

展望

最近の製品開発における材料開発者の仕事

丸山正明 日経BP社NBP企画 第一制作室長
Masaaki Maruyama

Material Science Engineers Work in Recent Product Development

1 既成枠を覆す新材料の威力

1.1 製品の新機能付与や性能向上に効果

製品開発競争が激しい製品分野では、新材料を採用する確率が大幅に高まる。新機能を付加したり大幅に性能を高めるために、ふつうは機構の改良・工夫などの設計面でまず対処することを試みるが、解決できない場合には、新材料に頼るケースが増えるからだ。

その代表例は、ノート型パソコンの主要機構・部品。最近登場したパソコン向けのOS（基本ソフト）やアプリケーションソフト（業務ソフト）は、記録容量が数10MBあるものが珍しくなくなっている。この結果、今年発売されたノート型に組み込まれたHDD（ハードディスク駆動装置）は、記録容量が1GB前後と大容量になっている。そのHDDに用いられるHD（ハードディスク）は大部分がガラス基板製に切り替えられている。

1.2 ノート型の性能向上を支える新材料

小型・軽量化を徹底追究した製品開発が続いているノート型は、内蔵するHDDのHDが直径2.5インチ（約64mm）と、デスクトップ型に用いられている3.5インチ（約90mm）より小さい。このため、一層高い記録密度が求められ、HDには従来のアルミニウム合金（AlMg系）製から、表面硬さが500数十～700HVと20～30%程度高いガラス製に切り換えられた¹⁾。95年以降に、発売されたノート型に採用されている2.5インチHDは、ほとんどがガラス製とみて間違いない。

このガラス材料には、アルミノシリケート系とソーダライム系の化学強化型と、リチウムシリケート系の結晶化型の3種類が用いられている。化学強化型はガラス相を構成するアルカリ金属原子を、イオン半径の大きい原子に置換する処理でガラス表面に残留圧縮応力層を設けて破壊強さを改善したもの。結晶化型は熱処理によってシリカ（SiO₂）結晶を析出させて破壊強さを改善したもの。ガラス製基板は、HOYAや日本板硝子、旭硝子、オハラなどが製造・供給している。

ガラス製は、アルミ合金製に比べて価格が10～20%程度高いため、90年代初めにガラスメーカーが熱心に売り込んでも採用が見送られてきた。ノート型向けのHDDが記録容量を大幅に高める必要性に迫られた途端、高価なガラス製に一気に切り替わり始めた。新材料の性能に頼らざるをえない状況が、高コストを跳ね返したのである。

ガラスからの代替を狙う別の新材料が早くも登場した。HDの高密度化ニーズに答えるために、非晶質カーボン製が登場した。フェノール樹脂などを1000～2000℃の高温で焼成し、非晶質カーボンをつくる。この次世代HD基板は、ユニチカや日清紡、花王、鐘紡などが精力的に開発を進めている。米国のパソコンメーカーがこの非晶質カーボン製法を採用すると発言している。

このほか、次世代のHDD向けには、材料開発に支えられた要素技術が目白押し。これから採用が増えると予想される、話題の高性能磁気ヘッドのMR（磁気抵抗）ヘッドには、ヘッドとHDが万一接触してもクラッシュしないように、MRヘッドの表面にDLC（ダイヤモンド・ライク・カーボン）保護層が設けられている。ダイヤモンド結晶構造を一部含んだDLCなどの高硬度・耐摩耗性に優れた新材料の出番が高まっている。

MRヘッドの次を狙って開発されているGMR（巨大磁気抵抗）ヘッドの素子材料として、磁性層と非磁性層を積層した材料候補が提案されている。GMRヘッドの開発の中身は、現在のところ材料開発と表裏一体といえる。

1.3 製品開発の激化に伴い材料代替が盛んに

ノート型パソコンの開発競争が激しくなった背景は、パソコン市場は拡大しているものの、事業の収益性は悪化しているためである。

市場の大部分を占める米IBMのAT-PC互換機すなわちDOS/V機の新製品ラッシュが続く中で、各パソコンメーカーは、従来のデスクトップ型からノート型に開発の力点を移し始めている。この理由は、各社のデスクトップ機のパフォーマンス

仕様に大きな違いが無くなった結果、価格競争に陥って事業収益が落ち込んでいるからである。95年に、わが国ではパソコンが500万台も売れ、大きな市場を築いた。そして95年11月にWINDOWS対応パソコン向けの新しいOSである「WINDOWS 95」の日本語版が発売されたことが、パソコンの製品開発を加速させた。

わが国のパソコン市場でシェア第一位を保ってきたNECの通称98機と、DOS/V機の見た目上の使い勝手の差が無くなった。特にデスクトップ型は、NEC製とDOS/V機メーカー製の性能・仕様の差がほとんど無くなった。売れ筋のビジネス用途向けの中級機のデスクトップ型は、各社とも実売価格が20万～30万円台で、似たような仕様・性能を持つようになり価格競争に陥った。

収益が悪化したデスクトップ型に代わって、パソコンメーカーはノート型の開発に力を入れている。オフィスで使うデスクトップ機に対して、自宅向けに場所を取らないノート型を買う傾向が高まり、また高価だが高性能デスクトップの機能に引けを取らない高機能ノート型の登場で会社のオフィスにもノート型が浸透し始めている。日本ガートナーグループデータ・クエスト社によると、世界市場では、96年にはノート型の販売台数が約40%と大きく伸びると予測されている²⁾。

96年に入って、ノート型は機能分化が鮮明になった。一つは、CD-ROM（コンパクトディスクを用いた読み出し専用メモリー）駆動装置まで搭載したデスクトップ型の機能に引けを取らない高機能タイプ（マルチメディアタイプとも呼ぶ）、二つ目は、持ち運びを前提にした小型のサブノートタイプ（図1）、三つ目は通信機能に用途を絞った超小型タイプの3種類である。

高機能タイプは、A4判よりやや大きいサイズで重さが3kg以上あり、持ち運びには向かず、実売価格が40万円以上と高

価である（最近、高機能タイプはフルスペックの高機能版と機能をやや絞って低価格化した普及版に分かれ始めている）。一方、サブノートタイプはB5判サイズに近い大きさで持ち運びできるように、1kg台か2kg弱に抑えてある。FDD（フロッピーディスク駆動装置）などを外付けにし、その分小型軽量化している。超小型タイプは1kg以下でパソコン通信機能を中心とした仕様で実売価格は10万円台である。

この分類が示すように、ノート型では重さが重要な指標になっている。軽量化のため数年前に、ノート型のハウジング（筐体）の材料選択が激しく揺れ動いていた。プラスチック系複合材料や非強化熱可塑性プラスチック、マグネシウム合金などから、ノート型の開発の度に採用される材料が選ばれていた。ノート型の開発が激しくなり、軽量・薄肉化と耐久性、耐熱性、コストなどを同時に満たす材料選択に毎回迫られていたのである。

プラスチック系複合材料には、炭素繊維強化熱可塑性プラスチックと炭素繊維強化熱硬化性プラスチックの2種類があり、さらに炭素繊維強化熱可塑性プラスチックは炭素繊維の含有量の多寡（たか）で2種類に分かれる。炭素繊維含有量が多いものは導電性を示し、電磁遮蔽（しゃへい）機能を持つようになる。

非強化熱可塑性プラスチックとしては、ABS（アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン）やPC（ポリカーボネート）／ABSアロイなどが用いられている。マグネシウム合金としてはAZ91Dのダイカスト合金である。

96年に入って、ノート型の機能分化が進んだ結果、ハウジング向け材料のある程度のすみ分けが始まっている。高機能タイプ高機能版のノート型には、炭素繊維含有量が多い熱可塑性プラスチックやマグネシウム合金が主に用いられている。高機能タイプ普及版やサブノートタイプは、炭素繊維含有量が少ない熱可塑性プラスチックや炭素繊維強化熱硬化性プラスチック、非強化熱可塑性プラスチックが主に用いられ始めている³⁾。

1.4 超電導フィーバーが示した新材料の威力

新材料が持つ威力は、それまでの材料開発の限界を乗り越え、材料選択の常識を変え、先行企業の優位性を覆す点にある。86年12月に登場した酸化物超電導材料による超電導フィーバーは、新材料出現の衝撃を実感させた出来事だった。

IBM社のチューリッヒ研究所（スイス）が、ランタン・バリウム・銅・酸素系（La・Ba・Cu・O）化合物（臨界温度 $T_c=30K$ ）が超電導を示すことを見出してから、たちまち酸化物超電導材料を探す研究が盛んになり、この結果、87年2月にはイットリウム（Y）系酸化物（ $T_c=90K$ ）が、88年初めにはビスマス（Bi）系（ $T_c=120K$ ）とタリウム（Tl）系酸化



図1 サブノート型パソコン。ハウジングに炭素繊維強化熱可塑性プラスチックを用いているなどの効果で、重さが1.3kgと軽い

物 ($T_c = 120\text{K}$) と次々と新しい超電導材料が出現した。

86年までは実用超電導材料といえば、合金のニオブチタン (NbTi) や金属間化合物のニオブ3スズ (Nb₃Sn) を示し、線材などに加工され高磁場発生用コイルなどに利用されていた。酸化物超電導材料の出現で、それまで超電導材料に無縁だった多くの企業が研究開発を始め、酸化物超電導材料の実用化で主導権を握ろうとした。従来の金属系超電導材料の実用化に励んでいた企業・機関の技術蓄積の優位性が無くなったと判断した多くの企業は、これから何が出てくるか分からない大きな可能性のある酸化物超電導材料の研究開発に邁進 (まいしん) した。金属系超電導材料を手掛けてきた電線メーカーに加えて、鉄鋼・非鉄・化学の材料メーカーや電機・機械メーカーなどが多く参加した。

この際に興味深いことは、各企業・機関が持つ得意技術を決め手に開発指針を立てる傾向が強かった点である。例えば、ゾルゲル法や液中紡糸法、一方向結晶成長法などの得意とする独自技術を武器にした開発が、まさに百花りょう乱に進められた。この結果、材料科学の知見は急速に深まり、新材料の研究・開発の基盤を強化したことは間違いない。材料開発者にとっては、研究開発費がふんだんに使えた幸せな時代だった。

用途開発でも、従来の金属系超電導材料の延長線である高磁界を作製するコイルやその線材の開発も盛んになったが、酸化物系超電導材料ならではの磁気シールド容器や永久磁石、高速半導体デバイスなどの従来には考えられなかった用途も目標になった。従来は難しいと思われた T_c をあっさり超えたうえに、材料選択・用途に新天地を開いた点が新材料の威力である。

逆に、新材料の用途開発が難航すると、その新材料の開発から撤退することになる。超電導フィーバーから10年目が過ぎて、多くの企業は研究開発を中止し、現在残っているのは元々、金属系超電導材料の線材を手掛けていた電線メーカーと一部の大手電機メーカーなどに留まっている。新材料の開発に参入する際の開発戦略の立て方が、適切な撤退時期を決めることを教訓として残した。

1.5 何が出るか分からない新材料開発

材料開発の奥の深さを示した点では、永久磁石材料の変遷が興味深い。83年に磁力が強くて安価な永久磁石として、ネオジム・鉄・ホウ素 (NdFeB) 系が発見され、それまで高性能永久磁石の代名詞だったサマリウム・コバルト (SmCo) 系の材料開発では、銅 (Cu) やジルコニウム (Zr)、鉄 (Fe) の添加量を調整し、これを最適化して最大磁気エネルギー積をジリジリと高めていた。これに対して住友特殊金属は、希土類元素の精錬工程で廃棄物になっていたネオジム原料を用

い、最大磁気エネルギー積が数10%高いネオジム・鉄・ホウ素系 (現在は $360\text{kJ}/\text{m}^3$ とサマリウム・コバルト系の $240\text{kJ}/\text{m}^3$ の約1.4倍) を開発し、たちまち永久磁石市場は戦国時代に突入した。

住友特殊金属が開発したネオジム・鉄・ホウ素系永久磁石は焼結タイプであるが、ほぼ同時期に米国のGM (ゼネラルモーターズ) 社が同じネオジム・鉄・ホウ素系粉末を開発し、樹脂結合タイプ (ボンドタイプ) のネオジム・鉄・ホウ素系永久磁石を実用化した。材料開発で従来の限界が打ち破られて注目を集めると、いろいろな開発が同時多発的に進むことがあり、周辺技術も含めて技術蓄積が一気に進む。永久磁石のシェア上位の企業はシェア拡大の好機とみて、下位の企業は上位の優位性を覆す好機として、精力的に材料開発と用途開発を進めた。

83年以降、希土類系永久磁石の生産額は年率2桁 (けた) の成長を続けている。この中身は、サマリウム・コバルト系の生産額が横ばいであるのに対して、ネオジム・鉄・ホウ素系は急成長し、新規用途を開拓している。例えば、HDDの磁気ヘッドの駆動用ボイスコイル・モーターや医療機器のMRI (磁気共鳴画像診断装置) の磁場発生磁石などに用いられている。

さらに、91年に新しい樹脂結合タイプとして、高性能なサマリウム・鉄・窒素 (SmFeN) 系が見出された。旭化成工業や三菱マテリアルが研究開発を進めている。

一時期は、サマリウム・コバルト系が高性能永久磁石の代名詞であり、材料開発が成熟期に入り停滞ぎみとみられた時期もあった。何が飛び出すか分からないところに、新材料登場のこわさと面白さがある。

2 新素材革命の成果を検証

2.1 材料科学・材料開発は長足の進歩

80年代前半の新素材革命は、材料開発の技術を大幅に進歩させた。正確に言えば、新材料の基本型を実用段階まで進める技術である⁴⁾。その典型例は、構造用セラミックスとして期待されたエンジニアリング・セラミックスである⁵⁾。

その中心素材である窒化ケイ素は、70年代後半にはセラミックス粉末、焼結助剤、成形技術、焼結技術と材料開発に必要な要素技術がどれも未確立だった。当時は、焼結助剤を多く添加し加圧しながら焼結するホットプレス法で、単純な形状の小さな試験材を作製するのがやっとのレベルだった。粉末も研究用の標準粉末はドイツ製が多く用いられていた。

焼結助剤では、東芝の米屋勝利さん (現横浜国立大学教授) を中心とした研究グループが、アルミナ・イットリア ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$) 系を見だし、良好な工業用原料粉末の製造

法として、直接窒化法やシリカ還元法、イミド分解法が開発された。現在は直接窒化法とイミド分解法で作製された窒化ケイ素粉末が販売されている。現在では、窒化ケイ素の良好な工業用原料といえば、「日本製」と答えるほどの定評を勝ち取っている。

粉末と焼結助剤の技術開発が進んだ結果、ある程度複雑形状の焼結体を作製できる常圧焼結法の技術が確立されていった。1軸加圧で単純な形状の焼結体しか作製できないホットプレス法に比べて、普通の鉄系粉末冶金と同様に大気圧下で焼結できる常圧焼結法の実用化は、窒化ケイ素焼結体の適用範囲を広げるのに大きな役割を演じた。

ある程度の複雑形状が可能になると、より複雑な形状の部品に新材料の窒化ケイ素を適用したいとのニーズが高まった。窒化ケイ素焼結体は硬さが高いことが利点の一つである。このため、焼結後に部品形状を正確に与えようと後加工すると、砥石で砥石を削るような具合なので後加工コストがかなりかかり、最終的に部品コストが大幅に跳ね上がり、実用価格ではなくなってしまふ。

この問題を解決したのが、成形技術の進歩である。射出成形法とスリップキャスト法が確立された。小型部品にはプレス成形法も適用された。射出成形法では、窒化ケイ素粉末に焼結助剤を加え、さらに成形助剤と呼ばれる有機材料を混合したものが成形原料になる。成形助剤を30～40体積%と大量に混合するため流動性が高まり射出成形できるようになる。

この成形助剤は、窒化ケイ素粉末と焼結助剤粉末の間に入って糊（のり）として働いて成形後の形状を維持するのが役目だが、射出成形によってできた成形体（圧粉体）を焼結すると、今度は不要になる。成形助剤を含んだままの成形体を焼結すると、高温に加熱された有機材料が急速にガス化し、大きな気孔が多く入ったスカスカの多孔質体の焼結品ができ、もろくて使いものにならない。

焼結の前に役目の済んだ成形助剤を低温にゆっくり加熱して、有機材料を少しずつ気化させて除去する脱脂処理を施す。加熱の温度パターンや加圧雰囲気採用など製造ノウハウが蓄積され技術が確立されていった。

2.2 用途開発には周辺技術の確立が不可欠

窒化ケイ素の基本型を開発するのに必要な一連の要素技術が確立され、その応用の具体的な成果である新材料应用型の一つの頂点が、セラミックス・ターボチャージャーであった。正確には、高温の排ガスにあたるローターの羽根車を、従来のニッケル系耐熱合金製から窒化ケイ素製に切り替えた事例は、エンジニアリング・セラミックスが実用材料となった象徴の一つといえる。

85年に、窒化ケイ素焼結体製のローター羽根車を日本特殊

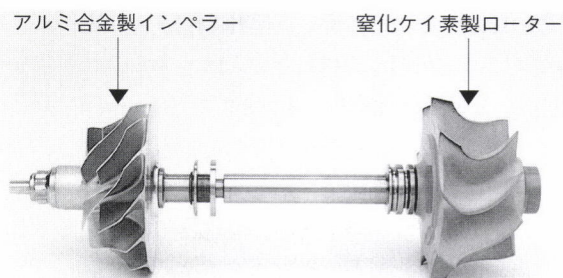


図2 窒化ケイ素製ローター羽根車を採用したターボチャージャー

陶業とやや遅れて日本ガイシの2社が日産自動車に供給した。同社はターボチャージャーに組み上げて一部の車種に採用した（図2）。

焼結体をつくる一連の要素技術が確立され、部品そのものは作製できるようになった。しかし、実際にターボチャージャーのローター羽根車に採用されるには、炭素鋼製の軸との接合技術をはじめとする周辺技術の確立が不可欠だった。実用化できるかどうかは、実は周辺技術が開発できるかどうかのカギを握っているケースが多い。新材料の応用型は、周辺技術まで含めた適用に必要な要素技術が整うかが成否を分けることが多い。

逆にいえば、新材料とは、周辺技術が未確立な材料を示し、実用化までにいくつもの技術開発のハードルを超えなくてはならない材料のことである。技術開発のハードルを超えることができて、開発コストがかかり過ぎては、新材料の事業化はできない。新素材ブームの時期に登場した新材料は基本型までたどり着いたものはある程度に達した。しかし、製品・部品の仕様を満たすような応用型の開発となると、各ニーズにきめ細かく対応しなければならず、開発時間がかかり過ぎて事業として成立しなかったケースが多い。

新素材ブーム時に同業他社が参入しているからと、あまり開発戦略を持たずに参入した材料メーカーは、90年ごろに事業の採算がとれないとみると、あっさり撤退する企業が多かった。新材料は、銅やアルミニウム合金、汎用プラスチックなどの汎用材料では対応できない用途に用いられる。元々、適用が難しい用途向けに適用されるため、超える必要にある技術開発のハードルが多くて開発コストが各用途ごとにかかるうえに、特殊な用途向けであるため、需要はあまり多くなく、開発コストの回収が難しい。この結果、事業としてなかなか成立しないのである。新材料の潜在需要量を見通した事業戦略を持つことが重要なことが、90年代前半に新素材ブームを反省した中から浮上してきた。

2.3 投資額に応じたスモールユニットで事業化

80年代に新材料の基本型が確立し、その後いろいろな新材料はそろって、多様な用途向けに応用型の開発が進み、周

辺技術を含めて技術蓄積が進んできている。もちろん、新材料の基本型のすべてが生き残る訳ではないが、90年代後半に入って製品仕様の高度化・差異化が進み、新材料に頼る余地は増えている。

新素材ブームの反動で安易に撤退した結果、新材料の応用型を生かす独自の周辺技術の育成にむやみに腰が引けている状況が続いている。新材料の事業化は、自社が持つ独自技術の優位性を生かす戦略に基づく長期計画で進めることしかない。特に、基本型と応用型の段階を登っていく際に、設備投資を過不足なく進める見極めが重要になる。70年代には鉄鋼やエチレンのような汎用素材（コモディティー）では大型設備投資で事業拡大に成功したが、特殊素材（スペシャリティー）である新材料は小さな設備・組織のスモールユニットで事業化を進めるしかない。

このスモールユニットで事業を進めるには、新材料の独自技術を武器に、成形加工などの周辺技術では欲しい技術を公募し、いろいろな企業の得意技術を持ち寄った一種の仮想事業部（仮想企業）で、製品の開発リードタイムをできるだけ短くすることで、迅速に製品を開発し販売するしかない。

国際的に大競争時代に入っている現在、製品開発ごとに、ある時はライバル企業と組み、ある時は外国企業と組む。80年代までのように、自社開発に固執して製品開発が遅れて製品化を断念するよりはましである。製品開発ごとに、最強の開発メンバーの組み合わせを、企業と国の枠を超えて選ぶ時代になりつつある。

3 ユーザー志向の材料開発を目指す時代に

製品の開発競争が激しくなり、その開発の中身も技術的に高度になるばかりである。新材料の適用対象となる製品の機構・部品がハイテク化すると、その開発仕様に合わせる応用型の開発も高度な技術レベルが求められるケースが増える。例えば、パソコンの外部記録媒体（メディア）として採用が増えているMO（光磁気記録）ディスクは、記録層にテルビウム・鉄・コバルト（Tb・Fe・Co）系非晶質、その上下の保護層に窒化ケイ素に近い窒素・ケイ素化合物（SiN_x）が用いられている⁽⁶⁾。これらの層はスパッタ法で作製されるが、スパッタに適した組織を持つ母材の作り方が求められる。最終的な使い方まで踏み込んで新材料の応用型を開発しなければならないことが分かる。このMOの開発は実用化までにいろいろな紆余（うよ）曲折があった。これを理解し追従して母材を作製することは、かなりの決断があった。逆に言えば、製品開発が足踏みしている時が、新材料の売り込み時期でもある。

発展途上の製品でも新材料の出番は増える。例えば、再充

表1 リチウムイオン2次電池を採用しているノート型パソコン⁷⁾

出荷時期	パソコンメーカー	機種
1994年前半	東芝 東芝	T3400／T3400T T3600
1994年後半	米Dell Computer Corp. 富士通 日立製作所 米DEC	Latitude XP FM PenNote L3 FRORA PEN Digital HiNote Ultra
1995年前半	米Texas Instruments Inc. 富士通 米AST Research Corp. 松下電器産業 日本アイ・ビー・エム 台湾Acer Inc. 東芝 米AST Research Corp.	TravelMate5000 FMV-450NL、同T、同S Ascentia910N CF-11DS2 ThinkPad755CX AcerNote950/CX、同350N DynaBookSS-R590 Ascentia950N
1995年後半	米Dell Computer Corp. NEC 三洋電機 米Gateway 2000、Inc. 米Compaq Computer Corp. ソーテック	Latitude XPi Versa2000/4000/4050 MBC-P50J LibertyDX4-100 LTE5000 WinBook Quattro 90/90D

電が可能で繰り返して使えるリチウムイオン2次電池。ノート型パソコンなどの携帯用情報機器の電源として需要が伸び（表1）、96年度のリチウムイオン2次電池の需要は、95年度の約3倍と大幅な伸びが見込まれている。各電池メーカーはシェア拡大を狙い、リチウムイオン2次電池の性能向上に励んでいる。その有力手段が負極の炭素材料の改善。現在、負極の炭素材料向けに呉羽化学工業、大阪ガス、日本カーボン、ペトカ（鹿島石油、ジャパエナジー、東京電力、三菱化学などが出資）、日本酸素などが参入している。炭素に関する技術蓄積が豊富な企業ばかりである。

ペトカは80年代に高弾性を売りものに開発されたピッチ系高性能炭素繊維の開発時に蓄積したメソフェーズ相の技術を生かし、MCF（メソフェーズ・カーボン・ファイバー）と呼ばれる黒鉛系炭素材料を開発した。94年から新規参入した、NECと三井物産の合弁会社の日本モリエナジーは、96年から正極材料に安価なマンガン酸リチウム（LiMn₂O₄）を採用したリチウムイオン2次電池を発売した。正極材料は、これまでコバルト酸リチウム（LiCoO₂）が用いられてきたが、戦略物質で希少原料であるコバルトは高いうえに価格変動が大きく使いにくい。日本モリエナジーは、安いマンガンを基にした化合物に切り換えて、約20%コスト低減できたようである。

発展途上の製品を目指して、新材料の売り込みをかける。この時に決め手となるのが、材料ユーザーである製品開発側に立って、新材料の応用型を開発できるかということである。新材料を用いて難問を解決するには、製品そのものの技術まで理解して使い方を薦めなくてはならない。製品開発向けに新材料の応用型を開発するには、多くの勉強が必要になる。90年代後半の製品開発では、材料開発者はスーパーエンジニアでなくてはならないのである。

参考文献

- (1) 鶴原吉郎：日経メカニカル，No.481〔5月27日号〕，
(1996)，p.24

- (2) 中村正弘：日経エレクトロニクス，No.658〔3月25日号〕，
(1996)，p.134
(3) 佐藤利夫：日経メカニカル，No.477〔4月1日号〕，
(1996)，p.70
(4) 丸山正明：平成8年度工学教育連合講演会講演論文集，
(1996)，p.3
(5) 丸山正明：セラミックス，Vol.29，No.10，(1994)，p.891
(6) 丸山正明：熱処理，Vol.36，No.4，(1996)，p.191
(7) 山下勝巳：日経エレクトロニクス，No.649〔11月20日号〕，
(1995)，p.99

(1996年10月4日受付)