

中小企業庁長官賞

「ヒータ式排ガス処理装置」

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、持続可能な社会を実現するための開発目標(SDGs)が叫ばれはじめ、あらゆる産業分野で地球環境に配慮した商品開発が求められている。半導体業界も例外ではなく、半導体製造過程のさまざまなプロセスにおいて、環境負荷の低い素材の使用、省エネ稼働する装置の開発が求められている。

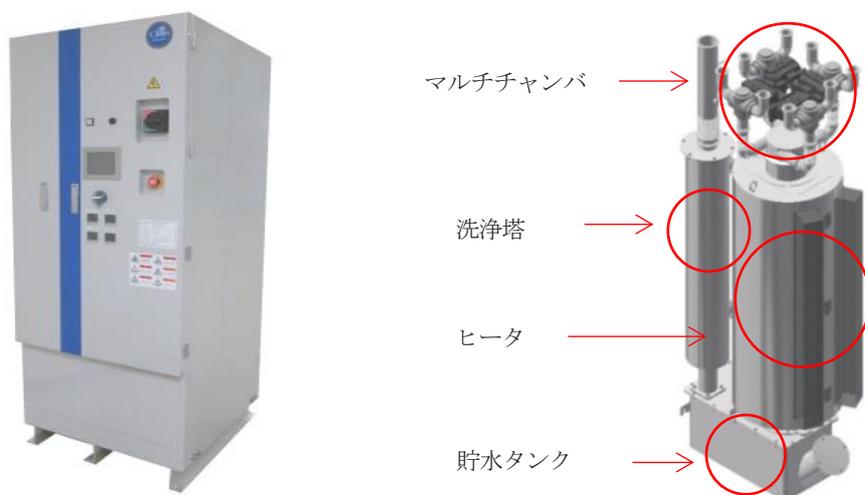
半導体の排ガス処理装置は、半導体製造過程の中でも主にCVD工程やエッチング工程で排出される排ガスを処理することを目的としている。CVD工程においては、デポジットガスとしてシラン(SiH_4)、ホスフィン(PH_3)等が用いられ、クリーニングガスとして三フッ化窒素(NF_3)、八フッ化プロパン(C_3F_8)等が用いられる。エッチング工程では、塩素(Cl_2)や臭化水素(HBr)などのハロゲンガス、またクリーニングガスとして四フッ化メタン(CF_4)、六フッ化硫黄(SF_6)等が用いられる。これら排ガスには、人体に有害なもの(可燃性ガス、ハロゲンガス)から、地球温暖化係数が高いもの(PFCガス)まで、物性的に様々なものがあり、これらを一度に処理するには熱分解処理を行うのが最も効果的である。従来、熱分解処理を行う排ガス処理装置としては、燃料ガスを用いるバーナ燃焼式が一般的であったが、環境負荷を考慮して近年は電熱ヒータ式が主流になりつつある。本装置は従来のヒータ式排ガス処理装置において常識として考えられたことを、弊社独自の発想で覆し今までにない究極のエネルギー効率を実現した、環境に配慮した新たなヒータ式排ガス処理装置である。

(2) 本装置の構成と原理

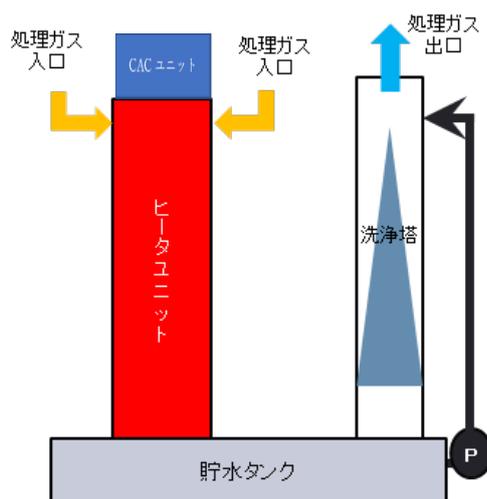
本装置は SiH_4 ガスやPFCガスをまず電熱ヒータで熱分解し、副生成物として出てくるフッ化水素(HF)や粉体(二酸化ケイ素 $[\text{SiO}_2]$)を後段の水洗浄塔で洗浄除去する構成となっている(図表1)。半導体製造工程で排出される有害ガスには、これら可燃性ガスやPFCガス以外にもハロゲンガス(Cl_2 、 HBr 、三塩化ホウ素 $[\text{BCl}_3]$)等があり、さらに前段製造装置で発生した粉体も含まれる。これらも後段の洗浄塔にて処理される。ガスの導入部にはマルチチャンバが設置され、そこで前段装置の各チャンバからくるガスが混合されて反応炉に流入する。また、ヒータと洗浄塔の下部には貯水タンクがあり、ここで粉体が捕集される。

従来のヒータ式排ガス処理装置は前段に洗浄塔があり、前段洗浄塔-ヒータ-後段洗浄塔の構成が一般的である(図表2)。前段に洗浄塔を設置することによって、前段装置から流れ込む粉体の除去とヒータでのガス分解に必要な水分を供給することができる。ただ、逆にこの前段

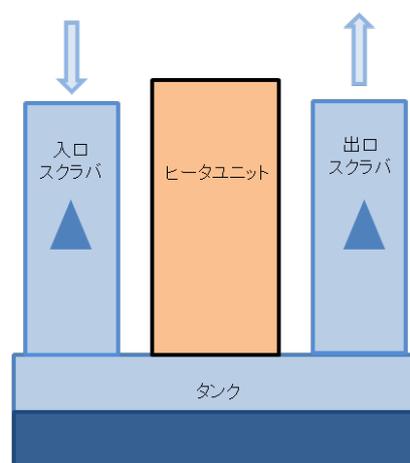
洗浄塔が粉体を作り出してしまいうこともあり、その対応として、配管にヒータジャケットを巻く必要が生じることもあった。本装置はヒータの上部に弊社独自技術である CAC(Clean Technology Anti-corrosion)ユニットが設置されている。これは一種の水供給ユニットで、ここから必要なときに必要なだけの水分を供給することができる。またこのCACユニットはマルチチャンバ部に設置されているので、ヒータからの余熱を有するマルチチャンバ部で、ガスの混合と水の蒸発を同時に行うことで、ここが予備反応炉の形で機能する。これにより本装置は前段洗浄塔を必要とせず、洗浄塔からヒータユニットへの配管を無くすことができるので、この配管部にヒータジャケットを巻く必要もなく、更なる消費電力削減が可能となる。



フロー図



図表 1 本装置の外観、構成部品、フロー



図表2 一般的なヒータ式排ガス処理装置のフロー

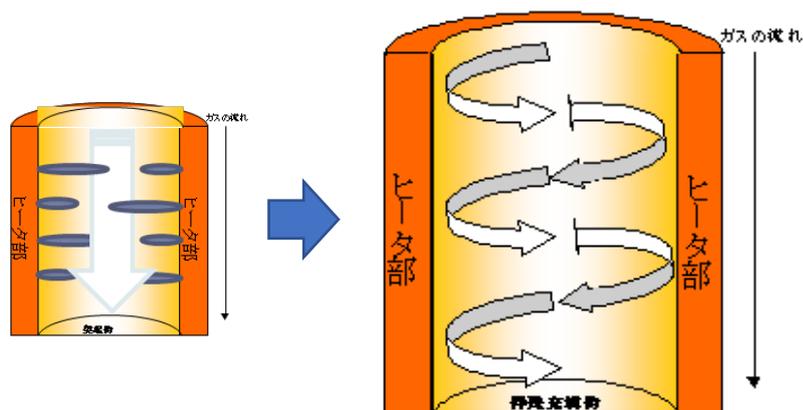
(3) ヒータユニットの特徴

本装置は発熱部であるヒータに直接ガスを当てる直接加熱方式ではなく、ヒータと処理ガスが直接接触することがない間接加熱方式を採用している。これは腐食性ガスによってヒータ自身が損傷することや、流入してくる粉体によってヒータ表面が覆われ、性能が著しく低下することを防ぐことが第一の目的である。また、直接加熱方式のヒータ式排ガス処理装置においては、ガスに熱を効率的に伝えるために、ガスの滞留時間を長く保つべくガスの流速を遅くする設計になっている。ただし、反応炉内に一定の温度ムラを生じることは避けられない。

これに対して我々は敢えてガスの流速を速くすることで、反応炉内の温度を均一化し、熱伝導率を上げようと考えた。あらゆる加熱炉の反応容器の内部には、「不働態層」と呼ばれるガスが澱みのように固定化して、結果として伝熱を妨げるように働く空気層が存在する。当初は反応炉内に突起物を設け、表面積を拡張することで熱交換率をあげることを試みたが、その後、ガスを炉内に旋回流で投入して、炉内にガスがスパイラル状に流れるよう工夫することで、この不働態層を強制的に動かし攪拌させ、熱伝導効率を高め、炉内の温度均一化に成功した。これをスパイラル機構と呼んでいる(図表3)。スパイラルをより効率化するために、炉内に特殊充填物を設置し、ガスの反応流路を最適化するための工夫がなされている。これらの工夫によって、ヒータ熱のガスへの伝熱という点において、究極の効率化を実現し、低い運転エネルギーでのガス処理が可能となった。

この特徴的な構造に加え、ヒータ上部には弊社独自のCACユニットが設置されている。これにより更なる反応の効率化、配管腐食の抑制を行っている。従来のヒータ前段に洗浄塔があるタイプの装置では、ヒータに流入する水分量を制御することが難しい。この方式であれば、必要なときに必要なだけの水分を供給することができるため、ヒータに余分な負荷をかけることがない。このCACユニットに関してはすでに特許を取得している。

上記、スパイラル機構及びCACユニットが弊社ヒータ式排ガス処理装置の大きな特徴である。その後も様々な工夫を重ねて効率化を図ることで、ヒータの常用温度を高め、今まではヒータ式での分解処理が難しかったガスまでも処理が可能となった。



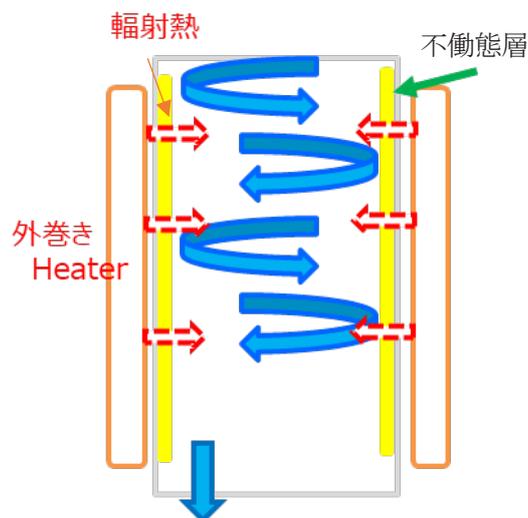
図表 3 スパイラル機構

2. 開発経緯

本装置はその開発当初から、間接加熱ということを最大のテーマとした。常識的には、間接加熱はガスが直接ヒータに触れないのだから、熱伝導的に不利になると考えるのが普通である。ただ、直接加熱方式はヒータの近傍での熱伝導は良くても、反応炉内に必ず一定の温度ムラが生じ、温度が低いところからガスがすり抜けてしまう。我々は、間接加熱では炉内に熱源がないというデメリットを逆手にとって、構造最適化によって炉内の温度を均一化し、低温部でのガスのすり抜けを防ぎ、熱効率を上げることができるのではないかと考えた。最初期のヒータのみの方式は、炉内に突起物を多く設け、炉壁の表面積をできるだけ広くし、ガスに乱流を起こさせることで炉内を攪拌し、温度均一化を試みた。この当時はヒータ式での主な処理対象ガスは可燃性ガスのシラン (SiH_4) 等であったので、この方式でも十分有用であった。

しかし、時代の変化に伴いヒータ式で処理すべきガスの種類が増え、PFC ガスのような比較的難分解性のガスも処理する必要が生じてきた。その場合、上記ヒータのみでは対応ができなかった。また PFC ガスが分解すると副生成物としてフッ化水素 (HF) が発生するため、水洗浄塔でこれを取り除く必要も生じた。そこで後段に洗浄塔を取り付けたタイプの開発に着手した。この時にガスの熱伝導率を高めるための新たな方法として、ガスを旋回流で速い流速で炉内に流すスパイラル機構を見出した。この機構により、炉内に生じる不働態層を薄くできることが分かり、熱交換効率が飛躍的に向上した。

さらに、反応に必要な水分を供給することと、炉内の腐食を抑えることを目的にヒータ上部に設置する水添加ユニットである CAC システムを開発した。この方法により、前段に水洗浄塔を設ける必要がなくなり、必要な水分を必要だけ供給できるようになり、ヒータのエネルギーロスを大幅に減らすことができた。その後、反応炉内のさらなる構造最適化を進め、今までのヒータ式では処理が難しかった難分解性のガスまで処理可能となり、ヒータ式排ガス処理装置の可能性を押し広げることに成功した(図表 4)。



図表 5 反応炉内の構造

$$C_A(t) = C_{A0} \exp(-kt)$$

$C_A(t)$: t秒後の濃度 C_{A0} : 初期濃度 t : 時間 (秒)

反応後の濃度 C_A を低くするためにできるだけ反応時間 t を長くとるために、ガスの流速を遅くしようとするのが一般的だが、開発にあたって敢えてガス流速を早くすることで熱交換率の向上ができないかと考えた。その発想のもとになったのは反応炉内にできる不働態層の存在である。この不働態層という空気の断熱層はヒータ方式、プラズマ方式、バーナー燃焼方式等、熱による排ガス処理を行う装置には必ず存在し、その状態は消費電力に大きく影響する。反応を効率化するためには、単純に温度を上げれば良いのではなく、いかにこの不働態層を薄く制御することが出来るかがポイントとなる。様々な試験を行った結果、線速を一定以上に上げることで、実際にガスの分解効率が向上することを見出した。さらにこのガスの流し方をスパイラル状にすることで、ガスが炉内全体に行き渡る形となり、反応炉内の温度均一化が実現できたほか、処理対象ガスの流量が変化した場合でも偏流が生じず安定した性能を発揮することを見出した。

また、PFC ガス対応の初期の装置には、我々が想定していたよりも配管腐食が激しいという問題があった。そこで、水分を上部からヒータ部に直接供給し F 分をフッ素 (F_2) ではなく、フッ化水素 (HF) にすることで配管腐食を抑えられないかと考え開発したのが弊社独自の水供給ユニット CAC (Clean Technology Anti-Corrosion) システムである。本システム開発の結果、配管腐食抑制の効果が認められたため特許出願している。

その後、我々はこのシステムを更に発展させ、反応に必要な水分も供給すること、また必要な時だけ水分供給を行い、必要でないときは止めることでヒータ負荷を下げることを実現した。さらにこの水分の供給の仕方も工夫し、ガスの旋回流に上手く乗るように内部構造とのマッチングも図った。この CAC システムもスパイラル機構同様、従来にはなかった発想により実現したものである。ヒータ部分に直接水を入れるとヒータに負荷がかかるため、一般的には避けられるが、実際には前段に水洗浄塔がある場合はヒータ部に水分が結果として流れ込んでくる。

しかも、ガスの流れがある限り常に流れ込んでくる。水供給ユニットにすることで、必要な時に必要なだけ流すことができ、大幅なエネルギー削減を実現した。

4. 特許の有無

次のとおり、特許1件を取得済み。

特許番号：第4340522号 / 名称：フッ素化合物を含有する排ガスの処理方法及び処理装置

5. 性能

(1) エネルギー効率

本装置の最大の特徴は熱交換効率が高いことによる消費電力の低さである。同じ条件のガスを処理するときの消費電力は従来装置の約半分まで済む(図表6)。

(2) 処理性能

本装置はスパイラル機構により、熱交換効率を最大限高めたことにより、今までのヒータ式では処理が困難であったガスまで処理が可能となった。その一例として一酸化二窒素(N_2O)ガスの従来装置との処理性能比較を図表7に示す。排ガスは物質により分解のしやすさに違いがあり、ヒータ式の装置で対応できないガスはプラズマ式かバーナ式で対応するのが一般的であった(図表4)。本装置は、ヒータ式排ガス処理装置の適用範囲を押し広げることに成功し、従来のヒータ式排ガス処理装置で対応可能であったガス(NH_3 、 SiH_4 、 NF_3 等)も全く問題なく処理することができる。

(3) 耐久性・安全性、運転・操作性、維持管理性

本装置は、間接加熱方式を採用しているため、処理ガスがヒータ線に直接触れることがなく、ヒータはほぼ半永久的に使えるほどの優れた耐久性を持つ。また、従来のバーナ式のように燃料を使用しないので爆発の危険もなく、プラズマ式のような高電圧を使うこともないため、極めて安全に使用することができる。装置は前面に取り付けられた操作パネルにてタッチ操作で簡単に操作可能である。また、PLCには外部出力のEthernet端子を有し、工場全体の中央監視システム(CMS)に繋ぐことで、リアルタイムで運転状況をモニタリングすることができ、維持管理性にも優れる。

図表6 処理風量150L/min時の消費電力比較

	本装置消費電力(kW)	従来装置消費電力(kW)
Single仕様	6.5	12.5
Dual仕様	6×2ユニット	—

図表7 本装置と従来装置の N_2O 除害性能比較

	本装置	従来装置
N_2O 除害効率(%)	92~99%	70~92%

6. 経済性

本装置は、熱交換効率を極限まで高め、 N_2O 等の難分解性ガスにまで対応でき、しかも消費電力を従来装置に比べて48%低減することができる。また、導入CDA(エア)量も半分まで下げることができるため、ランニングコストが従来製品に比べ、約半分となる。

7. 将来性

半導体業界においては今後も更なる微細化やウエハサイズの大口径化が進み、プロセスの排出ガス量はますます増えることが予想され、さらに分解効率としても従来は90%でよかったものが95%、さらに99%までといった方向に進みつつある。この状況の中で排ガス処理装置に今まで以上の高性能が求められるのは必至である。それと同時に、顧客の設備費導入費用の削減、用力費用の削減に対する要請も益々高まっており、本装置のような独自の発想によるユニークな装置の存在は、業界において益々重要になってくると考える。現に、まだ本格的な市場展開には至っていないが、処理風量を従来 1.7 倍にまで高めた新たな装置の開発も行っている。今後、当社ヒータ式排ガス処理装置の更なる市場展開が期待される。