

## オープンディスカッション 質疑応答

Q 1. (鈴木教授) 太陽熱発電について、①仕組みをもう少し解説してください。②ドイツで開発が進んでいるとのことですが、いわゆる「シュタットベルケ」事業モデルに係っていることですか。

A. 太陽熱を集光する形で熱に変えます。それを回収して蓄熱材の中に熱を取り込む形です。現在想定しているのは、600℃の熱を貯めて、蒸気タービンを回す仕組みです。熱が出ている間は当然発電できます。夜になっても発電できるということで、スペインでは300℃くらいで対処していると聞いており、詳しくはわかりませんが、ある程度の実証実験が行われているところと聞いています。

ドイツの話は、風力の話です。風力で発電した電気を使ってヒーターで発熱させます。この熱を蓄熱材に取り込んで、同様に発電するというものです。余っている電気を使って蓄熱をして、蒸気タービンを回して、発電をするシステムです。シュタットベルケに関連しているのか、詳細はわかりません。

Q 2. (鈴木教授) 硬殻シリカマイクロカプセルは、管壁など摩耗させないのですか。自動車への応用研究の実例はありますか。あれば、具体的に説明をお願いします。

A. シリカは、ある程度硬いので、管壁を摩耗させることはあるかもしれませんが、最初にコンセプトを申しあげているように、流速を落とすことができることが潜熱輸送の特徴なので、そんなに大きな流速を使って輸送することは想定の中に入れていません。その範囲で我々が実験したところと言えば、顕著な摩耗は見られていません。

自動車のメーカーも、非常に興味をもっておられます。ただ、まだ共同研究をしている訳ではないので、応用がどのようなになるのかはわかりません。自動車メーカーの興味はいくつかありまして、一つはラジエーターで伝熱が良くなるということと、ラジエーターのポンプ動力が下げられるという事です。もう一つは、触媒です。一昼夜車を置いても触媒の温度が下がらないというようなシステムについて、検討するようなお話しは来ています。

Q 3. (鈴木教授) 蓄熱材をシリカでコーティングするとの発想は、どこから生まれたのでしょうか。

A. カプセル化している蓄熱材として樹脂カプセルというものが既にございます。これはアメリカの大手企業で生産されていて、日本でも扱われているところもあるかと思えます。ただ、樹脂カプセルだと、基本パラフィンしか入りません。パラフィンは過冷却が無いという事で、非常に良い蓄熱材ではあるのですが、蓄熱密度が非常に低いということと、案外高いということ、可燃性の物質であるという欠点があります。水の中に混ぜていると問題ないのですが、例えば壁に貼るとかをする、大変なことになります。それよりも機械的強度に優れて、中になんでも入れられそうなものとしてシリカと言う選択肢を選んだということです。

Q 4. (鈴木教授) カプセルの摩耗や壊れの評価は、流速が早くなると起こるのでしょうか。

A. 摩耗や壊れのことは、現在やっているところですが、カプセルが壊れることはないと考えています。中を観察するときには、特殊なマイクロームを使って、何とか切断できている状態なので、普通に流している状況では、壊れることはほとんどないだろうと考えています。

Q 5. (中村教授) 服を着て発電できることは、素晴らしいことですが、よく問題になっている電磁波の影響はどうなるのでしょうか。体全体が電磁波に包まれるのでしょうか。

A. 熱電変換は直流電源としての発電です。直流ですので、電磁波は発電によって出ることはありません。逆にカーボンナノチューブは優れた電磁波吸収体なので、カーボンナノチューブウェアラブルデバイスを着ていると、逆に外からの電磁波が届きにくくなります。

Q 6. (中村教授) カーボンナノチューブ糸について、撚(よ)りの制限や織機の制限はあるのでしょうか。

A. 企業の方たちともよくお話するのですが、撚(よ)りや織機とあるように、日本はかつて繊維産業の世界最先端だったのですが、今、カーボンナノチューブのように特化した、小ロットの変った糸を作ってくれるところがなくて、結構困っています。我々がこの先、製品プロトタイプレベルまで生産していこうと思った場合、ウチで少し人数をそろえて、家内制手工業でできるレベルを超えた場合ですね、世の中にある繊維産業の装置として  $k\text{ m/秒}$  オーダーの、ものすごい大量生産の合成繊維の装置はあるのですが、特殊なものをゆっくりゆっくり、湿式紡糸で作るというところを対応していただけたところが、なかなか見つからずに困っております。関西は繊維産業が強かったはずですので、もしその辺が対応できるよと言う方がおられましたら、是非お声がけください。

Q 7. (鈴木教授) マイクロカプセルの耐久性について、ポンプを使い、秒速  $3\text{ m}$  程度で搬送した場合、どの程度の耐久性があるとお考えでしょうか。また、カプセルが破損した場合、どのような対応が適切であるとお考えでしょうか。  
高寿命(5~10年程度)の観点から、どの程度の流速での運用が適切でしょうか。

A.  $3\text{ m/秒}$  は、あり得る流速だと思います。これで破損するという事もないだろうと思います。壊れた時にどうするかという事ですが、あまり説明していませんでしたが、実は我々が中に入れていた無機水和物、今想定しているのは、リン酸水素2ナトリウムが  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  くらい、酢酸ナトリウム3水和物が  $58\text{ }^{\circ}\text{C}$  くらい、アンモニウムミョウバンが  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  くらいの蓄熱材なのですが、いずれも食品添加物で、壊れたら酸っぱくなるという話です。そのまま捨てていただいて問題はないという事になります。カプセルそのものも、砂と同じなので、そのまま捨てていただいても問題ないと考えております。

Q 7. (中村教授) 布状熱電変換素子の現時点での実用化に向けた課題を、もう少し詳しく説明して下さい。

A. 課題として、より高い性能にするためには、大学でできるレベルの研究ですので我々の方で、まだ2～3年は性能を上げようと思っています。

Q 8. (鈴木教授) パワーデバイスの温度上昇を蓄熱材により一定の温度に抑えることは可能でしょうか。

A. 温度帯が合えば、温度上昇を抑えることは、どんなものでも蓄熱材を使えば可能と考えています。中にどのような蓄熱材を入れるのか選択になると考えています。

Q 8. (中村教授) カーボンナノチューブ (CNT) 紡績糸用のCNTは、MWCNT、DWNT、SWCNT (半導体、導電体) では差があるのですか。CSCNTは使うことが出来るでしょうか。

A. 答えとして、熱電性能そのものに差があります。シングルウォール (SW) で半導体のものが一番熱電性能を出しやすいのですが、そんなものは高く使えないだろうというのが、私の見解です。今、我々のところで研究しているのは、そこそこの性能が出て紡糸しやすいシングルウォールで、特に半導体/金属を分離せずに、今、我々の手に入る中で最もコストが安いものを使っております。その辺の選択は、コストとの兼ね合いになると思います。高いけれど、もっと性能が良いものは、あるにはあります。

Q 9. (鈴木教授) マイクロカプセル化蓄熱材の用途開発コンソーシアムの情報を、もう少し詳しく知りたいです。

A. これは、いろんな企業の方々にアイデアを出していただいて、それに対応するような素材を開発するという目的でコンソーシアムを組ませていただいています。覚書と言うのがうちの大学で作っておりまして、一つには、私がハンドリングしないといけないのですが、同じようなテーマ、用途に対して複数の会社と共同研究をしてはいけないということと、どこの会社がどのような用途で使うのかを明かしてはいけないというような決まりが、神戸大学の方の縛りで私に与えられまして、その範囲でご相談いただいた内容に我々是对応していくという形をとらせていただいています。

Q 9. (中村教授) 総括のチャートの最後に書かれている「熱マネージメント技術としても重要」というところを、少し詳しく知りたいです。

A. カーボンナノチューブについて、我々が研究している熱電材料としては、タンパク質分子接合を使って、本来熱伝導率が高いはずのものを、できる限り熱伝導率を落とそう。つまり、電気は流すが熱は流さないという材料を作っています。今日は十分に紹介する時間がなかったですが、派生的研究で熱伝導率の高いものもできています。まだ金属で最も熱伝導率が高い銀を超えていないのですが、近いうちに少なくとも銀は超えたいと思っています。そうすると、軽量、フレキシブルな導熱材料として使えるのではないかと思います。それができると、熱マネージメントというところに、より生きてくると思います。

非常に限られたところで熱が出ている、それをどこかに持って行って使いたいという機器とか自動車とか、そのスケールでの近距離での熱輸送、それに使えるじゃないかと、少しは期待しております。また、低熱伝導率の熱電以外の需要があるかどうかわかりませんが、例えば、極めて高度に断熱した蓄熱槽から、電気信号を持ってきたい、ちょっとした熱は漏らしたくないときには、我々の作っているような、電気は伝えるが熱は伝えないという導電性材料が使えるかもしれません。そういう意味で、我々は熱電で研究を始めたのですが、熱マネージメントのトータル技術の中で、どこか今の技術で足りないピースを我々が埋められるかもしれないという意味です。

Q 10. (鈴木教授) 金属のような構造物に混ぜて (鋳物など)、熱特性を変えることはできますか。また、金属の強度はどのように変わりますか。水蒸気に混ぜて熱輸送量を増やせますか。

A. カプセルへの入れ方ですが、融液を使い中に入れる方法を採用しています。したがって凝固した時に、一般的には体積が小さくなるので、負圧になります。球形は負圧に非常に強いので、その負圧になる特性を活かすことを考えて融液を入れていきます。一方で、蓄熱材が気体になるような温度まで上げると、さすがに割れます。パワーデバイスを何℃に制御したいのかということですが、金属の中に入れ込むという事になると、金属の中に入れるプロセスが何℃なのかが関連してくるので、なかなか即答できない所があるかなと思います。例えば、600℃くらいのプロセスですと、それを最終的に50℃に保つようにしたいのですよ、と言う風なことになる、これはなかなか難しいだろうと。プラスチックもそうですけれども、作る時に300℃ですよ。使う時には20℃くらいに抑えたいですよと言うのも、なかなか難しいだろうと思います。どのように入れるのかという、入れ方によりますので、我々も、ペイントの中に混ぜて入れるという事はやるのですが、その程度で済むのであれば、色々可能だろうと思います。あるいはヒートシンクのような形状の中に詰め込むと言うような形であれば、それは問題ないだろうと考えています。

Q 1 0. (中村教授) カーボンナノチューブの熱伝導率を高めて、金属に混ぜて、超高熱伝導率の金属ができないでしょうか。(例えば、銅と同じくらいの熱伝導率であり、鉄と同じ強度)

A. 金属にカーボンナノチューブを混ぜるとするのは、どちらかというと、強度を高めるために行われています。カーボンナノチューブを何かと混ぜることや凝集体を作っても、意外に熱伝導率は上がらない材料なのです。それはカーボンナノチューブの物性研究業界でも課題になっていて、理想的な無欠陥のカーボンナノチューブを理想的に測るとダイヤモンドに匹敵するはずですが、熱伝導率でいうと1000~2000 W/mKが出るはずなのです。しかし、ナノチューブだけで固めても数十W/mKしか出ないというのが普通です。金属に混ぜて高熱伝導率を期待しても、恐らくコストに対して割に合わないと思います。

Q 1 1. (鈴木教授) 配管等の設備とマイクロカプセルのコストとそのメンテナンスコストはどの程度ですか。(温水循環に比べて)

A. コストは、普通の配管ですから、特別な設備が必要という訳ではなくて、普通にポンプで回していただければ流れるものです。ただ分散媒を入れて対応をできるのかというと、ちょっと懸念がありまして、先ほどのポリビニールアルコールを分散剤として使っていると申し上げましたが、高分子系はあまりシアのかかるポンプを使うと、切れてしまい、効果がなくなるという事があります。ポンプとかのデバイス、バルブチーズあたりのせん断が大きいシステムでは、ちょっと気をつけないといけないかもしれません。

Q 1 1. (中村教授) テレビで、光発電の必要性が語られましたが、その点へのお考えをお聞かせください。

A. 太陽電池とか光電変換の話かと思います。我々も光電変換を研究しています。適材適所と考えています。光電変換でより多くのエネルギーが得られるときは光電変換でやれば良いですし、熱電でエネルギーが得られるとき、使い勝手が良いときは熱電でやれば良いという事で、どちらもエネルギーハーベスターとして使う有望な技術だと思っています。

Q 1 2. (中村教授) 先生が描く夢は。

A. 私は、本来エレクトロニクスから入ってきて、十数年来、大きな目標、キャッチフレーズとして掲げていますが、Electronics on Any Surface!というキャッチフレーズです。至る所の表面に未だにエレクトロニクスの機能が入っていない。そこにどんどん機能を入れていけば、まだまだ豊かになるという考えです。そのために、今足りていないものとしてエネルギーハーベスターがあります。それが、我々が今、一番貢献できることではないかと思ってやっています。20年から30年後の将来に見た時に、昔はこんな機能がなかったのかとびっくりされるような、もっと幅広い高度な機能が、特に様々な物の表面に生まれる、そのワンステップになれば良いなと思っています。

Q 1 2. (鈴木教授) 先生が描く夢は。

A. 私の夢は、ほとんど話してしまいましたが、こういうサーマルグリッドのようなものを実現すれば、CO<sub>2</sub>削減や、化石燃料の節約などに効果があると申しあげました。これを実現するためにはいろいろとまだ、技術的な問題だけではなく、法的あるいは社会的問題というのが非常に大きな問題になるわけです。例えば、誰がどれだけお金を払うのかというような問題です。電気代でしたら、電気の使用量がパッと出てきますが、熱の使用量はどうやって量るのというような話であるとか、日本でのマンションみたいなものがセントラルヒーティングのような効率の良いものに変えられないのは、欧米では光熱費とかは家主が負担するのです。家主が工夫して省エネになるようにものを作るのですが、日本のシステムでは部屋に入居した人が光熱費を払うシステムになっていますので、どうしても個別の空調になるというような話にしかならないのです。個別の空調を使っているうちは、もうどうにもならないのです。それをみんなでセントラルのビル空調みたいにしめようと言ったところで、なかなかまとまりません。そのハードルをどうするのか。もともと、これを発想したのは、昔、某ガス会社が隣組コージェネレーションというようなプロジェクトに参加させていただきまして、これは非常に社会的なシステムで、隣の人がどれくらい使っているのか。だったら今日、ウチはこれくらいにしておこう。と皆で省エネをするというシステムなのです。こうした発想が生まれたのは大阪教育大学の悲しい事件がありましたが、隣の人が何をしているのかを近所がもっと共有して、助け合って生きていけないのかというような発想だったのです。こういうことに共感して、みんなでシステムを作っていこうという社会的な機運が盛り上がってくると、我々が作っているようなシステムが生きてくるのかなと思いますし、私の夢です。皆で助け合いながら省エネをしていくという事ができると良いと思いますが、社会はむしろ逆行しています。ですので、私の夢の実現はなかなか難しいと思うのですが、そういう気持ちは大切だと考えています。実際問題工場から熱を運んできて、工場は「タダでやるのか？」と当然なのです。タダでないにしても安価に提供していただければ、皆が助かるという、どこかにそうした気持ちが共有できると、非常に大きな省エネルギーの社会、いわゆる、超低炭素な社会ができかなと思っています。

(先生方の議論)

- (鈴木教授) 中村先生のお話しの中に、「熱伝導率」の件がありましたが、カーボンナノチューブのもっとも有望な熱拡散率だと私は思っています。熱を伝えることが大切なのか、温度を伝えることが大切なのかということです。熱制御とおっしゃっていますが、温度制御は大切で、熱拡散率が非常に大きいという特性は、金属では得られないものがあって、必ずしもネガティブな側面だけではないと思っています。
- (中村教授) 私から少し補足しますと、熱伝導率が高いというのは、熱をエネルギーとして早く運べるという意味です。熱拡散率は温度が早く一定になるという意味で、比熱と密度が間に挟まって、少し性格が変わると。ご指摘の部分はその通りだと思います。カーボンナノチューブの特徴としては、熱伝導率よりも熱拡散率が本来は高いというところが特徴であると思います。そこでどういう応用があるかという点は、もしよろしければまたいろいろ議論させていただければと思います。