

# 「環境の世紀 XI」第 10 講

## 「水素化社会における燃料電池と技術の現状」

山口 猛央 (YAMAGUCHI, Takeo) 先生

2004 年 6 月 23 日

### 講義内容

- 地球温暖化の現状
- 燃料電池の現状と将来
- 新規燃料電池の開発

## 1 導入

丁寧な紹介をどうもありがとうございます。化学システム工学科の山口です。

この中で総合科目でもう私の話を聞いたことあるという人どれくらいいます？あまりいないようなので、ちょっと重複が出てくると思うけど、話しがつながらなくなるのでそれは許してください。

今日の話は水素化社会。地球温暖化っていうのがどういう現状にいるのか。新規燃料電池の開発。ここは話が難しくなるところは、うちの研究室でやっていることもあるけど、ざっと飛ばしてしまおうと思います。

### 1.1 研究者としての態度

#### 1.1.1 まずは結論

僕が今日言いたいのは、結局のところは、地球温暖化問題は、燃料電池も含めて、小宮山先生の言ったように、全体を見ると言うこと。あともう一つ武器を持つと言うこと。その武器というのが、僕の場合「膜」なんです。僕の研究のスタートは膜分離なんです。

#### 1.1.2 膜分離とは

膜って言うと、海水の淡水化です。今 4 万トン規模で沖縄で海水淡水化が行われている。5 万トン規模で福岡でも始まるようとしている。シンガポールでは世界最大 35 万トン規模の海水の淡水化が行われている。のレベルまで構造を制御するようなこと。

そういうようなことはずっと昔からやってきたわけですが、うちの研究室の中では燃料電池とバイオマテリアルが 2 本柱でやっているわけです。このように武器を持っているとそこに入っていったときに非常に強い。

### 1.1.3 stereotype な研究者

ところが、現状では、作っては試して作っては試してという、研究者が多いです。

合成をやっている人ってあたらしいものってどんどん作れるんですよ。なんの役に立つかって考えずに作ってみて、論文どんどん書いていって卒業していく。うちの研究室でやっているようなことだと、超分子って知ってる？超分子って言うのはホストゲストって言って、同じ形をしたものを捕まえるっていう概念だけど、今はもう2万種以上知られている。

でも使われているのはほんの十種類くらい。

### 1.1.4 理想の研究者像

皆さんに派ぜひそうなってほしくない。システムの全体を見るってこともある。これからの社会の半歩先、一步先の研究というのを考えて、立場によりますが、そのくらい先のことを考えて研究をするということです。

大事なのは、自分の殻に閉じこもらないこと。なおかつちゃんと自分の武器は持っている。そこを膨らましていく時には、これからの時間のスケールも考える。いろいろな技術も考える。時間と横のつながり。

両方を考えて、自分のスキルを伸ばしていく、そうすれば一線の研究者でいられるはずだし、ずっと夢を見て言い研究を出来るんじゃないかと思います。文系の人も同じです。

たかが一年後とかをみると、だいたいみんな同じようなことをやってることになる。生まれてきたからには人と違うこと、人と違う発想を求めたいと思うなら先のことを考える。そのときには時間と横のつながりが見えてないと新しい研究というのはたぶん意味のない応用研究になってしまう。数十年後につながる研究するにはそういうことを考えなくてはいけない

## 1.2 化学システム工学とは

僕のやり方はその中でシステム化とか最適化っていう考え方で、要するに、化学システム工学科なんて言うどんなことをやっているのかわからないかと思いますが、化学工学という分野があって、アメリカなんかだと工学の化学だと全部化学システム工学に入ります。例えば、燃料電池は電気化学と化学システム工学の両方が一緒になってるのです。

元々の研究の最初はずっと昔、何をやったかという、みなさん工場ってわかる？工場って言うと、熱の移動を考えると一カ所でちいさなもの作っても不利なんですよ。いろんな会社が集まって熱と物質を Co-利用していけば省エネになるでしょ。でっかい水島のプラントとかコンビナートが出来上がる。あれ全体を設計するような話を作る。全体を見るようなシステムを構築する。それが化学システム工学のスタートなんです。その際には反応や分離のそれぞれのユニットも作らなければならない。

医薬品作るのは合成して分離してそれで出て行くでしょ？研究室でやるんだったらちっちゃくていいけど、人の役に立つようにと思ったら大量に作らなきゃいけないから。

全体を見て設計していくというのが学問の最初です。

こういうようなプラントっていうのは入れ替わりがあるかもしれないけど、僕の考えというのは材料の中でこれをやっ飛ばすというもので、新しい燃料電池などの話なんですけど、この話は後半に出てくるのでそ

れまで覚えといてね。

一番最後何をいいたいかってことを最初に言っただけです。

## 2 水素化社会の話

で、何でそんな考えに行き着いたかっていうと、皆さん水素化社会が来るっていうのは、そんなの嘘だっていう人はほとんどいないと思います。

### 2.1 地球温暖化問題

人間の生活のいろいろなところで二酸化炭素が放出されている。今地球温暖化ガスは日本では京都議定書の後減っていていると思う人どれくらいいますか？いない。増えていると思う人。結構いますね。そう、確実に日本でも増えているんです。これをなくさなきゃいけない。これからどうやって減らすのか。ひとつはエネルギーの変換効率をよくすること。

物質って原油をただ重油にしてガソリンにして燃やして仕事に換えているんだけどこの効率が非常に低い。例えば自動車だったら20%。残りは捨ててるわけですね。これを50%~60%に増やしたらおなじCO<sub>2</sub>放出で3倍の仕事が出来るんですよ。

あと、これは難しいんだけど、まだ使っていない自然エネルギーも使っていこう。これも10~20年後も考えれば、太陽電池は効率悪くても屋根につけている。効率何で悪いかというと、太陽から地球に来るエネルギーは十分なくらい大きいんですよ。でも、一カ所に降り注いでいる太陽エネルギーの量は薄いんですよ。

人が住んでる場所の屋根につけるくらいしか出来ないから実質的に少なくなる。

バイオマスってのは量としては多い。

風力エネルギーは使わないより使った方がいいですね。

水力もある。

こういったエネルギーも使っていこうっていう話なんだけど、太陽エネルギーでまず考えると、太陽エネルギーは電気にしますよね。これ、電気って貯められないんですよ。これが一番の問題点。

### 2.2 水素化社会への期待

水素やアルコールみたいな化学物質は貯められるんですよ。電気は基本的には貯蔵することができない。そうしたらどうするかというと過剰に発電したら捨てるしかないんですよ。だから水素化社会が今後生まれてくるはずなんです。

そのときにどうなるかっていうと、今送電線あるでしょ。それだけじゃなくて同時に水素も運ばれてくると思います。あるいは都市ガスが供給されてそれみたいに各家庭に水素作られるんだと思います。基本的には電気と水素が両方供給されてうまくバランスして燃料電池が使われて、電気と熱うまく使われて、新しい社会が出来ていくという話なんですけど

水素化社会になっても電気がなくなったりはしないですよ。水素のポイントは燃料電池なんですね。水素でずーっととっておいて、ほしいときにほしいだけ電気に変える。そこが重要。もちろんそのときには水しかできない。

## 2.3 二酸化炭素削減にむけて

ここ 150 年の気温推移なんですけど、(ppt)知っている人は知っていますよね。地球温暖化が進んでるのは。これ、ずーっと予想すると、2100 年にはプラス 3~5 度なんか覚悟しなければならない。これが今のシナリオ、二酸化炭素が増えたときのシナリオだから、水素化社会を実現して、20 年はかかるが水素化社会に向かって歩いていけば、ずいぶん違ったシナリオになる。

この気温上昇のカーブを下に向かわせるにはどうすればいいのかというのを考えるのが、水素化社会に向かった話ですね。

京都議定書。これ皆さんよく知っていますよね。二酸化炭素量は日本でも増えている。

産業革命以来どのくらい温暖化ガスが出たかって話になると二酸化炭素は主役じゃなくて昔は牛のゲップでメタンが出てそれが結構きいてるんじゃないかなんて話もあって、昔から考えるとフルオロカーボンなんかも結構大きいのですが、2001 年の一年間で見ると、今は二酸化炭素が大きいんですよ。

こういうところ、つまりフルオロカーボンなんかはこれまで減らしたんだから後は二酸化炭素を減らせばいい。

ですから地球温暖化の問題って言うのは今や「二酸化炭素の問題 = エネルギー問題」に帰着しちゃっているんですよ。2010 年までに 2000 年換算で 6% 削減って言ってるけど、実際は増えてるっていうのが現状ね。

## 3 現在の発電システムの問題点

### 3.1 エネルギー効率の観点

それでまあ、電力需要っていうのがあって、もう一つの問題点。今のは二酸化炭素をたくさん出してはいけないっていう問題点なんだけど、もうひとつは、火力発電所っていうのは、温度をずーっと上げていくとエネルギーの変換効率は上がるんですよ。原油が来たらほとんどガソリンに変えるんだけど、重いのは重油、軽いのは軽油。軽油はストーブなどに、重油は火力発電所にまわす。今がガソリンが一番儲かるから、ガソリンがたくさんできるようにしてる。石油会社はそういう風にクラッキングしている。

クラッキングってわかる？原油って CH がずらっとならなくて途中で S とかがあるんですよ。その S とかをががががが切って、CH のところが切れると水素をどんどん入れて、それが C<sub>7</sub>~C<sub>8</sub> になったのがガソリンね。そこが一番売れるからガソリンを一番作るうってのが石油会社の考え方。

でもこれは社会と一緒に変わるよ。いくらでも技術としては進展出来るはずなんです。

今はガソリン。これは構いません。皆さんが自動車に乗るときに気をつけてくれればいいだけ。

もう一つの問題は火力発電所ね。あそこに重油がいると。

皆さんがコンセントを入れたときにどのような効率で火力発電所で変換されているかって言うと、40% くらい。60% は海に捨ててるんですよ。熱として。だから火力発電所の周りの海は海水温が少し高い。

皆さんがコンセントを使うときは 6 割には海に捨てているんですよ。

どうしてかって、カルノーサイクルってのは知ってる？あれで熱に一度変換すると、必ずエネルギー変換効率は下がります。熱の温度が高いほどエネルギー変換効率は上がる。その平均値が 40% でもこの 40% って低いと思いませんか？京都議定書 6% 下げるのが目標ですよ。やっぱり 70% ~ 80% のエネルギー効率にしたいですよ。そこが一つ目の問題点。

## 3.2 ベースロードとピークカット

もう一つの問題は、何故今火力発電所が最新鋭の機材でも効率が40%くらいになっているかというと、1300度級であれば50%の変換効率は夢ではないんですよ。だけど、ものすごくでっかい火力発電所を作れないと実現できない。ところが、ものすごくでっかいのを作っても、このグラフは皆さんが使うエネルギーの時間変化ですが、昼間皆さんが使っているエネルギーの半分しか夜に使わないんですよ。(ベースロードのppt) エネルギーのピーク値ってのはかならず起こってしまう。夏と冬でも変わるよね。エネルギーのピークにあわせて使うと、ピークじゃない部分で捨てちゃうんだよね。

だから揚水発電とかいって、ダムなんかで余ってる電気で水を組み上げるんですよ。そんなことまでやらなきゃエネルギーは今保管できない。電気だから。

火力発電所なんかのでっかいところの問題って言うのは、上限にあわせれば50%でもそこには追従することができないんですよ。それをええようとするとうまく無駄が出てきて無駄がいっぱい出てきて、平均的には40%くらいになっている。

## 3.3 原子力発電の問題点

原子力発電はどうか。実は僕、原子力ナントカ委員会ってのやってて、要するに青森県で原子力廃棄物を埋設するって話があるの知っている？もう原子力発電をどうして止めようとしているかっていうのは、フランスもアメリカもドイツも、ドイツが先頭を切ってるけど、あれ廃棄物の問題だと思うんですよ。

日本は今40年前につくったプルサーマルとかで廃棄物をリサイクルするっていってるけど、そのリサイクルをかけたところで廃棄物は、アメリカの科学者が計算したところによると、あんまり変わらないっていう結果がでてる。それなのに昔ながらの原子力を今でも続けようとしている。それで僕が何をやってたかという、拡散の専門家として呼ばれたんですよ。拡散って何かって言うと原子力廃棄物がどのくらいのスピードで土の中を拡散するか見積もるといって研究会だったんですよ。

とにかく、1000年後を考えなければ行けないんですよ。下に埋める。あれ、ガラス固化をするんですよ。ガラス固化をして、厚いセラミックとかをかけて、土の中に埋め込むわけですよ。

数百年後を考えたら、そこの下に埋設しましたって言ったって、誰もわからなくなりました、って可能性あるよね。数百年っていったら遺跡発掘とかそういうレベルだよ。1000年後、人類だと思うけど、その上に何にも知らない人が住んで、下から原子力廃棄物がやってきましたなんていったら困るでしょ？

そのときには地盤がちょっと地震があつてずれると、そういうことがあった今までせつかく計算してたものが全部うそになって、原子力廃棄物が地下水で運ばれちゃうわけでしょ？そんなことは予想できるわけがない。止めたからいいって問題じゃないのかもしれないけど、そんなことに責任は取れないというのが科学者としての正直な意見です。

これ以上廃棄物が出さない方向に行くというのが本来の姿なんだと思います。これで自然エネルギーっていう方向に移っていくのかもしれない。原子力の方に聞いたら違う意見が聞けるかもしれない。

これは皆さん広く情報を得て、ただただ二酸化炭素問題を考えるだけじゃなくて、廃棄物の問題を考えなければいけない。そして、数十年後、数百年後まで考えて責任をもたなくてはならない。だから、いろいろなりすくを考えなければいけない。その一つが原子力廃棄物ね。

まあそんな話もあるから、原子力はとにかく全部にするほど進めていくわけには行かない。

これがエネルギー問題のもう一つの問題点ね。

### 3.4 酸性雨による環境破壊

それからもう一つ、皆さん酸性雨も問題も知っていますか？

中国で  $\text{SO}_x$  や  $\text{NO}_x$  ができて日本に移動してきて降り注いでるって言うのは、定方先生がきちんと研究して中国に結局脱硫装置を入れた。そうしないと日本の酸性雨問題は深刻でしたから。

中国の方も脱硫装置がだいぶ付くようになったのですが、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  は今でもある。 $\text{SO}_x$  って何かって言うと硫黄ね。 $\text{NO}_x$  って何かって言うと窒素ね。で  $\text{NO}_x$  は避けようがないんですよ。空気中に窒素がある以上これは出来ちゃう。ガソリンの中には硫黄分が必ず入ってる。燃やしたら火ならず硫化物は出ちゃう。これはしょうがない。

燃料電池はそれがほぼゼロなんですよ。硫黄分がない。水素と酸素の中に硫黄とか入ってこないでしょ。こういう  $\text{NO}_x$  とか  $\text{SO}_x$  は入ってこない。

$\text{NO}_x$  と VOC が空気中で反応すると光化学スモッグになるんだけどね。

### 3.5 化学エネルギーの化石燃料に対する優位性

こういうこと考えてきたら、クリーンなエネルギーが必要になってくる。それを作ろうとしてどうするかと言ったら、化学エネルギーを 100% 使ってあげる。S なんかを含んでないようなきれいな化学エネルギーをなるべく仕事に全部変えるっていうのが一番重要。それプラス自然エネルギーですね。自然エネルギーから化学エネルギーを作るっていうパスがあってもいいわけ。

化学エネルギーが出てくるでしょ。今、化学エネルギーを熱エネルギーに変換して機械エネルギーに変換して、タービンを回して電気を起こしてるでしょ。そうするとこの変換効率が今 40% くらい。

燃料電池だと熱を通さないからいきなり電気エネルギーに変換できるんですよ。今 60%。原理的には 80% も夢じゃないんですよ。(エネルギー変換の ppt)

あともう一つ。熱エネルギーの時は 1300 度級の火力発電所なんかでやって、やっと変換効率が 40%。燃料電池では、極端な例を言えば、僕のポケットの中に燃料電池を入れてエネルギー変換効率が 50 60% 実現できるんですよ。すごいと思いませんか？ 25 でだよ。火力発電所から電気を送ってもらう必要もなくなるわけです。このへんが化学エネルギーを直接変換して小型分散型に変わっていきこうしてる理由ですね。

なぜ、小型分散型が必要かって言うと、必要なエネルギー、昼のピークはオフィスで、夜は家で使ってますよね。つかってる場所も量も違うよね。送電ロスも下げるためには、使いたい場所で使いたいだけのエネルギーを作ればいいというのが理想です。それで小型分散型発電システムでは、各マンションとか家、これひとつひとつに燃料電池積んでしまえば、必要な時に必要な量だけ作ればいいでしょ。ケーブルとかいらなくなっちゃう、送電してもらう必要もない。そうすると必要なときに必要な量だけだから、エネルギー変換効率も悪くない。

### 3.6 ハイテク材料と小型分散型発電

ハイテク材料で言えることは、昔の蒸留塔って、海水を淡水化する装置ね、一回蒸発させて、そうすれば塩は残るよね。そしてまた凝縮させて飲んでたわけですよ。でっかい装置を作ったらどうなるかということ、熱を回収することが出来るんですよ。簡単に考えると熱って逃げるんですね。

量がこれだけでかいと、小さい量のもの大きな量のものがあったとするよね。体積と表面積の比は、小さくなれば表面積の方が増えてしまうんですよ。表面積が増えれば熱は逃げるんですよ。

逆に考えたら火力発電所とかコンビナートはなるべくでっかくしていくんですよ。すると熱が逃げない。もう一回回収して使いなおすことが出来るんですよ。トータルではエネルギー変換効率が高くなるんだよね。

だけど、ハイテク材料ってのは、燃料電池とかみんなそうなんだけど、皆さんの家庭に浄水器つけている人？あ、少ないね。浄水器ってのは、あれはこんな小さいカードリッジで変換効率が高いわけですよ。ちゃんと水は出てくるわけでしょ。あれが膜とかのハイテク材料なんですよ。どれも小さくしてもエネルギー変換効率とか仕事は悪くならないんですよ。

昔からやっているものはロスするシステムだったからエネルギーを回収して使い回してたんですよ。そういうことをやってたら小型分散型なんてことは出来ないんですよ。カードリッジにして家庭に置くなんで出来ない。

だけど、これからの社会では必ず小型分散型社会に入ります。そうしないと、送電ロスもあるし、昼と夜のエネルギーの消費の違いもあるし、使う場所の違いも出てくるし。そういうので限界に来てるから、これからは小型分散型社会というのに必ず入る。そうなれば、各家庭に水素を貯めておけば、必要なときに電気に変換すれば仕事出来る。電気から仕事への変換効率は100%に近いからほとんど問題ない。

もう一つは、エネルギー変換効率の観点から見ると、燃料電池だけ見てください。普通のカルノーサイクルでは、温度が上がれば上がっただけエネルギー変換効率がよくなりますっていうグラフを作ったよね。

燃料電池は逆で、温度が25度で変換効率83%なんですね。1000度では60%まで下がっちゃう。これ取り出す仕事の効率ね。これ燃料電池は本来は温度の低いところで使うというのが理想的な使い方。

もしくは温度の高いところで使って、これコジェネレーションって言って、できた熱も使うっていう考え方もあるけど、これ水素化社会の途中に出てくる考え方で、最終的にはなるべく、水素は83%、メタンを使うなら90数%全部、全部熱に変えないでエネルギーを換える。グルコースだったら102%ですよ。周りの水なんかのエントロピーなんかからエネルギーを吸収するんだよね。まあそれはエネルギー効率の定義の問題もあるからおいておいて、エネルギーの変換効率が上がる。それを目指さないといけない。

その過程で、水素はどっかで作って、再生可能エネルギーってのはバイオマスだったり、風力だったり、太陽電池だったり、水素を輸送して使おうなんていうのはNEDOが主導してやってたけどまあ不可能ではない話になってきている。ただ実際に動くのは20年くらい先の話。でも、ちゃんと自動車は動いているでしょ。各家庭用の燃料電池システムって言うのも出来てるんですよ。あとこれ水素スタンドね。これ水素スタンドも今もう10カ所位出来てるんですよ。ただまだ試験的です。こういった社会というのは皆さん徐々に進歩している。

## 4 燃料電池の現状と将来

### 4.1 燃料電池の仕組み

燃料電池の原理を簡単に説明しておく、高校の時に水の電気分解はやってるでしょ。

そのときに水素ガスと酸素ガスが水から出来るというのは聞いているよね。水っていうのは水素と酸素に換えることが出来る。そのときに1.23V以上かけると水素と酸素に変わるというのは理科の実験でやっていると思います。逆に、水素と酸素があると、最後に先生がぼんという実験やるよね。ぼんとなるからほら水素があるでしょっていうやつね。あれ、水素と酸素が反応して水になってるんですよ。

この反応は非常におきやすいんです。水素と酸素その間ほおっておいたらあっという間に爆発しちゃう。これを膜で隔てます。水素がプロトンと電子に変わる。H<sup>+</sup>と 2e<sup>-</sup>に変わって、酸素と反応して水になる。その過程で外部に仕事ができる。

水素と酸素っておいておくと勝手に反応するからエネルギーを取り出すことができる。そのときに全部熱にしてしまうんじゃなくて、電気に変換する。一応メタノールでも出来るんだけどね。これまあいいですか。初めて聞く人はなんとなくわかってくれればいいです。

## 4.2 燃料電池の種類

燃料電池の種類は、固体高分子型、熔融炭酸塩型、燐酸型、あとアルカリ型っていうのがあります。

一番最初にグロブ卿っていう人が燃料電池やったときにはこういう分類はなくて、たんに電解質の中に電極を突っ込んで電気の発電したっていうのを発見したってだけなんだ。

そのあと、何で燃料電池が流行ったかという、アポロ計画で、アポロっていう宇宙船の中にはアルカリ型の燃料電池を積んでるんですよ。これはコストとか考えたら見合わないけど、宇宙産業はコストあんまり考えませんし、電池としても一応使えた。

次に流行ったのがリン酸型とか熔融炭酸塩型。

思い出してほしいのは電解質をこのポリマーにするのか、セラミックにするのか、ポリマーにするのか、炭酸塩にして温度を高くすると熔融状態にするし、アルカリだったら陽イオンは動くよね、そういうことでプロトンを動かす代わりに何か別のものを動かしてもかまわないから何かを動かすっていうここを変えていったんです。それでどうなったかという、今世の中で注目されているのは固体高分子型にたぶん絞られてます。

リン酸型っていうのはビル用のコジェネまで言ったんですけど、リン酸とか熔融炭酸塩は液体なんですよ。それだと小型化が出来ないし、コストがかかる。そういうわけで普及って意味ではリン酸型と熔融炭酸塩型っていうのはもう下火になってる。

今固体高分子型が注目されていて、現状は発電効率 40~50% だけど、これ水素を入れて、常温から 100 度くらいで発電できる。電解質がポリマーを使うから、固体で、どんな形にもできる。一番の問題は常温から 100 で動くってところ。固体高分子型以外は温度高いからポケットに入れられないよね。固体高分子型は自動車に使ってみたり、コンピュータに使ってみたり、携帯電話に入れてみたり、そういったものにだんだん使われるように研究開発が進んでいる。

固体高分子以外では、火力発電所を分散型にして小型にして分散型のコジェネシステムっていうのを使おうとしてるのは、安定化ジルコニアっていうセラミックなんですけど、作動温度は高いけど、ここが固体だから安定であることは確か。どっちがどっちの時用途としてどう使われるかという。固体高分子型が小型の自動車とか、それ以外が分散型の発電システムね。火力発電所がこちら側にだんだん変わっていく方向ね。

## 4.3 各燃料電池の特徴

で、各種燃料電池の特徴って考えてみたら、携帯電話は 1W、ノート PC は 20W、自動車って言ったら 500W くらい、定置型って言ったら数百キロ W っていうそのくらい。

どう考えても、さっき言ったとおり、小さいでしょ。小さいものは熱を後で回収して使おうといっても無理なんですよ。だから、じっさい実際に使う温度が 100 以下のこの辺に集中するんですよ

もう一つは SOFC っていうって 700 度から 1000 度くらいで使う、大型のものね。実際の火力発電所よりは小

さいけど、割と大型のところをねらったのが SOFC。自動車も無理だろう。集合住宅とかマンションになれば可能性が出てくる。

#### 4.4 発想の転換、時代の要請

要は、これからの社会を考えるとときには、この様式はどのような用途があるのか、社会はどの方向に進んでいくのか、こういうのを切り分けて開発を進めなければ行けない。

携帯電話もノート PC も、燃料電池でくくっちゃえば一つだけど、こういったもの最適な構造も違って、膜もぜんぜん違うんだけど、みんな作ってみたら燃料電池としての発電試験をしてみましたとかそういうことをやってるんだよね。でもそれじゃあいけない。

定置型といったらどういう社会がこれから出来て、そういう場面で必要になるのかを考えると、要求される性能はなんなのかって考えると、次は定置型に要求される触媒層や膜は何なのかを考える。そうしたら新しいアイデアや膜が生まれてきて、各種の燃料電池が開発されるんですけど、今そうになってないんですよ。

どうなってるかっていうと Nafion って膜が Dupon 社で開発されたら、それをみんなが使う。なんに應用できるかは考えずに。性能は伸びるけど、あるところまでこの会社も同じような性能になる。その次にしていかわかんなくなる。何でかわかりますか？作っては試し作っては試してやって、中の構造とか考えていないと、わかんなくなっちゃって、みんないっしょに変換効率が半分くらいで収束しちゃう。これからの時代、中で何が起こっているのか考えなきゃいけないですよ。

#### 4.5 水素の作り方

それから水素はどこから作るのか。これ皆さん心配でしょ。

時代とともに太陽発電の量子効率も上がっていくでしょうし、風力発電もあたりまえのように使われるようになるかもしれない。バイオマスも発展するでしょう。バイオマスって木ね。気とかを燃焼させて、超臨界の水の中で反応させると水素が出てくるっていうような技術ね。

問題点としては木とかは水を大量に含んでいるから、そのまま燃やすと水分をたくさん含んでいるから燃焼効率が悪いんですよ。木の中には CH の H がいっぱい入っているでしょ。C と H と水の全部を高い温度まで持っていこうとしたらすごいエネルギーがかかっちゃうでしょ。H だけとりださなきゃいけない。木を燃やそうと思ったら、まず乾燥させて水分を抜いてから超臨界の技術をつかっていかないと水素って取り出せないんですよ。そういう技術がこれからどんどん進んでいくわけです。

LPG (液化炭化水素) とか LNG (液化天然ガス) なんかのなかから燃料 60 リットルから生成する水素量を考えてみる。この 60 リットルってのは自動車のガソリンタンクの大きさだけど、今燃料電池車走っているでしょ。あれ今圧縮水素 200~300 気圧で 60 リットルなんですよ。もしガソリンを車の中で水素に変えることが出来たらそれだけで圧縮水素の 20 倍の走行エネルギーになるんですよ。別にメタノールでもいいんですよ。メタノールなら 10 倍になる。変換効率と同時に自動車を作る人にとっては走行距離というのが非常に問題になってくる。

液体水素はエネルギー変換効率が悪いから止めようってなってるけど、ガソリンとかにすると 20 倍くらい走行距離がのびる。だからってガソリン自動車に比べて燃料電池車がそんなに見劣りするほど走行距離が悪い訳じゃない。なぜかというエネルギーの変換効率が倍になってるから。

世の中としては小さい容量の中で大量の水素を作っていくということが求められる。

ガソリンスタンドあるでしょ。ガソリンスタンドに水素に変換する装置ついてれば、ガソリンスタンドは地下にガソリンタンクを埋設してあるけど、水素をどこかで作って水素のまま圧縮して入れたときと、ガソリンスタンドで水素作るときの容量の差は数百倍あるんですよ。そうすると、ガソリンスタンドにはガソリンなどを埋設することになる。今のタンクローリー見たいなシステムがあってもおかしくない。スタンドで水素を作る技術が必要になってくる。

そうしたらさ、ガソリンスタンドで水素を作る技術はやってるかって言うとやってるんです。たとえば、天然ガスは、天然ガスは水をかけると  $\text{CO}$  と  $3\text{H}_2$  になるんだよ。

だけど  $\text{CO}$  が 10ppm 入っただけで触媒がやられて燃料電池が止まっちゃうんだよ。だから  $\text{CO}$  を  $\text{CO}_2$  にしてなくす反応を考えていくと、一番最後まで考えると水素が 4 段階くらいになるんだよ。そうやって  $\text{CO}$  を除去して、最後に生成をかけて燃料電池に持っていきっていう方法が水素スタンドでとられているという方式ね。

そうすると大変じゃないですか。今考えられてるのはメタン、天然ガスの主成分ね、これと水蒸気。ここで水素透過型の触媒膜を作ろうと考えているわけ。なんでメンブレン（膜）でやるかっていうと、この反応は 800 度くらいに行かないと水素が出来ないんですよ。

水素スタンドでやろうとしたら 500~600 度くらいでやりたいんですよ。どうするかっていうと、皆さんルシャトリエの法則って知ってる？ここで  $\text{H}_2$  をなくすと平衡がこっちに進むのね。これをやってるのがメンブレンリアクターといって膜のところで反応させて水素を取り除くと温度が低くても  $\text{CO}$  が出来る。そのまま、反応をすすめて、この反応が  $\text{CO}_2$  の方が、 $\text{CO}_2$  リッチになるから  $\text{CO}_2$  回収して、これを海の中に埋めるのがひとつのやり方。

もう一つのやり方は土の中に埋める。原油の採掘ってのは、空気を地中にがんがん送り込んで圧力で掘るんですよ。それを二酸化炭素に代えるんですよ。一つのやり方としてね。それがどれだけ  $\text{CO}_2$  削減になるのかわからないけど、採掘した分だけ  $\text{CO}_2$  入れるんだからいいじゃないかっていう考え方もあるけど、そのときに使うエネルギーはどうなるのかっていうのは今計算してる。

海に沈める、それも海の中の生態系を壊さないかっていうのも研究としてはすすめている。

それがコレクトな解なのかまだわからない。わからないけど、海や土に埋めると、これで回すと出て行くのは水素しかないんですよ。そういうクローズドシステムを作ろうという考えもある。これは水素の作り方ね。

#### 4.6 水素の供給方法

そんなことで、水素燃料の供給方法なんだけど、一つは外部プラント、でっかい工場で水素ステーションに入れて、燃料電池車に入れる。もう一つは、燃料はガソリンなんかで持ってきて、水素ステーションで水素化して、燃料電池車に詰めようという考え方、もう一つは、燃料電池車の中でガソリンを水素に変換して燃料電池車が動くように装置を入れておく。この 3 種類のやり方が考えられています。どこに行くかはわからないけど、現状では 2 番目が解だろうと考えられている。

あれが重要な解なんだけど、理由として燃料供給のところ燃料を持ってきてだけで二酸化炭素使ってしまうでしょ。そのため水素ステーションで変換した方がいい。ただ二酸化炭素を本当に集めるかっていうのはもうひとつ問題だよ。

二酸化炭素を本当に抑えたいんだったら、水素化社会の何十年後を考えたら本当は二酸化炭素は全部捨てたい。本当に海の中に埋めると言うんだったら、ある程度大きなプラントで、しかも海の近くで、ってやって大きな二酸化炭素量にしなくちゃいけない。まゝこの辺で二酸化炭素を積んで走って行って戻すなんて事はあ

んまりやらないんじゃないかと思う。これは PET のリサイクルと同じで、なにが一番の解なのかっていうのかわからない。どれが一番いいのかというのはわからないけど、

どうしてどれが一番いいかわからないのは、水素化の方法が年々新しい方法がどんどん出てくるんですよね。そうするとシナリオが書きにくく、計算が難しい。それが今の現状。

#### 4.7 家庭用コジェネレーションシステム

あとは家庭用のコジェネとか、これ都市ガスね。それをフュエルプロセッサって言って、天然ガス CH<sub>4</sub> から水素を取って、二酸化炭素を出しちゃう。ただし、燃料電池にするからエネルギー変換効率はよくなる。これで電気とお湯になる。

これ問題点知っている人いる？

(学生)いつも電気を使っているわけじゃないから、お湯が余っちゃうんですね。

そう、熱余りなんですね。皆さんお湯っていうとお風呂のお湯が一番多いよね。

今のエネルギー変換効率だと家庭中の電気を全部燃料電池でやろうとすると熱が余っちゃうんですよ。40% 50% くらいになる。現状ではそのコンセントよりちょっといいくらいなんですよ。残念ながら。

しょうがないからどうするかっていうと、今は燃料電池ではお湯を作りましょう。そうすると電気代が安くなりますよっていう宣伝をやるんですよ。火力発電所でお湯を作っても運べないけど、各家庭でお湯を作れば使えるでしょ。そうすればエネルギー変換効率は 80% 以上になっちゃう。

そのかわり、お湯の量に合わせちゃう。

電気は買電したり自分の家で使うから電気代が安くなるって言って、燃料電池を作るんですね。2008 年に実用化されます。50 万円で燃料電池売りますが、そのシステム全体はどんなに政府の補助があっても数百万円台に落とさないといけないと企業としてやっていけないというのが本当。

皆さんすぐには買わないというのが予想です。しかも、200~300 万円のを補助して 50 万円に下げて売ってというのが予想です。

しかも燃料電池でお湯を作る。ってことはかなり小さくていいんですね。

どんな技術も最初はそうなんですよ。最終的には燃料電池の効率がもっと高くなればそこでバランスする確率が高いわけですよ。燃料電池自身の値段もどんどん安くなっていく。そういうことが出来たら政府からの補助がなくても皆さんの家庭にも燃料電池が来る時代が来ると思います。でも今 2008 年为目标で本格的な導入はその 10 20 年後でしょう。でも 20 年以上かかってしまうかもしれない。

#### 4.8 燃料電池車

その原因のひとつ燃料電池自動車。これ 1 台二億円。買う？買わないよね。これリースでやってるんですよ。

これ一台買うとトヨタの社員が一人ついてきます。別に運転手としてじゃないですよ。メンテナンスのためについてきます。

しかも、ここの下に数百気圧の水素タンクがついてます。この前これが漏れる可能性があるっていうので取り替えたんだけど、新しいタンクに変えるための試験ってのが日本の消防法では出来ないから、海外に行ってやってきたんですけど、そこまでやらないと出来ない。とにかくそのくらいの値段がする。

これ、トヨタだけじゃなくて本田でもそうです。すべての会社がそうです。

燃料電池は静かです。ガソリンの廃棄ガスがない、水しか出てこないから、排気口に口つけても死にませんよ(笑)

燃料電池というのは環境にはとてもいいんですが、まだまだ技術として開発しなければならない部分が多い。タンクひとつとってもそうなんです。スタックをどうするかとか、まだまだ考えなければならないことが沢山残っている。

ガソリン自動車のテンモード燃費って知ってる？ 皆さん自動車買ったことないですね。私は買ったことあるんですよ。

買ったときついてくるパンフレットには 60km/h 走行時の燃費とテンモード燃費ってのがあるんですよ。テンモード燃費ってというのは、動いたり止まったり、みんな同じようなやり方で市街地走行をシミュレーションしたものがあんですけど、そのときの燃費がいくらか。60km の時はいくらか。パンフレットに書かないといけないんですよ。ガソリンエンジンってというのは 60km/h 走行で最高になるように作るんですよ。テンモードの時はあんまりよくないんですね。

燃料電池車ってのは走行すれば走行するほど効率が悪くなるんですよ。未来には 80% そこらにもって行きたいんだけど、今現状はこんなもんね。

これ見ればわかるのは、燃料電池車で高速道路ぶっ飛ばす人には恩恵ないと思います。でも市街地走行するバスだったら恩恵大きいですよ。それから、ハイブリッド車ってというのは、無駄になってるエネルギーを回収するんだよね。

燃料電池ってのはほとんどハイブリッドになっていて、その熱を回収して電気エネルギーに変換している。どのみちハイブリッドにしていますね。

ガソリンエンジンはこれ以上いいものともう出てこないから、あとハイブリッドにしていくしかないと思うんだけど、

これが試算です。

現状のガソリン自動車。

燃料効率ってのが、原油を採掘してきてからガソリンタンクに入るまでにどれくらいの効率でタンクに持ってきたか。そのうち 12% は放出しているわけですよ。(燃料効率は 88% )ハイブリッド車ももともとが原油だから同じね。

水素ってのは残念ながら造る場所で問題があって、上手く作れてないから 58% なんです。タンクからホイール。これは燃料を入れてから走るまでだよ。現状だったら 16% 。

ハイブリッド車になると 30% になるんですよ。燃料電池車では 38% ですが、それをハイブリッドにして 50% にしている。

これかけ算するとさ、たいしたことないでしょ。(ガソリン自動車の Well-to-Tank × Tank-to-Wheel = 14% , 燃料電池車は 22% 。)これが燃料電池自動車の現状なんです。燃料電池自動車を水素化社会のキーにしようと思ったら、まず、燃料電池をよくしなければいけません。それと水素を作るところもよくしなければいけません。そうすれば総合効率でよくなるんですよ。

最初言ったように、自分がどこをやってもいいんですけど、どういう考え方をしてもいいんですけど、もしも燃料電池の変換効率は 75% まで上がったなら、ある年代で来たとしてもすよね、そのときに水素作るのがまだ 60% だという時代が来たとする。そうしたら絶対僕は水素作る方研究しますね。

水素化社会ってのをどうやって作るかを考える。熱力学で考える最高の水準より低いところはまだまだ技術開発するのりしろがあるわけですよ。

今 50% でハイブリッドにしているということは無駄が多いということですよ。低いでしょ。これが燃料電

池単体での現状ですよ。38%。38 っていうのは低いから、今はこれをあげるのが燃料電池自動車を世の中に普及させる一番の問題。

それに、2 億円は高すぎる。これは技術のブレークスルーがないとどうにもならない。導入目標は、2010 年だと 5 万台、2020 年で 500 万台。日本の車の総数の 1 割ですね。このときは水素スタンドもその辺になければならない。1 割になるというのはガソリン自動車と価格的に競合できないと皆さん買わないでしょ。2030 年には何とか逆転したい。

#### 4.9 直接メタノール燃料電池 (DMFC)

今のは水素化社会になって、燃料電池車などいろいろ利用されるようになる未来社会の話です。それに行く前に、燃料電池って今高すぎるでしょ。でも、皆さんに買える燃料電池って言うのもあるんですよ。これがね、ポータブルの燃料電池。どういうものかっていうと、これ体積あたりのエネルギー密度ってのはどれくらい電池が持つかということ。現状の燃料電池の DMFC (ダイレクトメタノール燃料電池) っていうのがあって、これは水素は 200 気圧だからポケットに入れられないのね。メタノールだったら入れられる。現状の分離膜ではメタノールががが通ってしまう。だから、5~10% のメタノールしか使えない。まともな、発電も出来ない。今リチウムイオンバッテリーと変わらないくらいの持ち度なの。

このコンピュータが 5 時間持つとするじゃない。ここにメタノールのバッテリーをカチッとセットしたら、やっぱりリチウムイオンバッテリーの 5 倍くらい長持ちして欲しいよね。それが今のリチウムイオンバッテリーと同じじゃ、いくら効率いいんですけども、買わないわけでしょ。それが長持ち時間が 5 倍ですっていったら買うでしょ。

で、あの、そこが今問題なのかということ、要求出力ってのがあって、1kw あたりのコストなんですけど、ガソリンエンジンが安すぎるから、数百倍燃料電池の値段を落とさないと、競合できないんですけど、今燃料電池の値段ってこの辺何ですよ。

だから、今皆さんが使っているリチウムイオンバッテリーと変更可能なんですよ。あとは消費者の欲求を満たすためにそれが 5 倍くらいのエネルギー長持ちしますよってことになる。

じゃあこれ燃料のもっと濃いのに使える膜が作れるのかという話なんです。燃料があるでしょ。メタノールがパーッと通って、向こう側で悪いことやって、燃料電池発電を妨げている。だからしょうがないから 5% とか 10% とかでやるんですよ。だから、メタノールのクロスオーバー (膜の透過) を防ぐ。そしてプロトンの伝導性を高く持っていなければならない。スルホン酸基ってのが中にあるって、水がないとプロトンは動きません。水が入った分離膜の体積が大きくなって (膨潤)、その大きくなったり小さくなったりを繰り返すとカソードの触媒層は膨潤しないからとの接着面が剥れてきて二度と使えなくなる。サイクル特性って言うんだけど。だから、はがれないような膜を低コストで製造できなければならない。

#### 4.10 山口先生の分離膜

難しい話はいいいんだけど、今作られている膜っていうのを研究室でアイデア出して開発したんだけど、こう数十ナノメートルの電解質ポリマーを充填するんですよ。ちょうどポリマーってのは水にもメタノールにも膨潤しない素材だから、この穴に入るとマトリックスによって膨潤が機械的に抑制されるんですよ。ポリマーの膨潤が抑制されると普通はかきょうって言ってポリマーとポリマーをつないでるんですけど、それだとプロトンが伝導してくれないんです。だけど、それとはちがってポリマーの運動性を残しながら檻の中に入れ

てしまうんですね。そうすると水がどんどん入りたいんだけど、水があるところで止まっちゃうんです。メタノールが入ってこないじゃない。普通は、水が入ることでメタノールをつれてきちゃうんだけど、それが抑制される。

このグラフ横軸がプロトン伝導性、縦軸がメタノール透過性の逆数になっていますメタノールをどのくらい止めたかってこと。Nafion（市販の分離膜）ってのはここなんですよ。研究室で作った膜ってのは、中に入れるポリマーを代えることによって、この線も変わるんだけど。

機械的に強くなればなるほど、メタノールの透過を押さえます。メタノールの透過を押さええていって、ナフィオンと同じくらいプロトン伝導性が同じくらいで、Nafionの10倍くらいメタノールの透過性を抑制する膜を作れちゃったんですよ。

そうやって考えるとね、メタノール濃度見てください。60%がプロトンキャリアとして最高値。60%のメタノールと40%の水ってのが溶解度の関係で最高なんですよ。メタノール濃度によって、膜の体積変化率は一般の膜はすごい変化する。でも私たちの膜だとほとんど動かない。

あとは一番重要なのはクロスオーバーね。私たちの膜はこう。そんなにクロスオーバーしない。最初から計算してこうなるってわかっているからやっているんですけど、8%だとNafion膜ならこういうところで80mW。どんなに上手く使っても、我々の膜を使うと8%だところ、16%だところ。32%だところでNafion膜よりもクロスオーバーが少ないんだよね。今日修士の人の発表会があって、もう、8、16、32%でぜんぜんクロスオーバーしない。なぜかっていうのも明らかになってる。

ここは下がっているデータ持ってきてるけど、皆さんのコンピュータに入れるのに必要な電池性能は決まっているんですね。

あとは耐久性だよ。その膜を買ってすぐに壊れたらいやでしょ。燃料電池性能を500時間見たものなんだけど、Nafionはこれ。相当強いつて言われてるんですけど。若干落ちたのは触媒のところメタノールがちょっと止まっているから落ちていたんだけど、こっちは研究室で作ったもの。ぜんぜんかわらないでしょ。

企業のうちの研究室で学生達で作った膜を会社の人が習って販売を始めようかってことになってる。来年燃料電池を使ったPCが発売されるんですよ。我々の研究室で作った膜が採用されるかなんてわからないけど、性能としては十分クリアしてる。

これはポータブルの燃料電池の問題点ね。それは膜だってわかってたから、そこに特化して開発した。もう一つはこういう触媒層のところだって変えていかなければならない。実はね、炭化水素系のさっきの膜ね、ナフィオン膜で平米5万円くらい。どんなに頑張っても5000円は切れないと言われてる。我々作っている膜は1000円切りますよ。燃料電池の値段って言うのは膜、触媒、セパレータでそれぞれ1/3つて言われているんだけど、膜は炭化水素系でいいもの出来たから、触媒層のところも下げなければいけない。

こういう言うときには燃料電池を再現するモデルをコンピュータ上に作って、構造とかをちょこっと変えて、計算をやってみるとシミュレーションできるんですね。そうすると何がわかったかということ、白金がどれくらい使われるかということ、1/3の値段をかけてる割に2割しか使われていない。ばからしいでしょ。それはナノ構造制御をちゃんとやってないから。しかも、みんな考えないで、他の会社はそのへんで実験やっているからって、そのへんでやっているんですよ。

性能はこのグラフの0.1mg以上ではあんまり変わらないんですよ。でも0.1mg切ったところでガクンと下がっているんですよ。ということは0.1mg付近で燃料電池つくればいいでしょ。白金の値段高いんですよ。だからこのへんでつくって実証した。そうしたら本当にほとんど変わらないって結果が出てくる。もうひとつの問題点はカーボンってのが凝集していて、30nmのカーボンの膜に白金がくっついてる。このカーボンの中の方にある白金っていうのが使われていない。そんなことやると燃料電池としての性能はずっと上がって

る。白金は3~7mg使ってて、うちの場合は1/10、0.7mgくらいまで下げることになっている。

## 5 総括

ここで言いたいのは、世の中はポータブルは皆さんの周りに数年以内にできあがってくるかと思います。10年、20年後には水素化社会が出てきます。普及させるためには燃料電池の皆さんの信頼度を上げなければならない。最初はこういうポータブルから入る。本格的な水素社会、そういうロードマップを考えています。

ここで言いたかったことは、時間感覚。最初に始まるのはポータブル。あとはインフラが整って水素化社会、燃料電池が始まる。そういうロードマップを考えなければならない。いろいろなことを考えながら、時間と分野を総合して燃料電池っていうのは進んでいく。まだまだ始まったばかりで、追々皆さんが技術をやっていくの十分な分野だということが伝わればいいと思います。

時間ぎりぎりになりましたが、これで終わりにしたいと思います。ご清聴ありがとうございました。