

平成29年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高周波減圧プラズマを用いた多段設備と金属ナノ粒子インクの低温回路形成技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局 近畿経済産業局
事業管理機関：一般財団法人金属系材料研究開発センター
法認定事業者・研究等実施機関：株式会社電子技研
研究等実施機関：国立大学法人大阪大学 ナノミクス研究センター
アドバイザー：国立大学法人大阪大学 産業科学研究所
アドバイザー・川下ユーザー：住友電工プリントサーキット(株)

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者)

1-3 成果概要

1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

【1】多段平行平板プラズマ設備開発

【1-1】プラズマ検証設備によるプラズマ強度、分布、均一化技術の開発

【1-2】高周波均等分配技術の開発

【1-3】異常放電対策の開発

【1-4】多段電極ガス流れ排気均一分配技術の開発

【1-5】基板に対する電極構造の開発

【1-6】量産試作サイズを含む量産設備の技術検討

【2】プラズマ焼結の安定化技術の開発

【2-1】プラズマ焼結メカニズムの解明による量産設備技術の開発

【2-2】PET基板上での銅回路形成条件確立

【2-3】川下ユーザー各種銅カイワによる焼結評価

第3章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

携帯電話およびモバイル機器等の回路基板を印刷技術で製造することが出来るプリンテッドエレクトロニクス技術は、製造コストを大幅に削減できる次世代製造技術として期待されている。従来の回路基板製造技術は、フォトマスク・エッチング法で行っているが、この製造方法は製造工程が多く設備コストが高いという問題がある。

それを解決するために直接描画法（インクジェット法）で製造工程の簡略化、少量多品種製品対応、材料（インク）の節約でコスト低減を図る方向で開発がすすめられている。

回路基板材料も低コスト化のためポリイミド樹脂から PET 樹脂に変更するニーズがあり、この実現のためには直接描画法（インクジェット法）の回路構成電極の銅粒子インクを PET 樹脂基板の耐熱温度 100℃で焼結する技術が必要とされている。

電子技研では、この銅粒子インクを低温焼結できる高周波減圧プラズマ焼結技術の知見を有しており、本テーマではこの強み技術を活かし、量産化技術を研究開発し産業競争力の強化と新規市場の創出に貢献しようとするものである。

図 1 に回路基板製造技術の現状（フォトマスク・エッチング 法）と今後（直接描画法）と本テーマで提案する新技術である高周波減圧プラズマ焼結技術について説明する。

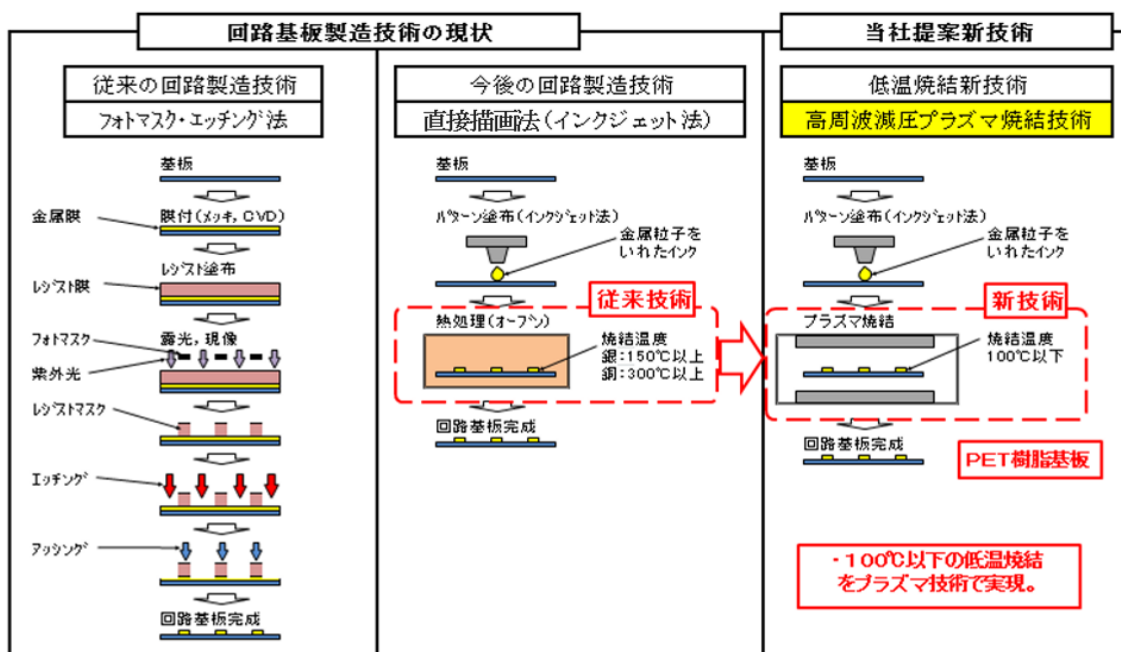


図 1. 回路基板製造技術の現状と提案新技術

従来のフォットマスク・エッチング法はメッキにて銅回路を形成するのに対し、今後の直接描画法では基材上に直接銅インクで回路を描画するため、銅インクを用いる必要がある。

現在は銅粒子を微細にしてポリイミド上に 300℃以下の温度で焼結させる方法が検討されているが、コスト高になり実用化が難しい状況にある。

川下ユーザー（回路基板メーカー）は、プリンタブルエレクトロニクス技術で低温（100℃以下）で銅粒子インクを焼結できるプロセス技術と従来の真空プラズマ設備と比較して、低コストで高スループットを実現できる生産設備の開発を要望している。

1-1-2 研究目的

提案する高周波減圧プラズマ焼結技術では、新たに製造設備を開発し、低コスト・低温焼結を実現できる量産設備を市場導入し新市場の創出に貢献することを目的とする。

具体的には、従来の減圧プラズマ設備より低コスト、高スループットを実現するため、多段（4段）平行平板設備試験を開発し、課題（プロセスバランス制御、異常放電など）の抽出と解決のための開発を行い、多段減圧プラズマ設備を完成させる。

また、設備の生産安定性（量産技術）の開発を行い、安定して稼働できる設備構想を完成させる。

また、多段プラズマプロセスの検証、条件出しにより、各段全てにおいて安定して銅粒子インクの焼結導電化プロセスを完成させる。

○「高度化指針」において定める川下製造業者の抱え課題及び要請（ニーズ）

（十）材料製造プロセスに係る技術に関する事項

（４）川下分野特有の事項

 b. 情報家電・エレクトロニクス分野に関する事項

 力. 量産技術開発

1-1-3 研究目標（新技術を開発するための課題）

（1）多段平行平板プラズマ設備開発

（1-1）プラズマ検証設備によるプラズマ強度、分布均一化技術の開発

小型（200mm 角電極）のプラズマ検証設備を製作し、多段にした時のプラズマ状態を測定できるシステムを大阪大学アトミックデザイン研究センターと開発し、プラズマ強度、発光スペクトル、銅ナノインク焼結比抵抗データを川下ユーザー量産試作基板を含む多様な基板サイズや量産設備に対応可能な基礎データを得る必要がある。

（1-2）高周波均等分配技術の開発

複数段のプラズマ放電を1つの発振器、マッチングで放電させるためには、各段のパワーバランスを均等化、給電部の抵抗、長さ、電極の容量（インピーダンス）といった複合した条件の整合技術とそれによる放電特性の関係をつかむ必要がある。

（1-3）異常放電対策の開発

減圧雰囲気中では高周波は放電を起こしやすくなる。目的の電極以外で放電してしまう異常放電を発生させない機構（材料、構造）を構築する必要がある。

（1-4）多段電極ガス流れ排気均一分配化技術の開発

複数電極を同時に処理する場合、すべての電極上の面内に均等にアルゴン／水素の混合ガスが供給されるが、チャンバー内すべて電極上で同じプラズマ状態でなければの回路の焼結が均一に起きない。プラズマ中の水素イオンが各電極スペースに均等に分布させる制御技術の検討が必要である。

（1-5）基板に対する電極構造の開発

基板に対するプラズマ分布の均一化には、基板に対する電極（給電、グラウンド）の最適サイズの検討が必要である。プラズマの形状がなるべく製品全体を覆うようなプラズマ発生条件をみつける。そのためには電極に対する電極面積、電極間距離（GAP）、給電方式の最適化の検討が必要である。

(1-6) 量産試作サイズ含む量産設備の技術検討

量産設備の技術検討においては、当社既存の平行平板500mm角設備（一段）及び200mm角多段設備で取得したデータをもとに、量産試作サイズ（300*400mm角量産設備の再現性を確認。他方、ハンドリング、メンテナンス性等、量産設備としての構造検討が必要である。

また、焼結プロセスの進行制御を行う上で基板温度をリアルタイムで精密に測定する技術が必要である。

しかし、プラズマプロセス中でリアルタイムに基板温度を測定することは高周波の影響で難しい。

そのため、高周波の影響を受けずにリアルタイムで測定できる測定技術の開発を行う必要がある。（大阪大学）

(2) プラズマ焼結の安定化技術の課題

(2-1) プラズマ焼結メカニズムの解明による量産技術の開発

各種銅ナノインクの焼結におけるプラズマ条件の基礎的解明ならびに量産時の面内バラツキ、製品での実証。

(2-2) PET 基板上の銅回路形成条件の確立

本設備が完成した時点で必要となるPET 基板上の銅微細回路を工業生産する場合における課題の明確化。

(2-3) 川下ユーザー基板・各種銅ナノインクによる焼結評価

川下ユーザー回路評価による焼結サンプル評価データを取得する。

各種市販銅ナノインクによる焼結評価および焼結メカニズム検討のための分析データを取得する。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者）

1-2-1 研究組織・管理体制

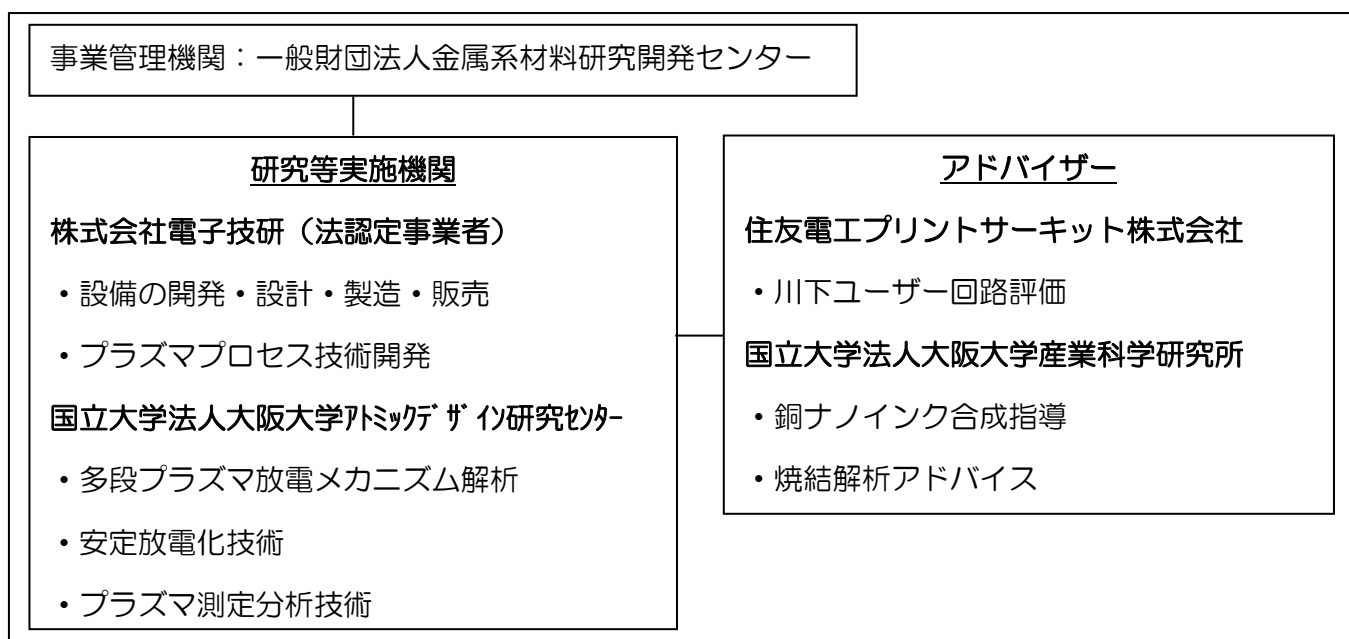


図2 研究組織・管理体制図

1-2-2 研究者氏名・協力者

【事業管理機関】

名称	一般財団法人金属系材料研究開発センター
事業所所在地	東京都港区西新橋 1-5-11 第11東洋海事ビル6F
担当者名及び役職名	産学官連携グループ 主席研究員 岡久拓司

【研究等実施機関1】

名称	株式会社電子技研
事業所所在地	大阪府東大阪市川田4-6-4
担当者名及び役職名	製造部開発G 主幹技師 小泉剛

【研究等実施機関2】

名称	国立大学法人大阪大学
事業所所在地	大阪府吹田市山田丘1-1
担当者名及び役職名	大学院工学研究科アトミックデザイン研究センター 教授 浜口智志 准教授 松本敏司

【アドバイザー1】

名称	住友電工プリントサーキット株式会社
事業所所在地	滋賀県甲賀市水口町ひのきが丘30
担当者名及び役職名	技術部 主幹 村田和夫

【アドバイザー2】

名称	国立大学法人大阪大学
事業所所在地	大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1
担当者名及び役職名	産業科学研究所 教授 菅沼克昭

1-3 成果概要

表 1 開発各テーマと目標および成果一覧

開発テーマ	実施内容・高度化目標	成果	達成率
【1-1】 プラズマ検証設備によるプラズマ強度、分布、均一化技術の開発	【実施内容】 ①ガシミュレーション構築、設計、評価設備(200mm 角)の開発 ②各プラズマ測定比較技術の検証 ③焼結検証データ取得 【目標値】 ①評価設備完成 ②発光、プラズマ強度、焼結における4段階同時処理時±10%以内 ③4段階同時焼結における比抵抗 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下	①評価設備開発完成達成 ②・水素発光プラズマ±9% ・プラズマ密度プラズマ±14% ・焼結比抵抗プラズマ±9% とほぼ達成 ③4段階同時焼結比抵抗 $2.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ を達成	90%
【1-2】 高周波均等分配技術の開発	【実施内容】 均等分配経路技術の構築、設計、製造、検証 【目標値】 4段階電極へ1つの発振器で同時に放電させる技術の開発	高周波発振器1台による4段階電極同時安定放電の達成	100%
【1-3】 異常放電対策の開発	【実施内容】 ①高周波経路 RF シールド技術の構築、設計、製造、検証 ②側壁 GAP による異常放電境界検証 【目標値】 ①電極面以外からの漏れ放電、および異常放電無き事 ②異常放電境界の確認	①RF シールド技術による高周波漏れ放電、異常放電無きことを検証完了 ②GAP 変更による異常放電境界の確認完了	100%
【1-4】 多段電極ガス流れ排気均一分配技術の開発	【実施内容】 ①ガシミュレーションによるチャンセル電極形状の構築検証 ②シャワーヘッドプラズマ変更傾向検証 ③電極サイド空間閉鎖による影響検証 【目標値】 ②4段階ガス均一性±10%以下 ③電極サイド空間最小化限界確認	②4段階均一性±9%達成 ③電極サイド空間最小化限界検証完了	100%
【1-5】 基板に対する電極構造の開発	【実施内容】 ①基板反り対策（周辺カバー治具）の検証 ②放電ダメージ低減のためのアルミトリイ検証 【目標値】 PET 基板ダメージ低減技術の開発	PET 基板を安定して処理できる電極構造、治具を開発	100%

【公開版】

開発テーマ	実施内容・高度化目標	成果	達成率
【1-6】 量産試作サイズを含む量産設備の技術検討	【実施内容】 ①量産試作評価設備検証 (300×400mm 多段設備) 電極サイズ UP におけるマッチング 整合安定放電 ②200mm 各検証機で得られたデータの再現確認 ③量産検証設備の検討 500mm 角用ハンドリング / ミテナス他検証設備の開発 ③量産サイズ (500mm 角) トイレハンドリング 及び放電の一連動作検証 ミテナス他検証 ④これまでの検証から量産設備構想設計 ⑤高周波の影響を受けずにリアルタイムで測定できる基板温度測定技術の開発 (大阪大学トミックデザイン研究所にて開発) 【目標値】 ①多段 4 段同時放電 5000W 反射波 5%以下 ②発光バラツキ ±10%以下 プロパバラツキ ±10%以下密度 $1 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$以上 ③4 段同時焼結 $1 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$以下 ③ハンドリング / ミテナス他検証設備の開発 ハンドリング、放電一連動作検証 ミテナス性 (セロ入替、真空気密) 検証 ④検証結果を踏まえた量産設備構想案の完成 ⑤プラズマプロセス中の基板温度のリアルタイム測定による焼結プロセス評価システムの開発、温度精度は ±10%以内	①2000W~5000W 4 段同時放電反射波 2%を達成 ②発光分析：バラツキ ±9% プロパ分析：電子密度 10^{11}cm^{-3}、バラツキ ±8% 焼結検証：$7 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 目標値達成 ③ハンドリング / ミテナス他検証設備を開発 真空特性、ゲート動作、放電安定確認 セロユニット (2 段) 入替及び真空到達確認 トイレ搬送ユニット製造、一連動作検証実施 ④量産サイズ 多段量産設備構想の検討、構想設計案の完成 ⑤開発システムを大阪大学のプラズマプロセス装置に設置して、温度較正を行い定常的な場合では ±1%、動的な (変化率 50℃/分程度) 場合でも ±5%以内で測定できることを確認した	100%
【2-1】プラズマ焼結システムの解明による量産設備技術の開発	【実施内容】 ①200mm 角 4 段によるプロパ条件出し ②300×400mm 角 4 段によるプロパ条件出し 【目標値】 ①プラズマ条件出しによる 4 段同時焼結 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$以下の達成 ②①条件移管、サイズアップ後の焼結性能再現	①200角 4 段同時焼結で比抵抗 $2.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ を達成 ②300×400 角 4 段同時焼結で比抵抗 $3.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ を達成	100%
【2-2】 PET 基板上での銅回路形成条件確立	【実施内容】 印刷方法の検討 プラズマ焼結配線サンプルの作成 【目標値】 PET フィルム上へのマーケッティング 活用可能な配線サンプル製作技術の確立及び焼結技術の確立	PET フィルム上への配線幅 100 μ 比抵抗 $10E^{-5}$ 台のマーケッティング サンプルを製作できる技術を確立	100%
【2-3】川下ユーザ-各種銅ナインクによる焼結評価	【実施内容】 ①川下ユーザ-協力による評価パターン製作、焼結、性能評価実施 (アドバタイザ-住友電工プリントサーキット様ご協力) ②各種銅ナインクによる焼結ベキベキ 状態の分析 (大阪産技総研分析) 【目標】 ①川下ユーザ-評価パターンによる評価検証データの取得 ②各種銅ナインク焼結ベキベキ 分析データ取得	①川下ユーザ-評価パターンによる評価データ取得完了 ②各種銅ナインク焼結ベキベキ 比較データ取得完了	100%

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

名称	一般財団法人金属系材料研究開発センター
事業所所在地	東京都港区西新橋 1-5-11 第11東洋海事ビル6F
担当者名及び役職名	産学官連携グループ 主席研究員 岡久拓司
TEL/FAX	03-3592-1283/03-3592-1285
E-mail	tokahisa@jrcm.jp

【研究等実施機関1】

名称	株式会社電子技研
事業所所在地	大阪府東大阪市川田4-6-4
担当者名及び役職名	製造部開発G 主幹技師 小泉剛
TEL/FAX	072-943-2006/072-943-2007
E-mail	t.koizumi@denshigiken.co.jp

第2章 本論

【1】多段平行平板プラズマ設備開発

【1-1】プラズマ検証設備によるプラズマ強度、分布、均一化技術の開発

①ガスシミュレーション構想，設計，評価設備（200mm角）の開発

多段構造構想によるガス流れシミュレーションを実施し、各電極上へ処理ガスが均等に供給される構造を検討した（図3）。

検討した構想より200mm角4段評価設備を設計，開発した（図4）。

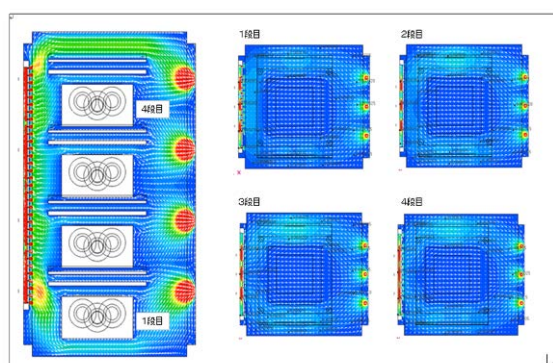


図3 多段ガスシミュレーション



図4 多段評価設備

②各プラズマ測定比較技術の検証

開発した4段階評価設備の各段階状態を比較する技術として、プローブプラズマ強度測定（図5）、プラズマ発光スペクトル測定（図6）（大阪大アトミックデザイン研究センター開発）を使用し、プロセス条件によるバラツキ傾向データを取得、条件出しにより段階バラツキ±10%以内をほぼ達成する条件を確立した。

達成値：プローブプラズマ強度バラツキ $\pm 1.4\%$ 発光スペクトルバラツキ $\pm 9\%$

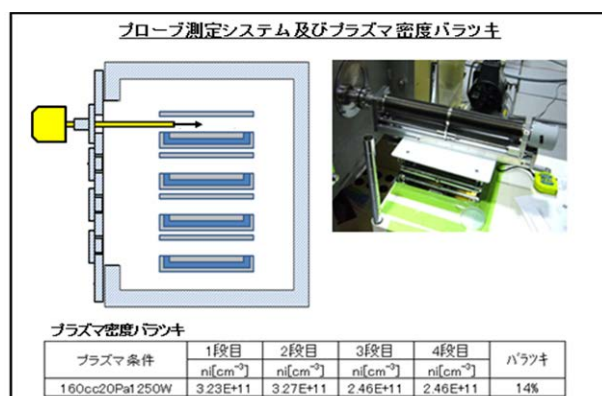


図5 プローブプラズマ強度測定技術

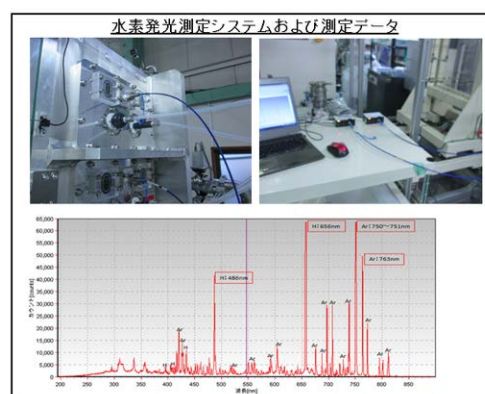


図6 プラズマ発光スペクトル測定技術

③焼結検証データ取得

開発した4段評価設備で実際に銅ナノインク焼結条件出しを実施し、4段同時焼結において目標である比抵抗 $1.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下を達成する条件を確認した（図7）。

達成値：バラツキ $\pm 9\%$ 比抵抗 $2.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$

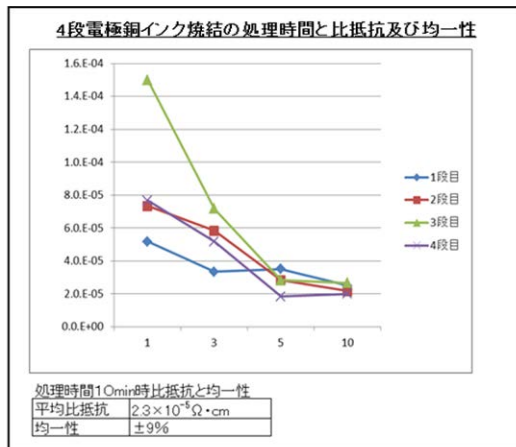


図7 200mm角4段焼結比抵抗データ

【1-2】高周波均等分配技術の開発

均等分配経路技術の構想，設計，製造，検証

本開発目標である装置低コスト化として、1つの発振器、マッチングで4段電極を同時かつ均等に放電させる技術を確認するために、独自の高周波分配経路を開発し検証を行った（図8）。

本開発技術により、4段電極を同時かつ均等に放電させる技術を確認することができた。

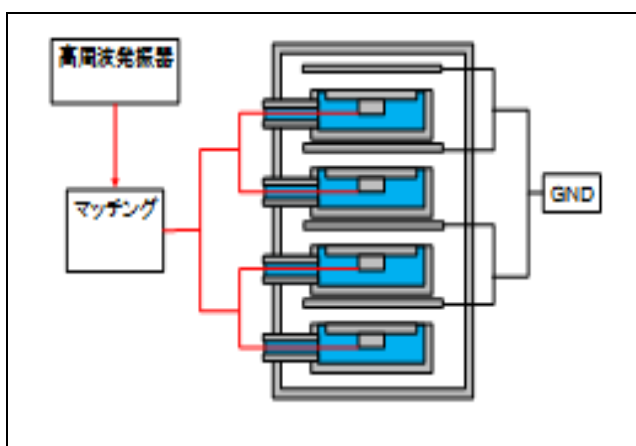


図8 高周波分配経路

【1－3】異常放電対策の開発

①高周波経路RFシールド技術の構想，設計，製造，検証

独自構想したRFシールド構造により、設計製造し、検証の結果、真空チャンバー中でも放電電極からの高周波漏れ、異常放電が発生しない構造を開発することができた（図9）。

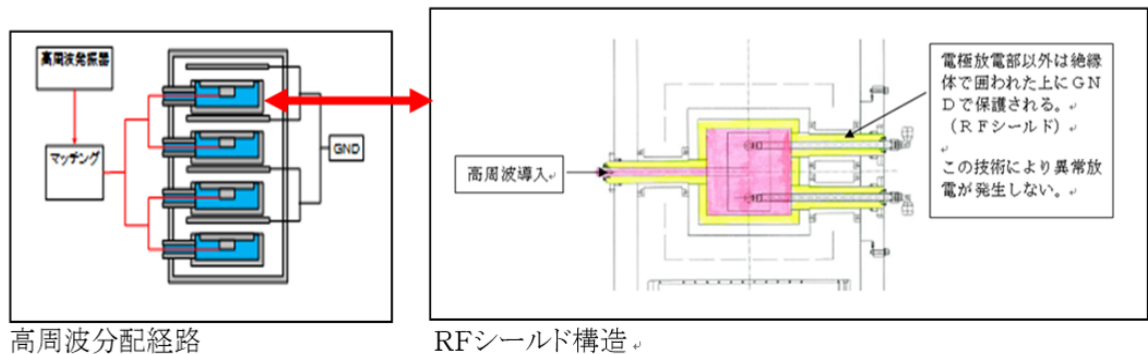


図9 多段電極RFシールド構造

②側壁GAPによる異常放電限界検証

多段電極において電極間，側壁間のGAP変更による異常放電が発生する限界および給電経路バランス変更に伴う異常放電発生有無といった異常放電境界の検証を実施した（図10）。

検証の結果、GAPによる異常放電限界を把握することができた。

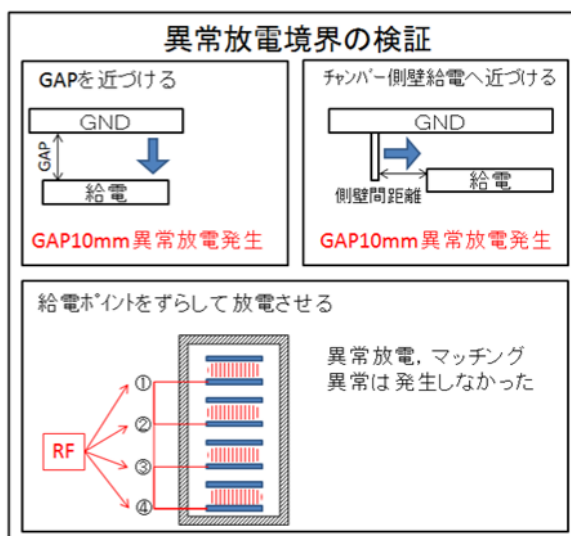


図10 異常放電境界の検証

【1－4】多段電極ガス流れ排気均一分配技術の開発

①ガスシミュレーションによるチャンバ電極形状の構想検証

本開発における検証装置開発に先立ち、構想構造のガスシミュレーションを実施し、ガスが各電極へ均一に供給されやすい構造をあらかじめ検討した（図11）。

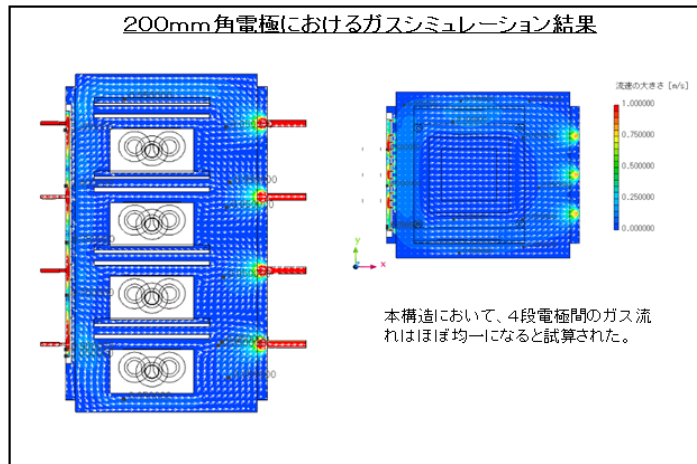


図11 200mm多段電極構造ガス流れシミュレーション

本検討により設計開発された装置により実際に4段同時に銅ナノインクのプラズマ焼結を実施することができた。

②シャワーヘッドバランス変更傾向検証

ガス供給シャワーヘッドの開口変更による各段間焼結プロセス速度のバランス傾向を確認した（図12）。

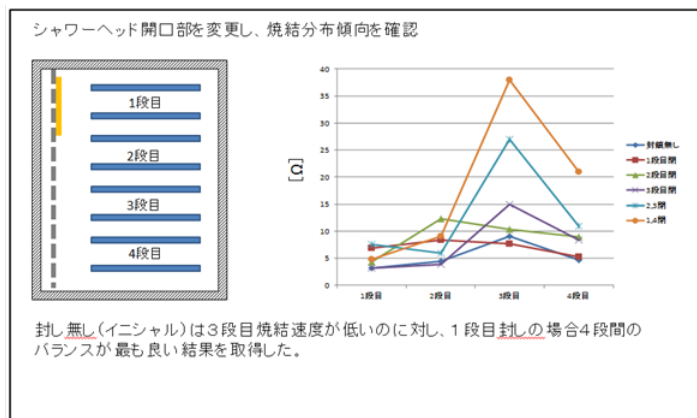


図12 シャワーヘッド開口部と各段間焼結速度

検証の結果、シャワーヘッドの開口による各段間プロセス速度のバランス調整が可能であることが確認され、調整技術として活用できることが確認された。

③電極サイド空間閉鎖による影響検証

電極サイドのスペースを塞いだ状態で焼結試験を行った結果、塞ぐ前と同等に焼結することが出来ることが確認できた（図13）。

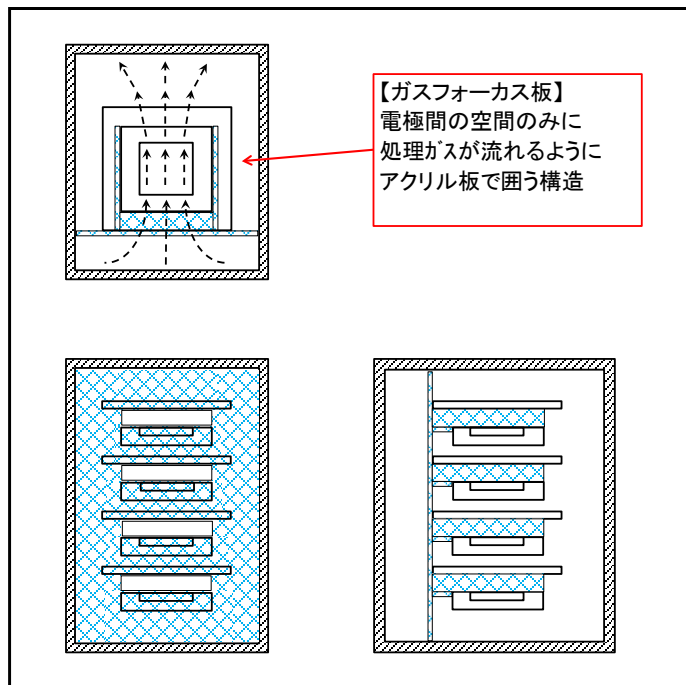


図13 ガスフォーカス（スペース閉鎖）板構造図

この結果より、チャンバー内の省スペース化（電極ユニットの最大化）がどこまで可能か検証することができた。

【1－5】基板に対する電極構造の開発

①基板反り対策（周辺カバークリップ）の検証

②放電ダメージ低減のためのアルマイトトレイ検証

反り防止対策およびアルマイトトレイによるプラズマダメージ低減を検証確認しPETフィルム回路基板の焼結処理時ダメージ低減ができる専用トレイを開発できた（図14）。

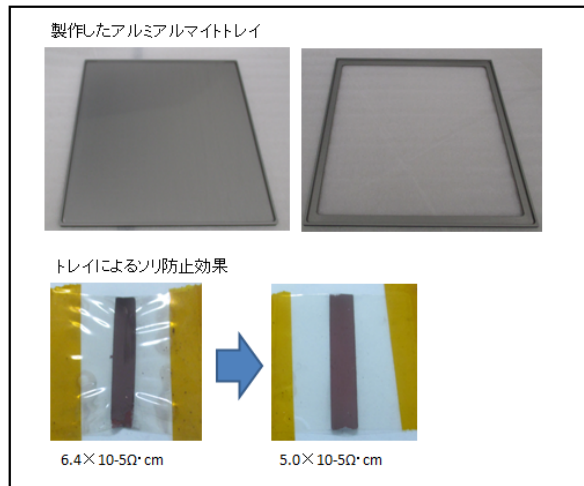


図14 反り防止およびプラズマダメージ低減トレイ

【1－6】量産試作サイズを含む量産設備の技術検討

①量産試作評価設備検証（300×400mm多段設備）

電極サイズUPにおけるマッチング整合安定放電の検証

200mm角電極を川下ユーザー量産試作サイズである300×400mmサイズへ改造し、マッチング整合調整を実施した（図15）。

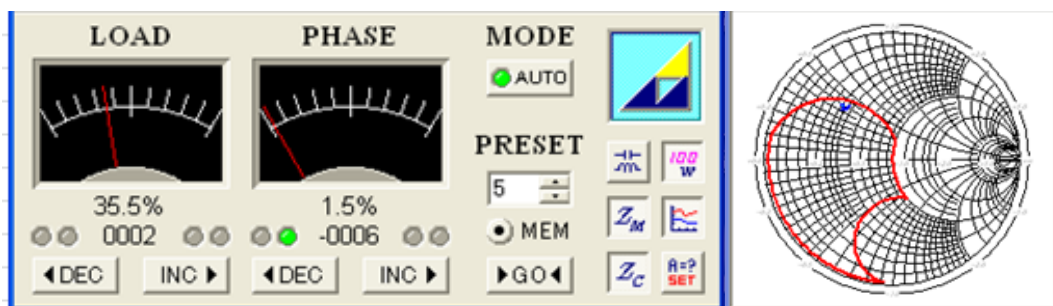


図15 マッチングバリコン調整パラメータ、整合時スミフチャート

調整後、300×400mm電極において4段同時放電時、2000～4000W導入時において反射波2%以下（目標5%以下）を達成した。

②200mm角電極で得られた各データの再現確認

300×400mm電極サイズにおける発光、プローブ、焼結の200mm角電極時同等性能の再現確認（条件移管の検証）を実施した。

測定の結果200mm角電極と同等の性能が達成され、条件移管が達成された（表2）。

表2 200mm角電極性能及び300×400mm電極性能

項目	目標値	200mm角電極	300×400mm電極
発光入出力	バラツキ±10%以内	±9%	±9%
プローブ強度	バラツキ±10%以内 電子密度 10^8cm^{-3} 以上	±14%（ほぼ達成） 10^{11}cm^{-3}	±8% 10^{11}cm^{-3}
焼結比抵抗	$10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 以下	$2.3\times 10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$	$7.0\times 10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$

サイズUPに対し性能が遜色無く移管できたことが確認され、設備として川下ユーザー量産試作サンプルの評価を実施できる状態を達成した。

③量産検証設備の検討

500mm角用ハンドリング／メンテナンス他検証設備の開発と検証

川下ユーザー量産時サイズ500mm角基板へのハンドリング／メンテナンス等の検証のため、検証設備を構想開発し、ハンドリング（専用トレイの搬送）、放電、等の一連動作を検証した（図16，17，18）

またセイロ式入替時のチャンバー真空気密性等メンテナンス方法の検証を行った。

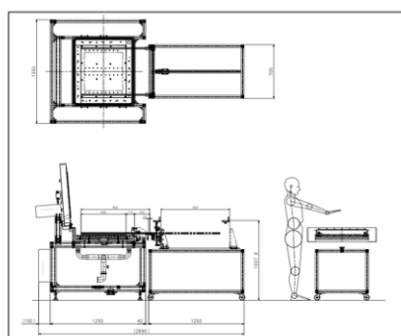


図16 ハンドリング／メンテナンス



図17 トリハンドリング

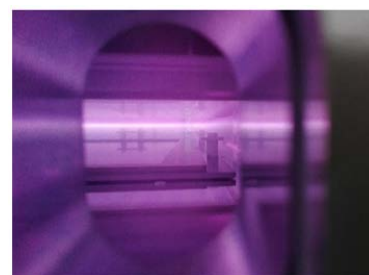


図18 プラズマ放電

検証ユニット構想図

本検証検討データを量産設備構想へフィードバックした。

④これまでの検証から量産設備構想設計

多段（４段）検証設備およびハンドリング／メンテナンス検証設備から得られた検証データをフィードバックし、将来川下ユーザーへ展開するための量産設備仕様について構想設計した（図１９）。

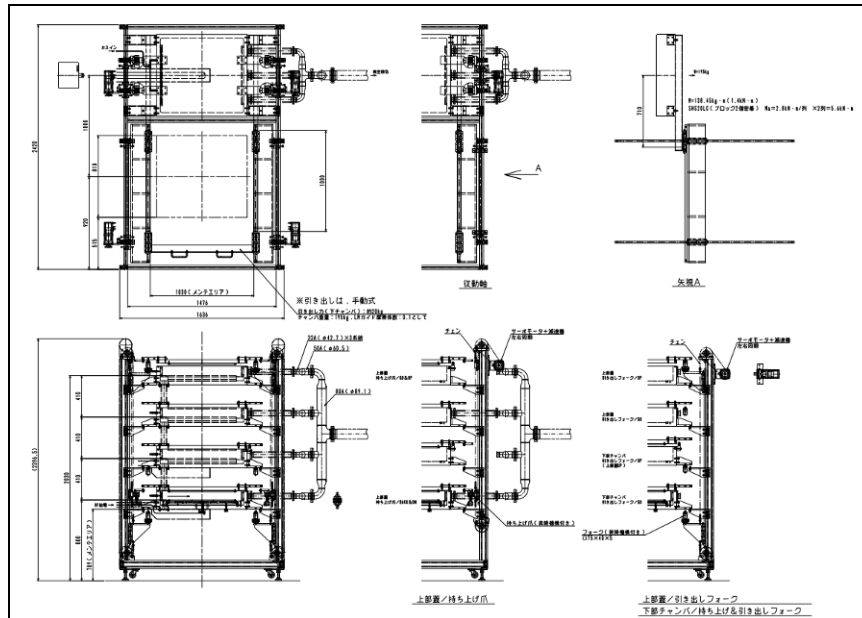


図１９ ５００mm多段量産設備構想

⑤リアルタイム基板温度測定技術の開発

大阪大学アトミックデザイン研究センターにて開発。

高周波の影響を受けずにリアルタイムで測定できる基板温度測定技術の開発を２９年度実施。

開発システムを大阪大学のプラズマプロセス装置に設置して、温度較正を行い定常的な場合では±１％、動的な(変化率 50℃/分程度)場合でも±５％以内で測定できることを確認し目標を達成した（図２０）。

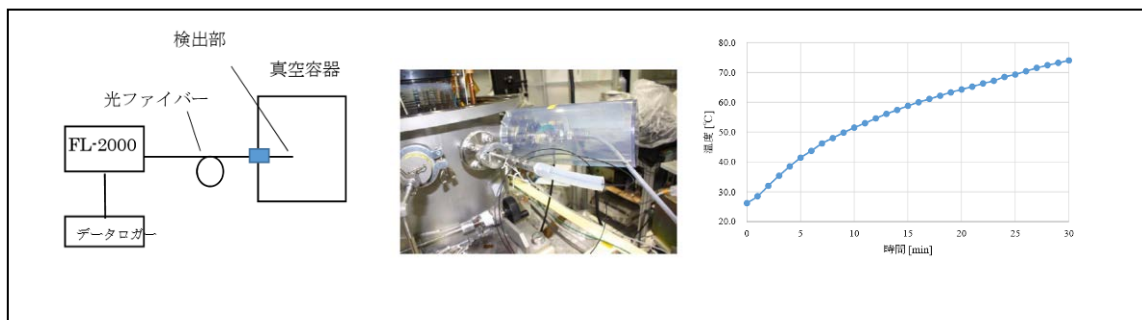


図２０ プラズマ焼結中基板リアルタイム温度測定システム

【2】プラズマ焼結の安定化技術の開発

【2-1】プラズマ焼結メカニズムの解明による量産設備技術の開発

①200mm角4段によるプロセス条件出し

まず 200mm 角4段検証設備のよる焼結条件出しを実施し、4段同時に比抵抗 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下を達成する条件を確立した。

②300×400mm 角4段によるプロセス条件出し

①の 200mm 角で確立された条件をサイズUPした電極へ移管し、プラズマ条件出しを実施し、300×400mm4段同時処理において比抵抗 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下を達成する条件を確立した。

表3 300×400mm 電極銅ナノインク焼結条件出しデータ例（一部抜粋）

銅粒子径0.3 μ 焼結データ

プラズマ条件	段	長さ[cm]	幅[cm]	高さ[cm]	5min		10min		15min	
					抵抗[Ω]	比抵抗[$\Omega \cdot \text{cm}$]	抵抗[Ω]	比抵抗[$\Omega \cdot \text{cm}$]	抵抗[Ω]	比抵抗[$\Omega \cdot \text{cm}$]
160cc10Pa2000W	1段	3	0.5	0.001	0.7	1.2E-04	0.3	5.0E-05	0.3	5E-05
	2段	3	0.5	0.001	1.1	1.8E-04	0.4	6.7E-05	0.2	3E-05
	3段	3	0.5	0.001	1.8	3.0E-04	1.3	2.2E-04	0.7	1E-04
	4段	3	0.5	0.001	0.9	1.5E-04	0.8	1.3E-04	0.5	8E-05
160cc10Pa3000W	1段	3	0.5	0.001	0.2	3.3E-05	0.2	3.3E-05	0.3	5E-05
	2段	3	0.5	0.001	0.3	5.0E-05	0.1	1.7E-05	0.5	8E-05
	3段	3	0.5	0.001	1.2	2.0E-04	0.5	8.3E-05	0.3	5E-05
	4段	3	0.5	0.001	0.8	1.3E-04	0.4	6.7E-05	0.5	8E-05
160cc10Pa4000W	1段	3	0.5	0.001	0.2	3.3E-05	0.3	5.0E-05	0.1	2E-05
	2段	3	0.5	0.001	0.5	8.3E-05	0.3	5.0E-05	0.2	3E-05
	3段	3	0.5	0.001	0.6	1.0E-04	0.2	3.3E-05	0.3	5E-05
	4段	3	0.5	0.001	0.4	6.7E-05	0.3	5.0E-05	0.2	3E-05
160cc20Pa2000W	1段	3	0.5	0.001	2.3	3.8E-04	1.1	1.8E-04	0.3	5E-05
	2段	3	0.5	0.001	3.5	5.8E-04	1.4	2.3E-04	0.8	1E-04
	3段	3	0.5	0.001	11.3	1.9E-03	5.3	8.8E-04	3.7	6E-04
	4段	3	0.5	0.001	4.7	7.8E-04	2.8	4.7E-04	1.9	3E-04
160cc20Pa3000W	1段	3	0.5	0.001	0.4	6.7E-05	0.2	3.3E-05	0.2	3E-05
	2段	3	0.5	0.001	0.8	1.3E-04	0.4	6.7E-05	0.3	5E-05
	3段	3	0.5	0.001	3.2	5.3E-04	1.5	2.5E-04	0.8	1E-04
	4段	3	0.5	0.001	2.5	4.2E-04	0.9	1.5E-04	0.6	1E-04
160cc20Pa4000W	1段	3	0.5	0.001	0.2	3.3E-05	0.3	5.0E-05	0.3	5E-05
	2段	3	0.5	0.001	0.3	5.0E-05	0.5	8.3E-05	0.4	7E-05
	3段	3	0.5	0.001	0.8	1.3E-04	0.7	1.2E-04	0.5	8E-05
	4段	3	0.5	0.001	0.6	1.0E-04	0.5	8.3E-05	0.4	7E-05
160cc30Pa2000W	1段	3	0.5	0.001	8.3	1.4E-03	5.3	8.8E-04	4.3	7E-04
	2段	3	0.5	0.001	12.1	2.0E-03	8.8	1.5E-03	7.6	1E-03
	3段	3	0.5	0.001	21.6	3.6E-03	10.9	1.8E-03	9.6	2E-03
	4段	3	0.5	0.001	23.1	3.9E-03	15.7	2.6E-03	10.1	2E-03
160cc30Pa3000W	1段	3	0.5	0.001	3.2	5.3E-04	2.2	3.7E-04	2.3	4E-04
	2段	3	0.5	0.001	5.6	9.3E-04	2.8	4.7E-04	2.1	4E-04
	3段	3	0.5	0.001	9.9	1.7E-03	6.3	1.1E-03	4.8	8E-04
	4段	3	0.5	0.001	7.9	1.3E-03	3.7	6.2E-04	4.1	7E-04
160cc30Pa4000W	1段	3	0.5	0.001	3.1	5.2E-04	1.8	3.0E-04	2	3E-04
	2段	3	0.5	0.001	5.4	9.0E-04	2.8	4.7E-04	3.1	5E-04
	3段	3	0.5	0.001	9.3	1.6E-03	4.5	7.5E-04	3.3	6E-04
	4段	3	0.5	0.001	10.1	1.7E-03	4	6.7E-04	4.2	7E-04

【2-2】PET基板上での銅回路形成条件確立

本開発にて使用している銅ナノインクの印刷方法として適しているスクリーン印刷法を用いて、実際の回路配線幅に近い $100\mu\text{m}$ 幅の印刷パターンをPETフィルム上に試作した。

作成サンプルをプラズマ焼結条件出しし、 $1.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の焼結回路配線作成を達成した（図21）。

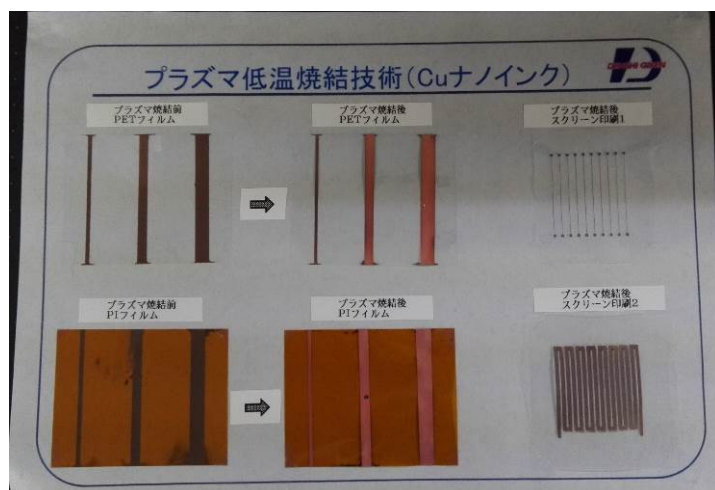


図21 銅ナノインク回路焼結サンプル

マーケティング拡販へ活用できる回路焼結サンプルの作成を達成した。

【2-3】川下ユーザー各種銅ナイツによる焼結評価

①川下ユ-ザ-協力による評価パターン製作、焼結、性能評価実施

住友電エプリントサーキット（アドバイザー・川下ユーザー）協力による評価パターン
製作および川下ユーザーが実際に実施する回路パターン評価データ取得を達成した。

(図 22, 23, 24)

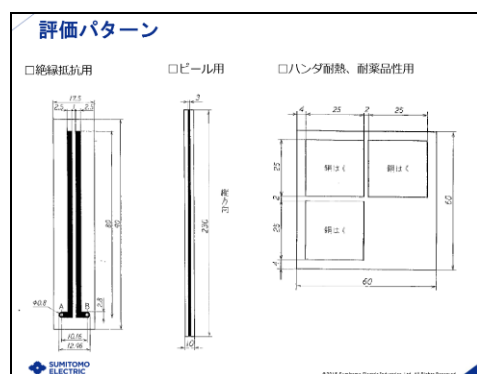


図22 評価パターン設計図

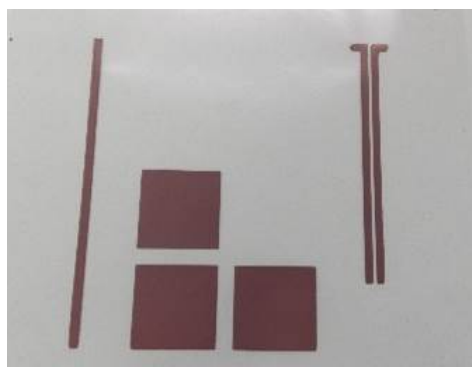


図23 印刷パターンサンプル

□プリント基板 初期評価結果

項目		試験方法	目標値	結果
密着強度	初期	180°引き剥がし	7N/cm以上	Min ; 4N/cm(テスト内材破) Max ; 8N/cm (界面剥離)
耐電圧		AC100V	フラッシュオーバーなき事	O K
耐薬品性	vs HCL	10%HCL 10min浸漬	染込みなき事	O K
	vs H2SO4	10%H2SO4 10min浸漬		
	vs NaOH	10%NaOH 10min浸漬		

評価：住友電工プリントサーキット様

図24 川下ユーザー評価パターン評価結果

密着強度については、界面剥離（銅ナノインクとPETの界面）において目標値7N/cm以上を上回る8N/cmを達成しており、回路の基材への密着強度は達成した。

目標を下回った部分を分析した結果、銅ナノインク内部の破壊が原因と判明し、銅ナノインクの状態（粒子分散、粒子表面）の安定化が必要と考えており、インクと基材の密着強度は目標達成とした。

②各種銅ナノインクによる焼結ネックング 状態の分析（大阪産技総研分析）

各種銅ナノインク（粒径違い）とプラズマ焼結プロセスパラメータによる焼結の進行状態（粒子ネックング）の傾向を把握するため、各サンプルのSEM分析を大阪産技研へ依頼し、傾向分析データ取得を達成した（図25）。

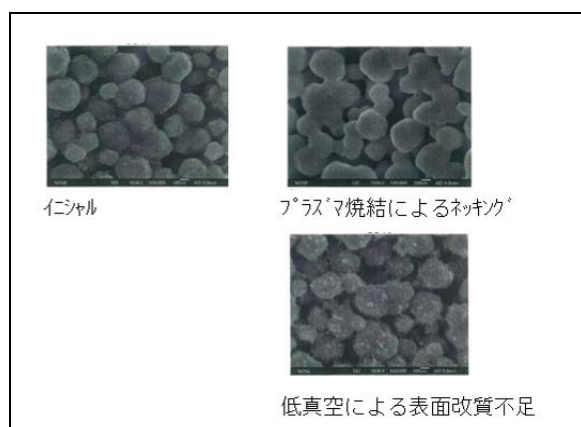


図25 SEM分析データ例

傾向として、高出力、低圧力になるほど到達する比抵抗は低くなることが確認でき、それはSEM分析の結果、高出力低真空になるほど銅粒子表面の不純物除去が進み、粒子同士のネックングが進行していることと関連性があることが確認できた。

最終章 全体総括

【評価検証設備および分析技術の開発】

27年度に開発製造した200mm角多段設備を活用し、28年度は4段同時プラズマ放電制御技術を確立した。

開発確立した技術として、同時放電時の各段間比較のための分析測定技術（発光，プローブ分析技術）、給電均等分配技術、RFシールド技術、段間均一性調整技術（GAP，ガス流れ）を開発した。

200mm角多段設備で培った技術を基礎とし、川下ユーザー量産試作基板の評価検討へ対応するため、電極サイズを300×400mmへ改造し、200mm角多段設備の蓄積技術を移管、29年度に川下ユーザー量産試作基板評価検討に対応した評価設備を完成させた。

また設備状態管理、プラズマ状態比較、プロセス進行管理するための分析技術については、大阪大学アトミックデザイン研究センター（研究実施機関）にて発光分析システム、焼結銅ナノインクのリアルタイム温度測定システムを開発した。

以上の評価設備、分析測定技術の開発により、川下ユーザー量産試作サンプルの評価検討を実施できる体制を確立することが達成できた。

【量産設備技術対応への開発】

川下ユーザー量産対応において基板サイズ以外にハンドリング，メンテナンス等の設備技術への対応が必要となる。

29年度には、量産基板サイズ500mmを量産するための設備検証，課題抽出，検証を目的としたハンドリング／メンテナンス等検証設備を開発製作し、ハンドリング動作検証（トレイー連動作），メンテナンス性検証を実施し、検証データ取得，課題抽出を達成した。

この量産技術検証から得られたデータ，課題および多段検証設備から得られた知見を活用し、今後川下ユーザーへ提案できる量産設備構想設計案の作成を達成した。

【公開版】

【プラズマ焼結低温回路形成技術の開発】

開発した多段検証設備および既存機（500mm1段）を活用し、PETフィルム上で銅ナノインク回路の低温焼結（100℃以下、比抵抗 $10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$ 台）を実現できるプラズマ焼結技術の確立を達成した。

更に印刷サンプル作成技術を取り入れたマーケティング活用サンプル製造技術の確立を達成した。

また、回路市場へ展開するための川下ユーザー回路評価データ取得を達成した。

また、焼結メカニズム把握のための粒子ネッキング進行分析（SEM分析）データの取得を達成した。

【今後の展開】

本技術開発で取得達成された技術，データ，サンプル等を活用し、プリント回路基板業界，プリントブルエレクトロニクス市場へのマーケティング活動、展示会等への発表を実施し、各種回路基板（ウェアラブル，車載回路等）の実用化が期待される2020年をターゲットとした本開発設備の拡販活動を進めていく。