講 演
 Lecture

日本のエネルギー政策と水素エネルギーの展望*

内 田 裕 久^{**、†}

(Received August 5, 2015 ; accepted September 4, 2015)

Japan's Energy Policy and Prospects of Hydrogen Energy

Hirohisa Uchida

はじめに

今日は初めに、原子力とは何かについてお話します。日本のエネルギー政策を語る上で、避けて通れないところで、これに係る問題として地球の温暖化の問題があります。次に、再生可能エネルギー、水素エネルギーについてお話します。水素を燃料電池以外にも、農業、陸上養殖に利用する方法もあるので、これもぜひ紹介したいと思います。

東日本大震災と原子力災害

私は、人間の安全保障、ヒューマンセキュリティという観点から、この 4 年間に海外十数カ国で自然災害と原子力災害について話をしてきました。なぜかという、日本がこういうことを全く海外に発信してこなかったからです。

東京電力福島第一原子力発電所のメルトダウンが起きた事故では、津波が原因で緊急冷却機能が動作しなかったということになっていますが、正確な原因はまだによく分かりません。

東海大学の元医学部長で、国会事故調（東京電力福島原子力発電所事故調査委員会）の委員長を務められた黒川清氏（図 1 左）は調査委員会の報告書をまとめましたが、国会はこの報告書を 1 回も使っていません。「責任の所在もなく、これが先進国のあるべき姿なのか」と黒川先生は嘆いておられます。

また、JST（科学技術振興機構）の理事長も務めた北澤宏一氏（図 1 右）は、民間事故調（福島原発事故独立検証委員会）の委員長を務められました。私とは材料分野の仲間で、超伝導の分野では大変活躍された科学者でした。昨

年の今頃はビールを飲みながら、「原子力発電は人間社会にとってリスクが大きすぎる」と仰っておられましたが、残念ながらお亡くなりになりました。

未解明のまま原発を再稼働するというのは、政治が決められていることです。科学者が決めていることだとは到底思えません。

2015 年 5 月 14 日にウィーンで発表された IAEA のプレス向けリポートで報告されているように、米国の指導で日本に最初に設置された福島第一原発施設は、その後、地震や津波による危険が見えられていたにもかかわらず、東京電力も国も具体的な対処をしていなかったと厳しく批判しています。米国では、ハリケーン対策として重要なシステムは地下に確保します。そのやり方をそのまま踏襲していたために、津波が来たときに冷却系は水没してしまいました。

私は日本の原発は安全であると信じていました。私自身、ピッツバーグの東芝ウェスティングハウスエレクトリック・カンパニーに行き、副社長ともお会いして、「原子力人材をアジアで育てたい」とアジアの原子力人材育成教育に関する協定を締結したのも当時東海大学工学部長だった私自身です。しかし、それから何年かして福島で予想もしなかった原子力災害が起きました。

社会技術とリスク

私は、日本の原発はもう少しまともなシステムだと思っていました。私自身も技術屋ですから、あの事故後の状況や対応できない現状を見ると、原子力発電を人間社会の技術として本当に認めていいものかどうか疑問に思います。

原子力の関係者は、「どんな技術にもリスクがある」と言います。皆さんは、新幹線に乗るときにシートベルトをしますか。乗り合いバスに乗るときにシートベルトをしますか。交通事故によるリスクがあるのにシートベルトはしませんね。なぜでしょうか。長年の安全運行の実績の積み

* 平成 27 年 6 月 9 日、平成 27 年度石油技術協会春季特別講演会にて講演 This special lecture was delivered at the 2015 JAPT annual meeting held in Tokyo, Japan, on June 9, 2015.

** 東海大学工学部 School of Engineering, TOKAI University

† Corresponding author : E-Mail : huchida@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

重ねがあるからです。しかし、私たちは、福島であの原子力災害を経験してしまいました。事故処理にはあと何十年以上もかかります。これと同じ社会技術のリスクと考えていいのでしょうか。

私の父親の出身は福井県です。福井県に立ち並ぶ原発でメルトダウンが起きれば、真冬であれば福井県の日本海側の住民たちは避難したくても避難できません。道路は雪に閉ざされて凍り付いて、車も走れません。人の移動は不可能なのです。

基本的に人間社会の中で使っていい技術かどうか、厳しく考えないといけません。私は、生前の本田宗一郎さんにお世話になりました。本田さんは、「技術っていうのは人を幸せにするものであって、不幸せにするもんじゃ駄目なんだ」といつもお話しされていました。私はそれが技術屋の基本的な姿勢だと確信していますし、大学では工学部の学生たちにも話しています。

自分で空間放射線量を測定しよう

私は昭和44年以来、春、夏、秋には栃木県北部の那須によく行きます。2011年から自分で空間放射線量を測定しています。4年前に比べて今は半分ぐらいに下がってきていますが、地面とか少し低地のほうに行くと、まだまだかなり高い状況です。

「この地域を洗浄する」と那須町から連絡が来たので、「どうぞ」と申し上げました。しかし、汚染された森林が雨に濡れて、しずくが地面に落ちて、低地に流れてくれば、洗浄する意味はありません。福島県だけではなく、北関東一帯は相当放射性物質で汚染されています。

比較的高価な放射線計測器に比べて、単三電池1本で測れる、セシウム137の放射能測定に特化した簡易型の測定器を5千円ぐらいで購入できます。東海大学の学生はこれを持って事故を起こしたチェルノブイリ原発まで行き、測定してきましたが、データを見ても問題なく使えます。こういう簡易型の測定機器を持って、自分で地域の放射線量を測ると空間放射線の実感がわくと思います。

東北自動車道に沿って北上し、途中の休憩施設で地面の所を測ってみてください。大体、栃木県矢板あたりから北の方に行くに従って計測値が上がっていきます。

原子力とは何か

「原子力工学」イコール「原発」ではないということをぜひ知っていただきたいと思います。原子力とは、原子の力を利用する技術です。不安定な原子構造から、より安定した原子構造に変化するときに、粒子や電磁波のかたちで出てくるのが「放射線」と言われているものです。大きく分けて、エックス線、ガンマ線などの電磁放射線と、アルファ線、ベータ線、中性子線などの粒子放射線があります(図2)。

原子力は発電以外に、核兵器への応用もありますが、医療、農業、工業などの産業で非常に役立っています。

例えば、重粒子線を使ったがん治療がありますが、つい

最近、神奈川県にも導入されました。90歳近い私の母親は、5年ほど前に子宮がん治療後に放射線を使って再発防止治療を施されましたが、いまだに再発していません。医療への放射線利用はとても重要な技術だと思っています。

もう1つ、意外と忘れてるのが宇宙開発です。高度を上げていくほど、私たちは太陽や銀河系から来る宇宙放射線を多量に浴びます。宇宙空間での放射線防御のためのサイエンスや技術もとても必要です。

水素のような軽い元素は、お互いに一緒になって重くなり、安定な元素へと安定化しようとしします。これが核融合反応の原理です。ウランのような重い元素は、中性子を当てて分解することで、より軽い元素になる傾向があります。核分裂反応です。いろいろな元素の結合エネルギーを見比べてみると、宇宙で一番安定な元素が鉄です。

わずかな質量変化が膨大なエネルギーに変換されるという核反応はアルベルト・アインシュタインが見つけた知見ですが、うまく使えば人類のために役に立つ非常に重要な発見であると私は思っています。

太陽からは常に太陽風や太陽磁場が地球に吹き付けられていますが、幸い、地球には地球磁場があって、これをかなりガードしています。この地磁気のガードで私たちはこうやって生きているわけです。太陽から来る特定の粒子は、今もこの建物や私たちの身体を通過しているのです。

さらに大きい銀河系から見れば、天の川から大量の宇宙線が地球系に降り注いでいるのも事実です。これが地球温暖化の1つのメカニズムに関わっているという指摘があるので、あとでその話をします。まさに宇宙空間は放射線で満ちており、宇宙開発は放射線との闘いともいえます。

原子力工学科の学生に、「原発で働きたい、就職したい人」ときくとほとんどいません。就職先を考えるときには、もっと広い視野で、宇宙開発、医療、産業あるいは放射線環境管理などの分野で活躍することも考えようと話しているところです。

東海大学の湘南校舎では、私の仲間が2011年3月の事故直後から大学に泊まり込んで、キャンパスの放射線測定をずっとやっていました。私は、3月下旬、平塚市辺りのキャンパスで得られたデータを持って文科省に行きました。3月18日ぐらいからヨウ素の痕跡はもうなかったもので、「こんなデータがありますよ」と言ったら、その時点で、国にはこういう具体的なデータはありませんでした。この国の危機管理は大丈夫なのかと思いましたが、これが実態です。

当時のデータは、東海大学工学部原子力工学科のホームページでいまでも日本語と英語で公開しています。なぜ英語かというと、事故直後、留学生がみんな帰国しまったので、留学生諸君に呼びかけるためです。「データを見てください。この地域は大丈夫ですよ。皆さん、戻ってきてください」という呼びかけでした。

日本のエネルギー政策

エネルギー政策は、科学技術ではなくて政治が決めます。

政治は政治家が決めるなら、その政治家を選ぶのは私たちです。ここは私たちが認識すべき重要なポイントだと思います。

1970年代から、日本の脆弱なエネルギー供給構造の強化、クリーンエネルギー・省エネルギー技術開発は必須だと同じことが繰り返し言われてきています。

電源構成の推移（図3）をみると、原油の輸入は減ってきて、LNGが増えています。ただし、電力全体の消費量は頭打ちです。省エネ効果の結果なのか、あるいは日本の産業が停滞してきているのか、心配なところもあります。市場の動きとエネルギーの動きは、常に両方同時に見ていかなければなりません。

神奈川県では、川崎市が京浜臨海工業地帯を中心に水素エネルギーなどの開発に非常に力を入れています。それには、大きな理由があります。原油輸入が減り、原油タンク利用率が下がる将来を見据えて、水素を中心とした新しい産業構造を模索しているからです。

去年出た政府のエネルギー基本計画には具体的な数字が出ていませんでした。しかし、この4月、政府は電源構成に関してベストミックス案を公開しました。そこには原子力については22%ぐらい入れるという案が出てきました。再生可能エネルギーは、もう少し大きくなるかと思ったら意外と低く、20%程度でした。30%には到底いきません。

神奈川県の黒岩祐治知事は、再生可能エネルギー比率を35%にすると主張しています。私は、過去3年近く黒岩知事の参与としてアドバイザーをやってきました。黒岩知事は、現在も太陽エネルギーを中心にスマートエネルギー政策を積極的に展開しています。エネルギー政策は腰を据えて、しっかり方向付けをしないと、どこへ行ってしまいか分かりません。勝手に都合よく、政治的に決められてしまうことになります。

私は水素エネルギーが専門ではありますが、世界に誇るべき日本のクリーンな石炭火力発電、天然ガス火力発電をもっと使うべきだと考えています。神奈川県磯子区にあるJ-POWER（電源開発）の石炭火力のSOxとNOxの排出量のデータを見ると、世界の中でも、あるいは日本の古いタイプの火力発電施設に比べても、圧倒的に排出量が少ない。石炭火力は安く安定しています。一方、原油価格と天然ガス価格は高止まりで、変動も大きい（図4）。

日本の産業力を維持していくうえでも、世界に誇る日本のクリーン火力技術を駆使してベースロード電源として、化石燃料をしっかりと使っていくことが大事です。

東京電力のLNG川崎火力発電所は、もうじきエネルギー変換効率が60%超えの2号系が稼働しだします。世界最高です。また、石炭火力でも、IGCC（石炭ガス化複合発電）で50%超になりつつあります。日本の火力発電の技術を海外でもっと利用すれば、CO₂排出量も大きく下がります。電源開発が出しているデータによれば、世界のCO₂を15億トン以上減らすことができるといわれています。

CO₂は大事な資源、悪者ではない

私自身、いつも変だと思うのは、なぜCO₂は悪者扱いされるのかということです。今、緑の葉がどんどん成長しています。これは光合成の結果ですね。CO₂がなければ植物は成長しません。皆さん、このことを意外と忘れていて、CO₂が悪者みたいな言い方をします。農作物の成長を促進するために、ビニールハウスの中に二酸化炭素をまくのです。

たとえばドイツでは、再生可能エネルギー由来の余った水素とCO₂からメタンを造るとか、アウディという自動車会社は水と二酸化炭素からディーゼル燃料を造っています。また、ドイツのBASFやスイスのチューリッヒ工科大学では、CO₂から化学製品、ファイバー、ジェット燃料にする開発をすでにスタートしています。

CO₂なしに植物も作物は育ちません。今は人工光合成の研究も進んでいます。

私は、CO₂から付加価値のあるものをいかにして造りだすか、石油化学系の会社はもっと積極的にやるべきだと思っています。CO₂を使って新商品、新プロセスをぜひ創りだしてください。

NEDOでも、去年からソーラー水素など製造プロセス技術開発とCO₂資源化プロセス技術開発が始まっています。再生可能エネルギーを使いながら、最終的には水素と二酸化炭素を使って、いろいろな製品にしていこうという開発です。まさに最先端のトレンドです。

CO₂が大気中に増え過ぎるのは良くないにしても、「CO₂を減らせ」の一本調子ではなく、少なくとも、これをどうやって使っていくかという、新技術の開発もぜひお願いしたいと思います。

CO₂は地球温暖化の主因か？

さて、CO₂は地球温暖化の主因でしょうか。科学的な確認をしておきたいと思います。

参考になる本があります。私の研究仲間で、長年にわたり水素と材料の研究を行ってきた研究者で、長く中央大学理工学部勤務されていた深井有先生の「気候変動とエネルギー問題－CO₂温暖化論争を超えて」（深井有著・中央公論新社）です。これは中公新書から出ています。

今、小・中・高で教えているのは、地球の温度が産業革命の頃から一気に上がっているというデータです。大気中のCO₂濃度も、この頃から一気に増えています。通常はこの時期だけを強調しています。しかし、学生のレポートだったら、これはアウトです。「何でそのような短期間だけ見て、将来を予想できるのか。もっと長いスパンで見ろ」。

もっと過去まで遡れば、大気中のCO₂濃度変化とは無関係に、地球の温度は高い時期も、低い時期もありました（図5）。

ということは、CO₂以外の要因があってもおかしくありません。その辺のメカニズムの解釈を採用したのがドイツです。2012年には、すでに「シュピーゲル」がある本（Die

Kalte Sonne: 冷たい太陽)の内容を紹介しています(図6)。

内容をお話すると、太陽からは常に太陽風と太陽磁場が地球に吹き付けています。地球をとりまく雲は、遠い天の川から降り注いでくる宇宙線が大气の中に入って、エアロゾルという雲のもとを作り、雲が形成されやすくなります。この宇宙線の侵入が多いときには雲ができやすくなります。しかし、これを邪魔するのが太陽磁場や太陽風です。これまでのデータから、太陽風と銀河系から来る宇宙線のバランスで雲量が決まるという傾向が出ています。今後は極端な温度上昇はないという予想をしています(図7)。

しかし、最近、これが少し乱れてきているというデータも国立極地研究所から報告されています。

雲量を左右するメカニズムを断定するのは難しいのですが、傾向として、雲が増えると地球は冷えてきます。雲が少なくなると地球は温まってきます。CO₂よりも、水蒸気の方が圧倒的に大気の温暖化に寄与するのはよく知られています。地球の大気温度に影響を与えるのは、雲量、すなわちこれに影響する太陽の活動度の方であろうというのがこのメカニズムの基本的な考え方です。

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)は虚偽のデータを捏造して、極端な地球温暖化を公表したため、スキャンダルになり、極端な温度上昇予想を取り消しました。

太陽活動と雲量・気温のメカニズムですが、今、太陽活動は停滞していて、非常に弱まっています。まだまだ弱まります。太陽は、11年周期で南極と北極が入れ替わりますが、この数年間は、完全に入れ替わらない状態が続いています。このような状況がかつて存在し、地球が寒冷化した時代がありました。2020年ごろには地球寒冷化が予想されるということで、覚えている方もいるかもしれませんが、2012年4月、国立天文台、理化学研究所、NASA、ESA(欧州宇宙機関)などがそろって、地球寒冷化を警告しています。

東京工業大学の丸山茂徳研究グループも、地球の温度に一番影響するのは、地球を取り巻く雲とか水蒸気の量、2番目に影響するのが温暖化ガス、その他に、地球が太陽の周りを公転するときの揺らぎの角度、地球磁場、火山活動などと指摘しています。

ですから、「CO₂だけを取り上げて、温暖化、温暖化」と言うのは科学的に問題があります。私たちが生きている太陽系あるいは銀河系には、もっと複雑なメカニズムで、私たちがまだまだ理解しきれていないものがたくさんあるという考え方のほうが正しいと私は思っています。

今年5月、毎日新聞が、地球自身の磁気も弱まっていると報道しています。太陽からの太陽風とか磁場をガードしている地磁気自身が、今、加速度的に弱まっているのです。地磁気が弱まると、オーロラがもっと低い緯度で見られるとか、楽しい現象はまだいいのですが、重大な通信障害や、地球寒冷化も予想されています。

ですから、宇宙のスケールで見ると、私たちが予想し得ないことが起きる可能性もあるので、CO₂だけに目をとられてしまうと危険です。

石油技術協会の皆さんには、むしろCO₂をどうやって商品にしていくなか、どうやって付加価値を付けていくかというところで頑張ってもらいたいと私は心から願っています。

ドイツの再生可能エネルギー

私はドイツのマックス・プランク金属研究所に6年間勤務して、帰国後すぐに、当時、まだ高かった太陽光パネルを買いました。小さな太陽光パネルが1枚十何万円もしました。それを湘南校舎の屋上に置いて、太陽光発電を利用して、GE社製のSPE(固体高分子電解質)の装置があったので、それで水を電気分解し、発生した水素を水素吸蔵合金に貯めるという運転を10年近くやりました。

これをエネルギー・資源学会などで発表したところ、散々批判されました。まず、太陽光エネルギーの研究をやること自体、変換効率が低いのになぜやるのか、太陽光エネルギーの将来などは見えないと。また、1980年代は、まだ燃料電池が実用化されていなかったで、「太陽エネルギーを水素に変換して何のメリットがあるのか」と散々批判されました。

今でも、再生可能エネルギーは、このまま固定価格買い取り制度をやっていると、あちこちにたくさん造り過ぎるという説もあります。また、原子力発電を再稼働させるためにも再生可能エネルギーは増やしたくないという雰囲気は日本政府にはあります。

ドイツは、すでに去年の段階で28.5%が再生可能エネルギーに移行しています。

私は、去年11月に南西ドイツのバーデン・ヴュルテンベルク(BW)州政府を訪問するチャンスがありました。ちょうど黒岩知事が行くときだったので、一緒にしましたが、州政府のクレッチマン首相が丸1日お付き合いしてくれました。BW州はドイツの緑の党の方が初めて首相になっている州です。有名な黒い森がある州です。ところが、首相は厳しい顔をされて説明を始めました。

風力発電が豊富にあるのは北海の方だが、ドイツの工業地帯は南ドイツ側にあるのです。メルセデス・ベンツの本拠地があるBW州がある南西ドイツのシュトゥットガルトと、その東隣でバイエルン州があるBMWの本拠地があるミュンヘンです。これがドイツの黒字を支えている重要な2大州で、この地域が大量の電力を消費します。もう1つ、北の方にノルトライン・ヴェストファーレン州があって、ここも工業地帯が伝統的にあります。

問題は、北の方で発電した電力をどうやって南の方まで持ってくるかです。直流発電送電というアイデアがあっても、その途中のドイツの人たちには、「電磁場の影響は体に良くない」と言って反対する人が多く、そんなに簡単には電力線を南の方まで引けません。首相は苦渋の顔をされていました。

そして、一番困っているのは、原発をやめると決断したが、放射性廃棄物を処理する場所がないことです。どこへ持っていっても反対されて、持っていく場所がありません。

この2つについて延々と首相が説明されていたのが非常に印象的でした。

ドイツは、政治の政策としていったん決めたら、頑固に実行するのみですが、私たちが参考にできることがかなりあると思います。

ドイツは、脱原発で再生可能エネルギーを導入したから、電気代が上がって困るという話がよくあります。私の息子家族はドイツで10年近く、年金暮らしの90歳を超えた義理の母もドイツで生活していますが、家庭に大きな負担になるほど電気料金は上がっていません。日本ではドイツの再生可能エネルギー導入について、ネガティブに誇張された意見があるようです。

ドイツの各地域には小さな電力会社がたくさんあり、インターネットで、「あなたの住んでいる地域には10社ぐらいありますよ」と確認できます。新聞の購読と同じで、「1か月契約してくれたらOKです」ということで、各社が電気料金表を全部公表しています。1カ月の接続料で、消費者はそこから選択すればいいのです。さらにその会社と接続契約をすると、「あなたは、100%再生可能エネルギーの電気がいいですか。まだ少し残っている原子力や化石燃料の発電が混じってもいいですか」という選択もできます。

そして、非常におせっかいなのですが、その家庭の1年間の電気の使い方が、いいとか悪いといった報告書までつけてきます。こういうところが非常にうまく進んでいて、小さな発電企業と住民とが一体になっているという気がします。

日本の再生可能エネルギー

日本の再生可能エネルギーをみると、太陽光発電を中心に発電容量は伸びています。北海道、本州、四国、九州の各地域間の接続がもっとスムーズにいけば、電力量だけ考えれば、例えば、北海道に集中して再生可能エネルギー施設を置いて、それを全国に送電してもいいぐらいです。しかし、分散型で使うのが本来の再生可能エネルギーの特徴です。

では、あちこちに造った場合、それをどうやって皆さんが効率よくうまく使えるようになるのか。今、各地で、電力の発電・送電分離会社ができてきている最中だと思います。しばらくは混乱するでしょうが、これからが消費者にはメリットが出てくる面白い時期になるだろうと思います。

神奈川県の場合、伝統的に誇れる再生可能エネルギーはが丹沢山塊にあるダムの水力発電です。全国の自治体の中で水力発電容量が一番大きいのは神奈川県です。そして太陽光発電容量も増えてきましたし、バイオも含めると、神奈川県の再生可能エネルギー発電容量は1.2ギガワットを超えました。原発1基分を軽く超える再生可能エネルギー発電容量です（図8）。

日本の再生可能エネルギーの設備容量では、現在、約28ギガワット以上あると言われています。これも時間の関数でどんどん変わっているわけですが、これからさらにどのぐらい伸びるのか、あるいはどこで止まってしまうの

か、これからの日本のエネルギー政策との絡み合いだと思います。

次に、京浜臨海工業地帯を少し紹介させてください。川崎市と横浜市にまたがっているこの地域の火力発電容量は6.3ギガワットです。計画中のものまで全部入れると8ギガワットです。あの小さな地域に、何と原発8基分の電力源があるのです。

「神奈川県は、目を覚ましてエネルギーで商売をやるべき」と話しています。しかし、こんな巨大なエネルギー源が首都圏の近くにあることも事実です。

水素エネルギーとは

水素エネルギー利用は、1960年代頃からアメリカを中心に伸びて、その後、世界に広がりました。しかし、世界が目を向けるようになったのは、やはり燃料電池技術が商品として出てくるようになってからです。ようやく「水素は使える」というように見てもらえるようになりました。

エネルギーは、1次エネルギーと2次エネルギーに分類されます。水素エネルギーは、1次エネルギーを使って造り出す2次エネルギーです。

なぜクリーンと言うのか。炭素原子と水素原子から構成される化石燃料を C_mH_n の形で表せば、 $C(m=0)H(n=2)$ が水素です。酸素と燃焼しても CO_2 を出さないからクリーンと言われています。

水素には使い方が2つあります。水素を消費して使う方法、と水素を消費しないで繰り返して利用する方法です。（図9）

＜水素を消費する方法＞水素と酸素を化合させて水にするときに電気が出ますね。ちょうど電気分解の反対の使い方です。燃焼反応（ロケットエンジンなどの内燃機関燃料として）と電気を発生させる反応（燃料電池）を利用するものです。

＜水素を消費しない方法＞水素吸蔵合金にためた水素を放出させて、もう1つの水素を貯蔵していない合金に送り、この2つの合金間で水素の吸収・放出反応というキャッチボールをするときに発生する合金の熱反応を利用する方法です。この場合、水素を吸収するときには発熱反応、水素を放出するときには吸熱反応が生じます。この熱反応は、冷える現象を利用することで冷凍機・冷水製造もできます。

水素を消費しない技術は、ニッケル水素蓄電池という充電電池にも利用されています。ここでは水分子から解離した水素イオンが電池の負極である水素吸蔵合金に入り（充電）、あるいは合金から出て（放電）、繰り返して電池が利用できます。エネルギーはまさにそうです。トヨタのプリウスに使われている充電電池も同様です。

水素の性質

水を電気分解し、発生した水素と、空気中の酸素を反応させて、このときに発生する電気でモーターを回すというのが基本的な燃料電池の原理です。電気分解の逆ということで、皆さん、中学校で勉強した水の電気分解を思い出し

てください。

試験管を逆さまにして水の中に入れて、水素ガスと酸素ガスを集めましたね。溜まった水素の試験管の方に、マッチで火をつけると、「ピュ」という音で引火すれば成功です。もたもたしていると、空気中の酸素が多めに水素ガスに混じって、引火し、試験管が割れたりしたこともあるかもしれません。「水素は爆発する、危ない」と言われる原因です。

よくドイツのヒンデンブルク号の爆発事件が出てきますね。あれは水素が爆発原因ではありません。飛行船の機体の布には、酸化鉄とアルミの混合物のテルミットと言われる材料が塗装してあり、そこが空中で帯電し、放電した火花がまず布に燃え移り、それから内部の水素ガスへ引火したと言われています。だから、中がヘリウムガスだったとしても、機体の布は燃える可能性があったということです。また、水素ガスへの引火で燃えたために、発熱量が比較的小さく、3分の2以上の人が助かっているのも事実です。

水素は、拡散速度がすごく速く、私は長年、水素ガスを使った実験をやってきましたが、水素が少し漏れても、1秒もたたないうちに5メートル以上離れた天井の水素検知器警報機が鳴ります。猛烈に速く拡散しますから、窓を開けておくとか、排気さえしっかりして、水素ガスをためないようにすることで、水素ガスは安全に使えます。どんな燃料も、ためて、引火すれば危険です。

1970年以前、都市ガスで自殺する人がいました。何で都市ガスで自殺できるのかと思ったら、当時はCOとH₂Oの混合ガスでした。今では、都市ガスはメタンが主なガスで、COは含んでいません。

ですから、実は、私たちは伝統的に水素をかなり燃やして使ってきたという実績もあります。

燃料電池の動作原理

燃料電池には、定置用と動力用の使い方があります。定置用はエネファーム、動力用は燃料電池自動車ということで、これからとても大きな市場展開が期待されています。5兆円以上という、従来の原発市場、あるいは放射線を利用した医療・工業の市場とほぼ同じぐらいになります。

燃料電池を動作させるためには、水素ガス分子と酸素ガス分子を、それぞれ解離させて原子状にする必要があります。シンプルですが、水素分子と酸素分子は、どちらも共有結合分子ですから、この共有結合をどうやって切り離して、お互いに原子状にして化合させるか。ここが重要なポイントです。

共有結合を切るためには、電子が必要です。高温であれば、共有結合分子は電子を金属側からもらって原子に解離できますが、通常、金属表面は酸化膜で被われていて、電子を出すことができません。100℃以下の低い温度では、金属酸化被膜は安定です。そこで、低温でも共有結合を解離させることができる金属というと、白金しかありません。この高価な白金の使用量を減らしても、燃料電池が効率良く動作するような研究開発が長年にわたり行われてきました。最近、燃料電池のコストが下がったのも、白金使用量

を大幅に減らすことができた結果です。

燃料電池の利用例

電気として45%、熱として42%、トータル87%で使えるのが定置用燃料電池のエネファームです。改質器が優れているので、天然ガス、下水道、廃棄物、メタンガスからでも水素を取り出して、発電できます。

埼玉県庁にはホンダのソーラー水素ステーションがあります(図10)。

太陽光で発電した電気で水を電気分解して、350気圧まで昇圧できるので、直接、燃料電池自動車に直接チャージできるシステムです。自動車の中に水素が十分にたまっていれば、逆に、インバーターを使って発電機にもなり、一般家庭であれば5日から1週間ぐらひは十分に給電もできます。

トヨタは、燃料電池バスには屋根に高圧水素タンクをたくさん積めるので、体育館に避難した人たちに給電するという実験をしています。海外では、「日本はそんなものが必要か」とよく言われますが、「日本は、毎年、台風が来て、体育館などに避難する人が出るの、これは非常に重要なんだ」という話をしています。

2013年4月には、最初の水素のステーションが神奈川県海老名市のガソリンスタンドの中にできました(図11)。当分の間、燃料電池の車はめったに来ませんから、通常ガソリンステーションの中に水素ステーションを置くことが大事です。

日本には各省庁の規制が多々あるために、水素ステーション1カ所造るのに5億円ぐらひかかります。ヨーロッパやアメリカの5倍もかかるのが現状です。今年の1月だったと思いますが、安倍晋三首相が自分で燃料電池自動車を運転しながら、「規制緩和をしなきゃいけませんね」と言っていました。まさにどんどん進めてもらいたい。

私も、今、神奈川県を中心に、水素社会の実現に向けて活動をしています。2019年には東京で大きな水素国際技術展—WHTC(世界水素技術会議)2019を開催する予定です。舛添要一東京都知事が積極的で、力を入れていますので、東京都と神奈川県が一体化して、この会議を成功させたいと思っています。

なぜ燃料電池自動車が注目されるのか

天然ガスから水素に転換して、燃料電池自動車に利用すると、エネルギー利用効率が40%近いのに対して、原油精製からガソリン車へ利用するときの利用効率は20%程度です。ざっと見て燃料電池自動車の方が、2倍もエネルギー利用効率を高く使うことができるのです。世界中が燃料電池自動車に注目している大きな理由です。

もちろん、ハイブリッド車も決して悪くありません。天然ガスもいいでしょう。ただ、これは、化石燃料、再生可能エネルギーなどを、どのように利用して、産業を回していくのかという社会システムの問題になります。

水素ステーションでは、3分間で700気圧の水素ガスを

満タンにできます。水素 1 キログラム 1,000 円ぐらいですから、満タンで約 6,000 円の売り上げになります。一方、電気自動車は、30 分ぐらいかけた充電しても、数百円取れるかどうかです。喫茶店でコーヒー 1 杯で延々と粘る人と同じようなものですから、燃料ステーションとしては困ります (図 12)。

再生可能エネルギーを水素として貯蔵する

水素と再生可能エネルギーは非常に相性がいい関係です。人が行けないような所に、例えば、無人の風車とか太陽光発電施設があっても、発生した電気で水を電気分解して、水素にして貯蔵しておいて、必要なときに燃料電池につないで電力源とすることが可能です。

再生可能エネルギーは、晴れたり曇ったり、風が吹いたり吹かなかったり、常に変動します。基本的に再生可能エネルギーは「ためて使う」のが根本です。意外とこの基本が理解されていません (図 13)。

再生可能エネルギーのため方はいろいろあります。蓄電池で化学的にためるのも 1 つです。水を電気分解して水素にしてためるのも 1 つです。それ以外にもいろいろなため方がありますが、今、比較的広がっているのは、蓄電池を使ったため方ですね。私自身は、水素吸蔵合金を利用して、水素としてためる方法を勧めています。圧倒的に安全で、長期間安定して貯蔵できるからです。

1980 年代からずっと実証してきたシステムがあります (図 14)。太陽光エネルギーと風力エネルギーの両方を、SPE (固体高分子電解質) 槽を使って水を電気分解します。そして発生した水素を水素吸蔵合金にためておいて、必要なときに燃料電池につなぐというシステムです。これを使えば、水素は 20~30 年ためておいても全く問題なく安定して使えます。これはテスト済みです。水素吸蔵合金に水素をためれば、高圧ガスタンクは要りません。10 気圧以下で水素吸蔵合金タンクに水素化物として安定に、長期間ためることができます。

水素吸蔵合金を利用した水素を消費しない技術

水素吸蔵合金は、私たちが空気を吸うよりも速く水素を吸収、放出できる金属材料です。水素は合金を構成する原子の隙間に入ります。同じ体積で比べると、合金は液体水素よりもたくさんの水素を、より高密度でため込むことができます (図 15)。

この反応を利用しているのがニッケル水素電池です。1988 年、私たちは充放電が 1,000 回以上できることを実証しました (図 16)。これが、後に実用化されてプリウスに搭載され、ハイブリッドカーが普及し、また小型の蓄電池エネループという商品も出るようになりました。

電池への使い方以外に、合金の発熱・吸熱という可逆的な熱反応の使い方があります。水素吸蔵合金は、水素を吸収するときに発熱します (図 17)。次に、たまっている水素を放出するときには、吸熱反応なので、周囲から熱を奪うので、周りが冷えます (図 18)。

図 19 をみてください。まず、水素をためている吸蔵合金に、ごみ焼却場とか発電所から出てくる排熱、例えば 100℃ 程度の水蒸気を当てます。そこで水素が放出されますそして、もう 1 つの水素を吸収していない空の合金へ水素を送ります。この合金が水素を吸うと発熱しますが、この発熱反応は使いません。地下水をこの合金タンクの周りに接触させておいて、水素を放出させると、吸熱反応により地下水が冷えていきます。この冷却する熱反応を繰り返すことで、地下水温度を 0℃ 程度まで冷やすことができます。工場排熱と水素吸蔵合金を使うだけで、容易に冷水が製造できます。

また、地下水の場合は、0℃ より下がると氷になってしまうので、氷点下まで冷凍する場合には、炭化水素冷媒を水の代わりに使います。この方法で、60 m³ の空間を 2 つ、-30℃ まで冷やした冷凍庫も実証しました。使うのは排熱と水素吸蔵合金の反応熱だけです。

冷水製造や冷凍機の実証を、愛媛県西条市でこの 10 年以上にわたり、経済産業省や日本製鋼所 (JSW) の協力で実証してきました。

冷水は、1,000 m³ のビニールハウスの中でイチゴ栽培に利用しました (図 20)。ハウスの中が高温になっても、イチゴは、植えられているプランターの中で冷水が流れている限り成長します。それを実証して、「水素イチゴ」という商標も登録しました。この水素イチゴは経済産業省のプロジェクト成果だったので、販売はできず、地元の方々に嫌というほどたくさん食べてもらいました。

一方、0℃ から 5℃ の冷水は、陸上養殖にも利用できます (図 21)。地元のサツキマスの養殖に適用しました。東海大学海洋学部秋山信彦教授の協力を得て、養殖からふ化まで全部成功しました。川魚は、塩水を浴びると、体が塩分の刺激を受けて、口が曲がり、マスにだんだん変わっていきます。肉も、川魚の白色からピンク色に変わります。そうすると、付加価値がぐんぐん上がります (図 22)。

水素イチゴやサツキマスの陸上養殖の実証から、西条産業情報センターを通して、特許を 6 件公開しました。

排熱と水素吸蔵合金の反応熱だけを使う冷水製造では、通常の電気式チラーを利用した場合に比べて、80% 以上の省エネ効果、CO₂ 削減効果があることも実証しました。

本当は、この世界初の実証をさらに発展させたかったのですが、残念ながら、昨年、西条市長が代わった途端にすべて実証施設は閉鎖、廃棄になってしまいました。

しかし、排熱があふれている京浜工業地帯やその他の地域でこの技術は使えます。ご興味ある方はご連絡下さい。

水素が地方の産業と経済を活性化—地方創生に貢献

愛媛県西条市でなぜこのような実証をやるようになったのでしょうか。2000 年ごろに当時の伊藤宏太郎前西条市長とお会いました。伊藤前市長が、「大企業を招致して大きなコンビナートを造ったが、すべて撤退してしまった。税金もない。雇用もない。どうしたらいいものか」と言うご相談がありました。

「ここには美味しいうちぬきという地下水が豊富にあるのだから、水素冷凍技術で、ここに大食料倉庫を造りませんか」と提案しました。すかさず市長は、「分かった。じゃあ、ここで地元産の野菜を加工、貯蔵して、これを関西に出そう」という食料コンビナート構想ができました。

このようにして10年以上にわたり西条市の農業、産業育成にご協力してきましたが、2014年には、経団連から未来都市モデルプロジェクト実証地域、農林水産省からは西条農業革新都市総合特区の指定を受けて、全く新しい動きに発展しています。

水素がきっかけで、農業関係の活動が活発になったのは非常にうれしいことです。特に食品関係は、とても大事なものです。

おわりに

雑多なお話をしましたが、日本のエネルギー政策は大きな分岐点にあると思います。再生可能エネルギーや水素エ

ネルギーが普及するまでは、クリーン火力を積極的に利用すべきです。そしてCO₂を新たな炭素源として、新材料や新商品の開発を行ってください。また、海外に日本のクリーン火力発電技術を輸出すべきです。

勤務先の大学では定年を迎えましたので、研究生活から抜けながら、現在は、川崎市の溝の口にあるかながわサイエンスパーク（KSP）の経営、管理に精力を注いでいます。全国の大学発ベンチャー支援プロモータ、ベンチャー起業投資事業、起業家育成教育などを行っています。KSPには約120社の研究開発企業が入居しています。70社が大手企業、50社がベンチャー企業です。5,300人ほどの人たちが日々活躍しています。ホテル、レストラン、コンビニ、銀行、郵便局、医療クリニックなどを備える小さなタウンで、地元地域との交流も盛んです。溝の口の駅からは無料シャトルバスを運行していますので、ぜひ一度お出掛けください。

ご清聴どうもありがとうございました。

図面一覧

東京電力福島第一原子力発電所では何が起きたのか => 未解明のまま再稼働へ

東京電力福島第一原子力発電所
国会事故調査委員会
黒川 清 委員長
元東海大学医学部長
政策大学院大学 教授
・国会事故調の報告結果に関する
検討を国会が無視している
・責任の所在を明確にしない政府
・日本は先進国といえるか？

福島原発事故独立検証委員会
(民間事故調査委員会)
故 北澤 宏一 委員長
東京都市大学 学長
・原発は人類・社会にリスクが大き
すぎる
・原発事故が引き起こした環境破壊
は容易に修復できない

UCHIDA Hydrogen & Eco Technology Lab
TOKAI UNIVERSITY
EDUCATIONAL SYSTEM

図 1

原子力工学=原発ではない

- ・「原子力=原子の力」を利用する技術
- ・不安定な原子構造からより安定した原子構造に変化しようとする際に、**粒子または電磁波の形で放出されるのが放射線**

- 1) 電磁放射線 X線 ガンマ線
- 2) 粒子放射線 アルファ線 ベータ線 中性子線

<利用技術>

- 1) 発電(ウランの核分裂)=原子力発電(原発)
核兵器(高濃縮ウラン)
- 2) 医療・農業・工業・産業に利用
- 3) 宇宙開発における放射線防御

UCHIDA Hydrogen & Eco Technology Lab
TOKAI UNIVERSITY
EDUCATIONAL SYSTEM

図 2

日本の電源構成 (経済産業省2013)

UCHIDA Hydrogen & Eco Technology Lab
TOKAI UNIVERSITY
EDUCATIONAL SYSTEM

図 3

安価、安定輸入できる石炭
天然ガス価格も個別価格へ

Changes in fuel prices in Japan

UCHIDA Hydrogen & Eco Technology Lab
TOKAI UNIVERSITY
EDUCATIONAL SYSTEM

図 4

長期間で気温変化をみれば

図3.2 木の年輪から推定した800~2000年までの気温変化(現在の気温からの差)。1000年の頃の中世温暖期、1800年頃からの氷河期後の回復が示されている(Moberg 他, 2005年)。

中島裕久
2008

UCHIDA Hydrogen & Eco Technology Lab
TOKAI UNIVERSITY
EDUCATIONAL SYSTEM

図 5

宇宙線、太陽磁場、雲量の関係

Der Spiegel 06 February 2012

UCHIDA Hydrogen & Eco Technology Lab
TOKAI UNIVERSITY
EDUCATIONAL SYSTEM

図 6

図 7

神奈川県:水力発電設備容量が国内最大 再生可能エネルギー発電容量=1.2GW超

図 8

2つの使い方

1. 水素を消費する使い方<創エネ>

> 燃料電池(FC) エネファーム・燃料電池自動車
> ロケットエンジン など

2. 水素を消費しない使い方

水素を繰り返し利用する<省エネ・蓄エネ>

> 水素吸蔵合金を利用
> 排熱、電気、不安定な再生可能エネルギー貯蔵
> 水素吸蔵合金+排熱利用を組み合わせると
冷水製造・冷凍技術 => 農業・水産業へ

UCHIDA Hydrogen & Eco Technology Lab
TOKAI UNIVERSITY EDUCATIONAL SYSTEM

図 9

HONDA太陽・水素ステーション 燃料電池自動車は発電機にもなる！

図 10

日本初の商用マルチステーション 神奈川県海老名市 ENEOS 19th Apr 2013

図 11

燃料電池自動車と電気自動車

燃料供給時間と売値

電機自動車: 30 min で数百円

燃料電池自動車: 3 min で6千円

⇔ ガソリンステーションレベル

図 12

電気と水素で再生可能エネルギー貯蔵

図 13

風力・太陽エネルギーを水素として 貯蔵するシステム(80年代から実証中)

図 14

ナノ化水素吸蔵合金による水素貯蔵 反応が速く安いFeTi合金

種類	高圧ボンベ	ナノ化TiFe系水素吸蔵合金タンク
外形	水素ガス 長さ: 132cm 直径: 23.2cm	長さ: 174cm 直径: 16.5cm ボンベサイズと同等に小さくした構造
水素貯蔵量 (L)	7000L	7000L
内容積 (L)	47L	28L
圧力 (気圧)	14.7気圧	10気圧
重量 (kg)	53kg	140kg (合金: 62kg)
		12000L 47L 10気圧 200kg (合金: 107kg)

※重量はタンク素材など条件次第で、軽量化が可能。

那須電機鉄工株式会社提供

図 15

図 16

図 17

図 18

水素と排熱を利用した冷水製造・冷凍システム

図 19

図 20

図 21

サツキマスの孵化、養殖、変態

図 22