

総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会

ナノテクノロジー・材料共通基盤技術

検討ワーキンググループ

第6回

平成24年11月19日

内閣府 政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）
共通基盤技術（ナノテクノロジー・材料）グループ

午後3時00分 開会

○事務局（守屋） それでは、皆様、定刻となりましたので、総合科学技術会議科学技術イノベーション政策推進専門調査会、ナノテク・材料共通基盤技術検討ワーキンググループ第6回会合を開催いたします。

まず配付資料の確認をさせていただきます。本日、議事次第、それから出席者一覧、座席表に続きまして、資料1として、前回会合の議事録案、資料2以降が本日の審議、情報交換に使う資料となります。資料2-①、②、③がございます。こちらは重点施策パッケージの関連の資料となります。それから、資料3-①、②、③、④までがございます。②がA3を2枚とめてあるものになりますので、ご注意ください。それから資料4がJST様からの資料、それから資料5、枚数が少々多いもの、こちらが本日の第2部のご講演用の資料、それから資料6として、事務局のほうで用意した1枚紙の資料となっております。不足する資料がございましたらお知らせください。

大丈夫そうですので、会議のほうを始めさせていただきます。

それでは、主査の塚本様、よろしくお願いいたします。

○塚本主査 皆様、こんにちは。お忙しいところお集まりいただきましてありがとうございます。

早速議事に入らせていただきますが、その前に、今日初めて、まさしく今お越しになりましたが、ご紹介させていただきます。日立製作所の武田委員の代理で青木さんが出席されております。よろしくお願いいたします。

○青木委員 おくれましてすみません。日立製作所の青木と申します。

私自身、もともと研究者でありまして、ナノ関係の材料関係をずっとやっていた関係で、武田の代理ということで、今日は出席させていただきます。

どうぞよろしくお願いいたします。

○塚本主査 よろしく申し上げます。

それから、後ほど改めてご紹介しますが、最新技術の動向のご講演をいただくために、今日お二方、出席いただいています。お一人がJSTの永野さん。永野さんはしょっちゅうお越しになっていますが、正式にお越しになったのは初めてということです。それから、今日のメインイベントとも言えるんですが、京都大学の北川先生、よろしくお願いいたします。

じゃ、早速議事に入らせていただきます。

まず初めに、議事録の確認です。議事録はお手元に配布されておりますが、内容については、

当然ながら既にメール等で確認いただいておりますので、特段、今日この場で何かお話がございましたらと思いますが、特にないと思います。よろしければ、この議事録で最終的な確認をさせていただいたということで、承認をいただいたということで次に進めさせていただきます。

それでは、早速ですが、今日の内容に入らせていただきます。

まず初めに、議題2、重点施策パッケージの取りまとめの結果についてということで、事務局からご説明をお願いします。

○事務局（守屋） それでは、資料2—①、②、③を使いながら、簡単に説明させていただきます。

まず最初に、資料2—③、3つ目につけてある資料をごらんいただけますでしょうか。私も総合科学技術会議、各協議会ですとかワーキンググループ、タスクフォース等で、平成25年度の科学技術関係予算の重点化について各省との協力、あるいはメンバーの方のご協力をいただきながらまとめてまいりました。既にアクションプランにつきましては、夏に皆様にご報告させていただいておりますが、重点施策パッケージのほうが、前回のこちらのワーキンググループ会合以降に最終確定しましたので、本日、簡単にご説明させていただくことになりました。

ページを1つめくっていただいたところに、特定までの経緯というのがございます。特に説明の必要はないと思いますが、10月の下旬に最終的に公表されたということです。

具体的にどんな案件がパッケージの施策として特定されたかというのが、その次に一覧表になってございます。①から⑨まで9本の施策にまとめてございまして、ただ実際は、パッケージという名前からおわかりのとおり、この中は複数の施策で構成されているものがありますので、個々の各省様からの施策レベルで言いますと、必ずしも9つというわけではなく、もっと数は多くなってまいります。

ちなみにナノテク材料関係ということでは、この中の④にあります「資源問題の解決に向けた希少元素の循環／代替材料創製技術の開発」という、継続案件ではございますけれども、こちらが特定されました。主管の省といたしましては文部科学省様、先ほど申し上げましたように構成される幾つかの施策につきましては、経済産業省様、それから環境省様の施策も含めた形で、1つの大きな施策群として推進することになりました。

お配りいたしました資料2—①、これはページ数が30ページ近いものなんですけれども、こちらの13ページをあけていただきますと、今、タイトルをご紹介しました文部科学省様の施策についての詳細が書かれてございます。施策パッケージの目標、あるいはその目標達成に向けたアプローチの仕方等、文部科学省様のほうのペーパーから落としたもの、それから、ページ

をめぐっていただきますと、それについての総合科学技術会議からのコメント等を書かせていただいております。

13ページの最後の2行から14ページにかけまして、構成される施策が幾つか出ています。例えば経済産業省様のレアメタル回収技術開発、それから資源循環実証事業、それから文科省様の元素戦略プロジェクト、環境省様の環境研究総合推進費の一部としての施策というようなことで、これらを総体として全体をマネジメントしていただいた上で、最終的な目標達成に向けて推進していただくということで、今回パッケージ型の施策として特定したという経緯でございます。

今申し上げましたように、施策パッケージとしては9本、それから、もう1枚、資料2-②ということで、先般既に特定済みのアクションプランにつきましての最終的な取りまとめの数と金額、施策の数と金額をまとめているのがございます。平成25年度のアクションプランについては123の施策が特定されておりますので、パッケージを1つの施策というふうに考えますと、合わせて132件の施策が25年度の重要施策ということで、予算重点化対象とされたのご理解ください。

事務局から説明は以上でございます。

○塚本主査 ありがとうございます。

ただいまのご説明に対して、ぱっと見せられて、急に何かといってもなかなかわからないんですが、特段の何かご意見、あるいはご質問がございましたらよろしくお願いします。

これは私から聞くのもちょっとおかしな話なんですけど、今、特にナノテク関連ということで、④が施策パッケージということなんですけど、これは、もちろん中身はまだ全部読めていないんですが、おおむね我々がつくってきたポテンシャルマップと関連づけると、相当なところが網羅されているという認識をしていいということですか。

○事務局（守屋） 網羅されているという言い方が正しいかどうかはわかりませんが、後ほど使おうと思っていた、今日お配りしたA3の資料3-②を見ていただけますでしょうか。この横長のA3カラー、折り曲げてあるものです。

今回、こちらに水色の薄い青の丸がついていると思います。ちょうどこの1ページ目というところと真ん中辺ですか、P4と書いた、これが希少元素代替材料開発ということで、私どもがこのポテンシャル技術マップに、既に開発項目として入れていたところなんです。こちらについては、多くはカバーされているのではないかと思います。幾つかの施策を束ねた関係で、この中に書かれているもの全部がこちらに包含されているわけではないと思います。

それと、2枚目の一番下の段、資源の有効活用という、基盤的技術の中でも一番右下に書かれている箱の中に、希少元素のリサイクル回収技術というのがございます。

今回のパッケージ施策については、この材料開発の技術と、それからこのリサイクルの技術、両面が入っているということで、2つに分けてこのマップ上では示させていただいております。

○塚本主査 ありがとうございます。

何かほかにご意見、ご質問ございますか。

じゃ、この資料は、とりあえずは今の段階で、これはもちろんまだ最終的に決まったわけではないということですね。予算的に、予算規模としては。

○事務局（守屋） 概算要求の段階ですので、金額につきましては、まだ確定しておりません。

○塚本主査 特にご質問、ご意見がないようですので、次に進めさせていただきます。

それでは、3つ目の議題です。今後強化すべき技術領域についてということで、事務局からご説明をお願いします。

○事務局（守屋） それでは、事務局から幾つかの資料を使いながら説明させていただきます。

資料は、3-①から⑤までご用意しています。前回、こちらでアクションプランに特定した施策のナノ関係のものを抜き出す作業をしたり、あるいはこちらの技術ポテンシャルのマップ上に、そういうアクションプラン対象の施策をプロットしていく作業の結果をこの場で議論させていただきました。どちらかといいますと、私どもが示させていただいた施策の網羅性ですとか、あるいはこのマップ上の丸の位置づけですとか、ちょっと形式に入った議論のほうを中心になったように記憶しております。

その後、このマップのつくり方ですとか、あるいは今後の進め方につきまして、関係府省の主要メンバーの皆様、それから専門家の皆様、あるいは塚本主査にも来ていただいて、事務局レベルの打ち合わせをさせていただきました。

その結果、これから私どものこのワーキンググループとして議論すべき、将来に向けて重要と思われる技術の議論に関して、もう一回、よりどころとしてこのポテンシャルマップを使うのがやはりいいんじゃないかということで整理をいただきました。前回もご説明したとおりですけれども、このポテンシャルマップの上ではあくまでも、これまでの総合科学技術会議での議論の結果、特定されたアクションプランあるいはパッケージ施策しかプロットしておらず、実はこの陰に各省様のほうで独自に打たれている施策等があることは前提としながらも、この中でさらに重点化すべきものを議論させていただければというふうに考えている次第です。

それとともに、単にこの俯瞰マップ全体を見渡して、何となく濃い、薄いとかという議論だ

けではなくて、今後重要と思われる技術を抜き出すための視点について、その場での議論もされました。その議論を受けて、事務局のほうでも幾つか新たな視点を加えさせていただきました。そういう幾つかの視点から、本日は皆様に、今後ナノテクノロジー材料分野で、こういう技術に着目して、新たな社会的な課題の解決に使ってはどうかというようなご提案に至る議論をしていただきたいと思いますと思っている次第です。

それでは、今日はこのワーキンググループとして、初めてスクリーンを使って画面でも見ていただけるような環境を整えておりますが、担当のほうから、私どものほうで用意した資料の内容と、表の見方等の説明をさせていただきます。

○事務局（山崎） それでは、私のほうから資料3を使って、今後ナノテクノロジー材料ワーキンググループのほうで検討を進めていく上での視点の事務局案についてご説明させていただきます。

事務局で案として作成した視点は、大きく分けて2つあります。1つ目は強化すべき技術領域、2つ目は共通基盤技術、基盤的技術の強化の方策についてです。

まず、1つ目の強化すべき技術領域に関しては、4つの視点を事務局調整ミーティングでの議論を踏まえて、案として持ってまいりました。1つ目は、これまでに余り強化されてこなかった技術領域のうち、適用範囲が広いものはどういった技術であるか。また、これまで余り強化されていなかった技術領域のうちで、技術ポテンシャルが高い革新性を有するものはどういう技術領域、もしくは個別の技術であるかという視点です。2つ目は、他の応用分野に展開することにより、さらに大きな効果を期待できる技術領域はないかという視点です。3つ目が、技術ポテンシャルが高い技術や技術領域で、現在我々が見えていないもの、現在の技術ポテンシャルマップに掲載されていない技術はどのようなものがあるかという視点で、新たな技術もしくは技術領域を探索、発掘していただくという視点です。4つ目は、これまでに十分に強化されてきた技術領域に関して、今後の強化の方向性というものがどうあるべきかという視点です。これらに関しては、後ほどまた事務局案としての例をお示ししたいと思います。

大きい視点の2つ目は、広範かつ多様な研究開発に活用され得る基盤的技術の強化の方策はどうあるべきかという視点です。これに関しましては、科学技術基本計画は4期になりまして、分野別の推進戦略から課題解決別の推進戦略になったということで、現在、基盤的技術は、課題解決を支える技術とに位置づけられております。これによって、このワーキンググループでの議論でも、重点化の状況が見えにくいという状況になっています。そういった観点も踏まえて、今後、基盤的技術をどのように重点化していくかという方策に関して、現状のままで十分

なのか、それとも何か別の方策なりツールが必要なのかという視点をご検討いただければと考えています。

次に、資料3-3に移らせていただきます。これはスクリーンに出していますが、とても見えるものではありませんので、お手元の紙と併用してごらんいただければと思います。

これに関しましては、上のほうに先ほどの資料と同じものを再掲させていただいておりますが、事務局で、これらの視点をもとにした検討テーマ例としてどういったものがあるかというのを準備しました。

まず、1-①のこれまで余り強化されてこなかった技術領域のうちで適用範囲が広いもの、もしくは技術ポテンシャルが高いものの事例としては、例えば分離膜ですとか光触媒等の技術。もう一つは、基盤的技術の上のほうにあるボトムアッププロセスの高度化等の重点化が現状のまままで十分かという事例を用意しました。

それから、2つ目は、他の応用分野に展開することにより、さらに大きな効果を期待できる技術領域ということで、ここで黄色く塗られた領域がありますが、医療やバイオ関係の領域に対して、他の領域の技術を応用していくことによって、何か大きな効果が得られないかと。例えば医工連携も含めて、医療領域に展開していくような技術にどのようなものがあるかということを検討できればと考えています。

③の技術ポテンシャルが高い技術／技術領域の探索は、これを全体を見て、まだ載っていないものの中で重要なものがないかという視点をご検討いただきたいと思います。

それから、④に関しては、これまでに強化されてきた技術領域の今後の強化の方向性ということで、ここでは2つ例を挙げさせていただきました。

1つは、左上の領域になります半導体関連領域の強化の方向性ということで、昨今の半導体業界の現状もありますけれども、微細化や高密度化という方向性とは別の方向性、例えばスピントロニクスのような他の原理を利用したデバイスですとか、処理系だけでなく、例えば50年、100年、1,000年の長期間もつような記録系の方向性等、一例ですけれども、そういったような方向性も議論できないかという話。

それから、もう一つは、太陽電池、二次電池に現在たくさんの資源が投入されていますが、これらの方向性に関して技術的な観点で何か議論ができないかという話です。

それから、2つ目の基盤的技術の強化の方策に関しましては、下の紫色に塗られた領域全体に関して、今のアクションプランや施策パッケージでの強化とは、別に何か強化の方策があるのではないかということ、事例として挙げさせていただいております。

このような視点を踏まえまして、我々ワーキンググループのほうで、これまで作成してきました資料3-②、このA3、2枚にわたるポテンシャルマップを見ながらご議論いただきたいと考えています。

マップに関しては、原則として前回お配りしたものと一緒ですが、先ほど守屋のほうから説明がありましたとおり、パッケージの施策をここに加えさせていただきました。あと、一部、事務局のほうで施策の内容等を検討して、アクションプランの丸の置く位置等を若干修正させていただいておりますが、原則的には、今までと同じものを配付させていただいております。

あと、申し遅れましたが、ここで挙げたのはあくまでも事務局調整ミーティングをもとにして例示させていただいた事務局案ですので、これにこだわることなく、視点にしても、検討テーマにしても、自由にご議論いただきたいと考えております。あくまで議論のきっかけとして、事務局のほうから提供させていただいたものです。

それから、資料④と⑤は、皆様のほうにあらかじめ送付させていただいておりますが、今回の議論に当たって参考資料として添付させていただきました。

④のほうは、このナノテク材料ワーキンググループが7月の段階で出した報告書のまとめ部分の抜粋になっております。

それから、資料⑤、これは一番上に施策俯瞰図という題名とともに、目次的に各分野を並べさせていただいているものですが、これは第3期科学技術基本計画を総括的にフォローアップした際の資料になっております。主要な施策について、第3期の分野別にまとまっているものですので、これは今後の議論をする上で、これまでどのような技術分野にどの程度の投資がなされてきたかに対して、主要な施策に関して掲載されていますので、ご参考にしていただければと考えております。

ただ、これで1つご注意いただきたいのは、ナノテクノロジー・材料分野という分野が第3期の中では設定されていますけれども、ナノテクノロジー・材料というのは、ご存じのとおり基盤的な技術ですので、ナノテクノロジー・材料分野だけがナノテクノロジー・材料分野、すなわちワーキンググループの対象となる技術領域ではなくて、ほかのライフサイエンスですとか情報通信等の中にも、基盤的技術としてナノテクノロジー・材料技術が含まれているというところをご留意ください。

少し駆け足の説明になってしまいましたが、私からの説明は以上になります。

○事務局（守屋） すみません、一言追加させてください。

こちら、技術ポテンシャルマップ上の丸は、前回のこの会での説明同様、25年度の施策でご

ざいますので、24年度以前、あるいは第3期のころに幾つかの施策で既に強化されてきていたもので、施策のない状態に見えているものもございますので、とはいえ、欲張ってこの絵ですべて表現はできなかったというのが実情です。ですので、皆様の自由な議論の中で、各省様のほうで気づかれる点がございましたら、ぜひ各省様のほうからもそういう過去の施策投入状況ですとか、ご意見などもあわせてご紹介いただければ、議論がスムーズに行くかなと思っておりますので、各省様のほうもよろしく申し上げます。

以上です。

○塚本主査 ご説明ありがとうございます。

山崎さん、資料3-①を出しておいてもらえますか。今、ご説明いただいた骨子はここに書かれているとおりでありますが、多分、1の①から④と列挙されていますが、③だけがちょっと異質なんですね。③は、今のマップに載っていないもので、いや、こういう技術があるんじゃないのという思いつきの世界です。その他の①、②、④は、既にマップに載せられているものをどう深掘りするか、あるいはどんな横展開があり得るかとか、あるいは冒頭、奥村議員なんかからもある種、メタファー的にご説明いただきましたけれども、例えばチタンがとんでもなく安くできたら、あるいは鉄並みに延性があったらというようなことがあって、ある材料、ナノテクを突き詰めれば、今見えていること以外に違う世界があるんじゃないか、そういう発想を飛ばして、何らかのポテンシャルを考えていこうということだと思えます。

したがいまして、3番はいかにもぼつと思いつきの世界なので、議論する中で何か出てくればということで、まずは1の①、②、④、より強化すべきもの、あるいはこれまで余りフォーカスされていなかったもの、こんなあたりがどうかというあたり。

それから、先ほど山崎さんからもお話がありました共通基盤技術、いわゆるキャラクターゼーションだとか分析評価、あるいは計算科学、そういう共通的なものをどうフォーカスして強化していくかというあたりに、少し議論をさせていただければと思います。

ご意見、ご質問、よろしく申し上げます。

○馬場委員 最初に、強化すべき領域というところで、もう少し違うところもあると思ったので、少しコメントさせていただきたいと思えます。ここに出ているのは、どちらかという各技術、単独の技術に対して書いてあるように思いますが、やはりナノテク・材料というのはいろいろな技術の融合とかあるいは統合によって、さらに違った技術領域を立ち上げていくようなところもあると思えます。そういったところも、ナノテク材料関係をやっていく上では大事と思えます。そういった融合なり統合なりで課題解決に早く結びつきそうなところも強化すべ

きではないかと思いましたが、コメントとしてつけ加えさせていただきます。

○塚本主査 ありがとうございます。これはたしかJSTのナノテクの俯瞰マップか何かにもあったように、個別の技術の先鋭化と、それを融合、統合することで新しい、それはシステムという場合もあるでしょうけれども、より広くとらえることで新しいソリューションが提供できるということだろうと思います。それはぜひそういう視点も必要だと。それは、すなわちここで書いている②、他の分野にも応用できるんじゃないのとか、それは、やろうとすれば恐らくそういう融合が要るんだだろうと思いますので、そういう視点でもぜひご意見をいただければと思います。

何かご質問、ご意見ございますか。

○ONEDO（和泉） ありがとうございます。少し違和感があるのは、この1.の部分でも産業という考え方が余り無いなというところで、検討の必要があるのではないかと思います。例えば資料3-③を拝見しますと、マップを作るときに議論させていただいた中身は、電気機械、エネルギー、医療、それから輸送用機械もそうですが、まず非常に大きい産業を想定して議論をして、その中での技術領域の選び方をしているというのは、これはアウトプットが産業との関係があるという理解ではないかと思います。

そうしますと、言い方だけの問題かもしれませんが、技術領域だけで議論するのではなく、産業なのか技術なのかというのは多分両方だと思いますので、産業の項目を入れると、もう少し議論の幅が広がるのかなという気がいたします。

以上です。

○塚本主査 ご指摘はおっしゃるとおりで、もともとのポテンシャルマップはそういう枠組みになっているので、恐らく事務局の思いを私が代弁すると、もともと課題解決型イノベーションということで、グリーンとライフが設定されて、協議会が課題設定をすれば、我々がそれを解決するためにという議論が極めてスムーズにいくんですが、そればかりは同時並行で動いていますから、一方で技術論的にも何らかの出口側に向けたポテンシャルを理解できるような動きをすべきじゃないかということと、今の時点では理解しています。

今おっしゃるとおり、とはいえ、それは単にサイエンスだけをやっていても意味がないので、それはどういう出口に向かってどうするかと。逆に協議会に対して、今のご指摘であれば、こういう技術を深めればこういう課題解決ができますよとか、こういう産業に生かしますよというコメントを入れたらいいというようなことだと思います。ありがとうございます。

○産総研（清水） 質問を含めて少し申し上げます。ナノテクノロジー・材料関連の共通基盤

技術の検討の視点のところ、これまでに余り強化されてこなかったというのと、強化されていた、の2つの表現が見られますが、これは多分投入されている予算規模を意味するのかなと思っています。例えばグラフェン・CNT等とございますけれども、これらの課題については現実に今、いろいろなNEDOプロジェクト等の国プロでもやっているわけですが、それほど大規模予算ではないと理解すればよろしいのでしょうか。私は炭素材料の今後の展開には非常に興味があります。元素戦略ということで元素の存在量が少ない、いわゆる希少金属というのが非常に注目されています。一方、炭素材料、炭素というのは全く逆で、存在量が非常に豊富な材料でもあり、新たな、炭素をベースとした元素戦略という視点から今後の展開が非常に重要だと思います。

特に、大昔から、最初は天然物として、ダイヤモンドとか、あるいは石炭、コークスとか、第2世代に入って例えば活性炭やカーボンブラックなどの人工物が生まれ、第3世代に入って繊維にしたりシートにして炭素材料の工業的な材料としての進化があり、第4世代になって、ここのグラフェンとかCNTとか、いわゆるナノテクノロジーのナノメートルサイズの観点から、新たなナノ炭素構造を生み出したと言えます。いかに今まで進歩してきた炭素材料の長い歴史を、今度第5世代においてどういうふうに材料化へ展開していくかというのが大きな課題となっていると思っています。

最後に、グラフェン・CNT等という、これは炭素材料、あるいはナノ炭素材料というふう書き換えるのはいかがでしょうか。ほかの用語がすべて出口あるいはプロセスで書いてあるのが、このグラフェン・CNT等という、ここだけかなり具体的に書いてあるので、もう少し広げた表現が適切ではないかと思いました。

○塚本主査 ありがとうございます。確かにおっしゃるとおりですね。万物これ、皆、何だかんだいったってカーボンでできていますから、人類そのものも。カーボンというのは非常に豊富で、なおかついろいろな使い道があるということだろうと思います。これは、恐らくグラフェン・CNT等ですから、あとフラーレンだとか、あるいはDLC、ダイヤモンドライクカーボンだとか、そういうのも入っているんでしょう。ですよ。

ありがとうございます。ほかに何かご意見ございますか。

○松下委員 まず最初に、事務局の皆様、おまとめご苦労さまです。

それで、ちょっとあえて申し上げさせていただきたいのですが、こちらの視点のほうの資料は、この後、報告書にもお使いになられるご予定がもしあれば、幾つか申し上げさせていただきたいのですが、まず1.のところは、先ほどほかの委員からもご指摘がございましたように、

強化すべき課題解決型技術領域とされたほうが、2. の基盤的技術、こちらも技術でございますので、矛盾がないのではないかというふうに感じます。

また、1番に「これまでにあまり強化されてこなかった技術領域のうち、」の後にハイフンがございまして、その後②「他の応用分野」と入っておりますけれども、この場合、②が強化されてこなかった領域のものなのか、強化されてきた領域のものなのかというのが、ちょっと判断が難しくなっておりますので、その辺が、言葉の問題なんですけれども、もしこれを出されるのであればお気遣いいただければと思います。

もう1点なんですけれども、こちらは本当に私の個人的な私心で申しわけないのですが、強化すべき技術領域といたしまして、エネルギーとか安全・安心、資源の創製などが個人的には重要だと考えております。今回の対応マップをつくっていただいたときに、どうも化学的な、合成的な領域に対するカバーが足りないのではないかというふうに、ちょっと危惧いたします。化学というのは日本が誇る産業でございますので、1の④としてそこをフォローしていただければなと思います。具体的に、今、改めて拝見させていただきまして、どこに入るかと言われるとちょっと、それこそ横断的でわからないのですけれども、ご配慮いただければと思います。

以上です。

○塚本主査 ありがとうございます。

私からも、逆に質問します。今の化学の世界、例えば有機合成だとかということも含めたということですね。

○松下委員 はい、そうです。

○塚本主査 ありがとうございます。事務局のほうはよろしいですか、今のご指摘。

○事務局（山崎） 今のご指摘いただいたのは、視点の④に関して化学的なものを入れる、化学的なものの強化の方向性に関して今後検討していくべきだという理解でよろしいですか。すみません、ちょっと完全に理解できていないかもしれないです。

○松下委員 自分が若輩過ぎまして、これまでにその部分が強化されてきたかどうかはわかっていないのですが、少なくとも、今、こちらのマップ上には反映されておりませんし、津波、地震の事件の後にもエネルギー問題とした場合に、すぐにアプローチしたのが、やはりすぐに結果の出るシステムのスマートグリッドのほうへ参りましたけれども、実際にはエネルギーを創出する部分の合成化学のほうのカバーをそろそろ始めてもよいのではないかというふうに感じました。

そうしますと、恐らく1の④というよりは、1の①か1の②になるのかなというふうには感

じます。あと、個人的には1の②と1の①の技術ポテンシャルが高いもの、適用範囲が広いものの差が個人的にわからないというのが大きな問題点になっているとは思いますが。

○塚本主査 ありがとうございます。

○事務局（守屋） よろしいですか。例えば今のエネルギーから化学、合成というあたりのキーワードの共通項で言いますと、例えば2枚目の上から3分の1ぐらいですか、熱マネジメントの関連のあたりの技術というのがあったりするんですけども、そういうお話とはまたちょっと違うのでしょうか。あるいは、ちょっと何か飛び飛びになってしまいますけれども、1枚目にも例えばバイオ由来のいろいろな化学品の製造ですとか、そういったものも入っています。確かに化学とかバイオというキーワードでくくっていないので、実際にこういうところに入れようと思うと結構苦しいところがあるんですけども、できましたら具体的な、もう少しバイオ関連という先の技術の領域を幾つか例示いただくと助かります。今日この場でなくても結構でございます。

○塚本主査 今の松下先生のご指摘いただいて、私、ふっと思いついたのが、例えばここには水素製造とか、水素の長期距離輸送は、エネルギーキャリア側で入っているんですが、もともと例えば水電解とか、水分解による水素発生だとか、あるいは葉緑素を使ったエネルギーの生成だとか、そんなのが世の中では動いているんですが、この中に余り入っていませんよね、そういう話は。これは電気化学であったり、化学は化学でも電気化学のほうですけども。どこかに入っているんですけど。

○経済産業省（北岡） 光触媒。

○塚本主査 光触媒で入っているの。光触媒、ああ、入っているな。水から水素ね、入っていますね。

○経済産業省（北岡） 結構入れていたと思います。

○塚本主査 よく読めば入っているんだ。

○松下委員 入っていれば大丈夫でございます。後で有機の分野の先生に松下が怒られない状態であれば大丈夫でございます。

○塚本主査 たしか、いわゆる日本のノーベル賞をとられたような不斉合成だとか、ああいうたぐいの技術を応用した、いわゆる高分子化学、その辺が余り入っていないのは、そういう印象はありますね。

○成戸委員 多分ケミストリーとしては、半導体とか太陽電池とかグラフェン・CNTとか、フラーレンも、全部ベースはケミストリーとして入っているという意味では入っているんだと

と思いますが、松下先生がおっしゃるように、見える形で、ケミストリーで何か有機化合物をつくるか、高分子をつくるというような部分が少し見えにくいということなんでしょうか。

光触媒とか分離膜というのは、少しケミストリーらしいところはあるのかもしれませんがけれども、うまく表現すれば、ケミストリーも随分使っているというふうには理解されるんじゃないかと思うんですけども。

○塚本主査 コメントありがとうございます。

ほかに何かご意見ございますか。

これは主査としてのあれじゃなくて、一委員としての意見ですが、他の分野に応用する、あるいはよりポテンシャルというのは、こういう議論になると、先ほども意見が出ましたけれども、より出口側でシステム化だとか統合とかいう議論になってこない、なかなか技術のマップ自体をじっとにらんで、神様でもない限り、これとこれをつないでぽっと出口が見えるというのは、なかなか難しいかなという気がしますね。だから、この段階でそこを余り欲張って議論しても、なかなか何か出てこいというのも難しいような気がします。

○事務局（山崎） そうですね、確におっしゃるとおりだと思います。今、事務局のほうでも、特にグリーン、ライフの協議会との連携も含めて、以前から言っているような気もするんですけども、何らかの形で課題なり、現在重要となっていることについて課題を落としてもらうような形での連携を進めようとはしていますので、そこに関しては、もう少しお時間をいただきたいと思います。

○塚本主査 今回の協議会の連携という意味では、ここで出席されている委員の方は、多くが2つの協議会を兼務されていますから、そちらから見て、ぼちぼちこういうところが方向づけされ始めているよとか、協議会のほうでですね。まだすぱっと言葉としてなっていないけれども、こんな領域がどうやら大きな課題になりそうだとか、そういうご意見もあれば、この場を出していただければ、ポテンシャルマップの補強に使っていけると思いますので、よろしく願います。

ほかに何かご意見、ご質問はございますか。

基本的には、先ほどの強化すべき課題解決型技術領域だとして、共通基盤技術、2.のほうですね。①から④じゃなくて、共通基盤技術としての2. 広範かつ多様な研究開発に活用される基盤技術、この強化の方策というのは、私は、残念ながら個別にひもつけるというのはなかなか難しいというか、だからこそ共通基盤技術なので、これはやっぱりアメリカ型のナノテクイニシアチブみたいな、ある種のパーセンテージ全体の予算の例えば5%とか1割とか、確

実に基礎的なインフラ、解析技術なんかに割こうと。それは後講釈としてあるテーマにぶら下げるとか、そういう方法しかないんじゃないかと思うんですが、いかがでしょうか。

ご質問、ご意見。

○松下委員 若輩の意見でございますので、あくまでたたき台にさせていただきたく、この中で検討テーマとして、技術領域を選択するところまで、本日はすることを望まれているのでしょうか。もしそうであれば、個人的には分離膜、光触媒、半導体関連領域の強化、太陽電池、二次電池、この3つは、グリーンイノベーションの戦略協議会の皆様のご意見とは一致すると思います。

また、基盤的技術に関しましては、重要だという認識が皆さんございますので、やはり重要なのではないかと思います。

あと、グラフェン、カーボンナノチューブに関しましては、応用性が具体的に見えてこないという点で、ちょっと判断がつきかねるところでございます。

○塚本主査 すみません、松下先生、もう一度領域をおっしゃっていただけますか。

○松下委員 グリーンイノベーション戦略協議会の一番合っておりますのは、太陽電池、二次電池などの強化の方向性の部分です。その次が半導体関連領域の強化の方向性の部分です。

最後、ちょっと話からは多分外れるんですが、実際に物をデバイス化するときには分離膜、セラミック技術が必要でございますので、分離膜、光触媒の部分も入ってくると考えます。

○塚本主査 わかりました。ありがとうございます。

ほかにご意見ございますか。よろしいですか。

今日の後半に実はちょっと、先走って恐縮ですが、実は前から私は奇異に感じておったのが、ポテンシャルマップの2枚目のボトムアッププロセスの高度化、これは、そういう言葉は書かれていないんですが、後ほどPCPとかメタル・オーガニック・フレームワークで、MOFとかいう言葉が出てきますが、ある空間空隙を利用した技術、これは場合によっては大きなポテンシャルを持っているんじゃないか。今すぐ、明日使えるというような技術ではもちろんないんですが、かなり時間のかかる技術だと思うんですが、こういうあたりに、残念ながら今のところ、国の予算としてはほとんどついていないというところで、今日あえてそういう講演をいただくということにしたんですが、そういう面で、今、余りフォーカスされていないんだけど、もっとこれはポテンシャルがあるんじゃないのというあたりの領域がございましたら、ご意見をいただければと思います。

よろしいですか。もし、いきなりがばっと大量の資料を渡されて、さあ、何か言えと言われ

でもなかなか難しい面がありますので、後ほどでも各委員の方、これは抜けているんじゃないかとか、あるいはここはもっと左、右に展開できるべきじゃないかとか、そういうご意見がありましたら、事務局にメールで、都度思い当たられた瞬間にメールをいただければ、大変ありがたいと思います。よろしくお願いします。

○奥村議員 私も発言させていただいてよろしいですか。今、事務局からどういう分野に力を入れていったらいいのかというのが①で出ているのですが、私のお願いは、例えば③でもいいのですが、医療だとか半導体とか何か大きな領域が出ていますが、ここでこういう大きい分野だけではなくて、この中でどういう知見が、あるいはブレークスルーが我が国にあるのかどうかということの発掘も、できたらお願いしたい。要するに技術課題が何かあるわけで、先ほど、私が申し上げたことを座長に引用していただいたのですが、例えばチタンが非常に安くできれば世界が変わるわけです。そういうことが、できるような技術があるのかなのか。あるいはこのCNTなども、製造は随分できているようですが、CNTを複合材として分散させたり混合するところで非常なネックがあるわけです。

そういう技術上のネックがそれぞれどのような課題があって、いま一つ使用量が伸びないのか。そういう技術上の課題をクリアできれば、例えばCNTをもっと複合材料に使えるとか、できたらそういう本質的な技術課題があれば同時に皆さん方で共有していただいて、逆にここにいらっしゃらない先生方等から、その課題解決に役に立つような情報が出てくれば、まさにフィットすると思います。できたらクリティカルな、各領域における技術課題みたいなことも共有していただけたらいいかなと、こう思っています。単に領域だけですと、似たようなテーマがいっぱい出てくるだけになるおそれがあるので、そうすると、3期の分野型というのと余り変わらなくなってしまう。クリティカルな技術課題は何なのかということは、やはりこのチームから出ないといけないですよ。これは戦略協議会会からは発信されないので、ここのチームから発信していただきたい。できたらその解決の知恵もあわせてご提示いただくと、戦略協議会に対しても重みのある提言ができるのではないかと思いますので、ご検討をお願いしたい。

○塚本主査 ありがとうございます。今、奥村先生からのご指摘に対して、各委員で、そう言われればということで、それぞれ、今、示されている各領域で、何か大きな課題、本質的課題ですね、個別のいろいろなテーマであることはいっぱいあると思うんですが、そういうのがもしございましたらご指摘いただければと思います。

そういう意味では口火を切って、私どもCNTを大量につくっているんですが、大体500ト

ンぐらいつくっているんですが、最大の問題は価格です。今、大変いいとお客さんはおっしゃるんですが、この値段じゃねということ、やっぱり2桁ぐらいまだ下げないと、一昔前、東レさんが随分カーボンファイバーでご苦労されて、当時、やっぱり随分高かったのがこなれてきて、もちろん品質だとか、コンポジットとしての性能があるんですが、基本的にはやっぱり価格が下がっていかないと、いろいろな分野でよしやってみようかと、なかなかドライブがかかりませんので、残念ながら今のところ、大変高価なものですから、それは最大の課題だと思っています。

ほかの領域で、それぞれ会社の方も含めて、そういえばこれは基本的にこういうところが解決しないと、いくらいいことを言っても進まないねというのがありましたら。

○成戸委員 奥村先生のご指示というか、非常にクリティカルなところを指摘しろというところまでは行かないんですけれども、ライフで非常に気になっているのは、一番、事務局の3の③の右のほうに「他分野の技術の医療等分野への展開」ということを書いていただいて、個別に見るといろいろ、ドラッグデリバリーとか、いろいろなことが書いてあります。それは従来もありましたし、1つずつは、ある条件のもとではある医療につながりますという形で表示されています。一般論としては非常に興味はあるし、皆さんいろいろな場所でやっていただくんですけれども、じゃ、本当にクリティカルな何かを見つけて、ここを超えれば圧倒的に強いものを日本がつかれるというような形でのテーマ設定というか、目標設定になっていないところが少し弱いところだと思います。

だから具体的にこうしましょうというのは、今日はなかなか1つずつ申し上げられないんですけれども、本当に奥村先生がおっしゃったようなことを、具体的に1つずつについてやっていかないと、医療分野で輸入超過が続いて、日本が強力なものを出せないというのが続くんじゃないかと思います。テーマがたくさんあるけれども、それは奥村先生のご指摘のようなことをきちっと、もう少し領域ごとに議論して行って、あるいはどこからか出していただくようなことをしないといけないのかなというふうに、痛切には感じております。反省なんですけれども。

○塚本主査 貴重なご意見ありがとうございます。そういう意味では、逆にJSTなんかは、こういうマップの中で、この辺の基礎的なところがブレークスルーしないと、いくら偉そうなことを言っても進まないよというような、そういうクリティカルな技術論というのはないんですか。

○馬場委員 私もJSTに移ってからまだ日が浅く、ここと同じように俯瞰的な形で技術全体

を見渡しているという段階です。その中でいろいろな意見を聞きながら、どこにボトルネックがあるかというのは、これから明らかにしていくことにしています。そういう活動を地道にこれからやろうとは思っていますが、まだ今の段階でどこにフォーカスすべきかというところまでは、導き出せていないという状況です。

永野さん、何かコメントありますか。

○永野フェロー この後の話でご紹介させていただきます。

○塚本主査 後ほどよろしくお願いします。

もともと個々のシートに書かれていた俯瞰マップになる前の課題、あれを眺めると、実はもう少しクリティカルなものか、あるいはこれはやればできそうな話かという峻別ができると思うんですが、もう一汗、これはここの会議ではなくて、サブワーキングみたいな形で少し議論する必要があるかと思います。いかがですか。ここで議論しても、恐らくクリティカルな問題がぱっと出るって、そんな見事な答えなんかありっこないので、もう少しわいわいがやがやと言いながら再検討する必要があるんじゃないかと思います。少し事務局のほうで、その辺のまた再ミーティングの調整でもいただければ。

○事務局（守屋） 今の点は、私ども事務局のほうで進め方を考えます。

○塚本主査 よろしくお願いします。

ほかにご意見ございますか。

それでは、今日、非常にいいご指摘をいただきましたので、改めて基本的なところにもう一回立ち返って、マップは大体できているんですが、じゃ、どういうクリティカルなところがブレークスルーすれば、いわゆる国際競争の中で日本がどう勝ち目があるかというあたりも含めて、もう少しワーキンググループのサブ事務局ミーティング的なやつで検討させていただければと思います。

それでは、次の議題に移らせていただきます。

それでは、最新技術動向に関する情報のご提供をいただくということで、このポテンシャルマップでも、ポテンシャルマップの2枚目の中ほどにボトムアッププロセスの高度化、ナノ操作による組織制御だとか、自己組織化による材料形成だとか、そういう話がちらほら出ている。あるいはメンブレンのほうにもそういう話が出てくるんですが、それに関連したところで、少し注目すべき技術かと思っているところをご講演いただきたいと思います。

初めに、J S Tの永野さんから少しイントロをお願いしたいと思います。

○永野フェロー 科学技術振興機構の研究開発戦略センターの永野でございます。ふだんはこ

ちらの馬場委員と一緒に業務をしております。

今日は、私どもの研究開発戦略センターで、こういった手法でもってナノテク・材料分野全体を俯瞰して、今後の重点化すべき領域を見出していくかといった、そのやり方をご紹介させていただきたいと思います。それから、私の次にご講演を予定されている北川先生のお話へ続く形で、1つの例として、こちらのタイトルでございます「物質中の微細な空間・空隙構造を制御した材料の設計・利用技術」ということで、研究開発の俯瞰から検討する今後のキー技術概念の1つの事例をご紹介させていただきます。どうぞよろしくお願いいたします。

私ども研究開発戦略センターは、ここで議論されているようなことに常に悩んでいるわけですし、どうやってこれからの研究開発を進めていくか、そして具体的にどこをどのようにやっていくのかということを考えるに当たって、この3つの観点、まず科学技術全体を俯瞰することによって徹底的に力を入れるというところをやりながら、これからの社会の期待というものいかに分析して、それらを邂逅させていくのか。その際に、この下側の海外とのベンチマーキングをやった上で、我が国が果たして勝てるポテンシャルがあるのか、または、弱いけれども何とかしなくてはならない領域なのか、そういった3つを考えながら、戦略プロポーザルという形で提言を作成・発行して、世の中にお示していくということをしてございます。

その提言は、1つには、JSTの事業での活用というものが念頭にはあるわけですが、当然JSTだけに閉じることなく、各関連府省で、最適な活用のされ方をさせていただければいいのではないかとということで活動してございます。

今日は、ナノテクノロジー・材料の俯瞰の事例でございますけれども、ここのポテンシャルマップと非常に近い形態で、現在の第4期基本計画と近い構造を持っており、ここにナノテク材料がこういった形で入ってきます。下から基盤技術、材料、プロセス、デバイス、そしてシステム。それで、ここに一体どんな技術シーズが存在しているのかということで、一つ一つを読み上げることはしませんけれども、ここに挙げたようなものがあります。これを私どもで特定するために、日ごろからの調査・分析と、俯瞰ワークショップという形で、内外の識者の皆様にお集まりいただき議論を重ねながら、いろいろな科学技術の動向をお伺いしているということでございます。

それで、誰から見ても合理的な手法というのはなかなか難しいんですけども、1つのやり方としては、図の一番外側の枠、全体に共通する課題であったり、研究を支える基盤的なインフラ、国際戦略、それから社会受容等の問題ですね、EHSやELSI、そして教育、こういったものについても常にセットで考えながら、どのような組み方をしていくかということを検

討しています。例えばこのようなくくり方でもって、大体今ここには30ぐらいの研究開発領域の例がございますけれども、こういったものを同定していくという作業に力を入れています。

こういうのを突然見出すことは、当然私どももできませんので、これをやるまでには数年がかりの作業をしております。この背景には、例えばこれは物質材料の視点からの研究開発の俯瞰というものでございますけれども、簡単に言いますと、下側に物質材料、今の研究のキーワードになるような物質材料があって、そして真ん中の紫のところにはナノテク融合の場と書いてございますけれども、いわゆる近年のナノテクをどうやってここで活用していくべきか。それを一番上側の黄色い部分、応用の具体的なデバイスであるとか材料であるとかに組み上げていく、そして産業・社会へと出していく。そのときに考慮しなくてはならないのは、この右側の縦のものです。これは国際戦略であったり、工業化・産業化していくときの規模化と量産化の問題、それから社会との接点の問題、こういった部分をいかに兼ね備えながら、我が国の戦略として練り上げていくかということが重要であるということを考えております。

これを横型に90度ひっくり返したものがこちらなんですけれども、いわゆる材料からプロセス、デバイスというところに流れていくときに、どんな研究領域の立て方が必要なのかということ考えたときに、いろいろな議論をした1つの結果として、ここにもまた三、四十個ありますけれども、重要な研究領域の例として、こういったものを挙げられるのではないかということ議論してきました。私どもはこれを数年かけて議論し、常にアップデートししています。

今日は、その1つとして、この真ん中の赤いところ、ナノ空間創出制御による新材料構築と利用技術、この辺を私どもの戦略センターで1つの提言としてまとめた経緯がございますので、それについて簡単にご紹介させていただきます。

先ほどの図で見ると、この物質の空間をいかに操るかというものは基盤的な技術であって、応用先は非常に幅広くまたがっているであろうと考えています。そういった可能性があるのではないかといった見方から、提言の候補として1つ抽出をしたというのが、私どものセンターで提言作成へ向けた活動を開始した経緯でございます。

「空間空隙制御材料」の定義でございますけれども、これは読み上げます。空間空隙制御材料とは、物質・材料を構成する元素間結合の「すき間」の形状・寸法・次元及び配列などの構造をナノ～マイクロメートルスケールで制御することによって、バルク材料にはない新機能を発現する材料である。構造や機能、相互作用を検討し、それらを組織化して新機能を創出、革新的機能材料を開発できるポテンシャルを持つものである。その機能というのは分離や吸着、触媒機能、貯蔵、イオン伝導、エネルギー変換など、特異な諸機能を発揮させることができる

材料である。という定義を作って、私どもはこういうふうにとらえてございます。

それは、この真ん中の緑色のところでございますけれども、いわゆる物質の機能や物性というのは、構成される元素とその構造、それは結晶系がどうなのか、アモルファス構造がどうなっているのかといったことでほぼ決まってくるというのが、これまでの科学技術であったわけですが、その構造におけるナノスケールのすき間を意図的に制御することによって、この右側にあるようなさまざまな特徴的な機能を発現させることができる可能性があるということで、ここにいろいろな構造の材料がございますけれども、こういった技術概念で1つづつつくることができるのではないかと考えました。

これを検証するために、下にある小さい字で申しわけないんですけども、ワークショップを開催いたしました。どういった技術シーズがあるのか、それから方向性があるのかといったことを徹底的に議論したことがございます。それを踏まえて、この下の2段目の、1つの提言として、「戦略プログラム 空間空隙制御材料の設計利用技術～異分野融合による持続可能社会への貢献～」を発行しました。

このような技術概念の研究開発をしていくときには、私どもで考えたのは大きく3つの柱が必要なのではないかとということ。A、B、Cとございます。空間空隙制御材料の設計と合成、まずはつくることそのものの部分。それから、Bとして、これは産業化を見据えたときに、空間空隙インプリメンテーション技術と呼んでいますけれども、いわゆるナノからマクロへの規模拡大、階層性を構築していく。高強度、高速合成、低コスト、そして量産化への道筋をつけるという、そういった取り組みです。そして、Cとして、共通基盤的な部分として、物理的な諸現象の解明であったり、計測・分析技術、それから昨今の技術が非常に伸びてきた計算機・シミュレーションであったり、マルチスケールのモデリング、そういったところで、サイエンスの面からこういったものを見ていく。こういった大きな3つの観点があるのではないかと考えて構成をしました。

これを技術シーズから社会へつなげていくところまでを考えたときには、これだけの広がりがあるのではないかと考えておまして、さまざまな材料がございます。メソポーラスの形態であったり、多層構造であったり、いろいろな技術シーズ、材料シーズがある中で、それをどんな観点で研究し、応用開発に取り組んで、そしてどこにつなげていくかといった、そういった見方がこの小さな俯瞰マップで示したものでございます。

事例としては幾つもございますけれども、より具体的な例は、今日この後北川先生からお話しいただくとしまして、私はこの3つだけ、例としてお持ちしております。

例1として、高イオン伝導機能を創出するような、こういった特異な空間構造であったり、真ん中の例2として、これはシリカの材料の中にある別の物質を入れて、これが光捕集機能を発揮する、いわゆる太陽光をエネルギー変換するような機能を発揮するであるとか、また、例3としてこういったかご構造の材料でもって、中にこういった物質を入れるかによって、例えば熱電変換の機能を創出する。こういった新たな事例が、今、我が国ではどんどん出てきています。

これは今あるものに限らないわけで、例えば機能から、または目標からバックキャストする形で、例えば変換という部分で見たときに低誘電率材料を考えるであるとか、今日お話にございました透過や分離の技術、それはイオン伝導もそうですし、物質を分離する技術、例えば蒸留であったり、液体やガスの分離であったりと、そういうのは化学産業で非常に重要なところでありまして、こういった幾つかの目標を考えることも可能であるといった例でございます。それを私どもは、ナノ空間空隙構造の物質と社会とのニーズをどうつなぐべきかというところで、いろいろなマッピングを試みてきました。

例えばこういったものにどれぐらいの期間投資をしていったらいいかのかということを考えるわけですが、もちろん研究開発のフェーズによって、また取り組む規模によって違うわけですが、1つの考え方としては、戦略的な投資によって、将来の産業へのインパクトを与えるところまで、仮に10年ぐらい考えるといった中で、学术界、それから産業界、そして産学官の連携による取り組み、いろいろなやり方が考えられると思います。こういったことを考えることができるのではないかと。

空間空隙制御材料のキーとなるコンセプトは、いわゆるナノレベルの基本的な構造のユニットがありまして、まず、これをつくるというところから、さらに階層性を持たせていくやり方、大規模化をどうやってしていくのか。そして、その空間とそこに入ってくる、または関与してくる物質、いわゆるフレームワークとゲストが互いに多様なわけでありまして、ここでもって電子構造をどう制御するのかとか、格子構造のバリエーションをどう与えていくのか。こういったところが最近の進展としては非常に注目される部分であると考えられます。これをやることによって、一体こういった機能を発揮させたいのかといったところを考えていくというようなコンセプトでございます。

将来的にどこまで実現できるのかわかりませんが、これだけの広がり可能性としてはあるのではないかと考えています。つまり大きなイノベーションを生み出していくような夢として、こういったものを考えることができるのではないかと考えています。

空間空隙制御材料が強みを発揮するであろうところとしましては1つ、いわゆる資源やエネルギー、環境への対応という観点がございます。これは、物質の空間空隙というところで機能発揮をさせることによって、いわゆる省エネルギーであり、これまでできなかった機能を発揮する、または圧倒的な効率でもって省エネ効果を発揮する、そういったところが環境・エネルギーといった問題へ対応させることがよいのではないかとというようなことを、私どもは議論してまいりました。

さまざまな空間空隙の材料が考えられるわけですが、特にこれから注目すべきところの1つの例として、サイズです。例えば50ナノぐらいのメソ領域でもって、ここにはポーラス・コーディネーション・ポリマー、PCPと言われるものであったり、MOF、メタル・オーガニック・フレームワークといった、こういった最近の新しい材料が世界的に非常に注目を集めています。そして、我が国にもこういったところがポテンシャルがあるというようなことで、こういった寸法、そしてフレームワーク、極性によって整理をしてみた1つの例でございます。

さまざまなものがあるので、私ども一通りのマップ化を試みました。調査を行ったところ、60件ぐらいの研究シーズを、物質の次元、それから機能、ニーズを軸にしてマップ化しました。次元と機能でマップすると、これは日本の大学や研究機関で開発されている新物質が、横軸に次元をとったときに縦軸でどんな機能に持っていける可能性があるかといったものでございます。

今度、縦軸を変えまして、ニーズという観点でマッピングをし直すと、これだけの広がりがあり、物質階層のポテンシャルとして我が国にあるのではないかと考えられます。

国際動向、これは数ある空間空隙の材料の中でも、その1つとしてMOF・PCPについてご紹介いたしますけれども、米、欧、それからアジアでいろいろな取り組みがなされています。アメリカはUCバークレイの研究者を中心に、先端的な開発を行っていて、国レベルでもNSFのプロジェクト、それからDOEのプロジェクトが走っているという状態です。

欧州ではフレームワークプログラムで、産業界が主導している、例えばMACADEMIAといった略称の、これは分離技術にフォーカスしたプロジェクトでありますし、ドイツのBSFなどが入っている、触媒材料に特化したNANOMOFというプロジェクトも走っていて、さまざまな取り組みが行われています。

中国や韓国、シンガポールでも、限られた数の大学ではありますが、中国では北京大、清華大等のトップ大学が中心に、既に論文の数では中国は世界一というような状況であります。

し、韓国でも国策のプロジェクトで、Frontier Hydrogen energy R&D Centerというところで水素関係のプロジェクトをやっています。シンガポールでもシンガポール国立大学が中心になってやっている、このように海外ではキーとなる応用を取り上げるような形でのプロジェクト化というのが、行われています。

以上までをまとめさせていただきますと、ナノテクノロジーの1つの象徴とも言える物質中の微細な空間空隙構造を制御した材料の設計・利用技術は、これからの素材開発にイノベーションをもたらす可能性があるのではないかと。我が国は、日本初と言っていいと思いますけれども、MOFやPCP、それからメソポーラスのシリカなどといった材料で、基礎研究では国際的な強みを持っています。

しかし、こういったMOF等の研究開発競争の激しい分野では、研究のボリュームの面では既に欧米、それから中国等がリードしています。日本は戦略的な取り組みで遅れたというのは、塚本座長からも先ほどございました。

より広く、物質の空間・空隙という概念でとらえたときに、学術体系や技術体系を構築することは、まだ世界的にもできていない。この意味は、今まで界面に注目するという研究は非常に多かったわけですが、界面というのは二次元の世界であります。空間空隙というのは三次元の世界でありまして、三次元の空間の中で、その空間の中で例えば高压な状態をつくり出したり、その中でしかできない反応を生み出したりというのは、それは界面の概念を超える三次元のコンファインドされた空間というような概念でとらえることができます。こういうところなんです。

基盤技術体系としてこれを構築し、そして同時に異分野間での垂直・水平の連携を取り入れた仕組みで臨むことが国際競争上、最も重要なのではないかと。といったことで、1つのご紹介をさせていただきました。

こういったものを検討する背景にございましたのは、私どもでこれまで議論してまいりました報告書が何冊か出ております。そのうちの2つ、ご紹介させていただきます。あとはお手元の資料でごらんいただければと思いますけれども、いろいろな可能性があるのではないかと。といったことで、私どもの日ごろの調査・分析、提言のやり方の例をご紹介させていただきました。

以上でございます。

○塚本主査 ありがとうございます。ちょっと熱が入って時間オーバーしましたがけれども、何かご質問、ご意見がございましたら。

○青木委員 よろしいでしょうか。1点、お教えてください。

一番最初にありましたCRDSのほうで進めていらっしゃるという社会のニーズというのと、この研究テーマとして何をやるかというところを突き合わせるというお話で、こういう材料分野というのは、レイヤーというか役割で考えますと、上か下かは別として、一番最初のほうにあるということで、社会の人の生活とか、そういうところまで持っていくとかなり距離感が多分あると思うんですが、そここのところまでのトランスレートというのは、CRDSさんの中にも多分いろいろなエネルギーとか情報通信とか、いろいろな分野で同じようなことをされていると思うんですけれども、その辺と俯瞰させて、このレイヤーを上がって、それをナノテクノロジーに落としていくという、そういうことをやった結果がこういうものだというふうに理解すればよろしいですか。

○永野フェロー ご質問ありがとうございます。結果を得るといふところまではなかなかいかないんですけれども、考え方としては、今おっしゃったとおりでございます、いきなり社会といふところまでは材料がすぐ行かないわけで、その間にどういった分野、産業の分野なのか、社会の分野なのかわかりませんが、それぞれのところに対応させていくというように、そのつけ合わせという作業に挑戦をしております。

それを行うために、この第4期の構造に近いわけですが、エネルギーに関しては私どものセンターでございます環境エネルギーのグループであったり、ライフサイエンスのグループであったり、それからシステムや制度面を検討しているグループと共同で議論したりワークショップなどを重ねておまして、そういった社会ニーズ、それから産業ニーズとの邂逅をやるということをやっている最中でございます。

○青木委員 わかりました。本当に必要かどうかというのは、あったらいいなというのはみんな思うんですが、なければ困るというふうに認知させるというのが、多分その一つの考え方で、そのためにはやっぱり定性じゃなくて定量で何か指標を持って落とし込まないと、なかなか予算も含めて説得されないというのが一般的な話じゃないかと思えます。

今日のお話だと、定量に相当するところというのはどういうところだと思えばよろしいですか。

○永野フェロー 定量的にどう表現するかというのは常に議論の対象として私ども重要視しておりますが、何を定量化するかというと、例えば予想される市場規模であったり、研究のポテンシャルという意味では論文であったり、特許の数というものは、既にこの前回までのこの場でも、馬場委員のほうからご紹介させていただいたように、いろいろやっけてはいるところですが、定量的な指標というのは、あくまで指標の一つとして見るのが私ども大事だと考えてお

りまして、最後の意思決定のところでは、合理的に数字から意思決定されるということは、なかなか基礎的な科学技術の分野では難しいのではないかとこのところも思っております。なので、これは議論を重ねることによって、1つの方向性を決めていくということが大事なのではないかと思っています。もちろんこういった部分でも、材料でも論文、特許、それから現在の産業規模、それから将来の市場予測といったものは試みております。

○青木委員 ありがとうございます。

○塚本主査 どうぞ。

○菊地委員 私は医療のほうで、先ほど奥村先生からもその他の応用へのときの一番キーになる課題は何かということですし、東レの成戸さんからはいろいろな面があって一概には言えないとの発言もありましたが、今日、永野さんの空間空隙構造を制御する概念でナノテクノロジーをもう一度まとめ直していただいたことで、はたとひらめいたというか、前からそういう感じは持っていたんですけれども、実は医療応用する場合、今回の先ほどの資料3-②に出ているところの医療というところ、すべてのアイテムが結局は体の中にナノ材料を入れていくわけですね。2000年ぐらいからNNIが出たにもかかわらず、薬も含めてナノテクを使ったことでも決定的な大きな成果としてはいまだにまだ出ていないところの一番難しさは、結局、医療応用の場合には生体構造といいますか、生体内に入れるナノ物質と生体組織とのマッチングといいますか、そのところのもっと基礎的な特性、それをしっかりと解明することのほうが、急がば回れで、実は世界を牛耳れることになると思うんです。

実はこのまとめの中でシーズマップのところの次元、機能ということで、最後のほうで日本の各大学がやっているところは私もほとんど知っている人たちですけれども、例えばDDSの東大の片岡先生とか、名古屋の馬場先生とか、名大から東大に移ったマイクロ化学デバイスの生田先生などとは常に交流があるんですけれども、結局、日本ではやっているといっても、まだまだ研究者マンパワーが少ないんですね。

それで、実は医療のほうで、今申し上げたように生体とのインタラクション、それから、あるいは再生医療のところでは海島構造と言われているような生体組織が異物と認識して反応しないような、そういうようなまさに表面構造をナノレベルでコントロールするというところで、細胞シートであるとかいろいろな革新的なものが出たわけですけれども、そこら辺の研究を国を挙げてやらせることが実はもっとも効果的かと思うんです。また、もしやらせる場合には、生物とか医学研究者にそういうところの基礎的特性を徹底的に、例えばこの5年ぐらいで集中的にやっていただくとか。そういうことをやることのほうがむしろ大事で、ほかの分野は、ナ

ノ材料そのものを開発するところが非常に大事だと思うんですけども、医療とか医学応用に関しては、むしろ生体とのインタラクションのところ、あるいは生体組織の先ほどのメゾスコピックスケールということで、数ナノから100ナノぐらいのところの遺伝子もそうですしウイルスもそうですし、実際の寸法がその辺のところにあるものが体をコントロールしているわけですから、その中に人工物であるナノのものを入れていったときに何が起こるのか。例えば遺伝子治療なんかも、教科書どおりはうまくいかないというところは、恐らくナノレベル材料の周辺のマイクロ環境がきちっとコントロールできないから遺伝子形質発現がきちり起きないとか、そういうこともわかっているわけですけども、それ以上は進んでいないわけですから、恐らく先ほどの奥村先生から質問の回答を言えば、医療、ライフ関係に関しては、ナノ構造と生体組織、細胞とか分子組織のところの空間空隙、インタラクションコントロールの基本メカニズムを解明する基礎科学研究が一番大事になるのかなという気がいたしましたので、申し上げます。

○塚本主査 ありがとうございます。非常に貴重なコメントをありがとうございます。

ほかにまだご意見、ご質問があるがと思いますが、ちょっと時間が押してまして、次の北川先生のご講演をいただきたいと思います。

改めてご紹介します。京都大学の物質-細胞統合システム拠点の副拠点長でいらっしゃる北川先生から、先生、すみません、30分しかございません。

○北川教授 私は先ほどから出ている空間材料をやっています。穴の小さいものと一口に言いますが、50ナノメートルより大きいマクロ孔、2から50ナノメートルの範囲のサイズのもの、これはメソ孔と呼んでいます。私たちが研究しているのは、さらに2ナノメートルより小さいマイクロ孔です。これを私たちはボトムアップでつくり上げています。

こういう穴の材料というのは紀元前のエジプト時代からありました。それは活性炭ですが人類が使って3,000年、それから、ゼオライトが出てきて石油産業に大きな発展をもたらしています。だけれども、そういう既存の材料でない、全く新しいものを出してくることによって、サイエンス並びに我々の生活に革新的なものが出てくるんじゃないか。

前世紀というのは、化学といたら新しい分子をつくる。すなわちそれによってお薬が出てきたわけですが、じゃ、今の世紀は何かというと、そこに加えて空間という視点に焦点を当てた化学が重要ではないかと思っています。なぜならば、金属酸化物、金属は、電子が流れる場はあるが、分子やイオンが関われる穴があいていません。そういうところに対して、空間を入れることによって、いろいろな化学種があらたに加わり、さらにプロトンだけじゃなくて、フ

フォトンもフォノンも全部かかわる多様な機能の場ができる。全てがダブルの自由度を持つわけです。こういうものをどうやってつくるのかというのは、ナノテクノロジーの視点でも大きな課題です。

まず、小さな細孔空間のすばらしいところに焦点を当てて話します。1立方センチのこのサイコロの内表面というのは4平方センチです。言うまでもありません。一方、0.8、0.8スクエアナノメートルのチャンネルをこんなふうにあけたら、2,200平方メートルです。こちらと全然違います。例えばこれ、メタンという分子を表面に張りつかせたらどうなるかという、100万倍の濃度のものがナノ細孔体に取り込めます。すなわちこの立方体の150倍の体積のものを入れることができます。

さらに細孔が小さいことで何がいいかというと、ゲスト分子がある面に対して吸着したら、大きいと細孔では1面しかききませんが、小さい細孔では、それを形成する器壁全面がききまので、非常に強く、ゲスト分子をとらえることができます。だから、穴が小さいってことはすごく分子を捉える意味ですぐれています。そうしたら、例えばこんなのをどうやってつくるのとおっしゃるわけです。我々の頭の中はこんな感じで、一つ一つつくっていきます。

それで、どういうことかということ、ぱっとこういうふうにつくりたい、これがボトムアップです。これが化学なのです。ケミストリーです。なぜならば、我々の条件でつくるということは、そこで使えるわけです。ごく低温でやっているわけじゃない。それで、私は、こういうふうなのは配位空間の化学ということで発展させてきています。配位ってなぜかということ、電子がいっぱいあるものに足りないものが結びつくというのは配位なんです。それで金属イオンに有機分子がついている。金属イオンのすばらしいところは、炭素の化学よりすぐれているのは、こういうふうに結合手が最高4つではないのです。6つも7つも8つもあるということです。

それで、実は概念はこういうことです。金属イオンとこういう分子をつくって、これは有機化学です。そして、ここに金属イオンと結合しなさいという情報を与えておくと、実はボトムアップで組み上げることができるわけです。これは分子のプロセスですから、非常に早いです。それで、こういうふうに組み上がる。

もう一回、お見せしますと、これがちゃんとX線で構造解析して示しますとこんな穴になります。すばらしいのは、1ミクロンの結晶であっても、それが持つ細孔のサイズはたかだか1ナノメートルですから、結晶の一辺、縦に1,000個の細孔、横にも1,000個、すなわち1ミクロンの小さな結晶でも断面には100万個できるわけです。これが実際に使えるわけです。これらの穴はこんなふうに分で組まれた工事現場の骨組みのようになっていますが、そこへ分子が

入ってきて、相互作用する。これを多孔性配位高分子（PCP）、または金属-有機骨格体（MOF）、政界の方はこの呼び名が好きだと思います。すなわちMOFはミニストリー・オブ・ファイナンスの省略と同じです。とにかく、世界でブームとなっており、2010年には報告数が2,000個以上になっています。とりわけ中国のコントリビューションはものすごく大きいです。

まず特徴第1、おわかりになったと思うのですが、一から設計できるというわけです。これが非常に大きいです。

2番目の特徴は、高表面積、軽量である。ゼオライトは最高でもバスケットボールのコート程度の表面積です。カーボン材料は理論的には2,500m²/g、サッカー場の半分。PCPは4,500m²/gぐらいできる。この理屈は簡単です。カーボンの1個の原子の表面積については、1グラム持ってきたら1万8,000m²/g、だけれども、こんなので何もできません。ベンゼンでは、全部のこの表面積8,400m²/g、2つ重ねて、マクドナルドのハンバーガーのようにすると7,100m²/g。じゃグラフェン様のようなものでやったら上下面で2,900m²/g、1次元にしたら5,600m²/g、飛び飛びにしたら6,200m²/g、完全に1個ずつきれいに並べたら7,700m²/g行くわけです。どうするのか。実は、これは金属イオンで結んだらベンゼン環をうまく配置できます。これは実際に外国のグループがやって、4,500m²/g、5,900m²/g。だから本当の話です。構造は空間だらけですかすかですが、表面積は非常に大きくなります。

本材料はいろいろな機能が出てきています。一方先ほどから議論になっているように、少なからず懸念が出てきます。「高いんじゃない?」「錯体でしょう、不安定でだめだよ」、「有機材料、不安定でしょ?」、「耐久性は」、「つくるのが大変そう」。これが一例ですが、例えば耐熱性では550度摂氏までもつものが出ています。大体一般的に250から300度摂氏、最高でも550度摂氏までの熱安定性のあるものがつくられています。耐酸性や耐アルカリ性の材料もつくられています。さらに水にさらしておいても大丈夫というのができています。だから、本材料は不安定であるというのは正しくない、しかし本材料が現れて、15年たってやっとこういう安定なものが出てきました。最初は、辛辣に言われたんですが。

どうやって合成するのか。常温、常圧合成、水熱、固相、マイクロウェーブ、いろいろあります。ちょっとお見せしましょう。これは常圧合成、これは新日鉄住金の私たちと共同研究者からいただきました。金属イオンの溶液と有機配位子の溶液をこのように混ぜます。はい、すぐにできました、これで終わりです。これ、リアルタイムです。もうできています。あとはどうするのか。これは単に分けるだけです。こうやって濾過して分離するだけです。この珍で結

晶が穴があいている材料です。だから、非常にプロセスは簡単です。

その他の例を示します。これは溶媒を使わない固相合成です。固体試料を乳鉢に入れてごりごりと摺っていたらできます。もうちょっとスマートにすると、こういう電動の合成器を使って合成します。それからマイクロ波でもできます。これは最後のほうにちょっとお見せしますが、本当に簡単に合成できます。さらに、超音波を使っても合成できます。

それから、これはBASF、世界最大の化学会社がやっていますが、電解合成があります。これはどういうことかということ、要は、反応させると必ず不要な化学種、たとえば対アニオンなどが副生します。これではまずいというので、銅をPCPの骨格に用いるなら、銅電極で合成しているというわけです。これは先ほど示した常温・常圧合成の1例です。

それから、私たちはつい最近までNEDOプロジェクトで研究をサポートしていただいて、ハイスループット合成機を購入しました。これはアメリカでは常識的な装置ですが、日本では、多分私のところしかないと思います。自慢じゃないですけれども、日本では1台しかないという恥ずかしい状態です。

もっとおもしろいのは噴霧合成、これは、水に溶かした金属イオンと水に溶かした有機のものを壁にシュッシュュッと交互にやります。それでできているという例です。これはBASFが簡単に合成できると宣伝しています。たとえば壁に噴霧したら、目的のPCPが塗り込められるというものです。

さて、じゃ、PCPの優れた機能というのはどんなものか？いくつかお見せします。まず、貯蔵という考え方は、私たちのスタートからあったのですが、これはほぼPCP/MOF研究の第I期と呼べる研究成果です。ほぼ水素貯蔵以外は次のフェーズ、すなわち実用化に進んでいます。それから分離用のPCPもかなり出てきています。次は何かということ、触媒だと私たちは思っています。もちろん、ほかのセンサーなどのデバイス、エレクトリックデバイスもあります。さて、貯蔵で言えば、これPCP、1グラム持ってきて、0.1気圧のCO₂にさらすと、1グラムの中に20%入る。これは5気圧にすると64%入るPCP。これは50気圧にすると70%も入るPCPがあります。すなわち、すかさずのPCPでそこにCO₂をいれると、ほとんどCO₂だらけ。そういうふうなものが出てきています。

次に、メタンに関しまして述べます。今、米国初のシェールガス革命にあるように、どんどんメタンの価格が下がっており、アメリカは輸入国から輸出国になる。すなわちアメリカで安いメタンを燃料とする車を走らせようという流れが出てきています。そのビジネスモデルは、GMやフォードと進めなくてもなくても、要するに汎用で走っている郵便局の車とかそういう

ものに、こういうシリンダーユニットを切りかえて走らせるということです。

実際にBASFは、MOF/PCP剤にメタンを詰めた燃料システムで、ベルリンーバンコク間をデモンストレーションしてこうやって走らせています。実は10年前にも、私たちはメタン貯蔵をやったのですが、日本は10気圧の高圧ガス保安法があって、初期投資に金がかかり過ぎるといのでみんなあきらめていたわけです。欧米は30気圧ですから、十分走れるということで、今実現しています。

一方、私たちは、アセチレンに焦点を当てて研究をしました。アセチレンって本当に危険で、2気圧、室温で加圧すると爆発的に反応します。非常に危ない。だけれども、現状としては非常に役に立つ気体です。フラーレンもつくれるし、ナノチューブもできる。非常にいいのだけれども、純粋にアセチレン貯蔵は難しい。されに性質が酷似しているCO₂との混合物では簡単に分けられない。私たちは、この細孔、これは断面ですけれども、器壁とアセチレン分子との水素結合というのをうまく使ったらできるということを示したわけです。これ、ちょっとデモンストレーションですけれども、こういう穴にアセチレンガスを水素結合がちょうどできるように、こう入っていきます。こういうふうに入ると、非常に高濃度に入れることができます。そしてこれが最も大切ですが、アセチレン分子をダブルの水素結合でサポートしているから反応はしない。こういうような材料がPCPから作れるわけです。要は、有機分子と金属イオンで取り込む分子を選択的に、安定に取り込めるように精密にデザインする事ができるのがこの材料の特徴です。世の中に出回っているアセチレンボンベは、危ないのでアセトンに溶かしてあります。それをこういうPCP貯蔵剤でつくと、純アセチレンガスを大量に、安定的に貯蔵、運搬が可能となる。次、この穴の中でポリマー合成が極めてうまくできるのですが、時間がありませんのでこれは省略させていただきます。

それから、先ほど永野さんの話に出た、PCPによるイオン伝導材料、これはなかなかおもしろい展開ができると思います。要するに燃料電池の中身を見てみると、ガス分離して、そしてイオンをトランスポートする電解質、反応するコンバージョン用触媒部、これ全部の技術がこういう材料でできないかというのを、今思っています。

とにかく生体もやっているイオンの移送ということは、実は我々もPCPを用いて実現することを考えています。そうしますとプロトン源およびそれを運ぶ物質が水だけでは問題があります。実際にこれは横軸に温度、縦軸にプロトン伝導度をとった現行の各種材料の場合を眺めてみますと、固体のものは確かにものすごい高温まで行ける。それから、有機高分子のナフイオンみたいなものは100度ぐらいしかいけない。中間の温度領域の材料がないんですね。これ、

ミステリーギャップなんです。それをどうするかというと、実はプロトン源でそして運べる水以外のものを入れたらいいということになります。水はこういうふうにプロトンを、お互いに隣にいたらぽんぽんと渡すわけです。そのような機構なら、イミダゾールではどうかということになり、実際イミダゾール分子がこうやってくるくる回ることができたら、プロトンを都合良く渡していけるんじゃないかと考えられる。この機構であればリン酸もそうです。それを穴の中に入れるということで、実際つくったのがこれにして、イミダゾールをつくったフレームワークの中に入れます。ほぼストレートにチャンネルをつくることができ、適当にイミダゾールを閉じ込める。しかしながら、自由に動けるような、そういうチャンネルをつくることができました。そうすると、このイミダゾールが温度を上げていくと、くるくる回って、そして隣にバケツリレーでプロトンを渡していくわけです。

そういうような設計でやっていくと、こういうプロトン担体の選び方、そして実際の穴の設計というのができるということになります。現在のフェーズは、これをプロトン伝導基板にして、実際電極で挟んで、どれだけ性能が出、長時間もつかとうい実験を、今進めているところであります。

それから、もっとおもしろいのは、リン酸骨格とイミダゾールでやると、これ、実は先ほど紹介した固相合成です。物理学者も数学者でも誰でもできます。こういう材料です。出きた材料では、リン酸がくるくる回って、ここでプロトンを渡すという、こういう材料です。そういう意味で、要するに中温域という領域で実現する材料もPCPで創出することができたわけです。

それから、光の件に関しては、永野さんがちょっと話されたので省略しますが、こんなことができる。これはサイエンスとしてはおもしろいのですけれども、要は非常に反応性の高いものをこういったフレームワークに組めないかという遊び心があった。実際それは、不安定なものからはできないから、最初からやらずに後で光を当ててつくってしまうという例です。実際にやったらナイトレンという、生成しても非常に反応性が高く一瞬の内に消えてしまうようなものが、全部壁にサポートされているものです。それができたという例で、実際にX線で構造を決めることができ、も反応せずに安定に存在している、

さて、今日、特に言いたかったのは、私たちは何をなすべきかということなのです。実際、肥料がなかったら世界の人口は高々40億どまりであるところ、現在では世界の人口が70億になっている。なぜかというのは、ご存じのように空気中の窒素が固定されたから。空気からの窒素肥料の実現です。これ、ノルウェーの木の年輪なんです、最初の10年、全くアンモニアを

やらなかったら、こんな遅い成長です。一方アンモニアをやると、どんどんと伸びているという例です。いかに窒素肥料が重要であるかというのがこれでわかります。

米や小麦をつくるのに1ヘクタール当たり約100キロの窒素が必要です。野菜はこの数倍必要というわけです。そこで問題は、どこにでも使って進めるサイエンステクノロジーというのが、これから重要なんだと。過去にその業績がありました。ご存じのようにハーバー・ボッシュ法です。これによって、要するに肥料が世界に行き渡った。そのおかげで今や1億4,000万トンのアンモニア生産量になり、それが出てから、これは世界の年代における人口のプロットですけれども、アンモニアが出てきたことにより、見事に世界の人口がほぼこういうふうに非常に伸びました。これが第一の錬金術です。だから、空気からパンをつくったと言われていま

す。ところがこの凄いハーバー・ボッシュ法、実際はエネルギー多消費型、高温、高圧反応、それから水素は地下資源、石油や天然ガスをつかうプロセスです。そういう意味ではだめなんです。横軸年で、縦軸を世界の人口をとってみますと、発展途上国は今後がんと伸びるのに、先進国は伸びない。何が言えるかということ、何十年も前は先進国がひとり占めにしてきた資源やエネルギー、全部それがシェアする必要が出てきたんだということです。限られた資源、エネルギーをシェアするということになると、どうしてもこれ、ナショナリズムが出てくる。現実、隣国との関連においても我々はさらされているわけです。

欧米先進国は、いつもエネルギーが先に出てくるし、BRICSもエネルギーですが、日本だけ、資源も重要項目です。どうしたらいいのか、特に地下資源は日本にはほとんどありません。それでは、実はどこにでもあるものを使えばいいのではということになります。炭素資源でいえば、空気中のCO₂、いっぱいありますし、水、この水素資源、いっぱいあるわけです。このどこにでも存在する資源を利用できれば、地下資源から脱却への道というのが現実味を帯びてくるし、領土問題が発生しない。これは平和への貢献なんだといえる。科学者は平和へ貢献するのだという、そういうシナリオです。だから、そういう意味で言うと、空気からパンをつくったというのは、昔ならば、今度は空気から食料、燃料をつくって、平和を築いたというふうに言いたい、道は長いですけれども。

そういう意味で、よく考えてみると、こういう簡単なガスが全部にかかわっていることに気づきます。環境、資源、エネルギー、ライフ、今日はちょっと時間がないので詳細に語れませんが、私は物質-細胞統合システム拠点に所属し、材料の細胞への応用をやっているんですが、生物も気体を利用している。今日はちょっと言えないので申しわけないんですけれども。

したがって、気体を自在に操るガスサイエンステクノロジー、分離・貯蔵・変換というのが重要です。ガスは必ず、簡単に混ざってしまいます。それは分離する必要がある、エネルギーをかけずに。それから貯蔵、濃縮する必要がある。そして変換。この操作が全部できないとガスの技術は発展しません。

これは、ちょっと古いですがけれども、日本全国の産業が使うエネルギーの中で、化学は34%、そのうち何らかの形で蒸留、分離などやっているのが40%、すなわち日本の全エネルギーの10%ちょっとは分離に使っている。問題はエネルギーをかけない分離ができないのか？

今日は、私のPCPを用いる化学のフィロソフィーをじっくりとしゃべれないのですが、重要な点を言います。ヘラクレイトスは万物流転説、日本では方丈記に示される物質観があります。すなわち、未来永劫に渡って変わらないというものは無い。この考えを多孔性材料に適用すると、「堅い頑丈な空間をつくるというのが従来の考え。従って壊れない」。ところが、もっと柔らかいソフトな空間、要するに応答できるような空間が重要ではないのかと。これにより、どのようなゲスト分子でもしっかりと認識できる。それが私の着想です。その実現はPCPでは比較的容易でした。要するに細孔をつくる分子それぞれが変わるわけではなく、たとえば、金属と配位子の結合角が変わるだけで、全体として柔らかさが生まれ、しっかりと入り込んできた分子を認識できる。そういうふうにしてつくれる、柔らかい空間が重要であるし、新しい化学でもある。

実際、それを用いて分離に応用してやると、PCPはあたかも手のごとく分子をしっかりと認識できるわけです。ここに示したように、こういうふうには、あたかも呼吸するかのごとく、層が動くものができたわけです。詳しく言いませんが、ゲスト分子を入れるとこういうふうには膨らんでいきます。どんなになっているかというのは、多分、ガスがいっぱい来ると開いてくるという、オープンゲート材料です。ところが、ゲスト分子を追い出すとまた閉じた構造に戻る。ちょっとヒステリシスを持つ、こういう材料です。従来できなかったこういうガスの認識が、ゲートの開き方が違ってできるということがわかります。

それでは、気体分離はどんなやり方が行われているかという、まずは深冷分離。これは気体を冷やして液化し、それから温度を上げて分けていく。一番エネルギーがかかる。それから圧力スイング、混合ガスを吸着剤の塔に入れたり戻したりして、混合ガスそれぞれの成分の吸着能の差をとるものです、最後には分離膜で、効率はこれが一番いいのですが、現行では、優れた膜材料がほとんど無いと言う意味でもっとも難しい技術です。例えばこの圧力スイングで考えてみます。これは実はこういうようなバイオガスを分離するのに圧力スイングが使われま

す。そうしたらあんな膨れたり縮んだりするものがもつのか、だれでもそう思う。もつのかと思うわけですが、実は、ある日本の企業が、柔らかい材料を用いて実証しています。実際にやってみて、60万回やっても性能は変わらない。驚異的です。これは実際は繰り返し実施が7年分に相当します。だから、ああいうソフトナ材料は壊れるんじゃないかと疑われていましたが、実は機能は変わらない、そういうものが出てきています。

どういうものかという、従来材料はこういうものだった。サイズと形だけだった。もう一つ、ちょっとすぐれてくると相互作用が穴の中で異なる。ところが我々はどっちかという、こんな感じなんだと思っています。まるで腸の蠕動運動です。柔らかいというのは非常に重要なコンセプトなんだということがわかってきました。

そういうふうにして実際にやって、これは、さらにずっとガスを送り込んだときに分離した状態をあらわしていますが、こういう材料でもできるということがわかっています。

究極は、私たち、これは新しいサイエンスの意味もあるんですが、空気中にある非常にわずかなガスを分離できないか。これは分子の認識、原子の認識という問題です。それができないか。たとえば、空気成分の酸素、アルゴンの分離がエネルギーを多消費して行われている。それをPCPを用いて低エネルギーにて分離する。このPCPを用いて分離する対象を、もっと不可能に近いごく微量空気中に含まれる、クリプトン、キセノンその他に応用できないかということを考えています。

変換の課題ですが、ここで声を大きくして言いたいのは、人類史上、エネルギー源を地下資源に頼ってきた。そして要は石炭、石油、天然ガスと変えてきました。今後は、エネルギー、資源について気体の時代です。特にシェールガス革命。シェールガスの場合のメタンはいいんだけど、CO₂削減も求められる。どうしたらいいのか。やはり地下資源に頼らないということを使う、そこが実は単にメタンだけじゃなくて、CO₂削減という2つのこの方向がある高度な先進国がやはり優位性を持っているわけです。

無尽蔵に存在する気体原料、これを有用なものにもし変えられたら、これほどすばらしいことはないと思います。

そういう意味で、例えば地下資源の流れを、こういう有用な資源から持ってきます。空気のようにどこでもある資源から持ってくると、必ず分離が必要、貯蔵、運搬、圧縮して反応させる、この操作がしっかりできる材料は何かという、これは私たちの材料だけではないと思うんですが、空間空隙材料です。いろいろな材料があります。それでやっていく必要がある。

私たちが、今、非常に興味を持って推進しようとしているのは、水から水素を取り出して、

そしてCO₂をメタノールに変える、このプロセスで循環させるという、米国のオラーが言っているメタノールエコノミーです。こうすればうまく回るわけですがけれども、これはまだ絵にかいたもちで、まだまだ技術がありません。これをいち早くやるというのもおもしろいんじゃないかと思っています。

これを実現するためには触媒が必要です。じゃ、我々の材料で触媒はどうかという、これはいろいろな考えがありますが、今日話を聞いていただいて、すぐわかるのは、金属があるから金属サイトが触媒になるじゃないか。それから、この有機分子の部分が触媒になるじゃないか、また、それらのハイブリッドができるじゃないかと、いろいろなアイデアがあると思います。時間がないので逐一は言わないですが、例えばこういうような分子触媒、有機化学分野の研究者が非常に多くすすめているものです。これが実はフレームの中に組み込むことができ、実際そのPCPが出てきています。細孔サイズもどんどん変えられる。それから、ナノ粒子とのハイブリッド化によって、例えばこういうメタノールをつくるという話も出てきます。だから、いろいろな組み合わせ、今後発展する素地が大いにあるというふうに思っています。

だから、技術的貢献という点では、先ほど言っていますように、分離、貯蔵、触媒、イオン伝導、その他、まだまだ出てくると思います。これは分野融合すればするほど出てくる話であって、一分野の人がやっている話じゃないと思います。

私としては科学的貢献を、気体の生命へのかかわりの解明としてすすめたい。そして、気体を自在に操るサイエンスというのは、まさに重要でおもしろい課題じゃないかと。あとメゾ領域にあらわれる非線形、多体现象ということで、新たなサイエンスがまだのこされている。これはメゾスコピックサイエンスとも呼ぶものと思います。それから、さっきも永野さんがおっしゃったように、擬圧効果というか、穴に入ただけですごい圧力がゲスト分子やイオンにかかる現象、この科学は面白い。そして究極分離、、、というように空間空隙材料は多様な展開が期待される。

アメリカでは、メゾ領域というのが今まさに非常に注目されています。DOEは、次はメゾだと言っています。だから、どういうふうなものなのかというのはポイントですがけれども、私たちは、このメゾにしかできない、単なるサイズじゃなくて、このドメインでしかできない、そういう次元で出てくる空間空隙物質というのをつくろうとしています。すなわち、物質のサイズコントロール、形のコントロールもして、この材料をこの領域に持ってきています。実際に、最近発見できたものが、メモリー効果です。これはマクロサイズでは出ない、ナノサイズでも出ない、メゾ領域で初めて出てくるというものが出てきました。

表面のコントロールは、まさにこうやって家を建てるかのごとく分子、イオンコンポーネントを変えて組みあげていきます。これは、ドイツのグループがこのような有機分子を介してつくっているものです。それから分離膜とおっしゃっていましたが、ヨーロッパではPCPを用いてこういう分離膜をつくっています。ZIFと言われているPCP結晶を多孔質アルミナ上につけて、分離能のみならず膜安定性もあり、十分うまく機能する材料を作り上げています。これも、やっぱりボトムアップでつくれるというところがポイントです。一方、これは電極触媒用の電極としての機能するPCPも出てきています。

ということで、こういうふうに分離、貯蔵、変換、輸送を1つのものにまとめていくような、そういう技術が今後出てくると予測しています。

これはちょっと驚くべきことで、今日は絶対にこれはしゃべろうかなと思っていたのですが、これを見ていただいたらわかりますが、軽水と重水の認識、すなわち同位体分離技術につながるサイエンスです。これ、圧力にたいする吸着量を表すグラフ（吸着等温線）です。私たちの柔らかいPCP材料で、軽水と重水のこの吸着等温線で、普通、室温でこれだけ差があるものなんてありません。通常はわずかな差です。要するにアイソトープの分離に対する新しいコンセプトが出せそうだとということがわかってきました。このように、今後どのような機能が発見されるかわくわくすることが多い分野です。

ということで、非常に新しいこの分野を我々は築きつつあるのですけれども、この/MOFはやっぱりボトムアップで一からつくれるというのがポイントです。それではマクロ孔、メソ孔、ミクロ孔全てを併せ持つ階層的な多孔性材料は実現できるのか？これは大きな課題です。実はこれができることをお見せします。このようなマクロの骨格をアルミナでトップダウン法でつくります。1マイクロぐらいの細孔を持つ骨格です。ここの表面に有機配位子を作用させ、PCPを成長させます。それはマイクロウェーブでやります。ちょっと見てください、これ、この1つ、これマイクロウェーブかけます。たった60秒でできます。これはまさに、料理をするという主婦の世界です。チンでできるのです。このような材料は分離、触媒、その他電子デバイスなど応用は多岐に渡ると期待されます。

最後に、PCP/MOFの国際会議は、実は2年後に神戸で私たちが開催します。これは今度で4回目になります。実はそれは、私は6年以上前、文部科学省の配位空間の化学で、こういう国際会議をやっています。だから1回目はドイツであったわけではないのですが、そういう意味で世界がこういうふうに関心し発展してきたといえます。こういう分野が今の現状でございます。

以上です。これでちょっと長くなりましたが、終わります。ありがとうございました。

○塚本主査 どうもありがとうございました。

時間が押し迫っているんですが、せつかくの機会ですから、ご質問があればよろしくお願ひします。

○松下委員 さっきのJST様のお話とも関係するのですが、ただいまグリーンイノベーションの戦略協議会のほうでは、技術実装をいかに到達するかというところが非常に問題になっております。いかにアカデミアの結果を産業へ持っていくかということが問題になっておりますが、北川先生の結果は、どうやってそこまで産業界に貢献できているんだとお考えですか。どうやって産業に実は転化できたんだとお考えですか。

○北川教授 やっぱり産業界の人とつき合う機会がないとだめですね。サイエンスは非常に重要だとか、技術はそうだという意味では、ニーズとかいろいろな形が、きれいな話があるのですが、基本はやっぱり膝をつき合わせて共に考える信頼関係がないとだめです。そういう機会が出てきているというのが、非常に最近です。そういうようなのがやっぱりNEDOのプロジェクトにしる、JSTのプロジェクトにしる、お互いが頻繁に議論し合うような会ができつつあるので、やっぱりそれは非常に重要なことではないかと思っています。

○松下委員 戦略協議会のほうでは、それがうまくいくためのシステムとして、例えば税金対策ですとか、そういったことも話し合われているのですが、例えばJST様のほうでは、インプリメンテーションに関してはどのようなシステムをつくられていらっしゃるのでしょうか。北川先生のおっしゃったような場が大事だというのはわかるのですが、それに加えてインプリメンテーションの場合には、どのようなシステムをやられていらっしゃるのでしょうか。

○永野フェロー 産学の連携プロジェクトに障壁をつくらないということを、事業としては推進しようといつも考えておまして、つまり産業界が入ってくるときに障壁を設けない。それから、研究開発をやっていく中で、ある時点で何か見えてきた、技術が出てきたというときに、速やかに次のフェーズのプロジェクトに橋渡しをするということ、なかなかこれはできていないというご批判もあるかもしれませんが、私どもやろうとしていまして、例えば最近ですと、経産省さんやNEDOさんとの相談を割と頻繁に持つようにと心がけています。

○塚本主査 どうぞ。

○菊地委員 今は産業界ですけれども、先ほど永野さんに申し上げたんですけれども、ぜひ医療応用のほうは、やはり医学研究者と同じような場をつくっていただくとよろしいんじゃないかと思います。まだまだ日本は圧倒的に少ないんじゃないかと思いますので、よろしくお願ひ

いたします。

○北川教授　それで、私たち今、物質－細胞統合システム拠点で研究をやっています。5年前の発足時に私たち、化学と物理、そして細胞、生物学者と共同研究をしようとしたのですが当初はなかなか進まなかった。そこでアンケートをとったら、化学、物理分野の研究者はどうしたら一緒にやれるかというので一生懸命考えますというアンケートです。バイオ系の方は、自分らの世界があるからどちらかという必要は無いという雰囲気而努力しようとはしない意識でした。だから、やっぱりマインドをちょっと変えてもらわないと、多分お医者さんは病気を治しているのだから特別に化学者と研究する必要は無い、早く技術を出してほしいという感じでした。だから、そのマインドをどうしたらいいかというのは、非常に僕らは5年間苦労したところなんですけれども、今では、結果的にうまくかみ合い共同研究が進んでいます。上から、共同研究が成立しないとだめだ、だめだと圧力をかけられたことによって、みんな考えるようになりました。

すなわち、ある意味でトップダウン的に圧力をかけ、何かうまい仕組み、たとえば資金と場所などを措置する、などをつくっていただいたら進んでいくように思います。

○塚本主査　ありがとうございます。今のディスカッションは非常に重要なところかと思えます。医工連携なんて言葉だけ躍っていますけれども、なかなか現実の世界では、バイオの世界の方いわゆるサイエンスの世界とでは、まだ相当溝があるように思いますし、これは国の仕掛けとしてもどうしていくかというのは、1つの課題だという気がします。

ほかにご意見ございますか。

なければ、ちょうど時間が参りました。北川先生、本当にありがとうございました。これからもさらに、いろいろ先導して研究いただけることを期待しております。

それじゃ、次回に向けて事務局のほうからご連絡をお願いします。

○事務局（守屋）　次回のお知らせの前に、資料6としてA4の紙1枚、カラー印刷したものをお渡ししております。表面に科学技術関係予算の推移ということで、平成18年から23年、昨年度までの数字が載っております。先般来、関係府省様にお願いして、個別のデータを調べていただいたものとは、実は合計数字がちょっと違う数字になっています。これは、内閣府のほうで担当部局が23年度のものとして、改めて第3期の区分で集計したものです。もっともデータの出所は関係府省さんであることは変わりありませんが、第3期の分け方と同等に、23年を見たらどうなるかということで、改めて整理したものがこちらになっておりますので、過去のデータからの連続性という意味では、この数字で見ていただくことができます。引き続き24年度に

についても、今、内閣府の担当部局のほうで精査中ということでございますので、いずれ平成24年度についても、同じように連続性のある数字で見ることができるようになります。

ちなみにここでは、平成23年度、ナノテクノロジー材料関係814億ということで、22年度759億に対しては、少し増えているという状況です。過去5年間平均すると、大体800億前後ですので、傾向としては大きく変わっていないという見方ができるかもしれません。

ナノテクノロジーだけの数字を出したものが裏面にありますので、ご参考いただければと思います。

それでは、最後に次回のご案内をさせていただきます。第7回、12月7日金曜日15時から、1214ということですので、このビルの12階の会議室になっております。

それから、10月が1回抜けた関係で、12月に2度、今のところ予定させていただいております。12月の2度目の会合が、19日水曜日13時からということになっておりますので、控えておいていただければありがたいと思っております。

以上です。

○塚本主査 ありがとうございます。次回、立て続けにちょっとありますが、ぜひご協力をよろしくお願いします。

それでは、以上で本日のワーキングを終了させていただきます。どうもありがとうございました。

午後5時02分 閉会