

科学技術と知の精神文化

講演録 39-2

若手研究者が育つ条件 - 材料科学における事例から -

東京工業大学科学技術創成研究院
フロンティア材料研究所教授
東京工業大学元素戦略研究センター長

細野 秀雄

2016年3月16日

国立研究開発法人科学技術振興機構
社会技術研究開発センター

「科学技術と知の精神文化」研究会

講演録の発行にあたって

世界的に大きな時代の転換期に直面している現在、日本の科学・技術に携わる人々とその共同体の精神・規範・文化について、歴史に学びじっくり議論をし、将来を考える場が必要なのではないだろうか。

阿部博之 東北大学名誉教授のこのような発案により、社会技術研究開発センターは研究会「科学技術と知の精神文化」を設置し、2007年度より継続的に会を開催しています。

研究会では、学問・科学・技術を取り巻く今日までの内外の言説、活動、精神、風土などについて、理系だけでなく、科学史・哲学・歴史学・法学・政治学・経済学・社会学・文学などの多様なバックグラウンドの有識者の方々にご講演いただき、議論を深めてきました。

本講演録は、研究会での講演をもとに、講演者の方々に加筆発展し取り纏めていただいたものです。21世紀に日本の科学・技術を進めるうえで基盤となる知の精神文化について、より多くの人々が考え互いに議論を深めるきっかけとなることを願い、発行いたします。

国立研究開発法人科学技術振興機構
社会技術研究開発センター

目 次

はじめに	1
材料という分野	2
研究の略譜	3
東京工業大学での人材育成の試み	6
若手が育った2つの領域 ～ アモルファスシリコン	8
若手が育った2つの領域 ～ 銅酸化物系超電導	11
元素戦略による人材育成	14
むすびにかえて	19
プロフィール	21

若手研究者が育つ条件

- 材料科学における事例から -

東京工業大学科学技術創成研究院
フロンティア材料研究所教授
東京工業大学元素戦略研究センター長

細野 秀雄

日時：2016年3月16日
場所：国立研究開発法人科学技術振興機構

はじめに

人文科学でも社会科学でも、あるいは自然科学でも、若手研究者の育成というのは最大の問題の1つだと思います。今日は、この問題を少しお話させていただこうと思います。まず、自分の経験の話を紹介させていただいたあと、私自身に関係したもので、15年ぐらい前に21世紀COEで東工大材料研が博士課程の学生を対象にして人材育成のかなり思い切った試みをしましたので、そのことを最初にお話します。2番目は、優れた若手研究者が出た領域があります。アモルファス（水素化）シリコン、それから銅系酸化物超電導ですが、この領域というのは共通の特徴があり、非常に多くの優秀な若手が輩出されたわけです。日本は材料が強い、材料というのはお家芸だと昔から言われていたわけですが、物質科学を先導するようになって、世界に日本ありと言われるようになったのはこの2つが大きな要因です。

3番目は、オンゴーイングで、私自身もずいぶん関わっていますが、元素戦略による人材育成です。元素戦略というのは2004年ぐらいから始まっているのですが、これは日本初のコンセプトです。日本は資源の少ない国です。希少元素をどう確保していくか、あるいは、その代替をどうしていくかというのが実は大事だという話が2004年ぐらいに、JST主催の会議の中で出てきて、それが元素戦略という言葉になったわけです。当初は関心があまり

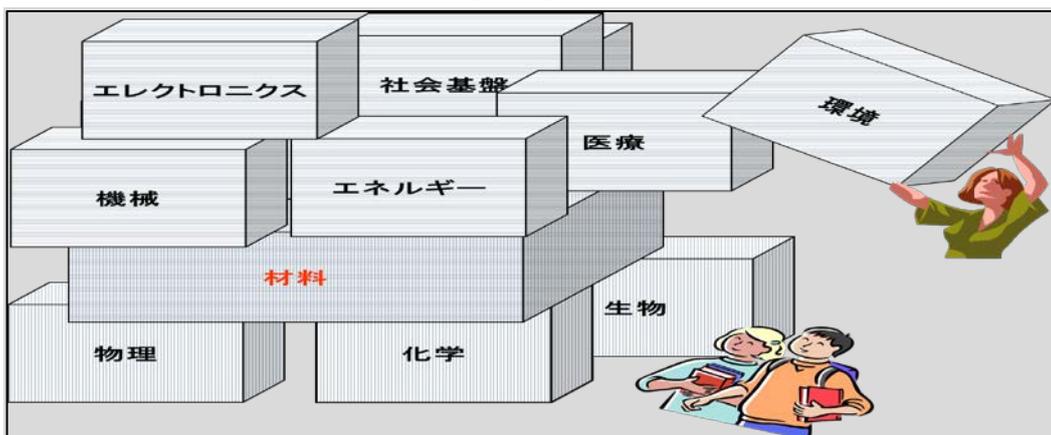
なかったのですが、中国が 2008 年に希土類¹のジスプロシウム²の輸出制限を行いまして、それが契機となって非常に大きい波及効果を与えているわけです。

材料という分野

今日は、分野外の方が非常に多いので、材料とはどういう分野かをお話します。材料という言葉は料理の材料とか建築の材料とか、あまりにも色々な使われ方をしています。僕は、特許とか法律を読んでも 1 回では分からないのですが、我々（材料科学の研究者）は 1 回読んだら分かる表現をしないと我慢できない人種なのです。だからシンプルに言いますが、材料というのは、あまたある物質の中で、人間社会に直接役に立つものを材料と言います。文化にだけ役に立つものはまず材料とは言いません。直接、フィジカルに役に立つということです。これはかなり強引な定義ですが、本質だと思います。

図 1 に材料をという分野の立ち位置を示します。材料というのはどういう分野にあるかと言うと、高校にある科目、いわゆる古典的な学問の上と、それからいわゆる工学部やエンジニアリングスクールにあります色々な学問、機械、エネルギー、エレクトロニクス、土木、建築、医療、あるいは最近、環境が入るかもしれませんが、これを結ぶ土台となっているものが材料という分野です。基礎と応用の間の糊のような役目をしている学問分野だと思っています。

【図 1】



¹ レア・アースとも言われ、31 鉱種あるレアメタルの中の 1 鉱種。かつて希土類とも書き、英語名の直訳であり、化学的に単元素の分離抽出が難しいことに由来している。

² ジスプロシウムは原子番号 66 の元素。希土類元素の一つ。現在 99%が中国で産出されている。

研究の略譜

私はもともとセラミックスの研究をやっていたのですが、1994年ですからもう20数年前に次のことを考えました。皆さん、ガラスを思い出してください。ガラスを粉々にすると真っ白になりますが、白い粉になる物質というのは必ず透明なのです。その逆も真なりで、透明のものは必ず粉にすると白くなります。人間のテリトリーと言っても良い地表から20キロぐらいの地殻の話ですが、そういう真っ白い粉になるような物質からできているわけです。その中にあるものを重量別に元素の比率³で並べると、上から二つの元素は酸素、シリコンです。どういうことかと言うと、我々の環境は酸化物からできているのです。例えば、シリコンと酸素が結びついた二酸化ケイ素、水晶がそうです。そのほかには、アルミナ、酸化鉄、石灰とか、こんな物で出来ているわけです。こういう資源的にありふれたもの、例えば伝統的な窯業・土石、ガラス、セメント、陶磁器を使って新しいことができないかと考えたわけです。こういう物質は、ごみ箱に捨てても怒られません。難しい言葉で言うと高い環境調和性です。ところが、こういう物質では電子機能はほとんど研究されていないので、この研究を20年くらい前から始めました。

僕らが学生時代は、日本は公害が最も深刻化していた頃で、水俣病などがもう出ていました。石油化学が凋落してきて、四日市の石油化学コンビナートはだんだんなくなりつつあるというのは隔世の感がありますが、当時は視界が悪くなるくらい排ガスが酷かった、そういう時代だったのです。でも、悪いことばかりではありません。1938年にデュポンがナイロンを出したときの売り文句は、「水と空気と石炭から生まれた、絹よりも柔らかく、鋼よりも強い」でした。ナイロンというのは実はデュポンのカロザース⁴が作った言葉です。NylonのNylというのはニヒリズムから来ているという話もありますが、カロザースはこれを発明したあと自殺してしまいます。何を言いたいかと言うと、ナイロンはCとHとOとNでできているのですが、ありふれたものを使って、そのものからまったく違う価値のものを生み出したということです。ナイロンというのは絹の代用品だったわけですが、絹は非常に高かったわけです。日本では、最近富岡の製糸場というのはもてはやされていますが、実は、過

³ 地殻中の元素の存在度（クラーク数）のこと。地殻に存在する元素の割合を火成岩の化学分析結果に基づいて推定した結果を質量パーセントで表したもの。

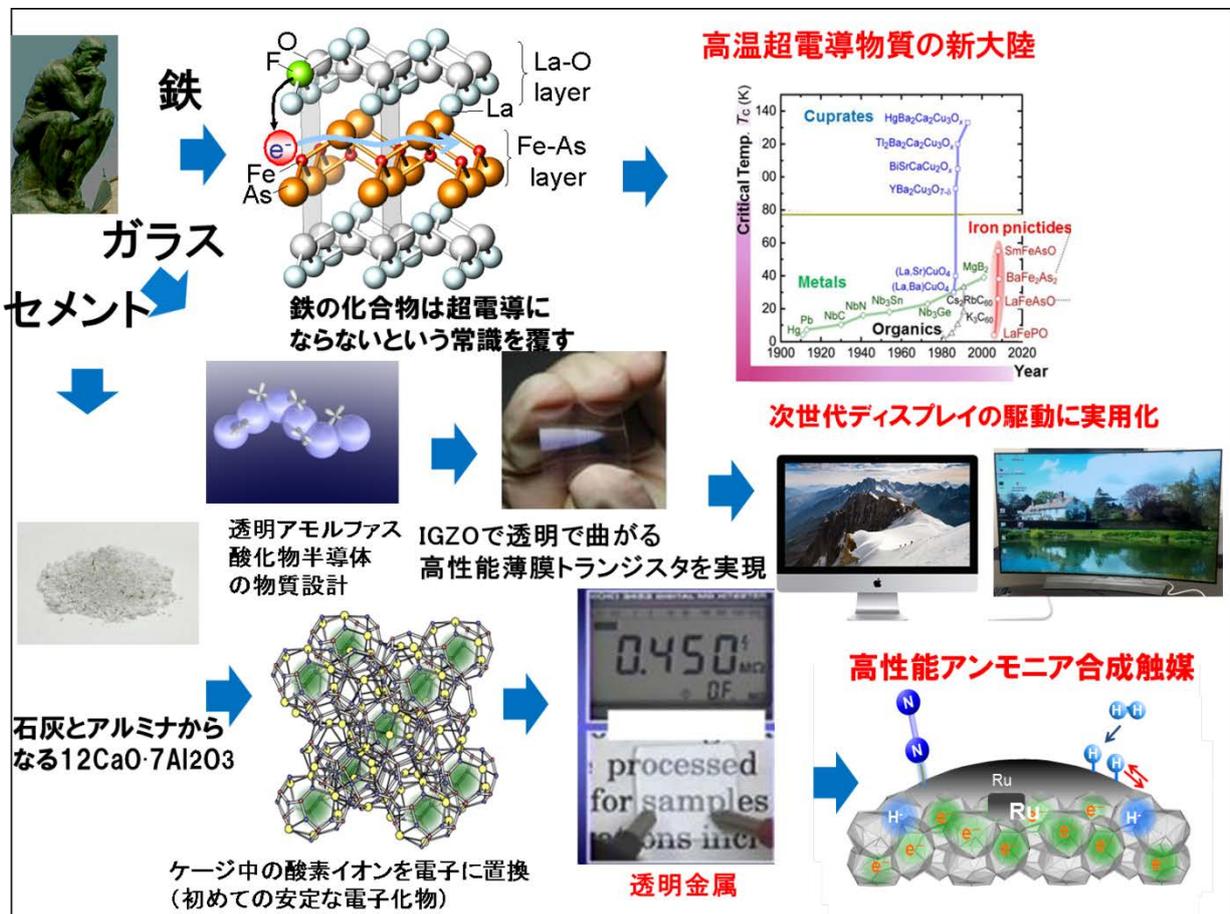
⁴ ウォーレス・ヒューム・カロザース（Wallace Hume Carothers, 1896年-1937年）はアメリカの化学者。デュポンの有機化学部門のリーダーとして、世界で初めて高分子から成る化学繊維を発明した。

酷な労働、女工哀史の舞台だったわけです。このナイロンの発明というのはそういうものを解放した一面もあるのです。

僕はこういう科学・技術の正の面に非常に憧れています。それで、ありふれたものを使って、現代の石器材料を作るということを目標として研究をやってきたわけです。1999年から2004年までJSTのERATO⁵で「透明電子活性」というのをやりました。発展研究(SORST)を含めて合計11年、それから内閣府のFIRST⁶、更に、今のACCEL⁷というふうに、ずっと大型の研究費を支援していただいているわけです。

ここ20年ぐらいやったことを1枚のスライドにまとめると図2のようになります。

【図2】



⁵ ERATO は、JST の戦略的創造研究推進事業の一つ。科学技術の源流をつくり、社会・経済の変革をもたらす科学技術イノベーションの創出に貢献することを目的とする。

⁶ FIRST プログラムは、内閣府が創設した「最先端研究開発支援プログラム」のことで、3～5年で世界のトップを目指した先端的研究を推進する制度。

⁷ ACCEL は、JST の戦略的創造研究推進事業で創出された研究成果の技術的成立性の証明・提示および適切な権利化を推進することで、企業やベンチャー、他事業などに研究開発の流れをつなげることを目指すプログラム。

近代建築というのは実は3つの材料からできているのです。鉄とガラスとセメントです。私の3つの仕事というのは、これは後付けの理屈となるのですが、実はその鉄とガラスとセメントだったのです。

まず、鉄です。鉄というのは磁石に付きます。磁石になるものは超電導には絶対にならないと言われるのが半ば常識だったわけですが、鉄の化合物を作りました。鉄と結合して元素が酸素ですと磁石になってしまうのですが、ここをヒ素にして電子をドーピング(添加)すると、磁石の性質が消えて超電導が出現します。それが銅酸化物系を除きますと、1番高い温度の超電導を示します。

次は、ガラスの半導体です。これは透明なガラスの一つなのですが、これを少し細工して、プラスチックの上に薄い膜を作り、これに電圧をかけると、実はこれは性能のいいスイッチングとして働きます。このうちの1つが、インジウム(In)とガリウム(Ga)と亜鉛(Zn)と酸素(O)から成る、頭文字を並べて、いわゆるIGZOと呼ばれる薄膜半導体になります。これが今、iMacや55インチの大型の有機ELのテレビ、あるいはマイクロソフトのSurface Pro4、などにディスプレイの駆動用に搭載されています。

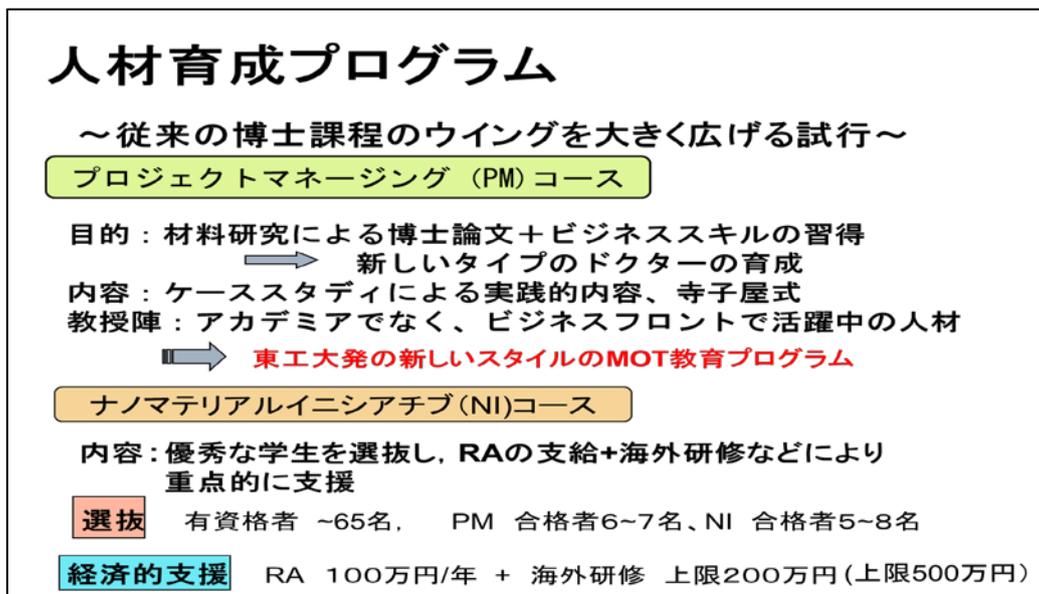
3番目は、セメントの一種なのですが、酸化カルシウムと酸化アルミニウムから構成されたものです。両方とも中学校で習う電気が流れない最も代表的なものです。酸化カルシウムと酸化アルミニウムの比率が、12対7でできている化合物です。函館の青函トンネルを造ったときに使ったセメントの2つの主成分のうちの1つです。1トン1万5,000円ですからキログラム15円と非常に安いのです。これをうまく工夫してやると、こんな見掛け上つまらない物質が、実は電気が流れる透明金属になって、低温にすると超伝導になります。この上にある金属を載せると常圧でアンモニア合成ができるということで、今、ACCELでこの辺に近いことを精力的に研究しているわけです。

このように、物質の可能性というのは、我々はまだほんの一部しか知らないのだということです。本当に面白くて、わくわくするようなところが、未だたくさんあるのです。私自身もこの研究を始める前は、ここまでいくとはまったく思わなかったのですが、本気で真面目にやりますと、どんどん面白い結果が出てきたのです。本当に物質というのは面白いなと思いました。

東京工業大学での人材育成の試み

これから人材育成の話をしていきます。今から15年くらい前に21世紀COE⁸というプログラムがありました。そのときに東工大の材料系は、何か新しいことをやらないとこれに採択されるのは無理だということで、少し思い切ったことをやってみました。「産業化を目指したナノ材料開拓と人材育成」です。当時、21世紀COEのプログラムで人材育成というのを挙げたところは全くなかったのですが、我々はわざと挙げてみたのです。強いところをさらに強く、弱いところなんか知らない、切り捨てるという、非常に強引なことをやらせていただきました。これは大学院の、特に博士課程をメインにやったのですが、とにかく強いところを徹底的に強くしなければ思い切ったことはできないというので、こういうプログラムを考えてみたのです。セラミック、ポリマー、メタル、この3つが材料の3大分野になっているわけですが、3つの領域共通にナノテクをメインに据え、一つは学術に特化したコース、もう一つは教育システムとしてプロジェクトマネージングコースをつくってみました(図3)。研究開発のマネージ、あるいは技術評価のプロみたいなものを養成できないか、あるいはベンチャー精神に富む人材を育成できないかということです。即戦力になるということは全然期待をしていませんでした。

【図3】



⁸ 「大学の構造改革の方針」(平成13年6月)に基づき、平成14年度から文部科学省の事業として措置されたもの。我が国の大学に世界最高水準の研究教育拠点を形成し、研究水準の向上と世界をリードする創造的な人材育成を図るため、重点的な支援を行うことを通じて、国際競争力のある個性輝く大学づくりを推進することを目的とする。

こういうことをやろうと思ったのですが、基本的にこれは大学の中の人間では絶対できません。中の人間のできるならもうとっくにやっています。だから外の人を借りようということで、産業界、あるいはビジネスのフロントにおられる方々、特に三菱商事の方にだいぶお世話になったのですが、そういう見ず知らずの人のところに色々な伝手を頼っていきました。特任教授という形で大学の職員になっていただき、その人たちの講義で単位を出すということをやらせていただいたのです。当時、そういう仕組みはなかったのですが、特任教授で単位を出すなんて何事かというので、だいぶもめたのですが、COEに採用にならないとえらいことだということで、大学は特例ということで認めてくれました。

人材育成プログラム、特にこのプロジェクトマネージングコースというのは、ある意味では新しいMOT教育⁹のプログラムを考えていたわけです。どういうことかと言うと、通常の方法による博士論文、プラス、ビジネススキルの習得、その両方をできないかということです。実際にはビジネススクールのような体系立ったプロジェクトマネジメントではなくて、ケーススタディをメインにして実践的な話にしようということで、人数も少なくして、教えていただくのもアカデミアではなく、ビジネスフロントで活躍中の人たちにお願ひしました。

これは、色々なところで取り上げていただいて、本（東工大 COE 教育改革、同 PM 編、いずれも日経 BP 社）にもなりました。ドクター3年間のうち2年間のコースでやっていて、ウェブサイトで講義内容を公開しましたが、当時はこういう試みは全くありませんでした。それから、機械系のCOEとも一緒にやるとか、慶應のビジネススクールとの連携で情報を共有するとか、東工大材料系以外のところにも拡張させていただきました。最終的には、これを東工大の正規のコースに取り上げていただき、今日まで形を変えて継続されています。その中のメインイベントが、東工大の持っている知財を教材にして、それからビジネスプランを作るというものでした。実際にこういうことができるかというのを半年かけてやり、公開でベンチャーキャピタルの人たちに来ていただいて、それを発表するというところを行いました。初めての試みだったので面白かったですし、それなりにうまくいった部分もありますが、本気でビジネスができるほどに技能が上がったかと言われると、今思うとかなり怪しい気がします。

⁹ 経営管理だけでなく技術を含んだ知識を学び、企業・組織の持つ技術を事業的な成果に結びつけ、競争力を高めることができる人材を育成する場。

若手が育った2つの領域 ～ アモルファスシリコン

2番目ですが、若手の優秀な人材が育ったと思っている2つの領域の話をさせていただきます。1つはアモルファスシリコンです。結晶というのは原子がきれいに並んでいるのですが、きれいに並んでいないものをアモルファス（非晶質）といいます。鉱物（結晶）の形というのは面のなす角度が一定なのですが、その形が定まらないのでアモルファスという言い方になっています。ミクロには原子配列が規則的ではないということです。これは、ある意味では結晶のちょうど逆なので結晶ではないものなのですが、簡単に作製ができるという特徴があります。ガラスも原理的にはそうです。アモルファスの半導体というのは、実はかなり昔から知られています。最初に使われたのは実はコピー機です。ゼロックスの感光ドラムがアモルファスのセレンでした。それから、松下が作ったDVDです。あれはアモルファスのカルコゲナイドなのです。一番大きいのは1975年のアモルファス水素化シリコンです。これが液晶ディスプレイに使われて、今日の10兆円規模のディスプレイ産業ができたわけです。

アモルファス半導体というものが一番世の中の人に知られるようになったきっかけは、1968年のオブシンスキーの論文です。料理みたいな非常に簡単な方法で半導体できて、それにメモリー作用があるというので大騒ぎになったと聞いています。この人はECD社というベンチャーをつくった社長で、世の中に半導体機能を持つアモルファスがあるということで一世を風靡しました。アモルファス半導体の可能性が確実なものになったのが、1975年のイギリスのウォルター・スピア教授とピーター・ルコンバー博士の論文で、アモルファス水素化シリコンというのが発見されました。結晶のシリコンは添加する不純物を選択することで正孔が移動するp型、電子が移動するn型の両方を作り分けられ、その両方をくっつけますとpn接合という半導体機能の主役となる重要な機能が出てくるのです。ところが、シリコンをアモルファスにしますと、p型、n型の制御ができません。アモルファス化することで、結晶では存在しなかった構造の不完全性に起因する余計なレベルが沢山出来てしまうのです。ですから、バンドギャップ中の真ん中にフェルミ準位があって、上にも下にも自由に動かさないのです。半導体として上手く機能するには、電圧でフェルミ準位の位置を容易に制御できることが必要です。ですからアモルファス半導体では、いわゆる半導体らしい機能というのは出ないと思われていました。ところが、スピアとル・コンバーは、シラン

(SiH₄) というガス分子を蛍光灯のグロー光電のランプで簡単に分解するという方法で作ったものだけが p 型、n 型が両方できるという論文を出しました。これが 1975 年です。この論文は最初に *Physical Review Letters* に投稿されました。物理で一番権威のある論文誌ですが、結晶で起こっていることが極めて低い効率でアモルファスでも起こっただけであり、“no new physics”、という判定で却下されたのです。スピアとル・コンバーは、がっかりして、困ったときによく投稿される *SSC (Solid State Communications)* に投稿しました。ところが、これが印刷されるやいなや、ただちに太陽電池の研究が始まったという非常に面白い歴史があります。このときの論文は誰が却下したかというのも知る人ぞ知なのですが、それは物理という学術の視点からは正しい判断だったかもしれないと思います。ただ、実用的な価値は、new physics というものとまったく別なところにあったという考え方もできると思います。

それから、この論文で面白いのは引用回数です。今、たぶん 1,000 くらいだと思いますが、10 兆円産業をつくった論文の引用回数が 1,000 しかないのはなぜかと言うと、非常に早く実用になって世の中に製品が出たものは、もう引用する必要がないからです。アモルファスシリコンで通じるのです。実用になりそうで、なかなかならないものは、たくさん引用されます。だから引用回数だけでものを計るということは絶対できないと思っています。例えば、私の鉄系の超伝導を報告した論文は、5,000 ぐらい引用されています。どちらが世の中にインパクトがあるかという、明らかにアモルファスシリコンです。引用回数が 10 のものと比べれば、やはり多い方がいいですが、引用回数だけで計れるほど単純ではないということです。

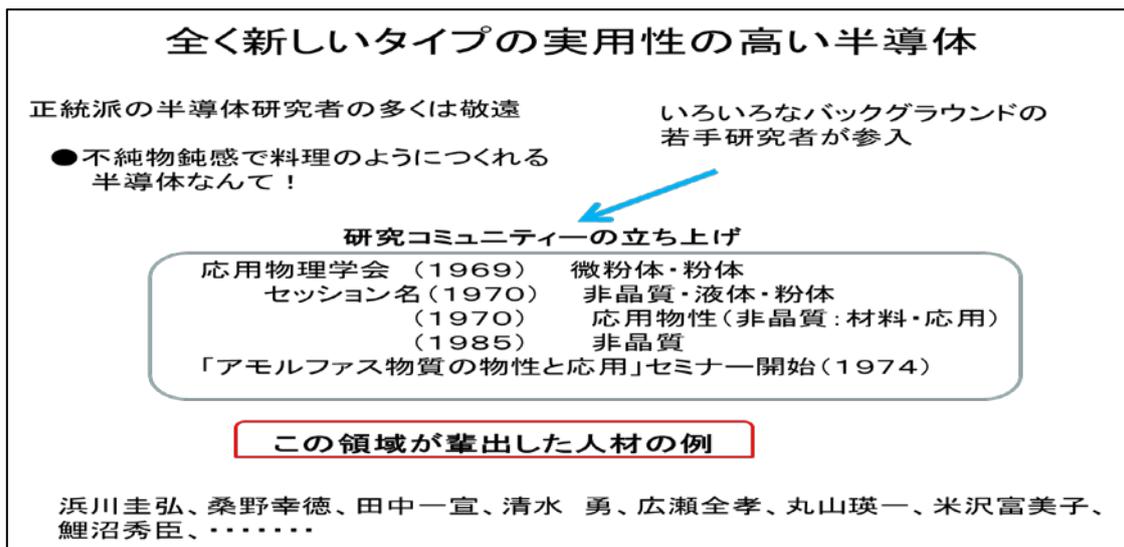
アモルファスシリコンが出たのは 1975 年ですが、1960 年代に欧州で始まったアモルファス半導体国際会議は、これ以降に参加者がずっと増えてきました。日本もこれをキャッチアップし、応用物理学会を中心に、あっという間に参加者が増え、1995 年に神戸で開催されたときには、初めて 800 人を超えるという大盛況になりました。当時、これを支えたのは、殆どが 30 代の先生方です。学問分野としても結晶半導体ではないので先輩は誰もいませんし、アモルファスですから実はポリマー¹⁰に近いので、化学や電気など、そういう若い人たちが飛び込んできて、みんなでソサエティをつくってしまったのです。応用物理の分野では、日本が研究の中心になった初めての分野だったと思います。これは産業的に非常に大

¹⁰ 重合体またはポリマー（英語：polymer）とは、複数のモノマー（単量体）が重合することによってできた化合物のこと。一般的には高分子の有機化合物である。現在では、高分子と同義で用いられることが多くなっている。

きいニーズがあったというのと、これまでにない新しい学理があって、そこに元気のいい人がたくさんいたからできたのだと私は分析しています。

半導体というのは電子が詰まった一番上の準位(フェルミ準位)が人為的に制御できるということがエッセンスなのです。結晶の場合は不純物を入れることで実現できます。結晶は原子の配列が完全なものほど適していますが、大きい面積の薄膜を低温で作るのは難しいのです。ところがアモルファスはまったく逆で、pn制御がなかなかできなくて、不純物を入れてもフェルミ準位は全然変わらないのです。よって電子の流れを制御できない。また、電子の動きやすさも結晶に比べて大幅に低下してしまうという悪いことばかりだったのですが、そのうちの一部分をアモルファスシリコンが解決してくれたのです。アモルファスの良いところと結晶の良いところを両方持っていたので、ここに新しいものができるのではないかということで、人がわっと集まりました。それから、応用としては大面積で、薄膜で使えるので、半導体、太陽電池、あるいは薄膜トランジスタに利用できます。これが頭にあって、ここに一挙に学問分野が立ち上がったわけです。まったく新しいタイプの実用性の高い半導体だったので、正統派の半導体の研究者は、多くの方が敬遠しました。結晶半導体はゾーンメンディングという方法で不純物を徹底的に除去して、それでほんのわずかなものを加えて制御するわけです。それまでのアモルファス半導体は不純物鈍感なので料理のように簡単に作れるのですが、特性が格段に悪いので、正統派の半導体の研究者はこの新しい学問分野にはそれほど入ってきませんでした。逆に、色々なバックグラウンドの若手研究者が参入したのです(図4)。

【図 4】



この分野を立ち上げた人の例をあげると、当時 電子技術総合研究所（現 産業技術総合研究所）にいらして、今は、JST の CRDS におられる田中一宜さんです。田中さんから聞いた話ですが、初め、応用物理学会にアモルファスのセッションをつくろうとしたらどこも入れてくれなかったそうです。1969年に微粉体・粉体というセッションが初めて受け入れてくれて、参加者がだんだん多くなって、非晶質(アモルファス)というセッションが初めてできたそうです。それから25～30年続く「アモルファス物質の物性と応用」というサマースクールもほぼ同時期に始まったということです。

この分野が輩出した先生方は、私が知っているだけでも、多数いらっしゃいますが、当時みんな30代だったわけです。同世代で、年配者がほとんどいなかったわけです。その代わり議論は激しくて、学会の会場で講演をやっていると野次が飛ぶのです。傍から見てみると殆どけんかに近いのですが、ところが会場を一步出るとものすごく仲がいいのです。議論がまともにできるという意味で、非常に珍しいコミュニティだったと思います。

若手が育った2つの領域 ～ 銅酸化物系超電導

それから、もう少しあとになりますが、銅酸化物系の高温超伝導です。超伝導は電気抵抗が温度を下げていくと突然ゼロになるわけで、現象は簡単ですが理解が非常に難しいのです。理解が難しいだけではなくて、高温超伝導物質を理論的には現在でも予測できないといってもいい状態です。歴史的には1911年に水銀で超電導が初めて見つかります。そのあと、超電導になる温度 (T_c) を上昇させることが重要な研究になり、 T_c は3年に1度ずつくらい上がっていきました。しかし、1970年代ぐらいになると、23K¹¹ぐらいまで行って、もうそれ以上は上がらなくなります。超電導というのは2つの電子が瞬間的にペアをつくることで生じるのですが、このペアはずっと相手が同じではなく、相手が変わっていかないといけないのです。本来、反発する電子どうしを結び付けているのは、実は結晶格子の振動なのです。だから真空中では超電導は起こりません。固体の中の電子しか超電導を起こさないのですが、固体を構成している原子が振動することによって、その振動が糊となり、2つの電子がうまく瞬間的にペアをつくるわけです。そういう理論 (BCS理論) が、1957年に提唱さ

¹¹ ケルビン (英語: kelvin, 記号: K) は、熱力学温度 (絶対温度) の単位。国際単位系において基本単位の一つとして位置づけられている。

れ、1972年にノーベル賞を受賞したのですが、BCS理論では、温度上昇の限界は23Kぐらいで、もうそれ以上は上がらないだろうと言われていました。

そうしているうちに突如、1986年にIBMチューリッヒ研究所のベドノルツとミュラーから、銅の酸化物が高温の超電導になるかもしれないという報告が出てきました。これが契機となって、それから2～3年の間に超電導になる温度は130Kぐらいまで上がってしまい、そこでまた飽和します。そのあとに出てきたのが、秋光先生（青山学院大学）が2001年に報告したMgB₂（ニホウ化マグネシウム）で、BCS理論に従う圧倒的に高いT_cの超電導となります。これは試薬瓶に入っているものが最も高いT_cを示し、細工を施すとT_cが下がるという非常に意地悪な超電導物質でした。そして、我々が2006年から2008年にかけて鉄系の超電導を見つけました。これが100年ぐらいの超電導の歴史です。

ベドノルツさんとミュラーさんの最初の銅酸化物超電導の論文のタイトルは、「Possible high T_c superconductivity（たぶん高温超電導）」です。本当に論文のタイトルが「たぶん」なのです。1986年に、「Zeitschrift für Physik」というドイツの雑誌で発表されました。この論文はこれまでに1万回も引用されていますが、発表当時は、ドイツの国内誌だったので、あまり注目されていなかったのです。そして、これが本物の超電導だということを確認したのは、日本の東大グループです。田中昭二、北澤宏一、内田慎一、高木英典という4人の先生が、4年生の卒論としてこれをテーマに取り上げ、本当の高温超電導でなることを示したのです。この発表が契機となって、世界中で大騒ぎが始まるわけです。「たぶん超伝導」から「本物の超伝導」まで1年ぐらいが経過しました。

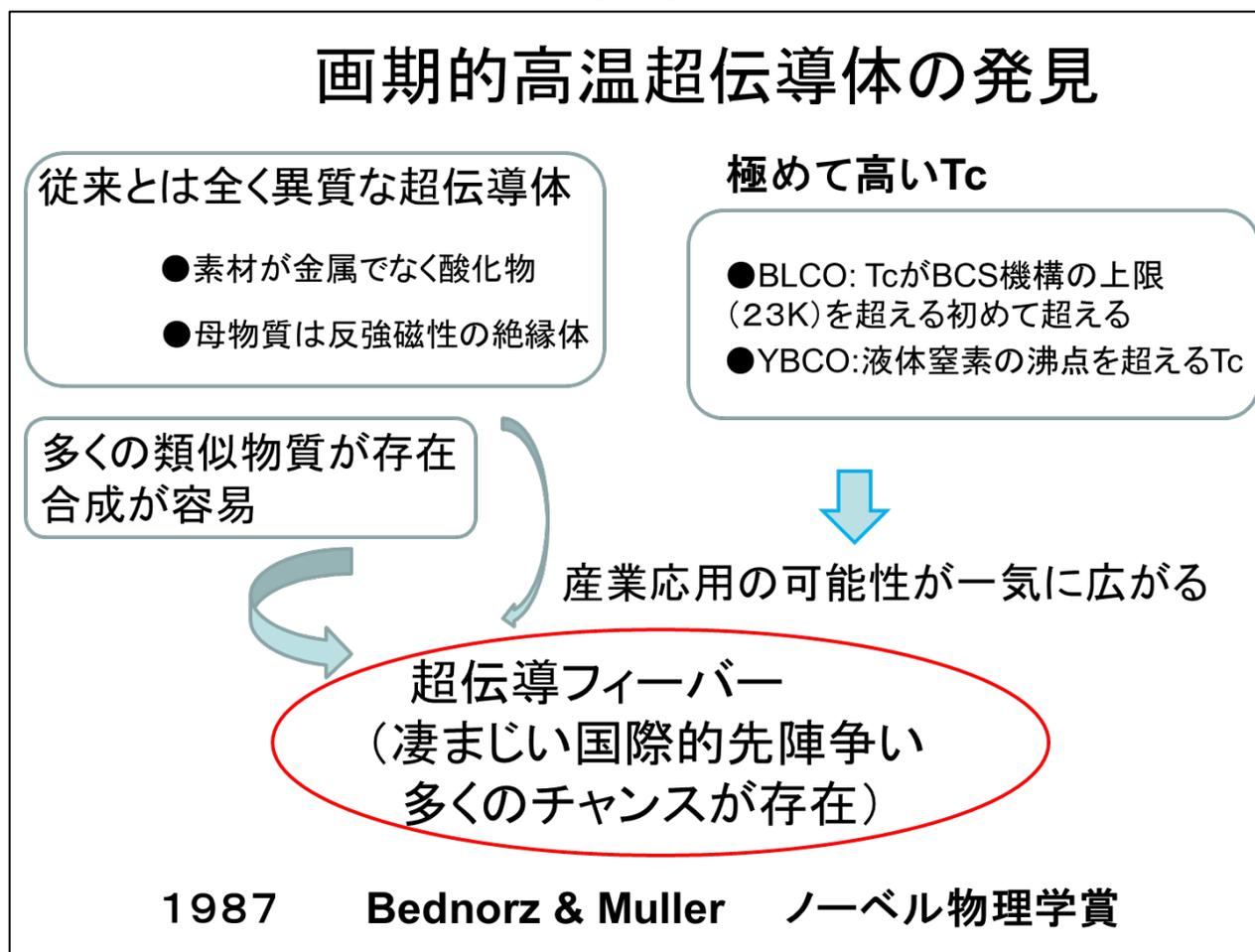
それからまた1年すると、今度は、超伝導の研究で一番重要なのですが、T_cが液体窒素の沸点(77K)を超える物質が銅酸化物系で見つかったのです。液体ヘリウム（沸点は-269度、4K）はリットル約1,500円もしますが、液体窒素（沸点は-196度、77K）はリットル50円ぐらいですから、液体窒素で使えるものが欲しいというのは、人類の夢だったわけです。それを実現したのが、当時アラバマ大学（のちに台湾の科学技術省の長官）のMaw-Kuen Wuと、今も現役で頑張っておられるヒューストン大学のPaul Chuです。YBCO¹²という物質が、常圧で93Kで超伝導を示すということで大騒ぎになりました。それで超電導フィーバーが起きました。

¹² イットリウム系超伝導体。イットリウム(Y)を含む、90ケルビン(K)以上で超伝導転移を起こす化合物のこと。高温超伝導の中で銅酸化物高温超伝導に分類される。

それで、色々なことが起きます。日本の応用物理学会の速報誌が、その発表の主な舞台になったので、論文の厚さが突然2倍になり、契約が破綻して出版社が潰れたそうです。それから、この騒ぎは漫画にもなっているのです。石ノ森章太郎の『超電導講座』という漫画が講談社から出ています。この中に、先ほどの4人の先生方も主人公で出てくるような状態になったわけです。

このときも色々なバックグラウンドの若手研究者がこの分野に入ってきました。それは、従来とはまったく異質の超電導体だったからです。元の物質がスピンをもっている遷移金属の酸化物だったのです。それまでの超電導の研究では、磁性を持つ物質や酸化物は超電導の候補としては避けるべきだという、有名なマティアスの経験則があったのです。また、 T_c （臨界温度）が極めて高く、液体窒素の沸点を超えたということで、一気に応用の可能性が高まり、もしかしたら室温超電導ができるのではないかという期待があって、非常に大きな騒ぎになりました(図5)。

【図 5】



前述のアモルファスシリコンもそうですが、これも従来の延長にない新しい物質だったので、その分野の権威がいなかったのです。そこで、ここに色々な人が入り、世界的にすさまじい先陣争いが起きました。論文を投稿して審査が出るのを待っているのは遅いので、ファックスを使って世界中の研究者とやり取りをする、あるいはマスコミを通じてオープンにしていくという動きが、このときに始まりました。超伝導の世界は非常に競争が厳しいので、審査員が情報を漏らすことが頻繁に生じたようです。そこで、プレプリントサーバーといって、論文を書くと、それを論文誌に投稿すると同時にウェブ上に貼って誰でも見えるようにしてしまうのです。今でもこれはずっと続いています。Arxiv という誰でも無料でアクセスできるプレプリントサーバーの中の cond-mat (condensed matter の略) がそれです

(<http://arxiv.org/archive/cond-mat>)。「これはもうやっている」ということを示すために、論文を書くときまず貼ってしまうのです。競争が非常に厳しかったので、こういうことが定着したわけです。

銅系高温超電導というのは非常にたくさんの若い人を育てます。強相関電子系酸化物というのはこのあと大きい分野になるわけですが、それを担っている先生方というのは、銅系超電導のときに飛び込んだ方々が大部分です。ですから人材育成という観点からみると、銅系超電導の研究ぐらい世界的な研究者を育てたテーマはないのではないかと思います。未だ産業的には大して実用にはなっていませんが、この点での貢献は絶大です。

元素戦略による人材育成

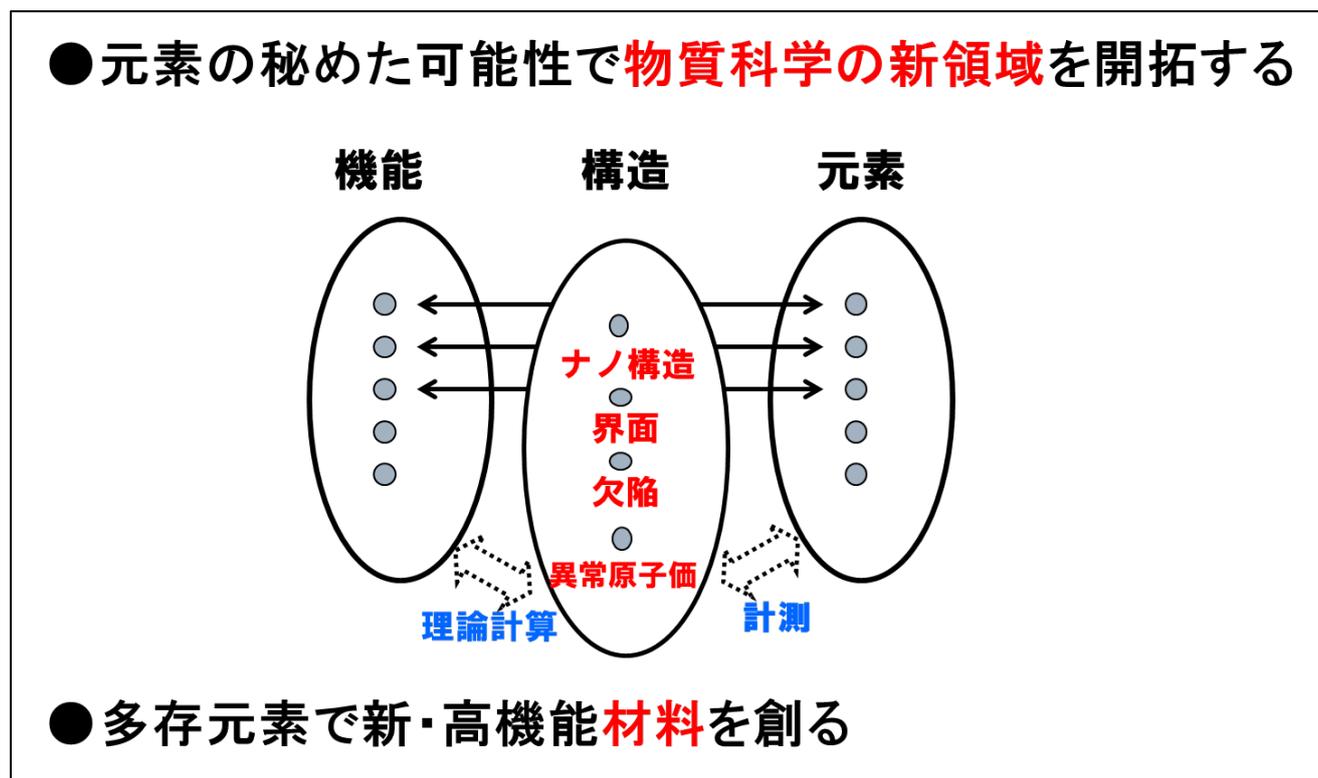
最後は、元素戦略についてお話します。2004年の4月17日から18日に箱根で1泊2日のJST主催の会議をやったのですが、そのときのタイトルは、「夢の材料の実現へ」でした。村井眞二先生と玉尾皓平先生のリーダーシップでやられたわけですが、出てきたものをまとめて「元素戦略」という名前を付けたのは中村栄一さんです。元素戦略というのは日本発の科学技術施策です。それが施策として取り上げられたのが平成19年で、日本で最初の府省連携プロジェクトになった「元素戦略」です。JSTでは平成22年から「CREST」と「さきがけ」¹³で元素戦略をテーマにしたプロジェクトが始まります。その後、文部科学省の拠点

¹³ 「CREST」、「さきがけ」はいずれも科学技術振興機構（JST）が行う戦略的創造研究推進事業。戦略的創造研究推進事業とは、社会・経済の変革をもたらす科学技術イノベーションを生み出す、新たな科学知識に基づく革新的技術の

形成型ができ、JSTでは戦略的国際共同研究プログラムにも展開されました。なぜこの辺から急に施策が走ったかと言うと、この間に中国のジスプロシウム輸出制限があったからです。玉尾先生がCRESTの元素戦略の研究総括を、私はさきがけの「新物質科学と元素戦略」の研究総括を仰せつかりましたが、そのときの様子を少し紹介させていただきます。

まず元素戦略は何を目指すかということなのです。図6のように、基本的には元素の秘められた可能性で物質科学の新領域をつくるということです。もう1つは、ありふれた元素で新機能材料を創るということです。社会が材料に求めるものは機能です。材料は必ず元素を使って作らないといけないのですが、この間に多様な関係があればあるほどいいのです。例えば、強い磁石は本多光太郎以来コバルトが必須だというのが常識でした。それを打ち破ったのは佐川真人さんです。佐川さんは豊富な鉄をベースに史上最強の磁石を生み出したのです。ですから、なるべく機能と元素には1：1の関係ではなく、まったく違う関係を見いだしていくのが元素戦略そのものだろうというふうに理解してこれに取り組んでいます。

【図 6】



シーズを創出することを目的とした事業で、「CREST」はネットワーク型（チーム型）、「さきがけ」はネットワーク型（個人型）の研究である。

それで、研究者の採択基準のときにどういうものを挙げたかということですが、図7にそれを示します。私がずっと挙げているのは、語弊はあるのですが、とにかく「生意気」な研究者を求めるということでした。生意気というのは、自分の構想やアイデアを強く主張でき、新概念や新領域の開拓に非常に強い野心を持つということです。見掛け上生意気かどうかは別にして、礼儀正しくても、前の世代がやったことなんかみんなひっくり返してやろうという野心を持った研究者を積極的に採用しました。もちろん、まず、テーマが合っていないとしょうがないわけです。それからオリジナリティーがあるか、この領域に採択されてから伸びしろがあるか、こんなことを採択基準にしてやってきたわけです。特に、生意気であるかどうかというのは非常に大事だろうと思います。

【図 7】

採 択 基 準

「生意気」な気鋭の研究者
自分の構想やアイデアを強く主張でき、
新概念や新領域の開拓に野心をもつ

- (1)提案内容と本領域の趣旨の整合性
- (2)オリジナリティーとこれまでの実績に照らしての実現性
- (3)本領域に採択されることでの伸びしろの大きさ
- (4)さきがけ経験者は、順位が採用枠の1/2以内に入った場合のみ
- (5)女性研究者は、採用枠の1.5倍以内の順位 & 採択者の20%以内

領域の基本方針は、とにかく改良よりも革新です。ジャンプを狙う研究をやってくれと強くいっています。3年半で4,000万円の研究費をJSTが出すわけですが、極端な場合は論文1報でいいので、とにかく明確なステップの見える研究を求めました。全部で34人の若手の研究者がいるわけですが、その専門分野は非常なバラエティーがあるわけです。ダイバーシティーが大きいので、自分だけで閉じこもらず、この中でどんどんコラボを積極的にやることを強く推進しました。特に若い方、30代前半の方などは研究室の中だけにどうして

も閉じこもりがちです。せっかくの機会だからこのネットワークの中に入って横でつながり、共同研究をどんどんやってくれと強くプッシュしました。多くの場合、研究テーマを提案するときというのは、提案が通りやすいように大風呂敷を広げるのです。ところが、実際に採択になって現地をサイトビジットしてみると、研究環境、上司との関係、設備、学生などの制約も考慮すると、これは絶対できないと明らかに分かるケースがあります。そのときはその場で、研究はここまでにしようとして提案します。これをやらないと、とても成果が見込める研究になりません。提案公募の限界というのはどうしてもこういうところにあるのです。

それから、若い人が置かれている環境は、分野によってかなり違います。伝統的に自由度が少ない分野、例えば有機合成や金属などは徒弟制度が非常に厳しいです。それはその学問分野の伝統なのです。ところが物性物理などではそういう感じが非常に希薄なようです。ですから、これを全部一緒くたにして運営するのは極めて難しいのです。論文の著者の順序も学問分野によって違うわけです。例えば素粒子なんかは全部アルファベティカルに付けるわけです。私の分野は現場で研究を中心に推進した人がトップになるのですが、必ずしもそれが常識としては通用しません。ですからこれは、その研究室に任せようということで、強引なことを行わないようにしました。

結果的に、結構面白い人材が出たのではないかと考えています。小林玄器さんというのは神奈川大学の助教だったのですが、自然科学研究機構の分子科学研究所が任期付きで研究室を持たせる特任准教授という制度を設けたので、彼はここの公募に応募をして採用されました。彼の提案は、もともとできるかどうか領域アドバイザーの方々の間でも非常に議論になりました。水素が結晶中でプロトン¹⁴としてよく動くというのは確認されているのですが、マイナスの電荷をもつ水素イオンでもよく動く物質を見つけるというのが彼の提案だったのです。採択後には、領域アドバイザーの方も含め、皆さんで相当に応援しましたが、最終評価が行われる一か月前の時点でも論文がゼロでした。しかし、この評価の1週間前に

「Science」に論文が採択されたのです。かなり不安だったに違いないのですが、論文1報でもいいという方針を信じて本気でやった若者がいたということです。3年半で研究費を4000万円もらって、論文1報で最後まで行くというのは、これはかなり胆力がないと実際にはできません。大抵は小さい論文を書いてしまいましたが、彼のように、本気でやったもの以外は書かないという腰のすわった若者もいることに驚きました。

¹⁴ 陽子 (proton) とは、原子核を構成する粒子のうち、正の電荷をもつ粒子。

それから、紅林秀和くんというメンバーがいるのですが、彼は採択したときは東北大のドクターコースを出て、ケンブリッジ大でポスドクをやっていました。彼はこのさきがけで業績をかなり挙げて、ロンドン大学の電子工学科の **Senior Lecturer** というポジションを取ります。これはパーマネントのポジションです。彼の研究室に何回もサイトビジットに行ったのですが、日本人は彼だけです。初めて研究室を持って動くことになったわけですが、日本に帰ってくる気があるかと聞いたら、どこまでできるものか確かめてみたいので、帰る気は全くありませんと言っていました。今時こういう逞しい人はめずらしいです。

それから、もう1人、愛媛大学の入船先生のところの准教授だった地球科学の西山宣正さんですが、彼はドイツの電子シンクロトロン研究所の高圧測定のパルスラインの責任者に抜擢されて、そこに移ってしまったのです。ですから、若い方でこういう機会をつかみ、海外でパーマネントでやってみようという人がそれなりに出てきているということです。

それから、これも予期せぬことだったのですが、さきがけから **CREST** を取れるまでの期間が若手研究者にはすごく大変なのです。一部では「研究費の死の谷」とも言われているそうです。さきがけは若い研究者を積極的に支援していますが、**CREST** はそういった年齢制限はないわけです。だから、さきがけが終わったあとに、**CREST** では採れるわけがないということで、メンバー間でだいぶ話題になっていました。「愚痴ばかり言わないで、自分たちで徒党を組んで取りに行ったらどうか」と言ったら本当に行きまして、それでこの領域から、なんと4件が **CREST** に通ったのです。そして、領域全体のさきがけのメンバーの3分の1が **CREST** メンバーとなったのです。よもやこんなことになるとは思わなかったのですが、ここの若い人は非常に横のつながりが強い。一種の協奏関係なのですね。回り出すまでは少し大変なのですが、一部がうまく動き出すと全体が回るのです。これを見たときに、若い人の力というのは非常に強いなと驚きました。

むすびにかえて

材料というのは日本の非常に強い分野です。グリーン、ライフ、情報通信、ナノテク・材料といういわゆる重点4分野は、いずれも日本の比率が落ちてきているのですが、それでもナノテク・材料というのはこの4分野の中で最も我が国が強い分野となっていました。ところが最近では、論文のシェア率を見てみると、もう韓国と変わらないのです。日本の人口は韓国の倍いるのに、ほとんど変わらなくなってきたのです。そろそろ強いというのは強かったというふうに直さないといけないと思います。

もっと悲惨なことがたくさんあります。日本の学会というのは非常にたくさんありますが、材料系というのは学会が乱立しています。例えば、何万人以上の学会というのは結構たくさんあるのですが、材料系になりますと30ぐらいあるのです。その中で1万人を超えている学会はないのです。非常に小さい学会がたくさんあって、それで、各学会は学会誌を持っていますが、インパクトファクター¹⁵が1を超えるところはほとんどないのです。非常にローカリティーが強くなっています。それから、これは日本のどの学会でも共通なのですが、45歳以上の正会員の割合が高いのです。ですから、あと15年か20年するとこの世代がリタイアしますので、今の学会の3分の2から半分ぐらいになります。これは確実にそうなります。ですから、どの学会も独力でやっていくのは非常に大変だろうということがデータから明白なわけです。

以上、人材育成の問題、学会の問題を材料系を対象を限定して話をしました。まとめると、まず、製造業を支えているのは材料系の強さです。たぶん現在はトップクラスですが、3年後はもう怪しいと思います。次に、本気で材料を作りだそうとしている研究者は多くないということです。なんとなく、もう脈が残っていないのではないかという感じがあるのだと思います。それから、新材料を目指してきた研究者は特定のグループに偏在しています。見つかる研究室はいつも見つかるし、見つからない研究室はいつも見つからないのです。これはなぜかと言うと、基本的には人は人によって触発されるからだだと思います。論文などの2次情報で触発されることは極めて少ないということが言えるでしょう。ですから30年前の高温超電導の際には、世界をリードする研究者が多く生まれたのです。本気で議論ができる競争的環境が研究者を育てるということだと思います。

¹⁵ インパクトファクター（文献引用影響率）とは、特定のジャーナル（学術雑誌）に掲載された論文が特定の年または期間内にどれくらい頻繁に引用されたかを平均値で示す尺度。

最後になりますが、優れた研究者が育つ条件を図8にまとめます。まず当たり前ですが、魅力的なテーマです。魅力的というのはどういうことかと言うと、社会的インパクトと、学問分野での新しいワクワクすることの2つがアンドで存在するという事です。それから学会の開放性です。新しい領域に食欲に取り込む積極性が必要です。3つ目は、若くても成果次第で大きな自由度があるということです。学問の世界というのは、下克上がないと停滞してしまいがちです。この戦国時代みたいな今日の状態というのは、実は若手研究者が一番育つ条件ではないかと私は分析しています。

【図 8】

まとめ

- 魅力的課題
社会的インパクト &
未開拓(新学問)でワクワクする領域
- 開放性
自由で徹底的な議論ができる学会
- 下克上
若くても成果次第で大きな自由度



プロフィール

細野 秀雄 (ほその ひでお)

東京工業大学 科学技術創成研究院 フロンティア材料研究所教授、同学元素戦略研究センター長

1953年生。現在、JST戦略的創造研究推進事業ACCELプロジェクトリーダーと共働きがけ「新物質科学と元素戦略」領域総括。東京都立大学工学部工業科化学科卒業、東京都立大学大学院工学研究科博士課程修了。研究分野は無機材料科学、特に透明酸化物半導体、新超伝導物質、エレクトライドの物質科学と応用、磁気共鳴。『鉄系超伝導物質の発見』の論文は「サイエンス」で「ブレイクスルー・オブ・ザ・イヤー」、2009年 朝日賞、2013年 トムソン・ロイター引用栄誉賞、2015年 日本学士院賞・恩賜賞、2016年 日本国際賞。日本学術会議会員。

社会技術レポートは、国立研究開発法人科学技術振興機構社会技術研究開発センターが不定期に発行しているものです。本レポートの複写、転載、引用にあたっては、社会技術研究開発センターにお問い合わせください。

科学技術と知の精神文化

講演録 39-2

若手研究者が育つ条件 - 材料科学における事例から -

東京工業大学科学技術創成研究院
フロンティア材料研究所教授
東京工業大学元素戦略研究センター長

細野 秀雄

国立研究開発法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センター
〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3 サイエンスプラザビル 4 階

TEL 03-5214-0130
FAX 03-5214-0140
URL <http://ristex.jst.go.jp/>
2016 年 6 月

Copyright©2016 JST 社会技術研究開発センター