

TODAY



## コトからモノ

一般財団法人 機械振興協会  
副会長・技術研究所長  
後藤 芳一

モノからコト、コト売りによく言われます。自動車部品のQCDに特化してきたところから、ソフトを加え事業モデルにして高い価値をめざそうという主張です。これを「I型」とします。一方、技術には、暮らしのニーズの変化に対応し社会課題を解決することも求められています。人口高齢化や環境など課題先進国であることを機会ととらえて、社会要請に応えつつ事業を創る発想です。先の言い方に習えば、この発想は「コトからモノ」です。これを「II型」とします。

イノベーションをめぐるのは、既存の知を組み合わせるのがイノベーションといわれます。ただ、特にII型での抜本的な解決には組合せでは済まないことがあります。破壊的な技術やしくみのイノベーション(発明)が必要になります。イノベーションあつてのイノベーションです。研究開発の役割はますます大きいです。

筆者の研究所は中小や地域の企業を支援しています。現場の困りごとを研究課題にして数年のプロジェクトにしています。プロジェクトは始期と終期、到達目標と経営資源などの境界条件のもとで目標管理する運営です。

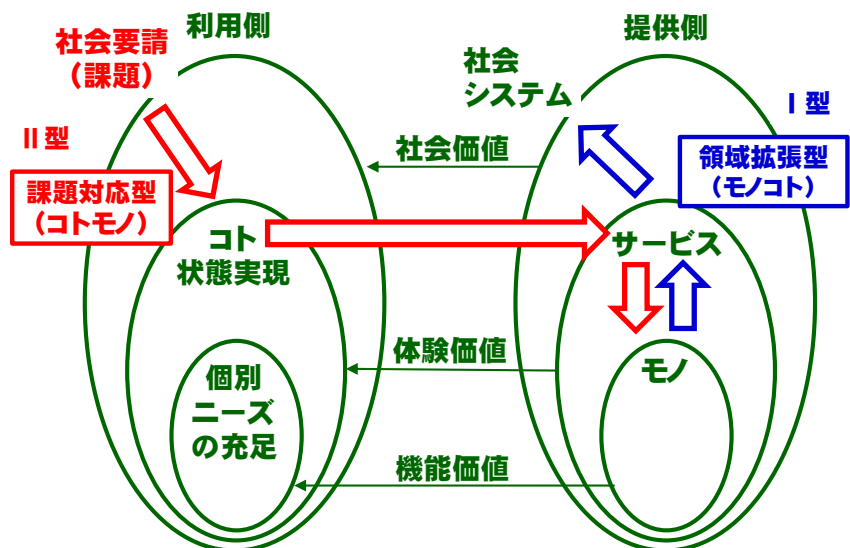
近年の活動は①障害者の就労機会を創り最低賃金の数倍の収入を確保(3Dプリンタ成形品を、地域(都内東久留米市)の作業所の障害者が来所して仕上げ)(2014～20年度)、②サポイン(中小企業庁)採択企業(東久留米市)のオンリーワン技術に予知

保全機能を加えて実装(薄膜高速巻上げ用の軸のチャック部分(高分子製、内側から空圧で軸受に圧着・芯出し)の高分子の紫外線劣化の予知機能を加え大手素材企業(愛知県)で稼働中)(2019～22年度)、③センサとデータを用いたスマート農業(葉物野菜のシェア首位の農業法人(熊本県)に生育管理ソフトを作成・提供し、年14回転(元は10回)生産に)(2014～21年度)、④中小食品工場支援(多職種チームを組んで3社(栃木県、東村山市、西東京市)の工場で、各5S/生産/食材加工を対象に介入研究中)(2022年度～現在)などを行っています。

②はI型、残りはII型です。社会課題の根本の解決は技術にかかります。ここでは「コトからモノ」になります。格言的に言われることは逆も真のことが多いです。コト売りやイノベーションはその一例でした。事例と往復しつつ、本当に言えることなのか、変革の時代こそ自分のアタマで考えたいところです。

機械振興協会技術研究所は今般、機械振興会館(都内港区)に移りました。引続きよろしくお願ひ申し上げます。

### 脱モノ作り特化はモノコト、社会課題対応はコトモノ



一般財団法人 機械振興協会 技術研究所 作成

## 令和3年度採択 戦略的基盤技術高度化支援事業 「インフラ検査向高精度磁気センサの多品種少量生産に向けた ミニマル装置開発と基盤プロセス確立」

東京電子株式会社 代表取締役 黒岩 雅英

### 1. はじめに

東京電子株式会社（以下東京電子）は独自の真空材料である0.2wt% Be-Cu（以下Be-Cu）を用いた真空部品に関する事業を進めてきた。Be-Cu材料関連事業を拡大するため、国立研究開発法人産業技術総合研究所で開発され社会実装が加速しているミニマルファブ装置の真空容器へBe-Cuを適用し、デバイス特性を実証する提案を行ない、2021年公募のサポイン事業（経済産業省 戦略的基盤技術高度化支援事業 JPJ005698）に採択された。この助成事業「インフラ検査向高精度磁気センサの多品種少量生産に向けたミニマル装置開発と基盤プロセス確立」（研究実施機関：東京電子・三重大学・東北大学、事業管理機関：金属系材料研究開発センター／2021～2023年度 関東経済産業局）の成果概要を紹介する。

### 2. 研究開発の背景

社会インフラの老朽化が進み2030年には築50年以上のインフラが50%以上になることや、点検スキルをもった建築系作業者が半減することなどから、インフラの維持管理にかかる費用は、大きな社会課題となっている（国交省試算：2028年6.4兆円）。この社会課題の解決策としては重要インフラの状態を常時モニタリングし、IoT/ICT技術で一元的にデータを管理し、メンテナンスをするインフラを峻別するアプローチが考えられる。ICT技術を活用した点検・モニタリング市場は2027年で815億円と予想されている。

モニタリングの核となるのが、小型・低消費で実現するセンシングデバイスである。インフラの多くは鋼棒が中に組込まれたコンクリートから構成される。東北大学の研究では、トンネル磁気抵抗センサ（Tunnel Magnetoresistance effect、以下TMRセンサ）でコンクリート表面から50cm離れた位置の鋼棒の損傷を検知できることを実証している。図1にTMRセンサの動作原理を示す<sup>1)</sup>。TMRセンサは、1～2nmという薄い絶縁体のバリア層を2層の強磁性体層（フリー層：上部／ピン層：下部）ではさんだ薄膜積層構造を有し、高

度な成膜技術が必要である。固定層の磁化の向きは固定され、自由層の磁化の向きは、外部磁場方向に応じて変化し、それにつれてセンサの電気抵抗が変化する。固定層と自由層の磁化の向きが同一の場合、最も抵抗が小さく、磁化の向きが反対の場合、抵抗は極端に大きくなる。このように外部で発生する磁場により自由層の磁化の向きの変化をバリア層に流れる電流値で検知するため、外部磁場に対する抵抗変化がセンサ感度として重要な指標となる（TMR比）。東北大学では心磁や脳磁など微小な磁気信号を検出、さらに低消費電力であり、他の磁気センサ対比でインフラ検査に適している。

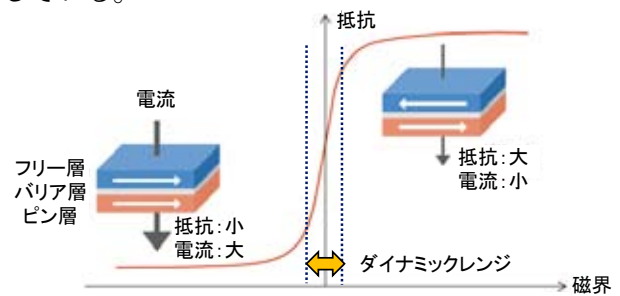


図1 TMRセンサ動作原理

検査対象となるインフラはさまざまな形態をとり、設置場所によるノイズ環境も異なり、TMRセンサの仕様は多種多様とならざるを得ない。さらに対象となるインフラ数は限られるため高感度TMRセンサを多品種少量かつ低コストで製造する必要がある。汎用的なTMRセンサの製造で一般に使用されている8～12インチウエハを使用するメガファブではコスト的に採算が合わない。

この課題を克服できる可能性があるのがミニマルファブである。図2にミニマルファブ製造スキームを示す。ミニマルファブではシャトルと呼ばれる特殊なケースと自動搬送システムを用いることで局所クリーン化を実現し、クリーンルームが不要となる（図2上）。使用するウエハは0.5インチと小径であり、装置の小型化が可能である。さらに各装置のサイズはW30×D45×H144cmに規格化され、生産ラインを構築する場合、省スペース化が可能である（図2下）。

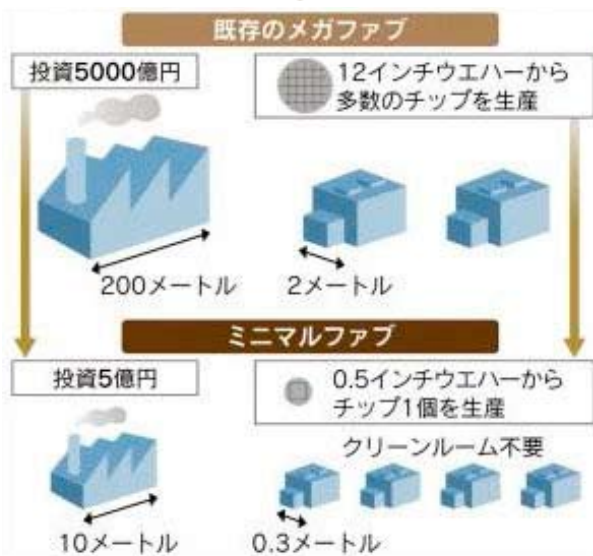
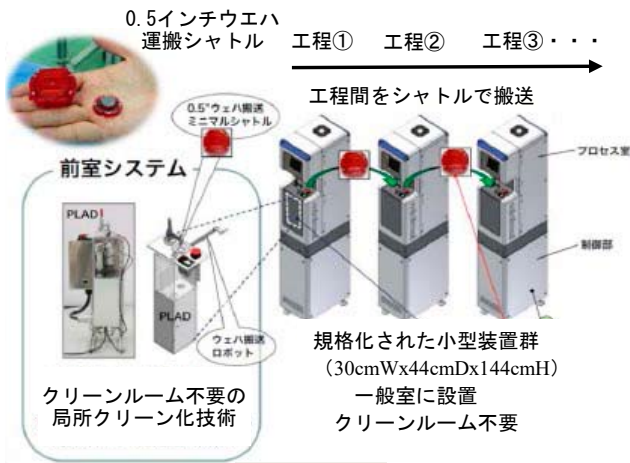


図2 ミニマルファブ製造スキーム<sup>2)</sup>

### 3. 独自ミニマル装置開発

本開発では、1年目に装置設計と独自コンポーネント開発、2年目に独自コンポーネント評価・改善とミニマル装置化、3年目に装置立ち上げとデバイス作製・評価を行った。図3にミニマル仕様の成膜装置の構想図を示す。成膜手法としては平滑な界面が得られる分子線エピタキシー法 (MBE: Molecular Beam Epitaxy) を選択した。

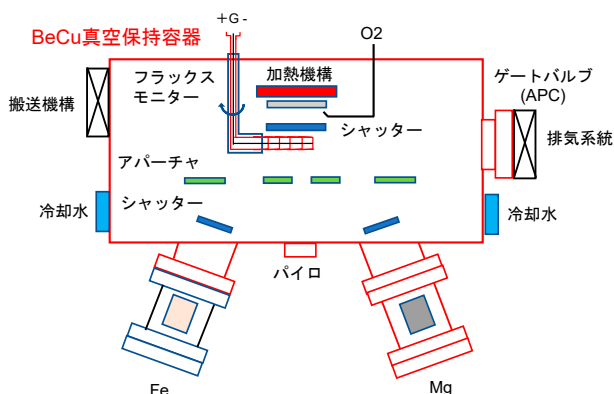


図3 TMR センサ積層用装置構想図 (断面)

なお本装置で作製する TMR センサは、最もシンプルな構造である Fe/MgO/Fe とした。東北大学から Fe/MgO/Fe 構造の TMR センサで良好な特性をだすためには、界面制御と MgO は MgO を成膜するのではなく、Mg 単層を成長して酸化するプロセスを繰り返すことが重要となるとの情報を頂いた。

開発した本装置と、開発済のプロセス装置を組み合わせて活用することで TMR センサの多品種少量生産が可能となる。今回開発した独自技術の詳細を以下に説明する。

#### 1) Be-Cu 製小型真空容器開発

Be-Cu 材料の磁性薄膜成長用ミニマルチャンバへの適用を実現した。図4は今回開発した Be-Cu 製小型真空容器の写真である。到達真空度は  $4.6 \times 10^{-6}$  Pa、冷却による温度均一性は  $\pm 1^\circ\text{C}$  以下を達成しており、プロセスに対して安定な真空環境を提供できることを実証した。

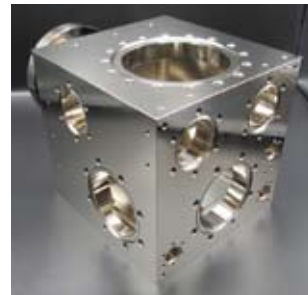


図4 開発した Be-Cu 製真空容器

一般に真空容器にはステンレス (SUS) が使用される。SUS は表面が緻密な酸化クロム層で覆われているため安定で、ガス放出も比較的少なく、加工性や溶接性に優れている。しかし低熱伝導率で高輻射率という特性を有する材料であり、真空容器の中に熱源があるプロセスでは、容器内面温度が上昇しやすく容器表面からガスが放出され、真空品質が低下する課題がある。このような状況をなくすため高熱伝導率で低輻射率という特性を有する Be-Cu の開発が(有)真空実験室を中心に進められ、安定した真空環境に加え SUS 対比で脱ガス 1/10 が実証されてきた。東京電子は Be-Cu 材料(真空実験室から Be-Cu 特許ライセンス中)を用いた超高真空対応の真空部品事業を推進してきた<sup>3)</sup>。

メガファブで使用される大型装置に比べミニマル装置では真空容器のサイズが小さくなり、必然的に真空容器表面状態がプロセスを行うウエハに影響を与える(試算では約 30 倍)。安定した成膜・界面制御を行うため真空容器として SUS 対比で性能の優れる Be-Cu を初めて真空容器として設計・

作製を行った。なお SUS に対し Be-Cu は高コストとなるが小型容器であれば材料コストとランニングコストとの関係から採算性は確保できる。

## 2) ミニマル装置への機能統合

Be-Cu ミニマルチャンバに付帯する膜厚制御、界面制御、絶縁膜成膜を可能とするソフトウェアの開発を行ない、すべての機能がミニマル規格に収まる装置が完成した。各コンポーネントを搭載した TMR センサ積層構造作製用ミニマル MBE 装置の外観写真を図 5 に示す。3 年目より機能検証を行い、実際の成膜検証へ移行した。成膜検証では成膜時でも独自に開発した機能が有効に働いていることを確認した。



図 5 開発したミニマル装置

### 2-1) 高断熱小型蒸着源

Fe を成膜する場合の蒸着源の温度は 1300℃程度の非常に高温となる。蒸着源からの放射により成膜プロセスに大きな影響を与えることが予想された。このため高断熱な独自構造を有する蒸着源を開発した。断熱構造付加により蒸着源周囲温度は 340℃低下することを確認した。

### 2-2) ノズルによる酸素供給と酸化シーケンス

大型装置では装置内にガスを導入する場合、装置内の圧力を均一にして大型ウエハの処理を行う。ミニマル装置ではウエハが小径であり、ノズルによりウエハへ局所的にガスを供給する機構を独自に開発した。一連の複雑な動作はソフト制御とし、毎回同じ処理が行えるようにした。

### 2-3) Be-Cu 製フラックスモニター

蒸着源から供給する材料量を計測するフラックスモニターは高温になるため、周囲に付着した材料が再蒸発する課題があった。この課題を克服するため高熱伝導 Be-Cu をこの部品に適用した。

## 4. ミニマル基盤プロセス確立

開発したミニマル装置で東北大学から提供された下地基板上に Fe(10nm)/MgO(2nm)/Fe(30nm) の構造の成長を進めた。1 回目より従来のスパッ

タ対比良好な表面平滑性が得られ、さらに磁気特性、良好な結晶性が確認された。図 6 は積層膜の断面 2 次電子顕微鏡写真と透過電子顕微鏡写真である。とくに透過電子顕微鏡写真 (図 6 右) からは今回開発した超小型のミニマル装置でも原子層レベルでの結晶成長が可能であり、さらに従来使用されてきたスパッタ法と比較して良好な Fe/MgO 界面が得られたことが確認できる。ただ当初目論んだ膜厚とは異なったり、表面に Fe の酸化物が生成しているという課題も明確となった。2 回目以降ではこれらの課題に対応した試料を作製し東北大学でデバイスプロセスを行い、事業目標である TMR センサ動作と TMR 比 100% を実現できる絶縁層の特性を得ることに成功した。

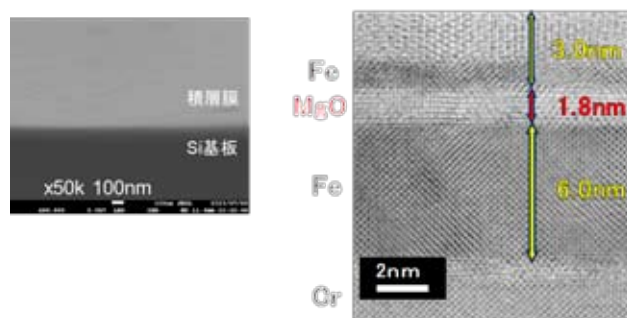


図 6 ミニマル装置で成膜した積層構造の評価  
左) 2 次電子顕微鏡 右) 透過電子顕微鏡

## 5. まとめ

Be-Cu 材料の新規展開のため TMR センサ積層用ミニマル装置の開発を行い、原子層レベルでの薄膜成長と界面制御が可能であることを実証した。現在製品化に向け改善を進めており、インフラ向 TMR センサの多品種少量生産に寄与する。事業終了後 1~2 年目は大学、研究機関、ミニマル装置販売企業に販売し、装置評価と製造実績をつくる。その後、ミニマルファブを活用している企業への販売を推進し、事業化を進める。

### 謝辞

本事業を推進するにあたり共同研究機関の三重大学教授中村孝夫先生、東北大学教授 大兼兼彦先生、事業管理頂いた JRCM 各位に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) <https://spin.apph.tohoku.ac.jp/>
- 2) <https://www.minimalfab.com/>
- 3) <https://www.toel.co.jp/>

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第 447 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 2024 年 6 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  
URL <http://www.jrcm.or.jp/> E-mail [jrcm@oak.ocn.ne.jp](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)  
※送付先の変更・中止等は上記 E-mail に御連絡をお願いいたします。