

水素エネルギーの世紀

— 21世紀への展望 —

真 柄 欽 次

プロローグ

はじめに

1. 水素エネルギー時代への展望
2. 水素を作り、貯蔵し、輸送する
3. 水素は安全か？
4. 燃料電池による発電
5. 排出権取引の問題点
6. 水素時代の到来までに何が必要か？

おわりに

プロローグ

「行動には常にリスクとコストを伴うが、安易な不活動を楽しんだ後の報いとしての、より長期的なリスクともっと大きなコストに比べれば、取るに足るものではない」
(There are risks and costs to a program of action, but they are far less than the long-range risks and costs of comfortable inaction)

元アメリカ合衆国大統領、ジョン・F・ケネディー
(Former President of the United States, John F. Kennedy)

はじめに

国連環境計画 (UNEP) と世界気象機関 (WMO) 共催による気候変動に関する政府間パネル (IPCC, 2001) により、「過去50年間に観測された地球温暖化現象は人間の活動に原因するものであるという、新しく、かつ、より強力な証拠が存在する」との報告がなされた¹⁾。化石燃料の使用により、大気中の二酸化炭素 (CO₂) 量は2000年における360ppmから、2100年には650~970ppmに増加し、6種類の温暖化ガス (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆) のうち二酸化炭素による影響は現在の約50%から75%に増加するものと見られる。

次の100年間に、平均気温は過去100年間の2倍ないし9倍の率、つまり1.4~5.8℃上昇し、海水面も9~88cm上昇すると予想される。地球の気象状態は大きく変動し、異常乾燥、熱波、豪雨、洪水、海水浸入などによって、人間社会と経済に大きな影響を与える可能性が高いと予想される。熱帯、亜熱帯、島嶼、沿岸地域に住む人達が最も重大な影響を受けるであろう。20世紀後半以後活発化してきた、この地域の沿岸地域への人口移動と人

口密度の増大は、地震や津波などの自然災害対策とそれらに伴う環境破壊に対する方策も、より困難にするものと思われる。

人類のエネルギー使用の歴史は約50万年前の火の発見に遡るが、19世紀なかばまでのエネルギー源は主に木材や乾燥した草や動物の糞によるものであった。現在、我々がバイオマスと呼んでいるこれらの物質はかさばる割に火力は強くない。バイオマスより火力のある石炭が英国で使い始められ、19世紀から20世紀初頭にかけて、一次エネルギーの主流となった。蒸気機関と言うと、まず、線路の上を走る汽車を思い浮かべるが、蒸気機関の最初の利用法は、炭鉱の坑内に溜まる水を汲み上げるためであった。

第二次世界大戦を契機として、運搬に手間取る石炭から石油へ、そして蒸気機関から、より強力な内燃機関へのシフトに伴って、20世紀半ばには石油時代に入った。鉄道輸送から、自動車や飛行機による人間と物資の移動と輸送が中心となってきた。バイオマスから石炭を通して石油に移ったエネルギー変遷の地政学的な意味は英国とドイツが19世紀に世界のリーダーになることを助け、20世紀にアメリカが世界のスーパー・パワーになる原因となった。

アメリカは石油を自動車や飛行機を動かすパワーとして、利用する方法を考え出し、大量の石油鉱床を国内で発見し続けて、石油先進国となった。石油を探索し、開発、生産することにかけてアメリカほど技術的に進んだ国はない。1960年代初頭までに、世界全体で約5万の油田が発見されていたが、そのうちの3万9000がアメリカ国内に存在したことは、この国でいかに活発な石油探索が行われたかを表している²⁾。つまり、数の上で（量ではない）世界中の油田の4分の3以上がアメリカに存在したことになる³⁾。この段階までに、アメリカ国内で350万本の石油探索井戸が掘られた。アメリカが持っている石油開発関連技術、とくに物理探査、掘削、生産、輸送に関する技術力は軍事、外交力とともに、20世紀の世界の覇者となるために、重要なものとなった。

世界の石油確認埋蔵量の3分の2以上を保有するオペック諸国のほとんどがイスラム教を信仰する国々である事実が20世紀以降の世界政治に与えた影響は大きい。1970年代の2回の石油危機、1990年代以降の湾岸危機—戦争、同時多発テロ、アフガン戦争、イラク戦争と続く、先の見えない時代の到来がエネルギー資源とくに石油、宗教、グローバル化、IT革命などの絡まりの結果、生まれたものであることは説明を待たない。

本稿では21世紀の夢である「自然エネルギーと水素」時代の中心となる「水素エネルギー」の可能性と問題点について論じ、続いて「水素時代」への移行に必要な50—100年間に人類がなすべきと考えられるいくつかの方策、例えば「排出権取引」、「天然ガスへの移行（在来型、非在来型を含む）」、「二酸化炭素の地下貯留・固定」などについて述べる。

1. 水素エネルギー時代への展望

一次エネルギー資源の変遷を炭素：水素比で表すと木材が10：1、石炭が2：1、石油が1：2となり、水素が炭素に比べて増加し続けたことが分かる。水素の増加はエネルギー効率の改善（燃焼された重量に対するエネルギー発生量の増大）をもたらすだけでなく、二酸化炭素（CO₂）やエアゾル（粉塵）の発生も少なくなる。天然ガスの炭素：水素比は1：4と、化石燃料のなかでは水素比が最高で、エネルギー効率と環境保全の点で最も優れたものである。このような歴史的な変化を将来にプロジェクトすると、天然ガスを

通過して、究極の水素時代に、いずれは突入せざるを得ないものと推定することは、当然と思われる。

アメリカ合衆国で最初に水素エネルギーの重要性を提起したのは、1970年代に、ハワイ州から選出されていた日系上院議員 S. Matsunaga (故人) であった¹⁾。Matsunaga 上院議員の考えはハワイ州議員、H. Morita 氏によって受け継がれ、2001年4月には「地熱、太陽熱、風力によって、水を分解して、水素を作り、燃料電池でバス、自動車、住宅、オフィスなどにエネルギーを提供する技術開発を始める」ために20万ドル(約2100万円)の資金を提供することが、州議会で承認されるに至った。一方、ハワイ大学へは合衆国、国防省から200万ドル(約2億1000万円)が燃料電池開発のために提供された。現在、ハワイ州は一次エネルギーの88%をアジア諸国とアラスカ州からの石油に頼っているが、Morita 氏によれば、「我々は究極的には太平洋地域諸国や日本ばかりでなく、カリフォルニア州にも余剰水素を輸出できるようになるであろう」とのことである。

現在、世界で自然エネルギー・水素エネルギー時代に向かって、最も進んでいる国は大西洋上に浮かぶ火山国、アイスランドであろう。1999年にアイスランド政府はシェル・ハイドロジェン、ダイムラー・クライスラー、ノースク・ハイドロなどの企業と共同でバスや船を水素と燃料電池で駆動するための30-40年計画を立てた。地熱と水力によって水素を作り、「北のクウェート」として、ヨーロッパ諸国に将来、水素を輸出したいとのことである。シェル・ハイドロジェン会長の Don Huberts 氏曰く、「石器時代が終わったのは、石が無くなったためではない。同様に、石油の時代も石油が無くなることで起きる訳ではない」。彼が言おうとしていることは、つまり「新エネルギーの時代は石油不足に原因するものではなく、地球環境を守るために水素と燃料電池の活用と共に訪れるであろう」ということになる。

究極的には水素エネルギー時代に、いつかは到達するとしても、当面は段階的(Incremental)脱炭素化とエネルギー効率化の努力を続けねばならない。天然ガス使用の増大、複合サイクル(Combined-cycle)とコジェネレーション(Cogeneration)発電、ガス・ツー・リキッド(Gas-to-liquid, GTL)法による液体燃料の製造、ハイブリッド(Hybrid)車への移行などが当面の問題となる。天然ガスを輸送し、貯蔵するインフラの整備の大部分は、水素時代にも使用可能と考えられる。

天然ガスについて北東アジア地域の状況を述べると、まず、中国西部タリム盆地や東シベリア地域に大きな在来型鉱床(例、コビクタ・ガス田、約30兆立方フィート)が存在するが、非在来型天然ガス資源の可能性も高い。アメリカで近年、顕著な生産増が見られる炭層ガスについては、ロシアで600~4000兆立方フィート、中国で1060~1200兆立方フィートの可採埋蔵量という評価がある³⁾。現在、アメリカで使われている炭層からのガス生産法は1)地層水を汲み上げて、炭層の圧力を下げるか、2)二酸化炭素(CO₂)を炭層に圧入し、石炭の表面に吸着しているメタン・ガスを遊離させ、生産する方法がある。特に後者はCO₂を地下に圧入し、固定するという、温暖化対策の一つとしても価値がある。

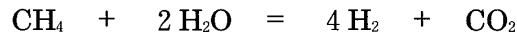
盆地中心ガス、メタン・ハイドレイト、シェール・ガス、フラクチャー・ガス等々の、他の非在来型について、北東アジア地域に関する情報はほとんどないが、広大な地域であるので、可能性はあると考える。特にメタン・ハイドレイトについては、世界の陸地全体で490~26250兆立方フィートという大きな評価値があるが、その内の大きな部分が北東ア

ジアの永久凍土下に存在するものと考えられる³⁾。

2. 水素を作り、貯蔵し、輸送する

環境にやさしい水素時代の到来を遅らせるものには、経済的理由と技術上の理由がある。第1の経済的理由としては、化石燃料の探査、開発、利用にかかわる補助金がある。少なめに見積もっても、現在、毎年3000億ドル（約32兆円）が化石燃料にかかわる補助金として使われている⁴⁾。補助金はエネルギー使用コストを実際よりも安くし、市民にエネルギーを浪費するよう仕向けていることになる。自然エネルギーなどの新しいタイプのエネルギーに対しては、特別の配慮がない限り、自力で開発努力をしなければならないので、化石燃料に比べて、コスト高となる。さらに、自然エネルギー—水素エネルギー時代に必要なインフラの建設には大きなコストがともなう。

第2の技術的な理由は「水素そのものを作り、輸送し、貯蔵する」部分と「水素エネルギーを電気や動力に変換する」部分とに分けられる。水素分子（H₂）は遊離した状態では、ほとんど存在しないが、酸素や炭素と結合させて、「水」、「化石燃料とくに石油やガスなどの炭化水素」及び「有機物（植物と動物）」の中に存在する。最も一般的で、コストのかからない水素の製造法は多くの精油所で行われている「水蒸気（H₂O）によるメタン・ガス（CH₄）の加熱法」である。化学方程式で表すと、次の様になる⁵⁾。



アメリカ、エネルギー省によると、この方法を中心として、全世界で毎年4000億立方米（石油換算約3億6000万トン）の水素が作られている。しかし、上に示す通り、この方法からは二酸化炭素（CO₂）が発生する。製造された水素はアンモニア、肥料、合成樹脂、プラスチック、溶剤、その他の工業資材、原料を作るために使われている¹⁾。

石炭をメタン・ガス化したあと、このガスから水素を取り出すことも可能である。中国は石油資源には乏しいが、石炭は世界の埋蔵量の約11%を保有しているので⁶⁾、イタリアの技術協力により、将来、この方法で水素を製造することを2000年北京で行われた世界水素会議の折に発表した。他方、バイオマス利用の場合には、一旦、バクテリアで分解させて、メタン・ガスを発生させ、燃焼により動力に変換したり、前述の水蒸気との加熱法により、水素を得ることができる。ゴミ発電はその一例である。

地球温暖化防止を考えると、風力や太陽光などの自然エネルギーを使って電気を作り、水の電気分解によって水素を得る方法がベストあり、再生可能かつ環境に最もやさしい方法となる。スタンフォード大学の Kruger⁷⁾博士によると、合衆国内にある約2億台の自動車を駆動するために、将来水素エネルギーを提供するには、アメリカ南西部のいくつかの州（ネバダ、アリゾナ、ニュー・メキシコなど）で得られる太陽熱で十分であり、もし風力を使う場合には合衆国の全風力エネルギーの約14%で足りるとのことである。

2050年の段階で、世界中の僅か0.5%の陸地面積で得られる太陽熱で、地球全体のエネルギー需要を賄うことが可能であるとの評価もある。このような評価が理由無きにあらずと、考えられる理由の一つは、過去3億年かけて、地球が蓄積した化石燃料（石炭、石油、天然ガス）から得られるエネルギーの総量は、地球が現在、太陽から受けているエネル

ギーの僅か11日半分にしか過ぎない⁸⁾ことを考えれば、理解できる。世界の開発途上国の多くが、赤道から遠くない熱帯と亜熱帯および砂漠と半乾燥地帯に存在する事実は、自然エネルギーへの移行が南北問題の解消にも役立つ可能性も秘めていることを暗示する。

水素ガスを輸送する方法としてはパイプラインが最も安全と考えられる。現在使われている天然ガス・パイプラインが使えれば、新しいインフラ投資は不要となる。しかし、水素供給をより安全なものにするためには、備蓄が欠かせないが、コストと安全性の観点から地下貯蔵がベストである⁹⁾。水素の備蓄は、(1)戦争や事故やテロ対策、(2)自然エネルギーが存在する時間帯に貯蔵し、そうでない時間帯に使用するため、に必要である。天然ガスの地下備蓄と同様の方法が考えられるが、東北日本海側に存在する枯渇油・ガス田やその他の地域の地下帯水層などが候補として考えられる。孔隙や割れ目の多い火山岩や凝灰岩なども適当な帽岩 (Cap rock) によってシールされている場合には、水素ガスの地下備蓄が可能であろう。いずれにしても新しいインフラ整備のためのコストがかかる。

3. 水素は安全か？

水素ガスの安全性の話になると、いつも1937年ニューヨーク市郊外で起きたヒンデンブルグ号の火災、墜落事件が持ち出される。このドイツ製の飛行船は水素ガスの浮力で空中に浮かび、大西洋から飛行し、着陸直前に火災を引き起こし、36名の命を奪った。水素ガスに引火、爆発した事故と一般に信じられ、それ故、「水素ガスは危険なガス」ということになっているが、アメリカ航空宇宙局 (NASA) 研究者であった B. Addison 氏によると、火災は酸化鉄とアルミニウムの混合物でできた塗料に引火したためとのことである¹⁾。この混合物は現在、ロケット燃料として使われているものに非常に似たもので、引火し易いものであるとのことである。しかし、当時のナチス・ドイツ政府はこの真実をひた隠しにし、事故を水素のせいにした。

この事件以降、水素による飛行船は作られなくなったが、不燃性のヘリウムを充填した「飛行船」は今日も存在する。長距離、かつ環境にやさしい輸送手段として、ヘリウムによる大型飛行船をドイツの企業が現在、開発中と聞く。

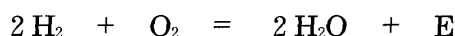
水素は可燃性であるので、他の燃料同様、空気と混ざり合えば、発火や爆発の危険性は常に存在するが、十分な注意が払われれば、安全に取り扱うことができる。水素は最も軽い元素なので、もしガスもれがあると、空気の上に流れ、上昇する。多くの石油系ガス (プロパン・ガスやガソリンから発生するガス) は空気よりも、比重が高いので、低いところに溜まり、空気と混じり、引火すると、爆発する危険性が高い。比重の軽い水素は上方に逃げるので、比較的安全である。

1994年に Sandia 国立研究所 (米国)、そして1997年に Ford 自動車会社が「水素を燃料として使い、安全に取り扱うことは可能である¹⁾」との結論を導いている。勿論、そのためには適切な技術開発がなされねばならない。

4. 燃料電池による発電

水に電流を流すと H_2O が分離して水素と酸素になる。逆に水素と酸素を送り込むと電気が発生する。つまり、燃料電池というものは「電池」ではなく、発電機である。英語名が Fuel Cell なので、燃料電池となったのであろう。空気中に酸素 (O_2) は存在するので、

水素（H₂）を送り込めば発電可能となる。この化学変化は次の化学方程式で示される（Eは発生する電気エネルギー）¹⁰⁾。



燃料電池による発電は化学反応によるものなので、排気ガスや騒音、振動がほとんどなく、大気汚染も少ない。エネルギー効率は40～60%と高く、排熱を利用すると、さらに向上できる¹¹⁾。

直接水素を利用しない場合には、メタン・ガス、メタノール、石油、ナフサなどをエネルギー源とし、水素を取り出すための改質器が必要となる。メタン・ガスの場合は上に述べた如く水蒸気と反応して、 $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$ となるが、メタノール（CH₃OH）の場合は $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} = 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$ となり、いずれにしても二酸化炭素（CO₂）が発生する。燃料電池自体は水素極と酸素極、及び電解液からなり、発生した電流（直流）はインバーターによって交流に変えられる。

燃料電池には燃焼する部分がないので、エネルギー効率が高く、冷却する必要がない。発生した熱を有効利用することにより、総合エネルギー効率を70～80%に上げることができる¹⁰⁾。さらに、回転する部分が少ないので、振動や騒音も少ない。水素を燃料として使う場合には、水を排出するだけであり、環境保護上優れた発電法である。

燃料電池の出力は電極の面積に比例するので、小型でも電極表面積を大きくすれば、出力が増大する¹⁰⁾。つまり、規模の拡大のために大型化する必要はない。先にも述べたとおり、排気ガスや振動、騒音を生じないので、大都市内に小規模発電し、近距離送電に限ることで送電ロスをもっとも最小限に止め、かつ排熱の利用も可能である。各工場内、各家庭内に必要規模に応じて、燃料電池を設置できる。小型分散化は災害対策としても優れた方法である。つまり、現在行われている大規模、長距離送電のように、災害時に全ての電力が止まる可能性が少ない。

現在、りん酸形、溶融炭酸塩形、固体電解質形、固体高分子形の4種類の燃料電池が開発されているが、すでに実用化の段階に達しているのはりん酸形である。実用化段階に達しているとは言え、世界中で数百台しか存在しない現状では、今後の技術革新に期待する部分の方が大きい。りん酸形燃料電池は燃料処理、空気供給、直流交流変換、並びに排熱回収の4つの部分からなり、通常、天然ガス、ナフサ、メタノールなどを改質器中で水蒸気と混合させて、水素を作り、使用する。

発電効率は40～60%に過ぎないが、熱再利用のコージェネレーション方式を使えば、70～80%の総合エネルギー効率が期待できる¹⁰⁾。発電容量は50～200Kw級の小規模なものが中心であり、我が国で1999年現在74台稼働している。他の3つの方式については、現在開発段階にあるので、詳述を避ける。

5. 排出権取引の問題点

二酸化炭素排出削減に具体的な方策を提言した1997年の京都での国際会議（COP₃）において明らかになった第一の点は、「化石燃料の使用が地球温暖化の主原因である」ことについては国際的なコンセンサスが得られたものの、各国独自の削減努力については経済

への悪影響への心配から積極的に政策の転換を進める意向の国は少なかった。先進国側は「経済発展の速い途上国、例えば、中国の参加なしには国際的な二酸化炭素の削減は不可能である」と言い、他方、途上国側は「現在までの地球温暖化の原因のほとんどは先進工業国によるもので、途上国がようやく経済発展と生活水準の向上を考え始めた矢先、化石燃料使用削減を迫るのはフェアではない。」との意見が出された。

表1に示す通り、アメリカの総排出量は年14.33億トンとロシア、日本、ドイツなどの先進国（年4.14～2.14億トン）と比べても、格段に大きい。一方、途上国である中国は人口の大きさもあるが、年8.46億トンとアメリカに次いで、世界第二位である。

大気中の二酸化炭素量は現在360ppm程度で、氷河期の終わり頃の値（約250ppm）よりかなり高い。現在は10年ごとに約15ppm増加している¹²⁾。上にも述べたとおり、このような二酸化炭素量の増加に伴い、2100年ごろには、地球の平均気温が数度上昇し、海水面が数十センチ上昇するであろうという予想がある。しかし、これらの予想はごく内輪のものである可能性が高い。つまり、現在の地球は直接太陽から受けたエネルギーを宇宙に放射するだけで、過熱化を緩めているばかりでなく、海流の動きによって、熱を循環している。一度、地表温度の異常が起き、蒸発や降雨のパターンが変わると、海のコンベアーベルトである海流の動きも変化する可能性がある。つまり、降雨量が増大すると、海水の比重が減少し、表層水の深部へのドライブ・メカニズムに変化が起きることにより、熱と大気中から取り込んだ二酸化炭素を深海に閉じ込める能力が落ちる可能性がある。その上、温暖化により永久凍土が溶け、その下に存在するメタン・ハイドレイトからガスが遊離したり、気象異常により森林が破壊されると、温暖化が加速する。次の数百年間に大気中の二酸化炭素濃度は4倍以上になり、気温は10～14℃上昇するという予想もある¹³⁾。海水面は約2m上昇し、土壌中の水分が激減するために農業が各地で不可能となる。

最後の氷河である Würm が凍解して以来、地表の平均気温が6～8℃上昇し、現在の地球平均気温約15℃に到達し、海水面が約100m上昇した事実を考えると、10～14℃の上昇がいかに重大な環境問題を提起するか自明のことである。

世界人口のわずか26%が住む先進国と旧ソ連諸国の国民が排出する二酸化炭素量は世界の約59%に及ぶ（1994年現在）。すなわち、74%の途上国の人達は41%の二酸化炭素を排出しているに過ぎない¹⁴⁾。だから、一人当たりの排出量となると、先進地域は途上地域の4倍以上となるので、当面途上国には排出制限を課さないという考えに理があるかに思える。

京都議定書の基本的考えは2010年における二酸化炭素排出量を1990年当時のそれに比べて数%削減しようということである。その算定基準としては1) 国ごとの人口あたり、2) 国ごとの個人所得あたり、そして3) 1990年の国ごと（人口や所得にかかわらず）の排出量などが考えられる。

- 1) 1990年に比べて2010年の人口が大きく増大した場合には、排出許容量が増加する。人口コントロールは環境保全にとって大切な要素と考えられるので、この方法は環境破壊を増長する可能性がある。
- 2) 通常、所得の向上は環境破壊を増長する。環境を無視した開発一辺倒的考えは時代遅れであると信ずる。また各国のGDPやGNPは為替レートによって変化するのので、為替レートが上がることで排出許容量が増えるのは理不尽である。

- 3) 従って、京都議定書では次の方式がとられた。つまり、人口や所得に関わり無く、国ごとの1990年排出量を元にして2010年の排出許容量を決める。しかし、1991年末に崩壊し、その後経済の大幅な縮小と低迷を経験した旧ソ連諸国にとっては、「棚ぼた」的な排出許容量（Hot air）を得ることが可能となる。すなわち、これら旧計画経済諸国の1990年代前半から2000年代初頭にかけてのCO₂排出量の減少は彼等の「努力」によるものではなく、経済の崩壊の結果、産業活動が停滞したためである。

旧ソ連諸国に比べて、例えば、資源小国日本の産業界は1970年代の石油危機にこりて、1990年までに大幅な省エネと環境改善を行った。筆者自身の評価によると、我が国の省エネと環境技術のレベルは1990年段階でG7諸国の中でもNo.1、つまり世界1であり、さらなる環境改善の余地は少ない。つまり、環境劣等生であった旧ソ連諸国がHot Airという「棚ぼた」の恩恵にあずかるのに反して、環境優等生である日本に対しては、さらなる改善を求めるというアンフェアな国際条約になる可能性がある。

しかし、COP3が日本の京都で開かれたことでもあり、かつ21世紀における世界のリーダーとしての我が国の立場を考え、かつ我が国の環境技術の高さを考えれば、目的達成のために努力することに意義があるとも言える。

表1には各国の二酸化炭素総排出量に加えて、国民一人当たりとGDP（国内総生産、百万ドル）当たりの排出量も示されている。旧ソ連諸国、例えばロシア、ウクライナなどと旧計画経済諸国、例えばポーランド、中国などの「GDP当たり排出量」は234～767トン／百万ドルと他の先進国の値（おおむね200トン／百万ドル以下）に比べて、高い。つまり、旧計画経済は自由経済に比べて、驚くほどエネルギー消費的であったことを示す。1990年代初めの経済の崩壊によって、これら旧計画経済諸国の多くは、中国を除いて、1990～96年間の二酸化炭素排出量において、多きなマイナスに転じた（表1参照）。つまり、1990年を基準とし、2010年を目標として排出量を削減する事は「努力なしで達成可能」であろう（Hot air）。このような「棚ぼた」現象に対して、経済価値が与えられる可能性のある排出権取引に問題があるとする意見に理があるように思われる。

排出権取引の他の問題点は(1)世界のほとんどの国が目標を達成したために、いずれの国も排出量を買取る必要が無くなる場合と、(2)世界のほとんどの国が目標を達成できないために、取引できるもの（排出許容量）が存在しない可能性があることである。アメリカ国内で1990年代以降実施されている、硫黄系酸化物（SO_x）の国内的な排出権取引においては、企業の努力により(1)の場合が発生し、取引なしで、排出削減を達成できたことである。しかし、アメリカの場合は排出違反には罰則が課せられるために、関連企業が積極的な改善策をとった結果であって、罰則を容易にかけられない国際関係において、排出権取引が有効であるかどうかは不明である。つまり、「国際的な排出権取引」は未だアイデアの段階にあるだけである。

6. 水素時代の到来までに何が必要か？

世界に残存する化石燃料には限りがある。しかし、もっと大切なことは、それらを使い尽くせば地球環境は修復不可能なレベルにまで悪化し、人類を含む全生態系の破壊に繋がる可能性のあることである。自然エネルギーを使って、水素を作り、エネルギー源とする

時代の到来には時間とコストがかかる。このような「夢のエネルギー時代」が到来するまでは、化石燃料の使用と、それらにかかわるインフラに頼るしかないであろう。「夢の時代」到来までの、おそらく、50～100年間、人類の為すべきことは「徹底的な省エネ」と「積極的環境政策」であろう¹⁵⁾。

大きく分けて、4つのグループの方法があり、それらはA：光合成の活性化、B：二酸化炭素を含む廃棄物質の処分、C：環境上、より優れた地下資源への変換 D：エネルギー効率改善、である。

A：光合成の活性化

A1. 植林による人工林造成

京都議定書（COP3）のメカニズム B. Clean Development¹⁵⁾に基づいて、将来、大規模植林活動が進展する可能性がある。荒れた土地に植林する事は、勿論、奨励されるべきであるが、人工林は生物の多様性の観点からは、自然林には及ばない。

過去半世紀の間に中南米で37%、アフリカで52%、アジアで42%の森林が失われ、2020年頃には世界の森林面積は陸地のわずか7分の1に減少すると予想される¹⁶⁾。半乾燥地ではしばしば行われている Agroforestry は穀物や野菜を育てるのに、強すぎる太陽光を避け、土壌からの水の蒸発を弱めるために農地に植林をし、樹木や灌木の間に作物を植える半乾燥地のための農法であるが、この方法は乾燥の激しい土地で人口林を作る方法でもある。平均湿度20-30%の土地で、従来使われていた高圧スプリンクラーを使用すると、約3分の2の灌漑水が蒸発で失われる（Texas A. & M. 大学 L. New 教授談）。灌漑水に含まれる塩類は蒸発しないので、結果として、畑に撒かれる水の塩分濃度を上昇させ、塩害の発生を早める。そのため、蒸発の少ない低圧スプリンクラーや点滴農法を Texas A.&M. 大学で開発した¹⁷⁾。これらを応用すれば、水不足の地域で植林と農業を同時に進め、地球環境改善にも貢献し得ると信ずる。

A2. 沿岸地域と海洋での光合成活性化

陸からの各種の汚染物質が海に流れ込んだり、沿岸部に工業地帯、住宅地帯、観光施設などを建設するために、大規模な環境破壊が進んでいる。被害は海岸に近いマングローブ林、やや沖合いにあるサンゴ礁だけでなく、多くの海藻や魚類を含む海の生態系全体に及んでいる。サンゴ礁やマングローブ林は海の熱帯雨林とも言われ、光合成の最も活発な生態系であり、地球環境保護にとって、大切なものである。とくに、マングローブは海水を吸収して成長する沿岸植物で、貴重なものであるが、1990年代以降、アジア途上国の外貨稼ぎの手段として的高级魚（とくに鮭とエビ）の養殖池を沿岸部に作るために大規模な伐採が進行している。世界のサンゴ礁の約80%、そしてマングローブ林の約40%が人口過密で環境破壊の進むアジアの沿岸部と海洋に存在することは、誠に皮肉なことかも知れない。つまり、これらの貴重な自然資源がもっと人口密度の低い地域に存在していたら、あるいは、地球の将来はもう少し明るかったかも知れない。

ユーラシア大陸には世界の屋根といわれるヒマラヤ山脈があり、陸地の標高差が大きい。またこの地域にはモンスーン雨が降り、台風やサイクロンによる雨水によっても、土砂が削剥され、海に運ばれる。水系面積としては世界の17%に過ぎないアジアの河川は大量の土砂と水を、汚染された混濁液として海に運び、沿岸近くで沈殿させる。その堆積物量は世界全体の量の約半分に達するといわれる。この様な膨大な量の堆積物を海岸付近でせき

とめるのに、マングローブ林と各種海藻が有効に働いている。しかし、近年の工業用地、住宅地、観光施設、養殖池の建設によるマングローブ生息地の破壊は沖合いのサンゴ礁の存在さえも危うくしている。サンゴは太陽光線を十分に受けられる水深100m以浅の暖かく、透明な海で育つ。つまり、混濁液を好まない。

一方、はるか沖合いに生息するサンゴ礁は台風やサイクロンに伴って起きる高波を弱める働きにより、沿岸部にあるマングローブを守る。結論として、マングローブ、海藻、サンゴ礁は沿岸と海洋地域で共生し、地球を守っている。

海生生物の集合体であるサンゴ礁については化学変化の状況は複雑であり、今後の基礎研究の成果が待たれる。光合成により、大気中から二酸化炭素、根や葉から水分を吸収して、炭水化物 ($C_6H_{12}O_6$) を生成し、酸素 (O_2) を放出する。サンゴ礁では、同時に石灰石 ($CaCO_3$) も生成されるが、それに伴って二酸化炭素 (CO_2) と水 (H_2O) が生成される。トータルとして、酸素の大気中への排出が多いので、サンゴ礁は海の熱帯雨林と考えられ、保護されるべき共生体と思われる。年間固定可能な炭素量は1.7トン/ヘクタールであるが、造成可能面積は1億5000万ヘクタールと評価されている¹⁸⁾。この面積はマングローブの約6000万ヘクタールの2倍以上である。

海藻の造成については、太陽光が通過し得る水深100m以浅の海域でなければならないが、どれほどの面積が地球上に存在するかは不明である。年間炭素固定量は8.7トン/ヘクタールである¹⁸⁾。地球創世の頃の海には、鉄イオンが充満していたと言われる。約40億年以前に進化した単細胞植物、ラン藻類の光合成作用により、その後、これらの鉄イオンが酸化鉄として大量に海底に沈殿し、縞状鉄鉱床となった。その結果、現在の海水は鉄イオン不足の状態にあるので、海洋に鉄分を散布することにより、海藻の生長を促し、光合成を再び活性化できるという考えがある。バハマ海域などでの実験や北海道海域での実験も報告されているが、その実効果については不明な点が多い。

B：二酸化炭素を含む廃棄物質の処分

世界の約600箇所で行われている天然ガスの備蓄に適する地下構造は「二酸化炭素の地下貯留、固定」にも適するもので、アルジェリア¹⁹⁾やノルウエーなど産油諸国の帯水層で実施されている。油田によっては、石油と共に生産される天然ガスの中に燃焼しない二酸化炭素が混合されている（随伴ガス）ため、分離後、空中に放出されるのが常であったが、近年の地球環境問題の重要性に鑑み、地下の帯水層に圧入、貯留されるようになってきた。邪魔なガスを地下に押し戻すという消極的な理由からだけでなく、アルジェリアの場合、二酸化炭素貯留によって減少する温暖化ガス排出量を将来の排出権取引で有利に使う可能性を求め、ノルウエーの場合は国策会社スタット・オイルが北海油田からの随伴ガスを閉じ込める（年間100万トン規模）ことによって、新しく国内で始まる炭素税支払いを避けることを意図している。

二酸化炭素という不燃性のガスを地下に圧入する作業はテキサス州西部とニュー・メキシコ州東部に広がる Permian 盆地の油層に対して、1972年以来行われている。Permian 盆地での目的は石油の回収率を向上させることにあった。通常、油層内にはフリーガス（主に可燃性のメタンガス）と地層水が存在するが、これら3相（ガス、石油、水）間には界面張力が働くために、石油の流動がしばしば妨げられる。簡単に言うと、メタンガスや水が石油を動きにくくする。だから、普通の状態（つまり、自噴とポンプによる一次回

取)で石油生産をするだけでは、石油の回収率はたかだか、30%である(つまり、70%は生産できない)。二酸化炭素を高圧、超臨界状態で油層に圧入すると、石油の界面張力が減少するために、15%程度の石油増産(つまり、一次回収量の約半分)が見込める。同じ方法を帯水層に行い、二酸化炭素を閉じ込めようとする試みである。

日本国内でも新潟油田地帯の関原ガス田で実験が行われている²⁰⁾。実験の目的は、(1)圧入された二酸化炭素の帯水層内での挙動を把握し、(2)帯水層ガス貯留システムの安全性を確認し、(3)その管理方法を確立することである。二酸化炭素圧入後の経時的な変化をモニターすることに主眼がおかれている。日本国内と近海地域の帯水層は、約900億トンの二酸化炭素貯留能力を持つと評価されるが、この値は火力発電機一基当たり年間約300万トンの排出量と比べても、充分大きな値である。

二酸化炭素を海底に貯留する実験が静岡大学で行われている。この場合海底のエコシステムに対する深い配慮がなされるべきであると信ずる。もう一つの可能性は深海に存在するメタンハイドレート²¹⁾ゾーンに二酸化炭素を圧入し、置換する。つまり、二酸化炭素を閉じ込めると同時に、メタンガスを回収するという、夢のような可能性であるが、アイデアの段階を出ない。

Permian 盆地の地下にはフリーな二酸化炭素ガスを含む地層が存在するので、そのガスを圧入すれば良いわけであるが、火力発電所などから排出される気体の場合は8%程度が二酸化炭素であるので(残りは窒素と水蒸気)、CO₂分離法も確立しなければならない²²⁾。

C：環境上、より優れた地下資源への変換

自然エネルギーへの変換が早急に進展しないとすれば、次善の方策として、化石燃料中最もクリーンな天然ガスをガソリンに近い液体(GTL、Gas-to-liquid)²³⁾に変換できれば、ガソリンをベースとした現在のインフラや自動車をそのまま使える。GTLとは「一酸化炭素、水素を経て液体燃料や、石油精製の間留分を合成する技術」の総称を言う²⁴⁾。1バレルのGTLを得るのに1万立方フィートの天然ガスが必要である。これは熱効率、約57%を意味するが、原料が天然ガスであるので、GTLは石油を原料とするガソリンよりクリーンである。GTL技術を開発している主要6社(おそらく、Sasol, Shell, Exxon, Mobil, BP, Syntroleum, Conoco)のプラントは十分な経済性を持っている²⁵⁾。

環境上最も優れ、かつ無限の資源供給が可能な「水素エネルギー時代」が到来するためには、ガソリン・スタンドを含む現在のインフラを、大変革しなければならないが、変革自体が環境破壊的である。現存のインフラを修復したり、新しいインフラを作るには山を削ったり、海や川を穿ったりすることによる生態系破壊が、必ず伴う。GTL法はもともと「石炭液化法」の基本であるフィッシャー・トロプシュ反応により、ガスから液体を合成する方法であり、大きなインフラ整備や環境破壊を伴わないので、今後の発展が期待される。兼子(2002)²⁵⁾によると、世界の在来型天然ガスを液化した場合、1.7兆バレル近くのGTLを製造できる。また、石炭を原料とした場合は約3.7兆バレル、非在来型メタン・ハイドレートからは、その資源のたった5%を利用しただけでも、約5.5兆バレルのGTLを製造可能とのことである。人類が今日までに発見した石油埋蔵総量が3兆バレル程度であることを考えると、これらの値がいかに大きいか判る。

上にも述べたとおり、日本からほど遠くない極東シベリア地域にはコビクタ・ガス田などの膨大な天然ガス鉱床(埋蔵量約30兆立方フィート)が発見されているが、近くに消費

地が少ないこともあって、本格的な開発段階に入っていない。天然ガス資源はコビクタ・ガス鉱床のような在来型に加えて、将来、この地域からのメタン・ハイドレイトや炭層ガスなどの非在来型の利用が考えられる。

この地域では中生代から古生代にかけての比較的古い地層中と先カンブリア紀(約6億年前)層中に大量の天然ガスと若干の石油が発見されている。筆者の考えでは、地層の古さから地質時代の過去に一旦、鉱床として成立した石油が、永い時間と地熱の影響でガス化した可能性がある。ガスは一般に上方へ逃げやすい物質で、石油であれば止めることのできる帽岩(Cap rock)さえも通りぬける可能性が高い。幸い、上方に逃げたガスの大半は永久凍土(Permafrost)に遮られて、その直下でメタン・ハイドレイト化したものと考えられる。メタン・ハイドレイトはメタンと水の分子が低温高圧下でシャーベット状態になったもので、1m³のメタン・ハイドレイト中に164m³(気体の状態で)のメタンと0.8m³の水が含まれている。つまり、ハイドレイトはエネルギー濃度の高い物質である。

パイプライン敷設に当たってはサハリン—北海道を通る北ルートと北朝鮮—韓国—山陰(ないし、北九州)の南ルートが考えられるが、本州の部分は人口密度の低い日本海側を通るべきものとする。近くに人口密集地がない方が建設コストも少なく、万一災害の場合にも被害を小さく止めることが可能である。日本海側を通過するもう一つのメリットは秋田、山形、新潟各県に数十以上の油・ガス田が存在し、それらの多くが枯渇状態に近づいているので、ガスを圧入、貯蔵することが可能である。パイプライン網の近くに備蓄地を持つことは、ガスの安定供給にとって重要なことである。ガス生産地や輸入途中地域での災害や事故(戦争とテロを含む)、夏の不需要期と冬の需要期との間の需給調整、昼と夜の供給調整などのために、国内備蓄は欠かせないものである。

備蓄に当たっては、地上にタンクを建設するよりも、地下の枯渇油・ガス層に圧入する方が、(1)安全、(2)低コスト、(3)新規投資が少なくすむという点で優れている。世界中に存在する600以上のガス地下備蓄基地の中の約4分の3が北米(アメリカとカナダ)に存在し、大半が枯渇油・ガス田の再利用である。ヨーロッパ諸国やロシア、モスクワ近郊にも備蓄基地がある。アメリカでのコスト比較によると、ガス地下貯蔵のコストは地上のガスタンク建設の10分の1以下で、しかも安全性が高い。

したがって、もし極東シベリアの天然ガスを輸入し、備蓄可能地に近い日本海沿岸を通過して、山陰から九州への輸入幹線ルートが建設され、この国内幹線から東西方向に本州横断消費パイプラインによって、太平洋側の大消費地にガスが運ばれることになれば、中東石油—辺倒の日本のエネルギー事情改善ばかりでなく、地球環境問題の改善にも貢献するであろう。輸入された天然ガスはGTLとして、ガソリン同様に車に使用するか、都市ガスとして使うことができる。現在、我が国の本州横断ガス・パイプラインは新潟—東京と新潟—仙台の2ルートしか存在しない。

D: エネルギー効率改善

D1. ハイブリッド車

ガソリン・エンジンとモーターを組み合わせ、信号待ちなどで停車(Idling)している時に空回りしているエンジンの力を使って、発電し、その電気を蓄電し、利用する「ハイブリッド車」はエネルギーの無駄を少なくして、エネルギー効率を向上させた自動車である。ハイブリッドとは「雑種」とか「混合種」という意味である。1997年以来、発売さ

れ、改良が加えられてきたが、平成13年現在7万5000台が国内に存在する²⁶⁾。トヨタ自動車(株)が2003年9月に発売した「プリウスS」の燃費は最高35.5km/lである²⁷⁾。同社は2005年には30万台のハイブリッド車を生産する予定である。

D2. マイクロ発電

20世紀初頭、アメリカでは発電の半分以上が工場などの産業施設で小規模に行われていた。発電に伴う排熱も利用された。しかし、当時の発電機は騒音を発生し、煙も出て、信頼性の低いものであったが、その後、蒸気タービン、変圧器、電流変換器などが進化したため、大規模で高効率の中央発電所が電力使用者から、どんどん遠くへ離れて行った。1970年には世界の約90%の電力は電力会社が供給するようになった。しかし、発電規模拡大は1970年代に壁にぶつかり、環境への関心、原子力発電事故、発電機の改良、エネルギー危機などの影響で規模縮小へ向かうことになった。アメリカでの1980年代半ばの平均的発電所はほぼ60万キロワットで、92年には10万キロワット、そして1998年には2万1000キロワットへと減少した²⁸⁾。今後も発電機の熱効率向上と共に、小規模化と分散化傾向が続くであろう。

おわりに

人類による地球環境破壊は約1万年前に、最後の氷河が解けたあと、農業と牧畜業を始めたときに遡ると言われる。しかし、当時の推定地球人口約550万人による環境破壊は取るに足るものではなかった。

人口増加は続き、約200年前、英国でスタートした石炭利用による産業革命は多くの地域的な環境問題を引き起こし、第一次世界大戦でピークに達した。石油の時代は1930年代以来の第二次世界大戦を契機として始まり、今日の石油、石炭、天然ガスと原子力の大量消費時代へと移行してきた。

しかし、1960年ごろ、地球人口が現在のその半分以下、つまり30億人程度に達するまでは、地球生態系が固定化できる炭素量(約30億トン/年)と人類全体による炭素排出量の間がバランスしていたものと考えられる。しかし、現在の人口は既に63億人を超え、2025年ごろには80億人以上になる予想であるで、化石エネルギー資源の使用は増えつづける見込みである。

現状を打破するには、「自然エネルギーと水素」利用の持続可能な社会を構築しなければならないが、その為のインフラ整備には時間(50~100年)とコストがかかる。中間的な環境政策として、二酸化炭素地下貯留・固定、大規模植林、Agroforestry、非在来型を含む天然ガスへの移行とガスの液化(GTL)、乗用車の燃費改善(ハイブリッド化)、マイクロ発電などが為されねばならない。GTLの原料としては、我が国からほど遠くない極東シベリアの地下に存在する在来型天然ガスや、将来的には非在来型の炭層ガスやメタン・ハイドレートが考えられる。

ガスの輸送手段としては、LNG(液化天然ガス)タンカーよりも、ガス・パイプラインの方が地球環境に優しいと考えられる。また、天然ガスのハイドレート(固体)化後の輸送コストについての評価もあり²⁹⁾、LNGに勝るとのことである。ハイドレート化するプロセスは比較的簡単で、小規模のプラントでも行える上、爆発などの危険性も低い。

表1 トップ12先進工業国と12途上国の炭素排出量 (1996年)

国名	総排出量 炭素換算 億トン/年	一人当たり 排出量 トン/年	GNP当たり 排出量 トン/百万ドル	排出量増加 1990-96年 %
(先進国)				
アメリカ	14.33	5.35	198	8.8
ロシア	4.14	2.81	627	-32.7
日本	3.08	2.44	110	12.5
ドイツ	2.41	2.94	146	-7.6
英国	1.51	2.56	132	-2.0
カナダ	1.15	3.82	180	5.3
イタリア	1.07	1.86	94	0.6
ポーランド	0.95	2.46	452	-7.1
ウクライナ	0.92	1.81	767	-55.8
フランス	0.91	1.55	74	-1.1
オーストラリア	0.87	4.70	249	9.6
スペイン	0.60	1.53	105	11.6
平均	2.66	2.82	261	
(途上国)				
中国	8.46	0.68	234	29.3
インド	2.50	0.26	184	37.6
韓国	1.04	2.27	196	82.5
南アフリカ	0.95	2.24	-	16.8
メキシコ	0.94	0.98	154	11.2
イラン	0.76	1.13	205	35.9
ブラジル	0.65	0.41	75	25.1
サウジアラビア	0.63	3.23	-	12.7
インドネシア	0.62	0.30	79	46.6
カザクスタン	0.54	3.29	1080	-33.8
台湾	0.48	2.23	-	48.2
トルコ	0.38	0.60	106	16.3
平均	1.50	1.47	257	

出所：注13) の Table 1 を修正。

注

- 1) Dunn, S. (2001) Hydrogen Futures Toward a Sustainable Energy System, *World Watch Paper* 157, World Watch Institute, Washington, D.C., USA.
- 2) Edwards, J.D. (1997) Crude oil and alternate energy production forecasts for the twenty-first century: end of the hydrocarbon era, *American Association of Petroleum Geologists Bull.*, Vol.81, No.8, pp.1292-1305.
- 3) 真柄欽次 (2004) 「21世紀世界の一次エネルギー展望と北東アジア・天然ガス資源の重要性」『北東アジア研究』(鳥根県立大学) 第7号。
- 4) Myers, N. and Kent, J.(2001) *Reverse Subsidies: How Tax Dollars Can Undercut the Environment and the Economy*, Island Press, Washington, D.C., USA.
- 5) 金子彰一 (2003) 「燃料電池は電池じゃない?」『石油開発時報』No.137、30-33頁。
- 6) 真柄欽次 (2001) 「北東アジアのエネルギーと環境問題」『レポート21-21世紀・地球公開講座から-』鳥根県立大学、165-170頁。
- 7) Kruger, P.(2000) Electric power requirements in the United States for large-scale production of hydrogen fuel, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.25, pp.1023-1033.
- 8) 真柄欽次 (2002) 「グローバル化時代のエネルギー政策」『レポート21-21世紀・地球公開講座から-』鳥根県立大学、107-116頁。
- 9) 真柄欽次 (2003) 「天然ガスの地下備蓄-21世紀日本のエネルギー安全保障と環境政策」『総合政策論叢』(鳥根県立大学) 第6号、83-92頁。
- 10) 森島宏 (2004) 「天然ガスのすべて-21世紀の主役エネルギーの最新知識-」『石油/天然ガスレビュー』(石油公団) 2004年第1-3号、114-169頁。
- 11) エネルギー環境教育情報センター (2002) 『6億人のエネルギーと地球環境』(財) 社会経済生産性本部、96頁。
- 12) Parry, M. L. et al. (1996) What is dangerous climate change?, *Science*, June 20, 1997.
- 13) Flavin, C. and Dunn, S. (1997) *Rising Sun, Gathering Winds*, World Watch Institute, Washington, D. C., USA.
- 14) 佐和隆光 (1998) 『地球温暖化を防ぐ-20世紀型経済システムの転換-』岩波書店、217頁。
- 15) 真柄欽次 (2004) 「積極的環境論 vs 消極的環境論、特に極東シベリアの天然ガス資源に視点をあてて」『北東アジア研究』(鳥根県立大学) 第8号。
- 16) JICA (2001) 『みどりの国際協力』国際協力事業団、森林・自然環境協力部、東京。
- 17) New, L. and Fipps, G. (2000) *Center Pivot Irrigation*, Texas Agricultural Extension Service, 20 p., Texas A. & M. University System, USA.
- 18) 鈴木款編 (1997) 『海洋生物と炭素循環』東京大学出版会。
- 19) 金子憲治 (2003) 「アルジェリアでCO₂地中貯留開始、三菱重工の“脱炭”事業が本格化」『日経エコロジー』2003年2月号、15頁。
- 20) 大下敏哉 (2002) 「枯渇油・ガス田の有効利用」『石油技術協会誌』第67巻、第6号、538-546頁。
- 21) 田中彰一 (2003) 「21世紀の非在来型ガス資源確保への挑戦」『石油技術協会誌』第68巻、第2・3号、149-155頁。
- 22) 飯島正樹他 (1998) 「燃焼排ガスからのCO-回収新技術と石油増進回収法への適用-」『石

- 油技術協会誌』第63巻、第6号、495-502頁。
- 23) 栗村英樹(1998)「GTL(gas-to-liquids)技術の適用性」『石油技術協会誌』第63巻、第6号、467-474頁。
- 24) 藤元薫(2001)「GTL(Gas To Liquid)技術の展望」『石油技術協会誌』第66巻、第2号、151-159頁。
- 25) 兼子弘(2002)「GTL(ガス・ツー・リキッド)の時代がやってくる」『石油開発時報』(石油鉱業連盟) No.135, 17-31頁。
- 26) 環境省編(2003)『平成15年度・環境白書』384頁。
- 27) 日経エコロジー(2003)「ハイブリッド車、注目の燃費は最高35.5km/l、プリウスは21世紀のカローラになるか」『日経エコロジー』2003年10月号、13頁。
- 28) Dunn, S. and Flavin, C. (2000)「マイクロ発電とエネルギーの未来」『地球白書2000-2001』第8章、242-275頁。
- 29) 真柄欽次(2002)「北東アジアを見据えた、今世紀日本のエネルギー政策」宇野重昭編『北東アジア研究と開発研究』国際書院、105-118頁。

付記：本論文は、平成16年度島根県立大学学術教育研究特別助成金による研究「北東アジアにおける非在来型化石燃料資源開発の可能性」並びに同平成16年度 NEAR 財団研究助成金による研究「極東シベリアの天然ガス開発と日本のエネルギー安全政策」の研究成果の一部である。両助成に対し、感謝申し上げます。

謝辞：本稿の原案を読み、多くの有益なコメントを提供された島根県立大学の赤坂一念、林秀司、林裕明の各氏に感謝申し上げます。

キーワード：水素エネルギー 燃料電池 京都議定書 排出権取引

(MAGARA Kinji)