

平成28年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「半導体製造プロセス向け次世代流量制御ユニットの開発」

研究開発成果等報告書

平成29年5月

担 当 局	近畿経済産業局
補助事業者	一般財団法人金属系材料研究開発センター

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 【1. 1】 制御弁の小型化
- 【1. 2】 オリフィス組込み方法の開発
- 【1. 3】 応答時間の高速化
- 【1. 4】 小型電気制御基板の設計製作
- 【1. 5】 流量制御器としての性能検証
- 【2. 1】 ガスの到達時間を計測する評価設備立ち上げ
- 【2. 2】 次世代ガス制御ユニットの設計製作
- 【2. 3】 ガスの到達時間の実証試験

第3章 全体総括

- 3-1 補助事業の成果
- 3-2 補助事業の成果に係る事業化展開について

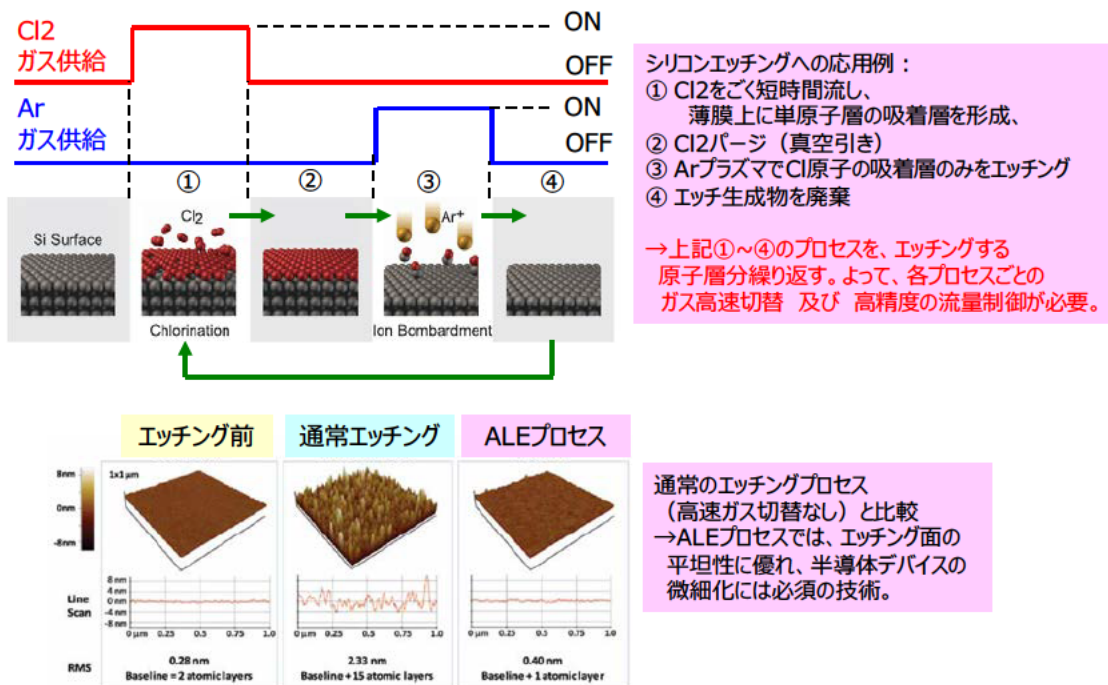
第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

半導体デバイスの高集積化・高機能化・低コスト化を達成するため、デザインルールのさらなる微細化・三次元化 及び ウエハ基板の大口径化が進んでいる。製造プロセスにおいては超高精度加工が可能な技術として、原子層レベルでのエッチングや成膜技術が注目されてきた。しかし、それらのプロセスは加工精度が極めて高いものの、一度の工程での加工量が少なく、処理速度（スループット）の改善が課題であった。

具体的な例として図1-1に示す「Atomic Layer Etch（通称 ALE）」プロセスを見ると、シリコンウエハ表面の原子1層をエッチングするために①→②→③→④とプロセスチャンバ内でのガスの置換が必要である。このサイクルを短縮するためにはチャンバ内でのガスの高精度・高速置換が必要であり、原子層プロセスの最大の課題となっている。



KEREN J. KANARIK他, "Moving atomic layer etch from lab to fab"
Solid State Technology December 2013 より抜粋・加筆

図1-1：ALEプロセス例

原子層加工プロセスの生産性向上のために、チャンバ装置メーカーからガス供給装置メーカーに求められているニーズは、流量制御器の高精度・高速応答性能の向上と、流量制御ユニットの小型化に集約できる。

【流量制御器の高精度・高速応答性能】

ガス流量の高精度化には、流量制御器の流量設定信号に対する、①ガス導入時の高速立ち上がり、②ガス流量変更時や③ガス停止時の高速立ち下がり性能向上、すなわちパルス化が求められる。（詳細後述）

【流量制御ユニットの小型化】

現在のガス供給ユニットはサイズと重量が大きく、チャンバ装置に直接搭載できない。このためユニットと装置間に2~3mの配管が必要で、チャンバ内ガス高速置換の障害となっている。流量制御器を含むガスユニット全体を小型化し配管容量を極小化する必要がある。

半導体製造プロセスにおけるガス供給技術は、古くから熱式流量制御器（MFC：マスフローコントローラ）が普及しているが、原理的に制御性（流量応答性や流量再現性）などが悪い。フジキンは独自に高精度な圧力制御方式を製品化（FCS-P）し、世界のシェアを拡大している。

さらに、必要なガスを、必要なときに必要な量だけ供給できる「水道方式」の技術（FCS-W）を保有している。今回の計画はその水道方式技術を更に発展させ、ガス供給の短パルス化技術として確立することにより、原子層加工プロセスの生産性向上に資するものである。

（1）従来技術

従来技術では、サーマルセンサ方式の流量制御器（マスフローコントローラ、以下MFC）及び2対のON/OFF弁により構成される「ラン/ベント方式」が代表的な例として挙げられる。「ラン/ベント方式」では、プロセス開始に合わせてベントラインからプロセスラインにバルブ開閉を切り替えることで、プロセスチャンバ内に目的のガスを供給する。本方式では、2対のバルブ開閉の切替を高速応答化することで、ガスの高速切替えが可能である半面、下記のデメリットを有しており、ALEに代表される次世代エッチングプロセスには適用が困難といえる。

- ◆MFCは流体の熱移動により流量を検出・制御していることから、流量変更時の過渡応答が遅く、過渡応答の再現バラツキも大きい。
- ◆ラン/ベント方式のガス供給システムは、MFCと2対のON/OFF弁とがそれぞれ別々のコンポーネントで構成されるため、システム全体が大型化。
- ◆ラン/ベント方式では、プロセスチャンバにガスを供給しない場合においても、ベントライン側にガスを捨て続ける必要があり、無駄なガス消費が多くコスト高となる。

フジキンは独自技術として圧力制御式の流量コントローラ（FCS-P）を開発・製品化している（図1-2）。本技術は、制御弁・圧力センサ・オリフィスの組み合わせにより、オリフィス上流側の圧力を制御し、サーマルセンサ方式と比べ、高精度且つ高速応答での流量制御が可能である。

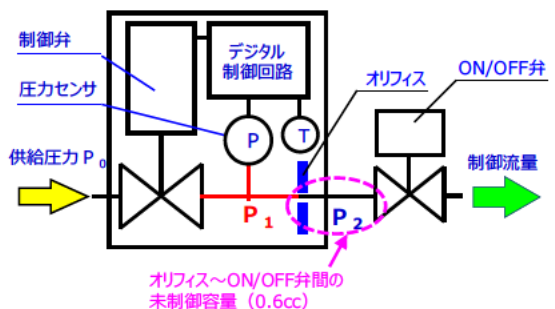


図1-2：FCS-P パーツ構成

（2）フジキンの現状技術 【水道方式技術】

上記の技術を更に発展させ、フジキンでは「水道方式」のガス供給用として、新たな圧力制御式の流量コントローラ（FCS-W）技術を開発している（図1-3）。「水道方式」とは、流量制御器に常時、流量設定信号を入力した状態で、下流に配置のON/OFF弁の開閉操作のみでガス供給・停止する方式であり、必要なときに必要な量だけガスを供給することが可能である。同時

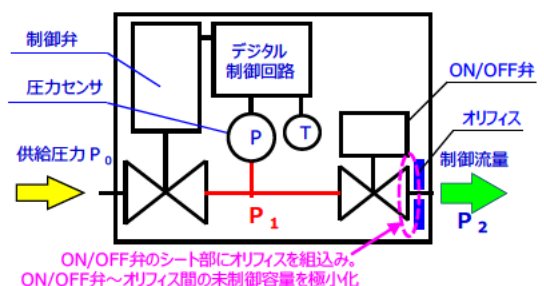


図1-3：FCS-W パーツ構成

に、制御弁のコントロールによりガス流量を精密に保つ、あるいは変更することが可能である。この方式は、原理的に応答性が悪いMFCでは実現不可能であり、「水道方式」は圧力制御式の流量コントローラであるFCS-Pならではの技術といえる。

(3) 新技術 【短パルス化技術】

前述の通り、次世代の原子層加工プロセスの実用化のためには、チャンバ内でのガス的高速高精度切替が求められている。その実現のためにはまず、チャンバにガスを高精度に供給する必要がある。すなわち、次ページ図1-4に示す①ガス導入②ガス流量変更③ガス停止の信号に対して応答の遅滞なくガス供給流量をパルス状に制御できること。また、供給流量が遅滞なくチャンバ内ガス濃度に反映されるよう、ガス供給ユニットとチャンバ間の配管容量を極小にしなければならない。今回の計画においてフジキンは独自の「水道方式」技術を基に、流路構造などの最適化により応答時間を短縮してガスのパルス供給を可能とする新たな圧力制御式の超小型流量制御器（FCS-W-Note）技術の開発を行う。更に各構成要素の高集積化によりユニットを小型化し、チャンバ直近への設置を可能とすることにより、次世代プロセスの実現に貢献する。

1-1-2 研究目的 及び 目標

本研究開発は、「中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針」の中の、下記の事項に相当する。

(四) 製造環境に係る技術に関する事項

1. 製造環境に係る技術において達成すべき高度化目標

(4) 川下分野特有の事項

4) その他の川下分野に関する事項

b. 情報家電分野に関する事項

①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

ア. 超クリーン成膜の実現

チャンバ内でのガス的高速高精度切替を実現するには、流量制御器の応答性向上と流量制御ユニットの小型化が必要である。

本研究開発では、上記「流量制御器の応答性向上」及び「流量制御ユニットの小型化」を行い、ガス供給の指令信号に対して、チャンバ内のガス濃度が正確に追従することで、ガス供給流量の高精度・高速切替（パルス供給）を実現する。

(1) 流量制御器の応答高速化

チャンバ内のガス切替は、プロセスによって様々なパターンを要求される。流量や ON/OFF 間隔の設定、あるいは途中での流量変更設定などである。それらのパターンにおけるガス供給応答性は、次ページ図1-4に示す①ガス導入②ガス流量変更③ガス停止の設定信号（黒線）に対する実際のガス供給流量（赤線）の遅延で表される。この①における「立ち上がり」や②③の「立ち下がり」が速い程、応答時間が短く、応答性が良い。応答性が良ければ、次ページ図1-5のチャンバ内ガス濃度の遅延⑤⑦⑨が少なくなる。次項目の小型化を実現しながら、如何にこの高速応答性を確保するか、すなわちパルス供給を実現するかが課題である。

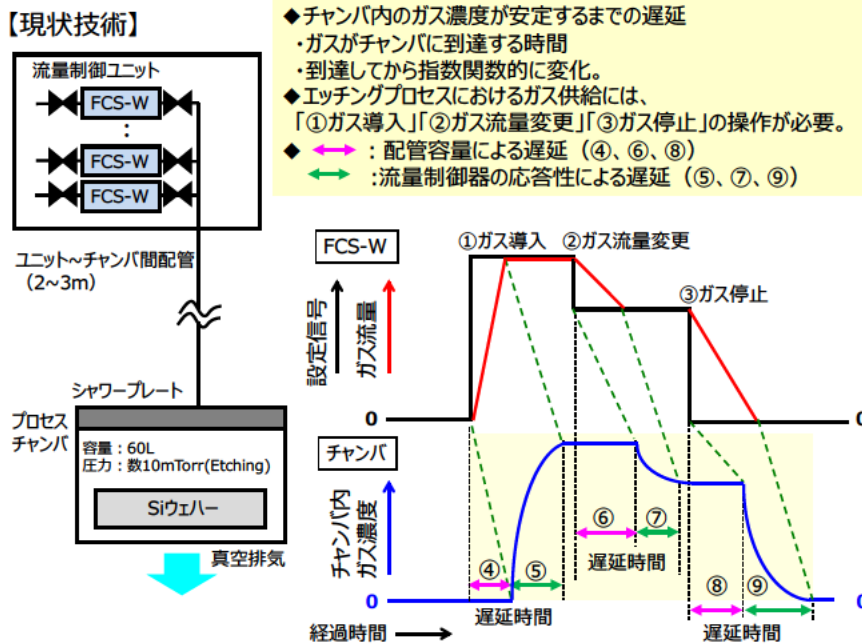


図1-4：現状技術によるチャンバ内ガス供給

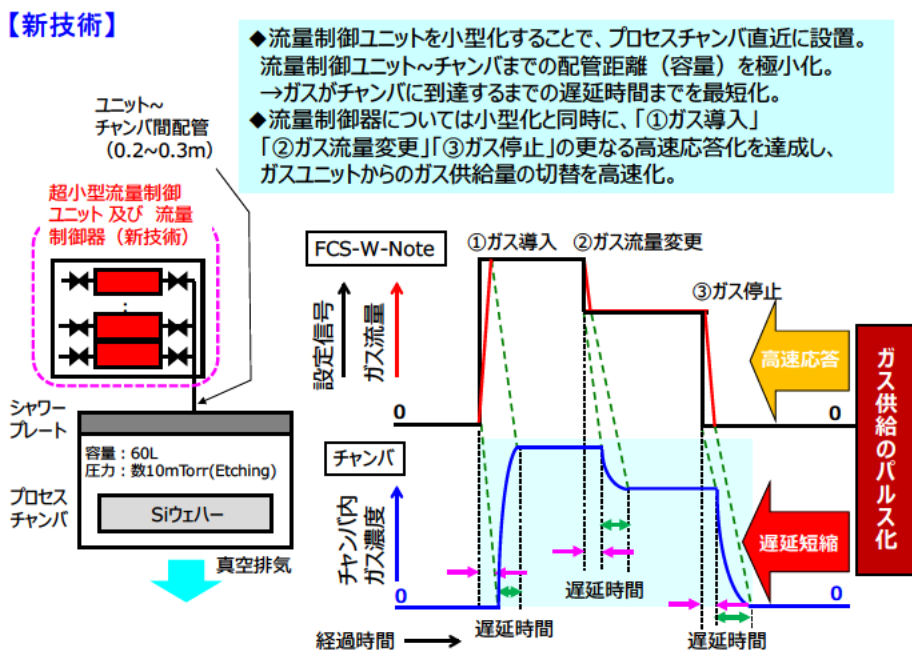


図1-5：新技術によるチャンバ内ガス供給

(2) ガス供給ユニットの小型化軽量化

現状のガス供給ユニットはサイズが大きく重量もあるため、チャンバから離して設置する必要がある。そのためガス供給ユニットとチャンバ間に配管容量があり、チャンバへのガス到達が遅延し、チャンバ内ガス濃度の遅延原因④⑥⑧となっている。遅延時間を短縮し、ガス供給をパルス化するためにはガス供給ユニットの小型軽量化が必要である。そのためには流量制御器自体を小型軽量化しなければならない。流量制御器の小型化と性能向上の両立を図るのがガス供給系の最大の課題と言える。

1-2 研究体制

1-2-1 管理員及び研究員

【事業管理機関】 ※管理員のみ

一般財団法人金属系材料研究開発センター

氏名	所属・役職
岡久 拓司	産学官連携グループ 主席研究員

【法認定中小企業】 ※研究員のみ

株式会社 フジキン

氏名	所属・役職	備考
西野 功二	大阪ハイテック研究創造開発センター 執行役員	統括研究代表者 (PL)
平田 薫	大阪ハイテック研究創造開発センター 主事	副統括研究代表者 (SL)
杉田 勝幸	大阪ハイテック研究創造開発センター 主席	
澤田 洋平	大阪ハイテック研究創造開発センター 主位	
滝本 昌彦	大阪ハイテック研究創造開発センター 主位	

【アドバイザー】

国立大学法人東北大学

氏名	所属・役職
白井 泰雪	東北大学未来科学技術共同研究センター 特任教授

1-2-2 実施場所

① 事業管理機関

一般財団法人金属系材料研究開発センター

(最寄り駅：JR 東海道線・JR 山手線 新橋駅)

〒105-0003 東京都港区西新橋 1 丁目 5 番 1 1 号

② 研究実施場所

株式会社フジキン 大阪ハイテック研究創造開発センター

(最寄り駅：ニュートラム ポートタウン東駅)

〒559-0031 大阪府大阪市住之江区南港東 8 丁目 2 番 2 9 号

1-3 成果概要

委託業務期間（H27年度～H28年度）における 研究開発の目標と内容	達成状況
<p>【1】水道方式機能を有する超小型流量制御器の開発</p>	
<p>【1. 1】制御弁の小型化 川下ユーザーの要求仕様である最大制御流量（1300sccm）により算出されたCv値（※注1）を目標値（Cv=0.0026）として設定するとともに、制御弁の幅10mm以下を目標とする。流体解析シミュレーションによるボディ部流路の最適化・試作評価を行い、Cv値0.0026以上を達成する。</p>	<p>達成率：100% 左記の目標値を踏まえて、制御弁の設計及び超小型流量制御器の試作を実施完了。試作品の評価にて、Cv値0.0026以上の達成を確認。</p>
<p>【1. 2】オリフィス組込み方法の開発 外部リーク量及びシートリーク量を、ヘリウムリークディテクタの検出限界である1×10^{-10}Pa・m³/sec以下とし、それを実現するオリフィス組込み方法の開発を行う。応力解析シミュレーションにより、オリフィス組込みに必要な最適形状、寸法公差を導き出す。</p>	<p>達成率：100% 応力解析シミュレーションにより、オリフィス組込みに必要な最適形状、寸法公差を導き出し、超小型流量制御器の試作を実施。左記の目標値の達成を確認。</p>
<p>【1. 3】応答時間の高速化 流体解析シミュレーションを用いて、制御流路形状の最適化および試作検証により目標を達成する。目標値は、流量設定変更時の立上り/立下り応答時間0.5sec以内。</p>	<p>達成率：100% 流体解析シミュレーションを用いて、制御流路形状の最適化及び試作品による応答性能の検証を実施。応答時間は目標値を達成。</p>
<p>【1. 4】小型電気制御基板の設計製作 従来基板の実装面積の30%以上の削減。高速通信に対応した制御が可能なソフトウェアの設計・製作。</p>	<p>達成率：100% 従来基板の実装面積の30%以上削減及び高速通信に対応した制御が可能なソフトウェアの設計・製作を完了。</p>
<p>【1. 5】流量制御器としての性能検証 【1. 5. 1】専用評価装置による各種性能検証 模擬プロセスの繰り返し回数100万回以上を達成するとともに、流量制御器の要求スペックをクリアする。 【1. 5. 2】輸送振動に対する耐性確認 各接合部に变形、緩み等の異常がないこと。試験内容は、MIL規格に準拠した輸送振動パターンとする。 【1. 5. 3】EMC試験の実施 国際電気標準化委員会などが定めるEMC規格に適合していること。</p>	<p>達成率：80% 【1. 5. 1】性能評価を行うための装置製作を実施し、模擬プロセスの繰り返し回数100万回以上（300万回）を達成。流量制御器の要求スペックをクリア。 【1. 5. 2】振動試験を実施し、各接合部に变形、緩み等の異常がないことを確認。 【1. 5. 3】EMC試験は未実施。コストダウンや量産性等の考慮を行った後、最終形状（量産形状）に仕上げた状態にて、後日試験を行っていく予定。</p>
<p>【2】次世代流量制御ユニットの実証試験</p>	
<p>【2. 1】ガスの到達時間を計測する評価設備立ち上げ 流量制御器への指令後、任意の箇所におけるガスの到達時間の計測を行うために、評価設備の設計・製作を行う。ガスの検出器として、圧力計、濃度計、質量流量計等を搭載し、ガスの到達時間の比較評価を行うとともに、従来方式の流量制御器と、本事業で開発した流量制御器の到達時間の比較検証を行い、有効性を明らかにする。</p>	<p>達成率：100% ガス到達時間の計測を行うための装置は設計及び製作を実施。従来方式の流量制御器と、本事業で開発した流量制御器の到達時間の比較検証を行い、有効性を確認。</p>
<p>【2. 2】次世代ガス制御ユニットの設計製作 新たに設計製作する次世代流量制御ユニット（16ライン）は、チャンバ直近に設置できるサイズと重量とし、川下ユーザーの要求仕様で180mm（幅）×475mm（奥行き）×235mm（高さ）、重量50kg以下とする。</p>	<p>達成率：100% 超小型流量制御器を16ライン分、計16台組み込んだ、チャンバ直近に設置可能な流量制御ユニットの設計製作を実施し、左記目標値を達成。</p>
<p>【2. 3】ガスの到達時間の実証試験 本事業で開発した流量制御器を搭載できる次世代流量制御ユニットを設計製作し、従来のユニットとの比較評価を行う。従来技術に対して50%以上の到達時間の短縮であることを実証する。</p>	<p>達成率：100% 本事業で開発した流量制御器を搭載できる次世代流量制御ユニットを設計製作し、従来のユニットとの比較評価を実施。従来技術に対して50%以上の到達時間の短縮であることを確認。</p>

【全体のまとめ】

水道方式機能を有する超小型流量制御器の開発

- ・超小型流量制御器に必要な要素技術（制御弁・オリフィス内蔵弁・電気基板の小型化）の確立。
- ・超小型流量制御器の試作・評価による機能/性能の実証。

次世代流量制御ユニットの実証試験

- ・超小型流量制御器を16ライン分、計16台組み込んだ次世代流量制御ユニットの設計・製作。
- ・次世代流量制御ユニットの設計・試作による製造技術の確立。
- ・実機評価による、ガスを高速高精度にパルス供給可能な次世代流量制御ユニットの実証。

※注1) Cv 値：

バルブにおける流体の流れ易さを定量的に表した数値。定義は「圧力差が 1lb/in²[6.895kPa] のとき、バルブを流れる 60° F (約 15.5℃) の温度の水の流量が、US gal/min (1US gal= 3.785L) で表される無次元数」。Cv 値の大きいバルブほど外形が大きく、開口部分も大きいことになる。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(フリガナ)： オカヒサ タクジ

氏名： 岡久 拓司

所属組織名：一般財団法人金属系材料研究開発センター 産学官連携グループ

所属役職： 主席研究員

Tel：03-3592-1283 Fax： 03-3592-1285

E-mail： tokahisa@jrcm.jp

(フリガナ)： ニシノ コウジ

氏名： 西野 功二

所属組織名：(株)フジキン 大阪ハイテック研究創造開発センター

所属役職： 執行役員

Tel：06-6612-0251 Fax： 06-6612-8541

E-mail： k-nishino@fujikin.co.jp

e-Rad 研究者番号 (8ケタ)： 80601591

(フリガナ)： ヒラタ カオル

氏名： 平田 薫

所属組織名：(株)フジキン 大阪ハイテック研究創造開発センター

所属役職： 主事

Tel：06-6612-0251 Fax： 06-6612-8541

E-mail： k-hirata@fujikin.co.jp

第2章 本論

【1】水道方式機能を有する超小型流量制御器の開発

【1. 1】制御弁の小型化

開発した超小型制御弁の幅寸法の目標は、川下ユーザーの要求事項を踏まえ、10mm以下に設定した。また、性能面での要求仕様である最大制御流量（1300sccm）が制御可能な制御弁を目標として、上記最大流量により算出された Cv 値（ $Cv=0.0026$ ）を目標値として設定し、設計及び制御弁を含め、超小型流量制御器の試作を実施した。なお、超小型制御弁は、流体解析の数値シミュレーション結果に基づいて設計を行った。図2-1に、試作した超小型制御弁の流量特性の確認結果を示す。制御弁はアクチュエータとしてピエゾ素子を使用しており、ピエゾ素子の駆動電圧範囲は0～140Vである。図2-1より、ピエゾ電圧が約80Vにて設計時に想定した最大流量（1300sccm）が流れることを確認し、目標である最大制御制御を確保可能であることを確認できた。

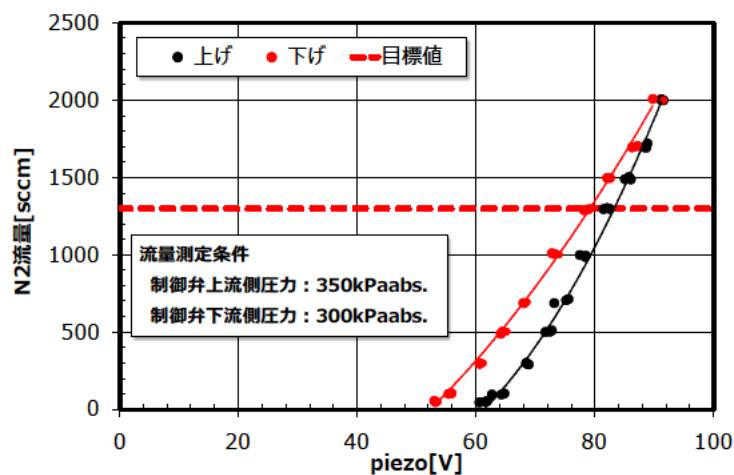


図2-1：超小型制御弁 流量特性

【1. 2】オリフィス組み込み方法の開発

オリフィス組み込み部の概念図を図2-2に示す。オリフィス組み込み部の外部リーク量およびシートリーク量は、ヘリウムリークディテクタの検出限界である $1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下を目標とし、応力解析シミュレーションにより、オリフィス組み込みに必要な最適形状、寸法公差を導き出し、超小型流量制御器の試作を実施した。なお、試作品設計の応力解析シミュレーション結果は、オリフィス組み込み部の各シール箇所に加わる応力がシール性能に必要な応力値以上であることを確認している。

試作品の外部リーク量及びシートリーク量の実測値についても、目標値である $1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下であることを確認できた。

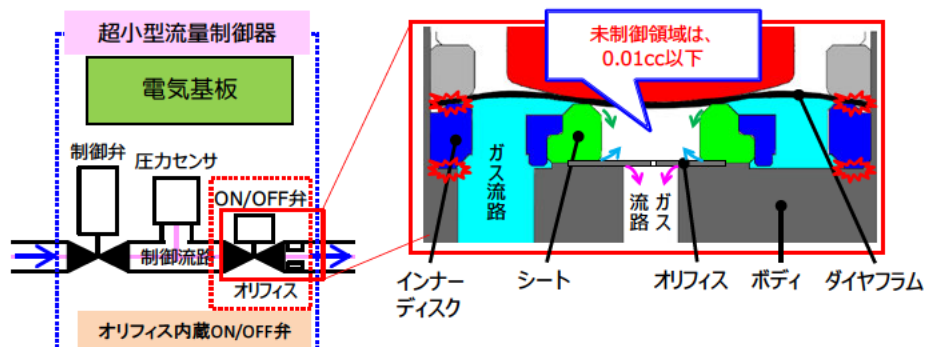


図2-2：オリフィス組み込み部 概念図

【1. 3】 応答時間の高速化

ガス流量変更時（例えば 100sccm から 50sccm への流量変更）は、制御弁～オリフィス間の制御域に溜まったガス圧を下げる必要がある、そのためには制御流路の容積を極小化することが求められる。

制御流路形状の設計最適化により、制御弁～オリフィス間の制御内容積を極小化し、試作品による応答性能の検証を実施した。図2-3に、試作品の立下り応答時間の確認結果を示す。図2-3により、従来技術に対し、立下り応答時間の約80%短縮を確認した。

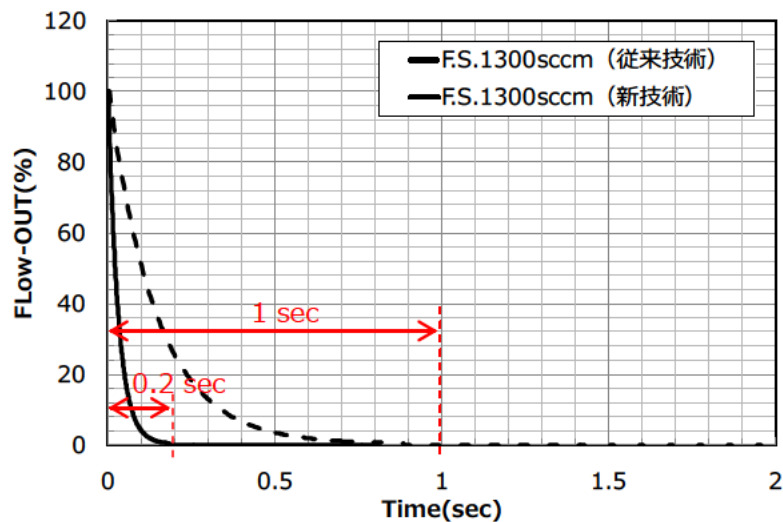


図2-3：立下り応答時間の確認結果

【1. 4】 小型電気制御基板の設計製作

超小型流量制御器に実装する電気基板については、本体の小型化に伴い、従来基板の実装面積の30%以上削減及び高速通信に対応した制御が可能なソフトウェアの設計・製作を目標として、設計・試作を実施した。図2-4に、制御回路構成のブロック図を示す。図2-4の回路構成に従って電気基板の試作を実施し、上記目標の達成を確認した。

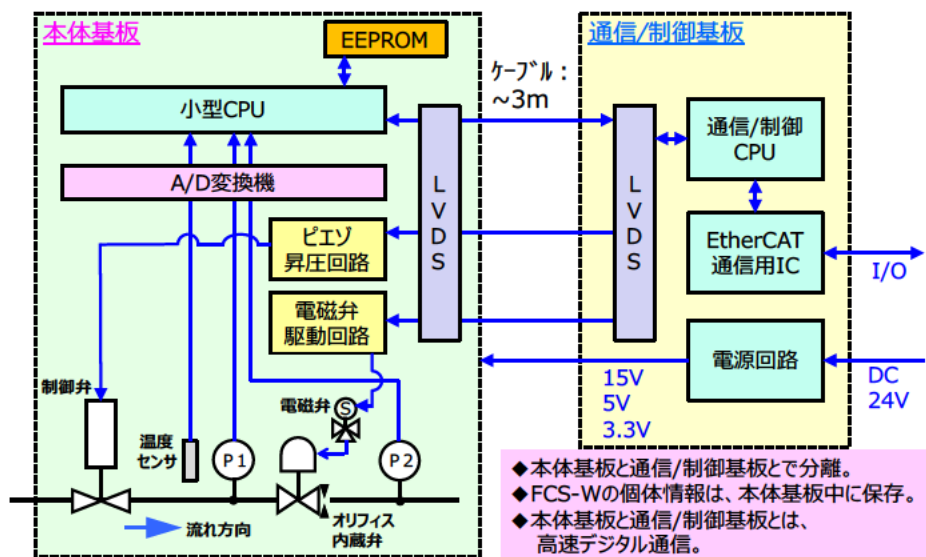


図2-4：制御回路構成ブロック図

【1. 5】流量制御器としての性能検証

【1. 5. 1】専用評価装置による各種性能検証

性能評価を行うための装置製作を実施した。図2-5に、性能評価装置の画像を示す。

図2-5の装置を用いてエッチングプロセスを模擬したガス流量制御を行い、模擬プロセスの繰り返し回数300万回を実施した。表2-1に、300万回繰り返し後の流量制御器の性能確認結果を示す。繰り返し回数300万回後においても、流量制御器の要求スペックをクリアすることを確認した。



図2-5：性能評価装置画像

表2-1：300万回繰り返し後 性能確認結果

検査項目	判定基準	結果
流量精度	±0.1%F.S.以内（設定：1～20%F.S.） ±0.5%S.P.以内（設定：20～100%F.S.）	判定基準以下
シートリーク （Heリーク検査）	2×10^{-5} Pa・m ³ /sec. 以下	判定基準以下
パーティクル	弁開閉時の0.1μm以上のパーティクルの平均 個数が1開閉当り1個以下	判定基準以下
応答性	設定値の±2%まで0.5秒以内	判定基準以下

【1. 5. 2】輸送振動に対する耐性確認

試作した超小型流量制御器の輸送時振動の耐性を確認するため、図2-6に示す試験機を用いて振動試験を実施した。振動試験前後にて、性能に差異は確認されず、各接合部に変形、緩み等の異常がないことを確認した。

【1. 5. 3】EMC 試験の実施

本項目は、開発した超小型流量制御器について、国際電気標準化委員会などが定める EMC 規格に適合していることを確認することを目的とする。

EMC 試験は現状未実施であり、コストダウンや量産性等の考慮を行った後、最終形状（量産形状）に仕上げた状態にて、後日試験を行っていく予定。



図2-6：振動試験機画像

【2】次世代流量制御ユニットの実証試験

【2. 1】ガスの到達時間を計測する評価設備立ち上げ

従来方式の流量制御器と、本事業で開発した流量制御器の到達時間の比較検証を行うため、ガス到達時間の計測が可能な装置の設計・製作を実施した。図2-7に製作した装置の構成及び 画像を示す。図2-7の装置を用いて、ガス到達時間の確認を実施した結果を図2-8に示す。従来技術は、ガス到達時間が流量設定開始から 400msec を要するが、新技術では 100msec 以下であり、超小型流量制御器のガス到達時間の優位性を確認できた。

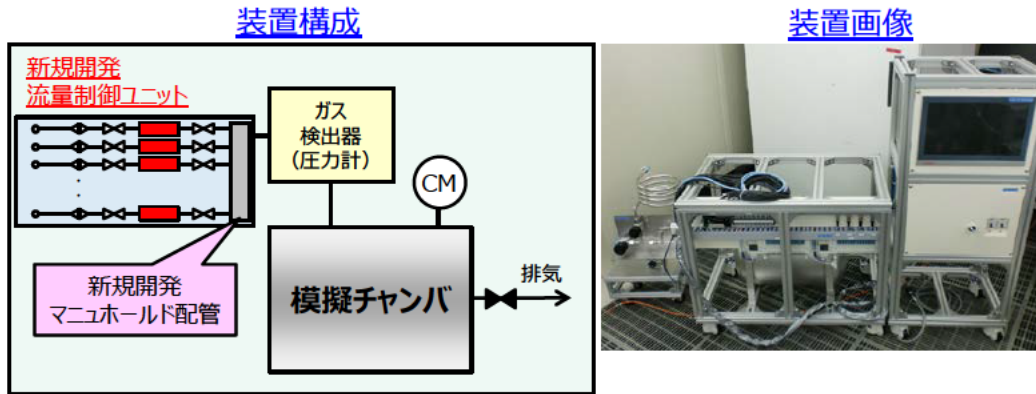


図2-7：ガス到達時間計測装置の構成、画像

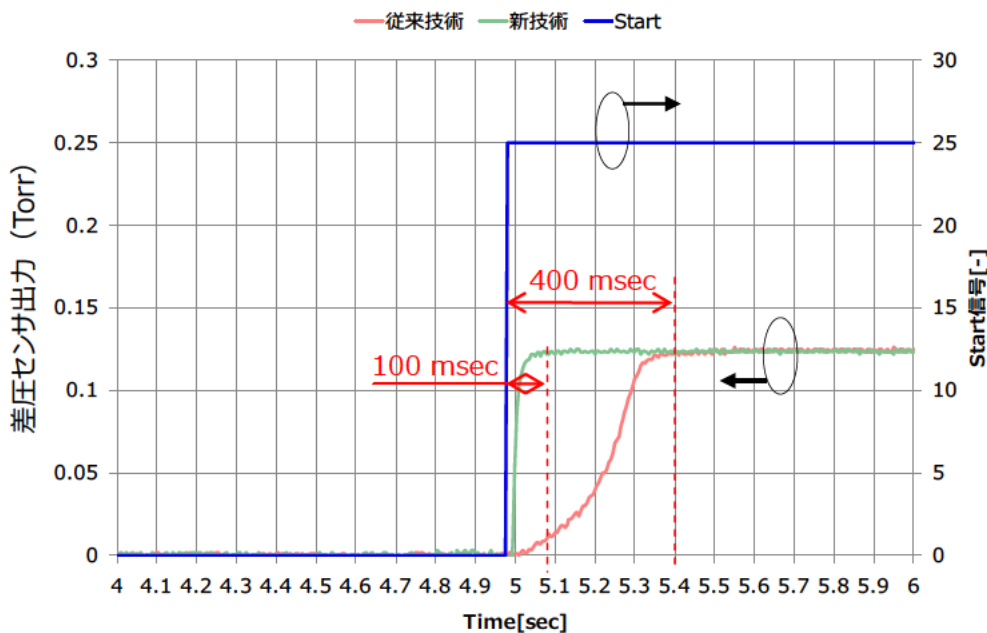


図2-8：ガス到達時間計測結果

【2. 2】次世代ガス制御ユニットの設計製作

次世代ガス制御ユニットとしては、チャンバ直近に設置可能とするための設計を実施した。超小型流量制御器を 16 ライン分、計 16 台組み込んだ次世代流量制御ユニットを、チャンバ直近に設置できるサイズと重量とし、川下ユーザーの要求仕様で 180mm (幅) × 475mm (奥行き) × 235mm (高さ)、重量 50kg 以下とすることを目標とした (現状製品ユニットは 472mm (幅) × 475mm (奥行き) × 235mm (高さ)、重量 100kg。)

設計製作した次世代ガス制御ユニットのサイズは、175mm（幅）×171mm（奥行き）×235mm（高さ）、重量 24kg であり、上記目標を達成することを確認した。

【2. 3】 ガスの到達時間の実証試験

本事業で開発した流量制御器を搭載できる次世代流量制御ユニットを設計製作し、従来のユニットとの比較評価を行った。図2-9に上記比較評価の試験系を示す。比較評価の結果は図2-10の通り、ガス到達の応答時間は立ち上がり時が5→1sec、流量変更時が4→1secとなり、従来技術に対して50%以上の到達時間短縮を確認・実証できた。

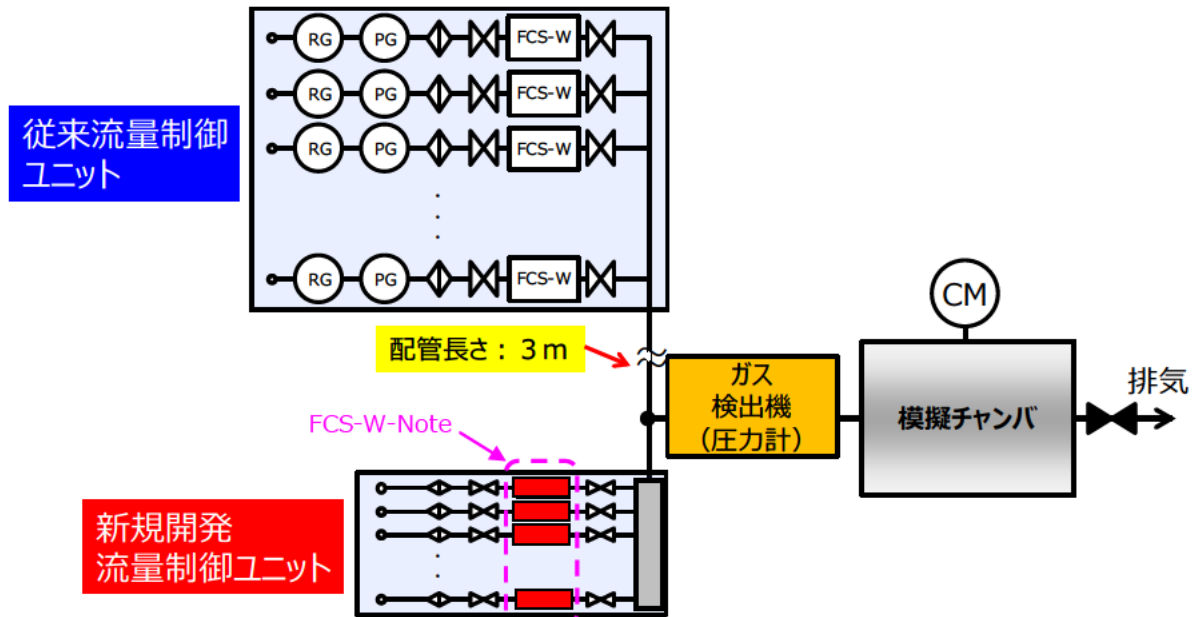


図2-9：ガス到達時間比較評価_試験系

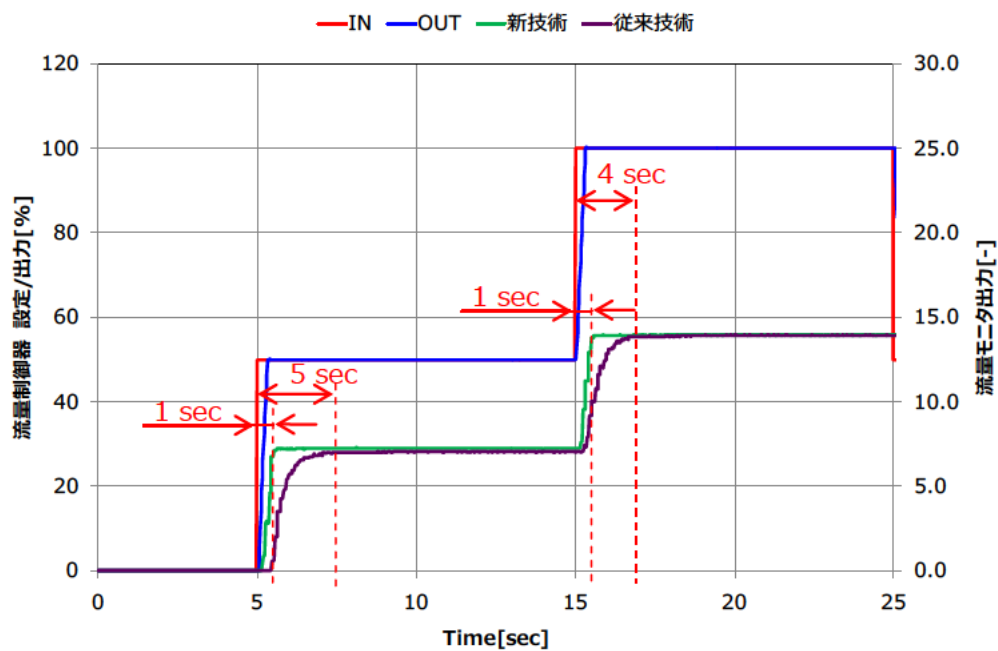


図2-10：ガス到達時間比較評価結果

第3章 全体総括

3-1 補助事業の成果

【1】水道方式機能を有する超小型流量制御器の開発

【1. 1】制御弁の小型化

流路最適化により試作を行った結果、制御弁の Cv 値 0.0026 以上の目標を達成した。これにより、超小型制御弁の要素技術を確立した。

【1. 2】オリフィス組込み方法の開発

オリフィス内蔵 ON/OFF 弁について、1 次試作品は外部シール 及び 内部シール性能ともに目標値 ($1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下) を達成した。これにより、超小型オリフィス内蔵 ON/OFF 弁の要素技術を確立した。

【1. 3】応答時間の高速化

超小型流量制御器の試作品について、流路最適化により試作を行った結果、立下り応答特性は目標値の 500msec 以下を達成した。これにより、流量変更時の立下り応答の高速化の技術を確立した。

【1. 4】小型電気制御基板の設計製作

電気制御基板の小型化について、目標値である従来基板の実装面積の 30%以上削減を達成した。これにより、超小型流量制御器用の電気制御基板の要素技術を確立した。

【1. 5】流量制御器としての性能検証

【1. 5. 1】専用評価装置による各種性能検証

性能検証用の装置（性能評価装置）製作を実施し、装置は問題なく完成。エッチングプロセスを模擬したガス流量制御を行い、模擬プロセスの繰り返し回数 300 万回を実施。繰り返し回数 300 万回後においても、流量制御器の要求スペックをクリアすることを確認した。

【1. 5. 2】輸送振動に対する耐性確認

振動試験を実施し、各接合部に变形、緩み等の異常がないことを確認。また、振動試験前後にて各種性能にも変化がなく、超小型流量制御器の振動耐性を確認した。

【2】次世代流量制御ユニットの実証試験

【2. 1】ガスの到達時間を計測する評価設備立ち上げ

ガス到達時間の計測装置（到達時間計測装置）の製作を実施し、装置は問題なく完成。本装置を用いて流量制御器により制御されたガスの到達時間を定量的に計測し、超小型流量制御器のガス到達時間の優位性を確認した。

【2. 2】次世代ガス流量制御ユニットの設計製作

超小型流量制御器を 16 ライン分、計 16 台組み込んだ、チャンバ直近に設置可能な流量制御ユニットの設計を実施し、次世代ガス制御ユニットは、目標である現行ユニットから約 1/3 のサイズダウン達成を確認した。

【2. 3】ガスの到達時間の実証試験

本事業で開発した超小型流量制御器を搭載できる次世代流量制御ユニットを設計製作し、従来のユニットとの比較評価を実施。従来技術に対して 50%以上の到達時間の短縮である

ことを確認した。

【全体のまとめ】

水道方式機能を有する超小型流量制御器の開発については、超小型流量制御器に必要な要素技術（制御弁・オリフィス内蔵弁・電気基板の小型化）を確立した。また、超小型流量制御器の試作・評価による機能/性能の実証を行い、流量制御器としての要求スペックを満たすことを確認した。

次世代流量制御ユニットの実証試験については、次世代流量制御ユニットの設計・試作により、製造技術を確立した。また、実機評価により、ガスを高速高精度にパルス供給可能な次世代流量制御ユニットの性能を実証した。

3-2 補助事業の成果に係る事業化展開について

(1) 想定している具体的なユーザー、マーケット及び市場規模等に対する効果

本開発成果である次世代流量制御ユニットを搭載した原子層加工装置（ALE や ALD）をご採用頂くことにより、エンドユーザである半導体デバイスメーカーにおいては、原子層加工の生産性が向上する。デバイスメーカーの課題である微細化（線幅 22nm→14nm）と 3 次元化（トレンチ加工アスペクト比 40:1→100:1）も実現し、超大容量メモリーや多機能チップ（システム・オン・チップ）などの次世代半導体デバイスの製品化が促進される。それらのデバイスは、次世代 8K テレビなどの超高精細映像の処理や保存、高速通信 5G デバイスの小型化、快適なウェアラブルデバイスの実現、現在は高電力を消費しているインターネットサーバーの大幅な省エネ化など IT 分野における多くの社会ニーズに貢献できるものである。

本開発成果品は、川下の半導体製造装置メーカーの課題であるプロセスガスの短パルス化による ALE（原子層エッチ）のスループット向上を実現するものである。国内川下ユーザである半導体製造用装置メーカー（東京エレクトロン（株）様ほか）また半導体メーカー（（株）東芝様、ローム（株）様ほか）に導入頂くことにより、装置や製品の付加価値が高まり国際的競争力強化につながる。半導体製造用装置のうち本開発品が先ず普及を目指す「ドライエッチング装置」の世界市場は 2013 年で 39 億 7500 万ドル（約 5 千億円）である。

(2) 事業化見込み（目標となる時期・売上規模）

本開発成果品は、経済産業省の「グローバルニッチトップ企業 100」として弊社が選ばれた際の対象製品「半導体製造装置用向けの超精密バルブ機器」の次世代を担う新製品である。一層の世界シェア向上と事業拡大の戦略商品として位置付けている。開発成果は直ちにサンプル出荷し、ユーザーに評価頂き、平成 31 年度から販売開始する。平成 33 年度には 20 億円の売上を目指す。