

科学技術のあり方

～ 水素エネルギー社会構築の視点から ～

上智大学大学院 博士前期課程

理工学研究科 理工学専攻 機械工学領域

B1378466 野崎昇

【要旨】

人類は地球に存在する限りある資源を大量に消費し続けた。その結果、「化石燃料の枯渇」「地球温暖化」という自らの存続に関わる危機に直面している。そのため、人類にとって、この二つの問題を解決することは急務である。現在、これらの問題解決のための糸口として世界中で注目を浴びているものがクリーンで再生可能な水素エネルギーである。というのも、水素はCO₂を排出する化石燃料とは違い、燃料として使用しても水しか排出しない。また、排出した水を電気分解することで再び水素を製造することができるからである。しかし、水素エネルギー社会の到来にはまだまだ課題が残されている。そのため、人類はこれらの課題を解決するために様々な研究をしている。私もその課題の一つである水素脆化という現象のメカニズムを解明するために研究を行っている。しかし、研究を通して、本当に正しいことをしているのか、科学技術はどうあるべきなのかということを疑問に思った。それは今まで科学技術を発展してきたがために地球温暖化などの問題が発生したからである。しかし、今までは、人類が人類の利益のためだけに科学技術を発展させてきた。一方、水素エネルギー社会実現へ向けた科学技術の発展はこれまでとは違う。人類が人類だけのために科学技術を発展させるのではなく、地球を守るために科学技術を発展させようとしているという点に気が付いた。そして、これこそが科学技術のあり方であるという結論に達した。つまり、科学技術は地球と共存するために存在すべきということである。

1. 諸言

2013年11月5日、環境問題解決の兆しが見えた。日本の自動車会社がついに水素燃料電池自動車の試作車を発表した。水素エネルギー社会の到来を感じさせるニュースである。現在まで、人類は地球に存在する限りある資源を大量に消費し続けた。その結果、自らの存続に関わる危機に直面している。その危機というのは「化石燃料の枯渇」と「地球温暖化」である。そのため、人類にとって、この二つの問題を解決することは急務である。そして、これらの問題解決のために世界各国で研究や取り決めが行われてきた。その一つが水素エネルギーの利用である。水素エネルギー社会とは生活に必要な多くの電気を、水素エネルギーを利用してまかなう形態の社会である。水素はCO₂を排出する化石燃料とは違い、燃料として使用しても水しか排出しない。また、排出した水を電気分解¹することで水素を製造することができるので再生可能でクリーンなエネルギーである。化石燃料に限りがある現在では、この水素エネルギー社会の実現こそが「化石燃料枯渇」と「地球温暖化」解決の糸口になると考えられる。しかし、水素エネルギー社会の到来にはまだまだ課題が残されている。その課題の一つである水素脆化という現象のメカニズムを解明するのが私の研究の目的である。私は地球を救いたいという大きな志のもと研究を行っているが、ふと疑問に思ったことがある。それは、科学技術はどうあるべきなのかということである。いつの時代も科学技術は人々の生活を豊かにするために発展してきた。そして、その発展の結果「化石燃料枯渇」や「地球温暖化」という問題が起きている。私は科学技術を急速に発展させようとしている今こそ科学技術のあり方についても一度真剣に考えなくてはいけないと感じている。本論文は、現在騒がれている「化石燃料枯渇」「地球温暖化」に対して人類がどのような解決策を考え、行動しているかを述べ、そこから科学技術のあり方について考察したものである。

2. なぜ水素エネルギー社会が求められているのか

2.1 「化石燃料の枯渇」「地球温暖化」

現在地球上には様々な問題が存在するが、その中でも人類の存続に危機を与えるほどの二つの大きな問題がある。それは、「化石燃料の枯渇」と「地球温暖化」である。化石燃料である石油はあと40年、天然ガスも約60年で枯渇すると試算されている⁽¹⁾。そのため、化石燃料に頼った現在のエネルギー消費を続けていくわけにはいかず、化石燃料枯渇問題への対策は急務となっている。

化石燃料の燃焼によって排出されるCO₂も大きな問題だ。Fig.1に過去40万年分のCO₂濃度と地球の平均気温の関係を示す⁽²⁾。赤線が平均気温（右縦軸のTemperature Change

¹「水の電気分解」とは、水に対し、電圧をかけることで陰極(-)からは水素が、陽極(+)からは酸素が発生する、水の酸化還元反応のこと

が 0 の時に 10°C)、青線が平均 CO₂濃度を示している。Fig.1 に示すように、CO₂濃度と地球の平均気温は連動していることが分かる。つまり、化石燃料の燃焼により CO₂が排出され続けることで、地球温暖化がますます進んでいく。実際に近年 CO₂濃度の急激な上昇により地球の平均気温も上昇している。そのデータを Fig.2 に示す⁽³⁾。Fig.1 と Fig.2 のデータを比較すると現在いかに地球温暖化が深刻化しているかが分かる。まず、Fig.1 より過去最高で CO₂濃度は 300ppm 程度、平均気温は 13.7°Cであることが分かる（右縦軸の Temperature Change が 0 の時に 10°C）。次に、Fig.2 を見ると、ここ数年で CO₂濃度と平均気温が急激に上昇し、2000 年の時点では CO₂濃度が 390ppm、平均気温が 14.4°Cになっていることが分かる。これは、CO₂濃度と平均気温が今だかつてないほどの異常な状態であることを表している。そして、今のまま CO₂濃度が上昇していくと、2100 年には 2000 年の 2 倍以上の CO₂濃度に達する可能性があるとして IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の報告がされている⁽³⁾。その結果、今世紀末までに平均気温が最大で 6.4 度、海面水位は 59 c m 上昇する恐れがあると指摘している。オランダ、ドイツ北部、デンマーク、バングラデシュ、ベトナムなど海抜以下の地域を抱えた各国、オセアニア諸国、モルディブなどの海抜が低い島を擁する地域の中には、海面上昇が差し迫った問題となっているところもある。海面上昇により平均海面が上がると、これに準じて高潮や波浪による最大波高も上がる。このため、海面上昇によってこれらの災害の危険性が増し、被害はより内陸へと拡大する。また浸水区域の広域化を招くための防潮扉・排水ポンプの設置など、海岸沿いの地域経済及び自治体に多くの負担を強いることとなる。日本における試算例では、15cm の海面上昇につき毎年 5 兆円以上の被害が生じると予測されている⁽⁴⁾。

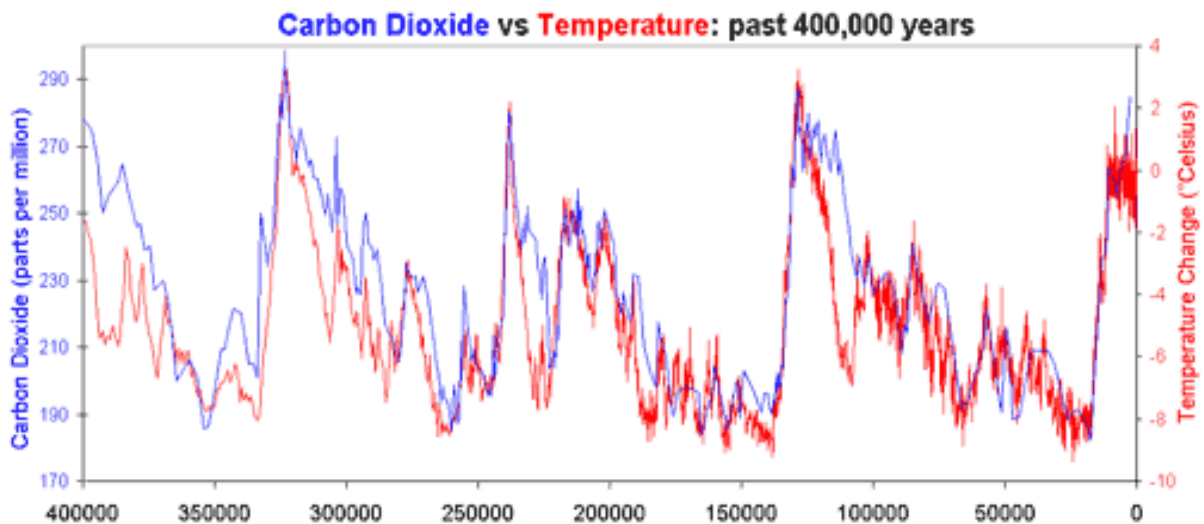


Fig.1 過去 40 万年分の CO₂ 濃度と平均気温の関係⁽²⁾

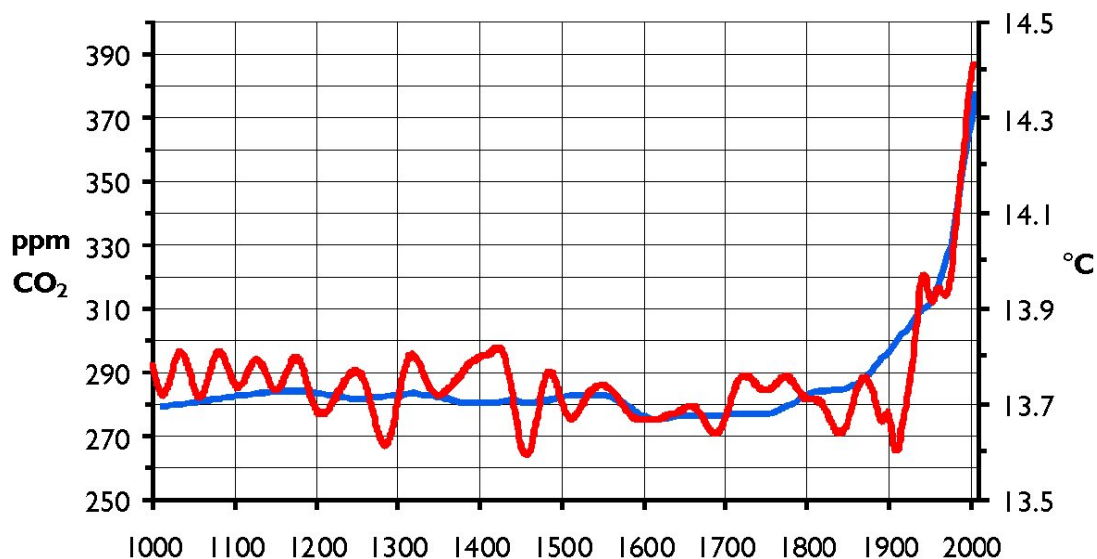


Fig.2 1000年から2000年のCO₂濃度と平均気温の関係⁽³⁾

2.2 水素エネルギー社会とは

そこで必要になってくるのが化石燃料に頼らないエネルギー社会の構築である。というのも、「化石燃料の枯渇」にせよ「地球温暖化」にせよエネルギーを化石燃料に依存していることが原因で起きている問題だからである。つまり、化石燃料に依存しないエネルギー社会の構築ができれば、これらの問題を解決することができる。そして、現実的かつ将来的に化石燃料に変わりうるポテンシャルを持つのが水素エネルギーである。

水素は酸素と反応させることで電気を作り出すことができる。そのため、水素を用いた発電をする場合、化石燃料を必要としない（ただし、現状では水素を精製する過程で化石燃料を使用している）。また、発電による排出物も水素と酸素の化学反応時に発生する水蒸気（水）のみの非常にクリーンなエネルギーである。

一方、水素エネルギー社会が望ましいと言ったが、自然エネルギーなども化石燃料を利用しないクリーンなエネルギーである。実際に、政府も太陽光発電などに力を入れていて、住宅街を歩けば屋根の上に太陽光発電機を設置している家を見つけられるほど、一般家庭にまで普及している。風力発電についても洋上風力発電²の研究など政府が力を入れて行っている⁽⁴⁾。このように、自然エネルギーもクリーンなエネルギーとして非常に注目を浴びている。しかし、自然エネルギーだけでなく、水素エネルギーにも力を入れることで大きなメリットが生まれる。

²洋上風力発電とは洋上での風力発電のこと。直接浅瀬に設置する場合と洋上に浮かんだ浮体構造物に設置する場合がある。

自然エネルギーというのは供給が非常に不安定であるという欠点がある。そのため、自然エネルギーだけでは供給不足や供給過多になる可能性がある⁽⁶⁾。そうなると、供給不足の時には各地で停電が起きる。供給過多の時は大量に発電しているにもかかわらず、過剰発電分は捨てなくてはならない。過剰発電分をどこかに蓄えておけばよいが、現在の実用的な蓄電技術では体積エネルギー密度にして 620Wh/L くらいが限界である⁽⁷⁾。体積エネルギー密度というのは電池が貯蔵できるエネルギーを、電池の体積（外装も含む）で割った値のことで、620Wh/L というのはおおよそ携帯電話に使用されている電池と同じくらいの蓄電量である。そのため、生活に使う電力を蓄えておくというのは現実的でない。

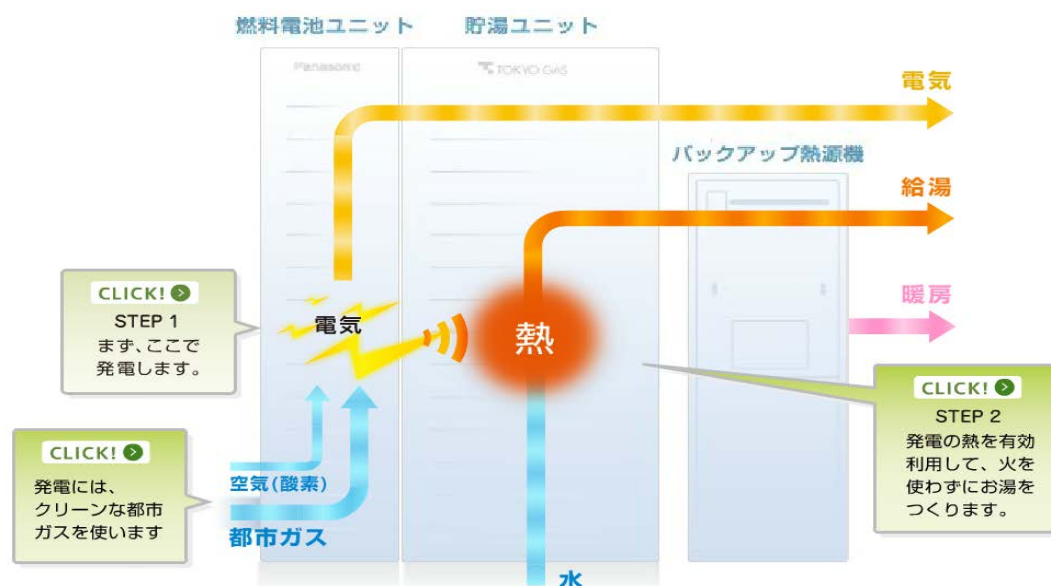
しかし、水素エネルギー社会を実現することでこの問題は解決する。水素は酸素と反応させることで電気を生み出し、水を排出する。また、逆に水を電気分解することで水素と酸素に分けることが出来る。自然エネルギーを用いて発電を行い、供給過多のときには余った電気で水素を生成し、蓄えておく。そして、供給不足になった時に、蓄えておいた水素を利用して発電を行えば、供給不足分を補うことが出来る。このように自然エネルギーから水素を生成する方法を用いれば、水素は究極のクリーンエネルギーと呼べるだろう。化石資源に頼らない水素は化石燃料問題、地球温暖化問題とも無縁の存在なのだ。

3. 水素エネルギー社会の現状

3.1 水素エネルギー社会がどこまで実現しているか

水素エネルギー社会は究極のクリーン社会であるということは分かっていたただけだろう。一方で、多くの方は“実現させるのは困難な社会”と考えているだろう。確かに、実現するまでに多くの壁があるが、既に水素燃料電池の技術も発達し、一般家庭用に販売されるまでになっている。この水素燃料電池とは、水素と酸素の電気化学反応によって電気を取り出す装置のひとつである。名前に電池とあるが、乾電池などの一次電池や鉛蓄電池などの二次電池とは異なり、反応物を供給し続ける限り、原理的には永久に発電し続けることができる。これを応用し、一般家庭向けにしたものがエネファームと水素燃料電池自動車（FCV :Fuel cell vehicle）である。

エネファームというのは家庭用の水素燃料電池で発電するシステムのことで2009年頃から一般家庭で購入することができるようになった。Fig.3 にシステムのイメージ図を示す。

Fig.3 エネファームのイメージ⁽⁸⁾

従来型の大規模発電所から一般家庭に電気を送るシステムだと、変電や送電により多くの電気を損失し、家庭に届く電気は 37%しかない⁽⁸⁾。しかし、エネファームは家庭で発電、さらに排熱も利用するため、現在、総エネルギー効率が 90%を超えるようになってきている⁽⁹⁾。一般家庭でエネファームを1年間使用すると、石油、天然ガスといった一次エネルギーの使用量を 23%削減できる。CO₂の削減量は 1,330 kg となり、全体の 38%も抑えることができる⁽¹⁰⁾。

現在、東京ガスが販売するエネファームの最新モデルで値段が 200 万円とやや高い。しかし、購入費用の一部について年度により支給額は異なるが、国による補助金の支援制度が設けられている。また、住んでいる地域によっては家庭用燃料電池購入者に対する独自の補助・支援制度が用意されている場合がある。例えば、上智大学のある千代田区でエネファームを購入する場合は、国からの補助金(45万)と千代田区からの補助金(50万円)が支給されるため約 100 万円で購入することが出来る⁽¹¹⁾。さらに、エネファームを導入した場合、当然、住んでいる地域、戸建かマンションかなどによって異なるが、一般的な家庭であれば電力全てを電気会社から購入した場合に比べ、年間約 5~6 万円の光熱費が削減できると東京ガスにより報告されている⁽⁸⁾。現状では買い替えることによる金銭的なメリットは少ないが、将来的には価格も下がり、エネファーム購入により金銭的なメリットが得られるようになるだろう。

FCV というのは燃料電池を用いて作った電力により走行する究極にクリーンな車のことで、国内 3 社(ホンダ、トヨタ、日産)、海外 7 社(メルセデス、GM など)全メーカーが足並みを揃え 2015 年に商品化されることが決定している⁽¹²⁾。基本的には電気自動車をベースにしており、燃料電池により電力をまかなう。つまり、小さな発電所を自動車に搭載

するようなイメージである点ではシリーズ式ハイブリッド車³と共通だが、内燃機関は一切搭載されない。そのため、システム規模の大小に関係なく、騒音や振動も少ないのが特徴である。現在日本のCO₂排出のうち自家用車が占める割合は全体の17%に及ぶと報告されている。そのため、FCVが一般家庭に普及することでかなりの量のCO₂排出を削減できる。

2013年の初め頃には既にFCVの販売は決定されていたが、2013年11月5日、ついにその性能が発表された。それによると、ある会社での例だが、実用航続距離は500km以上、水素充填は3分程度と従来心配されていた走行距離と充填時間の問題をしっかりと解決し、ガソリン車並みの走行距離と短時間満充填を可能にしている。さらに外部電源供給能力は、一般家庭の使用電力1週間分以上である。2015年発売時の販売価格は300~500万円と言われている⁽¹³⁾。発売初期段階でこれだけ高性能なものが300~500万円で発売されるのだから、FCVが普及する日が近づいているのを感じて頂けるだろう。

3.2 水素脆化

しかしながら、来るべき水素エネルギー社会に向けた様々な水素供給におけるインフラ整備に対する課題や問題点は、未だに多く残っている。その中で特に問題となっているのが本研究室の研究対象である金属の水素脆化現象である。水素脆化というのは金属材料に水素が侵入し著しく脆くなるという現象である。水素エネルギー社会では、水素の製造、輸送、貯蔵などを通し多くの金属が水素と触れる可能性がある。水素は非常に小さい原子で、金属に触れると容易に金属内に侵入してしまう。そして、微量であっても金属に水素が侵入してしまうと水素脆化は起きてしまう⁽¹⁴⁾。つまり水素エネルギー社会では常に水素脆化が起こりうる環境にあるということである。さらに厄介なことに、高強度材料ほど、水素による材料の強度、延性が低下する現象が顕著であることが知られている⁽¹⁵⁾。現在、人類は限りある資源を有効活用するため、材料の強度を高め、構造物に使う資源を減らしたり、材料の強度を高め軽量化することで燃費を向上させたりしている。そのため、年々高強度鋼の使用量が増えてきている。この軽量化の流れは水素エネルギー社会においても変わらないだろう。そのため、水素エネルギー社会において人々の安全を保障するために水素脆化の解決は必要不可欠である。

水素脆化の問題は1940年から認識され始め現在では世界中で研究されている。しかし、まだ統一したメカニズム解明には至っていないのが現状である。現在有力とされている説は「格子脆化説」、「水素助長局所塑性変形説 (HELP 説)」、「水素助長歪み誘起空孔説」の3つである⁽¹⁶⁾。

これらを説明する。まず一つ目の格子脆化説とは水素により、表面エネルギーを低下させる一つの要因である原子結合力の低下が起こることにより、材料が破壊しやすくなる

³シリーズ方式 (直列方式) は、エンジン (内燃機関) を発電に使用し、モーターを車軸の駆動と回生に使用するもの。

いう説である。簡単にいうと、材料というのは小さい結晶がくっつき合っていてはいるのだが、水素が入ることによりくっつく力が低下してしまうということだ。二つ目に挙げた水素助長局所塑性変形説（HELP 説）とは水素により、転位が動き易くなり、き裂先端領域のせん断変形を局所化して延性破壊を助長するという説である。簡単に言うと、材料の内部にある転位というものが動きやすいほど材料は簡単に変形する。水素がその転位を動きやすくすることで変形しやすくなり脆くなるということだ。そして、最後の水素助長歪み誘起空孔説とは水素により、塑性変形に伴う原子空孔の安定化が起き、空孔の生成と密集化を助長するという説である。簡単にいうと、水素が材料中に入ると、材料の内部がスカスカになり破断しやすくなるということだ。

本研究室において、純鉄や実用鋼である高強度鋼、ステンレス鋼において水素脆化研究を進めているが、現在のところ水素助長歪み誘起空孔説を支持する研究結果がでていない。

4 科学技術のあり方

人類は今日に至るまで人類の生活を豊かにするために科学技術を発展させ続けてきた。火の利用に始まり、現在では宇宙にまで行けるようになってきている。そして、今この瞬間も科学技術を発達させるために研究を行っている人々がいる。しかし、人類の生活を豊かにするはずの科学技術が人類の生活を脅かしていることも事実である。例えば、戦争、原発事故、森林の乱伐、環境汚染、化石燃料の枯渇、地球温暖化…など少し考えただけでもたくさん出てくる。それでは、今後、科学技術とはどうなるべきなのか。

今までの多くの科学技術の発展は人間の欲望を満たすために行われてきた。たしかに、人々の寿命は延び、食料は増え、生命的な豊かさを得たかのように思えるが、取り返しのつかないほど多くのものを犠牲にしている。そのように科学技術が発展したのは人類が人類の利益のためだけに科学技術を発展させようとしたためだろう。しかし、本論文を書いていて、人類は今までと違う方向に科学技術を発展させようとしているように感じた。自然エネルギーや水素エネルギーは確かに今の人類にとって金銭面的にも技術面においても必ずしも便利であるとは言いがたい。水素エネルギー社会が構築されても初めは問題が山積みになるだろう。しかし、今、その不便な方向に向かって科学技術を発展させようとしている。その結果、自分が生きている間は不便な可能性も十分にある。無責任なことを言ってしまうと、化石燃料はまだ残っているし、地球温暖化も自分が生きているうちはまだ平気だろうから今の生活を続けていくこともできる。しかし、多くの人々が化石燃料にエネルギーを依存している社会から脱する覚悟があり、自分が生きている間に便利な水素エネルギー社会が訪れるかは分からないのに、その方向に向かい科学技術を発展させようとしている。これこそが、科学技術の正しいあり方だと思う。科学技術は人のためであって、人だけのものではない。大規模なことをできるからこそ、使うときには細心の注意が必要だ

し、地球を含めた全生命のことを気遣う必要がある。科学技術は地球と共存するためにあるべきである。

5 最後に

なぜ人類は近年、地球を守るための科学技術を発展させるようになったのかということ
を疑問に思った。それは、テイヤールの言葉を用いて表すならば、「人間が未来に対して責
任を持つことができる存在」だからだと考えられる⁽¹⁷⁾。化石燃料枯渇問題や環境問題がテ
レビなどで多く取り上げられ、もはや知らない人はいないだろうと思われるほどに問題意
識が広がっている。そして、これらの問題が人類存続の危機に関わることも知っているだ
ろう。その結果、人類は知っているだけではなく責任感を持つようになり、節電から燃料
電池自動車開発まで規模は違えども多くの人自分なりにできることを行っている。私が
現在水素脆化のメカニズム解明のために研究を行っているのも、地球の未来に対する責任
感があるからだろう。

21世紀、科学技術は飛躍的に発展していくだろう。しかし、忘れてはいけないことは一
人一人が地球の未来に対し責任感を持つことである。そして、その責任感を人類で共有で
きた時こそ人類は同じ目標に向かい進むことが出来る。現在、人類は未来に対する共通の
責任感をしっかり持って、科学技術は地球を守るべく正しい方向に進んでいるように
思える。

参考資料

- (1) 資源エネルギー庁 「世界のエネルギー事情」
- (2) U.S. Department of Energy HP 「Historical Carbon Dioxide Record from the Vostok Ice Core」 <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/vostok.html>
- (3) IPCC の第 4 次報告書 <http://www.iccca.org/>
- (4) 環境省 「温暖化影響総合予測プロジェクト」
- (5) 環境省 「風力発電の導入見込量についての報告書」
- (6) みずほ総合研究所 「再生可能エネルギー普及に向けた展望」
- (7) 経済産業省 「蓄電池技術の現状と取り組みについて」
- (8) 東京ガス エネファームスペシャルサイト http://home.tokyo-gas.co.jp/enefarm_special/
- (9) 東京ガス、東芝、パナソニック カタログ
- (10) 燃料電池普及促進協会 「エネファームについて」
- (11) 千代田区 「新エネ・省エネ機器等導入助成制度」
- (12) 経済産業研究所 「燃料電池の実用化」
- (13) 日本経済新聞
- (14) 金属材料の水素脆性克服に向けた分析技術の重要性・新展開 高井健一
- (15) 独立行政法人物質・材料研究機構 「高強度鋼の水素脆化特性」
- (16) 水素脆性の基礎—水素の振るまいと脆化機構 南雲道彦
- (17) 現象としての人間 テイヤール・ド・シャルダン