＜「第３回バイオマスエネルギー研究会」講演録＞

化石燃料の大量消費と環境問題を解決するためのエネルギーキャリア戦略

― 水素社会の実現をめざして！

大阪大学機械工学専攻燃焼工学研究室教授

赤松史光

菅総理は、昨年 11 月に、G20 サミットで、2050 年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロとする目標を示しましたが、今日は、それに向けてどのような研究が進んでいるかを、お話させていただきます。

京都市は、先進的な取り組みをしていいまして、家庭での使用済てんぷら油などの廃食油からバイオディーゼル燃料を製造し、ごみ収集車や市バスの燃料にしています。その技術検討会に参加されていた京都大学の塩路昌宏教授は、私が参加している「バイオマスエネルギー利用研究会」の会長です。

私たちが利用しているエネルギーの約 9 割は、石油、天然ガス、石炭などの化石燃料を、燃焼させることによって生み出されています。しかしながら、近年、化石燃料の大量消費により、地球温暖化など地球規模の環境問題が起こっています。この問題を解決するために、太陽光、や風力などの再生可能な自然エネルギーを用いて、化石燃料を代替するエネルギーキャリアを構築するための研究開発が、大型国家プロジェクト（SIP）として進められています。

今日は、化石燃料の大量消費と環境問題を解決するための、エネルギーキャリア戦略について、最新の研究成果を紹介しながら説明させていただきます。

大阪大学燃焼工学研究室の研究内容

私は燃焼工学を研究していまして、図 1 は、私の燃焼工学研究室の研究内容を、簡潔に表したものです。研究室では、「次世代新エネルギーに関する研究」として、水素、アンモニア、バイオマスの燃焼研究をしています。

2013 年から 2018 年までは、内閣府の SIT（次世代パワーエレクトロニクス）において研究に取り組みました。また、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）で、新エネルギー開発の研究をしています。そこの特任研究員は元企業におられた方がほとんどで、私は主に実験を担当しています。

従来、エネルギーは、化石燃料や天然ガス、重油を燃やしてつくってきましたが、水素、アンモニアなどの再生可能エネルギーでつくることをめざしています。水を電気分解して水素をつくり、空気中の窒素と化合させるとアンモニアになります。炭素が入ってないカーボンフリーのアンモニアを、直接、利用する研究も行っています。

水素は、化石燃料に比べて燃焼性が高く、速く燃えますが、爆発の危険性があるという問題があります。それに対してアンモニアは、化石燃料に比べて燃焼が低く、なかなか燃えないと

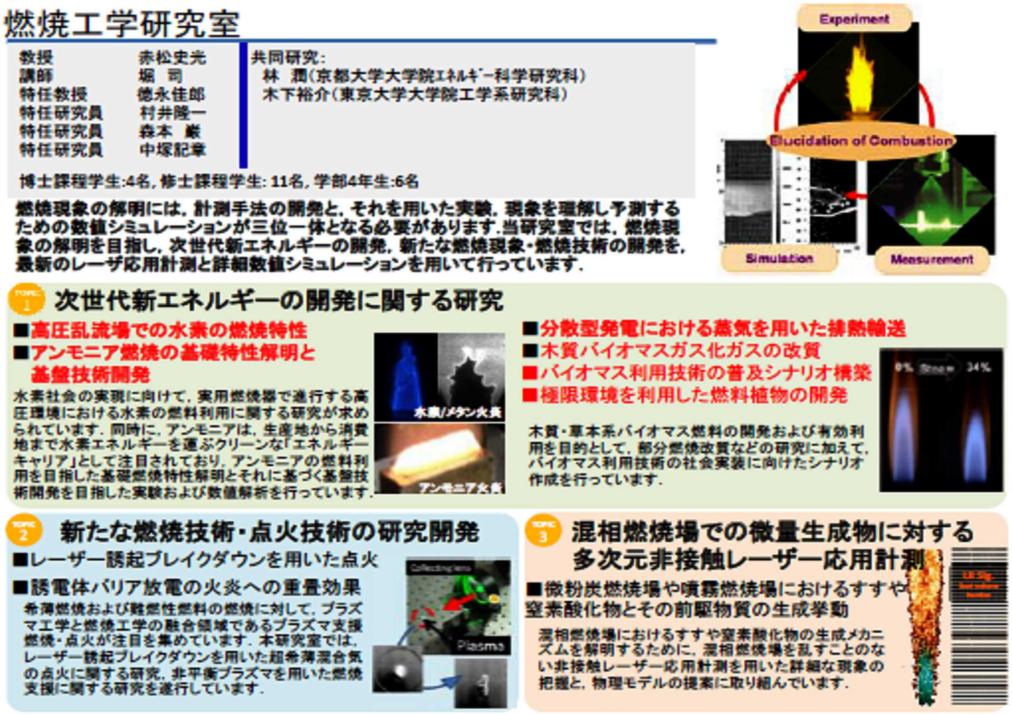

図１　大阪大学燃焼工学研究室の研究内容

いう特性があります。アンモニアは、燃料としての認知度が低いのですが、じつは、航空宇宙分野、とくに宇宙機器の推進機、スラスターの燃料として使われています。

アンモニア燃料の開発は、現在の化学工業において窒素化合物合成の基本的製法になっている「ハーバー・ボッシュ法」から始まります。鉄を主体とした触媒上で水素と窒素を高温・高圧で直接反応させ、化学反応によってアンモニアを生産する方法で、ヒトラーが第２次世界大戦で戦線を拡大したとき、あらゆる国から石油をカットされたために開発されました。

アンモニアは、燃料として良好な特性がありますが、NOx（窒素酸化物）の生成が問題となり、一般燃料としては使われなくなりました。しかし、カーボンフリーが重要になっている今は、日本でも注目が集まり、世界中でアンモニアを燃料として使うプロジェクトが広がっています。

日本は、今、原子力発電所が止まっているので、92 %くらいを化石燃料からエネルギーを得ています。私が学生を終えた頃は、化石燃料の NOx や PM（粒子状物質）、CO_2 が問題となり、化石燃料はともかくやめないといけないということで、燃料電池が開発されていきました。しかし、今、9 割を占める化石燃料をいきなりやめるのは難しい。水素を燃料電池にするときには、99.9 %という純度の高い水素が必要になります。しかし、燃焼で使用する場合は、不純物が混じっていてもまったく問題なく燃えます。そこで、水素やアンモニアを、現在のエネルギー機器、燃料機器に直接、供給してしまえば、カーボンフリーの再生可能エネルギーになるという考え方が出てきています。

化石燃料による環境問題

化石燃料を燃焼させることで、さまざまな環境問題が起こっています。図２は、それを表したものです。

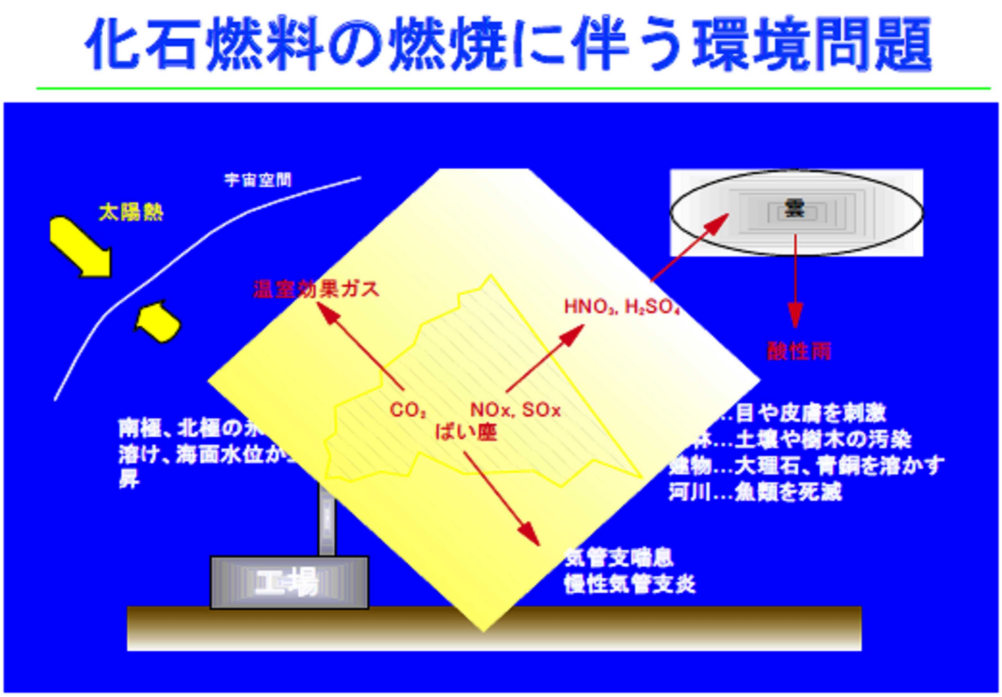

図 2　化石燃料の燃焼に伴う環境問題

2015 年の国連サミットで採択された“SDGs（持続可能な開発目標）”17 のなかには、エネルギーに関する 2 つの目標が入っています。その 1 つは「エネルギーをみんなに、そしてクリーンに」（7 番）、2 つめは「気候変動に具体的な対策を」（13 番）です。

イギリスで産業革命が起こった頃は、二酸化炭素濃度が 280 PPM だったそうです。南極、北極の氷を X 線で分析すると、こういう値が出るそうですが、今は 400 PPM を超える状況にきています。大気中では、CO_2 の濃度だけが上がっています。CO_2 は、太陽光で地表が暖められ、固体輻射する時、地球から出ていく赤外線を吸収するという特性があり、これが温暖化の原因だとされています。

地球の平均気温が 2 ℃上がると、海洋に溶けている CO_2 が、炭酸飲料の泡のように出てきます。さらに永久凍土が溶けると、土の中で凍っている天然ガスが出てきます。その量は、二酸化炭素による温暖化効果の 25 倍もあるとされています。また、新型コロナ感染症でパンデミックが起きていますが、これも、永久凍土に閉じ込められていたウイルスが、永久凍土が溶けたことによって地表に出てきたのではないかともいわれています。このように、別の観点からも地球温暖化を防止する必要が生まれています。

また、地球の平均気温が上がったことで、北極、南極圏に留まっていた寒気が蛇行し、それによって局地的に大雪が降ったり、冬が暖かかったり、乾燥している地域に雨が降ったり、今まで雨が降っていたところが乾燥したりと、地球規模の環境変動が起こっています。最近では、ゲリラ豪雨や大型の台風、アメリカではハリケーンによって、壊滅的な状態になっています。災害が起これば、莫大な復興事業費が必要になります。事前に地球の気候変動を止めていくことは、経済的にも合理性があることになります。

2015 年のパリ協定（COP 21）では、「2030 年までに 2013 年ベースで 26 %削減、2050 年までに 2013 年ベースで 80 %削減」という目標が掲げられました。この協定は、アメリカの再批准で流れが加速化しています。パリ協定では 2013 年度ベースで 80 %削減としていたのを、「カーボンニュートラル」ということで、2050

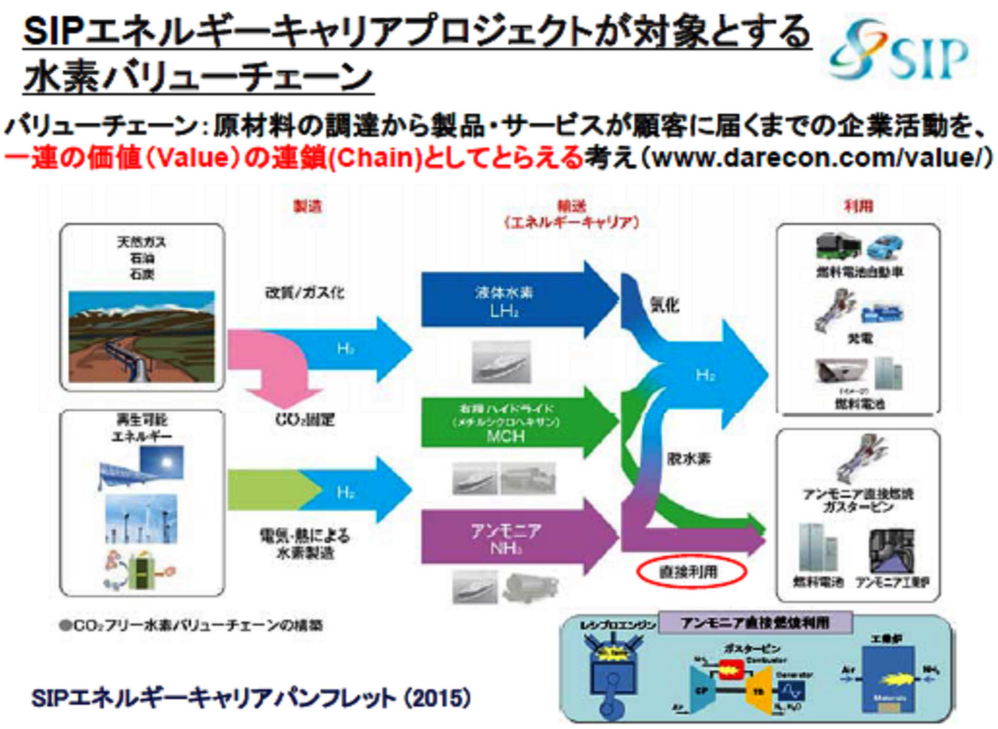

図３　SIP エネルギーキャリアプロジェクトが対象とする水素バリューチェーン

年以降は、二酸化炭素の大気中の濃度が増えないレベルまでもっていくことになっています。

ペットボトルの水は、500 ℓで 150 円です。ところが、ガソリンは、その２分の１の価格です。産油国からタンカーで持ってきて精製し、ガソリンスタントまで運んでも、そこまで安い。もとの価格はほぼタダです。それでもエネルギービジネスとして成り立っています。化石燃料の価格の８割は、産油国に落ちます。ところが再生可能エネルギーを使って自らエネルギーを創生する、つまり、化石燃料のバリューチェーンから再生可能エネルギーに変えると、今のビジネス構造は大きく変わります。イノベーションをともない、パラダイムチェンジを起こして、まったく新しい形の社会をつくっていくことになります。

化石燃料に変わる水素の可能性

図３は、SIP エネルギーキャリアプロジェクトが対象とする「水素バリューチェーン」です。「バリューチェーン」とは、原材料の調達から製品・サービスが顧客に届くまでの企業活動を、一連の価値（Value）の連鎖(Chain)としてとらえる考え方です。

「水素社会」という言葉は、実現性がないものだと考えられてきました。日本では、液体水素を船で運搬してこなければなりませんが、ヨーロッパでは、天然ガスのパイプラインが何万 Km も走っていて、そこに 40 %の水素を注入し従来の燃焼機器で用いています。世界的には再生可能エネルギーを使ったビジネスへの転換が進んでいます。

褐炭から液体水素に

日本では、川崎重工が、2019 年に、オーストラリアの品質の悪い褐炭から液化水素を作り、それを運ぶ船を、2019 年に完成させました。これは、CO_2 だけの問題ではなく、ホルムズ海峡などの政情不安な中東から化石燃料を輸入するというリスクを避けることができ、日本のエネルギーのセキュリティを上げて、安定的なエ

ネルギー供給のルートができることになります。

川崎重工のプロジェクトは、オーストラリアのラトロブバレーでとれる若い石炭、褐炭を水素にしようというものです。ラトロブバレーには、日本の240年分の褐炭があるそうです。

褐炭を海上輸送すると、自然発火したり、重量の半分が水や灰だったりするので、そのままでは海外に輸出できません。品質の悪い石炭を水素にする過程で出てくる CO_2 は、あまりとれなくなった油田に注入すると油田の圧が上がり、油田を復活させることができます。二酸化炭素を貯留するだけだと、お金だけがかかりますが、油田を復活させると、そこに付加価値が生まれます。CCS（二酸化炭素回収・貯留技術）アンド CCUS（分離・貯留した CO_2 を有効利用する技術）として利活用するところまで含めると、オーストラリアも、ビジネスとして成立します。

水素発電の可能性

三菱重工の50万KWガスタービンシステムでは、天然ガスを燃料に用いていますが、その発熱量の40％を水素で代替するという、NEDOのプロジェクトに、2年前から取り組みました。

また、再生可能エネルギーを100％有効利用するためには、再生可能エネルギーの供給が減った時に、急速にその代替となる発電が必要なため、現在、三菱重工とやっているNEDOのプロジェクトで、止めている50万KWの発電システムを、一気に50万KWまで上げ、さらに、一気に10万KWまで落とすという負荷変動の実験をしています。

海外では、再生可能エネルギーを100％使い、減った時にはそれを補うために一気に発電し、増えて来たときには一気に下げるという発電システムを開発し、利益を得る企業がたくさん出てきています。世界では、1秒間に何万KWを変えられるかで、高額の利益を得るビジネスが出てきています。常に待機しておいて、必要なときに発電し、再生可能エネルギーの電気をサポートする。

技術革新や経済効果を生む、水素のバリューチェーン

CO_2 削減だけではなく、化石燃料のバリューチェーンから水素のバリューチェーンになることで、技術革新や経済効果も生まれてきます。

今の水素は「グレー水素」と呼ばれていて、化石燃料起源の水素がほとんどです。これを、CCSをともなった技術を用いて、製造過程で二酸化炭素を出さない水素を「ブルー水素」といいます。最終的にめざしているのは、安価な再生可能エネルギーの電気を使って、水を電気分解してつくる「グリーン水素」に展開していこうということです。

「夢」の未来エネルギー

世界的に人口増加が見込まれています。また、発展途上国が工業化すれば、先進国と同じようにエネルギーを大量消費することになります。このままエネルギーを化石燃料だけに頼っていては、エネルギー危機がやってくるといわれています。石油の確認埋蔵量は、富士山の体積分だけだそうです。地球全体で富士山の体積分の化石燃料しかない。今後、世界のエネルギーデマンドが上がっていくことを考えると、化石燃料だけに頼っていくことは現実的ではないということで、さまざまなエネルギー研究がされています。

サハラ砂漠の3分の1の面積に、現在の太陽光パネルを敷きつめると、世界のエネルギーデマンドが賄えるとされています。地球全体でみると、無限の太陽光エネルギーが降り注がれています。風力であれば、チリのパタゴニア地方は、風速20 m/s、30 m/sの風が、毎日、同じ方向に吹いています。関西電力の電気代は、1 kwhで25円程度ですが、パタゴニアは1 kwhで1円を切るシステムの発電ができています。北極圏や南極圏では、強い風が吹いています。

世界中の風力を電力に変えると、日本の使用電力の８倍を発電できるといわれていて、これから考えても再生可能エネルギーは、非常に可能性があることになります。ただ人口密集地帯から離れたところに、再生可能エネルギーが豊富なところがあるので、エネルギーを輸送できる技術が必要です。そのため、水を電気分解して水素をつくることが注目されています。

今の交流送電技術だと数百kmが限界ですが、短距離であれば直流で送ることもできます。パソコンは交流から直流に変換して使っているものも多いので、少し街から離れたところに大きい発電所をつくっても、直流で送電できます。

強い太陽光が照りつける赤道直下の砂漠地帯では太陽光発電を、強い風が吹き付けるパタゴニアや南極、北極などでは風力発電をするというように、いろいろなところに、再生可能エネルギーである太陽光や風力で発電して、オンサイトで消費する。余った再生可能エネルギーは、水素やアンモニアで蓄えるという実証試験も進んでいます。福島にある再生可能エネルギーセンターでは、太陽光を太陽の方向に向かって自動的に角度を調整したり、風力であれば、レーダーでどういう風が吹くかを見極め、その風に向けて風車の向きや羽根の角度を変えたりする実験を行っています。

再生可能エネルギー起源の電気は、大量に使っても問題はないので、節電しなくてもいい。将来的には、スマートフォンのように、再生可能エネルギー起源の電気をどれだけ使っても、1 か月の定額料金という契約になっていくのではないでしょうか。

再生可能エネルギーで余った電気は、水素に変えて、それがたりないときは、急速に起動できる発電システムが補うという、今とはまったく違う送電形態になるといわれています。再生可能エネルギー起源の電気が余ったときは、家庭でもリチウム電池に充電しておくことができます。

未来エネルギーの一端を担うアンモニア

図４は、大阪大学に設置されている、アンモニア実験装置の概要です。

図４　大阪大学に設置されているアンモニア実験装置の概要

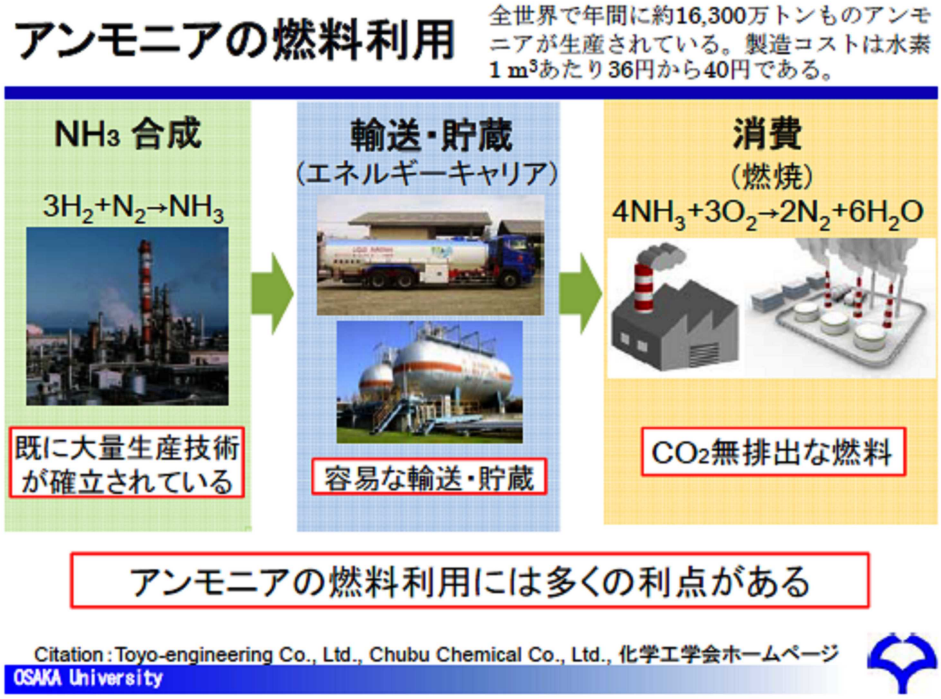

図 5　アンモニアの燃焼利用

大阪大学では、アンモニアを加熱金属の焼き入れをしたり、残余エネルギーをとったりするための熱処理に使っています。

アンモニアの燃焼による NOx の懸念を払拭

アンモニアは、燃焼させると NOx が出るということで懸念されていましたが、それを減らす技術開発を行いました。大陽日酸との共同研究で、NOx の発生を環境基準値以下まで抑制すると同時に、火炎の伝熱を強化する「アンモニア燃焼技術」の開発に成功しました。

石炭を燃料に使う火力発電所では、燃焼機器の下流にアンモニアを注入して出てきた窒素酸化物を、アンモニアで還元するということをやっています。これを、下流に少しだけアンモニアを入れるのではなく、燃焼機器の頭から入れて発熱量をとったうえで、下流に少しだけアンモニアを残せば、下流に少しだけ入れるのと同じことができるようになりました。

また、元日本燃料学会の会長の小林秀昭先生が、100kw の炉で、管の中心からアンモニアを出し、端の方から空気を出して燃やすという二段燃焼で、NOx をゼロにできることを実証しました。アンモニアは、直接、燃料電池の原料にもなります。燃料電池はハイテクではないので、現在の燃焼電池を少し改造するだけでアンモニアを使えます。高度な技術は必要ないということです。

アンモニアを燃やすとオレンジ色の炎が出てくるので、オリンピックの聖火にどうかとの提案があったのですが、オリンピックは、アメリカの GE がメインスポンサーなので、日本ではできませんでした。石炭と一緒にアンモニアを燃やすと、石炭は C の固まりなので、単位電力あたりの二酸化炭素排出量が多い。アンモニアはカーボンフリーです。

図 5 は、アンモニアの燃料利用の行程を表したものです。

アンモニアの場合は 1000 万 t くらいが、すでに化学原料として輸送されています。アンモニアは－ 33 ℃で液化するので、LPG 船というタンカーでそのまま輸送できます。今は化学原料に限定されていますが、現在の技術で大量輸送、大量製造でき、1000 倍から 1 万倍に量産

して輸送すれば、十分、化石燃料に代われます。ただ、価格が高いので、アンモニアを使うことによって CO_2 を削減するという強いインセンティブが働かないと、実現できそうにないといわれています。

しかし、北アメリカは、アンモニアのパイプラインが何千 Km も敷かれています。農地に、アンモニアを液のそのまま土に入れています。また、アメリカの農家は、アンモニアを燃料にしてトラクターを動かしたり、農業機器を動かしたりして、カーボンフリーの農業をしている人たちがいます。

日本では、1 億 4000 万トンくらいを船で輸送してきています。化石燃料に次いで、世界でダントツの輸送量です。これを、今の 1000 倍から 1 万倍のスケールで輸送できれば、十分、化石燃料に代替できるといわれています。アンモニアを、直接、燃焼として使えることが実証できたため、今は、直接、燃焼利用する方向に進んでいます。日本の「本丸」である、川崎重工の液体水素は、2030 年までにはできないので、最近は、商社や、サウジアラムコという石油メジャーが、アンモニアを輸送してビジネスにしようとしています。

最近、中部電力の碧南火力発電所（発電容量 100 万 KW）に、10 %のアンモニアを入れようと、NEDO のプロジェクトで検証しています。ただ問題は、メタンやプロパンという化石燃料に対して、アンモニアは燃焼速度が極端に遅い。燃焼速度は、火炎が 1 秒後にどれくらい広がるかでわかりますが、メタンやプロパンは半径が 40cm です。アンモニアは 7cm しか広がらない。水素は 3 m に広がります。燃焼が遅いアンモニアをどう使うかということで、工業炉で使うことを考えました。

活用が見込まれる工業炉でのアンモニア利用

図 6 は、研究室での、工業炉技術の研究体制

図 6　アンモニアを用いた工業炉技術の研究体制

を表したものです。

工業炉でアンモニアを使うと、いろいろな効果が生まれます。その一つは、煤が出ない効果。加熱対象のものに黒い煤がつかない。アンモニアの場合は煤が出ないので、加熱対象の酸化も防ぎながら加熱できるという特徴があります。日清精工という車のボディをつくる会社では、薄い鋼板をつくるためにローラーで圧延をするのですが、その時に潤滑油が必要です。その油がついた板を、従来は酸とかアルカリで洗浄していましたが、アンモニアの炎で、表面を酸化させないで油をとる技術開発をしています。

低炭素化に向けての波及効果が大きい アンモニアの直接燃焼技術

アンモニアを使うことによって、燃料を少ない空気で燃やせば燃やすほど、エネルギーの利用効率は上がるため、今、NEDO プロジェクトに、工業炉の燃料をアンモニアにするための実証事件を申請しています。また、「グリーンアンモニアコンソーシアム」という企業連合ができていて、政府に働きかけています。日本の企業だけでなく、サウジアラビアの石油メジャーも入っています。ノルウェーのヤラ・インターナショナルという再生可能エネルギーでアンモニアをつくる企業も入っています。さらに日本の三井物産、三菱商事、丸紅も入り、すでにビジネスチャンスであると認識されています。

アンモニア（NH_3）は、化学原料、肥料にとどまらず、CO_2 フリー燃料としての将来性が顕著です。また、アンモニア燃焼技術の適用により、エネルギー源の低炭素化を促進し、再生可能エネルギー起源であるアンモニアによる、トータルエネルギーシステムも構築できます。

SIP エネルギーキャリアプロジェクトによる、アンモニアを用いた工業炉をはじめとする直接燃焼技術は、幅広いエネルギーシステムの低炭素化に向けて、波及効果が大きいと考えています。