

本田財団レポート No. 144

第 122 回 本田財団懇談会（2012 年 7 月 23 日）

「元素戦略～材料から未来を創る～」

東京工業大学フロンティア研究機構
教授

細 野 秀 雄

講師略歴

細野 秀雄 (ほその ひでお)

東京工業大学フロンティア研究機構 教授



《略 歴》

- 1953年 埼玉県生まれ
- 1977年 東京都立大学工学部工業科化学科 卒業
- 1982年 東京都立大学大学院工学研究科博士課程 修了 (工学博士)
名古屋工業大学工学部無機材料工学科 助手
- 1988年 米国ヴァンダービルト大学 客員助教授
- 1990年 名古屋工業大学工学部材料工学科 助教授
- 1993年 東京工業大学工業材料研究所 助教授
- 1995年 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所 助教授
- 1999年 東京工業大学応用セラミックス研究所 教授
- 1999年 独立行政法人科学技術振興機構 ERATO「細野透明電子活性プロジェクト」総括責任者
- 2002年 文部科学省21世紀COE 東工大「産業化を目指したナノ材料開拓と人材育成」拠点リーダー
- 2004年 東京工業大学フロンティア研究機構 教授 (応セラ研兼任)
独立行政法人科学技術振興機構 ERATO-SORST「機能性酸化物プロジェクト」総括責任者
- 2010年 最先端研究開発支援プログラム(FIRST) 中心研究者

《主な受賞歴》

- 1991年 Otto-Schott 研究賞(ドイツ アッベ財団)
- 1994年 W.H.Zachariasen 賞
- 1999年 日本セラミックス協会 学術賞
- 2004年 日本化学会 学術賞
- 2005年 文部科学大臣表彰 科学技術賞 (研究部門)
- 2009年 藤原賞
紫綬褒章
- 2011年 朝日賞
応用物理学会 業績賞
Jan Rajchman 賞 (国際情報ディスプレイ学会 SID)

ほか多数

《主な著書・編著、他関連刊行物》

- 2006年 『Nanomaterials - From Research Towards Applications』 Elsevier
『透明金属が拓く驚異の世界』 ソフトバンククリエイティブ
- 2010年 『好きなことに、バカになる』 サンマーク出版
『酸化物半導体と鉄系超電導 ―新物質・新機能・応用展開―』 シーエムシー出版
『Handbook of Transparent Conductors (1st Edition)』 Springer

ほか多数

元素戦略：未来を創る材料

本田財団懇談会@東京会館(7月23日)

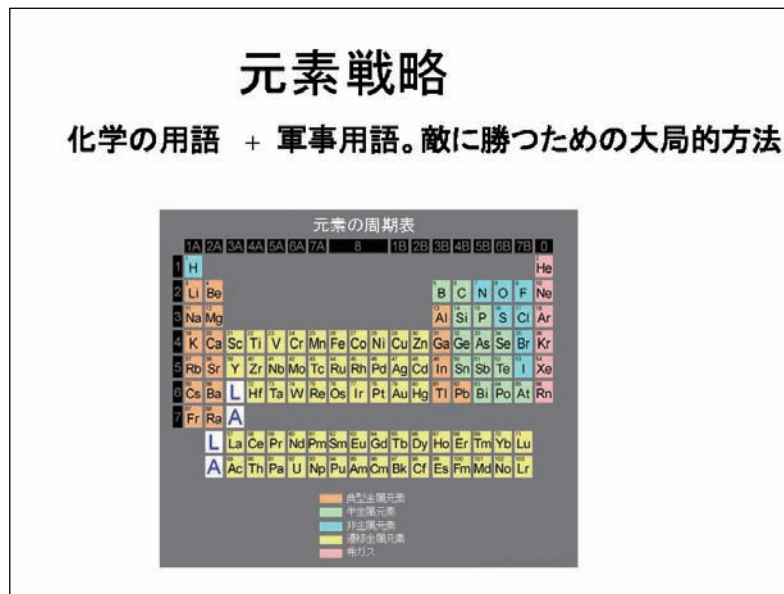


東京工業大学
応用セラミックス研究所
細野秀雄

本日は「元素戦略～材料から未来を創る～」という話ですが、「元素戦略」とは実に奇異な言葉だと思いませんか。「元素」は化学用語、「戦略」は軍事用語で、敵に勝つための大局的な方法という意味です。これが「元素研究」ではないところが、元素戦略というものの大きな特徴を示していると思います。

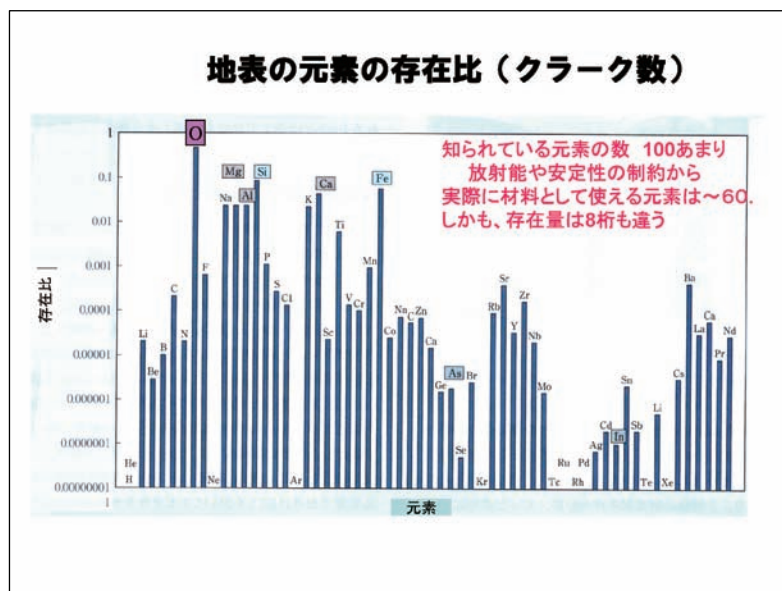
これから時系列にしたがって、この元素戦略が出来上がった経緯について紹介いたします。その後、私たちが進めている元素戦略の具体的な研究例をお話して、最後に元素戦略は何を目指すかということ、アカデミアの立場でお話させていただこうと思います。

■ 希少元素が支える現在のエコイノベーション



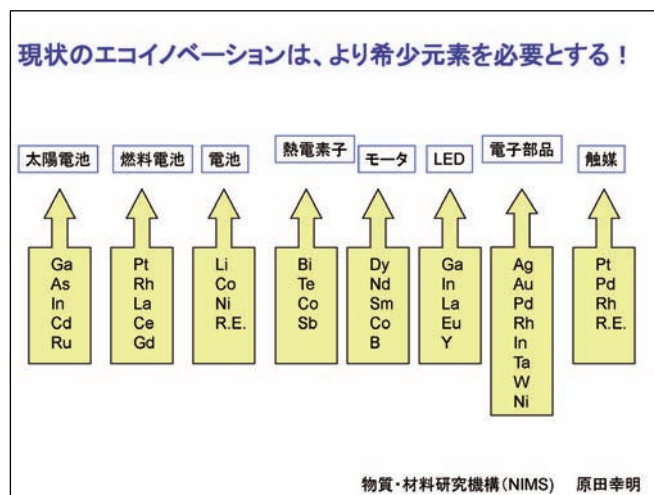
図－1

〈図－1〉 元素周期律表に元素が 100 いくつありますが、だいたい煩惱の数と同じぐらいあると言われています。一番多いのは酸素でして、全体の半分ほどあります。他にも、私たちの身の回りにあるような元素がたくさんあります。この存在量の幅は、約 8 桁にわたります。



図－2

〈図－2〉 実際に知られている元素の数が 100 あまりで、放射能や安定性の制約から、実際に材料として使える元素というのは 50 から 60 ぐらいでしょうか。しかも、存在量に 8 桁もの開きがある。私たちがずっと地球上で生きていく上で、この束縛から逃れることは絶対にできません。その中で人類は新しい材料を生み出し、あるいは工夫をして、生き延びていくことが宿命です。



図－3

〈図－3〉 ところが、太陽電池、燃料電池、電池、熱電素子、モータ、LED、電子部品、触媒といった、いわゆる「エコイノベーション」と呼ばれる製品は、皮肉にもより希少元素を必要とします。希少元素がなければエコイノベーションができないような状態になっているのが、我々の現状です。

■ 日本発のコンセプト「元素戦略」



図－4

〈図－4〉 そうした状況の中で元素戦略というものが立ち上がったきっかけは、2004年4月に箱根で(独)科学技術振興機構(以下JST)が行った、「夢の材料の実現へ」というワークショップでした。これを主宰されたのは村井眞二先生、議長が玉尾皓平先生という有機化学の大先生でした。その中で、中村栄一先生が「元素戦略」という言葉を最初に言い出しました。この後いろいろな肉付けがされ、それが現在の日本の科学技術政策「元素戦略」にまで発展します。ですから、これはもともと日本で生まれたコンセプトなのです。

元素戦略は日本発の科学技術施策

平成16年4月 JST未来戦略ワークショップ「夢の物質」
(村井 眞二JSTフェロー主宰、玉尾皓平議長@箱根)で
中村栄一氏(東大)が提案。

平成16年7月 ユビキタス元素戦略を細野秀雄(東工大)が提唱

平成19年 MEXT-METI合同プロジェクト「元素戦略」が発足

平成22年 JST 戦略創造研究 CREST & さきがけ に
「元素戦略」が発足

平成24年 MEXT 新元素戦略プロジェクト(拠点形成型、期間10年)発足

JST 国際科学技術共同研究推進事業
EU-Japan「希少元素代替材料」が開始予定

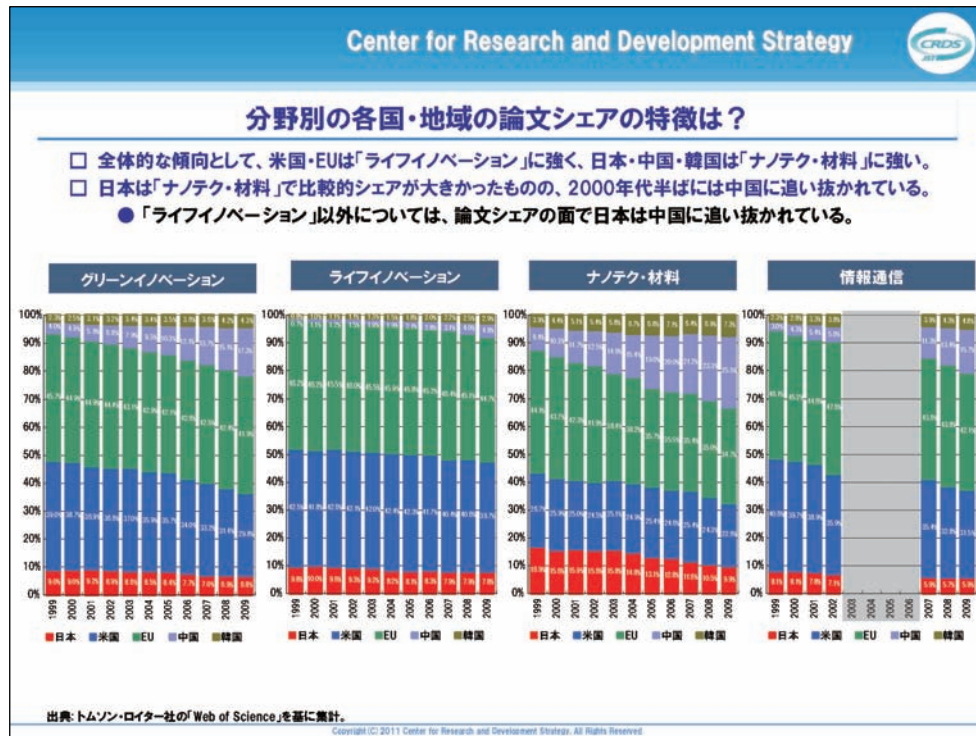
図－5

〈図－5〉 このワークショップの後に、ありふれた元素を使って新しい機能を持つ物質を創ろうということで、私たちが「ユビキタス元素戦略」を提唱します。これがその後、平成19年から始まった文部科学省と経済産業省の省庁連携プロジェクト第1号として具現化します。

平成22年度には、JSTの戦略的創造研究プログラム「CREST」と「さきがけ」に、元素戦略に関する領域ができました。また、今年から文部科学省が新元素戦略プロジェクトを発足させます。これは拠点形成型で、それも期間が10年という本格的なプロジェクトです。そして今秋には、JSTの国際科学技術共同研究推進事業が始まります。さらにEUから申し出があり、「希少元素代替材料」という新しいプロジェクトが立ち上がる予定です。以上が、今までの大まかな経緯です。

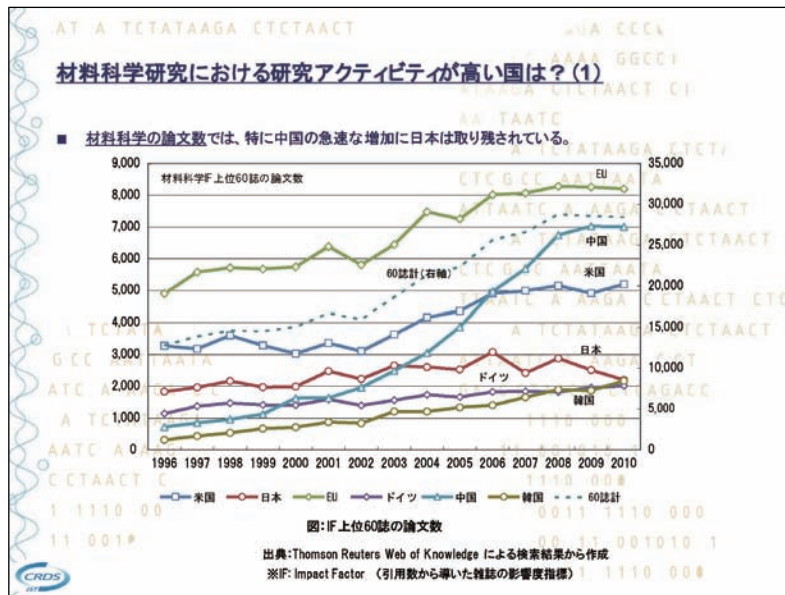
■ 世界に後れだした日本の材料科学研究

では、「戦略」と言わざるを得なかったのはどういうことなのか。グリーンイノベーション、ライフイノベーション、ナノテク・材料、情報通信という重点 4 分野について、論文ベースで日本、米国、EU、中国、韓国がどういう占有率で時代とともに変遷しているかを考えてみたいと思います。



図－6

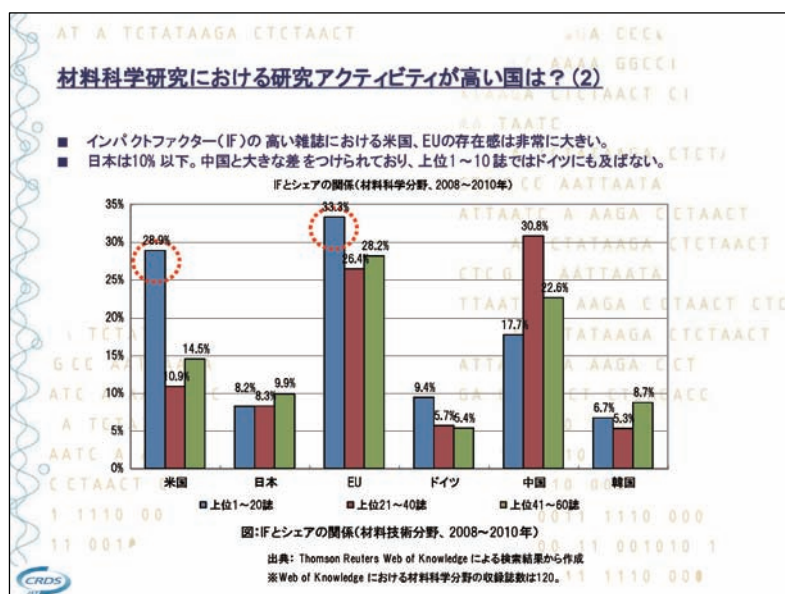
〈図－6〉 ナノテク・材料という分野は、日本が極めて強い分野です。日本の強い製造業というのは、このナノテク・材料分野によって支えられていると言っても過言ではないと思います。ところが、2005 年あたりから急速にシェアが落ちてきます。それと同期するように、中国の占有率が高くなってきます。韓国も伸びてきましたが、飽和してきました。結果的に 2000 年以降、日本はどの分野でもジリ貧になっています。一番強かった材料分野でさえも、2005 年には中国に抜かれています。おそらくこの傾向は現在もっと強くなっていると思います。



図－7

〈図－7〉 このグラフはSCI (Science Citation Index) に載っているジャーナルですから、ほぼ全ての論文を統計したものです。問題はトップジャーナルがどうなっているかということです。材料科学についてトップ 60 誌の年代別推移を見ると、EU は国が多いですからもちろん多いですが、ずっと上がっていています。米国も上がっています。さらに中国は急速な勢いで上がっています。

ところが日本は、1996 年ぐらいから少しずつ上がっていましたが、2000 年あたりからは上がっているのか下がっているのか分からないような状態になっています。現時点では、韓国やドイツとほとんど同じ状態にまで論文数が落ちています。



図－8

〈図－8〉 もう少し詳細に見てみると、2008 年から 2010 年の 2 年間でどれぐらいその論文が

圧倒的に強いのは、やはり米国と EU です。その次は、どの順位のところを見ても中国です。その後になって日本、ドイツ、韓国がどんぐりの背比べになっています。日本は材料分野では非常に強いと言われてきましたが、現時点で見ると中国にとてまかなわない。韓国やドイツと同じぐらいになっている。こうした事実が統計から読み取れます。もちろん日本の産業はまだ強いですが、この論文ベースの影響というのは 10 年後ぐらいに産業界へそのまま反映するのではないのでしょうか。これが、元素戦略が始まったときの材料研究者、あるいは物質研究者の危機感の表れでした。

AT A TCTATAAGA CTCTAACT
JST研究開発戦略センター『戦略イニシアティブ「元素戦略」』より
(2007年発行)

新材料設計・探索

材料探索・設計指針

高度の物質観を持つリーダー
学術的裏付け
経験
「形式知に裏付けられた・暗黙知」

理論・計算・モデル

計算機実験
モデル計算
演算能力
手法開発
データベース

実験的探索手法

作製プロセス
計測評価
高速高性能
パラメータ走査
ソフト開発
機器開発

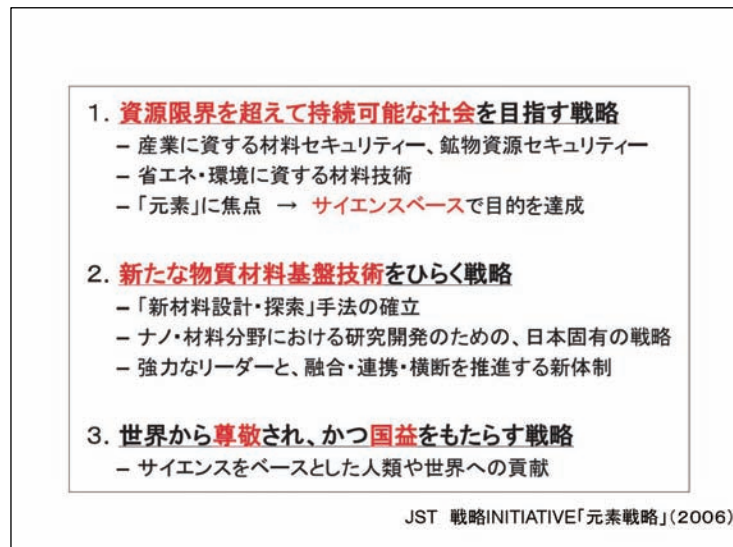
「形式知」

「腕力の効率化武装」

CRDS

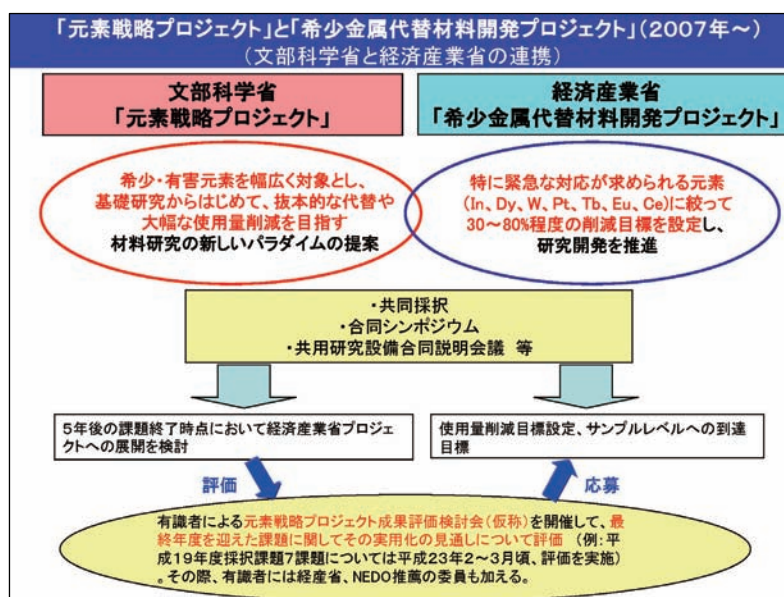
〈図－９〉ではどのように取り組もうかというときに、JST の研究開発戦略センターが『戦略イニシアティブ「元素戦略」』というものを発行します。その中に、新材料設計・探索という視点から新しいことを考えてみようという試みがあります。

そのときに注目されたのは、今まで材料分野というのは、理論や計算という部分についてあまりフォーカスをしてこなかった。またどちらかというと、物性物理と材料分野というのはそれほど強く融合していなかったという事態があると思います。そこで、巻き返すのならばやはり設計で巻き返そうではないかという声が、このときに出てきました。



図－10

〈図－10〉 そしてこの中で、元素戦略はどういう意味があるのか、どういうことをやるのかについて、サマリーが出てきます。まず、資源限界を超えて持続可能な社会を目指す元素戦略である。これはサイエンスベースで行こうということです。2 番目は、新たな物質材料基盤技術をひらく戦略である。ここに新材料設計という指針が入っています。また、これは日本固有の戦略であると言っていますが、これは当時の話です。そして強力なリーダーを立て、そこに集まって分野横断型の新体制を作ろうとなっています。3 番目は、世界から尊敬され、かつ国益をもたらす戦略である。日本には天然資源が少ないので、まず国益を考え、その国益を伸ばしていくと、それは結果的に世界から尊敬されることになる。つまり同じベクトルだということを、ここでうたっています。これが 2006 年の段階で、戦略プロポーザルという形でまとまりました。



図－11

〈図－11〉 そうして、第 1 次の元素戦略が 2007 年から出発します。どういうスタンスで始め

たかという、文部科学省は、サイエンスベースでいろいろな基礎研究から始め、大幅な使用量削減を目指そうということをうたっています。一方、経済産業省は、緊急な対応を求められている7つの元素に絞り、削減戦略を行います。

この両方が1つの傘の下に入って共同で採択して、合同シンポジウムあるいは設備の共用を行います。昨年はこの第1期が終わり、今は2期目の最終年度になっているはずです。うまくいったものについては、文部科学省の成果を経済産業省のプロジェクトへ持っていくような相互乗り入れができる。このようにプロジェクトが設計されています。

「元素戦略プロジェクト」採択16課題		
(1) 豊富で無害な元素あるいは物質による代替材料の研究		
・高分散貴金属ミニマム化触媒の物質設計およびプロセス開発	(白金、パラジウム大幅削減型触媒)	熊本大学 (H20採択)
・脱貴金属を目指すナノ粒子自己形成触媒の新規発掘	(白金、パラジウム大幅削減型触媒)	原子力研究開発機構 (H19採択)
・貴金属フリー・ナノハイブリッド触媒の創製	(白金フリー型触媒)	北海道大学 (H20採択)
・貴金属代替分子触媒を用いる革新的エネルギー変換システムの開発	(白金フリー型触媒)	九州大学 (H20採択)
・低希土類元素組成高性能異方性ナノコンジット磁石の開発	(ディスプロシウムフリー磁石)	日立金属 (H19採択)
・ITO代替としての二酸化チタン系透明導電極材料の開発	(インジウムフリー透明電極材料)	神奈川科学技術アカデミー (H19採択)
・圧電フロンティア開拓のためのバリウム系新規巨大圧電材料の創生	(鉛フリー圧電材料)	山梨大学 (H19採択)
・アルミ陽極酸化膜を用いた次世代不揮発性メモリの開発	(ルテニウム等フリーメモリー材料)	物質・材料研究機構 (H19採択)
・複合界面制御による白金族元素フリー機能性磁性材料の開発	(ルテニウム等フリーメモリー材料)	筑波大学 (H21採択)
・有機分子を活物質に用いた二次電池の高性能化と充放電機構の解明	(コバルトフリー二次電池)	大阪大学 (H21採択)
・エコフレンドリーポストリチウムイオン二次電池の創製	(リチウムフリー二次電池)	九州大学 (H21採択)
・亜鉛に替わる溶融Al合金系めっきによる表面処理鋼板の開発	(亜鉛フリーアルミ溶融めっき鋼板)	東京工業大学 (H19採択)
(2) 戦略元素の有効機能の高度活用		
・材料ユビキタス元素協同戦略	(ランタンフリー鉄系超伝導材料ほか)	東京工業大学 (H20採択)
・サブナノ格子物質中における水素が誘起する新機能	(水素の有効活用)	東北大学 (H19採択)
・ケイ素酸素系化合物の精密合成による機能設計	(ケイ素酸系メソポーラスの活用)	早稲田大学 (H20採択)
(3) 元素有効利用のための実用材料設計技術		
・化学ポテンシャル図に立脚した多元系機能材料の精密制御	(リン化合物の設計)	京都大学 (H21採択)

図-12

〈図-12〉 具体的に採択されたものを大きく分けると、豊富で無害な元素による、希少元素使用材料との機能代替、戦略元素の有効機能の高度活用、最後に実用材料設計技術という3つに分類されます。こういう形で合同プロジェクトが2007年から走っています。

■ レアアース問題で変わった米国の元素戦略

元素戦略が動き出した2007年に、日本化学会元会長で現東京理科大学学長の藤嶋 昭先生が、世界化学会の会長会議で元素戦略を紹介したいということでパワーポイントを用意しましたが、「どうでしたか」とお伺いしたところ、「全く反応がなかったよ」とのことでした。「困っているのはおたくだけではないか」というのが、米国やヨーロッパの対応だったのです。



図－13

〈図－13〉 ところが、2010 年になるとその空気がガラッと変わります。2010 年には、米国化学会の機関誌『Chemical & Engineering News』、米国セラミックス学会の機関誌『Ceramic Bulletin』の両誌で、レアアースの特集が組まれました。この間に何が起ったかということ、実は中国のジスプロシウム問題が起っています。あれですっかり様子が変わってしまい、これは日本だけの問題ではなく世界的な問題であると、世界中が一挙に動き出したのです。

AT A TCTATAAGA CTCTAACT

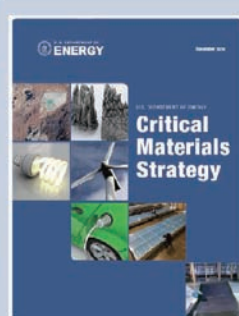
米国“Critical Materials Strategy (重要物質戦略)”

■ 米国エネルギー省 (DOE) が2010年12月15日に発表した戦略レポート

- レアアースの一部を含む鉱物(14種類)を対象に広範な分析、評価を実施。
 - ランタン、セリウム、プラセオジウム、ネオジウム、サマリウム、ユロビウム、テルビウム、ジスプロシウム、イットリウム、インジウム、ガリウム、テルル、コバルト、リチウム
- 特に風力発電、電気自動車、太陽電池、高効率蛍光灯の4つの技術で用いられる重要材料に焦点。
- 重要物質の国内生産の許可、国家備蓄、外交分野などに関して提言。

■ クリーンエネルギー技術としての需要および供給リスクの観点から重要度が極めて高い物質(6種類)

- ジスプロシウム、ネオジウム、テルビウム、ユロビウム、イットリウム、インジウム (Dy, Nd, Tb, Eu, Y, In)



- ・クリーンエネルギー技術における重要材料の利用
- ・重要材料の歴史的な供給、需要及び価格
- ・米国政府内の既存プログラム
- ・他国での材料戦略
- ・供給需要予測
- ・プログラム及び政策の方向性
- ・元素別評価、市場占有率仮定及び材料内容推測
- ・第111回レアアース学会及び重要材料法
- ・2010 TREM会議
- ・クリーンエネルギー技術のレアアース元素研究開発における日米討論会議
- ・未来のクリーンエネルギーのためのレアアース及び他の重要材料に関する大西洋ワークショップ
- ・ARP-Aワークショップ議題

出典: U.S. Department of Energy: "Critical Materials Strategy" (Dec. 2010) を元に JST 研究開発戦略センター作成

図－14

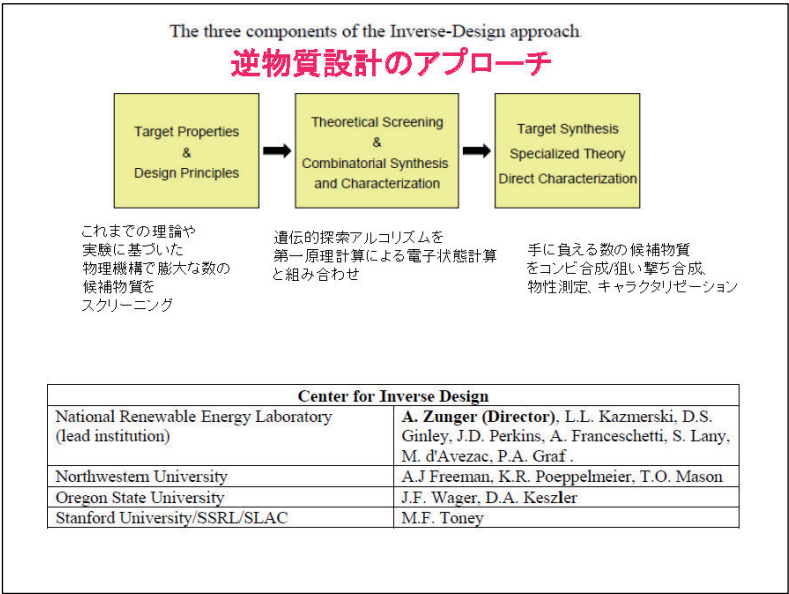
〈図－14〉 その後、立て続けにいろいろな施策が出てきます。米国が考えたのは、“Critical Materials Strategy (重要物質戦略)”です。米国にとって重要な元素をリストアップし、それにフォーカスを当てて行うというものですが、これにはかなり複雑な要素が含まれます。1 つは、

軍事に必要なものです。これは日本ではなかった視点です。もう 1 つは、米国の場合には自分たちの国に豊富な資源がありますが、その米国ですらほとんどを輸入に頼っていて、なおかつ産業的に重要な物質があります。それをアンドで結び、Critical Element という形でリストアップして、戦略を始めたわけです。

同時に、米国の場合はここで基礎サイエンスの問題が出てきます。米国のエネルギー省が Energy Frontier Research Centers というものを 50 か所ぐらいに作りました。これは主に国立の研究所を中心にその周りの大学をつなげ、いくつかのブランチを作って始めたものです。

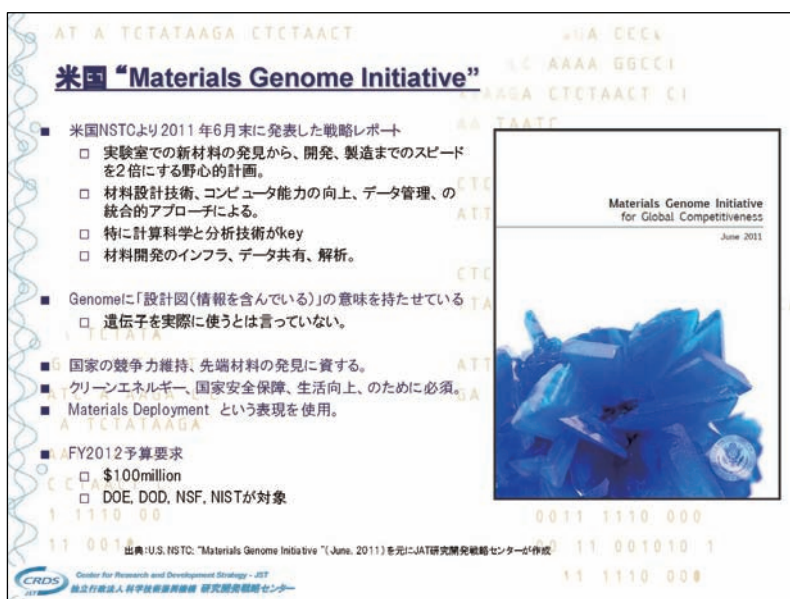
この中で、コロラドにある再生エネルギー研究所の Zunger 先生が、Inverse Materials Design Center を立ち上げます。これはどういうものか。

概要には、「例えば高温超伝導、鉄系超伝導などがいろいろ見つかってきたけれども、これは偶然に見つかったもの “accidentally-discovered materials” だ」と書いてあります。そして、このまま行くのではまずい。今までは新しい物質を創り、それらの機能をいろいろと調べていた。そうではなく、我々が欲しいのは「物質」ではなく「機能」である。機能を求めるためには、まず必要な電子状態を決め、それに対し実際の原子配置のものを作り、これで新材料あるいは画期的な機能を持つ物質を設計しよう。それができれば苦労はしませんが、米国はこういうことを初めて言い出します。



図－15

〈図－15〉 しかし、具体的な手法になると途端に現実的で、我々がやっていることとあまり変わらないと思いますが、はじめにターゲットとなるマテリアルの性質を決めておき、デザインの軸を決めます。実際には、ここで理論的にいくつかの可能性を探っておき、あとは効率よく創ってスクリーニングしようというものです。これが “Inverse Materials Design” というコンセプトで、実際に米国で動いています。



図－16

〈図－16〉 それがもう1段階ジャンプしたものが、“Materials Genome Initiative”です。要するに、創薬においてバイオのほうで使っていたゲノムを調べてみて、それから効く薬を創ろうというのと同様に、マテリアルの世界にも相当いろいろな蓄積があるではないか。それをゲノムとみなしていろいろな要素を解析して、それに合った創り方、あるいは物質を探そうではないかという発想です。こういうことで“Materials Genome Initiative”戦略が2011年に出てきます。非常に目の覚めるような、米国らしい発想だと思います。

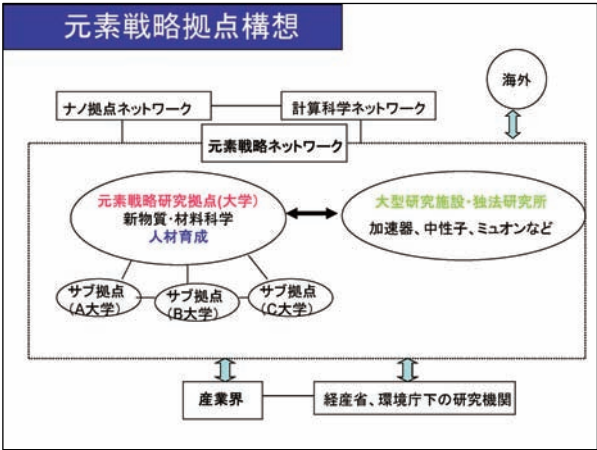
■ オールジャパンによる拠点形成型「新元素戦略プロジェクト」



図－17

〈図－17〉 それに対し我が国はどうなったかということ、2011年3月号の「Nature Materials」に、中村栄一先生が希少な化学元素をどうやってマネージするかというコメントリーを發表します。また、朝日新聞が「資源の制約に知恵で挑む」という社説を出します。これは非

常に見事な見出しだと思います。日本は資源のない国だけれども、それに対し知恵で挑もうということが取り上げられていて、元素戦略の立案に関わった人の思いというのが、この一文に凝集されていると思います。



図－18

〈図－18〉 その後、これからサイエンスの部分はどうしていくのかについて、元素戦略の検討委員会ができます。その中で、やはりオールジャパンで拠点を作って、この元素戦略を進めていこうではないかという話になりました。それが「元素戦略拠点構想」です。この中には、例えば大学や国立研究所を核にして、大型の研究施設、加速器、あるいは中性子などは日本がかなり優位なものを持っていますが、それら全部をこの中に有機的に入れ、1つのプロジェクトとして走らせ、拠点を形成しようではないかという構想が出てきます。これが2年ぐらい前だったと思います。

MEXT 新元素戦略プロジェクト(拠点形成型)

代表研究者の強力なリーダーシップの下、物質の機能を支配する元素の役割の理論的な解明から新材料の創製、特性評価までを、拠点を中核として形成する共同研究組織の密接な連携・協働によって一体的に推進

期間:2012年7月から10年間

<磁石材料領域>
代表研究者 広沢 哲 (独)物質・材料研究機構 特別研究員

<触媒・電池材料領域>
代表研究者 田中 庸裕 京都大学 大学院工学研究科 教授

<電子材料領域>
代表研究者 細野 秀雄 東京工業大学 フロンティア研究機構 教授

<構造材料領域>
代表研究者 田中 功 京都大学 大学院工学研究科 教授

図－19

〈図－19〉 その結果として、今年の7月から文部科学省の「新元素戦略プロジェクト」が発足します。磁石材料領域、触媒・電池材料領域、電子材料領域、構造材料領域という4つの領域が立ち上がりました。



図－20

〈図－20〉 具体的に紹介すると、東京工業大学の場合、東京工業大学が核になり、物質・材料研究機構と高エネルギー加速器研究機構がタッグを組みます。そこに東京大学物性研究所の計算物質科学イニシアティブが加わり、1つの体制で推進します。他の拠点についても、ほぼこうした形で研究プロジェクトが組まれています。

■ 各国の対資源制約アプローチ



図－21

〈図－21〉 ところで、主要国の材料研究と元素制約へのアプローチというのは、国の特徴が非常によく出ています。日本は、この元素の制約を技術開発でクリアしようというのがかなり大きなスタンスです。米国の場合は、安全保障が表に出てきています。EU の場合は、やはり基準・

規制が非常に大きなアプローチになっています。中国はたくさんの資源を有していますが、元素戦略に関しては非常に慎重です。もちろん自分たちで資源を独占したいという思惑がありますが、それだけでは自国分ですら確保が難しいのが現状で、実際には他の資源国を取り入れた形で元素戦略が動いています。韓国の場合は、最終製品の大部分がディスプレイ関係や車と決まっているので、それに関係した元素戦略という形です。こうした各国の特徴が、この元素戦略の攻め方に如実に現れています。

元素戦略に関連する国の役割		文部科学省	経済産業省	厚生労働省・環境省	外務省ほか
新機能戦略	ありふれた元素から今までにない機能を引き出すことによって、新たな活用を生み出す。	○			○外交
代替戦略	希少元素や規制元素の豊富で無害な元素による代替、別ルートによる同一機能の実現を目指す。	○完全代替が可能な基礎的な研究	○具体的な元素を対象に早急な対応が必要な実用化技術開発		
減量戦略	希少元素や規制元素の使用量を極限まで減らす。	○大幅削減が見込まれる基礎的な研究	○具体的な元素を対象に早急な対応が必要な実用化技術開発		
循環戦略	希少元素の循環利用や再生を推進する。	○	○	○	
標準・規制戦略	標準・規制という高いハードルを自らに課して乗り越えることで、イノベーションを目指す。		○	○	
資源確保戦略	資源外交、資源開発で元素を確保することによって不足に対応する。		○		
備蓄戦略	元素を備蓄することによって、不足に対応する。		○		

図－22

〈図－22〉では、我が国の元素戦略では各省庁がこういった役割を担うのか。文部科学省、経済産業省、厚生労働省、環境省、外務省という形で見ていくと、文部科学省のほうはサイエンスベース、それなるべく基礎から行く。経済産業省は元素を具体的に絞って実用化研究のほうに持っていく。厚生労働省や環境省については、規制や資源循環、リサイクルの問題を大きく取り上げています。

■ 逆境は国内研究巻き返しの好機

レアアース危機は好機

- 日本の物質・材料研究は現在 世界No.1(でも危ない)
- その起源は、1986年の銅酸化物の高温超伝導体の発見の際に、多くの野心的研究者がいろいろな分野から参入し、厳しい国際競争によって、人材が育ったこと。
- 日本の強い製造業はそれに支えられてきた
- 2009年に物質・材料分野のトップジャーナルの論文掲載数で、2010年には特許出願数で中国に抜かれた
- 新たな展開の巻き返しには、強いエンジンが不可欠

元素戦略を物質・材料研究のジャンプアップを

図－23

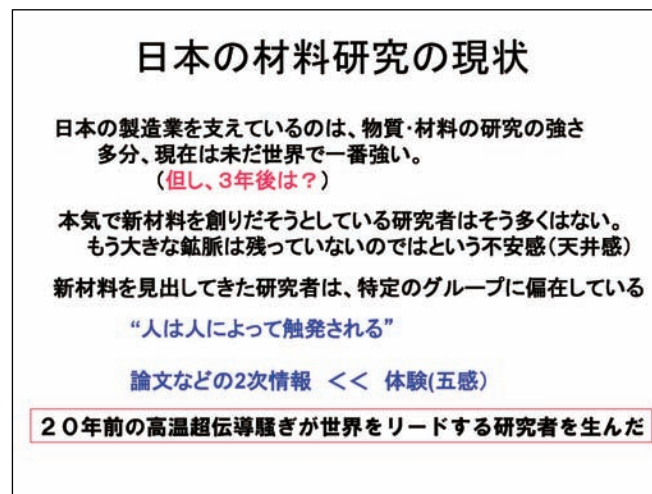
〈図－23〉 ここからは研究の話をさせていただきます。よく言いますが、レアアース危機はある意味で好機ではないかと思えます。1970年にカリフォルニアでマスキー法が成立して、当時のビッグ3（GM、フォード、クライスラー）をはじめ、マスキー法はクリアできないという大合唱になりましたが、それをクリアしたのがHONDAのCVCCです。ビッグ3ができない、日本のトヨタも日産もできないとあきらめていたのを、HONDAという二輪出身のメーカーが技術でそれをクリアした。

当時私も若かったものですから、それを非常に誇りに思いました。レアアース危機というのは、それと似たようなところがあると思えます。

日本の物質・材料研究は現在世界のトップクラスですが、危ないというのが実情です。なぜ日本はこの分野が強くなったかということ、20数年前に起こった銅酸化物の高温超伝導研究が起源だと思えます。あの研究は大騒ぎをしたわりに、何も出てこなかったではないか、お金の無駄遣いだと言う人もいます。しかし、現場にいとそんなことは絶対にありません。あれぐらい一流の研究者を育てたテーマはない。日本が物質・材料分野で世界を牽引する立場になったのは、あの高温超伝導の大騒ぎがあったからです。どのように人材育成を行ったらいいかというのは、それがお手本になると思えます。

日本の強い製造業は強い研究に支えられてきましたが、徐々に危ない状態になっています。トップジャーナルの論文掲載数も抜かれ、もちろん特許出願数でも中国に抜かれています。そのため、新たな展開には新しく強いエンジンが必要です。それは例えば、元素戦略のように、難しくサイエンスをまともにやらないと達成できない。なおかつ、それができることによって国益になり、人類にも役立つというプロジェクトだろうと思えます。

■ 新発見が遍在する新物質・材料研究現場



図－24

〈図－24〉 日本の材料研究の現状は、実は本気で新材料を創り出そうとしている研究者はそれほど多くありません。誰かが創ったものを改良したり、その性能を上げたりすることは非常に重要なことですが、もう新しい鉱脈はなくなってしまったのではないかと、もう掘ってしまったのだろうという天井感があるように思えます。

本当に天井があるのかというと、実はそうでもないと思います。その証拠に、新材料を見だしてきた研究者はある特定のグループに偏在しています。宇宙線のように確率的に見つかるなら、いろいろなところからまぐれ当たりが出るはずですが、1 つ見つかったところから 2 つ目が出て、2 つ見つかったところから 3 つ目が出る。そのように非常に集中しています。

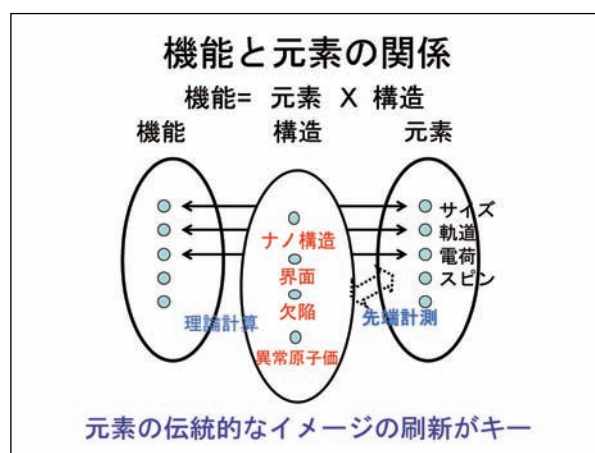
それはなぜか。これには 2 つの理由があると思います。1 つは、人は人によって触発されるということです。ある人が自分たちの研究室の先輩や後輩を見て、いつも一緒に生活をしている人が非常に評価の高い仕事をする、あの人ができて私ができないはずはないのではないか、という気になります。これは非常に大きなモチベーションになるだろうと思います。

ところがそれが論文のようなものになると、論文は試行錯誤したものを全部並べ替えて論理的に書きますので、読むと自分にはとてもできない、という気分になってしまいます。特に完成度の高い論文ほどそうだと思います。そのため、生の 1 次情報に触れられるということが、新しい材料や物質がどんどん偏在して出てくる 2 つめの理由だと思います。ですから、高温超伝導騒ぎが世界をリードする研究者を生んだ裏では、そこには先輩・後輩もなく、非常に厳しい議論が行われたのだと思います。

もう 1 つ、それに類する分野があります。それはアモルファスシリコンです。アモルファスシリコンは 1975 年に発見されましたが、応用物理学会では当時 30 代の人たちがものすごい勢いで議論をしていて、けんかをしているのではないかなと思うような分野でした。我々の少し上の世代ですが、それから 20 年たち、その中から非常に立派な先生方が出てきました。これは高温超伝導と非常によく似ていると思います。

新しいものが出て、先輩・後輩もなくみんなで先陣争いをする。それと同時に、世界的なスケ

ールでの競争も猛烈に厳しい。そういった中で切磋琢磨することにより、力量のある新しい研究者が育つのだらうと思います。



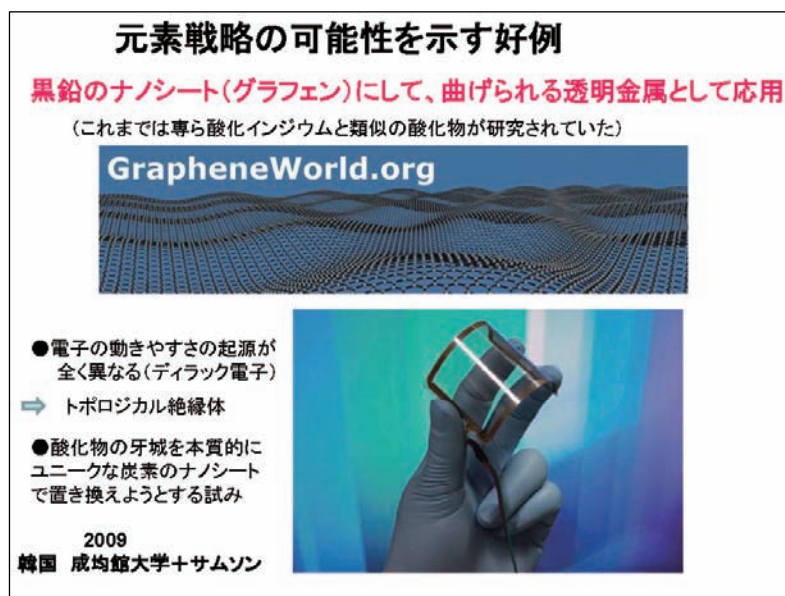
図－25

〈図－25〉 さて、本題に戻ってもう少し現実的に考えてみると、機能と元素というのはもちろん 1 対 1 の関係にあるわけではありません。しかしどんなに難しいことを言っても、何か物を創るときには、最後は天秤で薬品を測って混ぜて創ります。そうすると、どの元素を選ぶかが大事ですが、研究者はみんな必ずある元素に対して固定的なイメージを持っています。このイメージを崩さないと、新しい元素戦略にはならないと思います。

例えば、強い磁石になるものはコバルトを含んでいる、コバルトでなければ強い磁石はできないという考え方では、新しい元素戦略にはなりません。ネオジウム磁石を創った佐川真人先生のすばらしいところは、コバルトではなく鉄で創ったということです。そういう今までとイメージが変わるようなものを創っていかなければいけません。

そのためには、機能と元素は構造を媒介として結ばれますが、構造にはナノ構造、界面、欠陥、異常原子価などがありますし、元素のほうもサイズ、軌道、電荷、スピンなど、いろいろな自由度があります。この中で、なるべく直線的な相関ではなく、「こんな創り方があったのか」「そんなものでこんなものができるのか」というルートを開拓することが、研究としては一番重要だろうと思います。一言で言うと、「元素の伝統的なイメージの刷新」がキーになると思います。

■ 伝統的なイメージ刷新の好例



図－26

〈図－26〉 私自身が感心した元素戦略の 1 つの好例として、グラフェンを挙げたいと思います。簡単に言いますと、グラフェンは鉛筆の芯を 1 枚はがしたシートです。2010 年に Geim 博士がこの研究でノーベル賞をもらいましたが、これを透明導電体の代わりにしようという研究があります。実は、これは日本ではなく韓国が始めました。私自身は透明半導体のエキスパートですが、これまでは酸化インジウムの代わりに酸化亜鉛を使うとか、エキスパートが 10 人いたら 10 人が思い付くようなことをやっていました。しかしグラフェンは、透明導電体は酸化物である、というイメージにこだわらなかったからこそ生まれたのです。

もう 1 つ私が驚いたのは、実はグラフェンの電子の動きやすさの起源が、酸化物のそれと全く異なっていた点です。酸化亜鉛や酸化インジウムの場合は、バンド構造の中に有効質量が少しだけ下がる理由がありますが、そうではなく質量がゼロになる電子だったのです。物理の人はこれを「ディラック電子」と呼んでいますが、そういうものが世の中にあり、材料屋にとって全く新しいコンセプトの電子を透明導電体の代わりにできる。僕にとってそれはたいへんな驚きでした。

なぜかという、物性物理の分野では、こういうことは 1950 年代から知られていて、いまさら何も新しくないというのが物性理論のエキスパートたちの意見ですが、少なくとも私の周りの材料屋は全く知らなかったのです。それは、あまりにローカルな自分たちのテリトリーにこだわって、物性物理の領域の話を知らなかったということです。これは非常に反省しています。

ある領域の人たちにとっては常識だったものが、我々にとっては全く情報すらなかったという事実は、元素戦略に必要な機能を手に入る元素から創っていくという意味において、新鮮な驚きがあります。もう 1 つ、ディラック電子が存在する物質が「トポロジカル絶縁体」と呼ばれるものですが、これも透明導電体としては非常に面白い可能性が出てきていると思います。

■ ありふれた物質から新材料を創りたい

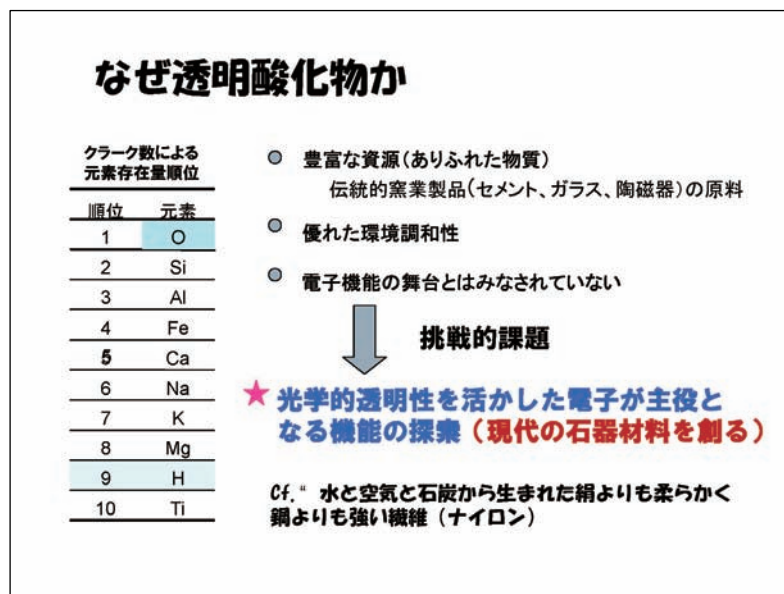


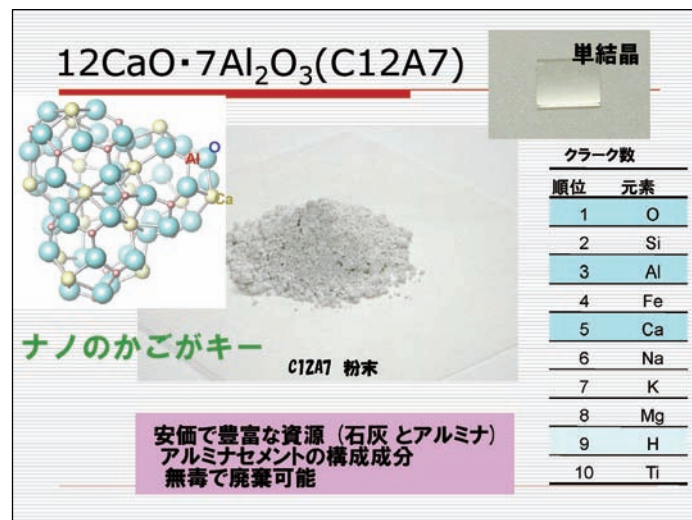
図-27

〈図-27〉 ここからは私たちの話をさせていただきます。私自身はセラミックスの研究者です。セラミックスというのは一番古い素材で石器時代からあります。構成元素も、クラーク数の1番から10番までの元素でほとんどできています。例えば石ころは何からできているかというと、マグネシウムと酸素とシリコンです。あるいはアルミニウムの場合もあるかもしれません。ではガラスは何でできているかというと、カルシウムと酸素とナトリウムとシリコンです。豊富な資源で、ありふれたものからできています。これは伝統的な窯業製品の原料です。

また優れた環境調和性があり、ごみ箱に捨てても怒られませんが、こういったもので電子機能が出るとはほとんど思っていませんでした。こうした古い材料をもう一回新しい目で見直して、電子が活躍するような新しい機能を創りたい。いわば「現代の石器材料を創る」ということをやりたかったわけです。

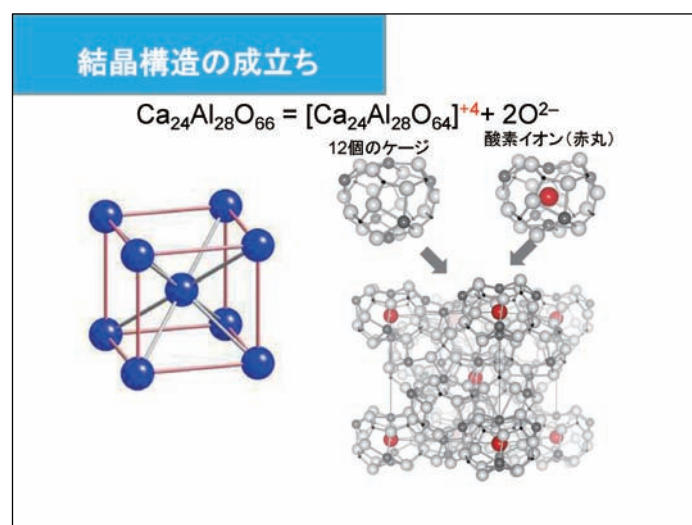
そのモチベーションになったのは、ナイロンの発明です。1935年に、デュポン社にいたCarothers博士がナイロンの合成に成功します。それを発売したときのうたい文句は、「水と空気と石炭から生まれた絹よりも柔らかく鋼よりも強い繊維」でした。私はこういうものを創りたいと思いました。そのためにこういう研究をやっているというのが本音でして、今も強いモチベーションになっています。

■ 元素戦略から生まれた化合物C12A7 エレクトライド



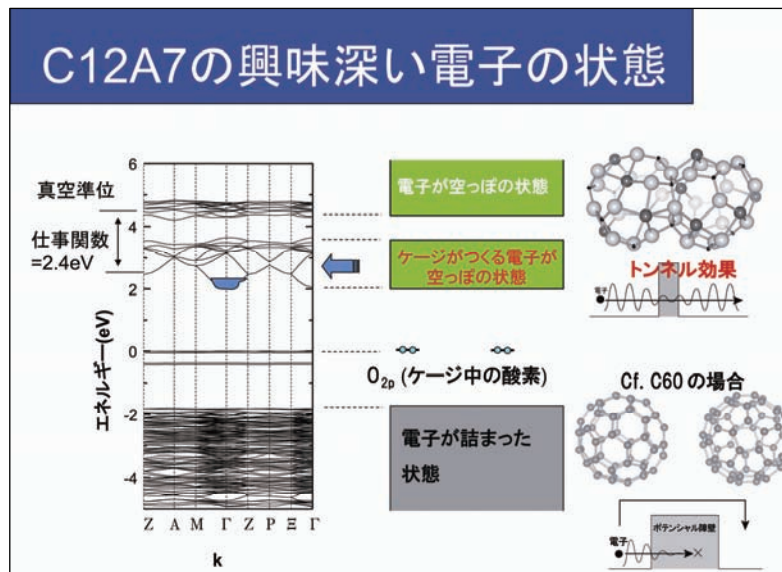
図－28

〈図－28〉 今日お話をするのは、酸化カルシウムと酸化アルミニウムの化合物である「C12A7」という物質です。これはクラーク数の 1 番、3 番、5 番の元素のみで構成されています。値段はどれくらいかというと、1 トンが 1 万 5000 円ぐらいです。ということは、キログラム 15 円です。これは実際に、アルミナセメントのかなりメジャーな成分として使われています。



図－29

〈図－29〉 ところがこれは、非常に面白い構造をしています。どういうことかというと、かごの構造からできています。無害で、もちろん廃棄可能です。例えばサイコロの頂点に原子を 1 個ずつ置いて、真ん中にも置く。これは体心立方格子と呼んでいますが、これを 1 つのケージと思って配置して、面を共有してつなげると C12A7 の結晶構造ができます。こんな複雑な構造を作るのはたいへんではないかと思われるかもしれませんが、これは炭酸カルシウムとアルミナを混ぜて 1000℃に熱すれば必ずできます。



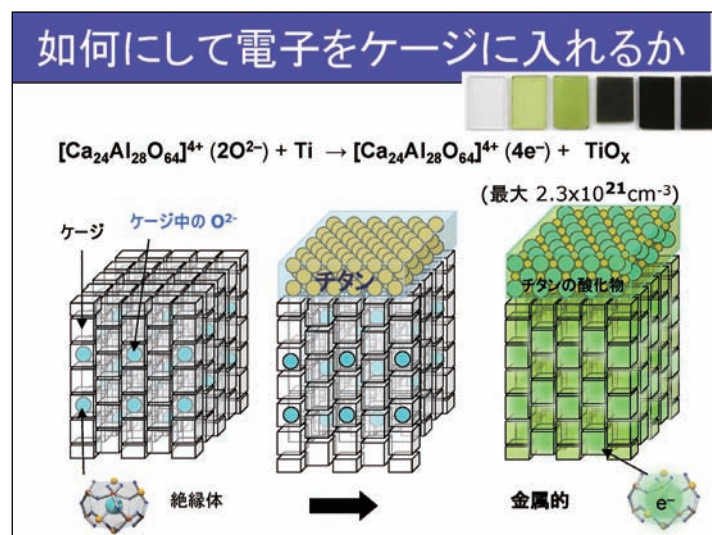
図－30

〈図－30〉 しかし、この物質の電子は非常に変わった状態になります。この物質の特徴というのは、基本的に石灰（CaO）と同じ構造をしています。違う部分が 2 つあります。1 つは、普通の酸素よりも高い位置に酸素の軌道があります。ケージ（かご）がプラスの電荷を持っているため、その中にマイナスの電荷を持つ酸素が入りますが、ケージの大きさよりも酸素の大きさのほうが 50% も小さい。結晶というのはきっちりとぶつかるようにできていますが、この場合は入れ物のほうが大きい。ですから、酸素がふわっと入った状態になって、酸素の軌道のレベルが高くなります。

もう 1 つは、非常に分散の大きいバンドがあります。これは何かというと、C12A7 の結晶構造はケージがある面を共有してつながっていますが、この中に入った電子というのは壁を抜けてしまいます。つまり、量子力学で言うところの「トンネル効果」が、この物質の中では起こっているのです。ですから、これがあるために非常に大きい、電子の通りやすい道ができています。

ちょっと考えると、この構造は C60（バクミンスターフラーレン）と同じではないかと思われるかもしれませんが、C60 ではこういうことは起こりません。C60 の場合は全体が中性なので電荷を持っていない。なおかつ、結晶がふわっとぶつかっているだけなのでこの間に距離があります。また、この中に電子は入れられません。すると壁によって電子は動けませんので、C60 というのは結晶を作ってもあまり面白いことはありませんが、類似の構造でケージの壁がプラスを持っていて、それが面を共有することにつながると、この中に電子が動ける道ができます。

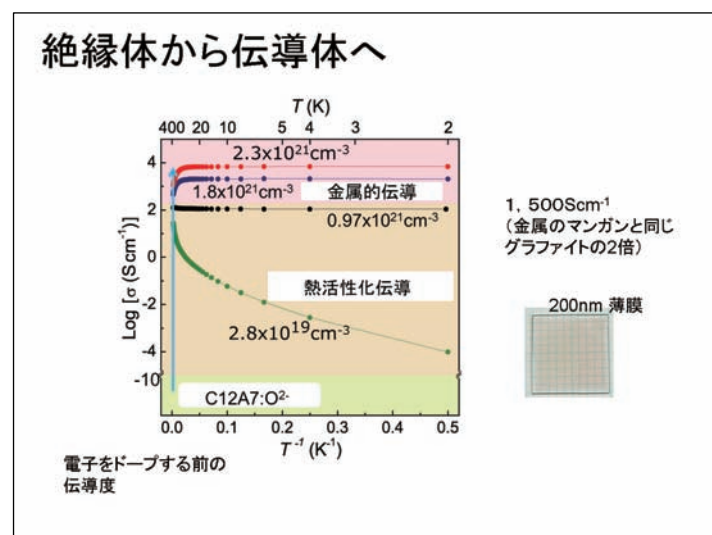
ところが光で見ると、電子が光を吸収して高いエネルギー状態に飛び上がりますが、実はこのバンドへの光の遷移確率はゼロです。ですから光吸収では確認できず、ここにバンドがあるということが分かりませんでした。実際にこれを確かめるために、我々はこの中に電子を入れてみました。



図－31

〈図－31〉 いろいろな方法がありますが、セメント成分の C12A7 の結晶を作り、それを金属のチタンと一緒にガラス管に入れて 1000℃に加熱します。すると何が起こるかという、チタンが蒸気になってチタンの薄膜ができます。高温になると、中に入っていた酸素がよく動くので表面まで上がってきて、表面でチタンと酸素が非常に強い結合を作ります。そうすると、 O^{2-} （スーパーオキシド）が入っているものが取られてしまいますので、ここに何か入らなければいけない。そこでこの中に電子を入れようと試みたのです。

もしこの反応が 100%進むと、 2.3×10^{21} の電子がこのかごの中に入るはずで、実際に入ります。すると、はじめは真っ白い粉です。真っ白い粉というのは、空気を抜くとガラスのように透明になります。はじめはこれも透明でしたが、ずっと電子を入れていくと緑の色が濃くなります。黒くなっているのは、緑が濃くなっているだけです。

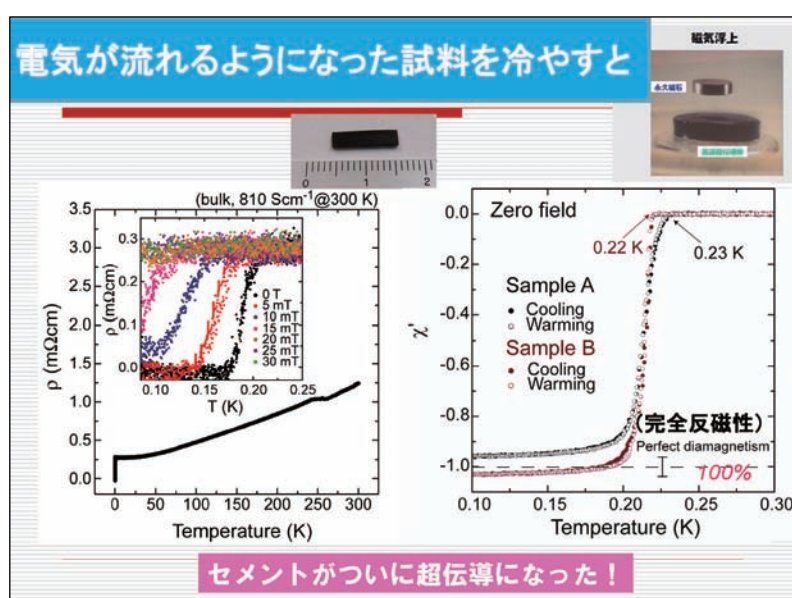


図－32

〈図－32〉 このときに電気の流れやすさ（伝導度）はどうなるのかを調べてみると、はじめは

室温で 10^{-10} 程度、すなわち立派な絶縁体です。ところがこの中に電子を入れると、すぐに 10 桁ぐらい、あるいは 12 桁も伝導度が上がります。この場合は、温度が下がると伝導度が下がるのでまだ半導体的要素がありますが、 1×10^{21} の電子を入れると温度に対し全く変わらなくなります。それ以上入れると、温度が下がると伝導度が上がるという、金属的な伝導になるわけです。どれぐらいの伝導度まで行くかという、金属のマンガと同じぐらいになります。同時にどの程度の着色かという、200nm の薄膜でも薄い着色で済むほどの金属的伝導を示す膜が出てきます。使っているのは石灰とアルミナだけです。両方とも典型的な絶縁体にもかかわらず、それから半導体、金属ができました。

■ セメントが超伝導体に！



図－33

〈図－33〉 この金属になったものは、温度を下げると抵抗がゼロになります。これは超伝導だと思います。超伝導ならば、磁力線を外に体積分だけ排斥してしまうことでいわゆるマイスナー効果になりますが、実験的にはほとんど 100% の超伝導がでてきました。温度は低いですが、セメントが超伝導になったわけです。

絶縁体だと思っていたものが半導体になり、透明金属になり、超伝導になりました。これはつまり、半導体とか、金属とか、超伝導というのは物質によって決まっているのではない、我々の腕と工夫次第で変えられるということです。

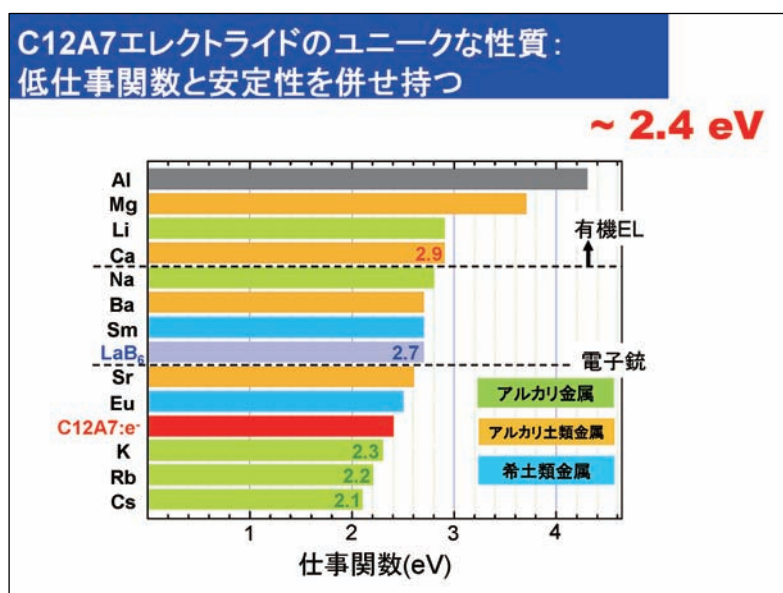
これについては非常に面白い逸話があります。いま私は超伝導にかなり一生懸命に取り組んでおりまして、2006 年にこの研究の論文を発表しました。ちょうど同じ時期に、皆さんが半導体で使っているシリコンウエハに、ボロンをたくさん加えると超伝導になるという論文がでてきました。そのときに、新しい超伝導体の研究者としては非常に有名なエキスパートであるプリンストン大学の Robert Cava 教授が、雑誌「Nature」に“Super silicon”という記事を書きました。その記事の中で教授は、「実は超伝導というのはそんなに珍しいことではない。1 年に 1 つや 2 つ

新しい物質が見つかった。今回はついにシリコンまで超伝導になった。」と書かれています
が、しかし最後のところで、「もしコンクリートにドーピングして超電導体になれば、私はもう
辞める」と言っています。本当にこう書いてあります。

これが超伝導になったので、2007 年の大晦日の研究室を閉めるとき、彼に「超伝導になったけ
れども」というメールを打ったら、僕の家までは 30 分ほどなのですが、家に着いたらもう返事が
来ていて、「確かに超伝導になっている。言わなければよかった。しかし、私はまだ子どもが大
学生なので辞めない（笑）。」

ここまでなら非常に単純なストーリーですが、超伝導の研究者はそんなに甘くありません。彼
は何をしたかという、彼の研究室に留学したことのある日本人の先生に、あれは絶対に超伝導
になるから、単結晶を作って俺のところに送れと言ったそうです。超伝導の新物質研究のフロン
トに 20 年も頑張っているような人は、一筋縄ではいきません。そういう逸話があります。

■ C12A7 エレクトライドが併せ持つ低仕事関数と安定性



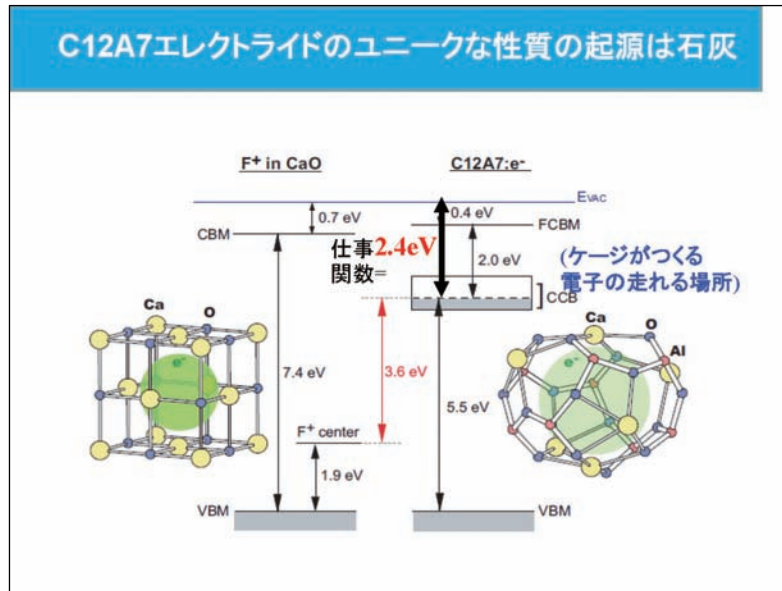
図－34

〈図－34〉 この物質のユニークな性質は、実は電気が通るところよりも、むしろ低仕事
関数と安定性を併せ持つというところ。どういうことかという、金属の性質を表すもの
には電気がどれくらい通るかということと、もう 1 つ固体の中から動ける電子を真空中に取り出す
のにどれくらいエネルギーが要るかがあります。これはいわゆる「仕事関数」と呼んでいるもの
ですが、この物質の仕事関数は極めて小さい。

例えば、金属のナトリウムを水の中にさらすとすぐ燃えます。金属のカリウムだったら封を切
った瞬間に発火します。こういうアルカリ金属は仕事関数が非常に小さく、イオン化しやすい。
しかし必要なのは、イオン化しやすく、なおかつ安定な金属です。そういったものにはいろい
ろな用途があります。

ところが今までのものを見ると、仕事関数の低い金属というのは化学的に活性です。例えばカ

リウムなどはその典型ですが、仕事関数が 2.3 ですからすぐに燃えたり爆発したりします。アルミニウムは仕事関数が 4.3 です。この場合、ハンドリングは容易ですが仕事関数が大きい。仕事関数が小さく安定した金属はないか。そこでこの C12A7 に電子を入れたものの仕事関数がどれほどかという、金属のカリウムと同じぐらいです。なおかつ安定性があり、手で持てる。ポケットの中に入れてもなんということはない。なぜこんなことが起こるのか。



図－35

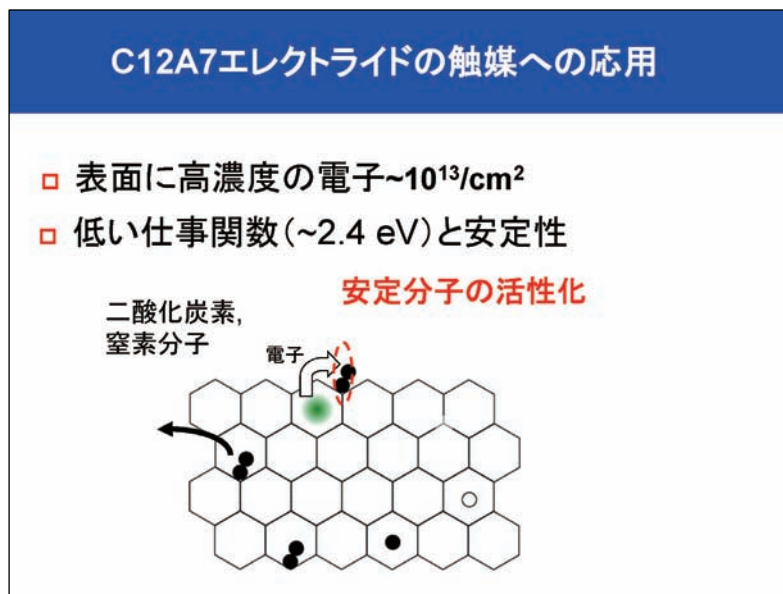
〈図－35〉 その理由は非常に簡単です。この C12A7 の電子物性の親の物質は石灰です。左の図は CaO の中にいる酸素を取って、そこに電子を入れたものです。

これは「F+center」と呼んでいますが、CaO の電子状態と C12A7 に電子を入れたものの電子状態は非常によく似ています。しかしバンドギャップを見ると、ある基準に沿って電子を入れると、石灰の中の電子というのは深い位置になります。ところが C12A7 の中の電子の位置というのは高く、3.6eV もあります。逆に言うと、仕事関数が小さくなります。

それにもかかわらず安定なのはなぜかという、基本的に電子とカルシウムというのはなるべく近くてきっちり結び付いているほうがいいのですが、C12A7 の中ではアルミニウムがずっと引っ張りあって、この距離は遠くなっています。ですから、電子は極めて不安定です。ところが、周りのケージがお互いに引っ張りあってるので崩れません。

実は金属の性質を担っている電子というのは、この隙間にある電子です。構造を支えているのは周りのケージを作っている電子です。ですから、構造を支えているものと金属の性質を担っているものが、空間的に分離しています。こういう発想をすれば、一見矛盾するような性質を 1 つの物質の中に入れ込むことができます。実際に酸素を入れようとしても止まってしまいます。水も入りません。つまりは、手でハンドリングでき、金属のカリウムと同じぐらいの仕事関数ができたことになります。

■ C12A7 エレクトライドの触媒への応用

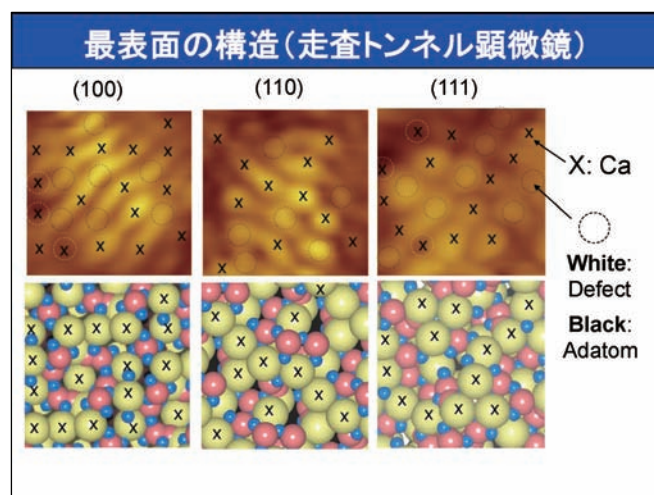


図－36

〈図－36〉 これを使っていろいろな応用をしてきましたが、その前にアンモニア合成の話をしてしたいと思います。酸素の代わりに電子が入っている C12A7 を「電子化合物（エレクトライド）」と呼んでいますが、この物質は表面に電子が $10^{13}/\text{cm}^2$ 個あります。仕事関数は 2.4 で、化学的に安定です。こうした非常に特異な性質を使い、安定な分子を活性化してみたいと思いました。

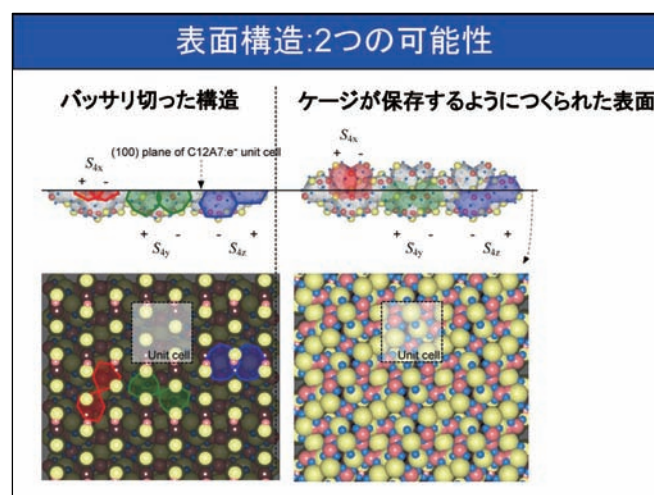
例えば窒素だったら三重結合ですから、そこに電子を放り込めば窒素の強い三重結合が切れるかもしれない。あるいは炭酸ガスは非常に安定ですが CO_2 の結合は強いので、その反結合性軌道に電子を入れることができれば活性化できるかもしれない。こうした発想がきっかけになっています。

そのためには、最表面で結晶と同じような構造が本当に保たれているか確認する必要があります。走査トンネル顕微鏡（以下 STM）を使って最表面の構造を決めましたが、2 年間ぐらい全く像が見えませんでした。超高真空中で割っただけでは見えませんでした。最終的には超高真空中で割って、なおかつ 950°C に加熱した状態にすると、いつもきちんとした像が見えるようになりました。



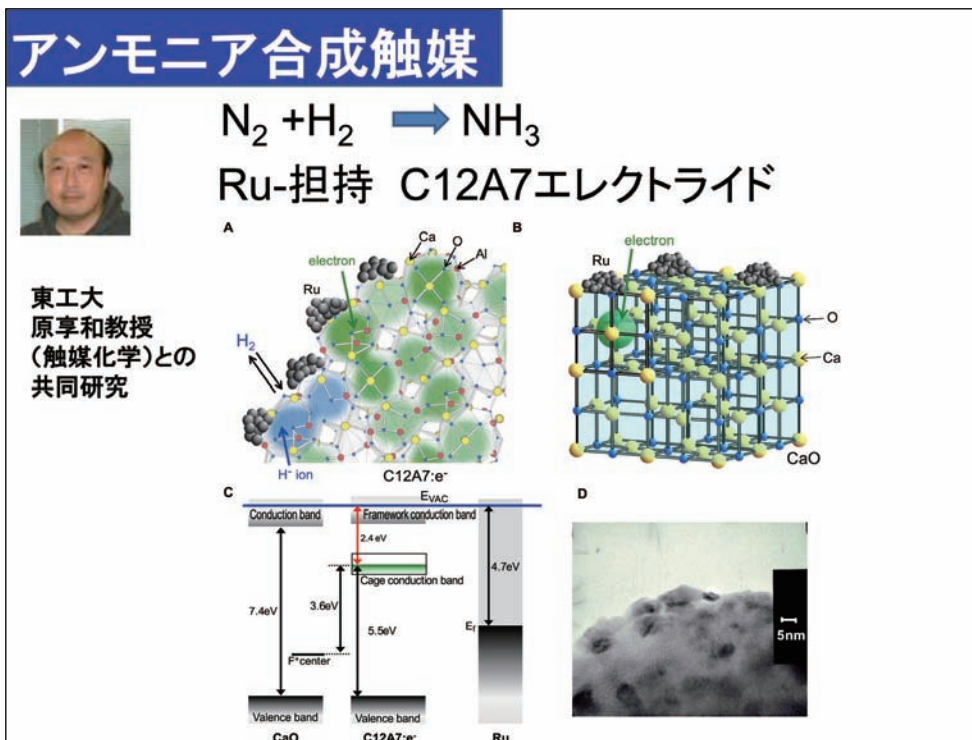
図－37

〈図－37〉 これは原子分解能の像です。左から 100、110、111 方位があり、下のモデル図と合っています。これはどういうモデル図かというと、C12A7 という結晶は、あるところでパッと割ったときにへき開しないため、へき開面はありません。そのため、どのように割れるかというのは、やってみないと分からない。これを単純にある結晶の面でスパッと切るか、あるいはケージを保つように割るかということを 2 つ考えました。



図－38

〈図－38〉 両方のモデルを比べてみると、ケージを保存するように面が作られています。これは非常に幸運でした。なぜかということ、STM で見えていますから、ここにケージがあれば電子がある。ですから、針が落ちて原子分解能の像が取れるのです。全く同じような構造をしているゼオライトというのは、いまだに STM 観察ができていません。これは電導性がないからです。もしそのように割れて再構成しない場合は STM の針が下りませんが、この場合は下ります。これで原子分解能の像が取れたわけです。「しめた」ということで、これで触媒活性をやろうと思いました。

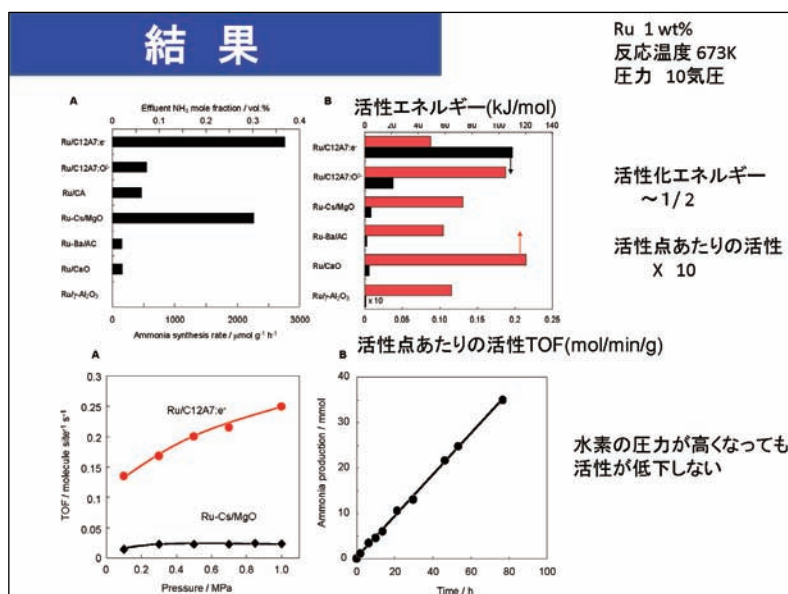


図－39

〈図－39〉 そこで、我々の研究所の同僚である触媒化学の原享和教授と、ここ 2 年半の間、外に一切発表しないで進めてきました。今度発表することになっていますが、どうということかという、窒素と水素でアンモニアを作るのです。これは 100 年前に食糧危機からヨーロッパを救った、ハーバー・ボッシュ法です。私たちも教科書で習っています。それが 100 年間変わっていないというのは、いくら何でも怠慢ではないか。触媒化学の歴史を知っていればそんな大それたことをやらなかったかもしれませんが、原先生も「やってみましょうか」と乗ってくれました。

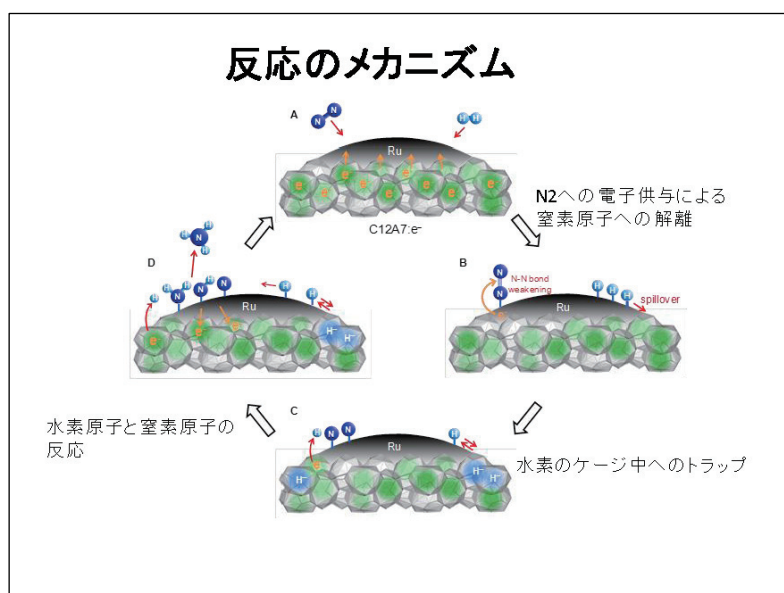
何を考えたかという、ルテニウムを使いました。ルテニウムというのは窒素をつかまえる力があります。これは、東京工業大学で触媒化学の先生であった秋鹿研一先生という方が、20 年以上前に見つけています。それを C12A7 の電子の入っているものの上に担持して、触媒活性を調べます。

何を狙っているかという、C12A7 の表面にルテニウムの塊を付けます。そうすると、そこで窒素が固定され、仕事関数が小さいですから、電子は N-N 結合の antibonding (反結合性) に入ります。これによって、窒素分子が活性化できるのではないかと考えました。実際に右下の透過型電子顕微鏡 (TEM) の写真 (図 D) を見ると、数ナノメートルのルテニウムを担持した C12A7 エレクトライドができています。



図－40

〈図－40〉 その活性を調べてみると、活性化エネルギーはいま使われているものの半分です。同時に 1 活性点あたりどれくらい働くかという、いわゆる TOF (turnover frequency) を見てみると、今までのものより約 10 倍、1 桁大きいものが出てきます。また、これはやってみて分かったことですが、実はいま使われている普通の触媒というのは、水素の圧力を高くすると活性がなくなってしまいます。これは「水素被毒」と呼ばれています。水素がどんどん高压になってくると、活性点を覆ってしまう。ですから、圧力をかけても反応速度が上がりません。しかし、この C12A7 エレクトライドの上に付けたルテニウムに関しては、ほぼ直線的に上がります。



図－41

〈図－41〉 なぜこんなことが起きたのか。現在仮説として考えているのは、窒素と水素が吸着すると、窒素は電子が antibonding に入って非常に解離しやすくなります。水素はルテニウムの

上で 2 つに分かれ、分かれた水素は上にとどまっているのではなく、ケージの中に入ります。すると、水素と電子が反応して、 H^- になります。そして、この状態で窒素の原子と H^- で N-H 結合ができ、最終的にアンモニアとして表面から脱硫をすることになります。このように C12A7 は、アンモニア合成の触媒として意外に面白い性質があることが最近の研究で明らかになりました。

■ C12A7 エレクトライドの多彩な機能

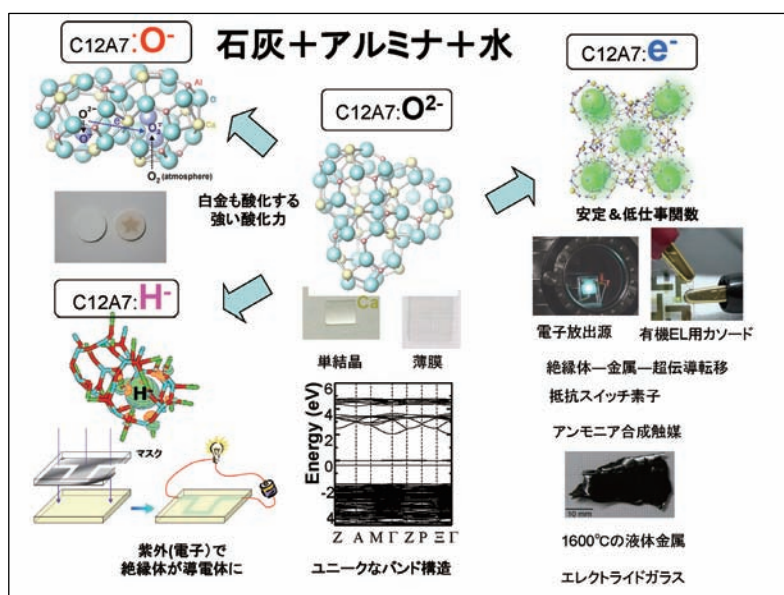


図-42

〈図-42〉 セメントの C12A7 で今まで我々が找けた機能を挙げてみますと、ケージの中に普通の酸素が入っています。これを O^{2-} に変えると、非常に強い酸化力があります。例えば白金を 1000°C に上げると、白金が全部 4 価に酸化されてしまいます。あるいは水素で焼くと、ケージがプラスですから、中に H^- が入ります。そうすると見掛けは真っ白ですが、紫外線を当てると当たった部分だけに電気が流れるようになります。 H^- からイオン化をして電子が出てくるわけです。

また、今日お話をしたように、この中に酸素の代わりに電子を入れてやると、低仕事関数で安定なものが得られますし、電子の放出は有機 EL のカソードに利用できます。他にも、絶縁体-金属-超伝導の転移が見られますし、アンモニア合成触媒にも使えます。さらにこれを、 1600°C の状態でドロドロに溶かしてやると、溶かした状態でも実は電子が残っています。 1600°C ですからマグマのような状態ですが、その中に電子が 1×10^{21} も安定に存在できることが分かりました。

これだけの機能ができていますが、使っている元素をもう一度思い出していただくと、カルシウムとアルミニウムと酸素と水です。水を H^+ と OH^- で使っているのではなく、 H^- と O^- ということで電子に使っています。ありふれた元素を使ってもこれだけの芸当ができるのです。

これが今まで我々がやってきた元素戦略の代表的なものですが、こういうものはたぶんほかにもたくさんあると思います。単に我々が見えていないだけです。我々は 1 つ尻尾をつかまえたので、それに対し芋づる式にいろいろな研究を行ってきましたが、説明したように、そんなにとっぴなサイエンスや、あまりに難しい理論付けはしていません。自然に出てきたわけです。

■ 常識を覆してきた数々の新材料

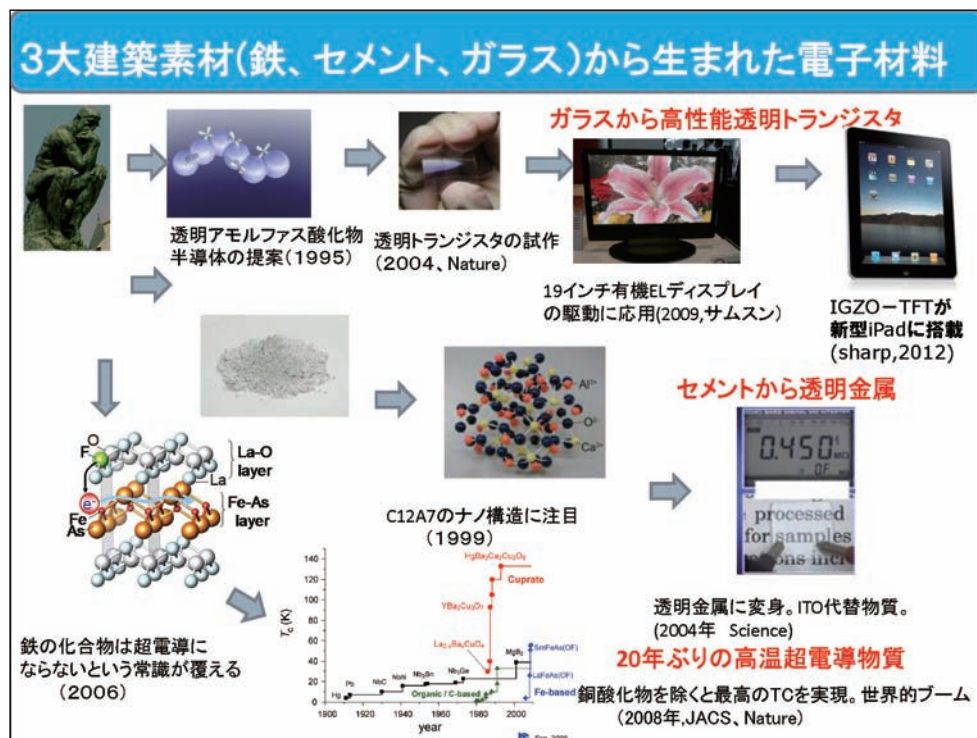


図-43

〈図-43〉 また、現代建築というのは何でできているかというと、鉄とガラスとセメントです。こういう建築素材から、電子材料が生まれています。実はガラスでできた半導体から、シャープが「IGZO」という酸化物半導体を採用した中小型液晶パネルを開発して、今年から量産が始まりました。これは我々が創った半導体です。1995年に発想して2004年にTFT（薄膜トランジスタ）にしましたが、発表した当時は半導体のアモルファスシリコンの研究者たちから、アモルファス半導体の会議で「ここはガラス屋の来るところではないよ、半導体の会議だよ」と何度も言われたのをよく覚えています。

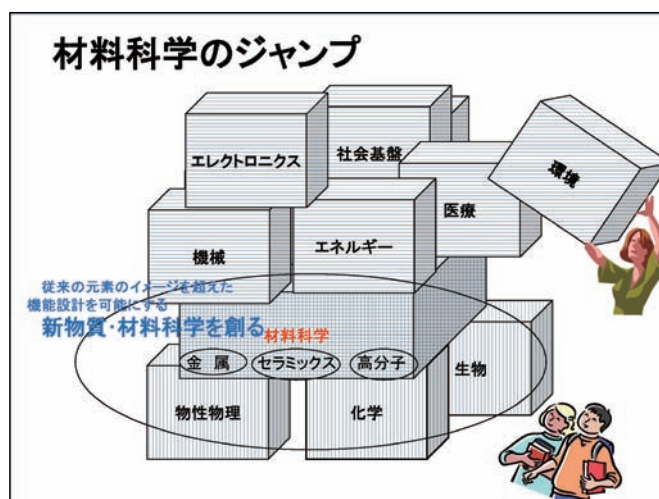
そのときに思ったのは、「アモルファスシリコンと言っても自分たちで創ったものではないだろう。そのうちに足を掛けて転がしてやろう。」もちろんそこまでは言いませんが、そういった悔しさはありました。あまりにもメジャーが強く、メジャーにいるから自分たちがいいというのはとんでもない話です。確かにメジャーがないと産業はできませんが、面白いことというのは辺境にあります。ですから、HONDAのCVCCには非常に共感するところがあります。みんながやらないけれども、そこから出てきたものが不可能を可能にするというのが、材料研究の一番面白いところです。

今日お話したように、セメントから透明金属ができました。しかし、透明金属としての実用性はあまりないと思います。むしろ全く違った形で実用の芽が出てくるでしょう。鉄の超伝導も、鉄は超伝導にならないと言われていましたが、うまい構造を選び、うまい原子の組み合わせを選んでドーピングすると、超伝導ができました。

これを見ても、我々の目の前には新しい機能や新しい物質がたくさんひそんでいるに違いない。

現にこれだけ多くの成果が、15 年ぐらいの間に我々のグループだけで出せたのです。我々がそれほど才能に恵まれていたとは全く思いませんが、確かに本気になって探しました。これは間違いないと思います。ですから、露天掘りできるような物質は少なくなったかもしれませんが、グラフェンのように、少し下草を除けば新しい機能物質や新物質がゴロゴロしているに違いないと思います。

■ 元素戦略における材料科学への課題



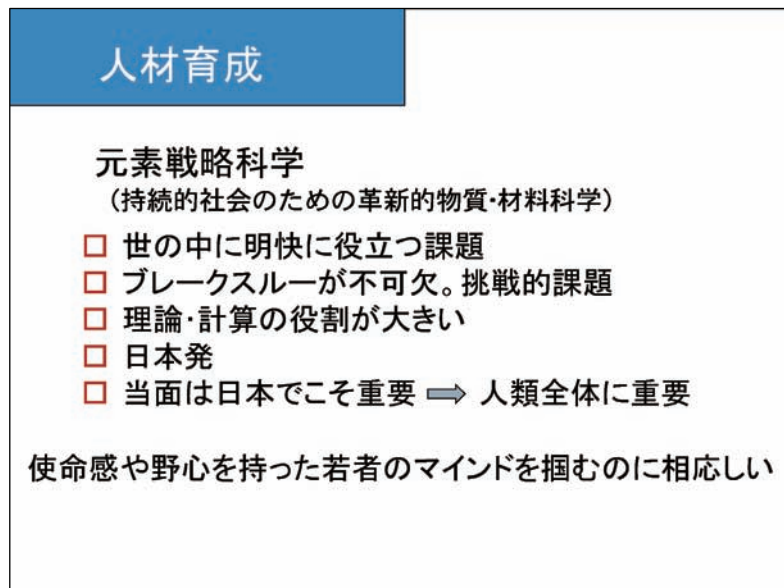
図－44

〈図－44〉 「材料」という言葉がなかなか理解してもらえないのは、普段は料理の材料や建築の材料という風に使われるため、クッキングやコンストラクションの科学ととらえられがちです。そうではなく、材料というのは全ての物質の中で人間社会に直接役に立つものです。ですから、これは時代とともに変わります。しかし、物性物理、化学、生物という基礎的な学問に加えて、エレクトロニクスや機械やエネルギー、医療、あるいは環境もここに入ると思いますが、こういう実学の間を結ぶ位置に、材料があります。

現在は細分化が相当進み、金属、セラミックス、高分子という 3 大材料になっています。細分化しないと研究ができなかったという事情はありますが、我々自身もほかの分野のことがなかなか分かりにくくなっています。いわんや物性物理の理論家にとって常識とされていることが、我々には分からない。

今度の元素戦略で欲しいのは「機能」です。機能をどうやって設計するか。こういった点で、もう一度新しい材料科学を創ろうではないか。しかしそういったときに、特に化学の人に多いのは、有機・無機に非常にこだわります。有機・無機なんてもういいではないか。それよりも全体を俯瞰して、機能がどのように決まっているのか。物質系を広くみて、機能が何で決まっているのか。それに対しどう電子状態が必要なのか。もう一度そういう整理をする必要があります。

「材料科学の因数分解」と言っていますが、そういうものが元素戦略で材料科学が目指すものではないかと思っています。

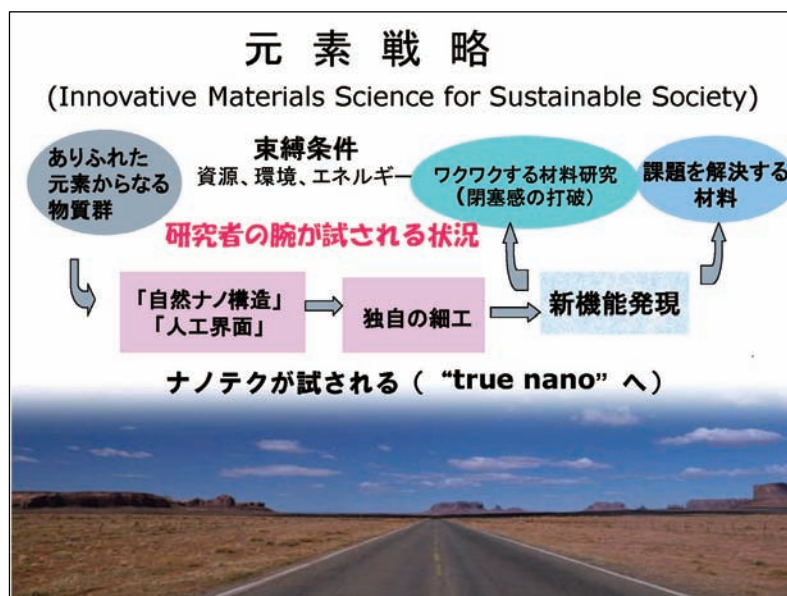


図－45

〈図－45〉 またこの元素戦略では、人材育成が非常に重要です。元素戦略科学というのは、持続的社會のための革新的物質・材料科学でなければなりません。これは世の中に明快に役立つ課題です。役に立つことはやらないと言う人もいますが、とんでもない話です。役に立たなければ意味がない。これは材料というものの宿命です。また、ブレークスルーがなければ絶対に駄目です。改良だけではいけない。そのためには挑戦的課題を設定しなければいけない。さらにそこでは、理論・計算の役割が大きいと思います。ですからかなり難しいことです。

そしてこれは、日本が言い出したことです。日本には資源がありませんから、当面は日本でこそ重要なテーマですが、人類全体に対し重要なテーマでもあります。こういうテーマというのは、使命感や野心を持った若い人のマインドを掴むのに相応しいと思います。ぜひこういう挑戦的な課題にチャレンジして、世の中に役立つことを目指す若い人が出てきてほしいと思います。若い人が元気になると、年配者は安穩としていられませんので、陰に隠れて一生懸命に勉強します。これはそうした人たちへの刺激策にもなるはずです。

■ 終わりに～ナノテクが試される元素戦略



図－46

〈図－46〉 最後になりますが、元素戦略をまとめるとどうということになるかというと、「産業は学問の道場」という言葉がありますが、元素戦略というのは実は「ナノテクの道場」だろうと思います。ナノテクに対して期待があるのは、ただ小さいからではなく、ナノテクが今まで不可能だと思われていたものを可能にするからです。もしそれに対してナノテクが本当に応えられるならば、この元素戦略にとって本当に効果的な役割をしてくれるはずです。ですから、ナノテクは元素戦略の道場であるという言い方をしたいと思います。

世の中の人々は、ありふれた物質を使って課題を解決してほしいと考えています。我々大学にいる人間としては、ワクワクするような材料研究をして閉塞感を打破したい。高温超伝導のときは、言われなくても大学で徹夜して、正月でも帰らなかった。それぐらいワクワクするような研究が、この材料研究のエッセンスなのです。それが世の中の役に立つ。このワクワクすることと役に立つということは、両立できることだと思います。ぜひこういう課題を解決する材料、ワクワクする材料研究が、この元素戦略を通じて実現できることを期待しています。

■ このレポートは平成 24 年 7 月 23 日東京會館において行われた、第 122 回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。本田財団のホームページにも掲載されております。
講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得て下さい。

発 行 所 **公益財団法人 本田財団**
104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル
Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103
<http://www.hondafoundation.jp>
発 行 者 原 田 洋 一