

(5) 機器・システム開発領域

研究課題名	マイクロシステム融合研究開発
中心研究者名	江刺 正喜
研究支援担当機関名	東北大学

<研究課題からの報告>

1. 研究課題の目的及び意義

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) とは、微小な電気機械システムのことであり、自動車のエアバック用の加速度センサ、デジカメの手振れ検出用のジャイロセンサ、多数のノズルを持つインクジェットプリンタ用ヘッドなどに使用されている。しかし、半導体集積回路 (LSI) 上に多様な MEMS を形成することは技術的に困難であり、半導体デバイスの新しい価値や用途の創出が難しい状況であった。

このため、本研究課題では、微細化した LSI 上での MEMS 製作を可能にする「ヘテロ集積化 (LSI に異なる要素を集積する技術)」の技術開発と、その技術開発により、高付加価値化を図った MEMS の量産技術を世界に先駆けて確立すること、さらに、超並列電子線描画装置のプロトタイプをヘテロ集積化で実現することにより、MEMS や LSI の生産技術を革新し、世界で優位に立つことを目的として研究開発を実施した。

具体的な研究目標として、以下を設定し、研究開発を推進した。

- ① 超並列電子線描画装置
 - 100×100 配列のナノクリスタル Si 電子源の試作、超並列電子線描画装置プロトタイプを試作
- ② ヘテロ集積化初期試作
 - ウェハへ異種要素を集積化する技術の開発
- ③ 試作コインランドリ
 - 次世代微細加工プロセス技術の開発、試作コインランドリ利用者へ提供
- ④ ヘテロ集積化量産試作
 - 8 インチ以上の大口径ウェハによるヘテロ集積化デバイスの量産試作、プロセス・評価技術の開発
- ⑤ 高効率 MEMS 融合製造技術
 - 異種デバイス・異種材料のヘテロ集積化デバイスの作成

2. 研究成果の概要

① 超並列電子線描画装置の開発

フォトマスクを使わないマスクレス露光のデジタルファブリケーションにより、LSI の多品種少量生産を低コスト化する装置のプロトタイプを開発した。これはナノクリスタル Si による 100×100 の電子源アレイを、樹脂接合・転写によ

る「ヘテロ集積化」(図1)でLSI上にアクティブマトリクスとして製作したものである(図2)。製作した電子源アレイによる電子線露光に成功し、縮小投影露光装置としての動作確認の段階に至った。

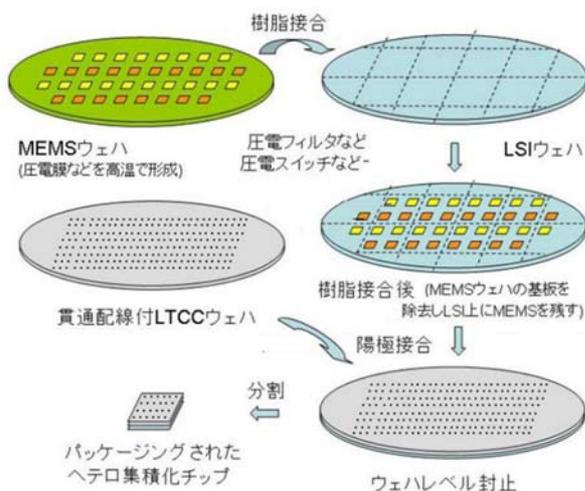


図1. 樹脂接合によるヘテロ集積化

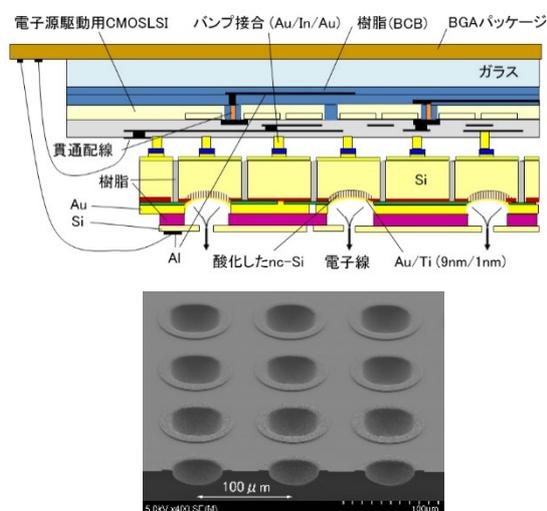
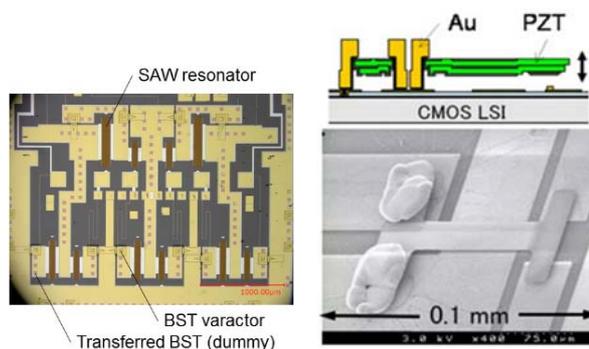


図2. 超並列電子線描画用アクティブマトリクス電子源の断面構造(上)と完成写真(下)

② ヘテロ集積化の初期試作

増大する通信トラフィックに対応するため、空いているチャンネルを見つけて通信する「コグニティブ無線」の開発を目指した。マルチバンドワイヤレス機器で、電波帯を有効利用するため、LSI上にRF(Radio Frequency)共振子やフィルタ、圧電スイッチなどを形成した。これも樹脂接合・転写による「ヘテロ集積化」で実現した。レーザで剥離するデボンティングによる選択転写により、複数個の異なる通過周波数のSAW(弾性表面波)フィルタをLSI上に形成したマルチバンドフィルタ、あるいは強誘電体可変容量素子をSAWフィルタ上に形成した可変帯域フィルタなどの開発に成功した(図3)。



左: LSI上に製作したチューナブルSAWフィルタ

右: LSI上に製作した圧電スイッチ

図3. 製作したヘテロ集積化デバイス

③ 「試作コインランドリ」サービスの提供

以前パワートランジスタ工場として使われていた遊休施設と、寄付された装置などを活用し、企業などが人を派遣して試作や製品製作を行えるようにした「試

作コインランドリ」サービスを開始した。これは、4 または 6 インチの半導体ウェハを処理できる施設で、設備に費用をかけていないため、使用料も安く、150 社程の会社が利用している。半導体の研究・開発を行う大学や企業にとって、設備投資の必要性がなくなり、新規製品への参入障壁を下げられ、人材も育てることができる。この中で、社会のニーズや他のサブテーマに関係した、低応力ポリシリコンの成膜技術などを開発した。

④ ヘテロ集積化の量産試作

独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）の 8 インチラインを用いた量産での MEMS 技術を開発し、圧電型マイクロ静電気センサ、マイクロ粘性センサ、マイクロ流体バイオチップなどの研究を発展させることができた。

⑤ 高効率 MEMS 融合製造技術の開発

界面接合技術、ウェハ上でのセルフアセンブリ技術、微細成形加工技術などの研究を進展させ、実用段階まで到達することができた。これらの研究は、グループ間の連携や民間企業との連携などで積極的に行われ、大きな成果を上げることができた。

<評価小委員会による所見>

1. 研究目標の達成状況

超並列電子線描画装置の開発では、100×100 の電子線をアクティブマトリクスで制御するための電子源や LSI の製作に成功し、さらに世界的にも実用化されていない 15×15 の露光装置による動作確認、プロトタイプまで完成させた。

ヘテロ集積化初期試作では、LSI 上の圧電型スイッチ、SAW フィルタ・発信器の試作、IC と異種材料の SAW 共振子のウェハ接合による一体化等、様々な無線通信用のデバイスのヘテロ集積化に成功し、世界で初めての成果が得られている。

試作コインランドリでは、使用ユーザーは、日本だけでなく外国にまで広がっており、試作ラインの整備も進んでいる。毎月 400 件以上、150 社程の企業に利用され、我が国 MEMS 技術の産業利用を促進するという意味でも、一定の役割を果たしていると評価される。

ヘテロ集積化量産技術では、マイクロ流体バイオチップ、マイクロリアクタの量産化への道筋を付け、8 インチウェハプロセスによる静電／圧電センサの試作等が進み、所期の目的を達成したと判断される。

高効率 MEMS 融合製造技術では、キャリアウェハ上に多数のチップを配置し、ウェハレベルでの一括接合により集積化する技術、Ne 高速原子ビームによる原子レベルでの平滑な表面同士の接合技術、金属パターン表面を平坦化し常温で接合する技術等、様々な試みで成果が得られていると判断される。

2. 研究推進・支援体制の状況

研究推進体制については、進捗状況の把握や推進のための研究会、運営委員会が隔月で開催され、また中心研究者も委託先へ定期的に巡回するなど、全体的には、順調に機能していたと思われる。また、研究推進について第三者の意見・助言を求める諮問委員会を設置し、研究開発の進捗を客観的な視点から確認することができたことは評価される。

研究支援体制については、東北大学、産総研に支援組織が設置され、東北大学及び産総研の産学連携推進本部等の既存組織がこれに協力して研究支援を行う体制は適切に機能していたと判断する。

知的財産権に関する取組については、全体として 61 件の特許出願が行われ、うち 7 件が登録されており、主体的・能動的な取組が行われたものと判断する。今後は、国際出願の推進と、出願特許の更なる権利化を確実に図っていくことが必要である。また、ドイツのフラウンホーファー研究機構との共同研究に当たっては、全ての特許をフラウンホーファー研究機構に帰属させ、利益の半分を大学が受け取るという契約としており、国内企業と大学とのライセンス契約のあり方を検討する上で、今後参考になる対応と考えられる。

若手研究者の育成に関しては、国際連携を行っている機関への若手研究者の派遣や、雇用したポストドクターのうち 3 名が本研究開発の成果により大学及び民間企業に採用されるなど、若手の研究人材の育成や国際的活躍を促す取組が行われたと判断する。

3. 研究成果の今後の展開

ヘテロ集積化初期試作で見られたワンチップのチューナブル SAW フィルタや、ヘテロ集積化量産試作における粘性センサ、静電気センサなど、基盤技術としていくつか特筆すべきものがあり、実用化への期待の高い内容である。また、超並列電子線描画装置では、電子線の高密度配列などで新しい技術展開が見られつつあり、継続した発展を期待したい。

超並列電子線描画装置以外のサブテーマについては、相互に有機的な関連を持つよう、今後俯瞰的な視点から研究開発が行われることを期待したい。電子線描画装置については可能性検証のレベルと思われるが、多方面への展開も期待でき、応用範囲を広げつつ開発が進められることを期待する。

本研究課題を通じて、有効性が確認されたシステムの 1 つとして「試作コインランドリ」が挙げられる。このシステム自体は、研究課題の目的とする高度な技術開発を伴うものではないが、MEMS に興味をもつ中堅中小企業等にとっては大変有効

で有益なシステムであり、今後何らかの資金援助、あるいは自立した組織として運営できるよう努力していただきたい。

4. 総合所見

本研究課題は、LSI 上での MEMS 製作を可能にする「ヘテロ集積化」の研究開発と、その技術開発による、高付加価値化を図った MEMS 量産技術の確立及び超並列電子線描画装置のプロトタイプの実現を主な目的として研究開発を実施した。

その結果、樹脂接合・転写によるヘテロ集積化技術を確立し、超並列電子線描画装置のプロトタイプの完成や、可変 SAW フィルタの開発、並びに量産技術としては 8 インチウェハによる静電／圧電素子の試作など、個々のテーマで、それぞれ世界水準と言える成果に達している。

また、試作コインランドリのような、企業を巻き込んで我が国の MEMS 産業の発展、促進に寄与する大変意義のある試みも見られた。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トップ水準の研究成果が得られたと判断する。

今回得られた研究成果や研究体制は継続が重要であり、今後、各サブテーマが有機的な関連を持つように、俯瞰的な視点から研究開発を継続していくことを期待する。

研究課題名	Mega-ton Water System
中心研究者名	栗原 優
研究支援担当機関名	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

<研究課題からの報告>

1. 研究課題の目的及び意義

人口の増加や経済成長、異常気象等によって、地球規模で水環境の破壊が進み、水不足は年々深刻化している。このような中、我々の生活を支えるのに十分な水量と水質を確保できる新しい水処理技術が求められている。特に、地球上の水の大部分を占める海水から淡水を作り出す海水淡水化技術が注目を集めている。

このため、本研究課題では、21 世紀で求められる持続可能でかつ大型の水処理基幹技術の構築を目指し、低環境負荷化、省エネルギー（創エネ）化への対応及び低コスト化に配慮した海水淡水化及び下水処理システムについて、要素技術とシステム技術の強化を図り、世界トップレベルの国際競争力（価格、性能、信頼性）を有する水処理システムの開発を目指し、研究開発を実施した。

研究課題全体としては、社会ニーズの低環境負荷、省エネ、低コストを課題とし、要素技術・システム技術の7つのサブテーマに取り組んだ。

具体的な研究目標として、高効率膜モジュールの開発及び大型施設の建設関連技術の開発をベースに、環境・エネルギー配慮型巨大淡水化技術の実用化システム（100 万 m³/日規模の大規模逆浸透膜海水淡水化プラント）と下水処理システム（10 万 m³/日規模）の開発を行うこと、

また、海水淡水化メガプラ

ントシステムの構築に要する設備コスト（10 万 m³/日規模で 1,500USドル/(m³/日））及び造水コスト（1USドル/m³）について、メガトン規模のシステムにおいて半減させることを設定した。また、エネルギー消費量についても 20%減少させることを設定した。

なお、中間評価において、「メガトンシステムを実現するためのコア技術を明らかにして、FIRST としての特徴ある研究成果を打ち出すための成果目標を明確にし、目標の達成に向けて研究資源の重点投入を図る研究計画の見直しを求める」との指摘を受け、濃度差エネルギー回収（PRO）を海水淡水化システムに組み込んだ際のメリット（省エネ・環境負荷低減）とデメリット（設備コスト）を具体化し、技術

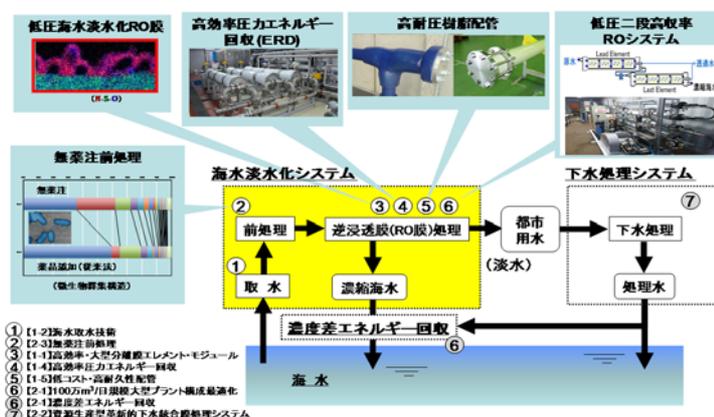


図 1. Mega-ton Water System 全体図

的課題を明確化するため、サブテーマの改変（PRO を 100 万 m³/日規模大型プラント構成最適化に統合）を行った（図 1）。

2. 研究成果の概要

以下に掲げる画期的な要素技術・研究成果を組み合わせ、メガトンレベルの海水淡水化システムを構築した。その結果、設備費、造水コスト、エネルギー消費量の観点から、それぞれ目標を達成した（表 1）。

	ベンチマーク(世界平均) (at 10万m ³ /日規模)	目標 (at 100万m ³ /日規模)	達成度
設備費(CAPEX)	1500USD/(m ³ /日)	半減(750USD/(m ³ /日))	達成
造水コスト(WPC)	1 USD/m ³	半減(0.5 USD/m ³)	達成
エネルギー消費量 (追加目標)	3.5~4kWh/m ³	20%超の削減	達成

表 1. 海水淡水化システムの数値目標と達成度

- ・ 低圧海水淡水化 RO（Reverse Osmosis：逆浸透）膜の開発

STEM-EELS（Scanning Transmission Electron Microscopy-Electron Energy Loss Spectroscopy：走査型透過電子顕微鏡法－電子エネルギー損失分光法）を用いて、世界初となる RO 膜の微細構造観察・解析技術を獲得した。また、解析技術を駆使して、微細構造制御による新規 RO 膜形成法を確立した。その結果、低圧条件下でも高い塩除去率を有する世界初となる低圧海水淡水化膜を創出し、低圧二段高収率 RO システムが可能となった。

- ・ 低圧二段高収率 RO システムの開発

世界初の低圧海水淡水化膜と新規ピストンレス ERD（Energy Recovery Device：圧力エネルギー回収装置）を採用し、省エネルギー化（20%削減）と高収率化（60～65%）を同時に達成した。

また、メガトンレベルにふさわしい技術を追求し、1系列の容量アッ

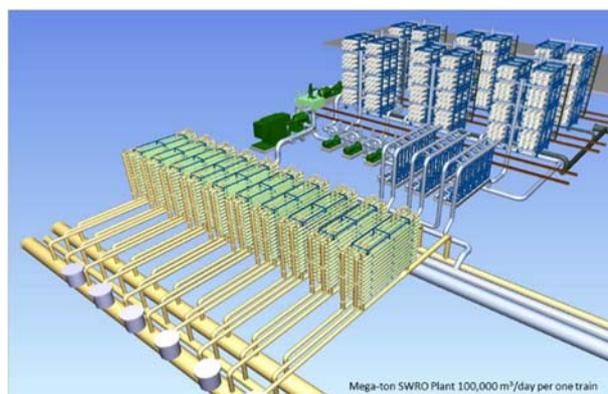


図 2. メガトンプラント（1系列）のイメージ図

プ（2万トン→10万トン）、機器部品の大型化・部品点数削減（RO膜：8インチ→16インチ）、高耐久性樹脂配管の採用、取水・前処理流量及び設備設置面積の削減（30%）により、設備コストの大幅削減（50%）を達成した（図2）。

・ 無薬注前処理技術の確立

微生物の菌数測定法を見直し、蛍光顕微鏡観察法を用いた結果、従来の菌数測定法は不完全であり、塩素による殺菌効果は限定的であることを明確化した。

また、塩素等の薬品の添加がバイオフィウリング（膜面に微生物が繁殖し目詰まりを起こす現象）のトリガーであるとする仮説を実証し、バイオフィウリングの予見可能な指標及び海水水質指標を世界で初めて確立、さらに、海水の水質マップを作成するとともに、前処理プロセスのガイドラインを作成した。

<評価小委員会による所見>

1. 研究目標の達成状況

本研究課題では、海水淡水化のためのシステム構築に当たり、水処理膜の高性能化に基づく、省エネルギー、低環境負荷に配慮した低コスト化を重要課題に掲げ、設備費、造水コスト、エネルギー消費量を具体的な数値目標として設定した結果、いずれも研究課題側が提示した目標を達成する成果が得られた。実際のプラントとしてメガトンの装置が稼働している状況ではないため、コストの試算などは推定の成果として評価せざるを得ないが、10万トンクラスの装置の稼働について一定の技術的な見通しが得られており、海水淡水化プラント技術としては世界をリードするレベルに到達したと判断される。

要素技術の開発においても、RO膜の高性能化を始めとして性能の優れた膜の開発が行われており、我が国の得意とする膜技術が世界的に十分に評価される内容となっていると判断される。

ただし、これらの成果は要素技術からのシミュレーションにより評価されたものであり、メガトンレベルの実機を組み立てた際の総合的な達成度を表すものではないことから、実証段階において生じうる問題点を早期に洗い出す必要がある。

また、深層海水を使うことのメリットは、海水の前処理が容易なことであるが、汲み上げのエネルギーが大きくなることや適地の場所が制限されることなどのデメリットもあり、実機の設置に当たっては総合的に評価する必要がある。

なお、「無薬注前処理」という表現に関し、微生物処理の観点で、深層海水を利用する前提であればよいが、前処理工程全てにおいて薬品を用いないとの誤解を招かぬよう注意が必要である。

2. 研究推進・支援体制の状況

中間評価時における指摘に対し、サブテーマの位置付け変更や、サブテーマ間やメンバー間の連携を図る取組も適切に行われており、実施・推進体制は適切に行われたと判断される。また、期間中に行われた SSD ラウンド（中心研究者による各サブテーマの研究場所への訪問・議論）の実施回数の多さ（48 回）から見て、全体の方向性及び各サブテーマの進捗状況の共有も適切に行われたと判断される。

知的財産権に関する取組については、成果の利用・普及の効率化、出口戦略を踏まえた出願、権利化の推進の観点から「発明審議会」を計 67 回開催するとともに、知的財産権の統合的管理を適切に実施するため、「実施権管理規約」の策定を行うなど、適切に行われたと判断される。

3. 研究成果の今後の展開

本研究課題では、海水淡水化システムのための「機器・部品」としての要素技術と、それらを組み合わせた新しい効率的な「システム」が提案されている。要素技術については、今後、参画企業において更に発展させていくことが期待される。また、システムについては、実証のステージを経て海外に展開していくことが望ましいが、海水淡水化の需要の高いサウジアラビアでの展開（海水淡水化プラントへの適用）の可能性も出ていることは、大いに評価される。

今後は、参画企業とともに、完成されたシステムを総合的に発展させ、国際的に事業展開していくことが求められるが、その際の主体をどのように維持発展させていくかについて留意する必要がある。

4. 総合所見

本研究課題は、海水淡水化メガトンプラントシステムを構築する際の設備コスト及び造水コストを半減させること、エネルギー消費量を 20%超削減することを目的として研究開発を実施した。その結果、メガトンレベルの実証までには至っていないものの、10 万トンクラスの装置の稼働について技術的な見通しが得られた。また、開発された個々の要素技術については、世界初の優れた技術が多く、現時点において、競合メーカーに対する技術的優位性が見られる。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トップ水準の研究成果が得られたと判断される。

ただし、上述のとおり、これらの成果は要素技術からのシミュレーションにより評価されたものであり、実機に組み立てた際の総合的な達成度を表すものではない。

本研究課題の成果は、需要の高いサウジアラビアでの展開の可能性も出てきており、グローバルな水資源の問題解決に多大なインパクトを与えることが期待される。

今後、メガトンレベルでの実証を早急に進めるために、関係企業と連携した「メガトン水チーム」として、サウジアラビアにおける実証実験の成功に全力を挙げて取り組んでいくことを期待する。