

随 想

鉄冶金学からエレクトロニクス材料
の研究まで

後藤 和 弘*

はじめに

日本鉄鋼協会は大正4年2月6日に創立し、本年は創立70周年をむかえいろいろな記念事業が行われている。記念行事の中で感銘深かつたものに「日本鉄鋼協会物故会員追悼会」があつた。

詳細は「鉄と鋼」第71巻第7号にあるが、この追悼会は本会創立と同じ日の2月6日に行われた。参会者全員が物故歴代会長の遺影の前に、故人の遺徳を偲びつつ花を献ずることからはじまつた。木下専務の司会で石原会長の本会の歴史と回顧の話のあと、飯田賢一氏による講話があつた。講話は初代会長、野呂景義氏に関するもので、同氏の世に知られていない数々の業績を文献学的に、そして実証的に紹介したものであつた。静かに淡々と話を進める飯田氏独特の雰囲気、追悼会参会者に深い感動を与えた。

日本鉄鋼協会の70年の歴史の中には関東大震災による事務所の焼失や第2次大戦による鉄鋼業の壊滅、戦後の復興、そして世界第一のレベルに達する高度成長などなど波乱万丈、大きな変革と困難な問題が山積していた。

どんな困難な時代でも本会会員の将来に対するゆるぎの無い明るい希望と信念によつて、本会が支えられてきたことに思いをめぐらせるとき、後輩の我々も心をひきしめて本会の発展に努力すべきと思う。

一方、最近の我が国の産業界をみると、新産業革命とも称される新しい変革が起きつつある。このような新しい変動と混乱状態に対して、日本鉄鋼協会は適切に対応しつつある。例えば春秋の講演大会に先端技術の部門として萌芽技術、中間領域の部門を創設したり、新素材評価委員会を発足したり、研究委員会では先端センサー技術や新しい加工法の調査を実施しつつある。

このように日本鉄鋼協会がその活動の中に鉄鋼以外の他分野の技術を取り上げることは歴史の必然であろうか？

創立70周年記念の物故会員追悼会に出席し、本会の先輩達の努力と遺徳に思いをめぐらしつつ、本会の将来の歴史を想像するとき、本会は現在ひとつの節目を迎えつつあるようにも感ぜられる。

日本鉄鋼協会の活動の技術分野の範囲が広がりつつあるので、エレクトロニクス材料に関する技術もいずれその中に含まれるかも知れない。以下に何故エレクトロニ

クス材料を重要視せねばならないか感想をいささか記してみることとした。

何故エレクトロニクス材料をとり上げた方が良いか？

「先端技術とは21世紀の日本の運命を決める戦略産業である」とよくいわれる。しかしこの表現を正しく言い直せば、「先端技術は従来の基幹工業の技術とあいたづさえて次世紀の日本の運命を決する」と言うべきであり現在の製造技術が不要になるということではない。

それにしても世の中に先端技術に関する本が数多く出版されている。(例えば末尾文献(1)~(5))これらの本をまとめて、「先端技術」と称されるものを表にすると表1のようになる¹⁸⁾。この表をよくみると次のようなことがわかる。

- (1) 表1の七つの分類に直接対応する学協会は無く、それぞれ三つ、四つの学協会が少しずつ関連する。
- (2) 従来の基幹工業の鉄鋼、金属工業、造船、重工業、セメント工業、石油精製、自動車、重電気などは含まれていない。
- (3) 表1の七つの分野はそれぞれ独立に発達するのではなく相互に依存しながら発達する。そのためこれからの技術者には広い専門性が要求される。
- (4) 表1の七つの分野の第2項以下はすべて第1の新しい材料の開発に依存している。

先端技術で要求される材料は、小型で特殊な機能性を要求される。また構造材料の場合でも従来にないような性質を要求されるので新素材の開発が必要になつてくる。

機能材料や新素材に関する本も多く出ているが^{6)~13)}それらを参考にして新しい材料をまとめて表にしたもの

表1 先端技術一覧表 (文献18))

大分類	具体的实例
材 料 工 学	新金属、ニューセラミックス、有機材料とそれらの複合材料、アモルファス合金、形状記憶合金、超電導材料、新半導体合金、セラミックエンジン、機能性高分子
エレクトロニクス	OA用・FA用新コンピューター、画像処理パターン認識、光通信、光コンピューター、ビデオディスク、薄型テレビ、新型ファクシミリ、レーザー計測、レーザー加工
センサー技術	物理センサー(光センサーとしてのアモルファスSi、Seやホトダイオード、圧力センサー、磁気センサー)、化学センサー(ガスセンサーとしての酸素センサー、湿度センサー、イオンセンサー、バイオセンサー)
エネルギー	各新型原子炉、ウラン濃縮、再処理、核融合、MHD発電、地熱発電、太陽光発電、燃料電池、水素エネルギー、石炭処理、海洋エネルギー、バイオマス
ライフサイエンス	遺伝子工学、細胞融合、バイオリアクター、インターフェロン、レーザー医療、人工臓器、人工血液、ソフト農業、新加工食品
産業用ロボットとFA	Factory Automationとロボット(自動溶接、ロボットによる電子部品組付、テレビ回路基板組立、ロボット搬送システム、部品のマシニングと自動車組立、汎用板金加工)
その他	宇宙産業(スペースシャトル、スペースコロニー、次世代ロケット)と新海洋産業(海中通信、マンガンド環境、海水ウラン回収、海洋微生物など)

* 東京工業大学工学部 工博 Ph. D.

が表 2 である¹⁸⁾。

この表の上の方の 4 分類は広義のエレクトロニクス材料と考えることができる。

このエレクトロニクス材料をもう少し詳しく表にした

表 2 機能材料・新素材の一覧表 (文献18)

大分類	具 体 例
エレクトロニクス材料	合金半導体, 化合物半導体, ジョゼフソン素子, 超電導材料, コンデンサー用セラミックス, 圧電素子, 有機金属材料, IC 基板材料, 3 次元回路素子
磁性材料	新磁性合金, アモルファス磁性材料, ソフトフェライト, 磁気ヘッド材料, 磁性流体, 珪素鋼板, ボンド磁石, 磁気記録材料, 磁気バブルメモリ材料
光エレクトロニクス材料	発光ダイオード, レーザーダイオード, エレクトロクロミック材料, 液晶, 光ファイバー材料, レーザー発振材料, 光変調素子, 受光素子, 光導電材料, 螢光体材料
センサー材料	薄膜磁気センサー材, アモルファス合金, ホール素子, PTC, サーマフェライト, 圧電素子用半導体, ホトトランジスター, ガスセンサー用半導体と固体電解質, イオンセンサー材, バイオセンサー材
エネルギー関連材料	太陽電池用アモルファス金属, 燃料電池材, 水素貯蔵合金, 原子炉, 核融合炉用材料, ウラン分離材料, ガスタービン用超耐熱合金, 超電導エネルギー貯蔵材, 耐火合金
機械関連材料	形状記憶合金, 超塑性材料, 新弾性材料, 新耐食材料, 極低温材料, 超耐熱性ファイバー, 超硬工具材料, 軸受合金
プラスチック材料	プラスチック光ファイバー, 吸水分離膜, ポリカーボネート樹脂, 光・熱硬化性樹脂, フォトレジスト, ウラン回収樹脂, スーパー繊維, 合成紙, 有機超電導材料
セラミック材料	エンジン部品用セラミックス, タービンブレード用セラミックス, 透明圧電セラミックス, アルミナ・ジルコニア・マグネシア等のニューセラミックス, ガスセンサー用セラミックス, 切削加工ガラス
新金属材料	アモルファス合金, 形状記憶合金, 超強力材, 一方凝固合金, 表面合金, 繊維強化合金, 磁性流体としての超微粉, 超塑性合金, 超微粒子, 半導体合金
生体材料 (ライフサイエンス)	人工血管, コラーゲン薄膜, 可食性フィルム, 人工赤血球, 人体用合金材料, 歯用材料, 人工臓器, その接合材, X 線や γ 線の検出材料, 磁気誘導抗癌剤

ものが表 3 である¹⁹⁾。表 3 には種々の材料の具体的な例とそれらをつくる製造方法も示してある。

さて本題にもどつて「何故エレクトロニクス材料をとり上げた方が良いか?」という問について考えてみよう。

鉄鋼技術の本質は鋼という素材の化学成分を精密に調整し, 更にそのミクロな結晶構造の分布を厳密に制御し種々の過酷な使用条件でも長年月使用できるような広義の機能材料をつくる技術である。

この技術を新しい機能材料・新素材の製造に応用できないはずはない。

一方先端技術の一番重要で, かつ中心的な分野は何と言つてもエレクトロニクスである。したがつてエレクトロニクスに関連した材料の研究や開発にたずさわっていると, おのずから先端技術の中心的情報が集まってくることになる。これは新しい金属材料の開発にも役立つと考えられる。

もうひとつ重要なことは鉄鋼会社の若き技術者が先端技術の中心に近い材料の研究開発に従事していることによる志気の向上である。

学生を送り出している立場から言えば, 技術者の志気の高い会社に学生を送り込みたい。このように記すると「従来の製鉄, 製鋼の技術はもうこれ以上進歩しなくて良いのか?」と言われそうであるが, もちろん答は「否」である。基幹部門の技術も同じ会社の中の先端分野の進歩と共にますます発展するようにしなければいけない。

もうひとつのことは現在の産業界の変革を見聞するとそれはひとつの工業思想の変革のようでもある。従来のようにそれぞれの会社が長年月同種の工業製品を品質良

表 3 エレクトロニクス材料の一覧表 (文献19)

材 料	具 体 例	製 造 方 法
IC, MOS-IC LSI 用 材 料	Mo/SiO ₂ /Si, GaAs, シリサイド 基板材料: Al ₂ O ₃ , SiC	PVD, CVD, Ion Implantation
磁 性 材 料	Fe ₈₁ B _{13.5} Si _{3.5} C ₈ , (Fe ₇ Co ₂ Ni) ₉₀ Zr ₁₀ , Tb ₂₅ Fe ₇₅ etc. BaFe ₁₂ O ₁₉ , Mn-Zn フェライト, Mn-Mg フェライト etc.	Single-roll, Twin-roll etc. 析出法
オプトエレクトロニクス材料	光ファイバー: SiO ₂ , 光ダイオード: アモルファス Si, etc. 発光素子: GaAs etc., 光スイッチ: LiNbO ₃ , PLZT etc.	CVD, PVD, MOCVD
セ ン サ ー 材 料	光センサー: CdS etc. 磁気センサー: InSb etc. 温度センサー: BaTiO ₃ , NiO etc. ガスセンサー: CaO-stabilized ZrO ₂ , SnO ₂ , ZnO etc. ZnO etc. 湿度センサー: Li-doped ZnO	プラズマ溶射, 焼結, 蒸着
レ ー ザ ー 材 料	半導体レーザー: Al _x Ga _{1-x} As/GaAs 固体レーザー: Al ₂ O ₃ (Cr ³⁺), YAG(Nd ³⁺) etc.	LPE (Liquid phase epitaxy) MOCVD, MBE
超 電 導 材 料	ジョゼフソン素子: 鉛合金 (Pb, In, Au) NbTi, Nb ₃ Sn, V ₃ Ca	
コ ン デ ン サ タ レ ジ ス タ バ リ ス タ	BaTiO ₃ , Ni-Cr, C, SnO ₂ , ZnO	ホットプレス焼結 グリーンシート焼結
そ の 他 の 配 線 点 材 料	Au, Al, Ni 合金, Ta, W, Mo Pt, Ru, Ph, Pd, Os, Ir, Ag	

く生産するのが「善だ」という思想から先端関連のものなら何でも作るのが「善だ」という思想、あるいは均一性能のものを大量生産するのが利益拡大になるという思想から多品種少量生産が利益拡大になるというように「考え方」が変わりつつある。

鉄冶金学からエレクトロニクス材料の物理化学的研究まで

鉄冶金学をやめてしまうのではなくその研究を更に高度化しつつ一方では、熱力学や原子やイオンの拡散、固体間反応の速度論などの高度な物理化学的研究の手法を、表3に示したようなエレクトロニクス材料の研究に応用するのはどんなものであろうか？ すなわちこれらの材料の製造や高純度化の物理化学的研究、薄膜デバイス製造の研究、薄膜デバイスの加熱処理中の固体間反応や不純物拡散の研究、デバイス材料の非化学量論的欠陥の研究、そしてでき上がったデバイスの使用中の化学反応による劣化現象の研究などを行うことである。このような研究は鉄冶金学のエレクトロニクス材料の研究への応用である。

もう少し具体的に説明するため、表3に示したような幅広いエレクトロニクス材料の中心をなす IC や LSI をとり上げて上記のことをもう少し具体的に説明する。

図1は MOS 型電界効果トランジスタの断面図である。上から Metal, Oxide (SiO₂), Semiconductor (Si) と層状に重なっているののでその頭文字をとって MOS トランジスタと呼ばれる。

この MOS トランジスタは 1960 年 Kahng and Atalla によりはじめて発表され 1963 年に製造がはじまったといわれている¹⁴⁾。

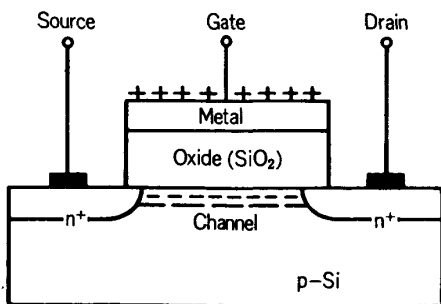


図1 Metal-Oxide-Semiconductor トランジスタの断面構造図¹⁵⁾¹⁶⁾

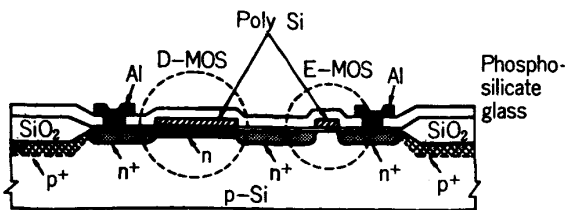


図2 MOS トランジスタが2個ついている集積回路の断面図¹⁵⁾¹⁶⁾

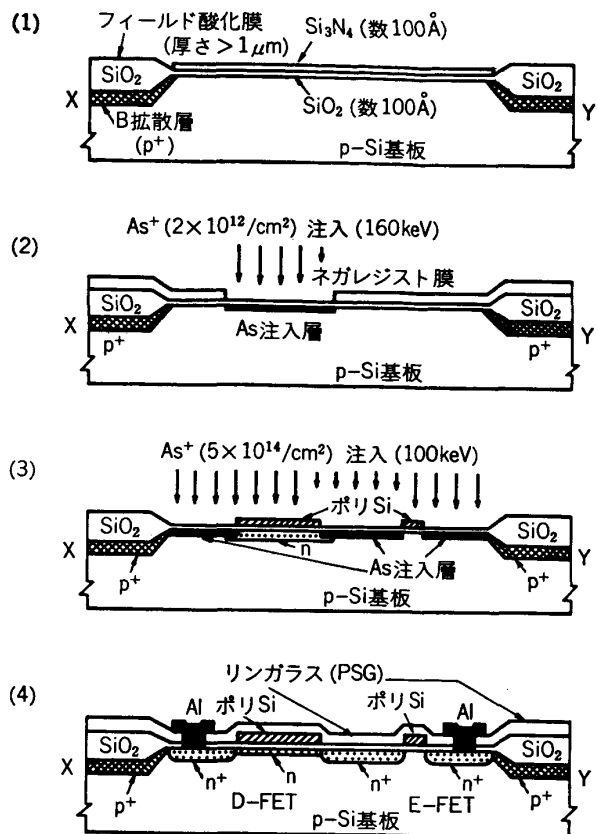
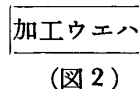
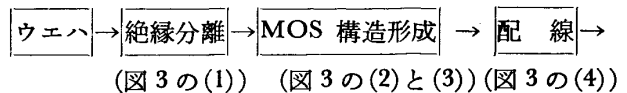


図3 図2のインバーターの加工プロセス中の断面説明図(図2X-Y断面), (1)絶縁分離(アイソレーション), (2)チャネルの形成, (3)ゲート電極と内部導体(n+層)の形成, (4)電極間配線(この断面図ではポリSiとn+層とのAl配線は示されていない). 伊藤・伊藤¹⁵⁾より抜粋, 加筆

図2は MOS-FET を二つ組み合わせた E/D インバーターの断面図である。丸い点線で囲んである二つがトランジスタで、あとの部分は配線や絶縁部分である。厚さは非常に薄い幅は図2の部分で数十マイクロンである。

この集積回路の製造方法はいろいろの本に書いてあるが^{15)~17)}、それらを参考にしてその概略を示す。

MOS トランジスタの加工プロセスは図3に示したように次のようになる。



絶縁分離とは、同一基板上につくられた素子間の導通を防ぐため、素子と素子の中間に絶縁層を形成する処置のことを言い次のようなプロセスでつくる。

①ウエハを乾燥 O₂ ガス中で 1000°C, 60 min 酸化

表 4 高密度集積回路化にともなう製造技術・材料の進歩の例 (文献19))

項 目	目 的	技術・材料の進歩
パターンニング技術	微細化 サイドエッチング防止	光露光→電子ビーム露光, X線露光 湿式化学エッチング→ドライエッチング (反応性スパッタリング)
不純物制御技術	濃度・分布の精密制御 損傷回復	拡散法→イオン注入法 電気炉加熱→瞬間アニール (フラッシュ光, レーザー)
膜形成技術	再拡散防止 ステップカバレッジ改善	CVD 法→プラズマ CVD 法 (低温加工)
電極・配線材料	低抵抗化	多結晶 Si→金属シリサイド, 高融点金属 (Mo, W)

し、表面に数百Åの厚さの SiO₂ 層をつくる。その上に更に CVD 法で厚さ数百Åの Si₃N₄ 膜をつくる。

②Si₃N₄ 膜上にレジスト (resist) を塗布する。このレジストの上にマスクを用いて絶縁パターンを露光し、光の当たらなかつた絶縁分離部のレジストを溶媒で除去する。レジスト除去部に露出した Si₃N₄ 膜とその下の SiO₂ 膜をエッチングして下地の Si 基板を露出させる。

③レジストを除去し表面に真空中で加速したほう素イオン (B⁺) を 10¹⁴/cm² 程度イオン注入する。この後、湿酸素中 1000°C, 60 min 酸化処理をすると、Si₃N₄ 膜部分は酸化は進まず、Si 露出部のみ 1 ミクロン以上の厚さの酸化膜 (フィールド酸化膜) と B の拡散層が形成される。ここまでの加工が終了した状態が図 3 の (1) である。

④Si₃N₄ 膜とその下の SiO₂ 膜をエッチングにより除去し、素子形成部に Si 基板を露出させて絶縁分離が完了する。

絶縁分離につづいて MOS 構造形成と配線があるが詳細は省略する。表 4 に示すように¹⁹⁾ IC の製造は高温酸化、レジスト塗布とマスクング、CVD, イオン注入、エッチング等の精密工程を組み合わせた知識集約型産業である。全工程は 27 工程よりなるがこのうち 1000°C 近傍の高温処理 5 回、900°C~400°C における工程 5 回が含まれる。

高温処理プロセス中には不純物元素の再拡散や接合面における固体間反応が考えられる。

例えば高速演算の必要性から信号伝搬速度の向上が要求され、ゲート電極として従来用いられてきた Poly Si (比抵抗 $\rho=1\sim 10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$) にとつて代わつてより抵抗の小さい金属シリサイド (MoSi₂, WSi₂, $\rho=10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$) や高融点金属 (Mo, W, Ta など, $\rho=10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$) などの使用が考えられている。しかしこれらの Mo, W, Ta などは SiO₂ 層と 1000°C では反応しないのであろうか? このような固体間反応速度を研究することは鉄冶金学の研究方法からさして困難ではないかもしれない。

以下にいくつかの研究課題を記してみる。

①各種 CVD 反応の熱力学的研究

②CVD や PVD あるいはプラズマ CVD などの薄膜生成のマイクロメカニズムの解明

③MOS-IC 熱処理中の固体間反応の速度論的研究

④Si ウエハの酸化速度とその微細構造の解明

⑤SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃ 中の H₂O, B, P, As, K, Na などの溶解度と拡散係数の測定

⑥Si 半導体中の不純物拡散の研究

⑦蒸着金属と SiO₂ の接合構造

⑧電極材料と Si の接合面のエレクトロマイグレーション

⑨Si, Al₂O₃ 基板や SiO₂ 膜などの熱伝導度の測定

以上のような研究は鉄冶金学の研究の手法を少し改良すれば実行可能なように考えられる。

筆者は最近研究の対象を二つに分け、一方は鉄冶金学、もう一方は上記のようなエレクトロニクス材料の物理化学的研究にした。

また、この方面の研究の情報交換がスムーズなることを祈念しつつ、「エレクトロニクス材料物理化学研究会」をつくつた。このささやかな勉強会は会員約 90 名で、鉄鋼 8 社と各大学、そして、日立、東芝、日本電気、松下電器などの電気系各社、日鉱、住友鉱山、三菱金属などの非鉄系の会社、旭硝子、東京窯業などのセラミックの会社などいろいろな会社の方々で会員として入会している。

年 2 回研究会をしているが、例えば第 2 回 (1985 年 11 月 6 日) には「鉄鋼会社がとり上げるべきエレクトロニクス材料」と題して神戸製鋼の技師長、成田貴一氏による特別講演などを含めて研究発表会を行つた。

おわりに

鉄冶金学は的場幸雄先生に学び、後に松下幸雄先生に新しい鉄冶金学を学んだ。お二人の先生方は後に日本鉄鋼協会の会長にもなられた。このように偉い先生から鉄冶金学を学んだことを筆者はひそかな誇りとしている。またその後日本の鉄鋼会社のいろいろな方々から御指導や御支援をうけ、そのお陰でなんとか今まで研究を続けることができた。

古い学問は大切にしつつ、一方では最近の産業界の変革に大学の方も正しい対応をしなければならぬ。しかしそれはなかなか困難なことで、大学にはそれぞれ種々の歴史的事情や立地条件、そして学生の就職の方面などいろいろな制約もある。しかしわれわれとしてはそれな

りに新しい局面に対処しているつもりである。

このような新しい分野への進出や変革について、今はこの世にない先輩の物故会員はどのように見ておられるであろうか？ どんな御意見であろうか？

この記事の初めに書いた「物故会員追悼会」は先輩のお声を聞く会でもあつたのかもしれない。

我が国の鉄鋼各社がその基幹である鉄鋼業それ自身と、同じ会社の中の先端部門の両方が相たづさえてよりいつそう繁栄しつつあるのを見るにつけ大学にいるわれわれもいつそう努力しなければならないと感ずる近頃である。

文 献

- 1) 先端技術 100 の常識 (1982) (日本経済新聞社編)
- 2) 研究テーマ総鑑—先端技術編 (1984) (矢野経済研究所編)
- 3) 「先端技術」別刷サイエンス (1983) (日経サイエンス編)
- 4) 日本の最新技術シリーズ (1983) (日刊工業新聞社編)
- 5) 新・産業革命 (1983) (日経産業新聞編)
- 6) 伊藤昭夫: VMC ジャーナル, Vol. 1, No. 1 (1981), p. 14 (日本真空(株)技術誌) 原典は機械産業の施策に関する調査研究: 4 機能材料, 産

業材料調査研究所 (昭和 54 年 3 月)

- 7) 本間基文, 北田正弘編: 機能材料入門上下巻, (1981) [アグネ]
- 8) 北田正弘: 機能材料辞典 (1984) [共立出版]
- 9) 田中良平編: 極限に挑む金属材料 (1979) [工業調査会]
- 10) 田中良平, 他共編: 未来をひらく新素材 (1983) [森北出版]
- 11) 新素材事典 (1983) [日本経済新聞社]
- 12) 「新素材百科」, 日本の最新技術シリーズ (14) (1983) [日刊工業新聞社編]
- 13) K. S. Goto: "Progress of Chemical Sensors with Solid Electrolytes at High Temperature", Proc. International Meeting on Chemical Sensors (1983), p. 338 [講談社]
- 14) 徳山 巖: MOS デバイス (1973) p. 9 [工業調査会]
- 15) 伊藤糾次, 伊藤容吉: 集積回路基礎技術 (1983) [昭晃堂]
- 16) 右高正俊: LSI プロセス工学 (1982) [オーム社]
- 17) 田内省二, 菅原治郎: 日本金属学会会報, 19 (1980), p. 17
- 18) 後藤和弘: 日本金属学会会報, 23 (1984), p. 662
- 19) 後藤和弘, 小林陸弘, 永田和宏: 金属 (1985) 6, p. 49