

TODAY



産学官共創の魅力と実践

東京工業大学
名誉教授 里 達雄

大学で長く非鉄金属材料分野の教育研究を行ってきた。特に、アルミニウム、銅、マグネシウムなどの非鉄金属を主な研究対象とし、それぞれ casting 凝固現象、熱処理プロセス、加工・再結晶挙動など一連の製造プロセスに関わる基礎テーマを取り上げ、さらに微視的組織解析や材料強度解析に関わる研究を多岐にわたって行ってきた。3年前に大学を定年退職した後は非鉄金属分野の企業や協会などより密な交流・活動を行っている。当然のことながら、製造現場での材料技術は広範囲にわたっており、また、現場では具体的な諸課題に時間との闘いの中で日々取り組んでいる。このように大学と産業界では取り組みの姿勢にかなりの違いがあるものの、これまで大学で基礎的観点から研究したり実験したりしてきたことが産業界での諸課題に意外と多くの点で直結していることを実感している。その意味で、大学の基礎研究と製造現場技術とがもっと多角的に結びつければ相互により一層深化できるはずだと確信するに至っている。大学在職中のこれまでの経験と短いながらも産業界との密な協調を行ってきた経験から痛感することを考えてみたい。すなわち、産学官の共創の重要性と魅力について自分なりの経験をもとに考えてみたい。

産業界では個々の企業が日々熾烈な競争を行っており、これは企業活動を活性化する主たる源泉である一方で、基礎基盤領域においては競争もさることながら、相互に連携し、人的にも設備的にも密な協力体制を構築することがより新たなブレークスルーの実現に繋がると考える。国際会議などで海外、とりわけ欧州の研究者と交流していると産と学（公的研究機関などを含む）との連携がきわめて自然に、かつ、時宜を得て行われており、さらに国や国の機関から手厚い支援を得ていることを度々聞かされる。私自身も欧州のそのようなグループに加わって共同で研究活動した経験をもっている。産学官の連携のハードルがきわめて低いことを感じる。

私が関与している日本アルミニウム協会では10年近く前から毎年春に研究合宿を実施している。これは産と学の研究者・技術者が一堂に会し、①大学側の最新の基

礎研究の紹介、②博士課程学生の自らの研究紹介、③企業側のニーズや直面する課題の紹介、などを行う集まりである。昼間の議論の続きは夜の部で個々の企業や大学を越えてじっくりと率直な議論を深める場を設けている。数年前からはJST（科学技術振興機構）関係の皆様にもご参加いただき、産学官共創の重要性を議論している。特に、この研究合宿の当初の議論の中からアルミニウム合金に関する「ヘテロ構造」研究テーマがJSTの支援を受けて立ち上がり、個々の大学や企業だけでは成し得ない様々な展開が現在まで行われている。これはまた「ヘテロ構造」研究で重視している産学官の共創の場としての活動にも繋がっている。中でも、アルミニウム合金では資源循環（リサイクル）やユビキタス元素活用の観点からの材料開発やプロセス構築がロードマップ（アルミニウム技術戦略ロードマップ）に謳われており、これらの達成に向けて研究が大きく展開されている。例えば、特筆すべき成果の一つとして、アルミニウム合金リサイクル材で不純物元素として蓄積されるユビキタス元素をうまく活用することにより、従来の課題であったアルミニウム合金の局部伸びの小さいことを克服し、きわめて大きな局部伸びを発現できるという成果が挙げられる。併せて、合金強度も増大させることができ、従来にない逆転の発想の成果が達成されている。さらに、アルミニウム合金中の水素挙動の解明と制御法に関して、破壊靱性、疲労強度、応力腐食割れ挙動など各種特性との関わりが長年課題であったが、現在、産学官の共創により大きな成果が得られ、さらなる進展が見込まれている。

また、本JRCM NEWS(No.379)でも紹介されているが、銅合金の高強度・高導電性化研究においても産学官の共創が花開きつつある。銅および銅合金の産業界においては、個々の企業の相互連携の経験が乏しく技術開発の共創機運が従来弱いことが気になっていたが、企業間、また、産学間、さらには産学官の連携の重要性が広く認識される機運が高まっている。その契機となったのがロードマップ（伸銅品技術戦略ロードマップ）の策定である。日本伸銅協会が音頭を取り、個々の企業ならびに大学関係者が一丸となって共通の中長期的課題、目標の方向性、技術展開の道筋などについて議論を重ねる中で連携の重要性に対する共通認識が深まってきた。このことは伸銅業界では私が知る限り初めてであり、これを踏まえ

てNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の支援を受けることに成功し、産学官の共創のもと超高強度・高導電性銅合金の開発研究が展開されている。銅合金において銅ならではの特徴を活かして合金成分や加工・焼なまし条件を最適化し、導電性・熱伝導性、成形性にすぐれ、さらに超高強度化を実現するヘテロナノ構造の創出を目指す研究であり、すでに多くの成果が得られている。大学におけるラボ規模の研究と企業設備を活用した実用規模の研究が結びついて初めて可能となった成果である。さらに付言すれば、近年の計算科学分野の急速な

進展も大きく貢献しており、さらなる連携・融合が期待される。

欧州などでは国を越えた産学官の共創は普通に展開されている一方で、わが国では少なくとも非鉄金属材料分野ではまだ緒に就いたばかりであり、今後の一層強力な展開がきわめて肝要である。人的にも予算規模的にも必ずしも十分でない中、産学官の共創を通じて非鉄金属材料の新たなチャレンジが進展しており、わが国の国際競争力を高める上でも是非とも成功させる必要のある取り組みである。

JRCM REPORT

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

株式会社電子技研 製造技術部 開発グループ
主幹技師 小泉 剛

1. はじめに

株式会社電子技研では、平成27年度から平成29年度までサポイン事業として「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」を実施し、プリンタブルエレクトロニクス市場の川下ユーザーが抱える課題を解決するための処理技術および処理装置の開発を実施した。本開発の概要を報告する。

2. 本開発の背景・目的・目標

携帯電話、モバイル機器等の回路基板を印刷技術（インクジェット法など）で製造することが出来る銅ナノ粒子インクによるプリンテッドエレクトロニクス技術は、従来のメッキ・フォトマスク・エッチング法と比較して製造コストを大幅に削減できる製造技術として期待されている。しかし、銅ナノ粒子インクの導電化には300℃以上の加熱が必要であり、廉価な回路材料（PET等）に回路形成できない課題を有していた。

電子技研では、この銅粒子インクを低温（100℃以下）焼結できる高周波減圧プラズマ焼結技術を有しており、本事業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することを目的として実施した。

目標としては、装置コストダウン、省フットプリント化を達成できる多段平行平板プラズマ装置を開発すること。および量産対応設備技術（ハンドリング、メンテナンス等）を開発すること。各種銅ナノインクおよび川下ユーザー評価回路の焼結処理に対応できるプロセスノウハウの確立することとした。

3. 研究開発成果

3-1. 多段平行平板検証設備の開発、検証

多段（4段）平行平板チャンバー内各電極への反応ガス供給、排気流れをシミュレーションし、チャンバー構造検討を実施した（図1）。シミュレーション結果より均一ガス分布が見込める構造を検討し、多段評価設備を設計開発した（図2）。

開発した評価設備の各段のプラズマ強度（ラングミュアプローブ測定：図3）とプラズマ発光スペクトル測定（図4）を実施し、条件出しを行い、目標値である段間バラツキ±10%以下をほぼ達成する条件を確立した。

開発した検証設備で実際に銅ナノインクのプラズマ焼結条件出しを実施し、4段同時焼結において目標値であるバラツキ±10%以下、比抵抗 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下を達成した（図5）。

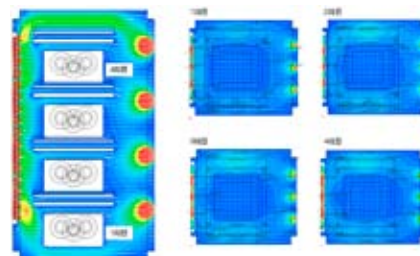


図1. 多段ガスシミュレーション



図2. 多段評価設備（200mm角電極）

プローブ測定システムおよびプラズマ密度バラツキ



プラズマ密度バラツキ

プラズマ条件	1 段目 ni[cm ⁻³]	2 段目 ni[cm ⁻³]	3 段目 ni[cm ⁻³]	4 段目 ni[cm ⁻³]	バラツキ
160cc 20Pa 1250W	3.23E+11	3.27E+11	2.46+11	2.46+11	14%

図 3. プローブプラズマ強度測定技術
条件出し結果バラツキ±14%を達成

水素発光測定システムおよび測定データ

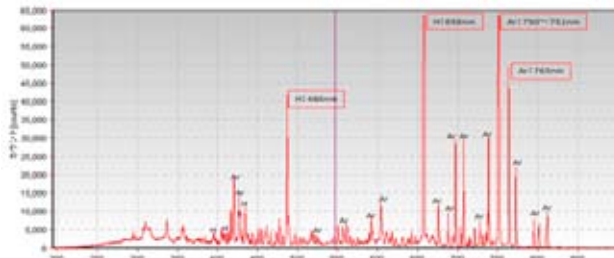
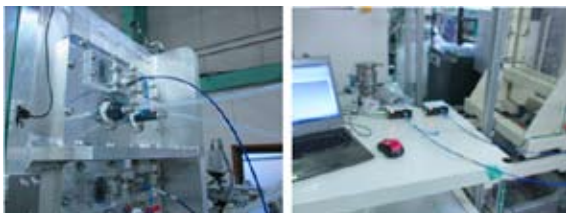
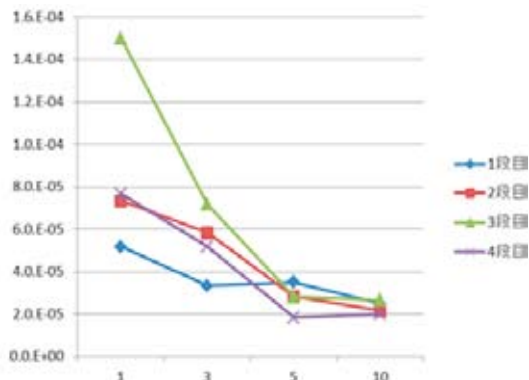


図 4. プラズマ発光スペクトル測定技術
条件出し結果バラツキ±9%を達成

4 段電極同インク焼結の処理時間と比抵抗および均一性



処理時間 10min 時比抵抗と均一性

平均比抵抗	$2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$
均一性	±9%

図 5. 4 段同時焼結比抵抗データ
条件出し結果バラツキ±9%、比抵抗 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ を達成

3-2. 高周波均等分配技術の開発

設備コストダウンのため、1 台の発振器、マッチングで 4 段同時かつ均等に放電させる技術として、

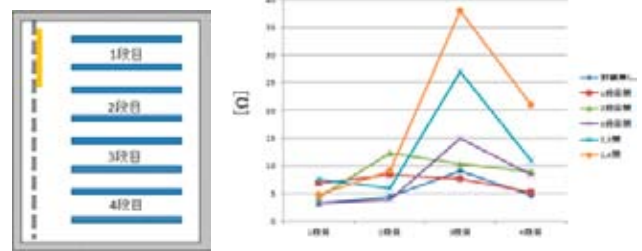
独自の高周波分配経路を開発し、均等放電技術を確立した。

3-3. 異常放電対策技術の開発

真空中高周波経路の異常放電対策として、独自の RF シールド技術を開発し、高周波漏れ、異常放電の発生しない技術を確立した。

3-4. ガスバランス制御技術の開発

多段電極各段へのガス供給バランス制御による各段焼結プロセス速度の調整技術を開発した (図 6)。シャワーヘッド開口部を変更し、焼結分布傾向を確認



封し無し (イニシャル) は 3 段目焼結速度が低いのにに対し、1 段目封しの場合 4 段間のバランスが最も良い結果を取得した。

図 6. ガス導入バランス制御によるプロセス速度制御技術

3-5. 基板反りダメージ対策

PET フィルム等の反りやすくプラズマダメージを受けやすい川下ユーザー基板を処理するため、専用トレイを開発した (図 7)。

製作したアルミアルマイトトレイ



トレイによるソリ防止効果



$6.4 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ $5.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$

図 7. 反り防止、プラズマダメージ低減トレイ

3-6. 川下ユーザー対応検証設備改造

川下ユーザー試作サイズ (300 × 400mm) の評価検証対応を目的として、開発した検証設備 (200mm 角電極) をサイズ UP 改造し、性能検証条件出しを実施し、目標値である各バラツキ、比抵抗 (200mm と同等) を達成した (表 1)。

表 1. 検証設備電極サイズ UP 検証結果

項目	目標値	200mm 角電極	300 × 400mm 電極
発光スペクトル	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	$2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$	$7.0 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$

3-7. 量産検証設備の開発

川下ユーザー量産サイズ 500mm 基板向け量産設備の構想、開発を行うため、ハンドリング/メンテナンス等の検証設備を設計開発した(図8)。

本設備を活用し、セイロ式チャンバー入替、トレイハンドリングー連動作、真空気密等メンテナンス方法の検証を実施した。

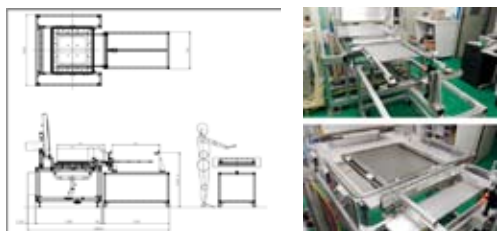


図8. ハンドリング/メンテナンス等検証設備

3-8. 量産設備構想設計

多段設備及び量産検証設備で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量産設備仕様を構想設計した(図9)。

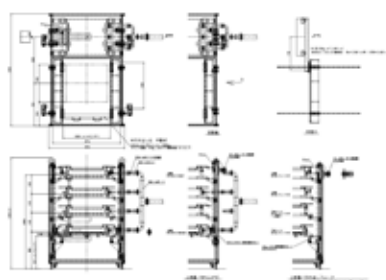


図9. 川下ユーザー量産設備構想

3-9. プラズマ焼結の安定化技術の開発

多段設備による銅ナノインク焼結条件出しの結果、4段同時に比抵抗 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下を達成できる条件を確立した(3-1、3-3参照)。

PET 基板上に実回路に近い印刷パターンを試作、プラズマ焼結し比抵抗 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の焼結回路サンプルの作成した(図10)。

評価パターンにおいて密着強度 8N/cm (目標値: 7N/cm 以上)、耐電圧、耐薬品性条件をクリアし、プラズマ焼結した回路が実用可能であることを検証した。

銅ナノインクのプラズマ焼結進行状態を電子顕微鏡(SEM)で分析し、粒子径による粒子接合(ネッキング)、表面変化(バインダー分解)などの傾向データ取得を達成した(図11)。

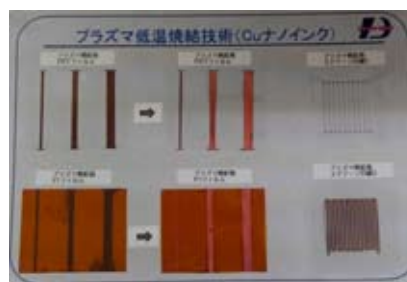
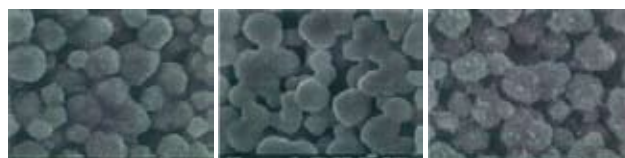


図10. 銅ナノインク回路プラズマ焼結サンプル



左: イニシャル 中: プラズマ焼結によるネッキング
右: 低真空による表面改質不足

図11. SEM 分析データ例

4. 全体総括

電子技研ではプリンタブルエレクトロニクス市場の課題である銅ナノインクの焼結温度低温化(目標 100°C 以下)を解決できるプラズマ焼結技術を基盤として、設備コストダウン、省フットプリント化を目標とした多段同時に安定かつ均等に銅ナノインク回路を焼結できるプラズマ設備を開発した。

さらに量産対応技術(ハンドリング、メンテナンス等)の検証設備の開発し、量産対応技術の検証を実施し、川下ユーザー量産設備構想設計を完成させた。

プラズマ焼結プロセス条件確立(各段同時焼結 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下を達成)し、PET 基板上に実用レベル回路パターンを作成し、比抵抗及び密着強度、耐電耐薬評価を実施し、プラズマ焼結回路が実用回路レベルであることを確認した。

また、プラズマ焼結によるインク内部粒子の変化(ネッキング、バインダー除去)を分析し、傾向データを取得した。

5. 今後の展開について

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、プリンタ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。

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 381 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2018年7月1日
発行人 小紫正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp