

「異分野融合型次世代デバイス製造技術
開発プロジェクト／高機能センサネットシステムと低環
境負荷型プロセスの開発」

事業原簿【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術開発推進部
-----	------------------------------------

目次

概要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について	I-1
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性.....	I-1
1.1 NEDO が関与することの意義.....	I-1
1.2 実施の効果.....	I-2
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-2
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目標	II-1
2. 事業の計画内容	II-2
2.1 研究開発の内容.....	II-2
2.2 研究開発の実施体制	II-8
2.3 研究の運営管理.....	II-9
2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性.....	II-13
3. 情勢変化への対応.....	II-14
III. 研究開発成果について	III-1
1. 事業全体の成果	III-1
2. 研究開発項目毎の成果.....	III-3
2.1 高機能センサネットシステム開発	III-3
2.2 低環境負荷型プロセス技術開発.....	III-5
3. 成果の意義	III-7
4. 成果に関する特許及び論文・学会発表に関して	III-9
4.1 特許	III-9
4.2 研究発表・講演.....	III-9

5. 成果の普及広報	III-9
IV. 実用化の見通しについて	IV-1
1. 事業全体の実用化の見通し	IV-1
2. 研究課題毎の実用化の見通し	IV-3
2.1 半導体クリーンルームセンサネットシステム	IV-3
2.2 8 インチラインの構築	IV-4
2.3 植物工場応用センサネットシステム	IV-5
2.4 高機能センサモジュール	IV-7
2.5 低消費電力 LSI	IV-8
2.6 新センサデバイス原理	IV-9
2.7 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス	IV-13
2.8 スマートプロトタイピング (8 インチラインのプロセスプラットフォーム構築)	IV-14
2.9 低環境負荷型深堀エッチング	IV-16
2.10 低環境負荷型集積化プロセス基盤	IV-17
2.11 スマートファブシステム	IV-17
V. 各研究開発成果の詳細内容	V-1
V.1 高機能センサネットシステム開発	V-1
V.1.1 半導体クリーンルームセンサネットシステム開発	V-1
V.1.2 8 インチ MEMS プロセスラインの構築	V-56
V.1.3 植物工場センサネットシステムの開発	V-75
V.1.4 高機能センサモジュール技術開発	V-105
V.1.4.1 センサモジュール	V-105
V.1.4.2 低消費電力 LSI	V-145
V.1.4.3 新センサデバイス原理	V-157
(i) ナノ構造ガスセンサ	V-157
(ii) 低消費電力センサ・無線モジュールへの検討	V-179
(iii) パーティクルセンサの MEMS 化	V-195

(iv)汚染ガスセンサ.....	V-217
(v)振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス.....	V-232
(vi)センサ用パワーマネジメントデバイス.....	V-250
(vii)位置推定センシング原理.....	V-287
(viii)高感度温度センシング用機能薄膜.....	V-306
V.2 低環境負荷型プロセス技術開発.....	V-318
V.2.1 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発.....	V-318
V.2.2 スマートプロトタイピング技術開発.....	V-341
V.2.2.1 シリコンベースセンサ TEG の試作.....	V-341
・加速度センサ・ジャイロセンサ・シリコン振動子 TEG の設計・試作..	V-341
・薄膜メンブレン TEG の設計・試作.....	V-374
・圧電薄膜ジャイロ TEG の設計・試作.....	V-395
V.2.2.2 異分野融合型次世代デバイス製造技術を適用したデバイス作製... V-415	V-415
・中性粒子ビームエッチングプロセスを適用したセンサ TEG の作製.....	V-415
・ μ プローブ TEG の設計・試作.....	V-443
V.2.2.3 欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発.....	V-467
V.2.3 低環境負荷型深堀りエッチング技術開発.....	V-504
V.2.4 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発.....	V-577
V.2.5 スマートファブシステム技術開発.....	V-597

(添付資料)

A-1：イノベーションプログラム基本計画

A-2：プロジェクト基本計画

A-3：技術戦略マップ(分野別ロードマップ)

A-4：事前評価関連資料(パブリックコメント募集の結果)

A-5：特許論文リスト

概要

		最終更新日	平成 23 年 11 月 15 日
プログラム(又は施策)名	ロボット・新機械イノベーションプログラム		
プロジェクト名	異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト/高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発	プロジェクト番号	P09008
担当推進部/担当者	技術開発推進部 奥谷 英司 (平成 23 年 11 月現在) 技術開発推進部 渡辺 秀明 (平成 22 年 3 月~平成 23 年 3 月)		
0. 事業の概要	<p>2015 年以降 2025 年に向けて革新的イノベーションを起こし、更なる市場の拡大を図るには、従来電子・機械製造技術と完全に異分野とされてきた技術とを融合させる等により、これまでの製造技術の概念・常識を打ち破った技術を創出することが肝要である。このため、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」では、MEMS 製造技術とナノ・バイオ等異分野技術の融合による以下①~④の研究開発項目により新たな共通基盤製造技術を開発する。①バイオ・有機材料融合プロセス技術、②3次元ナノ構造形成プロセス技術、③マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術、また、開発成果の産業界への普及促進に向けた環境整備のため、④異分野融合型次世代デバイス製造技術知識データベースの整備を行う。</p> <p>今回の事後評価対象テーマ「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」は、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」の研究開発項目⑤として、平成 21 年度補正予算で約 1 年間実施されたものであり、本テーマでは、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」で開発したプロセス技術等を活用しつつ、高機能センサネットシステム・センサモジュールの事業化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向けた開発・実証研究を行う。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>工場等の製造現場において、原材料や使用資源のきめ細かい状況モニタリングと制御を行う微細・極小、高機能なセンサの実用化により、製造プロセスの省資源化、高効率化の実現が期待されている。小型で低コスト、かつ信頼性の高いワイヤレスセンサとすることで、設置にあたっての大きかりな工事を必要とせず、既存施設にも低コストでの導入が可能となる。合わせて、センサの製造において低環境負荷型の製造プロセス技術の開発を行うことで、生産システムの低炭素化にも貢献が可能となる。</p> <p>本テーマは、上記背景に加え、全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が国や産業毎に強く要請されている中、平成 21 年度補正予算(第 2 号)「明日の安心と成長のための緊急経済対策」を実施するために措置された「環境・エネルギー技術への挑戦」に位置付けられた事業であり、NEDO はこれに早期に対応すべく「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」に追加して緊急に実施した。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>①高機能センサネットシステム開発 検証用のクリーンルームにおいて、従来比(1990 年比)CO2 削減 60%のセンサネット制御システムを開発する。また、一辺 30mm、厚み 10mm 以内に複数の MEMS センサと処理回路、無線回路、エネルギーデバイスとの融合を想定したセンサモジュールプラットフォームを作製する。</p> <p>②低環境負荷型プロセス技術開発 現状の SF6 ガスに対し、複数の代替候補ガスを調査・検討し、温暖化ガス排出量を 90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。また高機能デバイス薄膜の集積化に関し、250℃以下で大気圧付近から真空中で封止できる接合方式を決定する。さらに生体適合性ポリマーを用いた MEMS 製造プロセスにおいて、シミュレーションを用いて機械特</p>		

	<p>性などの機能数値を具体的に示す。</p> <p>大口径 MEMS 用試作ラインにて、センサ用途等 TEG の設計および試作を複数種類行い、歩留まり、生産性、効率性のデータとデバイスの動作を妨げる製造装置、製造プロセス、デバイス構造起因の欠陥・ばらつき等の課題を抽出する。研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果である中性粒子ビームエッチングをセンサ TEG に適用し、デバイス性能への効果を検証する。</p> <p>設計・計測・ファブ環境情報において共有化する情報を類型化し、データ共有化のためのデータフォーマット、それに付随する基本ソフトウェアの開発を行い、MEMS-TEG を用いてデータ交換および設計手法の検証を行う。また、クリーンルームおよび製造・検査装置に関わる消費エネルギー、二酸化炭素排出量など環境情報の収集管理の方法を決定する。</p>					
事業の計画内容	主な実施事項	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24f
	⑤高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発	<p>(異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト 研究開発項目①～④)</p>				
開発予算 契約種類： (委託(○))	会計・勘定	H20fy	H21fy	H22fy		総額
	補正予算(一般)	3,310(百万円)				
開発体制	経産省担当原課	製造産業局産業機械課、産業技術環境局研究開発課				
	プロジェクトリーダー	<p>「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」 技術研究組合 BEANS 研究所 所長 遊佐 厚</p> <p>⑤高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発 チームリーダー 独立行政法人 産業技術総合研究所 前田 龍太郎 (「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」サブプロジェクトリーダー)</p>				
	委託先 (平成 22 年度時点)	<p>技術研究組合 BEANS 研究所 【オリンパス、オムロン、デンソー、三菱電機、大日本印刷、パナソニック電工、日立製作所、日立ハイテクノロジーズ、日立プラントテクノロジー、東芝、富士電システムズ、セイコーインスツル、アルバック、みずほ情報総研、堀場製作所、産業技術総合研究所、立命館大学、マイクロマシンセンター】</p>				
Ⅲ. 研究開発成果 について	<p>本事業は、大きく二つのカテゴリーとして、「高機能センサネットワークシステム」と「低環境負荷型プロセス開発」に分けられる。前者は、高機能センサネットワークシステムの実験場としての 8 インチ MEMS 一貫プロセスライン(クラス 1000 クリーンルームとプロセス装置群)の構築と、そこでの空調オンデマンド制御に連動したセンサネットワークシステムの設置による CO2 削減目標の検証を実施し、後者は、MEMS 製造プロセスとして特徴的な Si 深堀エッチングと接合におけるプロセスの低環境不負荷化、前述の 8 インチ MEMS 一貫プロセスラインでの MEMS 基本プロセスレシピとして 7 種類の MEMS デバイスのテストエレメントグループ(TEG)の開発を行い、いずれも目標を達成した。</p>					
	投稿論文	「査読付き」9 件				
	特 許	「出願済」5 件(3 件手続き中)				
	その他の外部発表 (プレス発表等)	「学会発表」6 件、「セミナー講演会・展示会」3 件				
Ⅳ. 実用化の見通しについて	<p>それぞれの研究開発課題を担当した研究員の所属する企業において、例えば半導体クリーンルーム用センサネットワークシステム事業や、植物工場への事業、各種低環境負荷型プロセスの自社事業などにおいて、それぞれ展開されつつある。</p> <p>また、世界的にも例を見ない低環境負荷化を実現できる高機能センサネットワークシステムを完備した MEMS 一貫プロセス開発・試作施設は、我国有数の 8 インチという MEMS とし</p>					

	<p>ては大口径ウェハを扱える先端的な装置群を完備した研究開発拠点となりうる。これらについては、我が国の研究拠点 TIA-NMEMS への展開を想定し、MEMS 協議会にマイクロナノイノベーションセンター (MNOIC) を研究・開発から量産試作まで踏まえた研究開発の実行部隊として組織し、平成 23 年 7 月に設置された。本事業により設備が構築された AIST 集積マイクロシステム研究センターと共同で MNOIC は研究開発試作機能の構築と継続的運営を図るべく取り組みを進めている。</p>	
<p>V. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成 21 年 3 月 作成</p>
	<p>変更履歴</p>	<p>平成 21 年 3 月 改訂 (NEDO へ移管されることに伴う根拠法等の変更) 平成 21 年 12 月 改訂 (研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」を追加) 平成 22 年 3 月 改訂 (研究開発項目②(3)宇宙適用 3 次元ナノ構造形成技術」の研究開発の目標を産業化の進展を踏まえ変更)</p>

プロジェクト用語集

【AHU】	AHU (エアハンドリングユニット) とは、外部熱源設備から供給される冷水・温水・蒸気等を用いて、空気の温度・湿度を調節して部屋へ供給する、比較的大きな一体型の空気調和機である。
【Analog-to-Digital Convertor (ADC)】	入力されたアナログ信号に比例した数値をデジタル出力する回路。
【BOSCH プロセス】	エッチングとデポを交互に繰り返して行うエッチング方法で、高アスペクト比のエッチングが可能。これと対比して連続的にエッチングを行う方法を非 BOSCH プロセスと呼ぶ。
【CMP】	化学機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing)。研磨剤自体が有する表面化学作用または研磨液に含まれる化学成分的作用によって、高速かつ平滑な研磨面を得る技術
【CAE】	Computer Aided Engineering の略。コンピュータ技術を活用して製品の設計、製造や工程設計の事前検討の支援を行うこと、またはそれを行うツール。
【DRIE】	Deep Reactive Ion Etching. シリコンの深堀をするドライエッチング法. 高アスペクトでシリコンを加工することが可能.
【FFU】	FFU (ファンフィルターユニット) とは、ファン付きの高性能フィルタユニットのことです。FFU はクリーンルームやクリーンブース、精密製造装置の天井に設置し清浄空気を吹き出してクリーンな環境を作る装置。
【FCU】	ファンコイルユニットとは、一般的に、熱交換器 (コイル) ・ファンモータユニット・エアフィルタで構成されたものをいう。必要量の外気は AHU にて調和処理を行い室内に供給し、ファンコイルユニットは主に室内側の温度調整用として用いられる。また、室内側の温調は空調機 (AHU) が行い、ペリメータゾーンの負荷処理を行なうためにファンコイルユニットが使用される場合もある。
【GWP】	大気温暖化係数: Global Warming Potential、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などの各種の温室効果ガス毎に定められる、温室効果の程度を示す値。
【ICP】	誘導結合型プラズマ: Inductive Coupled Plasma、コイルアンテナに高周波を印加してプラズマを発生させる方式で、高密度のプラズマが生成される。
【IPCC】	気候変動に関する政府間パネル (英語: Intergovernmental Panel on Climate Change、略称: IPCC)。国際的な専門家で作る、地球温暖化についての科学的な研究の収集、整理のための政府間機構
【MEMS 等価回路】	等価回路は、L (コイル) ・C (コンデンサ) ・R (抵抗) ・電圧源・電流源などの素子により表現される。これにより、MEMS における電気と機械の複雑な相互作用およびその特性を明確に把握することができる。MEMS においては一般的に系全体のエネルギーをラグランジアンにより表現し、ラグランジュ方程式を解くことで等価回路を導出する。現在は、等価回路ジェネレータを用いることで簡便に MEMS を等価回路化することもできる。
【MEMS 化】	ここでの MEMS 化は、MEMS (Micro Electro Mechanical System) を一部または全体に用いて小型化することを指す。
【OES】	発光分光計測: Optical Emission Spectrometry、プラズマの発光をモニタリングする手法。
【PZT】	ジルコン酸チタン酸鉛 (Pb (Zr, Ti) O ₃) の略称。代表的な強誘電体材料で超音波センサや人感センサに広く応用されている。
【P-E ループ】	強誘電体において電界を印加したときの分極の変化を示す曲線。
【platen power】	プラテンはウエハステージのことで、プラテンパワーとは、ウエハステージに印加する高周波のパワーを意味する。
【QCM】	Quartz Crystal Microbalance. 表面に物質が付着することによって変化する共振周波数の値から付着した物質の質量を計測するセンサ。
【SEM】	操作型電子顕微鏡: Scanning Electron Microscopy. 電子線を計測対象に照射し、対象物から放出される二次電子像を計測することで像を構築し、表示する顕微鏡。

【SIMS】	二次イオン質量分析法：Secondary Ion-microprobe Mass Spectrometry。個体の表面にイオンを照射し、そのイオンと固体表面の分子・原子レベルでの衝突によって発生する二次イオンを検出することにより表面の組成、化学構造、深さ方向の分布等を計測する表面計測法。
【TEM】	Transmission Electron Microscope（透過電子顕微鏡）の略称。ナノメートル以下の物質構造が観測できる。
【TEG】	Test Element Groupの略。設計上や製造上の問題を見つけ出すための評価用パターンや構造をもった素子。
【TFT】	Thin Film Transistor、液晶ディスプレイの一種で、アクティブマトリクス方式の、薄膜状に加工されたトランジスタを用いるタイプのものである。
【VB-FET】	Vibrating-Body Field Effect Transistorの略。2007年にD. Groggらによって提案されたデバイスで、その構造は、駆動するMEMSの側壁部分に形成されたチャネルと固定されたゲートから成る構造であり、MEMSとトランジスタの集積デバイスとなっている。VB-FETは、ゲートと駆動チャネルの相互作用によりトランジスタ機能を発現し、入力信号を低インピーダンスに変換することができ、また、信号を増幅することができる。
【Wald-Minimax法】	逐次サンプリングの手法の一つ。評価線図が直線になり、かつ、ポアソン分布の信頼区間から求めた評価線図と比べて、評価結果に違いがなく、計測時間が短縮されることからJISの規格で使用されている。
【アナログフロントエンド（AFE）回路】	本報告では、センサからの微小なアナログ信号を増幅し、デジタル信号に変換することでマイコンで扱えるようにする回路を指す
【圧電性】	外部からの応力により電界が生じること。電界を印加することにより歪が生じることを逆圧電効果と呼ぶ。
【アニール処理】	熱処理のこと。本研究で用いたアニール処理は金属-半導体接触面を合金化することによりショットキー接触からオーミック接触に変化させる効果を持つ。
【アパーチャ】	中性粒子ビームを生成する為の主要部品。プラズマで生成したイオンを電気的に中性化すること及びイオンに対しバイアスによる運動エネルギーの付加がその主な役割。材質はカーボン。
【アーチファクト】	実際の物体ではない二次的に発生した画像のノイズ
【アクティビティ図】	動作（action）に着目し、その実行順序や条件、制御などの依存関係を示した図
【圧縮乾燥空気】	圧縮空気を乾燥させたもの 圧縮させると結露があるため乾燥が必要となる用途がある
【アッシャー】	レジストを気相中でオゾンやプラズマにより灰化（Ashing）することにより除去する装置
【育苗装置】	種を発芽をさせる装置。人工光にて発芽させる。苗が1cm～2cmに成長した段階で、栽培室に移して栽培する。
【インダクタンス】	電磁誘導の大きさを表す定数
【ウエハ・ツー・ウエハ接合】	ウエハ同士の接合。W2W接合とも略される。
【埋め込み酸化膜】	Buried Oxide (BOX)。シリコン、酸化膜、シリコンを積層した基板の酸化膜
【塩基置換容量】	塩基置換容量（CEC）とは、土壌のもつ負の電荷（陰イオン）の総量のことをいい、土が陽イオンの塩基肥料成分（窒素、石灰、苦土（マグネシウム）、加里（カリウム））を保持する能力（保肥力）を表す。CECの大きい土壌は肥料成分を多く保持することができ、生育後半まで養分を保つことができる。
【塩基飽和度】	塩基飽和度とは、塩基置換容量（CEC）に対して、塩基（石灰、苦土（マグネシウム）、加里（カリウム））が占めている割合を%で示したものである。土の保肥力に対してどのくらいの塩基があるのかを示す。塩基飽和度が100%以上の場合は、肥料分があふれている状態である。
【Au-Au 常温接合】	異種材料を接合する技術の一種で常温で接合できる。接合する材料の最表面にAu薄膜を形成したものをAu-Au接合と云う。
【エアシャワー】	作業員または衣服に付着している粒子状物質を強制的に吹き飛ばし除去するための装置。25m/s程度の流速で空気を吹き出す。
【エッチング】	化学反応を利用して金属膜等を削ること。液体を利用するものをウエットエッチング、気体を利用するものをドライエッチングという。

【エレクトレット】	誘電体内部に強制的に電荷を保持させたもののことであり、一度閉じ込められた電荷は半永久的に保たれる、という特徴を持つ。
【NLD プラズマ】	磁気中性線放電：Magnetic Neutral Loop Discharge、磁場がゼロとなるポイントが真空中に形成されるのが特徴。磁場ゼロのループ付近に濃いプラズマが形成される。
【FDTS 膜】	SAM 膜の一つ。perfluorodecyltrichlorosilane、 $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiCl}_3$ 。
【X 線 CT 装置】	線管と検出器の間で測定物を回転させながら X 線を透過し、全方向から透視画像データをコンピューターで断層像に再構成して表示する装置
【SOI ウェハ】	Silicon On Insulator の略。Si 基板と表面 Si 層の間に SiO_2 を挿入した構造のウェハ。
【温室効果ガス】	Greenhouse Gas (GHG)。大気圏にあって、地表から放射された赤外線の一部を吸収することにより温室効果をもたらす気体の総称。二酸化炭素、メタンなど
【温室効果】	大気圏を有する惑星の表面から発せられる放射（電磁波により伝達されるエネルギー）が、大気圏外に届く前にその一部が大気中の物質に吸収されることで、そのエネルギーが大気圏より内側に滞留し結果として大気圏内部の気温が上昇する現象
【換気回数】	クリーンルームの洗浄度を維持するためにクリーンルーム内の空気の入替えを行っており、その回数。対象となる空間に 1 時間あたりに供給される清浄エアの量を部屋の容積で割ったもので、1 時間あたりに何回、部屋の空気が入れ替わったのかを表す。
【灌液チューブ】	灌液チューブは、植物の 1 株 1 株単位で養液を供給できるチューブである。チューブの先端の小さな穴から点滴灌液を行なうことができる。
【緩衝層】	薄膜形成において基板と成膜する材料との結晶定数が異なる場合に、基板の上に形成し成膜材料との結晶の整合性をとる層のこと。
【開放電圧】	フォトダイオードにおいて、電流を流していない状態での電極間の電位差。
【カーボンフットプリント】	Carbon Foot Print (GFP) 製品やサービスのライフサイクルの各過程で排出された「温室効果ガスの量」を合算した結果、得られた全体の量を CO_2 量に換算して表示すること
【管電圧】	電子線を高電圧で加速し、陽極に衝突させて X 線を発生させる X 線源装置で、電子線に加える加速電圧。管電圧を高くすると X 線の透過性が高くなる
【管電流】	電子線を高電圧で加速し、陽極に衝突させて X 線を発生させる X 線源装置で、電子線による電流。管電流を高くすると X 線量が高くなる
【外調機】	外調機とは、外気負荷を処理する為の空調機。空調利用時の換気の際、外気を導入するが、そのままだと夏は暑く、冬は冷たい空気を取り込むため、空調システムに大きな負荷となる。そこで、主の空調機が取り入れる前に、外気をある程度の状態まで冷暖房や加湿などの処理を行うの設備。
【ガウスフィルタ】	注目画素に近いほど、平均値を計算するときの重みを大きくし、遠くなるほど重みを小さくなるようにガウス分布の関数 ガウス分布 を用いた処理
【機能性ナノ粒子】	ナノサイズの粒状物質の表面に修飾を行い機能を付加した粒状物質。
【強誘電体】	外部から電界を印加しなくても自発分極が存在し、電界によってその向きが変えられる材料。
【キャパシタンス】	電気容量の大きさを表す定数
【Q 値】	Quality Factor の略 共振の鋭さをあらわす値
【キャリアウェハ】	チップ仮配置のための輸送用の補強ウェハ。
【共振周波数】	固有振動数と同様
【クラス 10、100、1000】	クリーンルームの洗浄度を表す基準であり、1CF（キュービックフィート=1 辺が 1 フィートの立方体の体積を表す表記で約 28.3 リットルに相当）中のパーティクル数の上限値。つまり、クラス 100 のクリーンルームとは、28.3 リットルに含まれるパーティクルの数が 100 個以下ということの意味する。
【空気線図】	乾球/湿球温度/露点温度、絶対/相対湿度、エンタルピーなどを記入し、その中から 2 つの値を求めることにより、湿り空気の状態が分かるようにした線図。

【クラス・中間クラス】	空気清浄度の等級。通常クラス1~9であらわされる。1.1から8.9まで最小区切りを0.1とした中間クラスを使用することも可能。対象となる粒径に対する空気1m ³ あたりの粒子数の上限がクラスによって決まっている。
【クリーン度の傾向管理】	クリーンルーム内の場所に応じた局所的なクリーン度がどのような時間変化をしているかをモニタリングし、制御すること。
【空気取り込み機構】	市販のパーティクルセンサにおいて、ポンプを用いて、環境の空気を取り込むのが一般的であるが、ヒータで空気の対流を起こす熱式の取り込み機構も存在する。
【櫛歯】	ミラーを振らせるために必要な静電引力を発生させる部位。可動櫛歯と固定櫛歯が交互に噛みあうようにミラーの両端に配置される。
【顕熱/潜熱】	冷凍空調において物質を冷却または加熱する場合、温度が変わる熱と変わらない熱。温度が上昇下降する時に変化する熱が「顕熱」。顕熱に対して蒸発、融解、凝縮、凝固など、状態が変化するだけで温度が変わらない熱が「潜熱」。
【原単位】	二酸化炭素排出量の算定に用いる排出係数
【現像】	形成したい形状に露光させたレジストから必要な部分以外を除去すること
【コロナ荷電】	気体中における針・平板などの電極配置で印加電圧を大きくすると、ギャップに不平等電界が発生し、高電界部の電界が局部的に破壊電界に達した時に電離が起きる現象のことをコロナ放電という。この際、電極からは印可電圧が正電圧なら正イオン、負電圧なら負イオンが周囲に向かって発散するため、誘電体膜に直接電荷を打ち込むことが可能となる
【コンプライアンス】	ばね定数の逆数
【高環境負荷プロセスガス】	半導体加工で用いられるCF ₄ 、C ₂ F ₆ 、C ₃ F ₈ 、C ₄ F ₈ 、CHF ₃ 、SF ₆ 、NF ₃ 等
【固有振動数】	物体に強制変位を与えて開放した場合、物体は一定の振動数で振動する。固有振動数は複数あり、それぞれ振動モードに対応する
【コータデベロッパ】	ウェハにレジストを均一に塗布(コート)する装置と塗布されたレジストを現像(デベロッパ)する装置
【細霧冷却】	コータとデベロッパが一体化しているものが多い 細霧冷却方法とは、夏季の暑い日に温室の温度を下げるための方式である。水を噴霧するノズルとファンから構成される。
【サンプリングレート】	ADCに於いて、アナログ信号を測定しデジタル信号に変換する間隔であり、測定の速さを表す。
【散乱・散乱光】	光が粒子等に当たり、その周囲の様々な方向に光が広がること。周囲に広がった光を散乱光という。また、周囲への光の広がり方は、光の波長に対する粒子のサイズで決まり、光の波長に対して、粒子の粒径が十分小さい場合レイリー散乱、同程度の場合ミー散乱、十分大きい場合は幾何光学に従う。
【SAM膜】	自己組織化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer)。物質表面に自発的に化学吸着した単分子層膜。
【再構成フィルタ】	画像再構成の際に、対象物の周りのボケを低減するために行う画像フィルタ処理
【植物工場】	植物工場とは、環境及び生育のモニタリングを基礎として、高度な環境制御を行うことにより、野菜等の植物の周年・計画生産が可能な栽培施設である。植物工場には、完全人工光型と太陽光利用型がある。完全人工光型は、閉鎖環境で太陽光を用いずに栽培する設備である。太陽光利用型は、温室等において、太陽光の利用を基本とし、人工光による補光や夏季の高温抑制技術等を用いて栽培する設備である。
【硝酸態窒素】	土壌中の無機窒素は、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の3つの形で存在する。ただし、植物は硝酸態窒素だけしか、根から吸収して利用できない。通常、畑などにまかれた有機肥料の中の窒素成分は、当初アンモニア態窒素の状態である。アンモニア態窒素は、土壌中の硝酸菌(土壌微生物)の作用で、亜硝酸態窒素を経て硝酸態窒素に変換される。このため、硝酸態窒素になるまで時間が掛かる。一方、化学肥料(窒素)の場合には、最初から植物に吸収されやすい硝酸態窒素で利用される。
【焦電性】	強誘電体材料において温度上昇により自発分極が減少し、結晶表面に減少した分の電荷が発生すること。この特性を利用し、人体が発する熱を検知し人の存在を検知できる。人感センサとも呼ばれ広く普及している。

【真空紫外線】	120~160 nmの波長を持ち、大気圧下ではすぐに吸収されてしまうが、数 Pa 程度の低圧下において、軟 X 線よりも吸収率が大きい。
【4 面体要素】	連続体である物体形状を有限なサイズの 4 面体で分割した際の部分領域
【振動モード】	振動系の自由度によって決まる物体特定の振動形
【集中質点系モデル】	質量が 1 点に集中していると仮定している理想化したモデル。物体の変形などを無視している。
【人感センサ】	人感センサ（じんかんセンサ）とは、人間の所在を検知するためのセンサである。赤外線、超音波、可視光などが用いられる。
【蒸散】	植物内の水分が水蒸気として植物の外に排出される現象。気孔蒸散と表皮蒸散（クチクラ蒸散）があり、主に気孔の開閉によって排出量が調節される。
【JIS 規格 B 9920, Z 8122】	B 9920：クリーンルームの空気清浄度の評価方法が規定されている。 Z8122：クリーンルーム関連の用語が定義されている。
【蒸着】	金属や酸化膜などを蒸発させて、素材の表面に膜を形成する方法。
【ジャイロ】	物体の角度や角速度を検出するためのセンサ
【スパッタ成膜法】	薄膜形成技術のひとつ。真空チャンバー内に薄膜としてつけたい金属をターゲットとして設置し、高電圧をかけてイオン化させた希ガス元素（アルゴン等）や窒素を衝突させる。するとターゲット表面の原子がはじき飛ばされ、基板に到達して成膜することができる。また、真空チャンバー内にガスを導入し、これをはじき飛ばされた金属と反応させることによって化合物を成膜する手法を反応性スパッタ法と呼び、本研究における W03 成膜はこの方法に属する。
【垂直エレクトレット】	例えば、MEMS 技術により作製された櫛歯型構造の側壁へ蒸着した材料に、荷電をしてエレクトレットにしたもの。
【スキヤロッピング】	スキヤロップともいう。BOSCH プロセスで生じる、エッチング側壁のうねりのこと。
【スティッキング】	微細な構造体が基板や他の構造体に付着してしまう現象。
【選択的表面修飾】	ある基板（固体表面）に対し、異種材料の分子またはナノ粒子が、基板表面の材料および状態に応じ、選択的に配置・結合する現象または性質。たとえば無機材料基板上の希望の位置にタンパク質などの生体分子を配列する技術により従来にないデバイスの実現が可能となる。
【静電容量型】	動作原理に静電容量の変化を応用したもの
【精製窒素】	精製装置により窒素ガスの純度を高めたもの
【ソフトウェアアーキテクチャ】	ソフトウェアの内部構造、それらの外部特性、またそれらの相互関係、等
【多重反射】	一つの光線が構造物で複数回反射すること。ここでは、フォトダイオード表面にあるマイクロ構造で複数回反射することを意味する。
【耐摩耗プローブ】	摩耗特性に優れたプローブの総称。摩耗や損傷しにくい材質及び構造などを有するプローブを指している。
【ダイヤモンド構造】	MEMS 技術によって、センサ部の下部の Si 基板をエッチングすることで、薄膜化した構造。このような構造にすることで、熱容量が小さくなり、加熱が必要な半導体ガスセンサにおいては、ヒーターの消費電力を小さくすることができる。
【ダウンフロー】	FFU によって送り込まれた空気の流れ。FFU は天井に設置されており、床に向かって浮遊粒子を落としている。したがって、天井から床に向かって流れが生じるため、ダウンフローと呼ばれる。目的とする清浄度によるが、ダウンフローの流速は 0.3m/s 程度である。
【逐次比較型】	ADC の変換方式の一つ。他方式と比較して間欠的な測定に向くが、サンプリングレートを高くし難い。
【逐次サンプリング法】	空気清浄度の簡易な評価方法。一定量の空気を逐次サンプリングし、サンプリング空気中の微小粒子の累積個数を逐次サンプリング評価線図と比較して、清浄度クラスへの適合、不適合、サンプリング続行の判定をし、適合または不適合が判定された時点でサンプリングを終了する評価方法。

【中性粒子ビーム】	プラズマ中に含まれるイオンを加速し中性化アパーチャを通すことで得られる。通常のプラズマ（連続放電プラズマ）を用いても得られるが、パルスプラズマに含まれる負イオンを用いることで99%以上の高い中性化率が得られる。電荷を持たない粒子で加工するため、電界によってビーム粒子の軌道が影響されず、微細加工が可能である。ラジカルとは異なり、方向性と運動エネルギーを持っているために垂直加工が可能である。さらにプラズマとは異なり紫外線放射がほとんどないため、物質中に欠陥を生成しない。
【超低損傷エッチング】	一般的なプラズマエッチングでは異方性加工が可能であるが、電荷を持った粒子により加工を行うため、チャージアップによって加工対象に絶縁破壊などの損傷を与えることがある。また、プラズマ加工ではプラズマから照射される紫外線が物質に侵入し、化学結合を切断する（欠陥を生成する）。中性粒子ビームによって、これらの損傷をほとんど与えることなく加工が可能である。
【チップ・ツー・ウエハ 接合】	ウエハ上へのチップの接合。C2W 接合とも略される。
【徒長率】	徒長とは、植物の茎が不要に長く伸びた状態のこと。
【等方性エッチング・異 方性エッチング】	対象物のすべての方向に一樣な速度でエッチングが進むものを等方性エッチング、エッチング速度が方向によって異なるものを異方性エッチングという。
【透過画像】	X線を物体に照射し、物体を透過したX線の減衰係数の分布を、空間的に多数配置された検出器を用いて取得したもの。おおよそX線の減衰係数は物質の密度と相関があり、レントゲン写真のような2次元X線透過像のようなもの
【ドライコイル】	クリーンルーム内には、さまざまな生産機器が各所に配置され、発熱するタイプのものがある。そうした環境の中で緻密な温度管理を行うための設備。
【土壌灌水】	土壌灌水方法とは、土壌に水を注ぐ方法である。注水する水の量を制御することにより、トマトなどの果実の糖度を上げることが可能となる。
【ドメイン】	強誘電体材料において分極方向が一方向に揃っている領域。分域とも云う。
【軟X線荷電】	気体に波長が0.1~10 nmの軟X線を照射すると気体が電離し、生じたイオンや電子をバイアス電圧で分離して荷電を行うものである。
【ナノトライボロジー】	原子レベルの極微小なスケール領域におけるトライボロジー。摩擦や摩耗を扱う学問分野を総称してトライボロジーと呼ぶ。接触面積数10nm~数nmの極微小なトライボロジーにおいては、超潤滑現象を始めとするこのスケール特有の現象が観測され、その評価技術の確立及び挙動モデルの構築が求められている。
【Ni電鍍】	電気による化学反応によって電着する技術で、金属溶液の電気分解によりマスター盤に所望の厚さの金属を析出させ電着させた後、この電着層を母型から剥離し、金型または製品・部品として用いられることを指す。なかでもNi電鍍が主流で、レコードの原盤作成等のスタンパーとして用いられる。近年では光ディスクや半導体等でも用いられる古くて新しい技術である。
【熱源】	空調設備に必要な冷水や温水を製造する設備。冷熱源設備としては、蒸気圧縮冷凍機、吸収式冷凍機、吸着式冷凍機、ターボ冷凍機などがあり、温熱源設備としては、ボイラーなどがある。
【熱拡散・ドープ・ドー プ層】	シリコン表面に熱をかけ、リンやボロンなどの不純物を拡散させること。また、シリコン表面に不純物が拡散されている領域をドープ層という。
【熱酸化】	酸素を加えながら、シリコンウエハに熱を加えてシリコンの表面を酸化すること。
【ネットリスト】	電子回路における端子間の接続情報
【パーティクル】	クリーンルームやクリーンブース、ベンチ内の目に見えない微小なゴミ・チリ・ホコリ。
【半導体ガスセンサ】	WO ₃ , Sb ₂ O ₃ , ZnOなどの金属酸化物半導体の表面でのガスの吸着・反応による電気抵抗の変化を利用して、ガスを検知するセンサ。検知膜の材料、補助触媒等の添加、動作温度等を最適化することにより、様々なガス種の検知に対応することができ、小型・高感度・低消費電力・低コスト・長寿命等の特徴を持つ。
【配向性】	薄膜において基板面上方へ成長する結晶軸の分布度合い。完全配向では結晶の軸が揃っている。

【発塵量】	クリーンルーム内の装置や作業から生じるパーティクルの量。人が出入りすることでクリーンルーム内の発塵量は変化する。変化する発塵量に応じてFFUを制御し、クリーンルームの消費電力を抑えるということがコンセプト。
【ハードスプリング効果】	構造で規定される機械的なばね定数よりも実効的にばね定数が高くなること
【バブラー】	乾燥したガスを水の中を通過させることで、ガスを加湿する装置。バブラーを通過した後のガスはバブラーの温度における飽和水蒸気量の水分を含んだガスとなり、バブラーの温度を制御することで、ガスの湿度を制御することができる。
【バルクシリコン】	通常のシリコンデバイスに用いる単結晶シリコンウェハをSOIウェハと区別してバルクシリコン（あるいはバルクシリコンウェハ）と呼ぶ。
【パーティクル・浮遊粒子】	個体または液体の粒状小物体と定義される。インダストリアルクリーンルームにおいて、ワークから生じる金属粒子、人から生じる皮脂等が主な測定対象パーティクルとなる。クリーン度の分類は、0.1~5 μmの範囲における粒径以上の累積個数濃度によって行われる。
【パーティクルセンサ・パーティクルカウンタ】	パーティクルの数・粒径をはかるための計測器。市販のものは空気中のパーティクルに光をあて、その散乱光からパーティクルの数・粒径を算出する光散乱式が採用されている。
【非鉛系強誘電体】	代表的な強誘電体材料であるPZTは主成分として鉛(Pb)を含んでいるが、鉛を含まない強誘電体材料のこと。非鉛系強誘電体材料としてはバナチウム酸バリウム(BaTiO ₃)やニオブ酸カリウム-ナトリウム((K, Na)NbO ₃)がある。近年鉛を含む家電製品等の廃棄処理に対して環境問題が懸念され、非鉛系強誘電体材料の開発が関心を集めている。
【拡がり抵抗顕微鏡・SSRM】	Scanning Spread Resistance Microscope。試料にバイアス電圧を印加し、導電性探針を通して流れる電流を計測することで、試料の抵抗分布を計測する方法。
【ビーム（トーションビーム）】	ミラーの両端に対称に配置され、ミラーの回転軸となる。
【PFCガス】	Perfluorocarbonガス。半導体工場においてエッチング剤や洗浄剤として使用されているガスで、高い温暖化係数を持つ。CF ₄ 、C ₂ F ₆ 、C ₃ F ₈ 、C ₄ F ₈ 、CHF ₃ 、SF ₆ 、NF ₃ 。
【フリークーリング】	フリークーリングとは、外気温度の低い冬期に冷却塔単独で空調や生産装置の冷却に使われる冷水を製造するシステムのこと。冷凍機を用いずに冷水を作ることができるため大きな省エネルギー効果が期待できる。
【冬季暖房】	冬季暖房方法とは、冬季の外気温が低くなったときに、温室を暖房する方法である。暖房装置としては、温風ボイラー、ヒートポンプなどがある。
【フェムト秒レーザー】	レーザーの種類で、パルス幅がフェムト秒オーダー、波長800nmのレーザー。透明材料の内部加工ができる。
【フォトリソグラフィ】	感光性物質を塗布した物質の表面に特定のパターンを持った光を当てることで、光が当たった部分と当たっていない部分のパターンを表面に形成する技術。
【不純物ドーピング】	半導体の電気特性を変化させるために不純物を添加すること
【浮遊容量】	半導体間の相互作用により発生する意図しない容量成分
【雰囲気流体】	物体周辺の気体（雰囲気）を流体としての扱う場合の、流体
【プローブリソグラフィ】	nmサイズの微小プローブ先端直下で試料表面の電気化学反応を誘起し、固体基板表面に微細パターンを描画する技術の総称。 陽極酸化反応による金属・半導体表面への酸化膜パターン形成のほか、有機分子膜へのパターン描画等の実例もある。 次世代ローコスト&微細リソグラフィ技術として期待されている。
【プローバ】	ウェハ上の電極へ電気探針を当てる装置
【プラズマ表面活性化接合】	固体表面をAr、O ₂ などのプラズマにて活性化した接合。低温で異種材料の接合が可能となる。
【ペルチェ素子】	2種類の金属の接合部へ電流を流すと、金属間で熱が移動する現象を利用した素子。一方の面で発熱、他方の面で吸熱が生じるため温度制御素子として広く使われている。
【補光照明】	補光照明方法とは、冬季の日射量が少ない場合に、人工光にて日射量を補う方式である。人工光としては、ナトリウムランプやLEDが利用される。

【ホットエンボス】	型を用いて樹脂材料などを加熱及び加圧して成型する技術。
【ボッシュプロセス】	シリコンの深堀エッチング技術。エッチングと側壁の保護を交互に行いながら高アスペクト比のエッチングを行うことができる異方性エッチング法。
【ポリウムメッシュ】	物体の内部構造をポリゴンで表したもの
【ポリマー(PMMA など)】	2つ以上のモノマーが重合反応してできる化合物で、多数のモノマーが数多く連なって形成された高分子をいう（透過性の高いポリマー材料であるアクリル樹脂 (poly methyl methacrylate)）。ポリマー材料は、①大変位（ヤング率が小さい。シリコンの約 1/50）、②非脆性（壊れにくい）、3D 微細加工の容易性などの特徴を持つ。
【ポリゴン】	一般的には、多角形を表す。ここでは特に、3次元形状を4面体の組み合わせによって表すときの各4面体要素。
【マスフローコントローラー】	流体の質量流量を計測し流量制御を行う機器。流体の流量計測には主に“体積流量”と“質量流量”が用いられているが、質量流量は、流体の質量（重さ）を計測する事により、環境温度や使用圧力等の変化による補正を行う必要がなく、半導体プロセスをはじめ、高精度な流量計測・制御を要求されるプロセスにおける流量制御機器として幅広く使用されている。
【マルチプローブアレイ】	マルチプローブがアレイ状に配列されている状態。 プローブの先端に複数の機能部を有するマルチプローブがアレイ上に並んでいるものである。高スループットが期待できるため、プローブリソグラフィなどへの応用が盛んに研究されている。
【Marching Cubes 法】	コンピュータグラフィックスのアルゴリズムのひとつ。スカラーデータで埋まった等方向3次元ボクセルデータを、ポリゴンデータに変換するアルゴリズム
【マスク】	マスクの有無により加工の選択比の違いを利用した加工に用いる
【ミー散乱】	光の波長に対し、光が当たる対象となる粒子のサイズが同程度の場合の散乱現象。本研究では、ミー散乱が支配的な散乱現象となる。
【迷光】	機器内での屈折や反射等で予期せず発生した光線のこと。
【メディアンフィルタ】	局所領域における濃度値を小さい順に並べ、真ん中にくる濃度値を領域中央の画素の出力濃度とする処理
【ヤング率】	弾性範囲で単位ひずみあたり、どれだけ応力が必要かの値を決める定数
【有効bit数(Effective Number Of Bits: ENOB)】	ADCに於いて、雑音・入力周波数を考慮した有効分解能であり、測定の正確さを表す。
【ユースケース図】	システムには、どのようなアクタ（利用者）が存在するのか、それぞれのアクタはこういった操作（ユースケース）をするのかを記述した図
【ユーティリティ】	クリーンルーム内で共通で利用される設備。圧縮空気、バキュームライン、空調、等
【養液土耕】	培地に土やロックウールを利用し、水に肥料を溶かした養液を用いて栽培すること。
【ライフサイクルアセスメント】	Life Cycle Assessment (LCA)。製品やサービスに対する資源の採取から製造、使用、廃棄、輸送などすべての段階（ライフサイクル）を通して、投入資源あるいは排出による環境負荷を定量的、客観的に評価（アセスメント）する手法である。
【リン酸吸収係数】	土壌にはリン酸を吸着して無効化する性質があり、その強さを表わすのがリン酸吸収係数である。リン酸吸収係数が大きい程、リン酸を吸着し無効化する性質が大きくなり、リン酸が作物に利用されにくい。
【流量センサ】	ここでは、MEMS カセンサを用いた流量センサを想定。流路の上流と下流の圧力差をカセンサで計測し、圧力差から流速を算出。流路の断面積をかけることで流量が求められる。
【リバースエンジニアリング】	一般的には、出来上がったものの観察や動作解析により製造方法や動作原理、設計情報を調べること。ここでは特に、出来上がったものの形状をCAD形式のデジタルデータにすること
【冷却塔】	冷却塔とは、水などの熱媒体を大気と直接または間接的に接触させて冷却する熱交換器の一種で特に屋外に設置する設備。
【冷却水ポンプ】	冷却水ポンプは、冷凍機（ターボ冷凍機・冷温水発生機）で冷房時に発生する熱を冷ます為の冷却水を冷却塔に循環させるポンプ。

【冷水ポンプ】	冷水ポンプは、冷凍機で製造した冷水を外調機などの空調設備に送るポンプ。
【冷水・冷却水一定流量制御】	冷凍空調負荷に関係なく一定流量でポンプを運転する制御方式。
【冷水・冷却水変流量制御】	冷凍空調負荷に応じて流量を減らすことにより搬送動力の削減を図る制御方式。流量を削減する方法としては、インバータなどによりポンプやファンの回転数を下げる方法や絞りやダンパによって流路の抵抗を大きくする方法がある。
【レシピ】	装置の制御情報
【レジスト剥離液】	レジストを剥離するための溶液
【六フッ化硫黄】	常温大気圧において化学的に安定度の高い無毒、無臭、無色、不燃性の気体。100年間の地球温暖化係数は、二酸化炭素の 23,900 倍と大きく大気中の寿命が長いため、京都議定書で削減対象の温室効果ガスの 1 つに指定された。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与することの意義

MEMS 技術は、自動車、各種製造機器、情報機器、通信機器、セキュリティ、バイオ、医療環境などの広範囲な分野において、わが国の産業競争力強化に貢献している。現在 MEMS は高集積化・複合化による高機能化・低コスト化を推進し、その役割を拡大させようとしている。(図 I-1.1-1)

一方で、経済がグローバル化し、コスト・質という面で多くの国が我が国と競争可能になっている現在、我が国優位な競争力を今後も維持していくためには、イノベーションを促進することが非常に重要であり、電子部品・デバイスの小型化・高性能化に大きく寄与している MEMS 技術は、その有力な手段である。そうしたことから、社会にイノベーションを起こし、将来の社会に革新的インパクトを与え、新たなライフスタイルを創造する未来デバイスの開発が不可欠である。そして、この未来デバイス実現のキーとなるのが、従来の延長線上ではない、不連続な進歩（ジャンプアップ）が期待される創造的な研究開発であり、わが国のお家芸である微細加工技術と近年進展著しいナノテク、バイオとの融合であるプロセスインテグレーションや、従来の半導体製造技術の応用ではなく高速、低コストで連続形成可能な新たな製造技術である。このため、将来の第 3 世代 MEMS である革新的次世代デバイス（BEANS : Bio Electromechanical Autonomous Nano Systems）の創出に向けた新たな基盤的プロセス技術群を開発し、プロセス技術群のプラットフォーム化を確立することを通じて、わが国産業の国際競争力の強化を目指すとともに、新たな産業化を促進するための環境整備を行う必要がある。「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」(以後、BEANS) は、20 年後の社会の国家的課題である「環境・エネルギー」、「医療・福祉」、「安全・安心」分野で新しいライフスタイルを創る革新的デバイスを創製するために必要となる、トップダウンである微細加工プロセスとボトムアップであるナノ・バイオプロセスとを融合させたマイクロ・ナノ統合製造技術の確立を狙いとする世界でも類を見ない壮大で挑戦的な試みであり、NEDO が関与する意義が高いと考える。

今回の事後評価の対象テーマである、BEANS の研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」(以後、G デバイス) は、全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が国や産業毎に強く要請されている中、平成 21 年度補正予算（第 2 号）「明日の安心と成長のための緊急経済対策」を実施するために措置された「環境・エネルギー技術への挑戦」に位置付けられた事業であり、NEDO はこれに早期に対応すべく BEANS に追加して緊急に実施したものである。研究開発期間は平成 22 年 3 月から平成 23 年 3 月の約 1 年間、予算額は 33.1 億円であった。

進化するMEMSデバイス 第3世代MEMS:BEANS



図 I-1.1-1 第3世代MEMS: BEANSの位置付け

(Bio Electromechanical Autonomous Nano Systems :

異分野融合型次世代デバイス及びその製造技術) 出典 (財) マイクロマシンセンター

1.2 実施の効果

BEANSの成果を活用した革新的次世代デバイスとして超小型高感度センサがあげられるが、この超小型高感度センサは、我が国の産業が今後発展すると期待される分野である医療・バイオ、環境などに不可欠であり、幅広く活用・搭載されることで製品に競争力を与えるものであり、経済再生への貢献は大きい。BEANSで開発する新規製造技術は、MEMSの機能を飛躍的に向上させ、グルコースモニタや膵島細胞移植などの成人病治療に貢献し、全自律分散電源や超高感度センサによるセンサネットワークの実現が可能となり、安全・安心・快適な生活をもたらす新たな産業の創出が期待される。

今回の事後評価の対象テーマである、Gデバイスでは、BEANSで開発したプロセス技術等を活用しつつ、高機能センサネットワークシステム・センサモジュールの実用化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向けた開発・実証研究を行うことにより、BEANSの早期の実用化が期待できる。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

図 I-2-1 の MEMS 産業・技術ロードマップで示すように、MEMS は自動車、各種製造機器、情報機器、通信機を中心に広範囲な分野において現在の小型・高性能単機能

デバイスが既存部品を置き換えた第1世代から、2010年を目指し高集積化・複合化による多機能デバイスの創出を狙う第2世代MEMSの研究開発へと移行している。そして2015年以降2025年に向けて、革新的イノベーションを起こし、更なる市場の拡大を図るには第3世代MEMSの実現が望まれる。

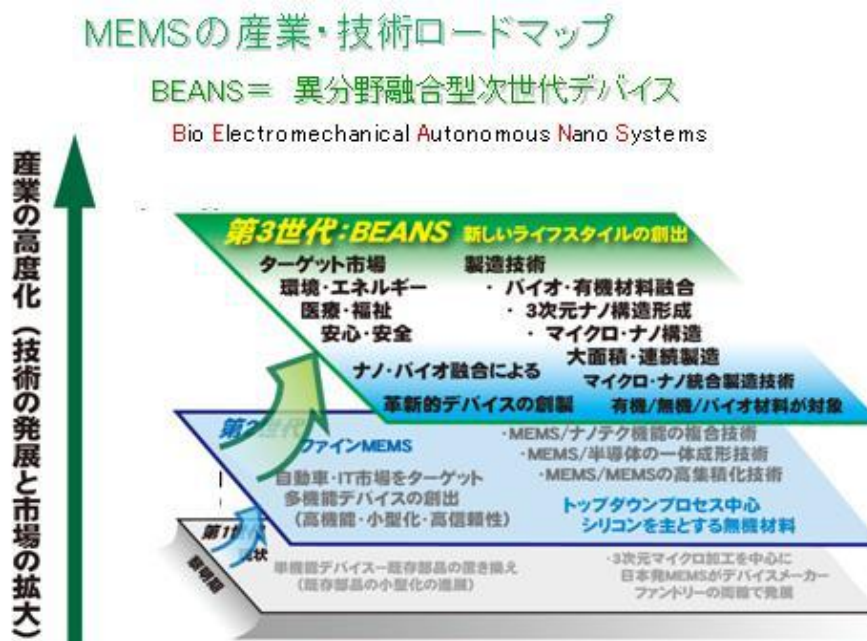


図 I-2-1 MEMS 産業・技術ロードマップ
(財) マイクロマシンセンターの資料を基に NEDO 編集

また、図 I-2-2 に MEMS 技術のロードマップを示す。ここでは、今後、ユビキタスセンサネットワークデバイスなどに貢献する革新的 MEMS の開発が求められており、BEANS の使命である、新しくライフスタイルを創出する革新的デバイスを創製するために MEMS の異分野技術を融合したプロセス技術群を開発することと合致している。

MEMS分野の導入シナリオ

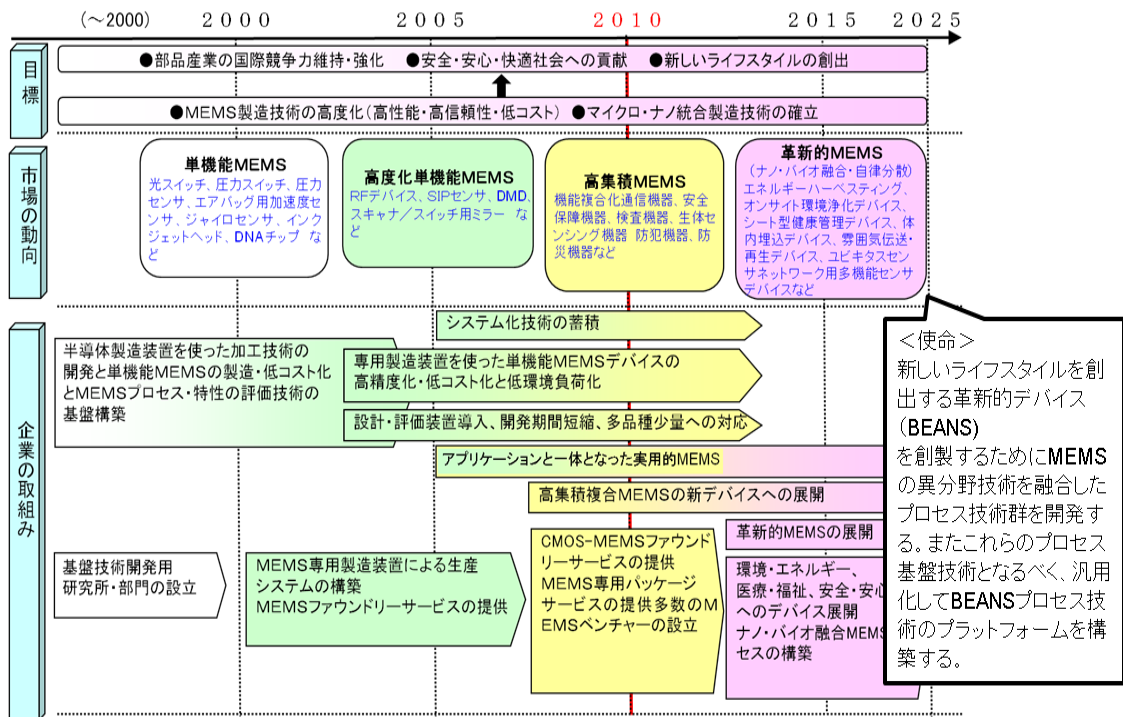
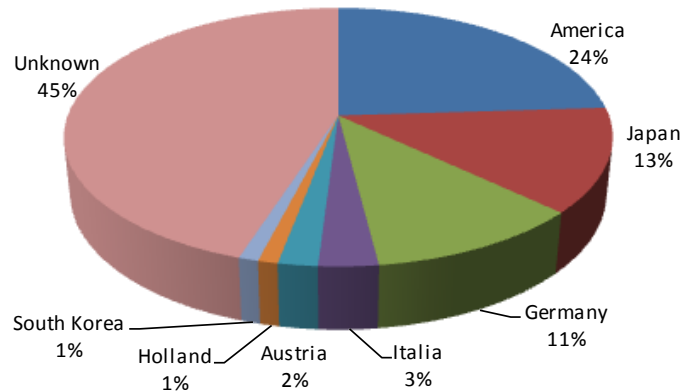


図 I-2-2 MEMS 技術ロードマップ

また、国のプログラムにおける位置付けについては、経済産業省「ロボット・新機械イノベーションプログラム」に BEANS が位置付けられており、プログラムの達成目標である「我が国製造業の高度化に必要な不可欠な基盤技術である機械分野においては、バイオ技術や IT 技術などの異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造及びその計測技術の確立を図ることを目標とする。例えば、2015 年頃に革新的 MEMS の本格普及を目指すことにより、安全・安心な社会の構築に貢献する。」に対して、BEANS では、①異分野融合による革新的 MEMS の実現、②途中段階でも実用化が可能な研究成果については、スピンアウトし実用化を促進、③健康・医療への応用、という面において上位のプログラムの目標達成に貢献できる。

海外動向については、図 I-2-3 に示すように、日本は、センサ・MEMS では、世界トップクラスのシェアを占めつつも、欧米各国と激しい競争が行われている。また、今後のセンサ・MEMS 市場の成長については、大きく伸びることが予想され、G デバイスを実施することによって、BEANS で開発したプロセス技術等を活用し、成果をいち早く創出することで国際競争力強化に資することが出来ると考えられる。

世界シェアTop20のメーカーの占める世界シェアを国別に整理
(2010)



Databeans の資料をもとにNEDOが作成

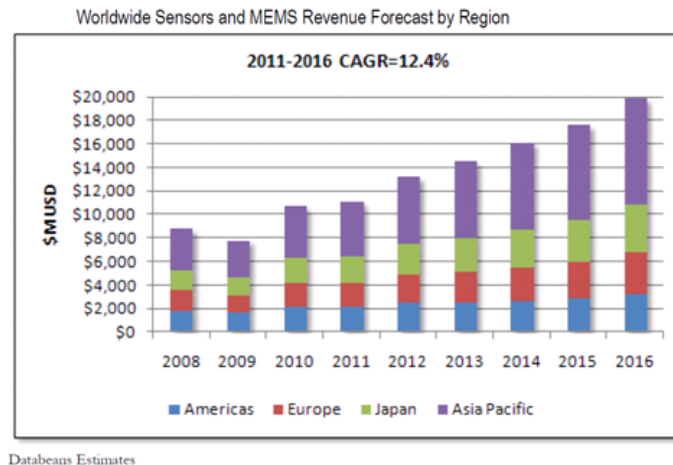


図 I-2-3 センサ・MEMS のシェアと市場成長予測、出展：Databeans, Inc.

その様な中、全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が国や産業毎に強く求められ、BEANS の研究開発項目⑤として G デバイスを平成 21 年度補正予算で約 1 年間実施した。

事業の背景として、工場等の製造現場において、原材料や使用資源のきめ細かい状況モニタリングと制御を行う微細・極小、高機能なセンサの実用化により、製造プロセスの省資源化、高効率化の実現が期待されている。小型で低コスト、かつ信頼性の高いワイヤレスセンサとすることで、設置にあたっての大がかりな工事を必要とせず、既存施設にも低コストでの導入が可能となる。合わせて、センサの製造において低環境負荷型の製造プロセス技術の開発を行うことで、生産システムの低炭素化にも貢献が可能となる。

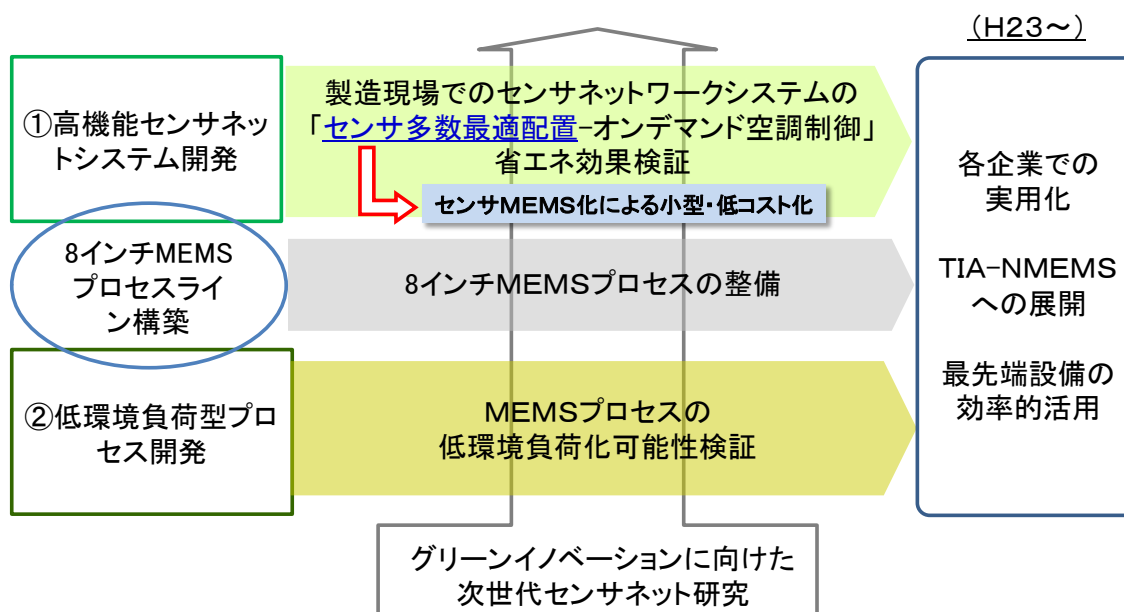
そこで、G デバイスは BEANS で開発したプロセス技術等を活用し、高機能センサネットワークシステム・センサモジュールの実用化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向け

た開発・実証研究を目的として実施した。具体的には、センサネットにより全ての機器類の消費電力等を「見える化」して、将来の省エネ社会に役立てようとするものであり、特に、消費電力が大きいと考えられる MEMS 関連のクリーンルームにセンサネットを張り巡らし、省エネを図るという近未来のエネルギー問題に先鞭を付けるものである。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」(以後、BEANS)のうち、今回の事後評価の対象である研究開発項目⑤「高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発」(以後、Gデバイス)は、MEMS技術戦略マップ2010のロードマップを踏まえつつ目標を設定して実施した。図II-1-1に示すように、高機能センサネットワークシステム開発として製造現場に多数のセンサを配置したセンサネットワークシステムを構築し、空調制御することで省エネ化の有効性や、多数配置可能なMEMSセンサ端末課題の把握を行うことと、MEMSプロセス自体の低環境負荷化を目標とした。そのための製造環境(大口径MEMSプロセスラインなど)の整備や、大口径MEMSプロセスの開発等を行った。大口径MEMSプロセスラインの整備は、我国の研究開発拠点(つくばイノベーションアリーナ(TIA-NMEMS))への展開も可能である。



図II-1-1 Gデバイス グリーンイノベーションにおける目標・実施内容の位置づけ

① 高機能センサネットワークシステム開発

検証用のクリーンルームにおいて、従来比(1990年比)CO₂削減60%のセンサネットワーク制御システムを開発する。また、一辺30mm、厚み10mm以内に複数のMEMSセンサと処理回路、無線回路、エネルギーデバイスとの融合を想定したセンサモジュールプラットフォームを作製する。

これらの取り組みや目標に関してはMEMS技術戦略マップ2010の応用事例としてその重要性が取り上げられ、既存の半導体クリーンルームで未達成のCO₂削減量であり、複数のセンサ機能を搭載したモジュールを目標サイズで達成した例はない。

② 低環境負荷型プロセス技術開発

シリコン貫通深掘り加工において、温室効果ガス排出量削減に向けて、温暖化係数の高いSF₆ガスに対し、複数の代替候補ガスを調査・検討し、温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。また高機能デバイス薄膜の集積化に関し、250℃以下で大気圧付近から真空中で封止できる接合方式を決定する。さらに生体適合性ポリマーの機械特性などの数値を求める。

深掘りエッチングにおけるSF₆の代替ガスや低温接合によるフレキシブル集積化は従来から課題視されていたものの未達成領域であり、ポリマーのMEMS化を含めMEMS技術戦略マップ2010のロードマップ数値をクリアすることを狙いとする。

大口径MEMS用試作ラインにて、センサ用途等TEGの設計および試作を複数種類行い、歩留まり、生産性につながるデバイスの動作を妨げる製造装置、製造プロセス、デバイス構造起因の欠陥・ばらつき等の課題を抽出する。異分野融合型次世代デバイス製造技術プロジェクトの研究開発項目「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果である中性粒子ビームエッチングをセンサTEGに適用し、デバイス性能への効果を検証する。

設計・計測・ファブ環境情報において共有化する情報を類型化し、データ共有化のためのデータフォーマット、それに付随する基本ソフトウェアの開発を行い、MEMS-TEGを用いてデータ交換および設計手法の検証を行う。また、クリーンルームおよび製造・検査装置に関わる消費エネルギー、CO₂排出量など環境情報の収集管理の方法を決定する。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

基本計画に示す研究開発の内容は、以下のとおりである。

(1) 高機能センサネットワークシステム開発

大口径MEMS用クリーンルームにおける各製造・評価装置や空調、純水製造等の周辺装置の消費エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどをセンシングすることにより、省資源、高効率に最も適した集積化センサチップ及びセンサネットワークシステムを検証し、省エネルギー、低炭素化などに関する効果を分析するための、センサネットワークシステムを試作する。

また、低環境負荷型及び異分野融合型次世代デバイス製造技術で開発したプロセス技術を活用した高機能集積化センサチップの開発に向け、ワイヤレス通信、エネルギーのワイヤレス自立、小型・薄型化と、エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどの高感度センシング機能、新たなセンシング原理を開発し、これらの数値を収集する。

この内容を受けて取り組んだテーマは以下の通りである。

1) 8 インチ MEMS クリーンルームセンサネットワークシステム開発

産総研つくば東事業所に新設した 8 インチ MEMS 用クリーンルームをセンサネットワークの実験場として、各製造・評価装置や空調装置、純水等の周辺装置の消費エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどを現状のネットワークシステムと現状のセンサ群の多数配置によるきめの細かいセンシングネットワークシステムを試作・検証した。

その結果、エネルギー消費量 60%削減を含め、フィードバック制御を想定した省資源、高効率生産に最も適したセンサネットワークシステムのあるべき姿を示した。

2) 8 インチ MEMS プロセスライン及びクリーンルームの構築

異分野融合型次世代デバイス製造プロセスの実証及び集積化 MEMS センサデバイスの試作を可能にする 8 インチシリコンウェハベース MEMS ラインを産総研つくば東事業所内に構築した。また、これをセンサネットワークシステムの実験場として活用した。

装置には、MEMS/LSI の前工程から後工程、評価までカバーする一貫ラインとして、ウェハの洗浄、リソグラフィ、拡散、酸化、成膜、エッチングから、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、さらに、デバイス表面及び内部の形状評価までを実施する装置を導入した。

3) 植物工場センサネットワークシステムの開発

東京農業大学内に植物工場を新設し、そこをセンサネットワークシステムの実験場として、野菜の育成状況を温度、湿度や照度と植物工場の稼働に必要な消費エネルギーを現状のネットワークシステムとセンサ群を多数配置し、きめ細かなセンシングネットワークを試作・検証することにより、省資源、高効率生産に最も適したセンサネットワークシステムを検証した。

4) 高機能センサモジュール技術開発

自立型ワイヤレス MEMS センサ端末に関し、モジュール試作及び想定モジュールのプラットフォームを検討した。センサ（温度、湿度、圧力、加速度など）の追加、差し替え可能なプラットフォームモジュールに関する課題を明確化した。

さらに、自立型ワイヤレス MEMS センサに必要なセンサ処理 LSI の低消費電力化の検討と試作を行った。

また、新たなセンサデバイス原理の可能性を検討する目的で以下を実施した。

- (i) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発の実証 ナノ構造ガスセンサ
- (ii) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発の実証 低消費電力センサ・無線モジュールへの検討

- (iii) パーティクルセンサの MEMS 化
- (iv) 汚染ガスセンサ
- (v) 振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス
- (vi) センサ用パワーマネジメントデバイス
- (vii) 位置推定センシング原理
- (viii) 高感度温度センシング用機能薄膜

(2) 低環境負荷型プロセス技術開発

シリコン貫通深掘り加工において、温室効果ガス排出量削減に向けて、温暖化係数の高いSF₆ から代替ガスへの切り替えと、エッチレート高速化によるガスの消費量低減およびエネルギー消費効率の向上など環境負荷の小さい高効率なエッチングプロセスの開発をする。

また、ウェハ・ツー・ウェハとチップ・ツー・ウェハ技術を組み合わせて、ウェハサイズ、チップサイズ、チップ厚さに関わらず、様々な異種デバイスをウェハレベルで一括集積化する技術も開発する。さらに、従来のシリコンに比べ高い機械特性を有するポリマー材料を使ったMEMSを開発するとともに、従来のシリコンMEMSと異種材料MEMSとの多層集積化技術を開発し、環境負荷低減プロセスを提示する。

さらに本プロジェクト成果のデバイス機能検証のためのTEG(Test Element Group)ウェハを設計開発及び試作すると共に、大口径TEGのデバイス・プロセス設計及び試作を行う。

3次元構造かつ可動部から構成される高機能センサ製造に不可欠となる設計—検査間の情報共有化フレームワークを構築し、そのフレームワーク上でマスク、3次元構造、及び機械的・電気的特性に関する設計情報を製造・検査に利用するだけでなく、非破壊検査装置の計測データを設計にフィードバックし、歩留まり・品質、スループットの向上を図るとともに、製造設備の電力使用量や温室効果・有害ガスの排出量などのデータを活用し、デバイス設計時から環境負荷を考慮した情報共有化技術を開発する。

これらを受けて以下の取り組みを実施した。

超小型・低コスト集積化 MEMS 開発に向けた低環境負荷型製造プロセス技術に関して以下の開発課題に取り組んだ。

1) 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発

従来のシリコンを中心とする無機ドライ材料に加え、有機材料の持つ特異な機能を活かす融合プロセスに関して、特にアクチュエータ MEMS の性能予測が可能なシミュレーション技術及びナノインプリントによる製造プロセスの開発を行った。

2) スマートプロトタイピング技術開発

新設した 8 インチ MEMS プロセスライン活用のためにプロセス条件の確立、レシピの整備等、プロセスプラットフォームの構築が重要となる。特に、異分野融合型次世代デバイス製造プロセスの実証及び集積化 MEMS センサデバイスの試作が可能となるよう、以下の開発課題に取り組んだ。

①シリコンベースセンサ TEG の試作

8 インチ MEMS プロセスラインの各装置の要素プロセスの検討及びセンサ TEG の試作を行った。

②異分野融合型次世代デバイス製造技術を適用したデバイスの作製

(i) 中性粒子ビームエッチング技術をセンサ TEG の製造プロセスに適用し 8 インチ化によるウェハ内の特性ばらつきを検討した。

(ii) 新構造マルチプローブ作製及びナノトライボロジーの評価の研究成果を実証するため、マルチプローブの特性ばらつきの抑制、先端部サブミクロンサイズの試作、マルチプローブ評価装置導入による形状・特性のばらつきを評価した。

③欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術の開発

8 インチ MEMS プロセスライン等で作製するセンサ TEG を設計し、製造、評価を経て得られた情報を収集・整理した。デバイス特性の欠陥やばらつき、更には電気的特性への影響要因について、等価回路モデルを活用してモデリング化し、デバイス特性のばらつき要因等を特定する評価手法を開発した。

3) 低環境負荷型深堀エッチング技術開発

シリコン深堀エッチングにおける低環境負荷化への取り組みとして、基本計画に基づき、SF6 排出量 90%削減に向けた代替ガスの選定指針の検討、リアルタイムモニタリングによるエッチングの高効率化、フィードバック制御手法を用いたエッチング最適化に関し検討した。

4) 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発

MEMS 集積化に不可欠なチップ、ウェハ接合技術の低環境負荷化として、250°C以下の低温接合を基本として、一括集積化のための 1/10 強度の仮接合技術に関しての表面粗さ、表面改質の検討、による本接合における機能膜の活用などについて検討した。

5) スマートファブシステム技術開発

①MEMS 固有の 3 次元構造の設計・計測情報の共有化技術

形状計測データ等を設計ツールで利用するためのデータ変換技術の課題抽出、プロセスレシピ・動作特性などを登録・参照できる MEMS 統合設計データベースシステムの基盤を構築、設計・計測データ、MEMS 統合設計データベース、MEMSONE 等の設計ツール等と連携して活用するための情報共有化フレームワークの要求仕様

を作成した。

②スマートファブ環境情報共有化技術

最先端 8 インチ MEMS プロセスラインでの MEMS 製造装置の電力使用量、およびガス使用量などの環境情報を収集する仕組み、収集された環境データを基に環境負荷を算出する手法の確立、環境負荷データ共有化データベース基盤の構築、MEMS 製造プロセスに用いられる主要な 30 種の原材料、作製されたセンサ TEG の環境負荷算出に必要なデータを収集した。

(1)、(2) を通じた全体の開発計画を以下に示す。

事業項目	H22年度				
	H21年度 4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
(1) 高機能センサーシステム開発					
1) MEMSクリーンルームセンサーシステム開発		センサーネットワーク・制御システム構築検討	センサーネットワーク・制御システム試作・効果検証		センサーネットワーク・制御システム試作・効果検証
2) 8インチMEMSプロセスライン構築		設備仕様検討	設備導入・設置		次世代オンデマンドシステムの検討
3) 植物工場センサーネットワークシステム開発		センサーネットワーク構築検討	設置		センサーネットワーク効果検証
4) 高機能センサーモジュール開発		仕様検討		試作	評価
・自立型複数センサーモジュール開発				試作	評価
・低消費電力LSI開発					
・新センサーデバイス原理検討					
BEANS適応センサーデバイス					
他センサーデバイス					
			ナノガス、低電力デバイス原理検討		
			デバイス原理検討(パーチクル、汚染ガス、小型発電、パワーマネージメント、位置推定、温度センサー用機能薄膜)		
(2) 低環境負荷型プロセス開発					
1) 低環境負荷ポリマー・センサー融合プロセス技術開発			原理、特性検討		試作
2) スマートプロトタイプニング技術開発					
・シリコンベースセンサーTEG試作		設計検討	事前試作		8インチライン条件出し試作・評価
・BEANS適用デバイス試作		設計検討	予備試作等検討		8インチライン条件出し試作・評価
・欠陥・ばらつきモデリング、計測技術開発		構想検討			評価検討
3) 低環境負荷型深層エッチング技術開発			代替ガス調査選定		
					プラズマモニタリングエッチング効率化
4) 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発			接合強度制御、気密封止検討		
			機能膜を劣化させない低温接合検討		
5) スマートファブシステム技術開発					
・3次元構造の設計・計測情報の共有化		構想検討			データ収集、情報共有化検討
・環境情報共有化		構想検討			データ収集、情報共有化検討

2.2 研究開発の実施体制

研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」（以後、G デバイス）は、「異分野融合型次世代デバイス研究開発プロジェクト」（以後、BEANS）の下に H21 末-22 年度に追加実施されたものであり BEANS 推進体制（図 II-2.2-1）のなかで取り組んだ。

拠点として、本部（秋葉原）、研究拠点 G デバイスセンター（産総研つくば東事業所内）と G デバイスセンター関西（立命館大学びわこ草津キャンパス内）の 3 か所を設け実施した。

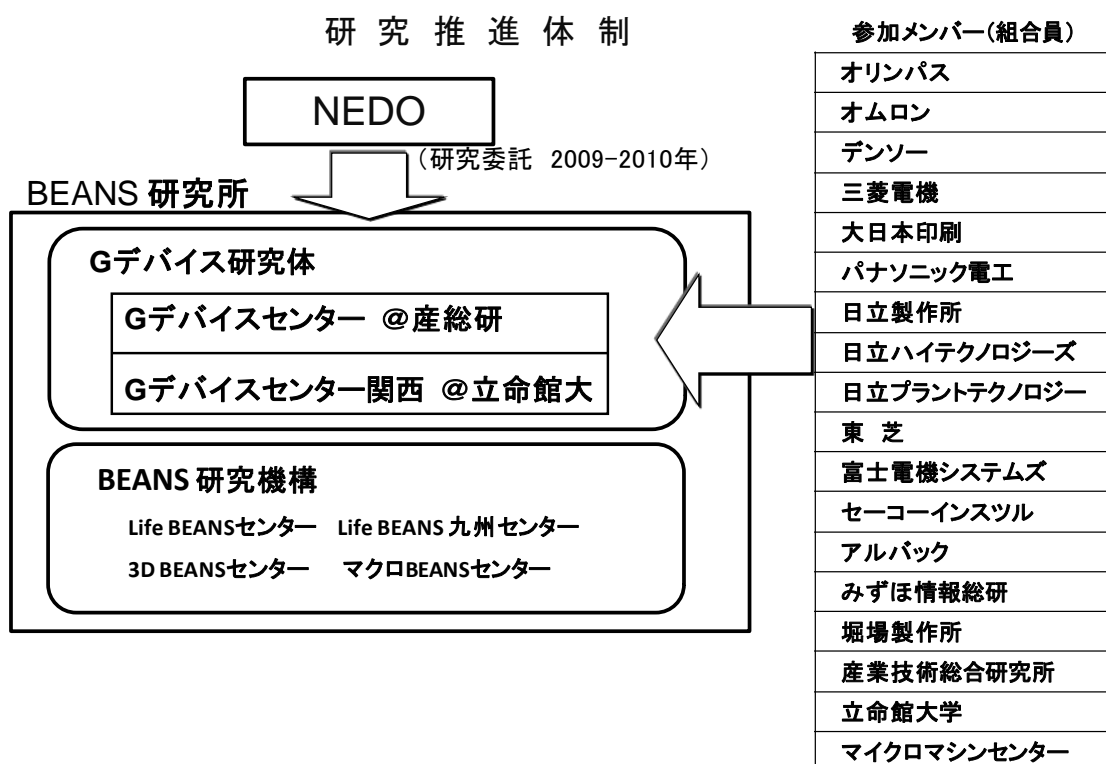


図 II-2.2-1 BEANS 推進体制

BEANS の NEDO 参画の上位運営会議であるプロジェクト推進連絡会へ研究体長以下関係者が参画し進捗報告等を行うとともに、BEANS プロジェクト本体全体の意思決定を受けて G デバイスの取り組み内容の追加、修正等を行った。

特に、G デバイスにおける研究実施体制として G デバイス研究体（図 II-2.2-2）は以下の通りである。

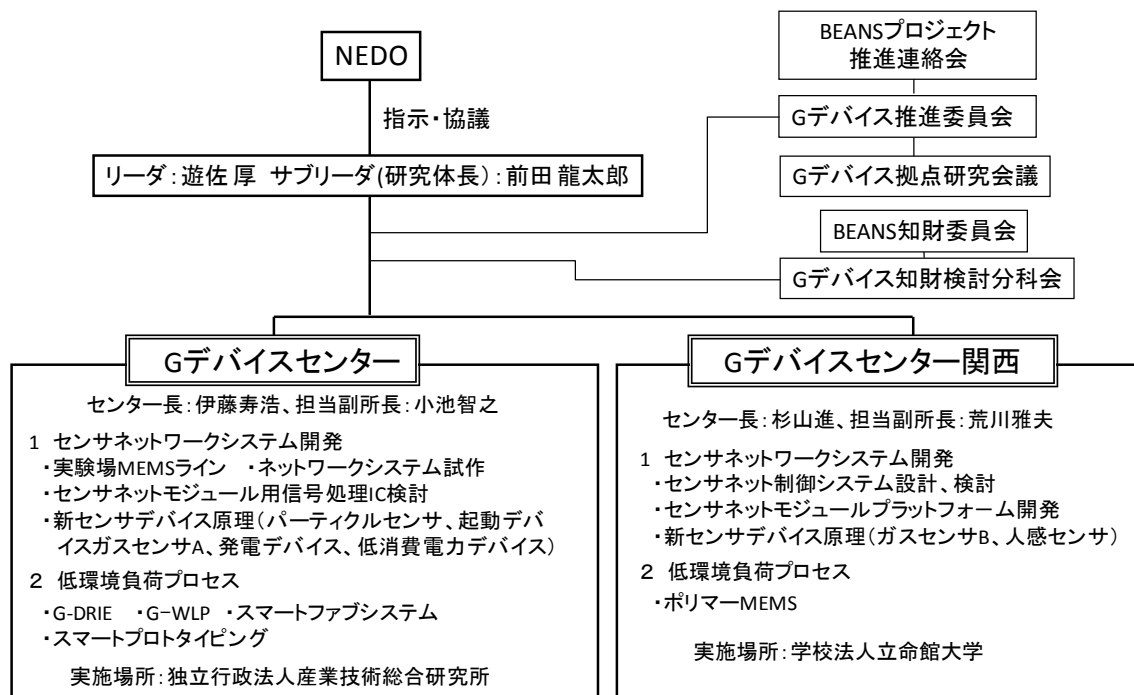


図 II-2.2-2 G デバイス研究体 : BEANS 研究組合の G デバイス担当部隊

また、研究体長をサポートし効果的な開発推進および開発進捗を管理するために、開発に参加する企業や大学研究者と研究員との緊密な連携を取りながら効果的に成果が得られるよう、BEANS プロジェクト推進連絡会の下に設置した G デバイス推進委員会を四半期に一度実施した。委員会の委員は、組合員企業と大学の有識者から 21 名で構成した。

さらに、本研究開発課題に新規参画した企業メンバーを主に想定し、本プロジェクトの知財規程の周知徹底を図るために、本プロジェクト知財委員会の下に G デバイス知財検討分科会を設置して実施した。分科会メンバーは組合員企業の知財部門等から 18 名で構成した。

2.3 研究の運営管理

G デバイスを効果的に運営・推進する目的で、BEANS における G デバイス担当の前田龍太郎プロジェクトサブリーダー(独立行政法人産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センターセンター長;以下、研究体長)とともに、開発計画の詳細の検討や、開発進捗を管理した。そして、研究開発に取り組む研究員全体の相互連携による効果的な開発成果が得られるよう、前述のとおり BEANS におけるプロジェクト推進連絡会の下に G デバイス推進委員会を設置し、四半期に 1 度開催した。また拠点として、G デバイスセンター(産総研つくば東事業所内、センター長:伊藤寿浩集積マイクロシステム研究センター副センター長)と G デバイスセンター関西(立命館大学びわこ草津キャン

ンパス内、センター長：杉山進立命館大学教授)で研究開発を行い、研究体長の下、それぞれの拠点での研究会議を毎月初めに開催し、研究テーマ毎の進捗のフォローや実用化に向けた検討等を実施した。知財権に関しては、BEANS 知財委員会の下に G デバイス知財検討分科会を設置し、知財規程の周知徹底を図った。

また、成果普及活動として、マイクロマシン MEMS 展での展示や国際ワークショップへの展示参加、年度末に本研究開発の成果報告の場として G デバイス研究体主催の国際ワークショップを開催し、ウェブサイト等を通じた広報、普及活動を実施した。

全期間を通じての、運営管理の実績を図 II-2.3-1 に示す。

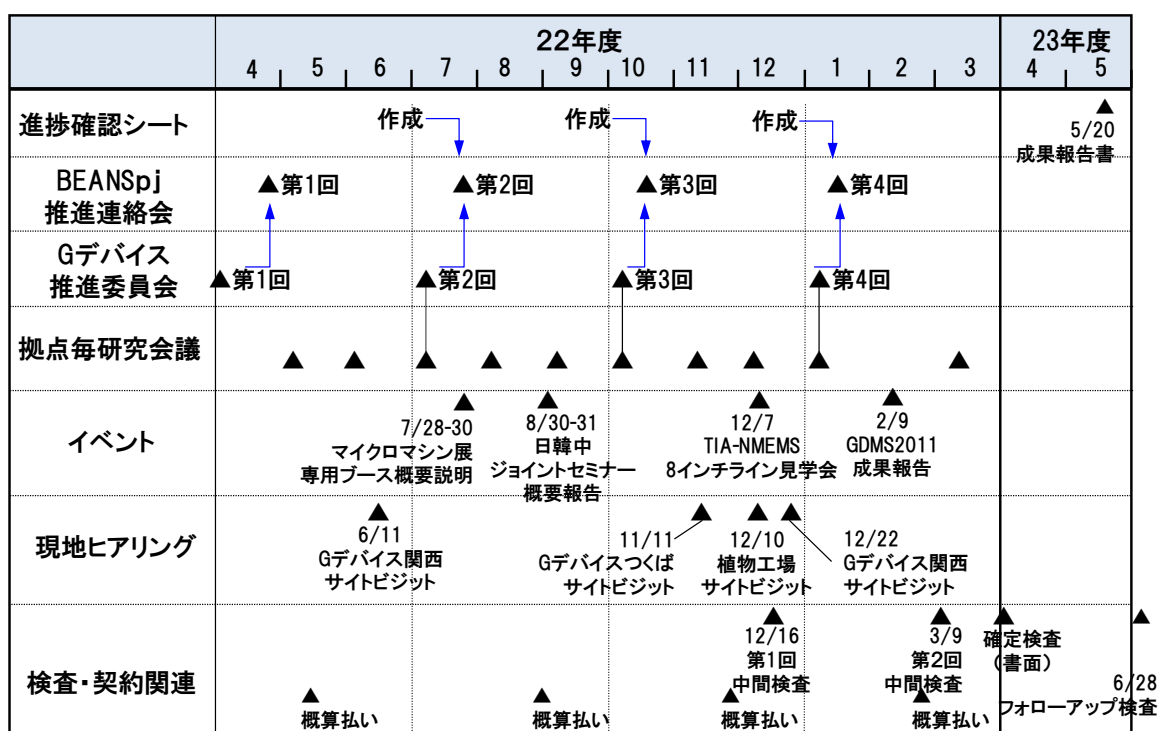


図 II-2.3-1 G デバイス マネジメント関連スケジュール

(1) G デバイス推進委員会の開催

G デバイスの確実な成果達成に向け、研究開発進捗と予算執行状況、設備導入状況などの報告を行い議論、課題の共有化・方向付けのために、研究体長を委員長として、四半期に一度開催した。開催実績を表 II-2.3-1 に示す。毎回、委員のほぼ全員とオブザーバーとしての METI 研究開発課の出席が得られ、活発な意見交換を行われた。委員会開催風景を図 II-2.3-2 に示す。

表 II-2.3-1 G デバイス推進委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第 1 回	4 月 8 日 (木) 16:00~17:30	MMC テクノサロン	25 名

第2回	7月 6日 (火) 15:00~16:50	東京都産業労働局秋葉原庁舎 第一会議室	24名
第3回	10月 7日 (水) 15:45~17:30	スター貸会議室(秋葉原)	25名
第4回	1月 7日 (木) 15:30~17:30	産総研つくば東 第一会議室	25名

MMC：財団法人マイクロマシンセンター



図Ⅱ-2.3-2 Gデバイス推進委員会の開催状況

最後の第4回のGデバイス推進委員会では、メンバー企業向けに前年11月末に完成した8インチMEMSプロセスラインの見学会を実施した。

(2) Gデバイス研究会議の実施

研究拠点として、Gデバイスセンター(産総研つくば東事業所内)とGデバイスセンター関西(立命館大学びわこ草津キャンパス内)を設け、Gデバイスの研究会議を実施した。研究会議は、短期集中で目的の成果を得るための取り組みについて、毎月初めに、研究体長と各センター長の出席により、研究開発の進捗状況、優先順位の判断、アドバイス等をタイムリーに行う狙いで開催した。

そのなかで、Gデバイスセンター、Gデバイスセンター関西に共通的な開発課題については、Skypeを活用したTV会議形式を導入し、効率的な拠点間の連携を図った。さらに四半期毎にはGデバイス推進委員会の前段として、両拠点の合同研究会議を実施して、研究員間の研究課題の取り組みに関する技術交流を図った。

表Ⅱ-2.3-2に、Gデバイスセンターの研究会議の開催実績一覧を示した。また、研究会議開催風景を図Ⅱ-2.3-3に示す。

表Ⅱ-2.3-2 Gデバイスセンター研究会議(産総研つくば東) 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	5月12日(水) 9:45~17:00	Gデバイスセンター	総勢25名

第2回	6月8日(火) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 25名
第3回 合同研究会議	7月6日(火) 9:30~15:00	東京都産業労働局秋葉原庁舎 第一会議室	45名
第4回	8月4日(水) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 23名
第5回	9月1日(水) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 25名
第6回 合同研究会議	10月7日(水) 9:30~15:00	スター貸会議室(秋葉原)	43名
第7回	11月8日(月) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 25名
第8回	12月9日(木) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 25名
第9回 合同研究会議	1月7日(金) 9:30~15:00	産総研つくば東第一会議室	44名



図II-2.3-3 Gデバイスセンター研究会議 実施状況

また、表II-2.3-3にGデバイスセンター関西の研究会議の開催実績一覧を示した。6月度、12月度は、NEDO サイトビジットと同時開催とした。また、研究会議開催風景を図II-2.3-4に示す。

表II-2.3-3 Gデバイスセンター関西研究会議(立命館大びわこ草津キャンパス)開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	5月7日(金) 9:30~12:00	立命館大 オープンリサーチルーム	8名
第2回 NEDO サイトビジット	6月11日(金) 14:00~16:00	立命館大 アドセミナリオ館会議室	16名
第3回 合同研究会議	7月6日(火) 9:30~15:00	東京都産業労働局秋葉原庁舎 第一会議室	45名
第4回	8月2日(月) 9:30~11:30	立命館大 オープンリサーチルーム	9名
第5回	9月2日(木) 9:30~11:30	立命館大 オープンリサーチルーム	9名
第6回 合同研究会議	10月7日(水) 9:30~15:00	スター貸会議室(秋葉原)	43名
第7回	11月8日(月)	立命館大	9名

	9:30～12:00	オープンリサーチルーム	
第8回 NEDO サイトビジット	12月22日(水) 10:00～11:45	立命館大 オープンリサーチルーム	9名
第9回 合同研究会議	1月7日(金) 9:30～15:00	産総研つくば東第一会議室	44名



図 II-2.3-4 G デバイスセンター関西研究会議 実施状況

(3) G デバイス知財検討分科会の開催

知財検討分科会は BEANS の知財委員会の下に設置され、G デバイスとして新たに参画した企業メンバーがいるため、BEANS 知財規定について内容の周知、意見交換を行い、コンセンサスを得ることを目的として開催した。

表 II-2.3-4 G デバイス知財検討分科会

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	9月8日(火) 13:30～16:30	MMCテクノサロン	20名

(4) 普及広報活動

約一年間という短期間の研究開発のため、前半は特にその取り組み概要を広く周知することを目的に 2010 マイクロマシン・MEMS 展などに参加して普及活動を行った。また、後半は 8 インチ MEMS プロセスラインの完成を機に関係者から見学会を実施、また 2 月に国際ワークショップを開催しその研究成果を広く公開した。

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

G デバイスの成果を踏まえて、参加企業での実用に対する取り組み及び、つくばイノベーションアリーナ (TIA-NMEMS) への展開について、G デバイスの研究会議及び G デバイス推進委員会において研究体長及びセンター長を中心に実施内容の検討を行った。

さらに、TIA-NMEMS の本格的な研究開発試作拠点形成に向け 8 インチ MEMS ラインに配置した国内有数な装置などの見学会を開催し、我が国関連産業にいち早く周知されるような取り組みを実施した。

3. 情勢変化への対応

G デバイスは、平成 21 年度補正予算（第 2 号）により措置され、緊急に実施した事業であり、更に 1 年間の短期間であったため、その成果を効率的に出すべく、前述の通り推進委員会や研究会を通じてきめ細かいマネジメントを行い対応した。

また、プロジェクト期間中に発生した東日本大震災の影響で産業技術総合研究所つくば東事業所の被災と G デバイスセンターの機能停止が一時停止したが、Web による掲示板等で被害・復旧状況等を関係者と情報共有するなど、遅滞なく研究開発の成果取り纏め、予定通り事業を完了した。

III. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

本事業では、MEMS技術戦略マップ2010のロードマップによる2025年以降の技術等を見越し、研究開発の目的に即した革新的製造プロセス技術を抽出し、その技術を確立することを目指した。

本事業は、大きく二つのカテゴリーとして、「高機能センサネットシステム」と「低環境負荷型プロセス開発」に分けられる。前者は、高機能センサネットシステムの実験場としての8インチMEMS一貫プロセスライン(クラス1000クリーンルームとプロセス装置群)の構築と、そこでの空調オンデマンド制御に連動したセンサネットシステムの設置によるCO2削減目標の検証を実施した。後者は、MEMS製造プロセスとして特徴的なSi深堀エッチングと接合におけるプロセスの低環境不負荷化、前述の8インチMEMS一貫プロセスラインでのMEMS基本プロセスレシピとして7種類のMEMSデバイスのテストエレメントグループ(TEG)の開発を行った。目標及び成果について、表Ⅲ-1-1に示すとおり、いずれも目標を達成することができた。

これらは、世界的にも例を見ない低環境負荷化を実現できる高機能センサネットシステムを完備したMEMS一貫プロセス開発・試作施設の構築であり、その開発・試作能力は、8インチというMEMSとしては大口径ウェハを扱える先端的な装置群を完備したもので我国有数なものである。研究開発拠点としてのTIA-NMEMSへの展開を想定、研究・開発から量産試作まで踏まえた施設として今後の我国MEMS関連産業発展へ大きく資するものとする。

表Ⅲ-1-1 Gデバイス：目標と成果

研究課題	目 標	成 果
<p>高機能 センサネット システム開発</p>	<p>①製造現場として MEMS クリーンルームにセンサネットシステム・空調制御で CO2 削減 60%(’90 年比)。 ②上記検証用クリーンルームと大口径 MEMS プロセスラインを構築。 ③製造現場としてセンサネット適用の植物工場を構築し省エネ効果 20%。 ④高機能 MEMS センサモジュール試作(自立型、複数センサ、30×30×10 mm)及び新センサデバイス原理を検討。</p>	<p>達成</p> <p>①8 インチ MEMS 一貫プロセスラインの空調、ライン装置等のエネルギー見える化システムを設置。多数配置センサによるオンデマンド空調制御で 90 年度施設比 60%の CO2 削減見込みを確保。 ②8 インチ MEMS 一貫プロセスラインの構築完。 ③植物工場に多数配置センサネットを設置し、葉物野菜、トマトなどの育成で、20%省エネ効果を検証、収率は 10% 向上。 ④複数センサ搭載自立センサモジュール試作、小型化達成。合計 8 種の新センサデバイス原理の可能性を把握。</p>
<p>低環境負荷型 プロセス開発</p>	<p>①ポリマ MEMS 基本プロセス確立とミラーデバイス基礎データ把握。 ②深堀エッチング：代替ガス及びエッチング効率の最適化で温暖化ガス排出量 90%削減の指針を確保。 ③集積化接合：部分的接合強度制御と 250℃以下の気密低温接合課題抽出。 ④大口径 MEMS プロセスライン TEG 試作を実施。3 次元計測情報を設計ツールと連携するフレームワーク要求仕様作成プロセス環境負荷情報データベース基盤構築とデータ収集、欠陥ばらつきモデリング技術を確保。</p>	<p>達成</p> <p>①低環境負荷型プロセスとしてポリマミラーデバイスの可能性についての基本プロセス、基礎データ等、方向性を確保。 ②深堀エッチング：目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ③集積化接合：目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ④8 インチ MEMS 一貫プロセスラインでの 7 種類の TEG を試作、プロセス条件を確保、一年間の短期の取り組みで、すぐ使える試作ラインを構築。同ラインでのプロセスを想定した、デバイス特性ばらつき、3 次元設計・検査情報共有化等のフレームワーク指針を確保、設計検査の面でも基盤を構築。</p>

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 高機能センサネットシステム開発

高機能センサネットシステム開発の研究課題は、「半導体クリーンルームセンサネットシステム開発」、その実験場としての「8インチ MEMS プロセスラインの構築」、「植物工場センサネットシステム開発」、「高機能センサモジュール技術開発」である。研究課題毎の目標と成果内容、及び達成度（達成：○、未達：×）を、表Ⅲ-2.1-1に示した。

表Ⅲ-2.1-1 高機能センサネットシステム開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
半導体クリーンルームセンサネットシステム開発	クリーンルームでのCO2排出量削減を検討できる制御管理システムを開発。 検証用クリーンルームでCO2削減(90年度比60%削減)を実証。	<ul style="list-style-type: none"> ・パーティクル量等の441点を計測評価できるエネルギーマネジメント統合管理システムを開発し産総研に設置。 ・塵埃負荷及び熱負荷時のパーティクル量、パーティクル拡散量、温度上昇等のデータから1990年度比、CO2 60%削減検証を実施。 	○
8インチラインの構築	MEMS/LSIの前工程から後工程、評価までカバーする一貫ライン、デバイス表面及び内部の形状等の評価装置の導入。	MEMS/LSI前工程プロセスラインとして、ウェハ洗浄、0.35 μ mロセリソグラフィ、ウェハ熱酸化・拡散、CVD・スパッタ成膜、ウェット及びドライエッチングライン(TKB812F)と、後工程プロセス・評価ラインとして、ウェハ接合・封止、ダイシング、実装配線、デバイス表面・内部性状・電気的特性評価ライン(TKB812B)を導入し、8インチMEMSプロセスの試作検証に適用。	○
植物工場センサネットシステムの開発	センサネットを適用した省エネ評価用植物工場を構築し、センサネットの効果及びMEMSデバイスの実用化を検討。	東京農大にセンサネット植物工場の開発環境を構築。リーフレタス、ミニトマトを栽培、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌灌水の4提案方式に関して、それぞれエネルギー20%の削減を達成。補光照明、冬季暖房、土壌灌水の3提案方式に関して、植物の収穫量10%改善を確認。MEMSデバイスの実用化可能性を検討。	○
高機能センサモジュール技術開発			
高機能センサモジュール	<ul style="list-style-type: none"> ・無線センサモジュール(30mm×30mm×10mm)試作開発。 ・アプリケーション分野の明確化と新たなセンサネットの活用検討。 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ機能に温度、湿度、圧力、加速度を搭載し、電池、信号処理回路、無線送信回路、アンテナを実装。植物工場など用途に応じセンサ機能を差替え可能な30mm×30mm×10mm以内のプラットフォームモジュールを試作。 ・半導体クリーンルーム応用に特定し、事業化課題と進め方を明確化。 	○

低消費電力 LSI	センサモジュールの長寿命/バッテリー交換レス化を目標に、低消費電力アナログ回路要素技術開発を行う。複数センサ信号を増幅・デジタル化するアナログフロントエンド LSI を試作、課題を抽出。	アナログフロントエンド回路を低電力化するために、低電圧(1.2V)、短時間動作回路要素技術を開発。平均消費電力 4 μ 時程度 (従来比 60%以上削減) で動作可能あり、目標であるセンサモジュールの長寿命化の要素技術開発に成功。	○
新センサデバイス原理検討			
ナノ構造ガスセンサ	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ小型化及び性能検証: トレンチに SnO₂ 粒子をポーラス状に埋め込み、センサ部の面積を 1/2 以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立。 ・粒子配列プロセスの大面積化: プロセスの大面積化に伴う課題抽出。 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ部の面積を 1/2 以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立するために、トレンチ埋め込み型ガスセンサを評価、平坦基板と比較し高濃度ガス中での感度が向上。 ・粒子配列プロセスの大面積化の課題抽出として、4inch Si 基板上へのディップコートを検討し、メニスカス先端部への微粒子供給を阻害しないような容器設計が必要こと、ウエハ表面を清浄に保つ必要があることを見出した。 	○
低消費電力センサ・無線モジュールへの検討	高効率な容量型センサや高効率高周波デバイス、そしてさらなる小型化・低消費電力化に向け、デバイスの試作を通じて課題検証。	超低損傷ドライエッチング技術を低消費電力センサ・無線モジュールに適用した場合の課題検証を実施。シミュレーションでは、専用設計ツールを構築し計算結果からゲート長・幅などのデバイス構造の課題を抽出。8 インチファンドリ試作ではインプラ工程や CMP 工程などのプロセス課題を抽出。	○
パーティクルセンサの MEMS 化	小型化、低コスト化が困難なパーティクルセンサの MEMS 化を検討。	<ul style="list-style-type: none"> ・検出方法として、光学的・電気的方法を複数検討、小型化のために新光学系を提案、パーティクル (線香の煙) を検出。 ・センサの流路断面積 5\times5 mm²、ダウンフロー流速を 0.3 m/s、対象粒径 0.5 μm とし、10 個のセンサで 1 秒間サンプリングを行うとして、JIS 規格のクリーン度を見積ることができた。 	○
汚染ガスセンサ	汚染ガス (NH ₃ , H ₂ S 等) を ppb レベルで計測するための酸化物半導体のセンサ開発。	低消費電力化された高感度 MEMS ガスセンサを開発。耐熱温度 500 $^{\circ}$ C 以上で、NH ₃ に対する検出限界を 2ppb、消費電力を 31mW に低減、H ₂ S に対する検出限界を 0.02ppb、消費電力を 48mW に低減を達成。	○

振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス	垂直エレクトレットの新しい高速荷電方法の開発を目指すとともに、小型化に有利な櫛歯型エレクトレット発電器の原理を検証。	真空紫外線による電離を用いた荷電法を開発し、コロナ荷電、軟 X 線荷電よりも極めて高速に荷電できることを明らかにし、当初目標を達成した。また、原理検証として、櫛歯状の垂直エレクトレットへの真空紫外線荷電の検証と 1 μ W オーダーの発電が可能であることを示した。	○
センサ用パワーマネジメントデバイス	センサネットワーク端末の電力削減のため起動スイッチの原理検証と通信方式の検証。	ゾルゲル PZT と流路形状デバイスにより発電型の低消費電力起動スイッチの可能性を得た。起動スイッチ向け無線として起動スイッチを用いた場合の通信シーケンスチャート、データフォーマット、通信タイミングチャートを策定。消費電力推定の基礎データを取得。	○
位置推定センシング原理	作業者の位置推定の原理開発。	ワイヤレス給電型慣性センサと RFID を組合せた無線方式センサモジュールで作業者位置をリアルタイム計測し、RFID タグ検出時の位置補正、サーバには作業者位置表示・タグ位置設定・履歴表示・シミュレーション機能を具備した作業者位置追跡システムを開発。	○
高感度温度センシング用機能薄膜	環境に優しい非鉛系強誘電体材料におけるセンサとしてのデバイス原理開発。	非鉛系強誘電体材料 BaTiO ₃ 薄膜をスパッタ法で形成し、焦電係数は 10~20pC/N、圧電定数は 10pC/(cm ²)を達成し、センサとして十分な性能を得た。	○

2.2 低環境負荷型プロセス技術開発

低環境負荷型プロセス技術開発の研究課題は、「低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発」、BEANS への展開も考慮した 8 インチ MEMS プロセスラインでのプロセス技術構築としての「スマートプロトタイプ技術開発」、特に MEMS 集積化に不可欠なプロセスの低環境負荷化に取り組んだ「低環境負荷型深堀エッチング技術」、「低環境負荷型集積化プロセス基盤技術」、「スマートファブ技術開発」からなる。研究課題毎の目標と成果内容、及び達成度を、表 III-2.2-1 に示した。

表 III-2.2-1 低環境負荷型プロセス技術開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリマーデバイス向け電鍍成型金型基本プロセス確立。 ・アクチュエータ MEMS を 2 回製作、駆動電圧、ミラー部反射率、ミラー部表面粗さの特性を評価、生体適合性への課題抽出。 	PMMA ポリマー材料による静電型ミラーデバイス（アクチュエータ MEMS）を電鍍成型金型によるプロセスにて開発。試作（2 回）及び特性評価した結果、生体適合性に問題ないことを確認。	○

スマートプロトタイプング技術開発			
シリコンベースセンサ TEG の試作	シリコンベースセンサ TEG の試作に向けて、各プロセス（成膜・リソグラフィ・エッチング・洗浄）装置の要素技術を開発。8インチラインを用いて試作し、ラインの特性と製造環境を評価、MEMS デバイス製造基盤を構築。	8インチウエハによる酸化膜、SiN、i線露光、Si 異方性エッチング、Si-DRIE、メタルドライエッチング、犠牲層ドライエッチング条件出し、応力解析、断面形状、寸法、ウエハ面内均一性を評価。5種センサ TEG 試作とそのセンサ特性評価により、8インチ試作に適用できるプロセスプラットフォームを構築、8インチプロセス装置、計測装置のレシピを蓄積。	○
中性粒子ビームエッチングのデバイス性能向上実証	中性粒子ビームエッチングの大口径(8インチ)化によるウエハ内の特性ばらつきをセンサ TEG の試作により評価。	8インチウエハ面内に作製したカンチレバーに中性粒子ビームエッチングを行ない、カンチレバーの共振周波数と Q 値の初期特性を計測し、ウエハの表面状態が回復すること、100nm エッチング行ったところで特性のサチュレーションが確認でき、中性粒子ビームエッチング装置開発に重要な指針となるデータを取得。	○
μプローブ TEG の設計・試作	先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを8インチウエハで試作し、ウエハ内、及びロット間の形状・特性のバラツキを、マルチプローブ評価装置を用いて評価。さらに、8インチラインの検査デバイスとして適用できるかの可能性を検討。	マルチプローブ評価装置を用いた評価手法として、局所陽極酸化(LAO)法による描画、光てこを用いた直接高さ測定、プローブ先端接触電流値のリアルタイム計測の3つの手法を提案し、電流値リアルタイム計測法が最も直接的かつ容易にデバイスの特性ばらつき計測や不良スクリーニングできることを見出した。上記計測法で8インチラインで試作したデバイスの、ロット間、ウエハ内形状ばらつきを評価、顕著な形状ばらつきはなかったが、ロット間電極配線形成プロセスの品質差を把握、本デバイスを用いた手法が、8インチライン検査デバイスとして適用し得る可能性を示した。	○
欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発	ばらつき評価に有効なセンサ TEG を設計・試作、最終パッケージ（真空中）やテスト（外力印加）段階と同様の擬似環境下でウエハ内の電氣的・機械的特性計測技術及び解析結果を基に構造依存のばらつき特性近似モデリング技術を開発。	8インチウエハに作製した複数デバイスについて、真空中・大気中で電氣的・機械的計測を行い、それぞれの MEMS 等価回路モデルパラメータを算出。算出した等価回路モデルパラメータのばらつきより構造寸法のばらつき評価を行い、等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることを確認。	○

<p>低環境負荷型深掘りエッチング技術開発</p>	<p>低環境負荷代替ガスの探索を3種類以上のガスについて行い、エッチング効率化/最適化と組合せ、SF6ガスに対し温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針の取得。</p>	<p>F2, BF3, SiF4 など5種類の候補ガスについて、10Hz周期の高速リアルタイム・プラズマ発光モニタリングにより得られた高効率エッチングレシピとプロセスシミュレーションによるフィードバック制御の組合せにより、温暖化ガス排出量をSF6比で90%削減できる低環境負荷代替ガス選定指針を得た。</p>	<p>○</p>
<p>低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発</p>	<p>(1) ウェハ/チップ仮接合強度を、正規接合強度の1/10以下に安定制御する集積化プロセスを開発。 (2) 可動部固着防止用機能膜が特性劣化しない250℃以下の低温接合技術実現に向け、接合面に付着した機能膜の影響を把握、機能膜部分的除去方法確立の課題を抽出。</p>	<p>合面の表面粗さと面積の制御、環状くり抜きパターンの選定により、正規の接合強度の1/10以下に安定して制御できることが判った。 機能膜として、SAM膜(自己組織化単分子膜、FDTS膜)はUV光、プラズマ照射で除去可能であり、除去後の250℃表面活性化接合で十分な気密封止が得られること、パターニング方法としては、N2、あるいはArプラズマ照射が適していることが判った。</p>	<p>○</p>
<p>スマートファブシステム技術開発</p>	<p>(1) 3次元設計・計測情報を、MEMS統合設計データベース、MemsONE等の設計ツール等と連携して活用するための情報共有化フレームワークの要求仕様を作成。 (2) 環境負荷データを情報共有化するためのデータベースの構築し、センサTEGの製造時における環境負荷を算出するのに必要なデータを収集・登録。</p>	<p>(1) X線CT装置により3次元構造を計測、得られた構造から設計時の形状や力学特性を比較。機械・電気特性の計測データと設計形状を、集中質点系モデルを介在させて比較する手法を検討。併せて、情報共有データベースシステムの設計・プロトタイプ開発を行い情報共有化フレームワークの要求仕様を纏めた。 (2) 30種類のMEMSデバイス用原材料と8インチライン(TKB812)で試作されたセンサTEG構造体の製造工程でのCO2排出に寄与する項目をデータ収集し、それらを積算して排出量を算定。算定の結果により、装置・工程・項目に対する排出量の削減への指針を得た。</p>	<p>○</p>

3. 成果の意義

H21年度末からほぼH22年度末まで一年間余りで短期に取り組み全体として当初の目標を満足したその成果については、H23年2月に開催したInternational Workshop on Green Devices and Micro Systems 2011(GDMS2011)においていち早く一般に公開し、多くの参加者を得て高い評価を得た。今回の取り組みは、グリーンイノベーション推進の強力な手段としてきめの細かいセンサネットワークによるエネルギーマネジメントが重要であることを半導体MEMS製造ライン、他で先駆的、実

証的に示せたことが大きな成果という。加えて省エネルギーに向けて、クリーン空調だけではなく、製造装置そのものの強力な管理ツールとしても示せたことも重要な意義がある。さらに、製造プロセスそのものの低環境負荷化に向けた取り組み指針を得られたことも意義があり、将来の国プロへの先導的な役割を果たすことができた。

特に製造現場における省エネ化は我が国にとって重要な課題といえる。しかしながら最先端の MEMS や半導体などの分野において、製造装置やクリーンルームの消費電力の内訳を「見える化」した例は、これまでほとんど見当たらなかった。例えば、最近の検討結果から、クリーンルーム内の製造装置のうち、特定の装置が著しいエネルギー消費量を示すことが判ってきた。それらの多くが、振動の抑制のための空気圧制御システムという、いずれも、加工の精度や安定性を維持するためのものである。こうした製造装置は、これまで、24 時間の稼動を前提とした運用がなされてきた。今回の成果を活用し、エネルギー消費量等の「見える化」を実現することで、運転の運用を変えることにより、待機電力を大きく削減でき、その結果として製造装置全体の消費電力を、従来に比べてピーク時で 3 割以上削減できる可能性があると推測している。

さらに、クリーンルームにおける消費電力は、そのほとんどが、空気をクリーンルーム内で必要な条件に変えるために使われている。クリーンルーム内の温度の制御と、微粒子を除去するための空気の循環に使われる空調機、温水や冷水を空調機などに供給するための装置が電力を消費する。

この空調機の消費電力は、送風に使われている分が大きく、季節の要因で大きく変わることはない。一方 この温水や冷水を供給するための装置の消費電力は、季節の要因で大きく変わる。外気の湿度や温度が高い夏になると、クリーンルームに必要な空気の湿度や温度と、外気の湿度や温度との差が、他の季節より大きくなり、除湿や冷却に必要な冷水が増えてしまう。この結果、夏場には、温水や冷水を供給するための装置の消費電力が大きくなり、クリーンルーム全体の消費電力の 6 割以上を占めるまでになる。

クリーンルームの電力消費量を、大幅に減らすことは簡単ではないが、製造装置の消費電力と同じように、クリーンルームにおいても、減らす余地が大きいと考えている。今回の研究成果を活用し、クリーンルームのある区画が無人だった場合、微粒子の浮遊量が少なくなるために、無人の時間は、送風を最小限に抑えることで消費エネルギーが削減できることが期待できる。

開発した高機能センサネットシステムでクリーンルームという巨大システムの消費電力を客観的に「見える化」し、システム全体の運用を最適化し、さらに社会全体のエネルギー消費を、大きく低減できることをこのプロジェクトは示すことができた意義は大きい。

本プロジェクト終了時の 2011 年 3 月 11 日に、東日本を大震災が襲った。発電施設、とりわけ原子力発電所にもたらしたダメージは大きく、それ以前と後の境界条件が大きく変わってしまった。省エネ化、グリーン化は近未来の問題ではなく、今年の夏の待ったなしの課題となった。そういった意味でも、先験的な取り組みとその成果を示すことができた。

世界的にも例を見ない低環境負荷化を実現できる高機能センサネットシステムを完備した MEMS 一貫プロセス開発・試作施設が構築され、その開発・試作能力は、8 インチという MEMS としては大口径ウェハを扱える先端的な装置群を完備したもので我国有数なものとなった。TIA-NMEMS への展開のなかで、研究・開発から量産試作まで踏まえた施設として今後の我国 MEMS 関連産業発展へ大きく資するものであり、その意義は大きい。

4. 成果に関する特許及び論文・学会発表に関して

4.1 特許

技術研究組合 BEANS 研究所の知財規定に基づき、BEANS 知財審査会を経て、BEANS 特許として取組みを行ったものとして、手続き中を含め 8 件の特許を計上した。現在 5 件が出願済みであり、出願済特許詳細を A-5 に示す。

4.2 研究発表・講演

本研究に基づいて、15 件の研究発表、講演を行った。一覧を A-5 に示す。

5. 成果の普及広報

約一年間という短期間の研究開発のため、前半は特にその取り組み概要を広く周知することを目的に普及活動を行った。また、後半は 8 インチ MEMS プロセスラインの完成を機に関係者から見学会を実施、また 2 月に国際ワークショップを開催しその研究成果を広く公開した。

1) マイクロマシン・MEMS 展への取り組み概要展示

国内イベントの中で、MEMS 関連企業、研究者が最もたくさん集まる本展示会が 7 月 28 日～30 日、東京ビッグサイトで開催され、そこでプロジェクトの取り組みを説明した。本展示はマイクロマシンセンター展示ブースの隣に 4 スパンのブースを確保し、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発事業」本体展示（12 スパン）と通路を挟んだ場所に位置し、本体の成果展示との連携がわかるような配置とした。

展示ブースでは、研究開発のコンセプトや個別テーマのパネル展示と、半導体ク

クリーンルームのパーティクルセンサを多数配置した場合の塵埃量に対応したオンデマンド空調によるエネルギー削減のデモおよび、植物工場での温度、湿度、照度などの多数配置によるモニタリングのイメージデモの二つを展示した。多数の来場者が訪れ、実際の研究者が個別テーマやデモについて直接説明することにより、来場者の十分な理解が得られるように工夫し、活発な議論が行われた。G デバイスセンター展示ブース状況を図Ⅲ-5-1 に示す。



図Ⅲ-5-1 2010 マイクロマシン・MEMS 展（東京ビッグサイト）
での概要展示

2) The 1st Japan-Korea-China Joint Seminar on MEMS/NEMS for Green and Life Innovation への展示

グリーンイノベーション、ライフイノベーションに貢献するマイクロナノ技術をテーマとする日韓中セミナーが、平成 22 年 8 月 30 日～31 日、札幌コンベンションセンターで開催された。日韓中の関係する先端研究者に取り組みをアピールするため、ポスターセッションにて展示を行った。集った研究者は総勢 60 名弱で、G デバイスの取り組み概要のほか、半導体クリーンルームのパーティクルセンサを多数配置した場合の塵埃量に対応したオンデマンド空調によるエネルギー削減のイメージについて報告した。

3) 8 インチ MEMS プロセスライン見学会

12 月 7 日に開催されたつくばイノベーションアリーナ NMEMS の関係者が集うワーキンググループ(TIA-NMEMS WG)で、ほぼ完成した 8 インチ MEMS プロセスラインの見学会を実施した。参加メンバーは、MEMS 試作関連の取り組みを検討しているメンバーなどであり、大口径ウェハのプロセスが可能で、特徴のある装置群が並ぶラインとして好評だった。

前述のごとく、G デバイス推進委員会の委員に対しても、1 月 7 日の第 4 回委員会で見学を行い、関係者に周知ができた（図Ⅲ-5-2）。



図Ⅲ-5-2 8インチ MEMS プロセスライン見学会

4) International Workshop on Green Devices and Micro Systems (GDMS2011)開催

3月の事業終了前に、成果について内外に報告するため、本国際会議を平成23年3月9日(水)にAISTつくば中央共用講堂で開催した。

事前登録130名に対し、当日関東地方は朝から大雪模様となり、出席者が少なくなることが予想されたものの、当日の出足は順調で、最終的に参加者数146名となった。グリーンイノベーションを主題にした本テーマへの関心度の高さと、最先端8インチMEMSプロセスラインへの期待の大きさを示した結果であると思われる。

当日のプログラムは、METI 研究開発課 矢野研究開発調整官と NEDO 機械システム部久木田部長がプロジェクトの位置付けと成果についての期待を込めた挨拶のあと、環境利用エネルギーハーベスティングや RFMEMS の研究で著名な Prof. Stepan Lucyszyn、商業店舗などのエネルギーマネジメントに関する研究で著名な東大藤本教授の招待講演が行われた(図Ⅲ-5-3)。



図Ⅲ-5-3 GDMS2011 会場風景

そのあと、二つの研究拠点 G デバイスセンター長が両拠点での取組みや成果の概要について報告、昼食時より、ポスターセッションでのテーマごとの報告、及び代表的テーマのオーラルセッションが行われた。どのセッションでも、最後まで多くの参加者が熱心に聴講及び意見交換が行われた。

最先端 8 インチ MEMS ライン見学は、3 回に分けて実施したが、すべて、定員一杯で事前登録の段階で締め切るほどであった。

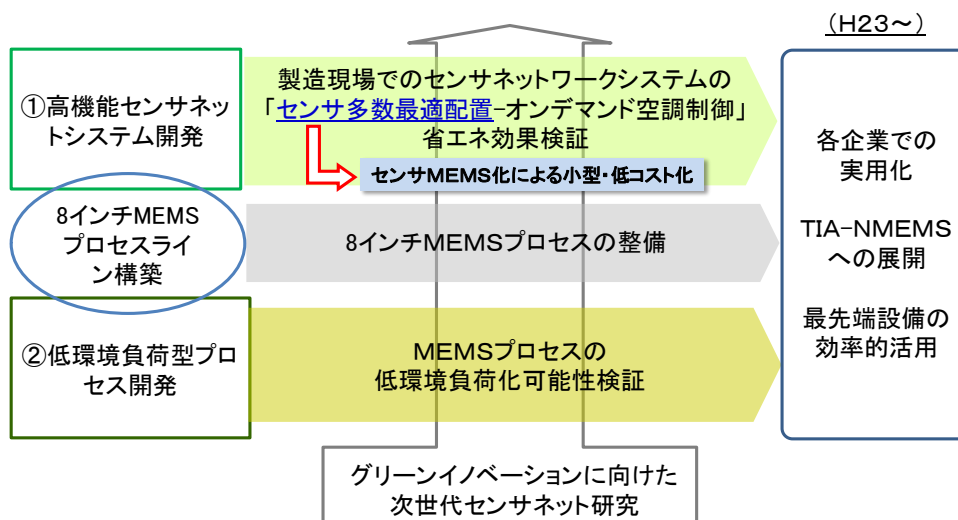
以下に、GDMS2011 プログラムを示す。

10:20	Opening session , Moderator R. Maeda T. Yano (METI), S. Kukita (NEDO)
10:30	Invited talks , Moderator R. Maeda “Ambient Electromagnetic Energy Scavenging for Sensor Networks”, Prof. Stepan Lucyszyn, Imperial College of London “Energy management in retailing business”, Prof. J. Fujimoto (Tokyo University)
11:30	Project overview : Moderator T. Koike T. Toshihiro Itoh and S. Sugiyama
12:10-14:30	Working Lunch Poster view of project details and topics from Inter university network Green 8 inch MEMS prototype station “TKB812” tour (A) Special Tutorial (13:30-14:20) “Challenges and Progress in MEMS Energy Harvesters”, Prof. C. Lee (National University of Singapore)
14:30	Oral session : Moderator T. Sakamizu “Green operation on demand (GOOD) for clean room”, K Ando “Development of Wireless Smart Multisensor Devices for a Green World”, A. Ranjith “MEMS Particle sensor for GOOD, H. Sven “Micro coil fabrication for ubiquitous power monitoring” Y. Zhang “Ultra Low Power Consumption IC for Green device”, T Fujimori “Environment Friendly MEMS process, D. D z ung
16:00-	Poster View and Green 8 inch MEMS prototype station “TKB812” tour (B) Reception : Opening remark: S. Ichimura(AIST), Closing remark: K. Aoyagi (MMC)

IV. 実用化の見通しについて

1. 事業全体の実用化の見通し

本事業で取り組んだ研究課題の狙いとその実用化の方向性は、図IV-1-1 に示す通りである。また、成果に基づく実用化の見通しを表IV-1-1 に示す。



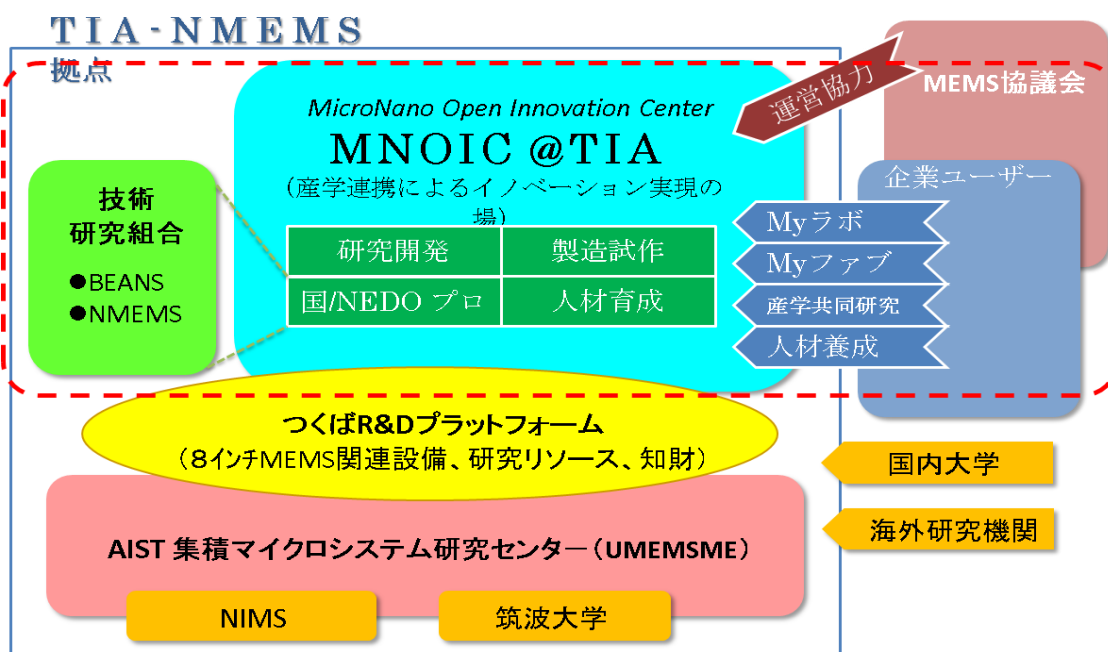
図IV-1-1 (再掲) G デバイスの実用化の方向性

表IV-1-1 G デバイス：実用化の見込み

研究課題	成果	実用化の見込み
高機能センサネットワークシステム開発	<p>①8インチMEMS一貫プロセスラインの空調、ライン装置等のエネルギー見える化システムを設置。多数配置センサによるオンデマンド空調制御で、90年度施設比60%のCO2削減見込みを確保。</p> <p>②8インチMEMS一貫プロセスラインの構築完了。</p> <p>③植物工場に多数配置センサネットワークを設置し、葉物野菜、トマトなどの育成で、20%省エネ効果を検証、収率は10%向上。</p> <p>④複数センサ搭載自立センサモジュール試作、小型化達成。合計8種の新センサデバイス原理の可能性を把握。</p>	<p>①多数配置センサによるオンデマンド空調制御システムの事業化を、半導体クリーンルームで積極的に展開する(オムロン)。</p> <p>②8インチラインはTIA-NMEMSの基幹設備として、活用する。活用主体は、MMCに新設されたMNOICとなる見込み。</p> <p>③植物工場のセンサネットワークシステムは、検証した4方式を実際の民間植物工場の実態に合わせて適用する等、実用化を進める(日立)。</p> <p>④自立センサモジュールや低消費電力LSI技術、新センサデバイス原理検討から、継続して各社で数年後の実用化を目指す。(オムロン、日立、パナソニック電工、SII、堀場、富士電機)</p>

<p>低環境負荷型プロセス開発</p>	<p>①深堀エッチング：目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ②集積化接合：目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ③8インチMEMS一貫プロセスラインでの7種類のTEGを試作、プロセス条件を確保、一年間の短期の取り組みで、すぐ使える試作ラインを構築。同ラインでのプロセスを想定した、デバイス特性ばらつき、3次元設計・検査情報共有化等のフレームワーク指針を確保、設計検査でも基盤を構築。 ④低環境負荷型プロセスとしてポリマーミラーデバイスの可能性についての基本プロセス、基礎データ等、方向性を確保。</p>	<p>①深堀エッチング：高集積センサやプロセス装置への実用化に取り組む（デンソー、アルバック）。 ②集積化接合技術：高集積センサ等へ4年後の実用化を目指す（三菱電機）。 ③TIA-NMEMSの8インチMEMS一貫ラインでのTEGレシピやプロセス条件として活用。活用主体はMMCに新設されたMNOICとなる見込み。3次元キャラクター化サービスの提供サービスを本年度実用化見込み（みずほ情報総研）。 ④ポリマーMEMS技術は、低環境負荷プロセスとして検討を継続。さらにVOC濃度センサとして病院施設等や、医療応用匂いセンサの実用化を目指す（オリンパス）。</p>
---------------------	---	--

また、世界的にも例を見ない低環境負荷化を実現できる高機能センサネットシステムを完備したMEMS一貫プロセス開発・試作施設は、我国有数の8インチというMEMSとしては大口径ウェハを扱える先端的な装置群を完備した研究開発拠点となりうる。これらについては、我が国の研究拠点TIA-NMEMSへの展開を想定し、MEMS協議会にマイクロナノイノベーションセンター（MNOIC）を研究・開発から量産試作まで踏まえた研究開発の実行部隊として組織し、平成23年7月に設置された。本事業により設備が構築されたAIST集積マイクロシステム研究センターと共同でMNOICは図IV-1-2に示すような研究開発試作機能の構築と継続的運営を図るべく取り組みを進めている。



図IV-1-2 TIA-NMEMS の概念図

2. 研究課題毎の実用化の見通し

2.1 半導体クリーンルームセンサネットワークシステム

センサネットワークシステム(Clean On Demand 空調自動制御システム)の成果に基づいた実用化の見通しは、現状下記の通り事業展開を継続中である。

(1) オムロン内部での取り組み状況

■BEANS 研究所 G デバイスでの研究成果の社内共有

社内の関係者と G デバイス研究成果の社内共有を行った。

■オムロン野洲工場での取り組み成果の社内共有

オムロン野洲工場でも類似の検討を行っており、野洲工場での成果の社内共有を行った。

■確認/共有事項

- ・人によりパーティクルが発生するため、その人をセンシングして、空調機の制御を行うことは、空調機のエネルギー削減に大きく貢献できることを確認した。
- ・G デバイス/オムロン野洲での各種データは、非常に有用であり、制御システムを構築する際に活用できるだけでなく、顧客提案を行う際にも説得力を持ってアピールする材料として活用できることを確認した。
- ・1Step として、これまでに付き合いのある顧客に絞り込んで提案を行い、社外での実績を積み上げて、横展開する方針で進めることとした。

(2) 外への取り組み

・オムロンとしての取り組み実績と、今後の商品化を平成23年7月9日に日本経済新聞に発表。

・客先提案状況

A 社：現場にて1次調査完了。

現場の空調機がインバータタイプでなかったため、空調機の ON/OFF で実地検証。クリーンルームが負圧状態となる恐れが出たため、一次検証を保留した。現在は、提案内容を再検討中。

B 社：現場にて1次調査完了。

ベイ方式ではなく、ミニエンパイロメントタイプのクリーンルームであったため、提案内容を再検討中。

(3) 全体を通して

G デバイスの成果は非常に有用であり、クリーンルームのエネルギー削減に繋がることを、オムロンとしても認識しており、事業化へと繋げるべく、社外への提案を行っている。しかし、客先のクリーンルームの構成(例：空調機がインバータタイプで

2.3 植物工場応用センサネットシステム

本研究で提案した植物工場に適したセンサネットシステムの実用化・事業化の見込みに関して述べる。

植物工場の将来市場に関しては、矢野経済研究所から「植物工場に関する調査結果(2009)」が報告されている。本報告書によれば、植物工場で生産される野菜は、2008年度が28億円であるが、2013年度には100億円、2018年度には200億円、2020年度には288億円に拡大すると推定されている。植物工場は成長分野であるといえる。

本研究では、センサネットに適した植物工場の制御システムとして、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌水分の4つの方式を提案した。これらの方式は、栽培エリアを分割して、それらのエリアを個別制御する方式である。栽培エリアの方向(東西南北)や、栽培エリアの中央や周辺で栽培環境が異なることが確認できた。各栽培エリアの環境測定にセンサネットを適用し、栽培エリア毎に分散制御することにより、省エネおよび作物の収穫量が改善できる可能性を示した。

一方、植物工場用センサネットシステムの投資回収は、省エネによる電力コスト削減だけでは短期間での回収が厳しく、生産する作物の収穫量改善や、高品質な作物を生産するための設備としても適用することが重要であることを示した。

これらに基づいて、日立としては以下の内容で今後実用化に向けて検討を続ける。

制御系まで含めた設備投資は、新規の植物工場でなければ、導入は厳しいので、既存の植物工場に関しては、環境計測用のセンサネットの導入を進める。

既存の植物工場では、温度監視などのセンサは1点だけの設備が多いので、多点計測が可能な環境計測用のセンサネットの導入を進める。センサネットで計測した計測データは、クラウドで一括管理する方法も提案し、スマートフォン等の端末で植物工場の環境を監視できるようにする。導入先は、既存の植物工場だけでなく、大学等の研究用の植物工場も含めて広く提案していく。

新規の植物工場に関しては、本研究で評価した4つの方式を提案していく。実用化に際しては、今回提案した4つの方式を、全て提案するのではなく、植物工場の立地条件や、栽培する作物により、効果の高いものから提案していく。北海道や東北のような寒い地方では、冬季暖房システム有効であり、日本海側の日射量の少ない地域では補光照明システムが有効である。また、九州などの暑い地方では、細霧冷却システムが有効である。高付加価値のトマトの栽培であれば、土壌水分制御システムを導入して、トマトの高糖度化に適用するのが良い。これらは、植物工場の設置環境などに応じて提案していく。

また、農業用途のセンサネットシステムを普及させるためには、露地栽培にも適用させることが必要と考える。外気温が大きく変動する最近の気象状況において、環境モニタリング可能なセンサネットシステムが、露地栽培においても、作物の品質向上につ

ながると考えられる。

2.4 高機能センサモジュール

高機能センサモジュールはクリーンルームや植物工場に限らず、生産現場、オフィス、そして店舗等の省エネルギー化、安全・安心に関わる異常検知・危険予知、生産性向上、収量向上等の様々な場面で適用可能である。

本研究開発で作製したモジュールは、クリーンルームの最適環境制御に特化して作成したものであり、省エネに向けたセンシング項目、センシング頻度の抽出に用いるものであり、無線方式・電池容量・非接触給電等が選択でき、複数種類のセンサの差し替えが可能なことを特長としたのである。

従来の市販センサ、コンポーネントでも同様の機能を実現することは可能ではあるが、市販品であることからモジュール単価のコストが数千円～数万円と高価であることが課題である。また、センサ自体が市販品であるためセンサ寸法が大きくなり、きめ細やかな計測制御の普及に大きな課題を有している。

本研究開発成果である高機能センサモジュールは、上記従来の課題を克服したものであり、複数のセンサ（最大 31 種）を搭載することができ、様々な想定現場で自由に構成できる小型、ローコストなセンサモジュールプラットフォームであることが特長である。

(1) オムロン内部での取り組み状況

■BEANS 研究所 G デバイスでの研究成果の社内共有

社内の関係者と G デバイス研究成果の社内共有を行った。

■確認/共有事項

クリーンルーム実証実験の共有化

人によりパーティクルが発生するため、その人をセンシングして、空調機の制御を行うことは、空調機のエネルギー削減に大きく貢献できることを確認した。

一方、パーティクルは常時モニタが必要であること、従来のパーティクルセンサでは光源が必要あるいは、吸引するポンプが必要であるなど消費電力が大きく電池寿命の観点で課題があることを共有。

上記課題について以下の点を共有

- ① パーティクル代替としてフローセンサで相関比較実験を実施。クリーンルームによってはパーティクルセンサの代替策としてフローセンサで代用できることを確認した。
- ② フローセンサの消費電力低減として、ピエゾ式フローセンサの活用を提案。
- ③ 上記、課題に対応したセンサモジュールとしてイベント起動型、電池サイズ大&非接触給電のタイプも準備。

(2) ビジネスモデルとオムロンとしての進め方

センサモジュール関連のビジネスは以下の2つの方法が考えられる

① モデル1

Gデバイスで開発したセンサモジュール、受信機をそのまま販売する。

(ただし、この場合はコネクタの接触信頼性等改良が必要である。)

顧客自らセンサネットワークを構築する必要がある。

② モデル2

アプリケーション毎にセンサネットワークシステムを構築し、システムで供給。

顧客は、工場、オフィス、店舗、空調メーカー等になる。

システム納入のため売上げは大きくなる。

オムロンとしては②で事業展開を進めていく。

実際のセンサモジュールは社内の独自のモノで進めていくが、必要に応じて上記Gデバイスで培った要素技術、IPを導入していく。

(3) 今後

電源コンセント式、電池式ではメンテが必要、大型になる等でコスト、サイズの広く普及するには課題が大きい。今後は、自己発電デバイスとの併用で電池レス、メンテナンスフリー化が重要である。

2.5 低消費電力 LSI

本研究で開発したアナログフロントエンド回路は、センサを用いる際に、必須となる回路ブロックである。よって、本開発技術はセンサネットワークへの適用はもちろん、センサ応用システム全般に適用可能な基盤技術である。また、本開発で要素試作により実証した回路は、アナログフロントエンド回路に於いて実用上重視される指標である、サンプリング速度・測定精度に対する低電力性能に関し、世界最高水準の性能を有する。よって、本開発技術を基に、用途に応じた実用的な回路を構成することで、強い競争力を有するセンサ応用システムを実現可能であると言える。

本技術の実用化に向け、今後、周辺回路を含めた、アナログフロントエンド回路の改良を行う。改良したアナログフロントエンド回路をIP化し、センサ用周辺回路のプラットフォームの構築を行い、センサネットワークへの適用を検討する。また、併せて、構築したプラットフォームを用い、日立グループの社会システム製品群や産業機器製品群におけるセンサ適用製品への適用による、早期の実用化を検討する。

2.6 新センサデバイス原理

(1) ナノ構造ガスセンサ

本研究において開発を進めてきたガスセンサの実用化・事業化の見込みについて、以下の通りである。

ガスセンサのアプリケーションとして今回 CR ドラフトガスを対象にしてきた。高濃度のガス感度が向上している為、溶媒濃度が爆発限界中でも感度が飽和しない可能性がある、この為、濃度検出及び爆発検知にも適用できる可能性がある。また、前述したように堆積材料の拡張性が高い為、幅広い用途に適用できる可能性がある。建築用材から放出される揮発性有機物質であるトルエン等の溶媒検出にも適用の可能性はあると考えられる。

(2) 低消費電力センサ・無線モジュール

本研究において開発を進めてきた VB-FET の実用化・事業化の見込みについて、以下の通りである。

本デバイスは、MEMS とトランジスタの集積による特徴的な特性を活かし、SAW や FBAR などの高周波デバイスにかわるチューナブルバンドパスフィルタの実現や加速度センサやジャイロセンサなどにも応用し周辺部品点数削減・低消費電力化などが期待できる。特にチューナブルバンドパスフィルタは、マルチバンド化した携帯電話市場においてニーズが高く、数百億円規模の市場であるため、事業化するメリットは非常に大きいと考えられる。また、加速度センサやジャイロセンサなどにおいてもセンサネットワークの省電力化ニーズが高いことから同様に期待できる。

(3) パーティクルセンサ

提案するパーティクルセンサの目指すところは、市販のパーティクルセンサの置き換えではなく、市販のパーティクルセンサとの併用により、クリーンルームのような大空間のクリーン度の傾向管理を実現することである。感度の高い大型のパーティクルセンサにより、大域的なクリーン度を評価し、提案するパーティクルセンサを用いて、局所的なクリーン度変化の傾向を計測する。このような用途において、提案する小型のパーティクルセンサは期待が高い。

提案するパーティクルセンサを実用化するためには、主に 2 つの技術的課題がある。第一に、レンズを用いずにパーティクルを感度よく検出すること、第二に、ポンプを用いずに効率よくパーティクルを検出領域に流入させることである。レンズを用いないことでセンサの小型化が実現できる。また、ポンプを用いないことでセンサの小型化に加え消費電力低減も実現できる。従って、小型で低消費電力なパーティクルセンサの実用化のためには上記 2 つの技術的課題を解決する必要がある。

前者の課題に対しては、マイクロ構造を有するフォトダイオードを用いたパーティクルセンサを提案し、原理検証まで終えている。しかしながら、クリーンルームなどクリーン度の高い環境における使用を想定すると、検出感度のさらなる向上が必要である。対応策としては、光源波長の最適化、フォトダイオードの高感度化により向上が見込め、PIN ダイオードやアバランシェフォトダイオードなどに今回提案したマイクロ構造を組み合わせることで実現できる。次に、後者の課題に関しては、すでにシミュレーションを行い、検討を始めている。現在はセンサの接地面と流路の距離に応じて、空気の取り込み量が増えることを確認している。流路の位置や形状を改善させることにより、さらに多くの空気を効率よく取り入れる構造を構築することも可能だと考えられる。従って、現在までの検討で提案するパーティクルセンサを実用化するための主たる技術的課題の解決方法を提案し、さらに基礎原理の確認に成功している。今後は上記課題のさらなる改善を行うと共に、SII（セイコーインスツル）内で行われているセンサネットに適用することを想定し、消費電力・製造コストなども検討し、実用化・事業化を目指す。

(4) 汚染ガスセンサ

本研究ではクリーンルームの消費電力削減のため、ドラフトの排気量制御に用いることのできる高感度・低消費電力のガスセンサの開発を行った。

実用化に向けての課題としては、まずセンサ応答の安定性・再現性の向上、製作ばらつき改善等があげられる。これらの課題の解決には WO_3 の成膜条件のばらつきを抑え、膜の耐環境性の向上が必要であり、スパッタによる制御性の高い WO_3 成膜の導入やアニール条件の最適化等の検討が必要と思われる。またガス選択性向上も大きな課題であり、課題解決のためには、触媒添加・動作温度の最適化等を検討しなければならない。

これらの課題が解決できれば実用的な小型・高感度・低消費電力・低コストのガスセンサが実現でき、高機能センサネットワークへの適用が容易となり、アプリケーションとしては、本研究の当初の目的としたクリーンルームの消費電力削減のためのドラフトの排気量制御だけでなく、都市環境の広域大気汚染モニタリングや工場・オフィス等の室内の換気制御等、センサネットワークに適合した今までにないガス計測応用技術へ展開できると考えられ、掘場製作所として継続して検討を続ける。

例えば、大気汚染モニタリング事業についてその市場性を見積もると、現在、従来の大気汚染分析装置は各都道府県に数十台ずつ設置されているが、それだけでは大気汚染の実態を十分に把握することはできず、各都道府県に数千箇所の測定ポイントが求められている。しかし現状の高価な大気汚染分析装置ではコスト的に実現が不可能である。そこで安価で高信頼性のセンサが実現できれば、大きな事業展開

が見込める。たとえば、センサユニット単価を 5 万円、センサユニット 100 個ごとに 500 万円のデータ集積ユニットが必要だとすると、各都道府県に 2000 個ずつセンサユニットを配置するとすれば、約 100 億円規模の市場であるが見積もられる。また国内だけでなく、海外へも事業展開すればさらに大きな市場となる。

(5) 振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス

真空紫外線を用いた高速荷電を用いることにより、実用的な荷電時間で櫛歯状の垂直エレクトレットへ形成することが可能になった。垂直エレクトレットを持つ MEMS 発電器が実現できたことにより、組立が不要となり、低コスト化、小型化が容易になった。

垂直エレクトレットを用いた MEMS 発電器は、低コスト化が可能であり、産業技術としての適用可能性が拡大した。今後は、低共振周波数化、エレクトレット材料の改良などにより、発電器の発電性能を上げ、実用化へ向けて取り組んでいく。

(6) センサ用パワーマネジメントデバイス

本プロジェクトでは、センサ端末の電池寿命を最大限延ばすために、必要時のみ動作する起動スイッチ(イベントドリブン型スイッチ)の開発を実施した。センサ端末の対象は、クリーンルーム内活用のためパーティクルセンサを起動させることを目的とした起動スイッチの開発を実施。起動源としては、フロー変化によりパーティクル量の変化に着目し、フロー変化検出タイプの起動スイッチを実施した。

本研究開発では低消費電力なスイッチを実現するために、圧電体(ゾルゲル PZT)付きカンチレバーを利用した省電力なスイッチの開発を行うとともに感度向上のためカンチレバーの上下面に圧力差を発生させる構造のフローセンサを提案し、フロー変化による起動スイッチの有効性を示唆した。

本起動スイッチは、センサ端末の電池寿命向上、電池交換なしなどのメンテナンス性に対して有効であり、センサーネット普及のためには画期的技術であることが示せた。しかし、起動スイッチとセンシング対象のユニット化、システム化検証により有効性を提案することが必須であり本プロジェクトで得た技術検証をさらに発展させ、事業化に進めるためセイコーインスツルとして継続的に研究開発を実施し実用化に近づける所存である。

(7) 高感度温度センシング用機能薄膜

本研究開発項目の機能性薄膜を用いた最終目標として集積化センサネットワークモジュールをあげることができる。本モジュールにおいては非鉛系強誘電体薄膜を用い、高感度温度センサ(焦電センサ)、および同じ薄膜を活用して作製する無線ネットの駆動電源として活用できる自立発電デバイスが搭載されている。従来

の焦電センサや振動発電デバイスの薄膜材料としては鉛系材料が用いられてきたが、有害な鉛を含まず優れた焦電特性および圧電特性を有する非鉛系強誘電体薄膜の開発が強く望まれている。

本プロジェクトで開発した非鉛系薄膜は Si 基板上の鉛系薄膜と同等の焦電性を示すことができた。今後、社内において開発した技術をベースに薄膜形成技術を進化・発展させ、PZT と同等性能を有する非鉛系圧電／焦電薄膜の開発を推進する。

また本プロジェクトにおいて取り組んだ強誘電体薄膜剥離転写技術においては、高品位な薄膜を、Si や安価なガラス、ポリマー基板上に膜品質の大きな劣化なく形成できる可能性を得た。これにより各種基板上への強誘電体膜の形成が可能となり、従来技術では実現不可能であった IC 一体型強誘電体薄膜が作成でき、センサ等の高感度化が期待できる。また、本技術によればガラスやポリマー基板上に薄膜形成できることから、ガラスやポリマー基板の持つ特性を活かした従来にない新規な MEMS デバイス開発が期待できる。

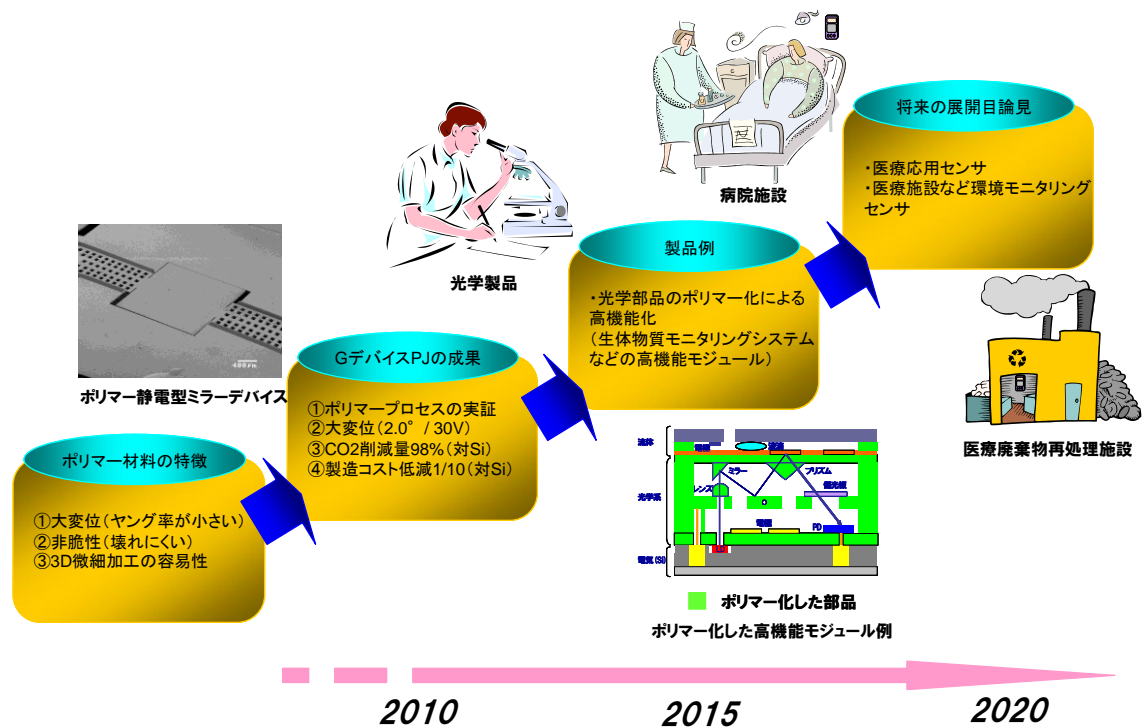
パナソニック 電工においては既に、非鉛系材料を用いたバルク焦電体からなる人感センサを開発し、センサユニットおよびセンサ搭載照明器具を販売している。一方 MEMS 技術を応用した圧力センサ、加速度センサも販売しており、MEMS デバイス製造に関しては豊富な実績を有している。今後、本プロジェクトで開発した技術をベースに、低環境負荷である非鉛強誘電体薄膜を応用し、省エネ化が可能でかつ快適空間創出につながる照明・空調制御を主としたセンサネットワークモジュールの開発を進めると同時に市場性を判断して、数年後をメドに実用化・事業化についての見通しを立てる。

2.7 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス

生体適合性のあるポリマー材料は、①大変位（ヤング率が小さい）、②非脆性（壊れにくい）、③3D 微細加工の容易性などの大きな特徴がある。本 PJ において PMMA を用いた静電型ミラーデバイスを開発することで、目論みの性能を得てポリマーの特徴を証明した。

オリンパスとしては、これらの特徴を活かし光学部品や医療向けセンサへの適用（下図）を考える。光学部品としては、大変位という特徴を活かした微小光学部品や医療応用としては、生体適合性の観点から生体情報モニタリング用センサなどの微細構造部品のポリマー化である。

また将来の目論見として、コスト低減というポリマー化の最大のメリットを活かし、環境モニタリングセンサなどの開発へ繋げる。例えば4インチウエハ1枚あたりの製造コストで比較すると、従来のシリコンベース静電型ミラーデバイスの約 1/10 になると試算している。



2.8 スマートプロトタイピング(8 インチラインのプロセスプラットフォーム構築)

研究試作の段階から 8 インチプロセスラインを用いて、新製造・検査装置による高品位プロセスの構築、新材料・新構造に対応したプロセスレシピの蓄積、プロセスマージンを制御した設計技術の高度化、及び高い製造歩留り・生産性を実現する新たな評価・解析技術のシーズの探索と実用化が不可欠である。

今後も低コスト化と量産化が求められる静電容量型のジャイロおよび加速度センサ、圧電型ジャイロ、Si 発振子等のセンサ TEG の試作を、8 インチラインのプロセス技術群のプラットフォーム化の手段に用いた。これらの試作に先立って、あるいは相前後して、8 インチラインに導入したプロセス装置の性能・特性を把握し、要素プロセス開発および面内均一性(欠陥・ばらつき)評価を行い、プロセスレシピ、各プロセスの歩留まり、材料、検査・計測・装置制御に関わる情報、知見・ノウハウの収集・整理を行うこととした。これらの収集・整理と試作プロセスでのそれを網羅的に蓄積することで、8 インチラインの特性・環境を踏まえたプロセスプラットフォーム確立に向けた第一歩を踏み出し、BEANS・3次元集積化デバイスの開発・試作ユーザへの訴求力が高まることが期待される。

具体的な取り組みと成果については以下に述べる。

1) 加速度・ジャイロ・シリコン振動子、Si 薄膜メンブレン、圧電ジャイロ TEG の設計・試作

<取り組み内容>

- ・シリコンベースセンサ TEG の試作に向けて、各プロセス(成膜・リソグラフィ・エッチング・洗浄)装置の要素技術を開発する。
- ・8 インチラインを用いて試作を行い、ラインの特性ならびに製造環境を評価し、MEMS デバイス製造の基盤構築を図る。

<成果>

- ・8 インチウエハによる酸化膜、SiN、i 線露光、Si 異方性エッチング、Si-DRIE、メタルドライエッチング、犠牲層ドライエッチングの条件出し、応力解析、断面形状、寸法評価、ウエハ面内均一性を評価し、さらに5種類のセンサ TEG の試作とそのセンサの特性評価により、8 インチ試作に適用できるプロセスプラットフォームの構築を完了した。同時に8インチプロセス装置、計測装置のレシピの蓄積を行った。

<実用化の見通し>

MNOIC ; ファンドリー事業 (H23 年度)

パナ電 ; 赤外線センサ、フローセンサ商品化予定 (H26 年度)

DNP ; ジャイロ商品化予定 (H26 年度)

2) 中性粒子ビームエッチングのデバイス性能向上実証

<取り組み内容>

中性粒子ビームエッチングの大口径(8 インチ)化によるウエハ内の特性ばらつきをセンサ TEG の試作により評価する。

<成果>

8 インチウエハ面内に作製したカンチレバーに中性粒子ビームエッチングを行ない、カンチレバーの共振周波数と Q 値の初期特性を計測し、ウエハの表面状態が回復すること、100nm エッチング行ったところで特性のサチュレーションが確認でき、中性粒子ビームエッチング装置開発に重要な指針となるデータを取得できた。

3) μ プローブ TEG の設計・試作

<取り組み内容>

先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを 8 インチウエハで試作し、ウエハ内、及びロット間の形状・特性のバラツキを、マルチプローブ評価装置を用いて評価する。さらに、8 インチラインの検査デバイスとして適用できるかの可能性を検討する。

<成果>

マルチプローブ評価装置を用いたマルチプローブデバイスの評価手法として、局所陽極酸化(LAO)法による描画、光てこを用いた直接高さ測定、プローブ先端接触電流値のリアルタイム計測の 3 つの手法を提案し、電流値のリアルタイム計測法が最も直接的かつ容易にデバイスの特性ばらつき計測や不良スクリーニングをできることを見出した。電流値のリアルタイム計測法を用いて、8 インチラインで試作したデバイスの、ロット間、ウエハ内での形状ばらつきを評価した結果、顕著な形状ばらつきは見られなかったものの、ロット間の電極配線形成プロセスの品質に差があることが示唆された。このことから、本デバイスを用いた手法が、最先 8 インチラインの検査デバイスとして適用し得る可能性を示した。

<実用化の見通し>

東芝； 16nm 世代以降の半導体・MEMS 向けローコスト描画技術として、実用化・事業化を目指す。

(東芝プレスリリース、

http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_01/pr_j2502.htm)

4) 欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発

今回開発したばらつき評価手法で等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることを確認できた。本成果より設計者がウエハ内のばらつきを解析するためのツールである「ウエハ内特性ばらつき可視化・分析ソフトウェア」として 2015 年までに実用化できる見込みである。まずは MNOIC のライ

ンに対応したシステムを提供する。実用化に向けて静電容量系以外の MEMS への対応、多種デバイスによる検証、測定の高精度化、高速化を進めていく。具体的には実用化のために、以下のステップを踏むこと考える。

- ① 静電容量系以外の MEMS への対応と多種デバイスによるさらなる検証
- ② 実用化に向けたツールの整備
- ③ 汎用の電気特性評価システムに組み込み「ウエハ内特性ばらつき可視化・分析ソフトウェア」を TIA-NMEMS/MNOIC にて提供
- ④ 「ウエハ内特性ばらつき可視化・分析ソフトウェア」の販売

更なる検証のためには、等価回路モデルにおける直流電圧依存性を考慮し、複数の直流電圧の出力特性からパラメータを抽出することで、等価回路モデルの精度を向上する必要がある。また実用的な手法を確立するためには、より多くのセンサに対して検証を行い評価手法の信頼性、汎用性を高めることが求められる。その後、評価を行うツールの整備を進める。評価に必要なツールには、MEMS の電気、機械特性のウエハ内分布を自動的に計測するツール、電気・機械特性から等価回路パラメータを抽出するツール、等価回路パラメータからばらつきを評価するツールなどがある。最後に整備したツールを汎用の電気特性評価システムに組み込み、「ウエハ内特性ばらつき可視化・分析ソフトウェア」として 2015 年度頃にユーザに提供を開始する見通しである。最初のツール提供の場としては、出来るだけ多くの設計者に還元でき、評価のために必要な測定装置を備えた公開研究施設である TIA-NMEMS/MNOIC が有力候補として考えられる。2018 年度頃には、年間数千万規模のソフトウェア販売事業を想定している。

2.9 低環境負荷型深堀エッチング

実用化に向けた今後の取り組みとして、

- ① MEMS 深堀エッチング装置、半導体エッチング装置への適用推進（アルバック）
 - ② 車載用高集積センサ、ECU 用 LSI への適用推進（デンソー）
 - ③ エッチング解析ソフトへのプラグイン化（みずほ情報総研）
- がある。

一方、実用化の課題として、以下をクリアにする必要がある。

（課題）

- ① BF3 ガスの低コスト化
SF6 と BF3 の単位重量あたりの単価を比較すると、現時点では BF3 が約 8 倍高価であることから、ガス使用量で試算すると 1 プロセスあたり 4 倍ほどプロセスコストがかかる。このコスト差をいかに縮めるかが今後の課題となる。
- ② エッチング性能への付加価値性
エッチング代替ガスを使ったプロセスをエッチング装置に組み込み、ユーザに

対してうれしさをアピールするには、エッチング性能で既存のプロセスに対してプラスになる何らかの付加価値が必要である。

③ 想定デバイスの技術成立性

車載用高集積センサ、ECU 用 LSI への適用を検討するうえで、エッチング工程を含むトータルプロセスおよび、デバイス性能の成立性が満足できるかが今後の課題である。

また、将来的には本プロジェクトで開発したプラズマモニタリングとエッチング形状予測結果からパラメータへフィードバックを行うことをエッチング装置に組み込むことも視野に入れる。

以上の実用化の課題に関して継続的に検討に取り組み、4、5年後の実用化を目指す。

2.10 低環境負荷型集積化プロセス基盤

本研究開発項目の最終目標である低温接合技術を適用する MEMS デバイスとして静電容量型加速度センサを挙げることができる。従来は、別チップとして製造した信号処理回路 ASIC と MEMS を、ワイヤー・ボンディングで接続して 1 パッケージ化している。本接合技術により、ASIC と MEMS とを 1 チップに集積化することで、ワイヤー・ボンディングによる接続に比べて寄生容量を低減できるため高性能化と小型化が実現できる。さらに、低温接合技術により、高温で機能劣化するスティクション防止膜の性能を損なうことなく実装が可能となる。

三菱電機は、1999 年に製品化した静電容量型 MEMS 加速度センサを初めとして、高い信頼性が要求される各種分野に継続して製品を提供している。総合電機メーカーとして幅広く製品展開をしており、各種システムと MEMS デバイスとを融合させた製品を事業化する能力を有している。例えば、加速度センサとジャイロを集積化した慣性センサは、国内外での法制化が進む自動車の走行安定性を制御する横滑り防止システムに不可欠なセンサであり、高性能で高い信頼性が求められ、本研究開発成果を適用するにふさわしい製品のひとつと考えている。

今回のプロジェクトで得られた要素技術をもとに、4 年程度を目処に実用化の見通しを立てる。事業化については、その時点での市場動向や事業性を勘案して判断する。

2.11 スマートファブシステム

本技術開発項目の成果の実用化の対象として次のものが挙げられ、それぞれみずほ情報総研としての実用化の見込みについて述べる。

① 3次元構造計測による設計へのフィードバック

X 線 CT 装置計測から形状・力学特性の比較という一連の手続きにより、デバイス・プロセス設計改善への指針を提示し得る。これにより MEMS 設計の効率化を

図ることができ、開発時のエネルギー・資源の削減、開発期間の短縮・製品の早期市場投入につながる。

X線CTによるMEMSの計測はこれまで行われていなかったため、計測の特性が企業の必要としている開発現場のニーズを満たすものであれば、計測・分析サービスという形で実用化の可能性は高いと想定される。2011年度中に実用化を予定しており、3年後の売り上げを9000万円と見込んでいる。

② MEMS製造時の二酸化炭素排出量の分析

MEMSのデバイス構造体の製造工程についての二酸化炭素排出量の分析により、装置・工程・項目に対する排出量の削減への指針を得る。これらにより、製造工程の環境負荷低減を図ることができ、また、MEMSの低環境負荷設計を行うことも可能になる。様々なMEMSの二酸化炭素排出量分析を通じて得られた知見は、ソフトウェアツールとして提供することで幅広く有効に活用されるものとなる。

環境負荷低減は我が国全体を挙げて取り組むべき課題であり、カーボンフットプリント等の国家の法制度・標準化施策や企業の社会的責任としての取り組みの進展とともに、二酸化炭素排出量の分析へのニーズが高まってくるものと想定される。ソフトウェアツールとしての提供は2013年を予定している。また、MNOIC@TIAでの装置やレシピへの環境ラベリングのための分析を予定している。

二酸化炭素排出量の分析手法が出荷される全MEMSに適用され25%の削減効果があると想定すると、9万t-CO₂e/年間(2019年)の排出量の削減が見込まれる。

③ デバイス設計・プロセス設計のための情報共有基盤

設計情報や材料物性、計測情報や環境負荷情報を格納できるデータベースシステムと、これらのデータを協調して活用するためのフレームワークを実用に供する形で実現することにより、設計の効率化を図ることが可能になる。設計の効率化という観点から、設計ツールとの連携や統合化をはかることで、より有効に活用されるものとなる。

設計における3次元構造などの計測情報の活用や、二酸化炭素排出量などの環境負荷情報の活用の進展とともにデータベースへのニーズが高まってくると想定される。特に、環境負荷情報は、環境負荷を分析する上での標準化と歩調を合わせた公共性の高いデータとなり得る。MNOIC@TIAの装置に対応したデータベースシステムの提供を2013年に、設計ツールとの連携機能の提供を2015年に予定している。

データベースシステムの利用によるデータの収集や設計の効率化により、設計時間を6000時間(1サイト、20デバイス開発)削減可能であると見込んでいる。