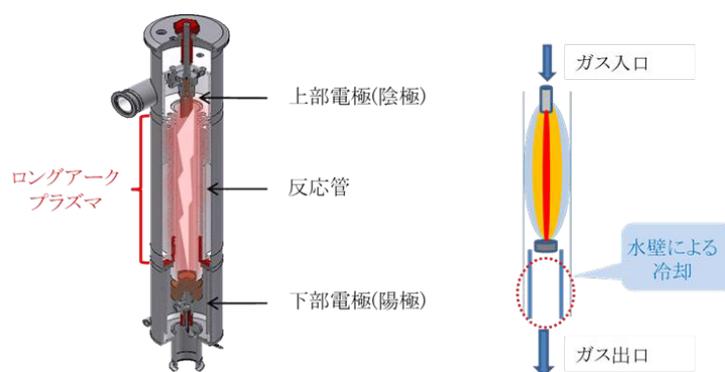
### (3) プラズマリアクタの特徴

初期型のプラズマリアクタはセラミック製反応管の上下に陰極と陽極を配置し、この電極間にプラズマを放電させる (図表 4)。電極間距離は約 400mm となっており、この電極間に大気圧下でプラズマを放電させることでロングアークプラズマを発生させる。

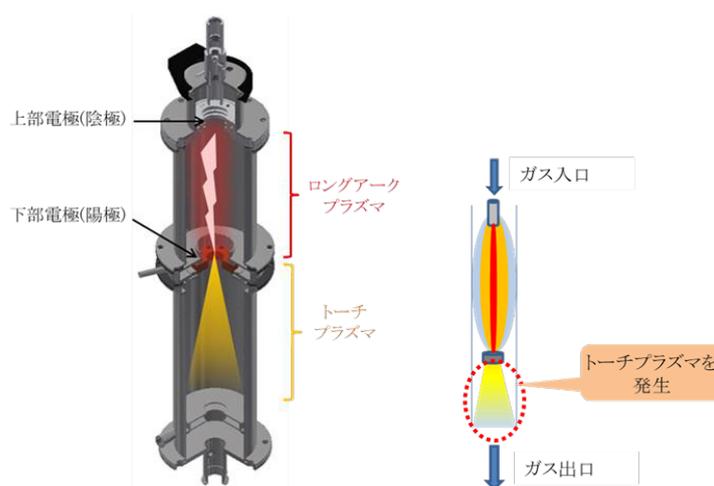
プラズマが放電している下流 (下部電極の下側) のプラズマリアクタ内部は水壁によってガスが冷却される構造である。この初期型プラズマリアクタでは電極間を放電するロングアークプラズマでガスを分解処理する機構であった。この大気圧下で約 400mm の電極間にプラズマを放電させるためには高度な技術が要求され、これを実現することで処理対象ガスに直接プラズマを放電させ高効率の排ガス処理が可能となった。しかし一方で、放電している下流の電極に

において、プラズマが急冷される構造にはエネルギーロスをガスの分解処理に有効活用できる可能性を残していた。

新型プラズマリアクタでは電極間を約 350mm と僅かに短くした上で下部電極（陽極）の形状を円柱型からリング型に変更することで、従来の電極間におけるロングアークプラズマに加えて、下部電極の下流でトーチプラズマ（プラズマジェット）を発生させることを可能にした（図表 5）。これにより処理対象ガスはロングアークプラズマのエリアを通過した後、トーチプラズマのエリアを通過することになり、この 2 段階の分解処理を経ることで高効率の処理が可能となった。



図表 4 初期型リアクタ



図表 5 新型リアクタ

## 2. 開発経緯

### (1) 開発の背景

従来、半導体業界において PFC 等ガスが含まれるガスに対する排ガス処理装置は燃料を使って燃やす燃焼式かヒータによる加熱式が主流であった。燃焼式を使用するためには工場内に燃料を供給するため高額なガスラインの設置工事が必要であるだけでなく安全性の懸念がある。また加熱式ではヒータにより加温できる温度に限界があり、分解処理が可能なガスの種類が限られるという課題があった。他の排ガス処理方式として、減圧下で使用する減圧プラズマ式や一部の大気圧プラズマ式もあるが、減圧プラズマ式は装置のトラブル時に半導体製造装置へ悪影響を及ぼす懸念があり、大気圧プラズマ式は排ガス処理の能力（受け入れガス量、分解率）に課題があった。

このような中、当社では燃料ガスを必要とせず、電気で稼働が可能であり且つ、全ての PFC 等ガスを分解処理できるポテンシャルがある大気圧プラズマ式に着目し、多くの受け入れガス量を高い分解率で処理することを目標に開発を進めた。またプラズマによる効果的な排ガス処理が実現できると、加熱式と異なり予備加熱が不要となり、排ガス処理が必要な時だけプラズマを放電させるという省エネルギーな稼働が可能になるという点も本方式に着目した理由の一つである。

その後、誰もが挑戦しなかった大気圧下で数十 cm の電極間を安定的にプラズマ放電させるというロングアークプラズマ式の初期型プラズマリアクタを開発し、このプラズマリアクタを搭載した装置の市場展開を進めた。市場導入が進むにつれて顧客から能力（受け入れガス量、分解率）の向上に向けた要望が寄せられるようになり、従来装置では能力向上に向けた施策として投入電力を増やしてパワーアップさせるという方法を採用する事例が多いが、ほぼ同じ投入電力の中で能力向上を実現することを目的として新型プラズマリアクタの開発に至った。

### (2) 開発の経緯

2005 年～2006 年	初期型装置の開発
2007 年～	国内半導体工場に初期型評価機を納入
2008 年～	初期型装置の量産機納入開始
2013 年～2017 年	新型プラズマリアクタの開発
2018 年 3 月	第 1 号機納入

### (3) 共同開発

共同開発無し。

### (4) 技術導入

他者からの技術導入、特許買取・譲渡無し。

### 3. 独創性

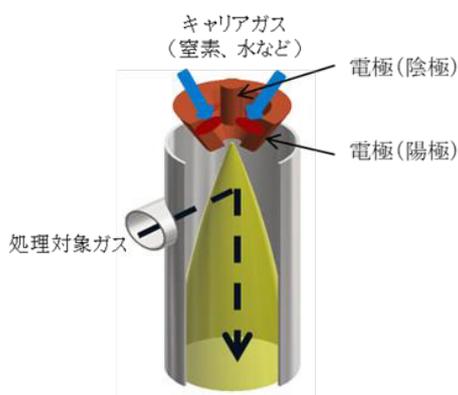
従来の排ガス処理に使用されている大気圧プラズマはほとんどがトーチ式である（図表 6）。トーチ式プラズマは数 mm 程度の短い電極間距離にプラズマを放電させ、そのプラズマを窒素や水蒸気などのキャリアガスで引き伸ばす方式である。多くの場合、このキャリアガスによって引き伸ばされたプラズマジェットを処理対象ガスに当てて分解処理を行うことになるが、高速で噴射されたプラズマジェットは流速が速く、また噴射部（電極部）からの距離と共にプラズマ温度は急激に低下する。そのためプラズマによって形成された高温部分における処理対象ガスの滞留時間は極めて短い。またこの方式では処理対象ガスだけでなくキャリアガスにもプラズマエネルギーが加えられることになりエネルギーロスも大きい。

一方、ロングアーク式（図表 7）は窒素や水蒸気のようなキャリアガスを必要としないため、プラズマエネルギーは処理対象ガスにのみ加えられるためにエネルギーロスが少ない。また処理対象ガスの流路に直にプラズマ放電させることができるため、トーチ式と比べて遥かに流速が遅く（滞留時間が長く）、且つ高温で分解処理を行うことができる。

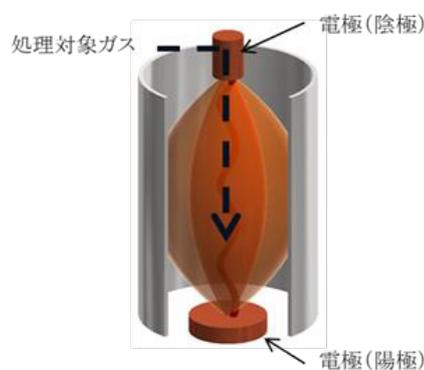
但し、大気圧下で長い距離の電極間にプラズマを放電させるロングアークプラズマを実現させることは容易でなく、特に重要となるのがプラズマの着火（放電）方法であった。通常、数十 cm の電極間にプラズマを放電させようとする、莫大な電力を加えて放電させることになるが、そうすると非常に大型で高出力のプラズマ用電源が必要になる。また異常放電など安全上の懸念もある。そのため高出力の電源でなくてもプラズマを着火させる方法として、着火用ワイヤーを用いる方法を考案した。これによって高出力のプラズマ電源を必要とせずスムーズなプラズマの着火が可能となった。

さらに新型のプラズマリアクタにおいてはロングアークプラズマの下流で同時にトーチプラズマ（プラズマジェット）を発生させることに成功し、処理対象ガスの 2 段階での分解処理を実現した。しかもこのトーチプラズマは処理対象ガスにより発生させるためキャリアガスは不要である。

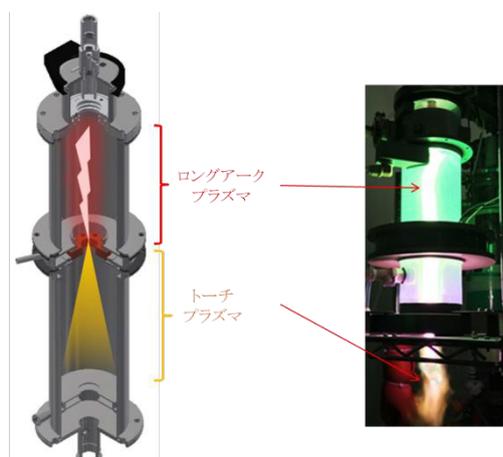
本来、プラズマリアクタはセラミック製の反応管と金属製の容器に覆われており内部のプラズマ放電は見えないが、内部状況を可視化するために反応管を石英管、容器を透明 PVC にて製作したプラズマリアクタが図表 8 の写真である。ロングアークプラズマの下流にトーチプラズマ（プラズマジェット）が発生している状況を見ることができる。



図表 6 トーチ式プラズマ



図表 7 ロングアーク式プラズマ



図表 8 新型プラズマリアクタ内部のロングアークプラズマとトーチプラズマ

#### 4. 特許の有無

次のとおり、特許 3 件を取得済み。

特許番号：第 4588726 号 / 名称：排ガス処理装置

特許番号：第 5236357 号 / 名称：プラズマ処理装置

特許番号：第 5844124 号 / 名称：排ガス処理装置の起動方法

#### 5. 性能

##### (1) エネルギー効率

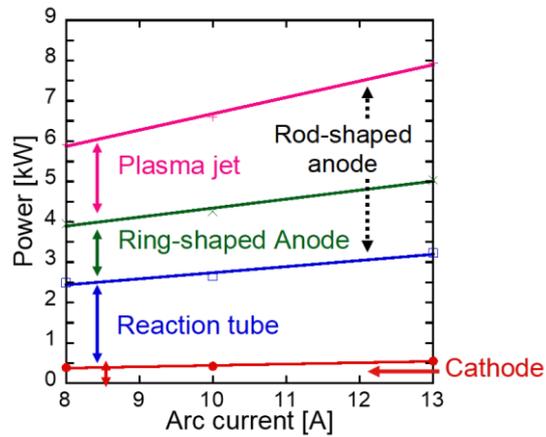
初期型プラズマリアクタと比較して新型プラズマリアクタのエネルギー効率がどれほど改善されているかを計測するため、九州大学 大学院 工学研究院 化学工学部門 渡辺研究室において熱収支の計測を行った。

プラズマ放電に伴い各部の冷却後の冷却水温度が上昇し、投入した電力の一部が冷却水によって熱損失となる。そこで各部での冷却水の冷却前後の温度差から、各部で生じた熱損失量を算出した。図表 9 は上限（ピンク色の線）が投入した電力を示しており、図中の下部から、陰極で生じた熱損失量、反応管で生じた熱損失量、陽極で生じた熱損失量を示している。また、投入した電力から各部での熱損失を差し引いたエネルギーがプラズマジェットの有するエネルギー量を示している。新型プラズマリアクタで採用したリング型陽極では陽極下流でプラズマジェットが生成し、初期型プラズマリアクタの円柱型陽極で損失していたエネルギーの約 60% をプラズマジェットとして噴出していることが分かった。

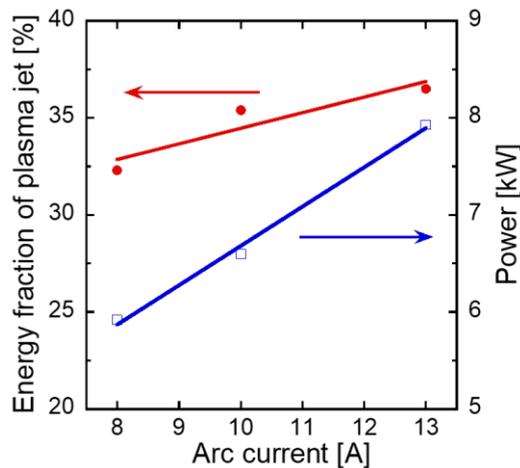
また各部での熱損失量を用いて下式から投入電力に対するプラズマジェットが有するエネルギーの割合を算出した。

$$\eta = \frac{P - \varepsilon_{cathode} - \varepsilon_{anode} - \varepsilon_{tube}}{P}$$

ここで、 $\eta$  はプラズマジェットが有するエネルギーの割合、 $P$  は電力[kW]、 $\varepsilon$  は熱損失[kW]を示し、下付きは各部位を示す。図表 10 が投入電力に対するプラズマジェットが有するエネルギーの割合である。



図表 9 陰極、反応管、陽極で生じる熱損失



図表 10 投入電力に対するプラズマジェットの有するエネルギー割合

初期型プラズマリアクタでは熱損失として活用できていなかった投入電力の 30~40%のエネルギーを新型プラズマリアクタでは陽極下流にプラズマジェットとして活用できている。なお、この熱収支の計測は日本機械学会学術誌 (Bulletin of JSME) Vol. 13, No. 4, 2018 にも発行された。

## (2) 処理性能

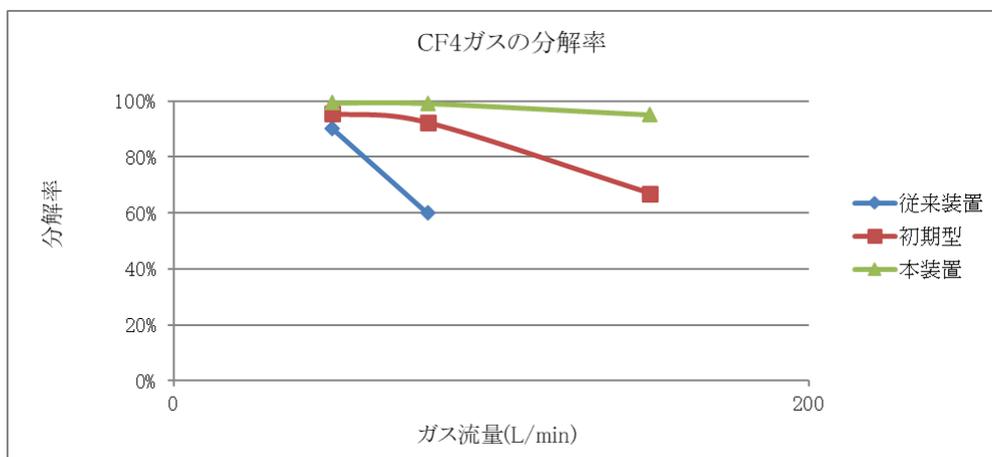
従来のプラズマを使用した排ガス処理装置では消費電力が 10kW クラスの装置において、 $\text{CF}_4$  ガスを 90%以上分解できるガス流量は総流量として 50L/min 程度である。装置によってはプラズマリアクタの後段にファンを搭載し、ファンの吸引力で大気を引き込み装置内で希釈した上でガスを排出する装置もある。このような装置では装置の入口ガス濃度と装置の出口ガス濃度の比較を装置での分解率として掲げていることもあるが、それでも  $\text{CF}_4$  ガスを含む総流量 100L/min 程度のガスで  $\text{CF}_4$  ガスの分解率は 90%程度の装置が多く、プラズマリアクタでの純然たる分解率としてはこれよりかなり低い分解率に留まっている。窒素で 1%(10,000ppm)に希釈した  $\text{CF}_4$  ガスを装置に流入させ、希釈されない後段洗浄塔直後の濃度を計測して初期型プラズ

マリアクタと新型プラズマリアクタの分解率比較では初期型プラズマリアクタにおいても従来装置と比較すると高い分解率となっているが、新型プラズマリアクタでは更に高い分解率となっている。また受け入れガス量での比較では、同程度の分解率を基準とすると2倍以上の向上が見られる。図表 11 に分解率のデータ比較を示す。

また本装置の主要ターゲットとする半導体製造装置からの排気ガスに対する処理能力として、本装置に流入するガスの総流量がおおよそ 200L/min の条件において、半導体製造装置（ドライエッチャー）から排出される  $CF_4$ 、 $SF_6$ 、 $CHF_3$ 、 $CH_2F_2$ 、 $Cl_2$ 、 $HBr$  が本装置に流入した時の分解率のデータを採取している。最も難分解性である  $CF_4$  においては現地で装置の条件振りの中で分解率(DRE)98%を超える状況も見られ、その他のガスでも 99%近辺の分解率であることが確認された。

### (3) 耐久性・安全性

初期型プラズマリアクタを搭載した装置の量産機からは装置内に圧力計や温度計などの各種センサー類を備えており、装置内で異常が無いが常時監視しているとともに、プラズマ放電時の電流値や電圧値も監視しており、異常を検出すると自動で停止する。装置の正面にはタッチパネルが設置されており、装置の状態や各種センサー類の値を容易に確認できる。また顧客である大手半導体工場では EES (Equipment Engineering System) が採用されていることが多く、本装置もこれに対応して装置の稼働状況やセンサー類の数値データなどを工場側に出力して傾向管理などが行える。



図表 11  $CF_4$ ガスの分解率比較

#### (4) 運転・操作性

本装置の稼働は運転ボタンを押すだけで装置内に異常が無いことを条件に自動運転が開始されるシステムになっている。そのため、装置の使用者に高い技術や知識、経験を要求しない。

#### (5) 維持管理性

主な消耗部品はプラズマリアクタ内の電極であるが、その消耗具合はプラズマ放電中の電圧値で把握することができる。電極の消耗が進むと最終的には電極を交換する必要があるが、その際にはプラズマリアクタ自体を交換し、取り外したプラズマリアクタは当社でオーバーホールを行う運用となっている。そのため短時間で容易に装置の再稼働が可能である。

### 6. 経済性

図表 12 に経済性の比較を示す。新型プラズマリアクタを導入した本装置の用力は初期型から変更は無い。装置構成上、インシヤルコストは定価ベースで 20%ほど高い設定とせざるを得ないが、処理能力の向上に伴い受け入れガス量が初期型と比べて 2 倍ほどになっている。

受け入れガス量の増大に伴い、顧客の設備導入台数を減らすことができるため大きな経済性が見込める。単純計算では導入台数を半減させることができ、インシヤルコストの上昇を考慮しても 40%ほどの設備導入費用削減に繋がる。

### 7. 将来性

半導体業界では最先端のプロセスで更なる微細化やウエハサイズの大口径化などで従来と比べより多くのガスが排出されることも想定される。排ガスを処理する設備の導入台数を最小化できることは顧客の設備導入費用の削減だけでなく消費電力の低減など環境負荷の低減に大きく寄与する。また国の違いや各顧客によって排ガス処理装置に要求される PFC 等ガスの分解率基準は異なる。国内では CF<sub>4</sub> ガスの分解率基準は 90%以上、その他ガスで 95%以上という事例が多いが、分解率が 99%近くを達成する装置が広く普及すると温室効果ガスの排出抑制に大きな効果が期待できる。これらの観点からも本装置の更なる市場展開が期待される。

図表 12 経済性の比較表

項目		初期型(シングルタイプ)	本装置(シングルタイプ)	従来比
インシヤルコスト(初期型を100として)		100	120	120%
用力	消費電力	10~12kW	10~12kW	同等
	使用水量	8~16L/min	8~16L/min	同等
	DC電源用冷却水量	8~10L/min	8~10L/min	同等
	窒素量	20~30L/min	20~30L/min	同等
受け入れガス量		50~100L/min	50~200L/min	200%