

3. 各テーマの成果詳細

3.1 MEMS プロジェクト RF スイッチ製造技術の開発

超小型、高信頼性で封止パッケージ化した高周波RFスイッチの製造技術の開発

3-1 研究概要

プロジェクトの目的である「RF-MEMSスイッチの製造技術開発」達成に向けて、各年度の取り組み目標とその結果の概要を示す。

DC-10GHz の信号伝送で、幅 $100\mu\text{m}$ 、厚さ $2\mu\text{m}$ の信号線を有するRFスイッチの製造技術に
関し、以下の目標を設定する。

- ① 信号線、接点用金属材料の膜厚精度およびアクチュエータの寸法精度1%以下の高精度材料
加工技術を開発する。
- ② 接点の開閉回数10億回以上可能な接点固定防止技術の開発。
- ③ パッケージの伝送損失を0.1dB以下(10GHz)に抑える低損失パッケージ技術の開発。

本プロジェクトで開発したRF-MEMSスイッチを図1に示す。

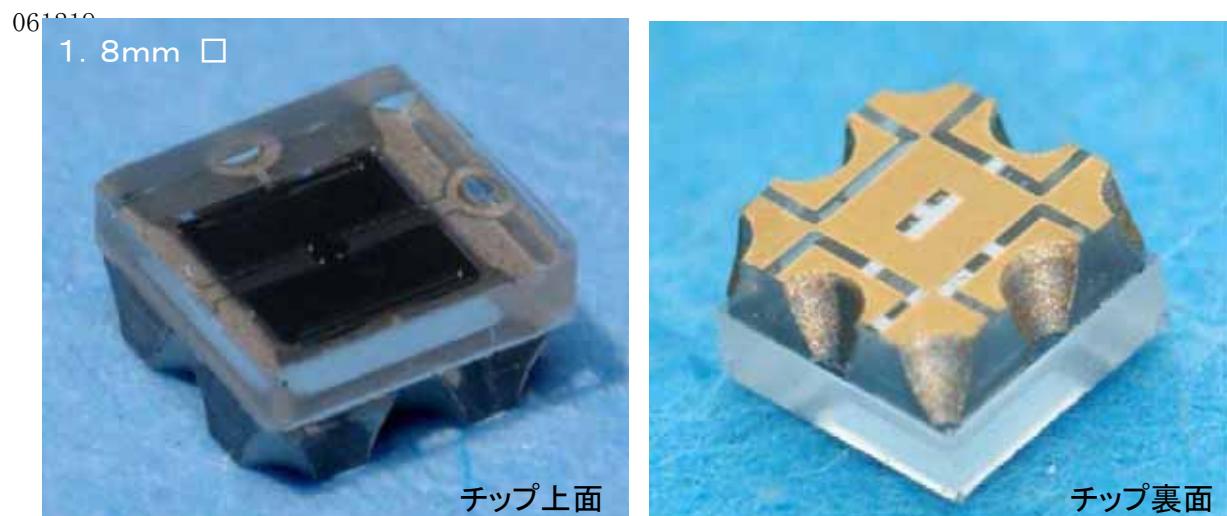


図1 開発したRF-MEMSスイッチ写真

3-2 成果詳細

(1) 高精度3次元加工技術開発

研究・試作のみでなく、実用化されたRF-MEMSスイッチ実現には高精度の加工技術とその再現性が十分でなければならなかった。特にRF-MEMSスイッチは2つに分割されている信号線を静電引力で駆動する接点金属で接触、導通させる構造のため、適度な押し付け圧、十分な駆動速度、それぞれの安定した動きが要求され、その性能を決める駆動部分と接点周りの加工精度が非常に厳しく要求される。[図2]

そこで具体的に以下の3点の加工精度ばらつきを1%以下に抑えることを目標に研究開発を行った。またこのプロセス技術の深耕度を正しく評価する測定機器や開発ツールを整備し、開発を正確かつ効率よく実行できる体制を整備し開発を実行した。

加工目標精度

- | | |
|---------------|------------------|
| ・絶縁膜形成膜厚ばらつき | 高精度膜厚制御 |
| ・電極金属形成膜厚ばらつき | 高精度膜厚制御 |
| ・シリコン加工形状ばらつき | 高精度シリコン・メタルエッチング |

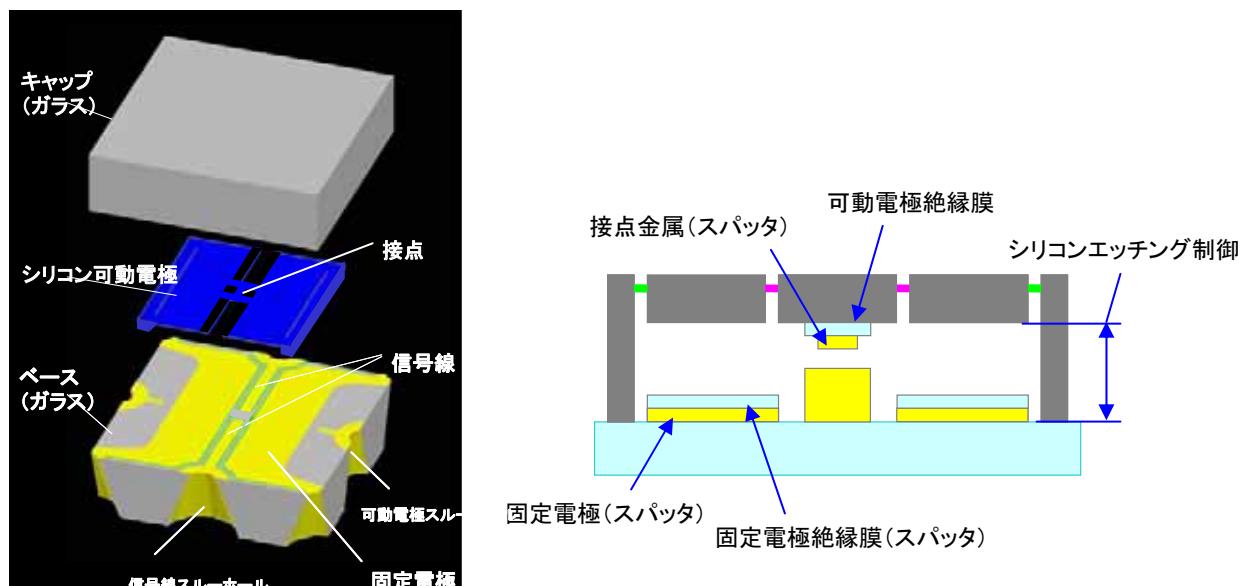


図2 RF-MEMSスイッチと3次元加工精度要求箇所

そして各年の目標を次のように定め、開発に着手した。

平成15年度：各種成膜装置、エッチング装置を立ち上げるとともに、寸法計測速度の高速化検討を行う。

平成16年度：各種成膜条件、エッチング条件を求め、加工精度1%への目処を得る。

平成17年度：信号線、接点用金属材料の膜厚精度およびアクチュエータの寸法精度1%以下の高精度材料加工技術を開発する。

①平成15年度の開発実績

平成15年度は開発基盤の整備と開発の着手のステージで高精度3次元加工技術開発においては主に各種成膜装置、エッチング装置を立ち上げるとともに、寸法計測速度の高速化検討を行った。

1)高精度膜厚制御

平成15年上期導入装置した拡散炉〔図3,4〕の立ち上げ、および下期に導入したドライ酸化炉、P-DEPO装置、インプラ修理ドラフトの立ち上げを完了した。装置の条件だし用プロセスでは、評価用パターンをMEMSシミュレーションソフト「CoventorWare」を活用し、必要膜質、膜厚の設計を行い、これを目標値に条件出しを実施した。さらに、これらの装置の立ち上げ後、高精度加工を実現するプロセス条件探索を目的とする試作を実施した。ドライ酸化炉、P-DEPO装置は上期導入装置である拡散炉と同様に、温度制御に優れた縦型を採用した。

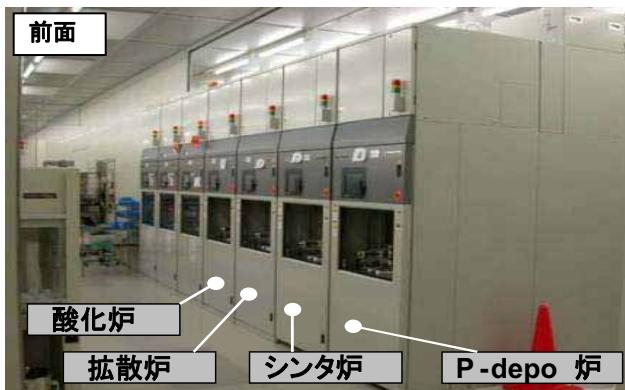


図3 成膜装置 前面写真



図4 成膜装置 裏面写真

2) 高精度シリコン・メタルエッチング

エッチングに必要な装置である、スピニエッチャー、ウエハ薬品洗浄ドラフト、レジスト除去溶剤系ドラフト、レジスト除去酸系ドラフト、酸化膜エッチングドラフトの立ち上げを行った。立ち上げた装置の一例として、図5にウエハ薬品洗浄ドラフトの洗浄作業フローを示す。この装置は、水素溶解水(水素水)・オゾン溶解水(オゾン水)・超音波の組み合わせで、ウエハを洗浄する。従来のRCA洗浄装置と比べると、少ない薬液で付着微粒子・有機物質を洗浄するため、より厳密な環境管理が可能であり、プロセス再現性向上も期待できる。また、薬液濃度が薄くできるため、ウエハ表面に与えるダメージも本装置の方が従来よりも小さくできる。さらにウエハ表面のダメージはばらつきに寄与する為、本装置によりプロセスばらつきを軽減出来ると考えられる。

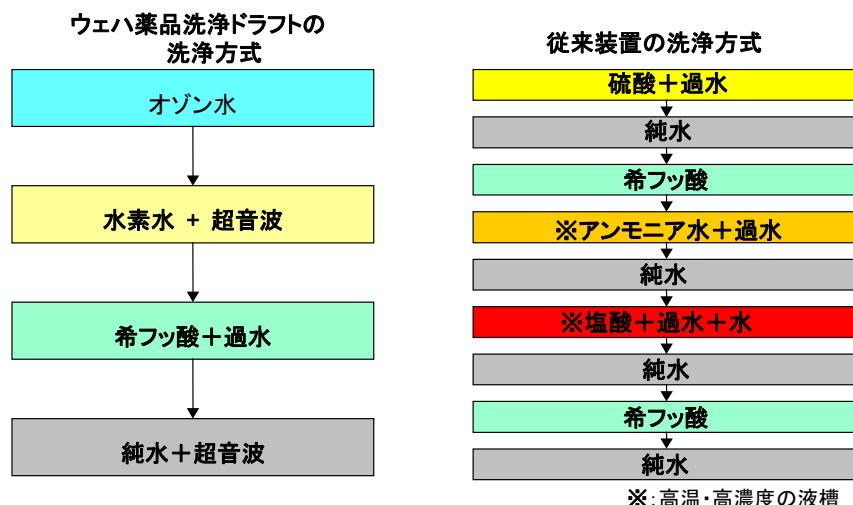


図5 ウエハ薬品洗浄ドラフト 洗浄作業フロー

3) 高速・高精度計測評価

高精度加工を安定して行うには、その加工精度を正確に評価することが必要である。また実用化製品をタイムリーに出すには、正確なデバイス構造設計と高速・高精度な計測評価が必要である。そこで加工表面を分析する表面分析機を選定し、発注を完了するとともにMEMSシミュレーションソフトウェア「CoventorWare」を使用してデバイス設計を開始し、短期間でのデバイス構造設計に活用した。

② 平成16年度の開発実績

平成16年度は技術開発・検証のステージであり、平成15年度で蓄積した技術データを基に各種成膜条件、エッチング条件を求め、加工精度1%への目処を得た。

1) 高精度膜厚制御

拡散炉、ドライ酸化炉、ウェット酸化炉、LP-CVD装置については条件出しにより表1、図6のような成膜装置の均一性のような結果を得た。さらにもう一つの成膜課題である金属膜厚制御技術の開発として、スペッタ装置（アルバック SME-200U）[図7]の導入立ち上げ、および条件の最適化・補正板の使用などの改良を実施し、1%以下の加工精度を達成した。[図8]さらにMEMSシミュレーションソフト「CoventorWare」を用いて設計した評価用パターンを活用することで開発を加速させることを実現した。

表1 各成膜装置の膜厚精度
($\pm X\%$)

	目標	面内	面間	バッチ間
LP-CVD(Si ₃ N ₄)	1.00	0.68	0.78	0.93
ウェット酸化炉	1.00	0.32	1.00	0.93
ドライ酸化炉	1.00	0.69	0.75	0.72
拡散炉	1.00	0.48	0.57	0.75

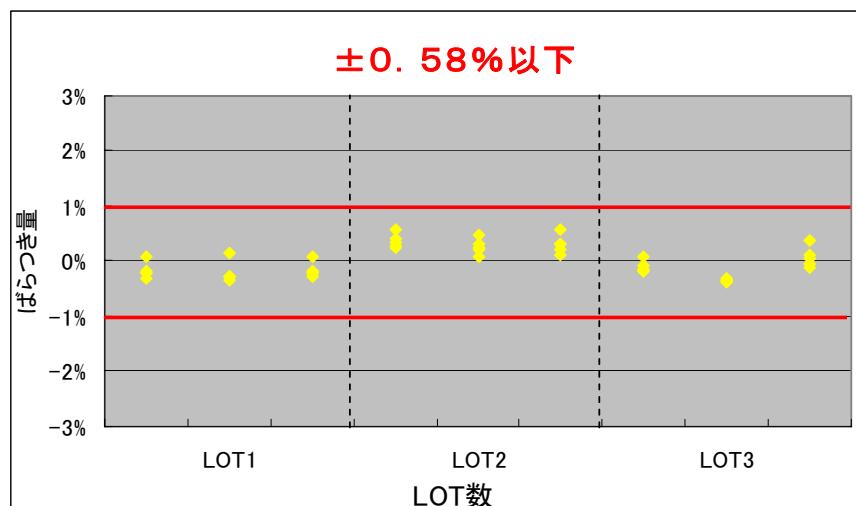


図6 可動電極絶縁膜 膜厚ばらつき

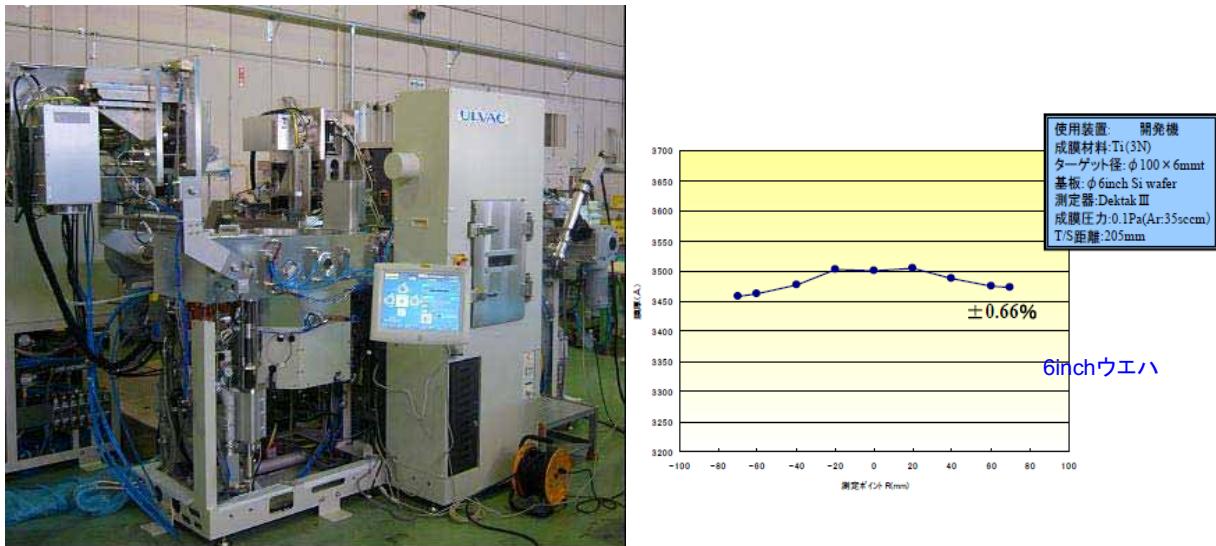


図 7 成膜装置（スパッタ）の均一性

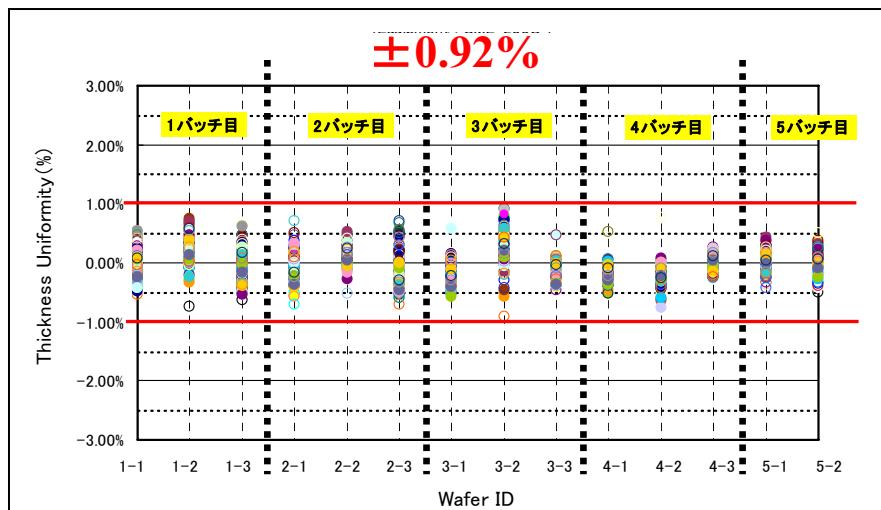


図 8 スパッタ装置の成膜膜厚ばらつき（バッチ間）

2) 高精度シリコン・メタルエッチング

先に述べたようにシリコン加工形状ばらつきはRF-MEMSの性能、特に接点信頼性を左右する。この形状に影響を与える加工プロセスは、基板であるシリコンやその上に形成されている金属で作られた電極をエッチングなどの加工を加える場合である。プロセスごとに形状を測定した結果、実際に大きなばらつきが存在し、性能に影響を与えるのはシリコンのエッチングプロセスであることが判った。そこで、TMAHを用いたシリコンウエハのエッチングにおいて、投入ウエハ間、面内、どこでも同一プロセス環境を実現することを目標に装置開発を実施した。その結果、槽内温度差±0.1°Cで制御することや、薬液の供給と攪拌方法を最適化すること、薬液槽の密閉化などの機構を持つシリコンエッチング装置〔図9,10〕を開発することにより加工精度1%以下を達成した。〔図11〕

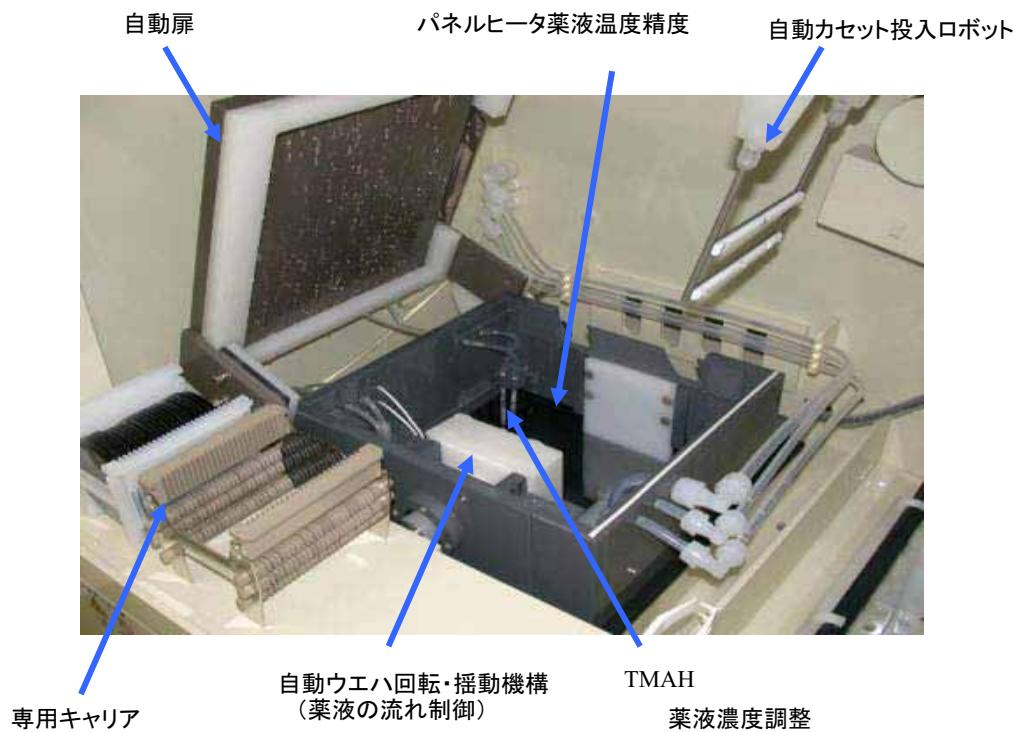


図9 シリコンエッチング装置 (エッティング槽)

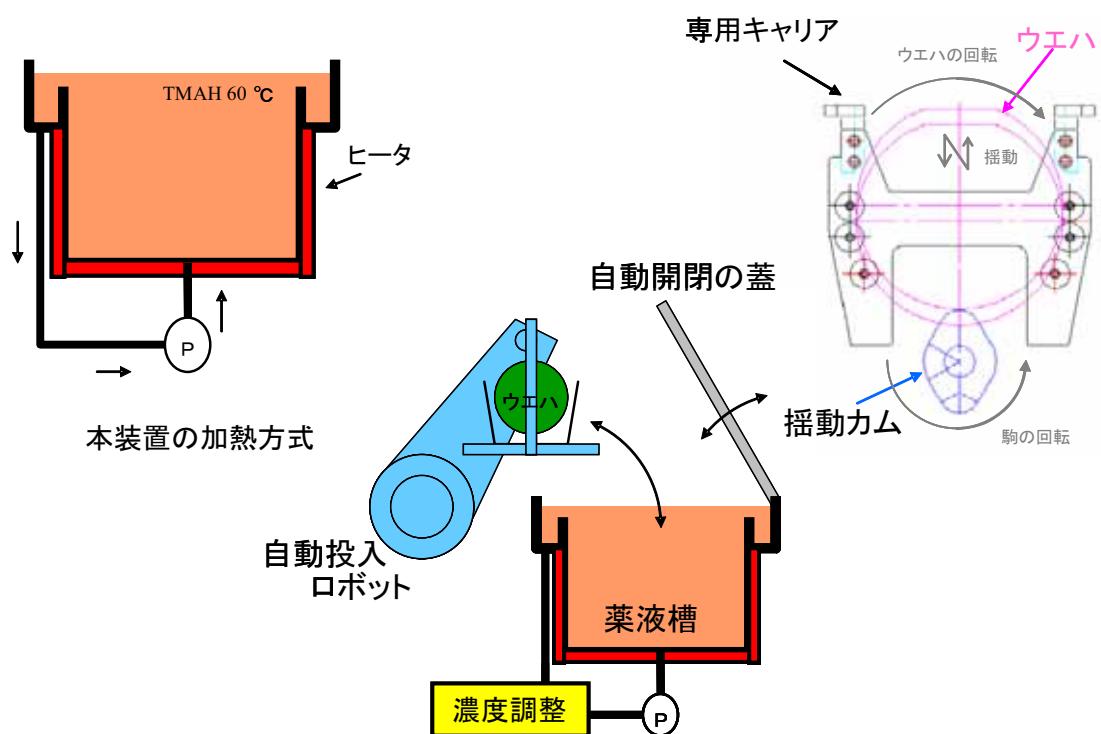


図10 シリコンエッチング装置の構成

$\pm 0.91\%$

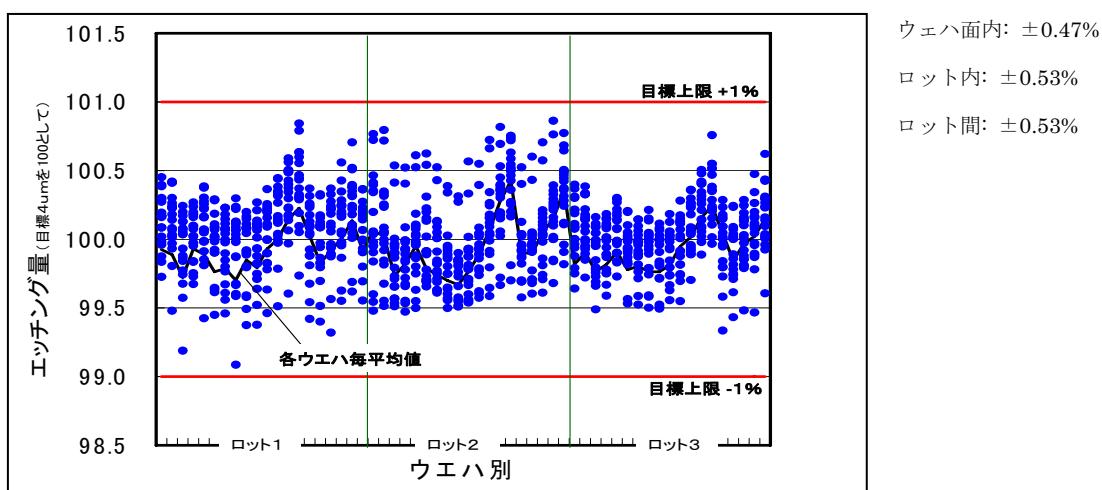


図 11 TMAH による Si エッチングばらつき (ロット間)

3) 高速・高精度計測評価

高精度シリコン・メタルエッチングの加工データと設計データの相関・検証を実施し、開発加速に活用した。

③平成 17 年度の開発実績

平成 17 年度は実用化とファンドリへの技術展開のステージであり、信号線、接点用金属材料の膜厚精度およびアクチュエータの寸法精度 1%以下の高精度材料加工技術を実機テストを通じて達成確認するとともに、ファウンドリに技術移転を行った。

1) 高精度膜厚制御

平成 15 年から 16 年度までに得た条件を用いて実デバイスを量産試作し、成膜評価を実施した。その結果、絶縁膜形成膜厚ばらつきおよび電極金属形成膜厚ばらつきとともに量産化に十分な出力結果を得た。電極金属形成膜厚ばらつきのデータをファンドリでの試験結果とともに提示する。

[図 12]

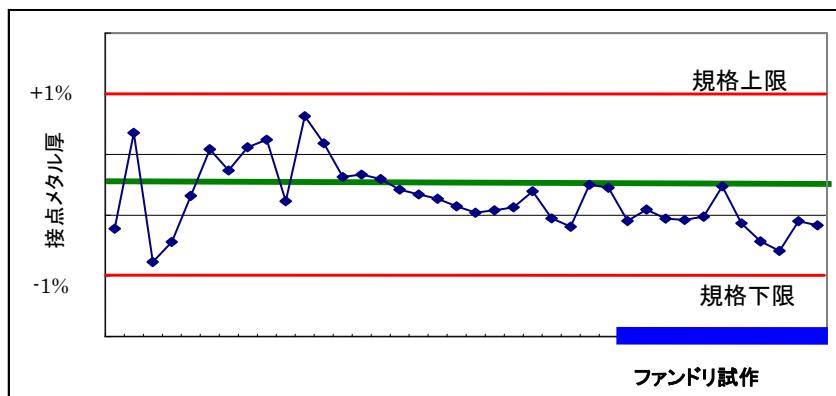


図 12 接点メタルスパッタ膜厚

2) 高精度シリコン・メタルエッチング

シリコン形状の安定加工技術が実際の量産プロセスの中で実用に耐えうるか確認するため、実デバイスを多く試作する中で評価を行い、十分な結果を得た。[図 13]

さらに今回 1 %以下の精度向上を目標としたプロセスも含む実デバイスで、実用可能なデバイスが実際に作製できているのかをファンドリ試作し、信頼性を評価することで検証した。[表 2]

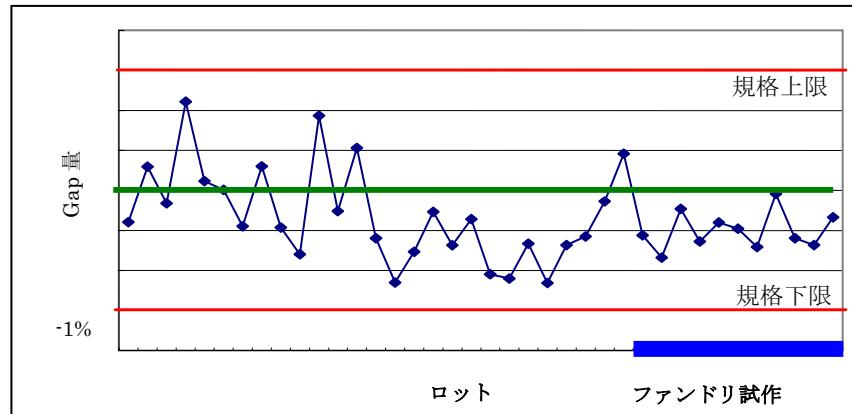
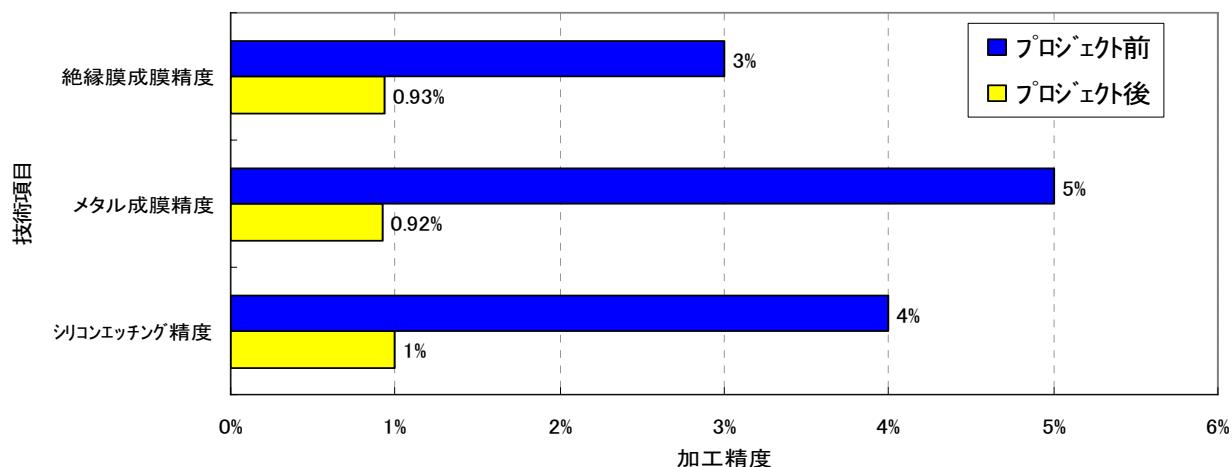


図 13 1stGap シリコンエッチング

表 2 動作信頼性評価一覧

試験項目	試験条件	試験個数	判定
電気的耐久性	DC0.5V,0.5mA 1億回以上	116	合格
高温保存	100°C 192H	11	合格
低温保存	-40°C 192H	11	合格
高温高湿	85°C 85%RH	11	合格
温度サイクル	-40°C～100°C 100サイクル	11	合格
高温通電	85°C 192H 定格通電	11	合格
低温通電	-20°C 192H 定格通電	11	合格
誤動作振動	10～55Hz/1.5mm/1掃引 5min(9G)接点ON/OFF1掃印	5	合格
誤動作振動	10～500Hz/1.5mm/1掃引 5min(10G)接点ON/OFF1掃印	5	合格
誤動作振動	100～2000Hz/20G/1掃引 4min接点ON/OFF1掃印	5	合格
耐久振動	10～55Hz/1.5mm/1掃引 1min(9G) 3軸方向各2H	5	合格
耐久振動	10～500Hz/1.5mm/1掃引 15min(10G) 3軸方向各2H	5	合格
耐久振動	100～2000Hz/20G/1掃引 4min 3軸方向各4回	5	合格
誤動作衝撃	50G 3軸6方向各3回接点ON/OFF	11	合格
耐久衝撃	100G 3軸6方向各3回接点OFF	11	合格
取付方向性	直交 3軸6方向	11	合格
はんだ耐熱	260°C 10sec2回	11	合格
温度特性	-20～85°Cにおいて2H放置後基本特性	11	合格
静電耐圧	HBM: 100V±極性5sec間隔5回	11	合格
絶縁抵抗1次-2次間	100MΩ以上/100VDC	22	合格
絶縁抵抗2次間	100MΩ以上/100VDC	22	合格

ファンドリ試作・技術移転に関して、ファンドリ技術者が実際に試作やプロセス、精度評価を実施することで、技術移転に取組んだ。結果として各加工精度の向上が確認でき、ファンドリの実力向上が得られたと評価できる。[図 14]



3) 高速・高精度計測評価

量産試験を行った実デバイスの加工状態を評価した結果、以下のように安定した評価を得られた。研究所試作とファンドリ試作との比較を図 17, 18, 19, 20 に示す。

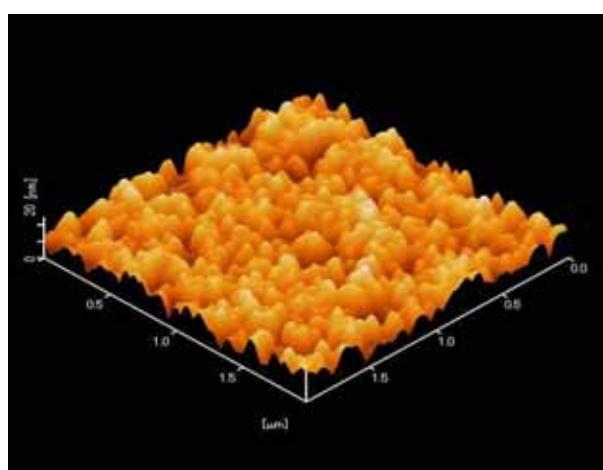


図 15 研究所試作チップ接点表面 AFM 像

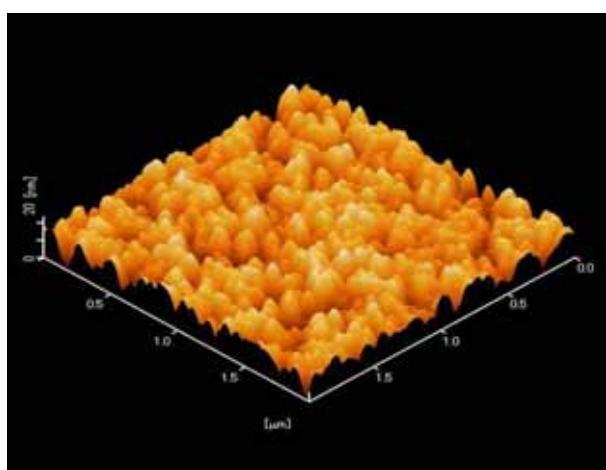


図 16 ファンドリ試作チップ接点表面 AFM 像

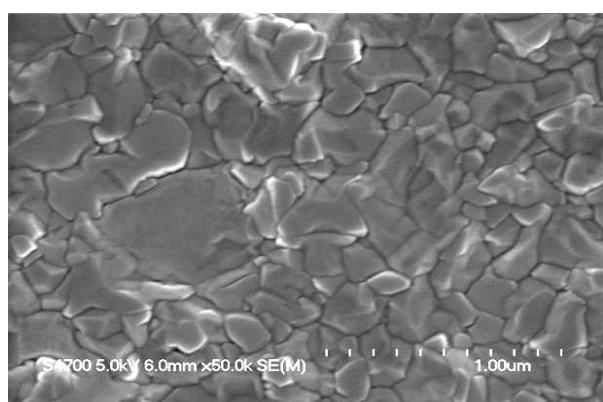


図 17 研究所試作チップ接点表面 SEM 像

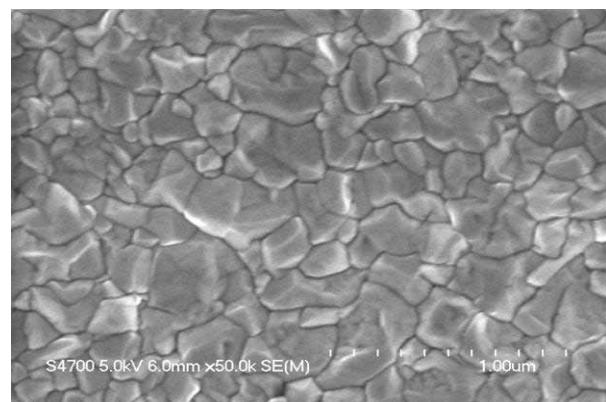


図 18 ファンドリ試作チップの接点表面 SEM 像

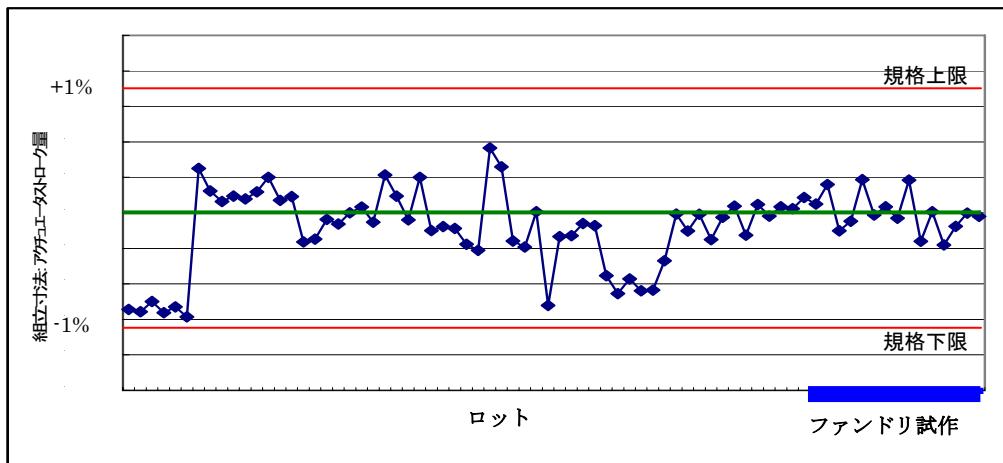


図 19 組立寸法 アクチュエータストローク量推移

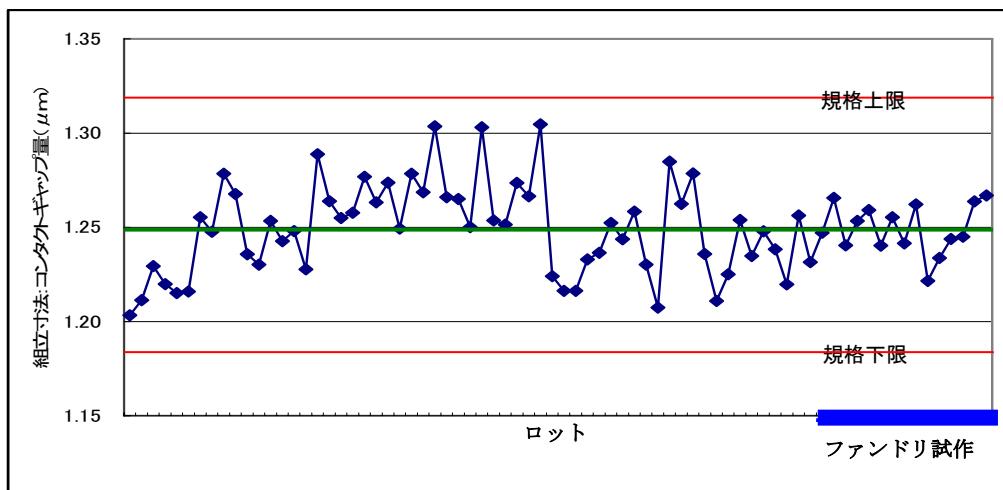


図 20 組立寸法 コンタクトギャップ量推移

高速・高精度計測評価についてもファンドリへの技術移転を行い、アクチュエータ、接点の解析・評価および設計へのフィードバックを行えるようにした。[表 3]

表 3 プロジェクトによるファンドリ測定評価技術向上効果

区分	技術項目	プロジェクト前	プロジェクト後
測定能力	表面分析分解能	10nm	1nm
	アクチュエータ動作高速解析	—	測定可能

(2)接点固定技術開発

スイッチ(リレー)の開閉設計において、考慮しなければならないパラメータは、「接点材料の硬度・固着力、アクチュエータの接触力・開離力、接点表面の制御、接触抵抗値」である。特に静電駆動型のMEMSスイッチの場合、アクチュエータであるシリコンの弾性力をスイッチの接触力や開離力として用いているので、接触力・開離力を大きく取ることができない。接点表面のコンタミネーションが多い場合、接触力が不足し接触抵抗が不安定になる。また、接点材料の固着力が開離力を上回る場合は接点の固定が起こる。MEMSスイッチにおいては、特に固定が大きな課題となっている。固着力は、接触抵抗とトレードオフの関係にあるので、まずMEMSスイッチに合致した固着力の材料を選定し、選定した材料の加工プロセスの開発、コンタミネーション抑制を含めた洗浄工程などの接点表面制御プロセスの開発、およびデバイスとしての量産製造プロセス確立を目指した。また、超長期開閉寿命試験を実施・評価して得られる課題を抽出して、開閉設計の最適化を図ることで、最終目標である開閉回数10億回以上を達成すべく取り組んだ。

接点固定技術開発における、マイルストーンとして以下の目標を設定した。

平成15年度：固定の起きにくい金属材料の選定とその加工技術を開発し、開閉回数2億回達成する。

平成16年度：固定の起きにくい金属材料の製作プロセスを確立し、開閉回数5億回達成する。

平成17年度：接点の開閉回数10億回以上可能な接点固定技術を開発する。

以下、年度ごとにその成果を詳しく示す。

①平成15年度の開発実績

以下のように平成15年度の目標を達成した。

1) 高耐久材料選定

接触抵抗と固着力はトレードオフの関係にあるので、MEMSスイッチに合致した固着力を持つ金属材料を選定する必要があった。平成15年度上期に行った材料による固着力-接触抵抗評価を基に固定の起きにくい金属材料の組み合わせを抽出した。[図21,22] また再現性・安定性を目標に積層膜の構成を決定し、プロセス条件の最適化を図り、開閉寿命試験にて信頼性実力を評価した。表面処理技術の確立と併せ、原理モデルにて寿命評価試験で2億回を達成し[図23]、高耐久材料の選定を完了した。

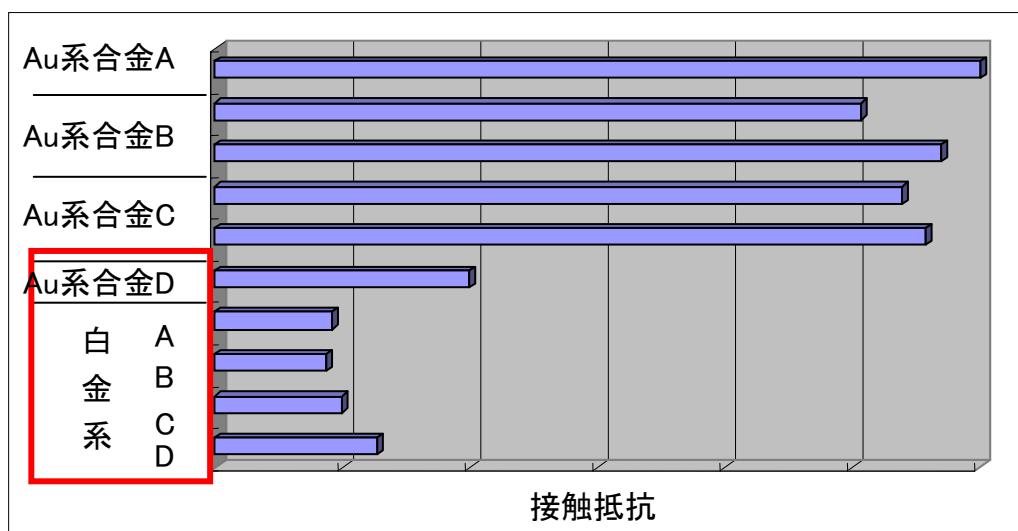


図21 接点材料ごとの接触抵抗測定結果

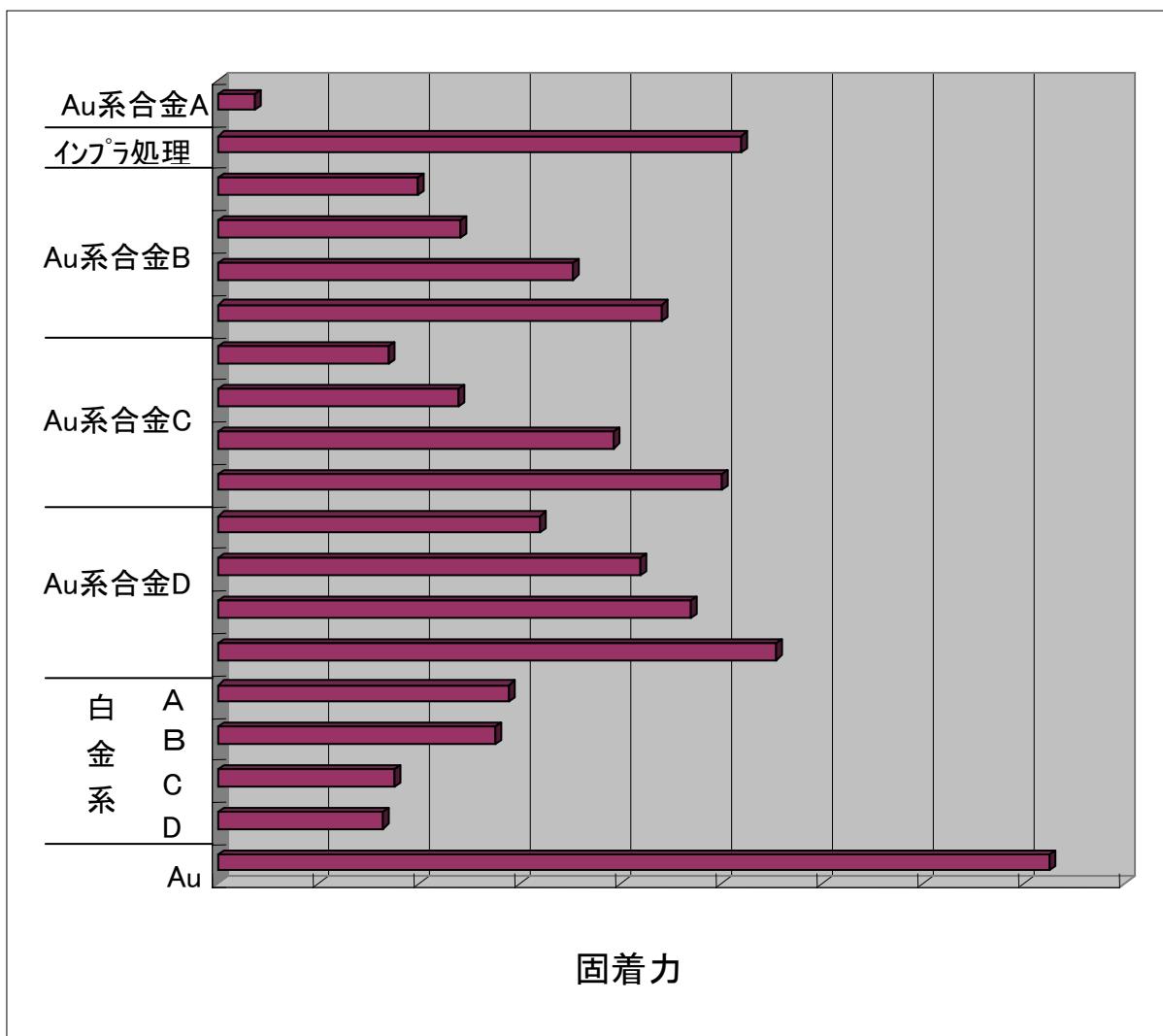


図 22 接点材料ごとの固着力測定結果

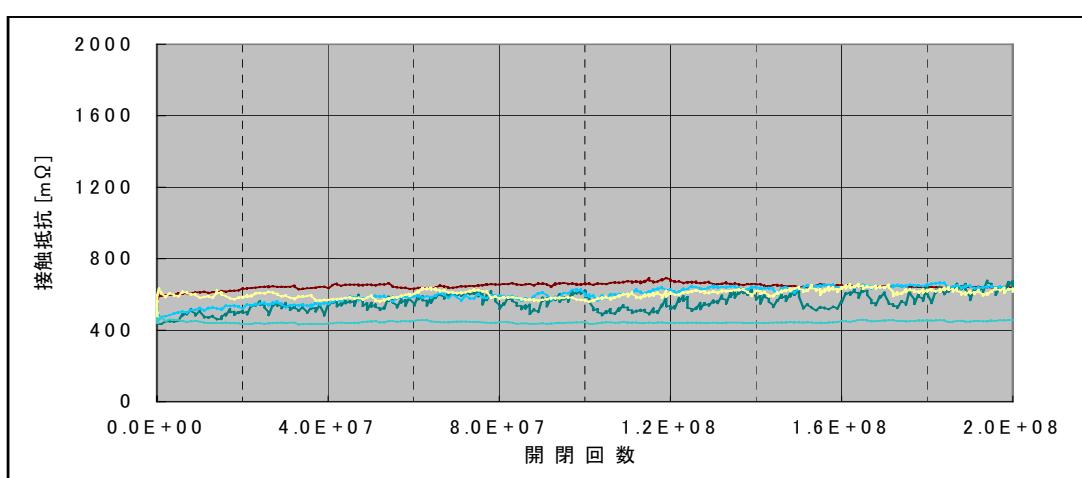


図 23 寿命評価試験結果(2億回)

2) 表面処理・加工技術

高耐久材料は難エッチング材料だったので、その加工方法を検討し、基板材料、配線材料と親和性のあるリフトオフ工法を開発した。この工法はメタル材料のリフトオフ膜を使用するもので、リフトオフ膜形成時の洗浄工法、リフトオフ後に不要物の残留や表面荒れを起こさない犠牲層除去工法などを含む。[図 24]この工法により、パターン形成に関してはプロセスの制約無しに、自由に接点材料を選ぶことが可能となった。また、リフトオフ基板の表面汚染がその後の高耐久材料(接点)成膜プロセスにおいて、結晶成長を妨げる要因となるので、リフトオフ基板の表面波プラズマによるガス洗浄プロセスを開発した。プラズマのガス種、温度、電力の条件を調整し、高い有機物除去能力と低ダメージを両立させた。さらに、試作プロセスデータはデータベースにて管理し、工程管理、課題と工程条件の相関抽出等に活用した。内作・外注にて作成した接点表面については、結晶配向性と結晶粒度の観点で表面分析[図 25]を実施し、開閉寿命との相関にて試作する金属膜構成を決定した。また、シンタ炉を導入し、立ち上げ完了した。接合機については、寿命に影響を与える接合時雰囲気制御が可能になるよう、改造を行った。

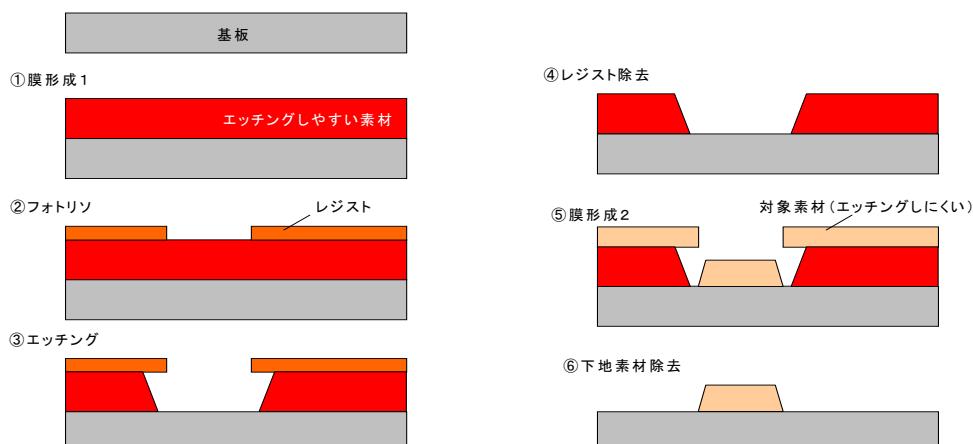


図 24 リフトオフ工法

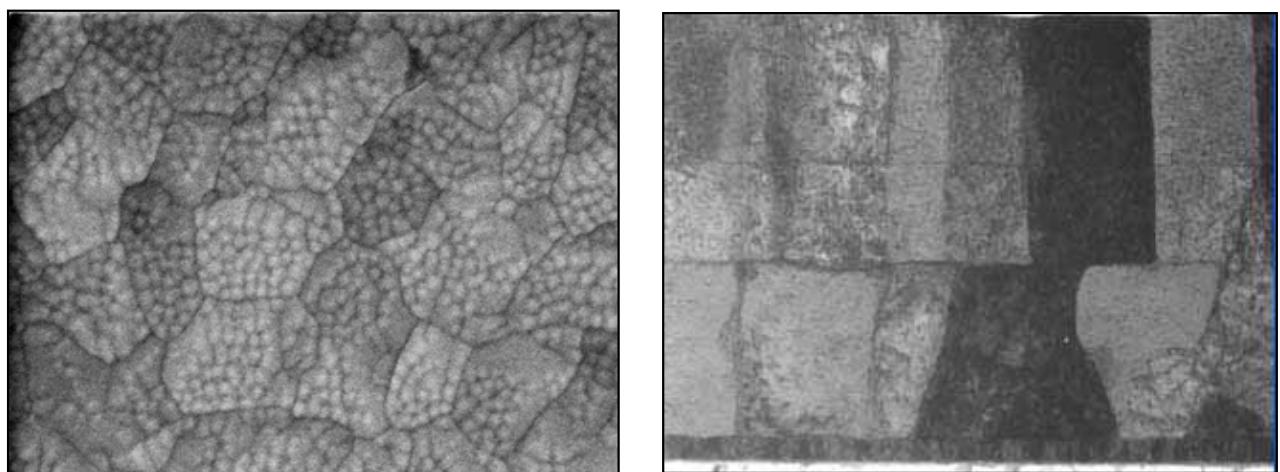


図 25 結晶制御した高耐久材料の観察像 [左：表面SEM, 右：断面TEM]

3) 超長期接点寿命評価

選定した高耐久材料接点の10億回を超える超長期寿命評価を実施するために、評価装置の仕様を検討した。10億回の寿命評価に必要なスイッチ駆動周波数、サンプリング周期、信号線の転送量などを抽出した。スイッチ固定などのモード分析と併せ、要求仕様としてまとめた。[表4]

表4 超長期寿命評価装置仕様

部位	機能	仕様	備考	
コイル部	駆動電圧印加	印加電圧 印加方式 駆動速度 精度	0~80V 荊水PAN60-3A MOSにて入切 max500Hz ±3%以内	
接点部	接点抵抗計測	印加電圧(内部) 印加電圧(外部) 負荷抵抗(内部) 負荷抵抗(外部) 接点通電電流(内部) 接点通電電流(外部) 精度 分解能	10mV~10V 10mV~35V 100Ω,1kΩ,10kΩ 5Ω~10kΩ 10μA~10mA 10μA~100mA 既存ライテスター同等以上のものとする 200kS/S,接点電圧32000分割/試料	電圧指令(アナログ)+bit3(デジタル))は無段階出力 低電流時の精度が問題となる 200kS/Sのうち統計値をRTシステムに出力する
	溶着計測	印加電圧(内部) 印加電圧(外部) 負荷抵抗(内部) 負荷抵抗(外部) 接点通電電流(内部) 接点通電電流(外部) 精度 分解能	10mV~10V 10mV~35V 100Ω,1kΩ,10kΩ 5Ω~10kΩ 10μA~10mA 10μA~100mA ±0.5μsec(20MHz) ±0.05μsec(20MHz)	20MS/Sのうち統計値をRTシステムに出力する

②平成 16 年度の開発実績

平成 16 年の開発目標は固着の起きにくい金属材料の製作プロセスを確立し、開閉回数 5 億回達成することであり以下のように目標を達成した。

1)高耐久材料成膜プロセスと寿命評価

平成 15 年度に選定した高耐久材料接点の安定した寿命性能を確保するためには、その成膜プロセスのロットおよびウェハ面内における安定化が必要である。そこで、高耐久材料成膜用の超高真空スパッタ装置（アルバック社製 SME-200U）の導入立ち上げ、および条件の最適化を実施した。図 26 は、高耐久材料接点の従来品と成膜プロセス安定化品の 1 億回までの開閉寿命性能を比較したものである。成膜プロセスを安定化させたものは、抵抗変動のばらつきが抑制されており、高耐久材料接点の安定出力に対して目処を得た。

また、高精度 3 次元加工技術確立によって得られた、アクチュエータの寸法精度向上による接触力・開離力といった開閉設計パラメータのばらつき抑制と、接点当接時の低衝撃化などのアクチュエータの動作安定化に取り組み、開閉寿命試験で 5 億回動作を達成した。[図 27]

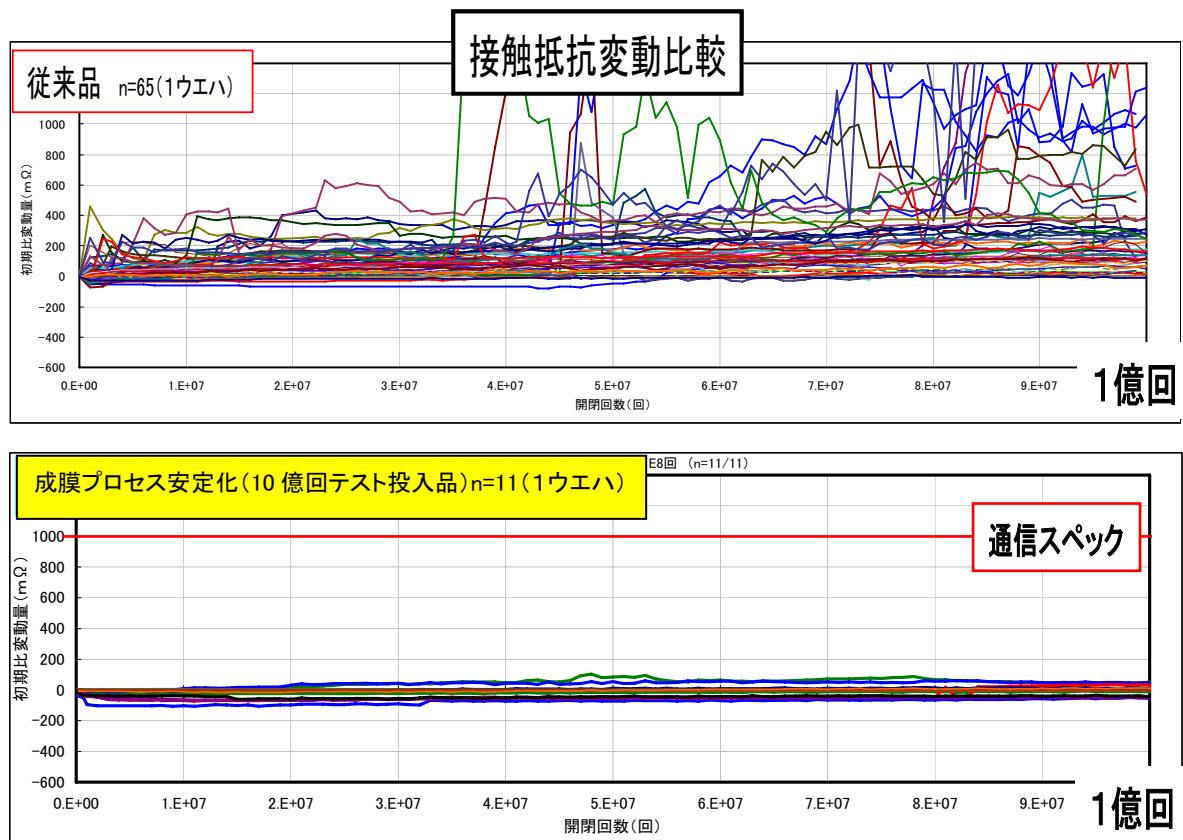


図 26 寿命評価試験結果（初期データの安定化）

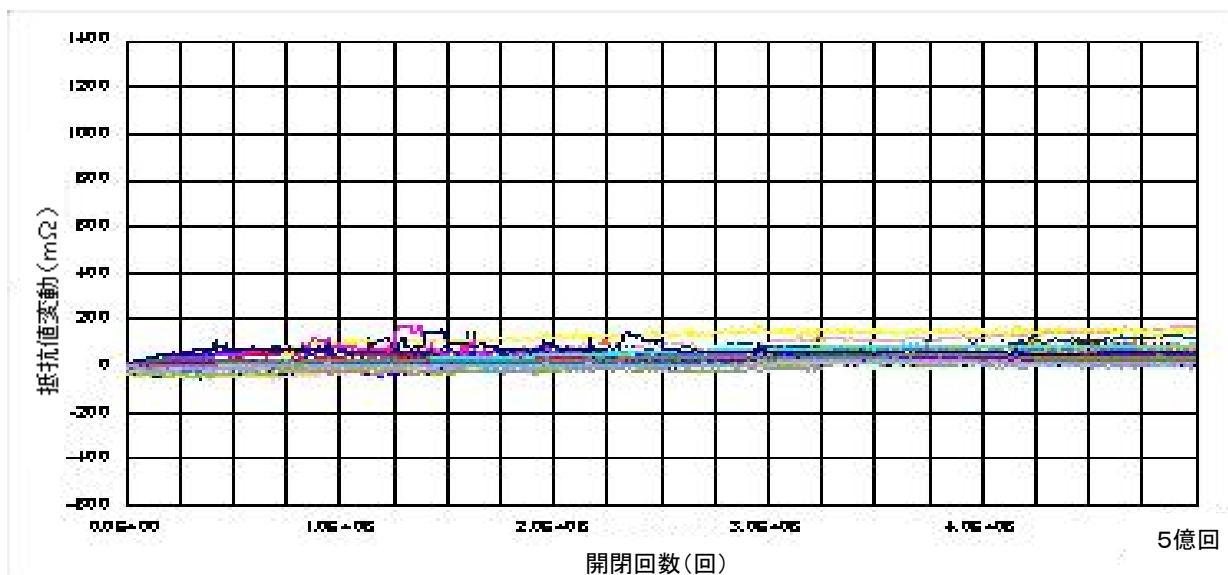


図 27 寿命評価試験結果（5 億回）

2)洗浄プロセス安定化

高耐久材料接点により固着が防止され、高精度 3 次元加工技術確立で得られたアクチュエータの寸法精度向上により開閉設計のパラメータのばらつきを抑えることができた。寿命を含めた性能をさらに安定して引き出すためには、接点表面状態の制御が重要である。特に、接点表面に付着するコンタミネーションは接触抵抗を不安定にする要因となるので、製造プロセスにおける洗浄工程を強化した。接点表面状態の安定化のためには、接点形成プロセスに限らず全工程の清浄化が必要である。バッチ・ウェハ面内ともに安定したプロセスの確立を図るため、表面洗浄装置の選定／導入を完了した。[図 28]



図 28 表面洗浄装置

3)超長期接点寿命評価

10億回以上の超長期接点寿命評価を実施するため、平成15年度に決定した要求仕様を満たす装置を選定し、納入／立ち上げを完了した。[図29]



図29 超長期接点寿命評価装置(E-life Tester)

4)デバイス状態評価

R Fスイッチの性能を評価するにあたり、どんなパラメータがどの程度寄与しているのかを調べるために、アクチュエータの動作や接点表面形状、付着物の分析といったデバイス状態を詳細に解析することが必要である。そのための評価装置を選定／導入した。

接点表面の結晶粒の状態観察や付着物の分析に表面分析器、アクチュエータの動作を解析するスキヤニング振動計 [図30-1]、接点表面の形状や表面粗さなどを測定する走査型プローブ顕微鏡システム [図30-2]、そして配線の長さや立体構造の高さなどを測定する測長SEMである。



図30-1 スキヤニング振動計



図30-2 走査型プローブ顕微鏡システム

③平成 17 年度の開発実績

平成 17 年の開発目標は接点の開閉回数 10 億回以上可能な接点接着防止技術を開発することであり、以下のようないくつかのプロセス安定化技術の確立により目標を達成した。

1) プロセス安定化（高耐久材料選定および表面処理加工技術）と接点寿命評価

平成 16 年度までに導入した製造装置ならびに、表面処理・加工・洗浄プロセスで基本的な高耐久材料選定および表面処理加工技術は確立した。平成 17 年はこれらのプロセスを用いた実デバイスの評価とその評価にもとづくプロセスの安定化を図ることであった。これを実行してきた結果、以下の図のように複数ロットで接点開閉寿命 10 億回を達成した。[図 31] また、一部のロットでは寿命評価を継続し 20 億回以上の実力があることを確認した。[図 32]

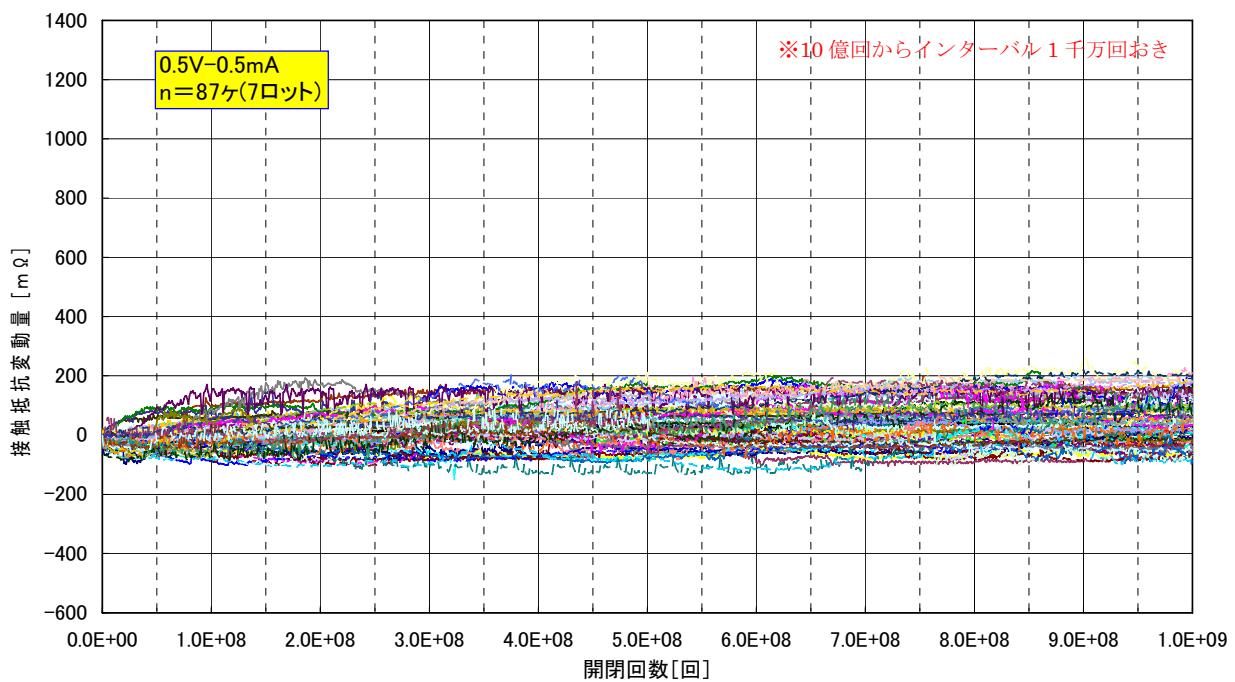


図 31 寿命評価試験結果（10 億回）

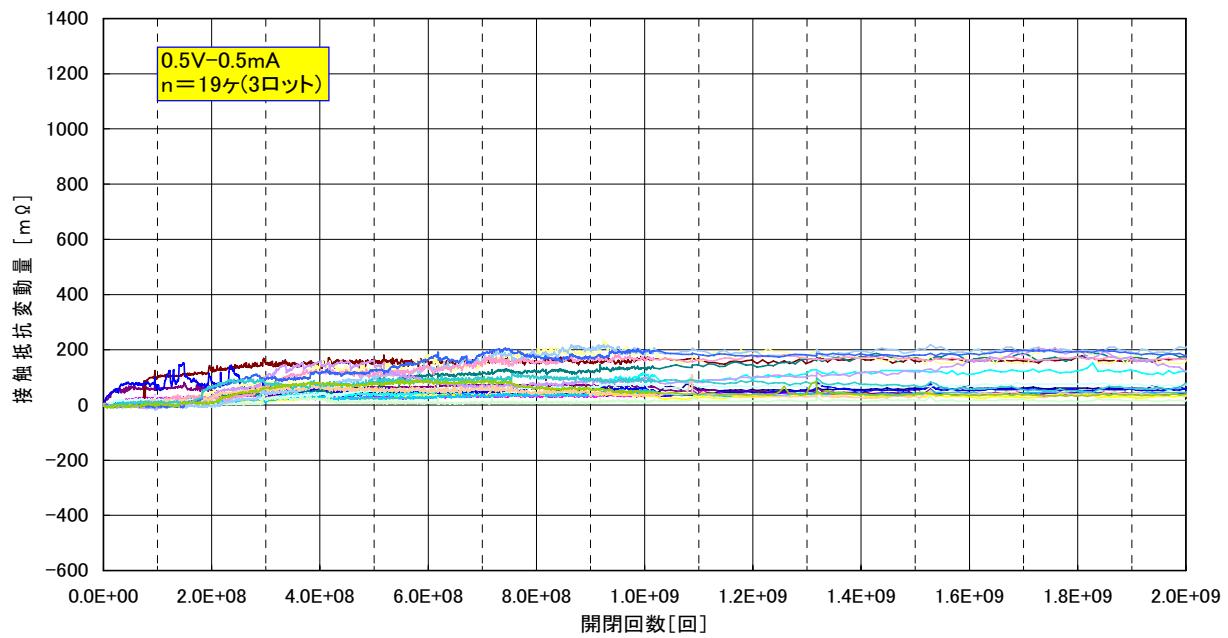
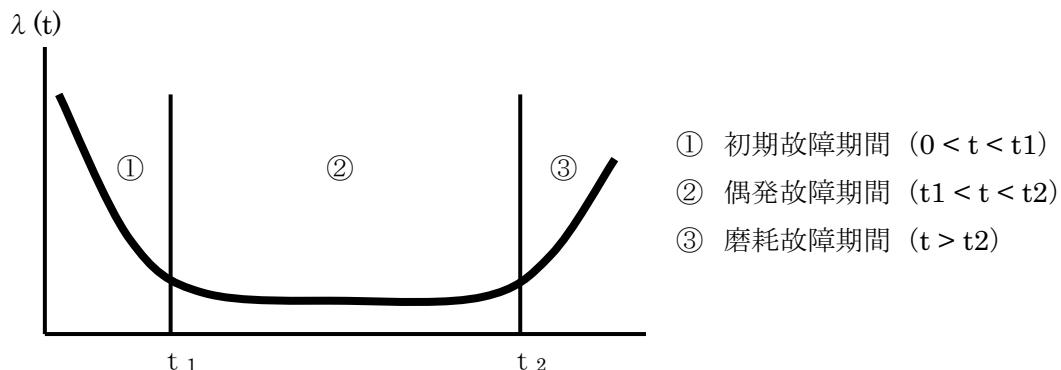


図 32 寿命評価試験結果（20 億回）

2) バーンイン工程の確立

開閉動作中に発生する故障モードの中には、初期特性検査で選別できないモードが存在する。それを出荷前に取り除くためのバーンイン(選別)工程を、その他の研究開発課題として検討した。市場での故障率を抑制するためには、出荷される製品を故障率と時間軸から描かれる Bath-tub 曲線 [図 33] の底部(偶発故障期間)の段階に持っていく必要がある。それを加速させて行うのがバーンイン工程である。加速するパラメータとして、周囲温度、駆動電圧、負荷などを検討し、条件を抽出した。バーンイン後の寿命評価試験にて故障率 0 % を確認した。(n = 116 チップ [水準:LTPD2%])



3) その他の信頼性評価

実機としての完成度を高めるため、特に目標には掲げていない信頼性評価試験を実施した。社内における汎用リレーの技術標準と EIAJ 規格を参考に、信頼性の項目と試験基準を定め信頼性評価を実施し、全ての項目で合格した。[表 5]

表 5 信頼性評価項目と合否

大項目	小項目	判定	大項目	小項目	判定
基本特性	動作電圧	合格	耐環境性	誤動作振動 (EIAJ A-121/121A)	A) 合格 B) 合格 C) 合格
	復帰電圧			耐久振動 (EIAJ A-121/121A)	A) 合格 B) 合格 C) 合格
	動作時間			誤動作衝撃 (EIAJ A-122)	合格
	復帰時間			耐久衝撃 (EIAJ A-122)	合格
絶縁抵抗	1次-2次間	合格		取り付け方向性	合格
	2次間	合格		ほんだ耐熱 (EIAJ A-133)	合格
耐環境性	高温保存 (EIAJ B-111/JIS)	合格		静電耐圧 (EIAJ D-111/MIL883)	合格
	低温保存 (EIAJ B-112/JIS)	合格		耐溶剤性 (EIAJ C-121)	合格
	高温高湿 (EIAJ B-121/JIS)	合格			
	温度サイクル (EIAJ B-131)	合格			
	温度特性	合格			

4) ファンドリーへの技術移転

高耐久材料の表面処理・加工技術などの工法および、寿命評価などの評価解析手法の技術移転に関して、高精度加工技術と同様、ファンドリー技術者が研究所において実際に原理・考え方、装置・その構成・操作方法を検討する形態で実施し完了した。表6に技術移転の効果を示す。

表6 プロジェクトによるファンドリー加工技術・測定評価技術向上効果

区分	技術項目	プロジェクト前	プロジェクト後
加工能力	貴金属パターン形成(リフトオフ)	—	加工可能
	接点洗浄	—	加工可能
測定能力	寿命評価(E-Life 試験)期間	300日	25日
	RF実負荷試験	—	測定可能
	RF特性試験	—	測定可能

(3) 低損失パッケージ技術開発

10GHz という高周波領域で、仕様を満たすには従来のパッケージング技術では不可能である。これはパッケージング材による損失と実装・配線方法に問題があったためである。

そこで低損失パッケージング材の選定とそれを用いた配線・実装・パッケージングプロセス技術を満たすものとしてチップサイズパッケージ(CSP)技術の開発を行った。

結果としてインピーダンス不整合の原因となるボンディングワイヤを廃し、スルーホールを用いた配線構造を採用することと、低誘電率であるガラスを用いた完全封止技術を確立し、0.1dB 以下(10GHz)である低損失パッケージング技術を完成させた。

以下に年度ごとの低損失パッケージ技術開発目標を記述する。

平成 15 年度：損失の少ないパッケージ材料の選定と、その工法および評価法を開発し、TEG (テスト用のダミーデバイス) にて、0.1dB (10GHz) を達成する。

平成 16 年度：損失の少ないパッケージ技術を確立し、デバイスにて 0.1dB (10GHz) を達成する。

平成 17 年度：パッケージの伝送損失を 0.1dB 以下 (10GHz) に抑える低損失パッケージ技術を開発する。

①平成 15 年度の開発実績

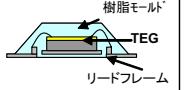
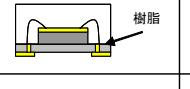
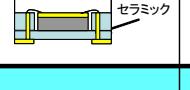
平成 15 年は低損失パッケージの材料と工法の絞りこみを行うステージであった。

1) 低損失材料選定

以下のような部材を用いたパッケージを、TEG チップ（可動接点のない、配線のみ接続したダミーチップ）を用いて試作し、高周波特性の評価を実施した。

パッケージ種類と損失を比較した結果を表 7 に示す。

表 7 パッケージの種類によるパッケージ損失の比較

		パッケージ材料	説明	構成	パッケージ挿入損失 (dB@10GHz)
ワ イ ヤ あ り	①	樹脂モールド パッケージ	デバイスをリードフレーム(金属の板状配線部品)に載せ、全体を樹脂で固めたもの。ワイヤ配線あり。実効配線長が長い。		✗ -8.5
	②	樹脂パッケージ	樹脂基板上のデバイスを樹脂の箱で保護したもの。ワイヤ配線あり。		✗ -10.2
	③	セラミック パッケージ	デバイスを箱状のセラミックで保護したもの。ワイヤ配線あり。		✗ -4.6
ワ イ ヤ な し	④	CSP(ガラス)	デバイスに箱状のガラスをフリットガラスペーストで接着し、密封したものの。フィードスルーエネルギー(貫通孔配線)あり。		○ -0.09

評価の結果、樹脂モールドパッケージ、樹脂基板によるパッケージ、セラミックパッケージのいずれも、10GHz ではパッケージ損失 0.1dB を達成できないことが判明した。これは、パッケージ内部で使用するボンディングワイヤに起因する。これら樹脂やセラミックなどの材料では、誘電率が高いため、実効配線長が長くなる上、誘電正接による損失が無視できない量が発生する。一方、CSP で使用するガラスの場合、配線長を短く出来る点、誘電率と誘電正接が小さく実効配線長を短く出来ること

から、10GHz でのパッケージ損失を 0.1dB 以下に出来る見込みがあると判明した。以上から、パッケージ材料としてはガラス系材料が優れていると判定した。[図 34]

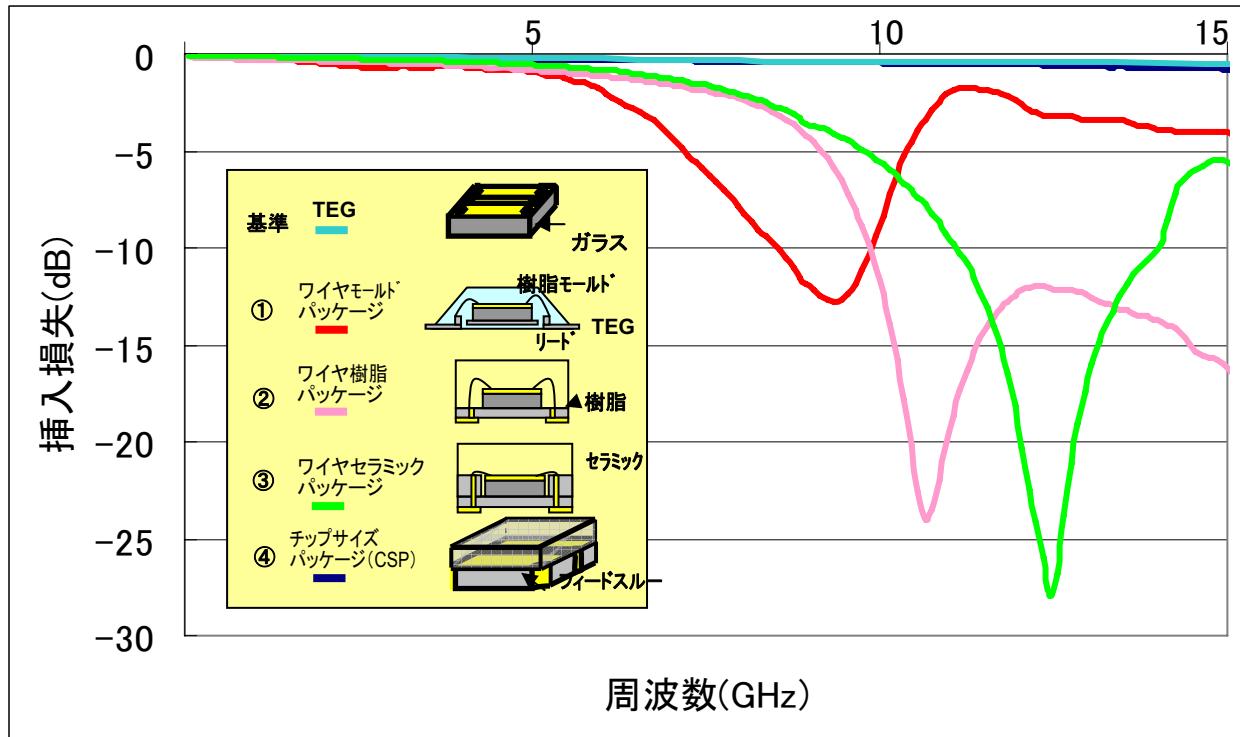


図 34 パッケージによる高周波特性比較

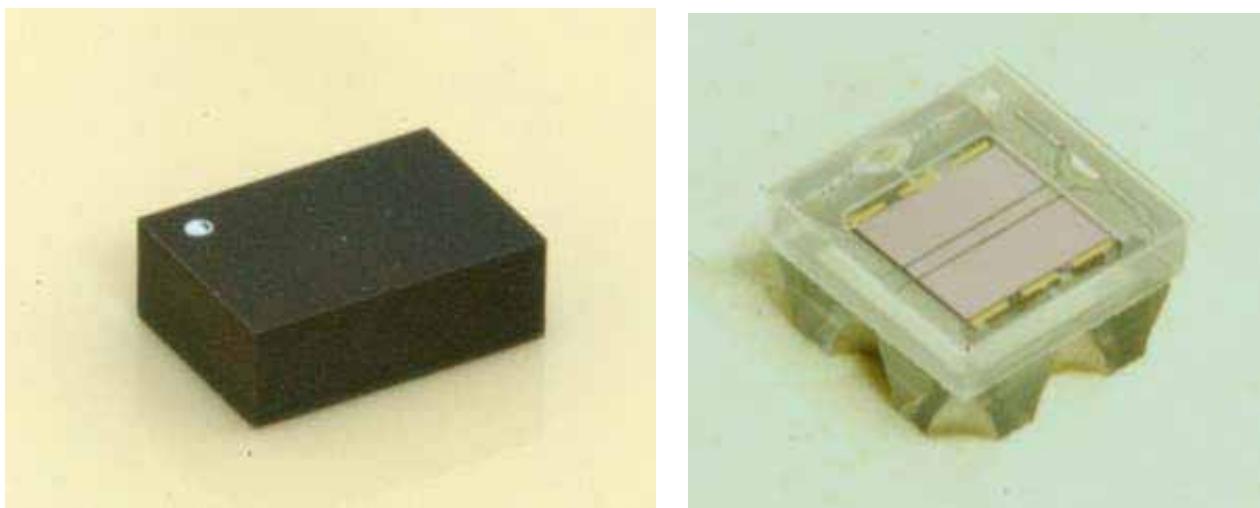


図 35 (左)樹脂パッケージ、(右)ガラスによる CSP

2) パッケージ工法確立

従来型のパッケージとして、デバイスをボンディングワイヤで配線し樹脂で封止する樹脂パッケージ、デバイスをセラミックの箱に入れ、ボンディングワイヤで配線するセラミックパッケージを試作・評価した。両パッケージは、ボンディングワイヤとパッケージ内部の配線長が最小になる構造とすることで、パッケージの損失改善を図った。

更に、RFスイッチ基板に貫通配線を設け、フリットガラスペーストを用いてガラスの蓋(キャップ)をRFスイッチに被せたCSPを試作し、同じく評価を行った。このパッケージは、RFスイ

チをウエハから分割する前にキャップウエハをガラスフリットペーストで接合し、ウエハ上のRFスイッチを一度にパッケージングすることを特徴とする。また、このパッケージはデバイスとパッケージを一体整形可能であり、損失発生個所をデバイス内で特定できるという特徴がある。

特性評価の結果、CSPでのパッケージによる損失は、TEGで0.091dB(@10GHz)を達成。[図36]パッケージ工法としてCSP工法が優れているという結論を得た。

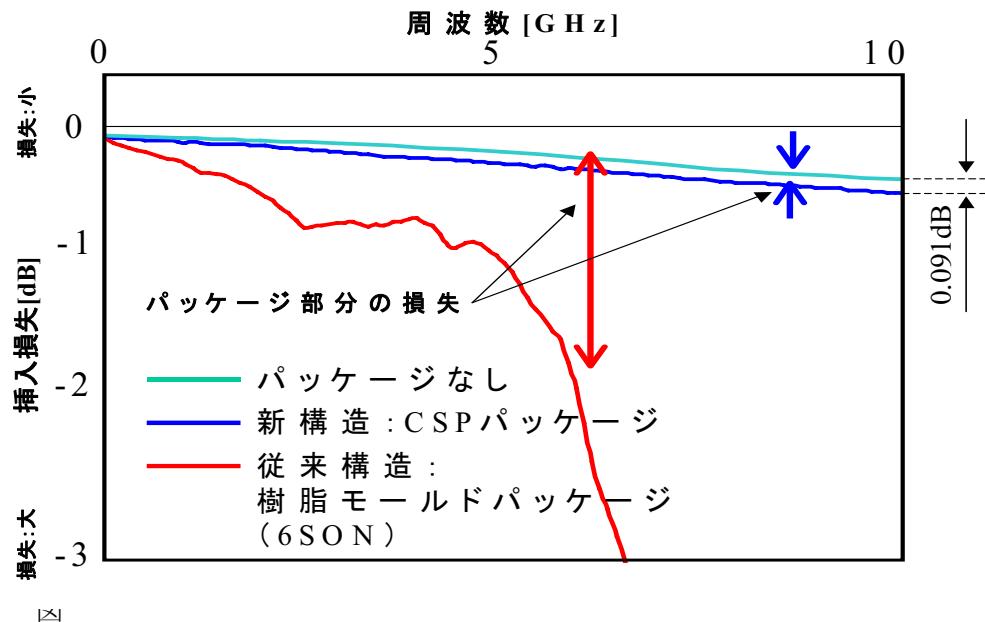


図36 パッケージ種類による挿入損失比較(TEG)

3)高周波信頼性評価技術

信頼性評価用に、高周波信号を連続して流した際のRFスイッチの挿入損失、反射損失、アイソレーションの変化を評価できる電気的信頼性評価装置の条件を抽出し、仕様策定を完了した。

②平成16年度の開発

平成16年の開発目標は実際のデバイスにて0.1dB(10GHz)を達成すること。そこで前年確定したガラス材料を用いてRFスイッチを試作し、そのプロセス評価とCSP構造の評価を実施した。またガラスについても低損失のものなど評価した。前年度の試作評価は、パッケージ対象はダミーパターンのみでスイッチ開閉機能のないTEGチップであった。これに対し平成16年度の試作では、実際に開閉機能を有するRFスイッチでパッケージングを行い、CSP構造で課題となるデバイスプロセスとパッケージプロセスの親和性をRFスイッチで評価した。

1) 低損失材料選定

何種類かのガラス材料を用いてRFスイッチを試作し、そのプロセス評価とCSP構造の評価を実施した。高周波特性を考慮すると低誘電率ガラスが有利であるが、低誘電率ガラスでは熱膨張率の違い、接合プロセスである陽極接合が困難といった点が問題となつた。このため、将来、より低誘電率素材の開発が必要になると思われるが、現状の10GHz以下の周波数領域においては現状の接合方法・プロセスとの整合性がよい、方珪酸系ガラス素材を最適と判断し、デバイス出力を実施した。

2) パッケージ工法確立

CSP工法を用いてSPST(1入力で1接点開閉)タイプのRFスイッチの試作を実施し、パッケージ工法の確立を図った。[図37]接合面積を考慮し、キャップウェハ接合工程の温度・圧力の最適条件出しを行つた。また、製造プロセス途中で発生する貫通配線部分へのダメージでパッケージの損失が増大するため、プロセスで使用するガス種・薬液の変更等の保護プロセス確立で、パッケージプロセス中にダメージが発生しない工法を確立した。

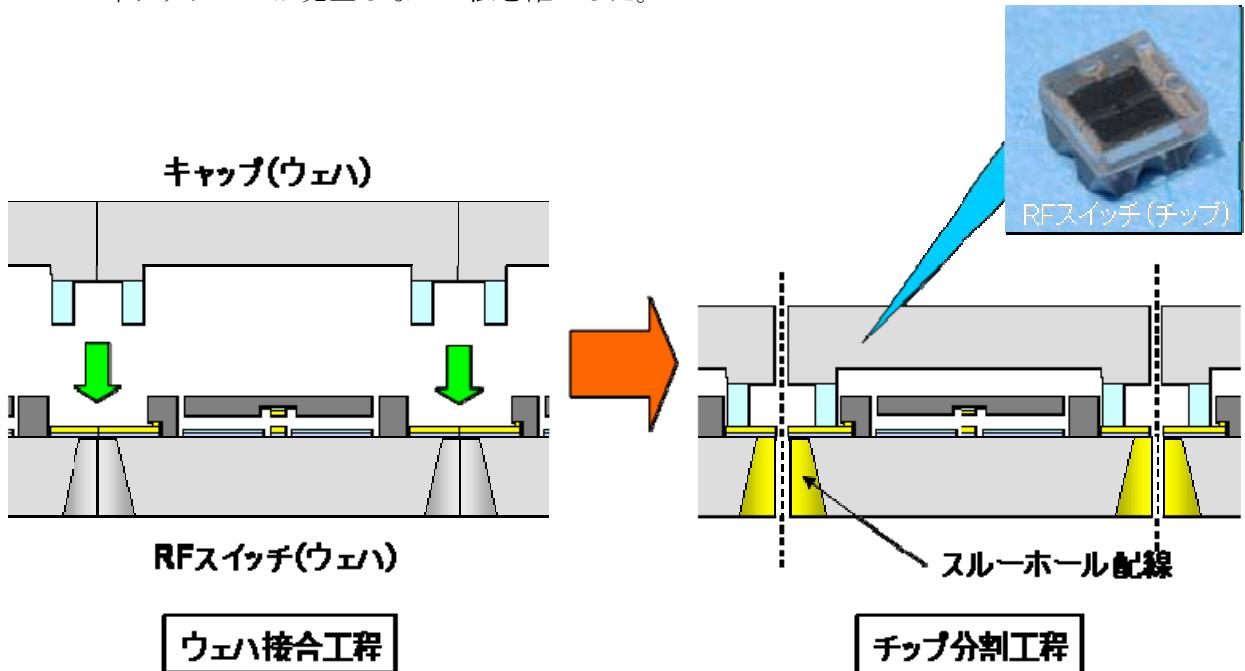


図37 CSPによるRFスイッチのパッケージ工程

以上の結果、実際のRFスイッチで測定して、インサーションロスにて0.09dB(10GHz)という目標の性能を得た。[図38] この工法でパッケージしたRFスイッチの挿入損失特性を評価した結果、チップ間での特性の差は十分に小さく、この工法は安定していることを確認した。[図39]

更に、CSPの封止性についてヘリウムガスを加圧してパッケージ周囲に与えてパッケージのリークレートの加速試験を実施した。その結果、リークレートは $3.4 \times 10^{-17} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$ という評価結果を得た。このリークレートは、ハーメチックシールで用いられるセラミックパッケージの半田封止によって得られるリークレートを上回るため、このCSPは十分な封止性があることを確認した。

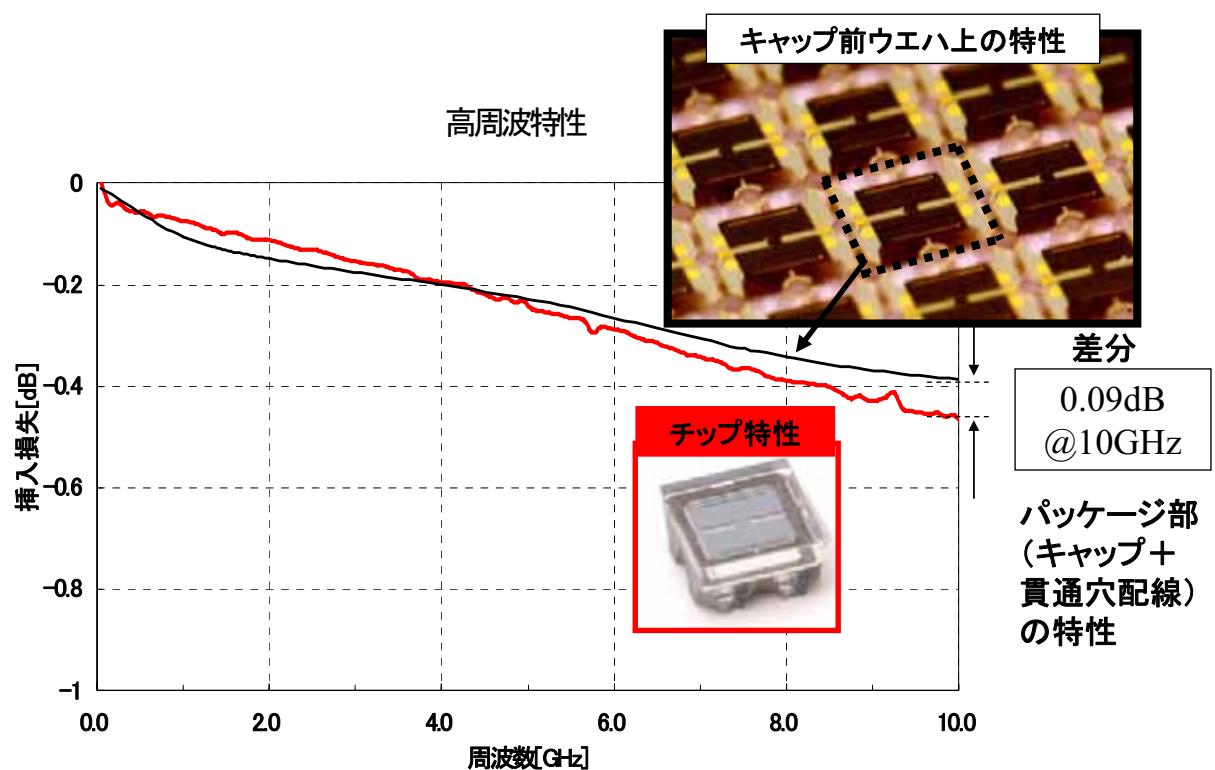


図 38 C S P 工法パッケージによる挿入損失

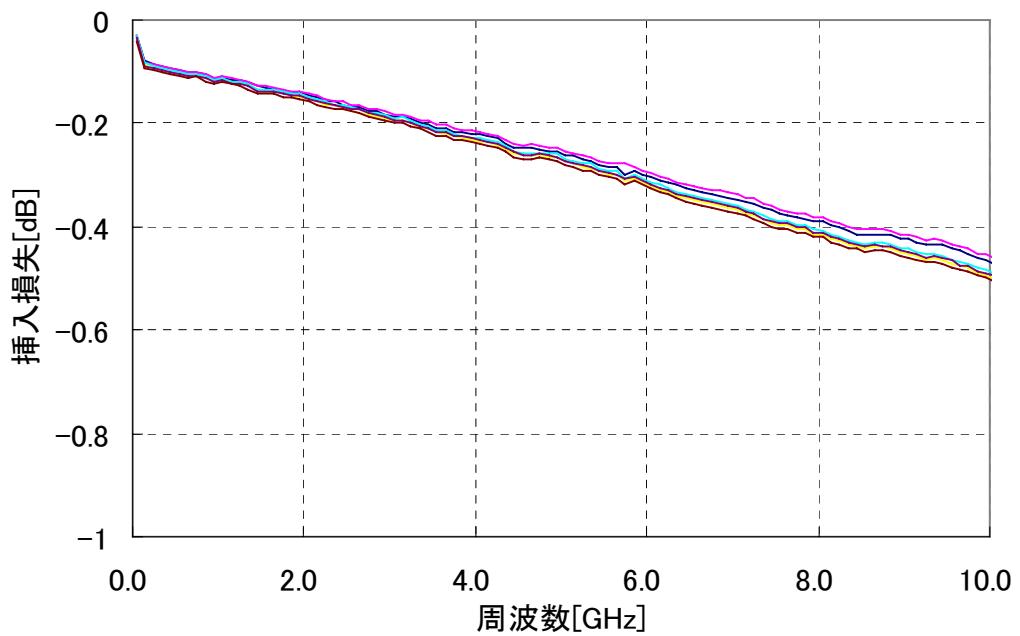


図 39 パッケージ後の高周波特性の安定性

3) 高周波信頼性評価技術

平成 15 年度に策定した仕様（高周波信号を連続して流した際の R F スイッチの挿入損失、反射損失、アイソレーションの変化を評価できる）に基づき装置の発注を実施。平成 17 年度前半に装置を立ち上げた。[図 40] 本装置は最大で同時に 10 個の R F スイッチに対し、最大許容電力に近い電力負荷を長期に与えつつ高周波特性を測定できる装置であり、高周波信頼性評価を加速することが可能である。



図 40 高周波信頼性評価装置 全景

③ 平成 17 年度の開発実績

平成 17 年度は低損失パッケージの実用性を検証するステージであった。

量産試作により作製されたデバイスを種々の環境負荷をかけ、高周波特性がどのように変化するかを測定し、実用化に耐えうるか検証した。

平成 17 年度はまた、ファウンドリ部門への技術移転を行う年でもある。パッケージ工程について技術資料をまとめ、パッケージ工程の実施、評価をファウンドリ部門でも実行できるよう環境を整備した。

具体的には、平成 16 年度に導入した高周波信頼性評価装置を用いて R F スイッチに高周波負荷を与え、挿入損失、反射損失の経時変化を通じてパッケージの損失量の変化を観察し、パッケージ信頼性を評価した。[図 41] 負荷条件として連続負荷とスイッチング負荷を与え、負荷電力は 0.1W から 1W までの範囲で与えた。負荷中の挿入損失の変化、及び試験前後での挿入損失の変化に対して試験基準を設け、パッケージの信頼性試験を行った。更に、R F スイッチテストシステムを用いて、パッケージ状態の R F スイッチに高周波信号を印加し、デバイスが発生させる信号歪みに関する電力特性を評価した。R F スイッチ自体は原理的に信号歪みを発生しにくい構造であり、パッケージ状態でも電力特性的に実用可能かどうかを測定し、R F スイッチの実用性を評価した。

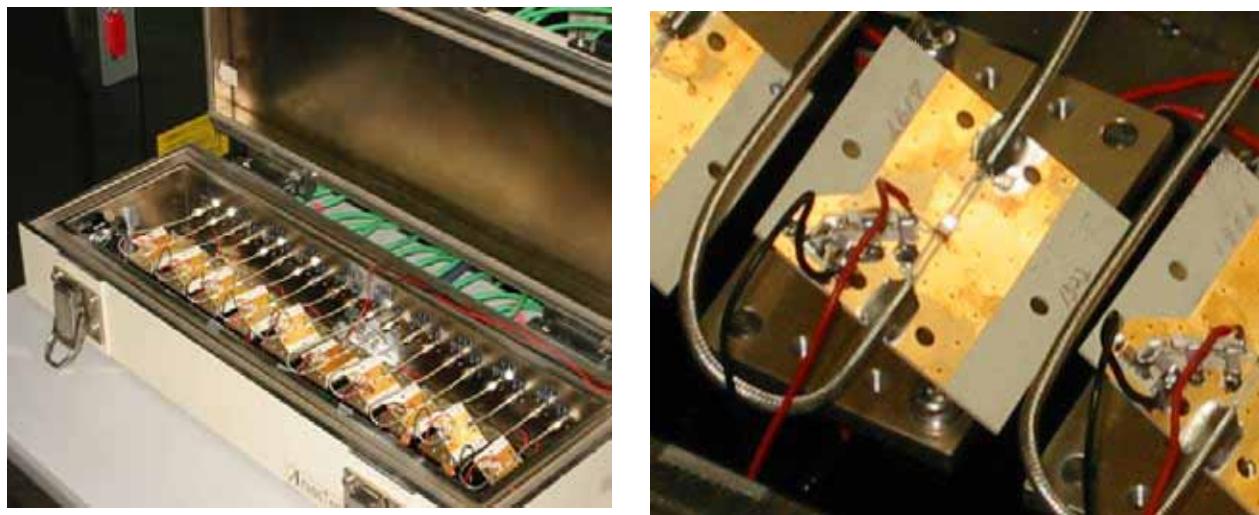


図 41 高周波信頼性評価装置（左：シールドボックス内、右：評価中の RF スイッチ）

1) パッケージの高周波長期信頼性

パッケージを施したRFスイッチに実用時に多用すると考えられる電力負荷を長期間与え、挿入損失の変化からパッケージ損失変化を評価した。連続負荷時・断続負荷時のいずれの場合でも、挿入損失の変化はほとんどなく、パッケージの損失は長期にわたって安定であることが証明できた。
[図 42, 43]

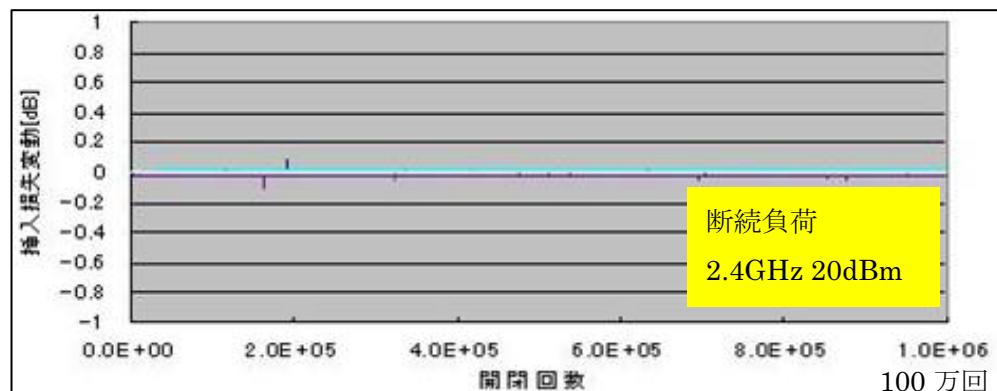


図 42 RF スイッチパッケージの高周波長期信頼性(断続負荷)

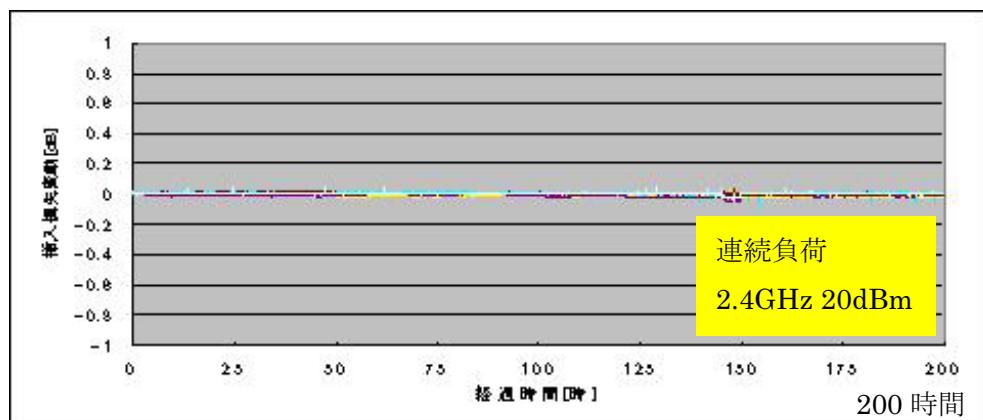


図 43 RF スイッチパッケージの高周波長期信頼性(連続負荷)

2) パッケージの大電力負荷時信頼性

パッケージしたRFスイッチに実際の使用時に瞬間にかかりうる、許容電力負荷に近い大電力負荷を与えて挿入損失の変化を計測し、パッケージが高周波電力で低損失性を損なわないかを評価した。[図44, 45] 電力は連続負荷と断続負荷の2通りの条件で与え、損失による発熱が十分飽和するまで測定した。その結果、パッケージ部分は大電力を与えても損失が増大せず、大電力に対してもこのパッケージは信頼性を保つことが判明した。

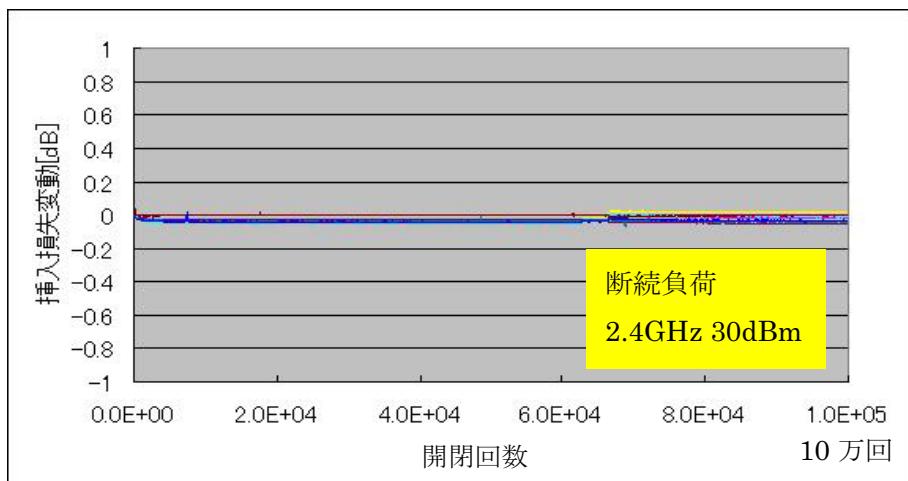


図44 RFスイッチパッケージの大電力負荷時信頼性(断続負荷)

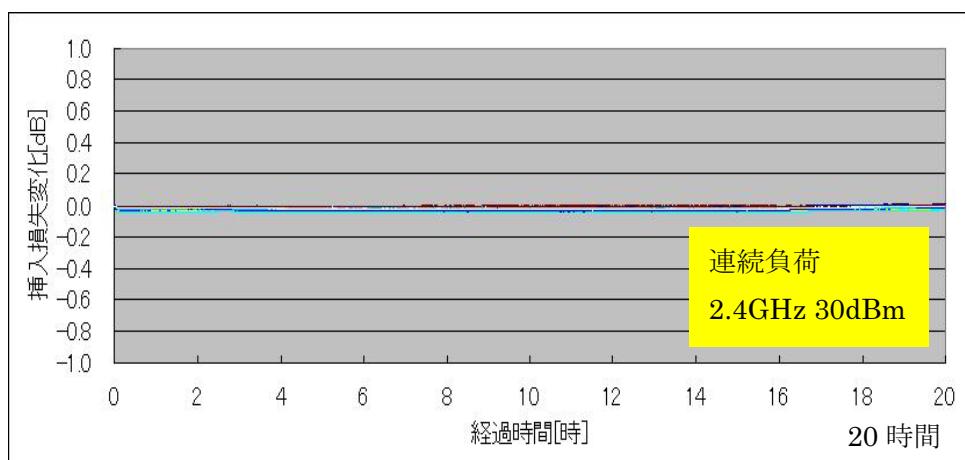


図45 RFスイッチパッケージの大電力負荷時信頼性(連続負荷)

3) 信号歪み

パッケージ後のRFスイッチの実用性評価の一環として、電力負荷時の各種電力特性評価を実施した。この評価で使用するRFスイッチテストシステムは、RFスイッチに対して電力を通過させて、通過後の信号に発生した各種高調波成分を広帯域に測定する装置である。[図46] この装置を使ってパッケージ状態のスイッチに大電力をかけ、特性値に変化があるかを評価した。



図 46 RF スイッチテストシステム

評価の際は、周波数 1GHz で電力 36dBm(約 4W)の正弦波を R F スイッチに投入した。また比較用として、TEG として高周波用同軸ケーブルを測定端子間に接続し、R F スイッチと同じ条件で電力を投入した。TEG は使用可能周波数内において、3 次高調波などを発生させる非線形特性がないため、TEG の測定結果は装置の測定限界になる。従って、R F スイッチの測定結果が TEG に近いほど、R F スイッチは非線形性の少ない、優れたスイッチということになる。

評価の結果、R F スイッチの特性は全ての特性で測定端子間に TEG を接続した場合とほぼ同等で、非常に線形性が高いことを確認できた。またこの結果から、スイッチ自身に非線形特性がないだけではなく、パッケージ部分も非線形ひずみを発生させていないことを確認できた。[表 8]

表 8 RF スイッチ信号歪み特性一覧

RFスイッチ実力値

測定項目	記号	測定値	単位
0.1dB利得圧縮時入力電力	P.in(0.1dB)	>37	dBm
入力3次インターフェトポイント	IIP3	>71	dBm
高調波	2nd Order 3rd Order	>92 >98	dBc
隣接チャンネル電力比(BW:3.84MHz)	ACPR(5MHz) ACPR(10MHz)	>48 >63	dBc

TEG実力値=装置測定限界

測定項目	記号	測定値	単位
0.1dB利得圧縮時入力電力	P.in(0.1dB)	>37	dBm
入力3次インターフェトポイント	IIP3	>70	dBm
高調波	2nd Order 3rd Order	>94 >97	dBc
隣接チャンネル電力比(BW:3.84MHz)	ACPR(5MHz) ACPR(10MHz)	>48 >65	dBc

測定条件(共通)

項目	記号	値
入力信号周波数	f	1 GHz
入力電力	P	36 dBm
入力信号形式	ACPR以外 ACPR	CW W-CDMA変調波

4) ファウンドリへの技術移転

パッケージ工程に関して、プロセス手順資料等をまとめ、この資料と実プロセスによる教育を通じ、ファウンドリ側の人員のみでRFスイッチのパッケージプロセス、評価、必要に応じた設計変更が可能な体制を構築した。プロジェクトで技術向上効果を表9に示す。

表9 プロジェクトによるファウンドリでのパッケージ技術・評価・設計技術向上効果

区分	技術項目	プロジェクト前	プロジェクト後
加工能力	CSP工法	—	加工可能
測定能力	高周波基本特性評価	—	測定可能
	高周波信頼性評価	—	測定可能

2-3 成果の意義

本プロジェクトにより、MEMS RFスイッチがメカニカルリレーと同等以上の優れた高周波特性を持たせつつ、最も課題とされた接点耐久性を10億回開閉を実現できた。また、サイズも既存半導体スイッチと同等レベルの小型化を実現できたことは、世界的に高い水準の成果を達成したと言える。特に開発技術の高精度3次元加工技術は、他の研究やファウンドリの実力と比較して、世界最高水準と言える。これにより、新たな高性能小型化高耐久性なスイッチングデバイスを市場に投入できる見通しが立つことで、通信、計測機市場への波及はもちろん、通信業界ではRF MEMSスイッチを応用した新たなアプリケーション開発の動きも始めていることから考えると、新市場創出に対して充分影響力があると考えられる。RF MEMSスイッチの展開できる市場は、ICテスタ市場だけでも今後年間数10億円以上の拡大が見込まれており、投入助成額に見合った成果が充分得られたと考える。

2-4 特許の取得

本プロジェクトで得られたRFスイッチに関する知的財産において、構造関連特許は、既存構造はもちろんのこと将来的な高機能化を狙った先取り特許として出願を実施。一方、製造技術関連特許は、MEMSデバイスを実現する上で最も重要な要素の1つであるため、特許化／ノウハウ化の吟味を十分に行い、事業戦略に沿って出願を行っている。また、一部の基本特許については、早期審査による早期権利化を進める一方、想定される市場や製造地域は、国内だけでなく米国、ヨーロッパ、アジアとグローバルであり、主要各国への出願も確実に実施している。

2-5 成果の普及

本プロジェクトの成果については、学会・論文発表やプレス発表、関連分野の展示会への出展などにより普及活動にも力を入れてきた。学会・論文発表に関して、世界最高水準となるRF-MEMSスイッチ関連技術内容を盛り込んだ、学会発表14件、論文発表5件を実施し、世界の関連専門分野への成果アピールを充分実施してきたと考える。また、成果となるデバイスのユーザ（携帯業界、ICテスタ業界）に対しても、ユーザヒアリング等を通じて、成果をアピールすることで普及を行ってきた。同時にニーズの吸収も行い、新たなデバイス課題の抽出や改善へのフィードバックにも取組んできた。この他、一般向けとなるマイクロマシン展やナノテク展、愛・地球博などへの出展を計7件、プレス発表、技術講演を計20件を実施、広く一般に対しても情報発信を行ってきた。図47に各展示会の写真を示す。

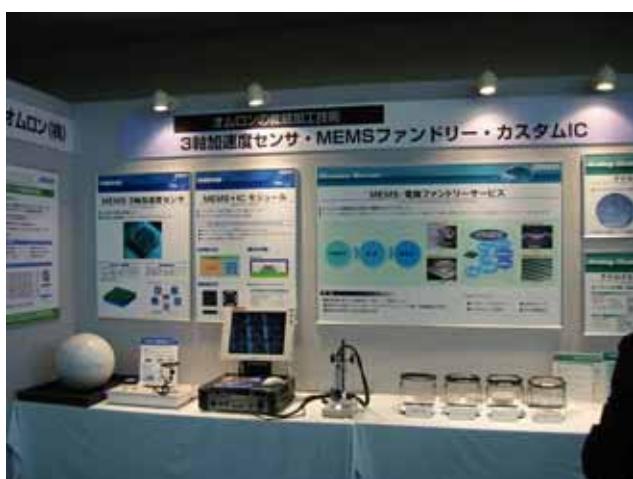


図47-1 2003年度 マイクロマシン展出展写真
真



図47-2 2004年度 マイクロマシン展出展写



図47-3 2005年度 マイクロマシン展出展写真

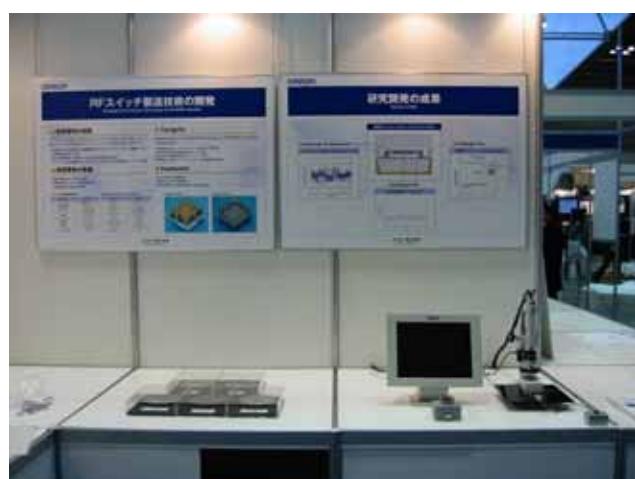


図47-4 2005年度 ナノテク展出展写真



図47-5 2005年度 ハノーバメッセ出展写真



図47-6 2005年度愛・地球博NEDOパビリオン展示写真



図47-7 左:2005年愛・地球博NEDOパビリオン(RFスイッチ)紹介HP



図47-8 右:2006年CEATEC展示写真

IV. 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

現在、本成果を基盤としたRF MEMSスイッチの商品化を実行中である。産業技術としてのRF MEMSスイッチの適用可能性について、チップ単体での信頼性試験を実施し、市場で充分耐えうる信頼性を確認、量産性についても高い歩留まりで生産できることを確認している。また本プロジェクトで培った技術は、実際のMEMSファンドリ事業に徐々に展開され始め、実用化に向けて着実に進んでいる。実用化への課題として、実際のユーザニーズに合わせた商品仕様への設計変更、その仕様に基づく信頼性試験、量産性検証を行う必要があり、今後の課題となる。

(2) 波及効果

優れた高周波特性を実現したことで、通信機器においては小型低コストでのマルチバンド化や低消費電力化が容易になるため、例えば現在一部の携帯電話ハイエンドモデルにのみ搭載されていた性能が、廉価モデルに展開できると期待され、需要拡大への効果が見込まれ。また、ICテストにおいては、より高速な信号を扱えるようになるため、より高速なCPUやメモリ、システムLSIの開発が加速されると考えられるため、これにより、コンピュータや通信機器のデータ処理、データ通信はより高速化大容量化が可能になり、関連分野における経済的波及効果は充分大きいと期待できる。ファンドリ事業に関しては、世界最高水準の高精度加工技術を活かし、今まで受託できなかった高精度加工に関する委託内容に対しても応えられるようになった。これにより産業界における新しい構造のデバイス、モジュールの実現に貢献し、結果として新デバイス、モジュールによる新市場創出にもつながり、経済的波及効果も間接的に貢献できると期待できる。

技術的波及効果として、RFスイッチの完成度が高まり、広く情報発信やサンプル提供を行ってきたことで、RFスイッチ以外のRF-MEMSの研究が盛んになり、高速データ伝送やウエアラブルなどの新デバイス技術開発に波及効果が出て来ていると考える。また、プロジェクトのために投入されたMEMSエンジニアは多くの未知の課題解決や解決手法、評価方法の考案・実行、各種機器の設計・開発・導入などの様々な技術的経験による能力向上を達成することができた。このような技術レベルを飛躍的に向上することができたことで、人材育成促進の観点でも波及効果が大きかったと言える。

(3) 事業化までのシナリオ

今後のRFスイッチの事業化シナリオは以下のことが予想される。

2007年度 商品開発を完了し、同年度に商品第一弾としてATE(Automatic Test Equipment：自動試験装置)用RFスイッチを市場に投入する。この商品リリースにより、一層の量産技術、品質安定性向上を図り、同時に携帯などの通信機器に仕様を合わせた通信機器向けRFスイッチの技術開発(価格競争力を上げるためのコストダウン技術など)を実行することで、2010年度あたりから本格化すると予想される携帯4Gへの展開に合致した事業化計画を進めていく。商品第一弾となるATE用RFスイッチのターゲット市場は、2009年度に100億円を超える見込みである。[図48]

また、RF MEMSスイッチに関するオムロンの事業化シナリオを図49に示す。

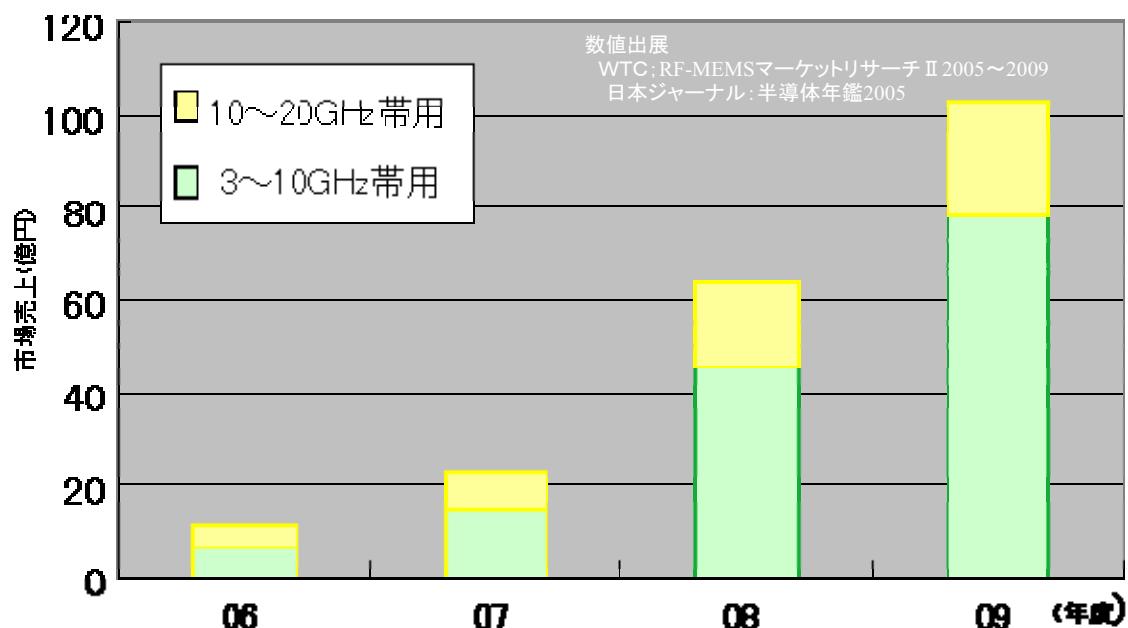


図48 ATE用RFスイッチ市場売上額(予想)

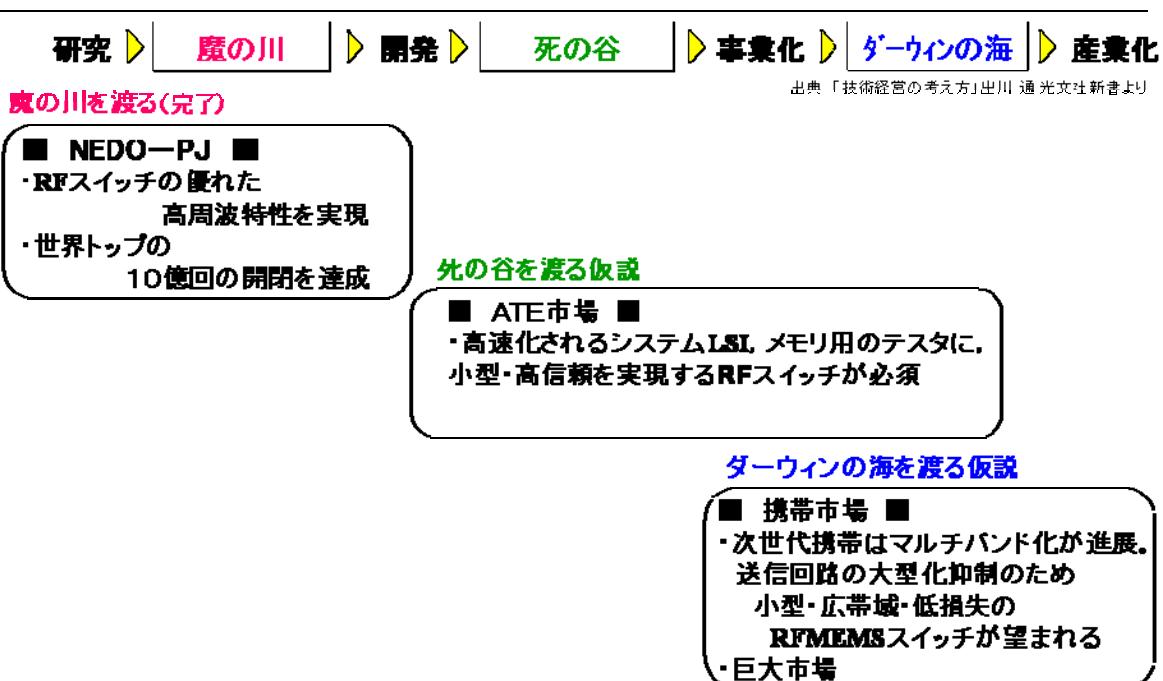


図49 RFスイッチ 事業化シナリオ