

ATTAAT A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA CCTAACT CTCAGACC

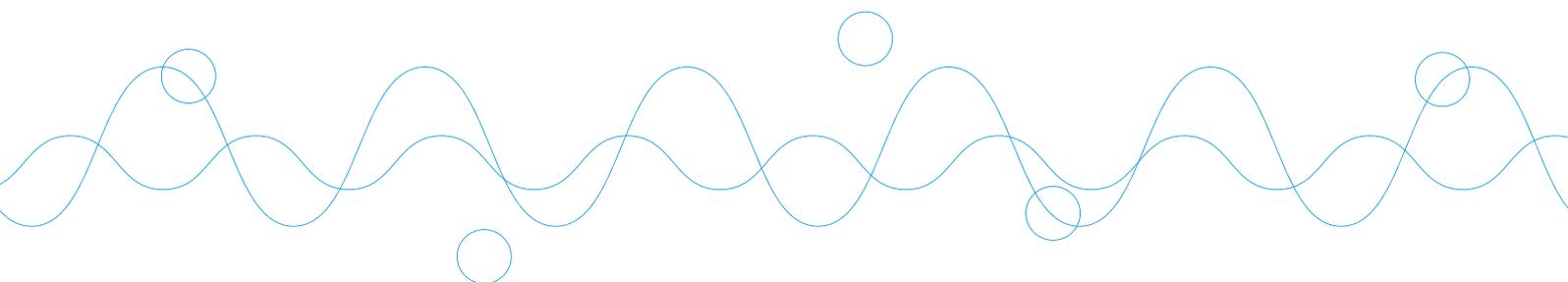
戦略プロポーザル

再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けた
エネルギーキャリアの基盤技術

STRATEGIC PROPOSAL

Fundamental Technology of Energy Carriers for
Transportation, Storage and Utilization of Renewable Energy

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立って行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする独立行政法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

<http://crds.jst.go.jp/aboutus/vision/>

エグゼクティブサマリー

本戦略プロポーザルは、太陽エネルギーをはじめとする様々な再生可能エネルギーを大量に蓄えるエネルギー媒体としての化学物質、すなわちエネルギーキャリアの基盤技術の研究開発を、我が国において戦略的に推進することを提案するものである。

化石燃料の枯渇、気候変動といった諸問題を克服するためには、今後再生可能エネルギーを大規模に導入する必要がある。現在、有力視されている風力、太陽光、太陽熱、水力などの再生可能エネルギーは地球規模では十分な賦存量を有し、世界の基幹エネルギーとなることが期待されている。しかし、我が国は国土が狭く、太陽あるいは風力エネルギー資源が決して豊富な国ではない。大量に再生可能エネルギーを導入するためには、将来、これらの資源の豊富な国から輸入する必要もある。このような再生可能エネルギーは本質的に、以下の2つの大きな問題点をはらむ。

- ①再生可能エネルギーは、地球規模もしくは国内において偏在している。例えば、太陽光、太陽熱であれば赤道に近い砂漠地帯の賦存量が多く、風力は高緯度地域の風況が良好であり国内であれば北海道・東北に風況が良好な地域がある。逆に、エネルギーの消費地である都市部には再生可能エネルギーの賦存量は少ない。
- ②日ごとあるいは季節ごとの時間的変動が伴う再生可能エネルギーは、需要側の変動と調和させることは難しく、基幹エネルギーとして用いるためには平準化が必須である。風力や太陽光など気象の影響を受けるものでは、短周期に加えて数日～数週間の長周期の変動が顕著であり、電力の昼夜平準化以上の長い時間スケールでの平準化が必要である。上記の問題を克服して再生可能エネルギーを大量に利用する社会を実現するためには、これらのエネルギーの輸送や貯蔵を可能にする必要がある。再生可能エネルギーは電力として既に利用が進められているが、電力は長距離の輸送や、大規模な貯蔵が困難である。このため、再生可能エネルギーから得られた電力から、もしくは再生可能エネルギーから直接、水素、アンモニア、有機ヒドライド、金属・金属酸化物などに代表されるキャリアを生産し、輸送、貯蔵した後に、必要な時に電力、動力、熱に変換して利用するシステムが必要である。

現在の科学技術で再生可能エネルギーまたはそれを基とした電力から、これらのキャリアを生産する手法は限られている。さらに、これらのキャリアから電力、動力、熱を取り出す手法も限られている。例えば、電力によって水と窒素からアンモニアを合成する技術や、有機ヒドライドの前駆体を電力と水によって水素化する技術などはいまだ基礎レベルにある。またキャリアを直接燃料とする燃料電池や熱機関も基礎研究からの研究開発が必要である。安定した再生可能エネルギーの利用を目指す我が国が、これらの科学技術を世界に先駆け確立するために、キャリアの生産・貯蔵技術の拡充と効率向上をめざし、基礎から応用開発にわたる研究を戦略的に推進する必要があるものと考えられる。

また、各種エネルギーキャリアはエネルギー密度、利用法、安定性、安全性、コストなど様々な特徴をもち、用途によって使い分ける必要もあり、どれか一つのキャリアのみが将来有望ということではない。例えば、燃料電池自動車には水素を用いることが想定されているが、気体水素は大規模、長期間の貯蔵には適していない。大規模、長期間の貯蔵にはアンモニア、有機ヒドライドなどの液化ガス、液体が好ましい。また、水素やアンモ

ニアは内燃機関に燃料として直接用いる可能性があるが、有機ハイドライドは循環型システムとしては燃焼させられない。これら様々な有望なキャリアの各変換技術の能力を研究するとともに、どのキャリア、どのプロセスが、将来の再生可能エネルギーによる社会を支えられるのか、キャリアの性質に応じた効率的なエネルギーシステムを判断するに資する科学的知見を得ることが重要である。これまでの日本のエネルギー技術開発において、電力は利便性の高い最終エネルギー源として位置付けられ、電力を用いてエネルギーキャリアを生産するという視点は注目されず、この分野の科学技術のレベルも未熟といわざるを得ない。しかしながら、再生可能エネルギーが社会に導入される後は、電力はエネルギーの入り口でもあり、電力からのキャリア生産技術は再生可能エネルギー利用の鍵である。また、究極的には、太陽光や太陽熱などの再生可能エネルギーから電力を介さず直接エネルギーキャリアを効率的に生産することができれば、真に持続可能な社会の実現が可能となる。電解技術や触媒技術、内燃機関など、我が国は卓越した技術を有し、これらを基としてエネルギーキャリア技術を確立し、再生可能エネルギーの大規模導入に備えることが重要である。また、エネルギー産業は経済の基盤であることは言うまでもなく、再生可能エネルギーを中心とした社会に移行するためには、現在の石油化学プラントや天然ガスプラントを、次第に再生可能エネルギーもしくはそれに基づいた電力によるキャリア生産プラントに置き換えていくということである。このためには技術開発のみならず、社会的受容性や既存インフラとの適合性、環境適合性や安全性など広い視点に立った検討が必要である。世界に先駆け技術を確立し、その技術を世界に提供し、世界の再生可能エネルギー導入を促進することが、科学技術創造立国である我が国の目指すところといえる。

エネルギーキャリアにかかわる科学技術においては、化学、化学工学、機械工学、システム工学などの幅広い学術の融合が必要である。また、原子レベルでの電気化学、触媒化学の反応メカニズムの理解から、反応器設計、システム構築や、環境適応性評価など広いスケールにわたる研究が必要であり、異分野研究者の連携、協力による研究推進が必須である。これらの分野間の融合は、エネルギー工学の視野をもった化学者、化学工学者、機械工学者、システム工学者を育成し、社会のエネルギー問題という高い視点から研究課題を俯瞰できる、視野の広い人材を育成することになると期待される。

Executive Summary

This strategic proposal recommends that the government should strategically promote the research and development of fundamental technology of energy carriers, i.e., energetic chemicals, for massive introduction of renewable energy.

Implementation of renewable energy is required to resolve the problems of fossil fuel depletion and climate change. On the earth, there are considerable amounts of available renewable energies such as wind power, solar irradiation and hydraulic power, and they are expected to serve as primary energy feedstock for future human society. However, Japan does not have a large land area, so the available amount of solar and wind power is smaller compared to other regions. If we want to introduce a large quantity of renewable energy, we should import such resources from countries having abundant renewable energy. The renewable energy has two inherent problems as follows.

- 1) The renewable energy resources are unevenly distributed globally and locally. A huge amount of solar irradiation is available in the desert areas close to the terrestrial equator, while wind power is often abundant at the high latitudes such as Hokkaido and Tohoku areas in Japan. On the other hand, they are not abundant in energy-consuming cities.
- 2) Most of the renewable energy is associated with large daily and seasonal fluctuations, so they should be leveled off as base energy supplies. Solar and wind power are affected by weather and fluctuates over a period of several days or weeks, which is much longer than the day and night leveling off of electricity.

To materialize a society utilizing massive renewable energy, these problems on transportation and storage of energy should be resolved. Renewable energy has already been widely used as an electric power supply, although electricity is not suitable for long-distance transportation and large-scale storage. Hence, it is most appropriate to produce energy carriers such as hydrogen, ammonia, organic hydrides and metals/metal oxides from renewable electricity or directly from renewable energy, and to transport and storage them before finally supplying them as electricity, mechanical power and/or heat.

There are only a limited number of known technologies for producing energy carriers from renewable energy, and, in particular, direct conversion of renewable energy to energy carriers is extremely difficult. Moreover, there are only a few technologies to obtain electricity, mechanical power and heat from such energy carriers. For instance, hydrogen can easily be produced by water electrolysis and used for producing secondary carriers; it is being used for commercially available fuel cells. However, we have only primitive technologies for synthesizing ammonia and organic hydrides from water with nitrogen or hydride-precursors. The direct-carrier fuel cells and direct-carrier engines

also require fundamental research and development. Since our country has set forth a goal of stable utilization of renewable energy, we should strategically promote basic and applied research in order to lead the world by developing these technologies.

The energy carriers mentioned above have individual characteristics in their energy density, utilization method, safety, stability, cost and so forth, so they should be selected and used depending upon the purpose. At present, there is no single carrier that is generally most promising. For example, it is assumed that gaseous hydrogen will be used for fuel cell vehicles, but hydrogen cannot be stored in large scale and for long periods of time. For such storage, liquids and liquefied gases such as organic hydrides and ammonia are clearly preferable. Hydrogen and ammonia can also be directly supplied as fuels into internal combustion engines, but organic hydrides should not be burned because of their recycling as precursors. Therefore, extensive research work on various conversions of carriers for production and utilization is mandatory, and it is most important to obtain sufficient scientific knowledge to judge which carriers would support future energy systems based on renewable energy.

So far in our energy technology development, electricity has been identified as the most useful final energy source, so that the production of energy carriers from electricity have not attracted much attention resulting in that the related technologies are left primitive. In a future society based on renewable energy, however, electricity will be a source of energy, and the production of carriers from electricity will play an important role in the utilization of renewable energy. Moreover, direct production of carriers from renewable energy such as solar irradiation will be the ultimate technology. Our country has much advanced technologies in electrochemistry, catalysis and IC engines, so we should prepare for large-scale dissemination of renewable energy by exploiting these advantage technologies for the development of carrier technologies. The energy industry is the basis of the national economy. It is presently supported by petroleum and natural-gas plants and should be replaced by the renewable energy carrier and/or derived electricity plants in the future. The social receptivity, compatibility to present infrastructures, environmental friendliness, and margin of safety should be investigated from a wider perspective, as well as the research and development of elemental technologies. Our country should develop technology in renewable energy carriers ahead of other countries and supply them to the world for the promotion of renewable energy as a world leader in science and technology.

A variety of disciplines such as chemistry and chemical, mechanical and systems engineering should be integrated to address the science and technology for energy carriers. Furthermore, a wide range of cooperation and collaboration is necessary from atomic-scale reaction mechanisms in electrochemistry and catalysis to real-scale reactors design, system structuring and environmental impact assessment. This synergistic attempt with a common view of energy conversion should certainly cultivate human resources of chemistry and chemical, mechanical and systems engineering, which can put R&D themes on energy in perspective.

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1章 研究開発の内容	1
2章 提案を実施する意義	
2.1. 現状認識および問題点	6
2.2. 社会・経済的効果	16
2.3. 科学技術上の効果	23
3章 具体的な研究開発課題	25
4章 研究開発の推進方法および時間軸	38
付録1 検討の経緯	41
付録2 国内外の状況	47
付録3 専門用語説明	49
参考文献	50

コラム目次

1 再生可能エネルギーによる持続可能社会	3
2 様々なエネルギーキャリアの比較	4
3 偏在・変動する自然エネルギー	9
4 諸外国で進む再生可能エネルギーを基とする化学燃料生産	11
5 エネルギー貯蔵・輸送	13
6 エネルギー貯蔵に関わる経済性	15
7 金属エネルギー	19
8 水素関連の累積投資額	21
9 キャリア変換のエネルギー	27
10 再生可能水素エネルギー	29
11 エネルギー研究領域における表面界面科学の基礎研究の貢献	31
12 アンモニアエネルギー社会	34
13 地域におけるエネルギーキャリアへの取り組み	37

1章 研究開発の内容

本戦略プロポーザルは、再生可能エネルギーの大量導入の鍵となる、再生可能エネルギーから化学燃料などエネルギー媒体となる化学物質、すなわちエネルギーキャリアへの変換技術や、得られたエネルギーキャリアの相互変換技術、エネルギーキャリアから電力や熱などのエネルギーを取り出し利用する技術の研究開発を国として戦略的に推進することを提案するものである。2011年の大震災後、停止した原子力発電に代わる電力を賄うため、電力会社は価格の高い化石資源を購入せざるを得なくなり、日本国民の負担するエネルギーコストが急増している。このような状況下、原子力に強く依存したエネルギー政策をとることの困難な日本において、再生可能エネルギーの大幅導入は国民の夢である。また、風力や太陽熱、太陽光発電の導入が進んでいる諸外国に比較し、我が国の再生可能エネルギーの導入は著しく遅れている⁽¹⁾。これらの再生可能エネルギーは自然に頼るため、賦存量の地域的偏在や、季節や年単位での変動が大きいことが特徴である。このため電力として電力系統に直接導入できる量には限界がある。また、電力は大陸間など長距離の輸送は困難であり、地球規模のエネルギーネットワークを構築しがたい。さらに、現在の二次電池のエネルギー密度を考えると、季節や年単位で基幹エネルギーを大量に二次電池に電力として蓄えるのは現実的でない。

再生可能エネルギーを容易に輸送、貯蔵するためにはエネルギーキャリアになる化学物質に変換することが最も有力である（図1、コラム1）。例えば、電力により水を電気分解すれば水素が得られるが、これは液化して輸送や貯蔵をすることができ、水素エンジンや燃料電池で動力や電力として利用することができる。また、水素からはメチルシクロヘキサンに代表される有機ハイドライドやアンモニアのような別のキャリアに変換し、またこれらから水素を取り出すこともできる（コラム2）。水素を中心とした変換技術は比較的古くから研究されているが、それ以外の水素への変換を経ない直接変換技術は極めて未熟な段階であり、研究課題が山積している。また、水素を経る変換でもシステム設計など応用には研究課題が多く残る。これらの再生可能エネルギーからエネルギーキャリアへの変換技術、またエネルギーキャリアの電力や動力への変換技術の基盤研究を推進することは、再生可能エネルギーの大幅導入に欠かせないといえる。

エネルギーキャリアの変換技術の研究推進においては、システム全体や社会への実装を考慮する必要があることから、触媒化学や電気化学などの化学分野のみならず、内燃機関などの機械工学、キャリア変換の熱マネジメントのための熱工学、ライフサイクルアセスメントなどのシステム工学などディシプリンを越えた分野融合が必須である。これらの分野の研究者が分野横断的に連携することが本研究領域の鍵となる。また、キャリアの社会的受容性（安全性、環境適合性など）や物的、制度的社会インフラとの適合性も重要な課題であり、どのようなシナリオでキャリア技術を社会に導入できるかについて併行して検討を進める研究体制が望まれる。

エネルギーキャリアとして有望視されている化学物質には、水素、有機ハイドライド、アンモニア、金属・金属酸化物など多くの種類があるが、本研究領域では特にキャリアの種類を限定しない。それぞれのキャリアは様々な特徴をもち、用途によって使い分けら

れるべきものであり、また予想される社会導入の時期も様々である（コラム2）。例えば、水素は2015年に燃料電池車が市場投入されることから、化石資源ベースの水素がこの時期から普及が進むと思われるが、水素は液化するためには -253°C が必要で大規模に長期間貯蔵する目的には向かない。有機ハイドライドやアンモニアは、ともに液体（液化ガス）であり大量に長期間貯蔵しやすいが、変換技術の展開によって、これらのキャリアの可能性は大きく変わってくる。現在の科学技術ではほとんどの変換技術は基礎研究の段階であり、これらを十分に研究、精査する必要がある。本研究領域では、各変換技術の能力を研究するとともに、どのキャリア、どのプロセスが将来の再生可能エネルギーを基とした社会を支えられるか判断に資する科学的知見を得ることも極めて重要である。

本戦略プロポーザルで提言する基礎研究を必要とする研究課題群を以下に要約する。

1. 再生可能エネルギーやそれを基とした電力からキャリアへの変換技術
 - ・電力から直接的なプロセスによってキャリア生産をする技術
 - ・太陽熱や太陽光からキャリアを生産する技術
2. 他のキャリアからのキャリア変換技術
 - ・電力を利用するキャリアからの脱水素技術
 - ・小型分散型プロセスのための水素化・脱水素プロセス
3. キャリアから動力、電力への変換技術
 - ・キャリア直接燃料形燃料電池の技術
 - ・キャリア直接投入型エンジン、タービンの技術開発
 - ・オンボード改質形燃料電池システム、エンジンシステムの技術開発
4. キャリアのフィージビリティ、環境適合性、安全性評価
 - ・各種キャリアの社会受容性検討
 - ・各種キャリアのライフサイクル、エネルギーペイバック検討



図1 再生可能エネルギーのエネルギーキャリアへの変換・貯蔵・利用技術

コラム 1 再生可能エネルギーによる持続可能社会

日本の陸地、約 38 万平方キロメートルが受ける太陽光エネルギーは、平均的な日本の国土の全天日射量は約 $11\sim 12 \text{ MJ m}^2 \text{ day}^{-1}$ であるので^(19,20)、 $1.6 \times 10^{21} \text{ J/year}$ と見積もられ、これは日本で消費される一次エネルギー $2.0 \times 10^{19} \text{ J/year}$ (2009 年)⁽¹⁾ の 100 倍である。再生可能エネルギーに基づいた社会を考えると、現在の電力以外で賄われているエネルギーも含め、すべてのエネルギーを再生可能エネルギーで代替しないと意味をなさない。市販の太陽電池のエネルギー変換効率は 10~15% であることを考えると⁽¹⁹⁾、国内の陸地の 10% に太陽電池を広げる必要があり、太陽光発電で国内のエネルギー消費を賄えるとは考え難い。また、風力発電も日本国内で風況が好ましいところは、洋上か陸上であれば北海道や東北の一部にしかなく⁽²⁰⁾、出力当たりの費用は安い太陽光発電よりも面積を必要とする。現在、世界で進む再生可能エネルギーの導入は、主に砂漠地帯での太陽光、太陽熱発電と、高緯度地帯の風力発電である。再生可能エネルギーを賦存量の多い地域で効率よく生産し、日本へ輸送することが、再生可能エネルギーの大規模導入への鍵となる。図 C1 に再生可能エネルギーを基にした持続型社会の模式を示す。



図 C1 再生可能エネルギーを基にした持続型社会

コラム2 様々なエネルギーキャリアの比較

図 C2、表 C2 に様々なエネルギーキャリアの比較をまとめた。アンモニア、有機ハイドライドとして代表的なメチルシクロヘキサンは窒素、トルエンを水素化した水素ベースのキャリアである。水素は 1 気圧では液化するために -253°C と極低温を必要とする液化しにくい物質であり、気体のまま 350 気圧に圧縮しても 100 L あたり 2 kg しか貯めることができない。その代り、燃料電池や燃焼には直接使いやすいキャリアである。一方、アンモニアは 10 気圧程度で液化するため LPG のように貯蔵できる。メチルシクロヘキサンでは、常温常圧でガソリンと同様な液体である。これらは 100 L あたり 12~4.7 kg の水素を放出することができるため、水素より貯蔵性は高い。しかし、水素を取り出すためにエネルギーと反応器が必要であり、直接、燃料電池で用いる技術は未熟である。また、アンモニアは燃焼に用いても、水と窒素しか生成しないので燃焼に用いることができるが、メチルシクロヘキサンはトルエンを回収しないと意味がないので燃焼させて使う意味はない。

ここには、水素、アンモニア、有機ハイドライドの水素エネルギー系のキャリアのみを示してあるが、 CO_2 を前駆体として再生可能エネルギーで、メタノール、ジメチルエーテル、メタンなどを合成すれば、これらも有望なキャリアである。これらの有機物は現在の化石資源社会で用いられている燃料と同じであるために、社会適応性は高い（コラム 3 参照）。しかし、 CO_2 を大気放出した場合、大気から希薄な CO_2 を収集するという問題が、循環型のエネルギーシステムにするためにはある。また大気に放出する前に使用場所で回収してきたとしても、使った燃料より重い CO_2 をキャリアの製造元まで輸送するのは効率的とはいえない。

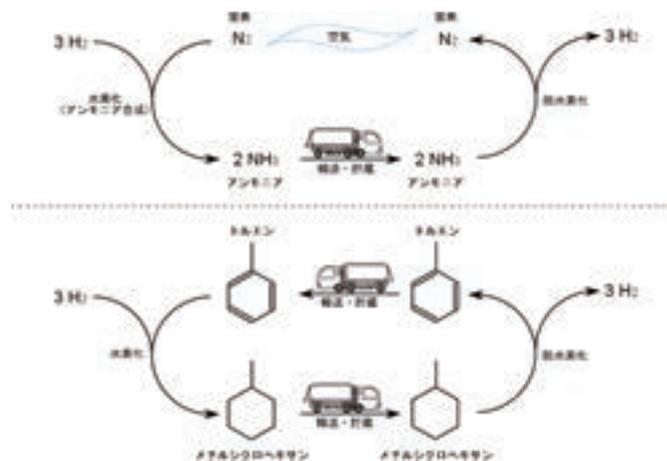


図 C2 アンモニアや有機ハイドライドによる水素貯蔵輸送システム

表 C2 主なエネルギーキャリアの特性

	水素	液体水素	アンモニア	メチルシクロヘキサン
化学式	H ₂	←	NH ₃	C ₇ H ₁₄
分子量	2.0 g/mol		17.0 g/mol	98.2 g/mol
標準燃焼熱	286 kJ/mol		382.6 kJ/mol	
	141.8 kJ/g		22.5 kJ/g	
沸点	-253°C	-253°C	-33.4°C	101°C
密度		0.0706 g/cm ³	0.682 g/cm ³ 液体	0.769 g/cm ³
質量水素密度	100 wt%	←	17.8 wt%	6.16 wt%
体積水素密度	2 kg/100 L (35 MPa)	7.06 kg/100 L	12.1 kg/100 L 液体	4.73 kg/100 L
水素放出に伴う エンタルピー変化	-	0.899 kJ/mol-H ₂	30.8 kJ/mol-H ₂	59.4 kJ/mol-H ₂
爆発限界	4.1~74.2 vol%	←	15~28 vol%	1.4~6.7 vol% トルエン
毒性		←	LCL0: 1500 ppm TCL0: 20 ppm	トルエン LDL0: 50 mg/kg TCL0: 200 ppm
水素化・脱水素	-		ハーバー・ボッシュ法	ニッケル、白金触媒
直接燃料型燃料 電池の現状	実用段階	←	基礎研究	基礎研究
直接燃料型燃料 電池理論起電力	1.23 V	←	1.17 V	1.07 V
水からの直接電 解合成	実用段階 (効率に問題)	基礎研究	基礎研究	
パイプライン	欧米に有		米国に有	
輸送手段	高压容器	タンクローリー	既存設備 (タンカー・列車・ ローリー)	既存設備転用 (ガソリンと同様)
貯蔵	高压容器	極低温	既存施設	既存施設転用 (ガソリンと同様)
世界年間生産量	5000 億 Nm ³ (4500 万 ton)		1 億 7000 万 ton	

2章 提案を実施する意義

2.1. 現状認識および問題点

2011年3月に起きた東日本大震災と、それによってもたらされた福島第一原子力発電所事故は、日本のエネルギー問題を露呈させるとともに、原子力発電の危険性を露わにし、今後の我が国のエネルギー政策へ多大なる影響を与えた。現在、原子力発電を止めることは化石燃料の大量消費に直結し、また化石燃料への過度な依存は価格の急騰をもたらす。我が国は、エネルギーの安定確保、安定供給において、極めて重要な岐路に立っているとわがざるを得ない。水力、風力、太陽光、太陽熱、地熱、潮力、波力などの再生可能エネルギーは、枯渇、温室ガス排出、放射性廃棄物などの問題点をもたない理想的な一次エネルギー源であり、これらの再生可能エネルギーによって成り立つ社会の構築は、人類の夢で、早急に達成されるべき課題である。これらの再生可能エネルギーの導入は世界各国で極めて急速に進んでいる。例えば、太陽光と風力の導入量は一次エネルギー消費量を基とすると、スペインでは3.5%、ドイツでは1.4%に達している⁽¹⁾。一方、我が国の導入量は0.2%であり、導入は諸外国に比べ明らかに後れをとっている。東日本大震災後にエネルギー問題が切迫した今だからこそ、再生可能エネルギーの大量導入は我が国が抱える大きな課題である。

再生可能エネルギーは地域的偏在、季節的・時間的変動という本質的な問題をはらんでいる。太陽熱発電や太陽光発電であれば、世界の砂漠地帯で行うと効率が高いが、日本のように晴天の少ない地域で行っても量的貢献は大きく期待できない。また、風力発電は高緯度地帯で平均風速が10 m/sもあるような地域では効率的であるが、日本の陸上部には、そのような風況の場所は極めて少なく、効率的な風力発電は望めない(コラム3)。効率よく再生可能エネルギーが得られる地域から、エネルギーを消費地に輸送するということが、再生可能エネルギーの大幅導入を実現する方法といえる。再生可能エネルギーによる電力は、国内程度の距離であれば送電で運ぶことができるが、地球規模で輸送することは困難である。この電力を化学物質であるエネルギーキャリアに変換すれば、化石燃料と同様に、船舶(タンカー)、鉄道(タンク車)、自動車(タンクローリー)などを用い地球上で自在に輸送することができることが知られている⁽²⁾。しかしながら現状の科学技術ではキャリアに変換する技術に多くの課題が残されたままで、実用レベルにあるとはいえない。

また、再生可能エネルギーの変動も大量導入への妨げである。再生可能エネルギーを基とする電力に余剰があるときに、電力からキャリア生産を行うことが効果的に再生可能エネルギーを利用するのに役立つ。事実、この認識は世界的にも進んでいて、再生可能エネルギー導入が進んでいるドイツでは、余剰な再生可能エネルギーによる電力とバイオマス資源由来のCO₂からメタンを生産するプロジェクト(SolarFuel)が進んでいる(コラム4)⁽³⁾。またアメリカにおいても非化石資源電力とCO₂からブタノールやディーゼル燃料などを作るプロジェクト(Electrofuels)が始まっている⁽⁴⁾。これら再生可能エネルギーを基とした電力を、エネルギーキャリアに変換することは、発電した電力を無駄なく使い切るために重要であり、得られたキャリアを貯蔵し、再生可能エネルギーが不足したときに利用することもできる。世界的にキャリアの重要性が広がる中、我が国においては再生可能エ

エネルギーの普及も大幅に遅れ、キャリアの変換技術の研究へ注力されていないことが問題である。

このような基幹エネルギーに係るエネルギーの輸送、貯蔵には、エネルギーキャリアに変換することは必須である。例えば二次電池もエネルギーを貯蔵できるデバイスであるが、その重量エネルギー密度は、現状で 100 Wh/kg 程度 (Li イオン電池、NaS 電池ともに)、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の 2020 年度目標でも 200~250 Wh/kg がターゲットとなっている⁽⁵⁾。一方、水素のようなエネルギーキャリアの場合、水素ならば燃焼熱は 284 kJ/mol、すなわち 39,400 Wh/kg となり、そのエネルギー密度は二次電池と比較にならないほど高い (コラム 5)。このことから、二次電池は、電子機器・電気自動車での利用や、電力網の短時間の電源変動を平準化する目的に期待できるデバイスであり、基幹エネルギーの長期保存には経済的にも不適といわざるを得ない (コラム 6)。

本戦略で推進される研究課題群は、我が国の基幹エネルギーに量的貢献ができる可能性をもつものでなくてはならない。地域的な廃棄物利用や地域性の再生可能エネルギー利用に留まるものではなく、将来、国全体の基幹エネルギーの変換プロセスとして貢献できる可能性があることが重要な点である。また、基幹エネルギーに量的貢献ができるという点では、希少材料に頼らない技術でなければならない。例えば、固体高分子形燃料電池からなる燃料電池車は、大量の白金を使用するために大規模に普及させることが困難といわれている。このように資源的に大規模導入に問題がある技術も多数残されている。

これまで電気エネルギーは化石資源などの一次エネルギーから 40% 程度の変換効率で得られる、非常に高価なエネルギー源であり、これからエネルギー物質を生産するという概念はこれまでの我が国の科学技術の中には無に等しかった。電気エネルギーを用いた物質合成、すなわち電解合成は複雑な有機合成を行うためのファインケミストリーの科学技術であり、バルクの化学品の生産をするためとは認識されていない。アルミニウム金属は、ホール・エルー法による電解製錬で大量生産されるため、「電気の缶詰」と揶揄されるほど電力を大量に使用して得られるバルク製品である (コラム 7)。また、ソーダ塩素工業に見られるように、水酸化ナトリウムおよび塩素の工業的生産には電気エネルギーが使われている。これらは貴重な電力を大量に投入するプロセスであり、化石エネルギー社会の中では、最も敬遠されるプロセスである。これらの一部の例を除くと、化学工業において電気エネルギーを高エネルギー物質の生産に使用することは行われておらず、高エネルギーな化石燃料からの化学燃料およびバルク化成品の生産が中心であった。電気エネルギーを入り口とした科学技術の振興も、今後のエネルギー社会で最も重要な課題である。

再生可能エネルギーを中心としたエネルギー社会を考えると、電気エネルギーは最も有力なエネルギー源ともいえる。化石資源の価格が高騰した場合、競争力のあるエネルギー源となりうる。従来型水力発電に加え、現在では風力発電、太陽熱発電、太陽電池は世界各地で導入が急速に進んでいる。現在、我が国は、これらの再生可能エネルギーからの高エネルギー物質の生産技術をほとんど有していない。

再生可能エネルギーはほとんどのものが、日々の変動のみならず、年毎や季節的な変動もある安定性の極めて悪い一次エネルギーである。この変動する再生可能エネルギーをエネルギーキャリアとして貯蔵し、安定して利用することが再生可能エネルギーを、どの割合まで導入できるかの鍵となることは過言ではない。例えば、日本は石油を国家備蓄と民間備蓄を合わせて 8,431 万キロリットル (2011 年 10 月末) を保有していて、これは 205

日分に相当する⁽⁶⁾。安定したエネルギー供給のためには、エネルギーは相応の備蓄をする必要があると考えられる。

また、エネルギーセキュリティも重要な視点である。原子力事故を危惧し、化石燃料である石油、石炭、天然ガスに依存すると、社会の負担するエネルギーコストが増え、我が国の産業競争力を低下させ、経済発展を阻害する恐れがある。また、化石資源の資源国は極めて偏っているため、化石資源のみに頼る国家のエネルギーセキュリティは高いとは言い難い。再生可能エネルギーは偏在があるものの、世界的には幅広く導入される可能性をもつ。また、再生可能エネルギーについても輸入をせざるを得ない我が国においては、外交的なセキュリティ確保のためのエネルギーの備蓄は必須であるが、電力のままでは輸入も備蓄も困難である。これらを、キャリアに変換し、国際的に取引することは、多くのエネルギー供給国の参入が見込まれ、安定したエネルギー供給を生むものである。国内で可能な限り再生可能エネルギーからキャリアを生産し、不足する分は諸外国からバランスよく輸入することが国策上求められる。このような、化学燃料、キャリアの重要性は現在の化石燃料による社会システムを考えれば疑う余地はないが、化石資源を基とする石油化学技術は極めて高いレベルで成熟している一方、再生可能エネルギーを大量かつ広範に利用するための科学技術が未熟な状態であることは極めて大きな問題である。

コラム3 偏在・変動する自然エネルギー

再生可能エネルギーとして期待されている風力および太陽光照射の地上における分布を図C3-1に示した。地上80mでの平均風速では南米南端のパタゴニア地方、グリーンランド、欧州北部、アフリカ東端、ヒマラヤ山脈付近に平均風速9 m/s以上の地域があり、風力発電に向いている。一方、太陽光は砂漠地帯を中心に分布している。スペインが太陽熱発電に注目し実績を上げているのは、欧州の他の国より日照条件が優れているからである。我が日本は風況、日照のいずれも良好とはいえない。欧州諸国よりもエネルギー消費量は明らかに大きい。国内の面積の限られた土地からの再生可能エネルギーのみならず、国際的な再生可能エネルギーのネットワークを組み、大陸間で輸送して用いる必要がある。

また、再生可能エネルギーの日ごと、季節ごとの変動も大規模導入の妨げになる図C3-2に国内の風力発電所の月間での発電量の変動の例を示した。ほとんど発電していない日が続いたり、好調に発電している日が続いたり数日以上の間隔での変動があり、このような変動型の電力を大量に直接電力系統に接続することは困難である。昼夜の変動であれば二次電池を利用する可能性もあるが、コラム5で示すように数日間～数週間という単位では二次電池は基幹エネルギーを貯蔵することは不可能に近い。

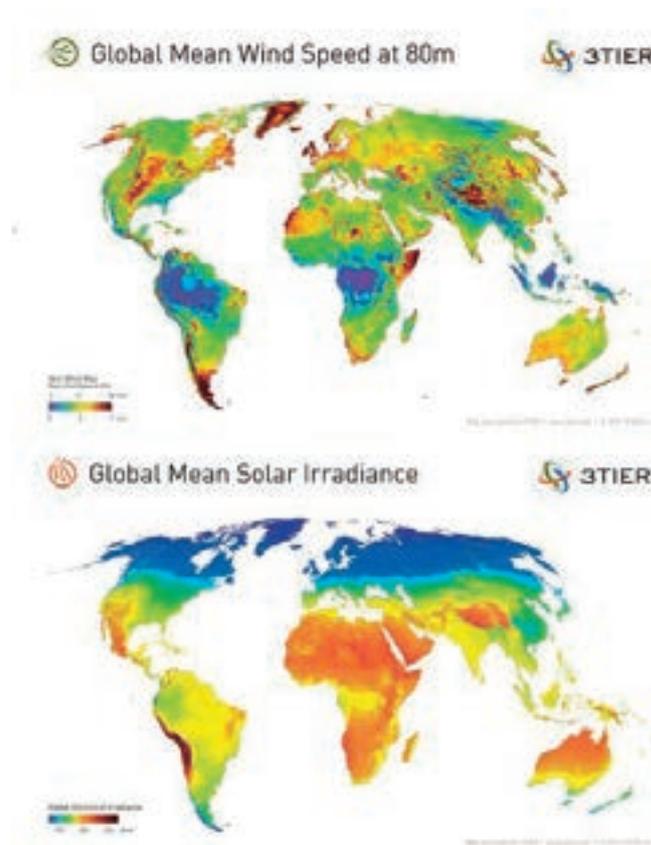


図 C3-1 地球上の陸地の平均風速（上図）と太陽光照射量（下図）の分布。3TIER の HP より⁽²¹⁾

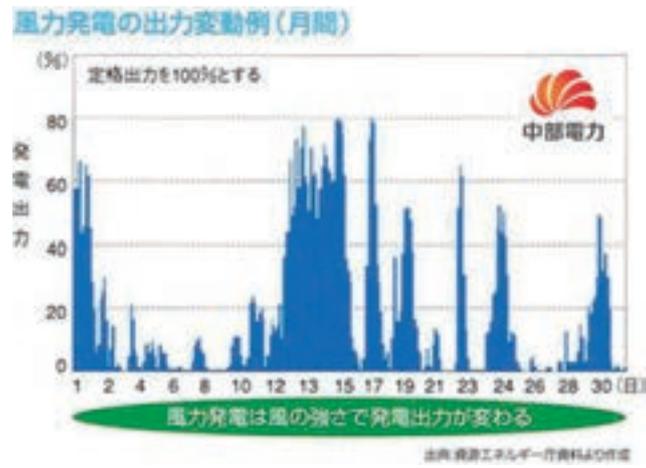


図 C3-2 風力発電所の月間出力変動例。中部電力 HP より⁽²²⁾

コラム 4 諸外国で進む再生可能エネルギーを基とする化学燃料生産

日本よりも再生可能エネルギーの導入が進んでいる欧米では、再生可能電力から化学燃料を製造するプロジェクトが数多く進んでいる。例えばドイツにおいては SolarFuel GmbH という会社組織が設立され、再生可能エネルギーによる電力とバイオマスなどから得られる CO₂ からメタンを生産するプラントを計画している (図 C4-1)⁽³⁾。2009 年 11 月に 25 kW の試作機を作り、電力と水と空気中の CO₂ からメタンを 40% の効率でメタンを作ることに成功している。2013 年には 6 MW 級の実証プラントを効率 54% 以上で運転することを目指し、2015 年には 20 MW 級にスケールアップするとしている。得られるメタンは都市ガスの規格を満たすもので、そのまま都市ガスとして用いることができる。

一方、米国ではエネルギー省 (DOE) の Electrofuels プログラムが 2010 年から企業や大学が連携して進められている (図 C4-2)⁽⁴⁾。これは再生可能エネルギー (および原子力エネルギー) による電力と、そこから得られる水素を用い、CO₂ と微生物などを利用して反応させ液体化学燃料の生産を狙うもので、ブタノールやディーゼル油に代表される各種の化学燃料をターゲットにしている。本来、大気に放出されるはずである CO₂ を回収し燃料化するため、カーボンニュートラルであり、またガソリンなど既存燃料を代替できる可能性が期待されている。欧州の SolarFuel は電解水素とメタン化反応の組み合わせという比較的成熟した電解技術と触媒技術を用いた、実用化段階の開発であるのに対し、Electrofuels は微生物利用の電気化学反応という基礎からの研究が必要なチャレンジングな課題である。いろいろなフェーズの研究課題を広く俯瞰し、フェーズに応じた予算規模での研究推進が望まれる。



図 C4-1 SolarFuel 社の取り組む再生可能電力からのメタン生産と試作機。SolarFuel 社 HP より⁽³⁾

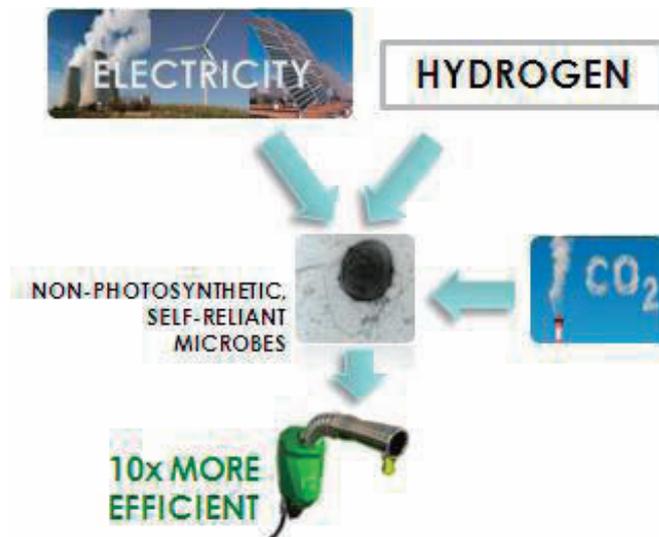


図 C4-2 Electrofuels プログラムによる再生可能エネルギーを基とする電力（原子力も含む）と CO₂ からの燃料生産。Electrofuels Project の HP より⁽⁴⁾

コラム5 エネルギー貯蔵・輸送

エネルギーの貯蔵というと、真っ先に思い浮かぶのは二次電池である。現状のリチウムイオン電池やナトリウム硫黄 (NaS) 電池の容量は 100 Wh/kg (360 kJ/kg) 前後であり⁽⁶⁾、これと水素のエネルギー (燃焼熱)、284 kJ/mol (142,000 kJ/kg) を比較してみる。100 Wh/kg は 360 kJ/kg と計算される。例えば、日本の電力需要 (2010 年度) は 4.0×10^{18} J/year であるが⁽²³⁾、日本の政府は 2030 年代までに再生可能エネルギーを 30% 程度導入することを目標としている⁽¹³⁾、すなわち 1.2×10^{18} J/year が再生可能エネルギーから得られる計算となる。再生可能エネルギーの平準化のために、どの程度のエネルギーを貯蔵する必要があるかは精査していく必要があるが、本質的に再生可能エネルギーは自然まかせのエネルギーであり季節変動も大きく、海外からの輸入が増えれば、日本の約 200 日分の石油備蓄⁽⁶⁾と同様に相当量の備蓄が必要なことは十分に予測できる。仮に 1 ヶ月分のエネルギー、 0.1×10^{18} J を貯蔵することを考えてみる。二次電池 360 kJ/kg のエネルギー容量でこれを賄おうとすると、2.8 億トンの二次電池が必要な計算になる。もちろん、二次電池の研究開発が進めば容量が数倍になることは見込まれるが、それでも非現実的な量である。二次電池は昼夜の電力の平準化には有望であるが、基幹エネルギーを長期的に貯蔵しエネルギーセキュリティを確保する用途には全く向かない。

同じ計算を水素の燃焼熱で行うと、水素 70 万トンに相当する。これを冷却液化して液体水素とした場合、液体水素の密度は 0.0706 g/cm^3 であるので 980 万キロリットルに相当する。莫大な体積に思われるが、現在の日本の石油備蓄は 8,327 万キロリットル (2010 年度)⁽⁶⁾であり、石油備蓄よりはるかに小さい。水素の量を基準として、メチルシクロヘキサンやアンモニアに変換した場合、水素密度はそれぞれ 4.73 kg/100 L 、 12.1 kg/100 L であるので、メチルシクロヘキサン 1,500 万キロリットル、アンモニア 580 万キロリットルに対応し、同様に石油備蓄基地よりはるかに小さい規模で 1 ヶ月分のエネルギー備蓄が可能である。

もちろん、この計算は電力の 30% を 1 ヶ月貯蔵することを仮定したもので規模感を示すだけのものである。また、キャリアから水素を取り出す時のエネルギーを考えていない。電力すべて、さらには消費エネルギーすべてを再生可能エネルギーで賄おうとすると、スケールはさらに大きくなる。忘れてならないことは現在の電力需要は国の消費エネルギーの一部であり、再生可能エネルギーに基づいた社会を構築するためには、現在は直接化石燃料を使っている自動車などの運輸機関、ボイラーなど熱源もすべて再生可能エネルギーに置き換えるということである。

エネルギーを輸入することを考えた場合、オイルタンカーなどの大型船舶は 30 万トンクラスのものがあるので、これに二次電池を積んだ場合、1 回に 1.1×10^{14} J しかエネルギーは運べない。メチルシクロヘキサンの場合では 1.8 万トン分の水素が運べ、 2.6×10^{15} J が運べる計算になる。それも運送にはガソリン用のタンカーと同様なタンカーでよい。現在の化石燃料社会と同様に国際的にエネルギーを流通させ、エネルギーが不足した際にキャリアとしてエネルギー産出国から輸入できるシステムを構築することができる。



図 C5-1 石油国家備蓄基地の分布（上図）⁽²⁴⁾と苫小牧東部国家石油備蓄基地（下図）⁽²⁵⁾。
 苫小牧東部基地は国内最大の石油備蓄基地の、最大 640 万キロリットルの備蓄量をもつ。
 例えば、メチルシクロヘキサンであれば、性質はガソリンなどの炭化水素に近く、石油備蓄基地のような施設で貯蔵できる

コラム6 エネルギー貯蔵に関わる経済性

コラム7にあるエネルギー貯蔵について二次電池とキャリアの経済性を考えてみる。NEDOの二次電池技術開発ロードマップ(Battery RM2010)によると⁽⁵⁾、現状の二次電池は100円/Wh程度である。前述の総電力30%を1ヶ月分に相当する2.8億トンの二次電池は、1万円/kgなので、2,800兆円であり、全く現実的でない。Battery RM2010では2030年までに15円/Whを目指しているが、せいぜい数分の1になるだけであり、1ヶ月のような長期間のエネルギーの貯蔵を考えると、二次電池では対応は不可能である。

キャリアによる備蓄を考えてみる。石油の備蓄基地は第二次オイルショック頃に建設したものが多く、現在の金額と対応させにくいので、近年、建設の進む石油ガス(LPG)備蓄基地の例をあげる。地上タンク方式の七尾国家石油ガス備蓄基地(2005年完成)では、25万トンの備蓄基地が415億円で建設されている。地下岩盤水封方式の波方国家石油ガス備蓄基地(建設中)では45万トンの貯蔵容量に対し、建設費は1,086億円(予定)となっている⁽²⁶⁾。これらから推測すると、580～1,500万キロリットルのキャリア貯蔵基地の建設には数兆円はかかるが、二次電池に比べれば1/1000程度である。

また、キャリアの場合にはタンクのみでなく変換のためのデバイスも必要である。NEDOの資料によると、例えば50Nm³/h規模の水電解のシステムで現状、約8千万～1億円かかるといわれている。50Nm³/h規模の水素のエネルギーは年間4.24×10¹²J/yearであるので、上記の総電力の30%の1.2×10¹⁸J/yearには、28万台程度の水電解のシステムが必要になる(実際にはピーク電力抑制のため、その数倍は必要である)。1基1億円であれば28兆円が必要になる。二次電池の1/100程度安価で数十年をかけて導入することを考えれば現実的な金額である。また、海外では30,000Nm³/h規模の水電解システムが実用化されているので、大規模化によるコスト削減効果も見込める。しかし再生可能エネルギーの平準化のためには起動停止が容易な変動吸収型のシステムが必要なことを考えると、起動停止が容易な小型のデバイスを28万台導入し風力発電の各発電機・各場所に分散させるほうが有望かもしれない。再生可能エネルギーを基とする電力からキャリアを直接生産するデバイス技術が確立した場合、水電解と同様な経済性で導入が進むものと考えられる。

2.2. 社会・経済的効果

本提言は、再生可能エネルギーの世界規模での大量導入に不可欠なエネルギーキャリアの基盤技術に関する研究開発を推進するものであり、この基盤技術確立の延長線上を長期的に展望すると化石燃料に依存しない持続可能な水素社会の実現が期待され、地球温暖化対策としての低炭素社会の構築およびエネルギーセキュリティの向上が社会的な効果として挙げられる。

本技術は既存のエネルギーシステムのパラダイムシフトを促す起点となり、シフト後には巨大な市場が見込まれる。その市場を形成する過程において、エネルギーキャリアの製造、輸送、取引市場、インフラ、海洋エネルギーを中心とした再生可能エネルギーなど新たな産業の創生が期待され、国内のみならず海外への展開も期待される。

この意味でも、「グリーンエネルギーを、社会の基盤エネルギーとして確立し、安定性の向上や地球規模での保全を図るとともに、新たな経済成長分野の出現を促していく」という国のグリーン成長戦略の実現を正に可能とする重要な基盤技術といえる。⁽⁷⁾

① 水素社会のインパクト（市場規模）

本提案の対象としている技術はまだ基礎研究レベルにあり、対象技術そのものの市場の予測を行うことは困難である。技術開発により有機ハイドライドなどのエネルギーキャリアが実用レベルに達すると、その先には水素社会という巨大な潜在市場がある。国のエネルギー計画の目標年である2030年までの水素需要は、家庭用燃料電池530万台、業務・産業用燃料電池620万kW、燃料電池自動車390万台などを想定すると320億Nm³（270万トン）、水素ステーションなども含めた累積投資額は38兆円と推定される。仮に水素価格を40円/m³～60円/m³（市場で十分競争力をもつ価格）とすると、2030年の水素の市場規模は1兆3,000億円～1兆9,000億円となり、前記のインフラなどの投資効果に加えて、水素市場の需要創出効果と輸入化石燃料消費代替に伴う国富流失の減少の両面からのマクロ経済効果が期待でき、その効果は本格的な普及が期待される2030年以降はさらに拡大すると見込まれる。さらに、エネルギーキャリアの技術開発によって、国際的な水素ネットワークの構築やインフラ輸出の拡大が予想され、我が国の国際展開にとって大きな経済的便益をもたらすことが期待される⁽⁸⁾。

② エネルギーキャリアによる社会的効果

再生可能エネルギーから製造される水素は利用過程において二酸化炭素を排出しないことから、エネルギーキャリアを基盤としたエネルギーシステムは低炭素社会の構築に大きく貢献することができる。

政府試算では、2030年の電力需要1兆kWhの30%を再生可能エネルギーによって賄うために、水力発電、地熱発電、バイオマス発電などの安定電源を除くと、太陽光発電670億kWh（6,300万kW）および風力発電660億kWh（3,500万kW）の導入が必要としている。両者を合計した発電設備容量は、現在の最大電力需要の約半分に相当する9,800万kWに達することになる。このように不安定電源である太陽光発電や風力発電が大量に導入された場合、電力系統安定化のためには、短時間の需給インバランスの対応に適している蓄電池に加えて、余剰電力を水素に変換して長期間貯蔵可能なエネルギーキャリアが必要になる。また、国土の7割が森林地域、6割が山岳地域といわれ、膨大な面積

を必要とする再生可能エネルギーの立地条件に恵まれない我が国が 2030 年以降さらなる再生可能エネルギーの利用拡大を図るためには、海外の再生可能エネルギーにある程度依存することも考えられる。その際、輸送、貯蔵が容易である有機ハイドライドなどのエネルギーキャリアの実用化が必須である。

また、再生可能エネルギーは石油ほどの偏在性がなく、また地政学的な影響を受けることも少ないことから、エネルギー輸入源を多様化することができ、我が国のエネルギー安定供給に資することは明らかである。

③ エネルギーキャリアの技術開発の産業へのインパクト

エネルギーキャリアを基盤とする社会では、化学工業におけるキャリア物質の開発・製造・販売、エネルギー産業におけるキャリア変換およびキャリアによるエネルギー流通サービス、利用側では水素やキャリアのエネルギー変換・消費機器の開発・製造が期待される。

キャリア物質の開発・製造は、既存の化学工業の基盤を応用することができる。利用側機器は、例えば現在の燃料電池開発企業の技術を発展させることが可能である。有機ハイドライドやアンモニアを利用する場合、現在の石油製品流通システムや都市ガスインフラの一部を有効活用できることが利点である。ただし、上述の非常に大規模な水素を輸送・貯蔵するためには、現存インフラを拡張していくことが必要となる。また、国内のみでこのエネルギーネットワークを構築しても効率的ではない。長期的には、国際的ネットワークを構築し、エネルギーキャリアによる国際融通を実施する市場が生まれ、エネルギー企業、商社、金融産業の市場参入が期待される。

また、再生可能エネルギーを入り口としていることから、この領域における市場の拡大、産業の活性化も同時に期待される。特に、我が国は陸上での再生可能エネルギー資源に制約があるものの世界第 6 位の領海を有する海洋国家であることから、洋上風力の急拡大を中心に、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電などの新たな産業の創生が見込まれ、国が目指す海洋国家への構造転換が大いに期待される。

④ 世界をリードする基盤技術推進に向けた政府の役割

我が国では、水素社会の構築に関しては WE-NET (World Energy Network) プロジェクト⁽⁹⁾、水素・燃料電池実証プロジェクト (JHFC)⁽¹⁰⁾、定置式燃料電池大規模実証試験⁽¹¹⁾を経て、燃料電池の研究開発が促進され商品化を実現した経緯がある。実際、このような長期にわたる官民を挙げての技術開発への取組みの結果、燃料電池関連の特許件数は2010年には米国を抜いて世界一になっている (コラム 8)。

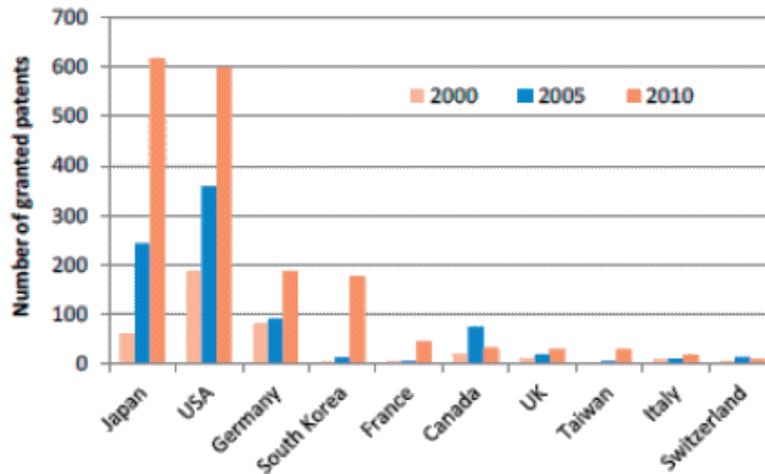


図2 燃料電池関連の登録特許件数。“The 2011 Fuel Cell Patent Review”、FuelCellToday⁽¹²⁾

このように、水素技術開発は政府の強力な支援と民間企業の高い技術力が融合し我が国が世界のフロントランナーとなっている成功事例であり、本提言におけるエネルギーキャリアの基盤技術についても国家として戦略的に推進することで、同様の展開が期待される。エネルギーキャリアに関する技術は現在基礎レベルにあるが、水素の例と同様に政府主導でこれらの領域における研究を進めることにより世界に先駆け技術を確立し、世界を牽引していくことが技術立国の目指すところであり、経済的発展の原動力の一翼を担うものである。

先の効果で見たように、2030年までに実用化が確認され、ある程度市場に導入されることが重要であり、そのような状況になれば恐らく2050年に向けて大きく花開きゼロエミッション社会の到達に大きく寄与する。そのためにも、現段階からの精力的な研究開発の有無が長期的な将来の可能性を大きく左右する。再生可能エネルギーが太宗を占める需給構造を実現するには、再生可能エネルギー大量導入の大きな課題（障害：偏在性、不安定電源、大量輸送の困難性など）を乗り越え得るエネルギーキャリア抜きでは不可能であろう。

コラム7 金属エネルギー

鉄、アルミニウムなどの金属は、天然には酸化物として産出され、これを人工的に何らかのエネルギーによって還元して生産されるものであり、エネルギーの塊である。逆に考えると、これらは酸化するときにはエネルギーを発生するエネルギーキャリアでもあり、一次電池をつくれれば電力を取り出すことができる。鉄はコークス（石炭）によって鉄鉱石から還元され製錬されているが、将来的には化石燃料ではなく再生可能エネルギーで行う必要がある。アルミニウムは現在、電解製錬で生産されているので、電気が安価な国で生産するのが有利であり、資源国はもとより、水力発電により電気の豊富な、例えばカナダの生産量が目立つ（図 C7）^(27,28)。ただし、現状のアルミニウムの電解製錬（ホール・エルー法）は炭素電極の酸化も利用しているので、エネルギーのすべてが電力ではなく、炭素もエネルギー源として必要である。社会に再生可能エネルギーによる電力が大幅に導入されたとき、このように物質生産によって余剰電力を吸収するという考え方は重要である。また既に、再生可能エネルギーの豊富な国でアルミニウムが生産され、日本で利用されていることは、再生可能エネルギーを化学物質として輸入していることにほかならない。

マグネシウムは海水に多く含まれる元素であり、軽合金材料として利用されている。金属マグネシウムをエネルギーキャリアとして用い、電力や熱に変換し利用するというマグネシウムエネルギーシステムも提案されている（付録1参照）。現在、マグネシウムの製法は電解法と熱還元法の2つが実用化されている。電解法は海水から得られるマグネシウム塩を塩化物とした後に、電解製錬しマグネシウムと塩化水素を得る方法で、得られた塩化水素はマグネシウム塩を塩化物にするときに用いられる。米国のダウ社やドイツのイーゲー社によるプロセスが確立している。このような電解の際の電力が再生可能エネルギーから得られ、十分な効率でマグネシウムの生産が行われていけば、マグネシウムは再生可能なエネルギーキャリアであり、電池や燃焼で利用することに大きな意味がある。

しかしながら、現在のマグネシウム生産の主流は熱還元法である。酸化マグネシウムを、ケイ素鉄などを用いて高温で還元する方法（ピジョン法）である。ケイ素も鉄もコークス（石炭）により原料を還元して生産されるものであり、安価な石炭資源による製造方法が氾濫していることになる。化石資源からの物質生産を、いかに再生可能エネルギーからの生産に置き換えるかが、今後の化学技術の目指すところである。

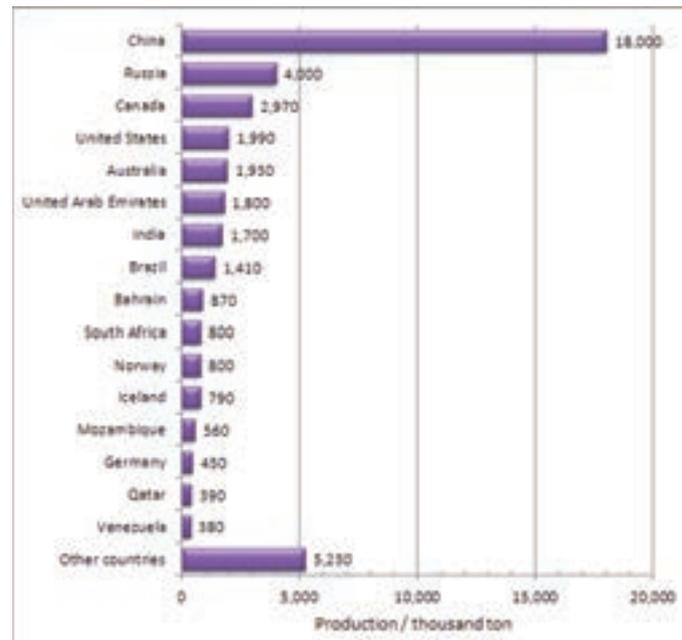
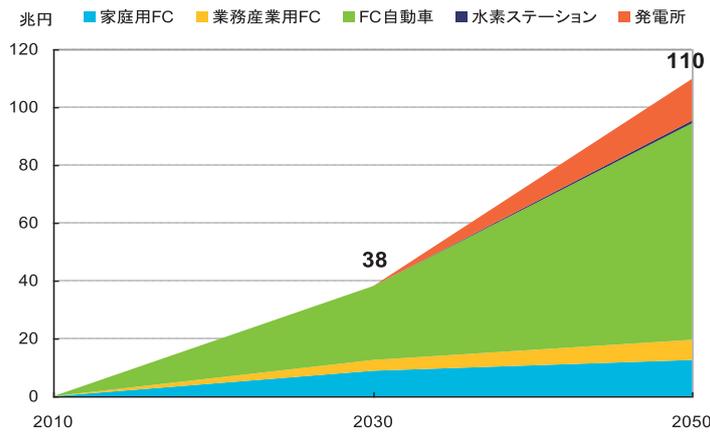


図 C7 世界のアルミニウム新地金生産量 (2011年)⁽²⁷⁾

コラム 8 水素関連の累積投資額

本提案の対象としている技術はまだ基礎研究レベルにあり、市場の予測を行うことは困難である。そこで、これらの技術によって利用拡大される水素関連市場の動向を取り上げる。図 C8 は水素関連の累積投資額を試算したものであり図中の下表に普及台数の前提条件が示してある。この計算に基づくと水素消費量は2030年で320億Nm³(27億kg)、2050年で2,900億Nm³(246億kg)となる。



<前提条件>：普及台数

	2030年	2050年
家庭用FC	530万台	1,450万台
業務・産業用FC	620万kW	1,780万kW
FC自動車	390万台	2,400万台
水素ステーション	2,000箇所	12,000箇所
水素発電所	0万kW	5,800万kW

<前提条件>：価格

	2010年	2030年	2050年
家庭用FC	280万円/kW	50万円/kW	30万円/kW
業務・産業用FC	80万円/kW	40万円/kW	20万円/kW
FC自動車	1,000万円/台	300万円/台	200万円/台
水素ステーション	10,000万円/箇所	5,000万円/箇所	3,000万円/箇所
水素発電所	50万円/kW	30万円/kW	20万円/kW

注：家庭用FCは2030年に世帯の10%、2050年に32%、自動車は2030年に保有台数の6%、2050年に40%がFC（フロー・ストックモデルによる試算）。

注：業務・産業用FCは日本ガス協会のコジェネ導入見通しを参考に想定。ただし、2050年にはすべての新規コジェネはFCになるものとしている。

注：発電所は、大幅なCO₂削減目標が設定されるにもかかわらず、原子力およびCCSがその受容性および立地可能性の面から実現しないと想定したケース。

注：水素ステーションは2,000台/箇所を想定（現在のガソリンスタンドベース）

燃料電池システムの出荷台数であるが、2008年に7,000台であったが2011年には2万2,000台と3年間で市場が3倍に拡大している。この拡大に大きく寄与しているのは日本であり、2009年に世界初となる家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの市場投入とその後の普及拡大による。政府は、2030年に本システムの530万台普及を目標に掲げており⁽¹³⁾、産業用・業務用のコージェネとあわせて累積投資額は、6兆円と見込まれる（再生可能エネルギーは3,000億kWh、累積投資額38兆円）。また自動車メーカー各社は2015年には燃料電池自動車の市場投入を目指していることから、今後も市場拡大が見込まれる。当面は定置用燃料電池や燃料電池自動車向けの水素は天然ガスなどの化石燃料から製造されることになるが、長期的には上述のエネルギーセキュリティの観点からは、再生可能エネルギーからの製造へとシフトしていくことが考えられる。

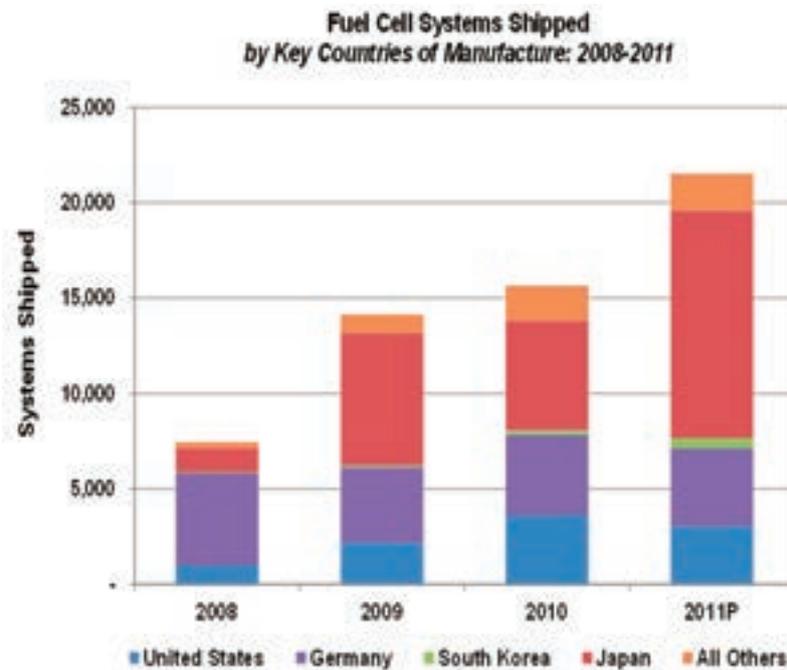


図 C8 国別燃料電池システムの出荷台数の推移。

“2011 Fuel Cell Technologies Market Report”、US DOE より⁽²⁹⁾

2.3. 科学技術上の効果

再生可能エネルギーからエネルギーキャリアへの変換技術、キャリア間の変換技術、キャリアの利用技術の進歩は、触媒化学、電気化学など化学変換にかかる分野のみならず、熱機関、燃料電池など機械工学・化学工学などの分野など、広範囲な学術領域の成長を促すものである。また、基幹エネルギーとなりうるキャリア技術を見出すという視点では、フイージビリティスタディなど経済的な検討や、ライフサイクルアセスメントなどの検討など社会受容性や既存インフラとの適合性など実社会から俯瞰する学術分野の動員も伴う。本領域で中心となる研究課題群と学術分野の広がりを図3に示す。

触媒化学、電気化学などの化学変換においては、根本的にあるのは表面科学、界面科学の視点に立った、分子構造論、化学反応論であり、開発するデバイスの性能だけにとらわれず、基礎的な分子変換の原理を理解する必要がある。次に、有力なキャリア変換技術を見出すためには、触媒化学反応、電気化学反応を行うときの触媒、電極における有望な材料を見出す必要がある。材料科学的な視点をもった研究者の活躍が、本領域では重要になってくる。また、基幹エネルギーを受け持つ可能性のある技術の創出が本領域の目的でもあることから、大量に導入することができる可能性をもたないとならないので、希少元素に頼った材料開発は避けなければならない。元素戦略的な材料科学の発展にも寄与する。さらに、キャリア変換技術を現実的なものにするためには、反応器や燃料電池といったスケールでの、開発設計技術も重要であり、化学工学、プロセス工学、機械工学などへの学術分野の進歩に貢献するものである。また、キャリア利用の大きな柱の一つとして、レシプロエンジン利用、タービン利用が挙げられる。キャリアに基づいた熱機関に関する科学技術は化学のみならず機械工学、燃焼工学に拠るものである。このように、本研究領域はディシプリンを超えた広い学術分野の統合によって遂行されるものであり、分野横断型の共同研究により、分野間の学術的知識が融合され、学術体系の拡充を成すものである。

本研究領域において極めて重要視すべきことは、学術界に基幹エネルギー技術に長けた研究者集団を育成することである。燃料、バルク化成品といったエネルギー物質に関する基盤技術は、ともすれば現在、化石資源に基づいた確立した技術体系があるために置き去りになりがちな分野である。例えば、水素エネルギーという言葉は40年以上も前に生まれ、経済産業省などによる多くのプロジェクトが行われてきたが、一方、化石資源がまだ廉価に使えるために水素エネルギーの導入は進まず、水素エネルギーに関心をもつ研究者はあまり増えていない。アンモニア合成に関しても、人類に欠くことのできない基幹工業技術であるが、既存のハーバー・ボッシュ法で現行社会は満足しているため、これを専門とする科学者は非常に減っている。また、有機ハイドライドも通商産業省（現経済産業省）のWE-NET (World Energy Network) プロジェクト⁹⁾の頃より使われた言葉であり、関連研究者は増えているとは言い難い。本研究領域では、これまで実現していなかった新しいキャリア変換技術に果敢に取り組むとともに、我が国におけるエネルギーキャリア技術の重要性を再認識し、この領域において研究を進める研究者集団を育むことも大きな目標のひとつである。再生可能エネルギー導入のためのキャリアへの変換技術の研究は、再生可能エネルギー導入が遅れているからといって、忘れられた研究領域になってはいけない。科学技術の目指すものは科学者の学術的興味、新規性追求を満足させるのではなく、社会が必要とするものを目指すべきである。エネルギーキャリアに関する研究は、将来の

燃料をどうするかという国家の基盤に関わるものであり、政府により戦略的に研究投資がなされ、多くの科学者が注目すべきものである。本領域の学術分野を形成し、専門家を育て、将来の国家のエネルギー問題に対応できるような体制を整えることも本領域に求められる。

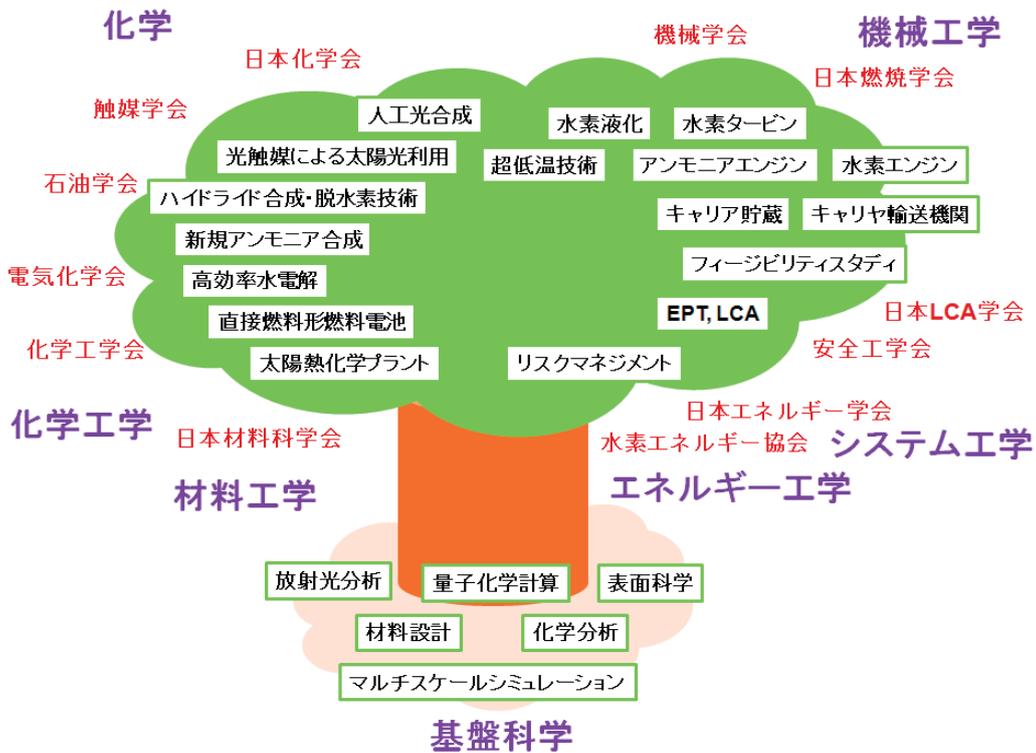


図3 キャリアの基盤技術領域に関連する学術分野

3章 具体的な研究開発課題

再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの研究においては、(1) 再生可能エネルギーや、それによる電力からのキャリア生産技術、(2) キャリア間の相互変換技術、(3) キャリアの電力や動力としての利用技術、(4) キャリアの社会受容性評価やライフサイクル評価、安全性評価、などの4つの分野に分けることができる。それらには、ある程度の既存技術が存在し更なる改良が強く求められる課題群や、基礎研究から取り組まなければならない全く新たな課題群が含まれている。図4に目標とすべき様々なキャリア変換技術が示されているが、おのおのの成熟度は異なり、基礎研究から応用研究までを含む総合的取り組みが必要である。

(1) 再生可能エネルギーや、それに由来する電力からのキャリア生産技術

短期的には再生可能エネルギーは、電力として社会に入ってくることは間違いない。水力発電は確立された技術が既存であり、これから導入が進む風力や太陽熱、太陽光による発電については実用的な技術レベルは確立している。しかしながら、これらの電力からエネルギーキャリアを生産する技術については、水電解技術を有するのみであり、その効率も60～80%とそれほど高くない。まず、高温高圧水電解など高効率な水電解技術や、高分子電解質膜型水電解などの水素製造に関わる基盤技術が課題となる。また、この電力のエネルギーによって水と前駆体から水素を介さずに、有機ハイドライド、アンモニア、メタノールを合成する技術を見出すことが非常に重要な研究課題である。電解水素からこれらのキャリアを合成する反応は発熱反応であり、無駄なエネルギーを放出する(コラム9)。水からこれらのキャリアを直接合成することは、水素をつくるより熱力学的には小さなエネルギーで可能であるため、水素をつくってから反応させるより無駄のないプロセスの構築が可能である。また、再生可能エネルギーによる電力を用いたシステムでは、変動に合わせて運転停止が可能なシステムを考えなければならない。一度運転したら容易に止めることのできない大型化学プラントのようなものでなく、小型の分散型システムが有力である(コラム10)。燃料電池自動車を例にとれば明らかなように、電気化学プロセスは熱化学プロセスより起動停止は比較的容易である。変動のある再生可能エネルギーの平準化の視点が本領域には重要である。

また、長期的には太陽光や太陽熱といった再生可能エネルギーから、電気を介さずに直接、光化学反応や熱化学反応でキャリアを生産する技術を創出することも本領域の課題である。太陽光や太陽熱のキャリアへの直接変換は、人類の夢の化学反応であり、最もシンプルにキャリアを得る方法である。

これらの課題達成には、より高度に原子レベルで構造制御された電極触媒や固体電解質の開発が不可欠であり、分析化学、計算機化学分野のサポートは必須であり、反応メカニズムを詳細に調べる必要がある(コラム11)。水素に関わる電気化学では白金などの貴金属材料が多用されるが、貴金属に頼らないユビキタス元素による材料設計も重要な研究課題である。

本課題群では、例えば、大型風力発電機に併設して設置できるような有機ハイドライドの電解合成技術が完成すれば、不安定な風力発電を系統電源に接続しなくてもよくなり、

離島のような場所に設置しておいても、有機ヒドライドが溜まったときにタンカーで汲み出せばよい。もちろん、アンモニアや他のキャリアで実現できる可能性もある。キャリアによるエネルギー貯蔵は、原理的に二次電池と同様に化学エネルギーでエネルギーを蓄えるものであり、二次電池と異なりエネルギー物質と電極材が一体になっておらず、エネルギー密度が比較にならないほど高い。電解合成による有機ヒドライドやアンモニアの合成は究極の二次電池技術とも捉えることができ、その社会における有用性は大きい。

本課題群に含まれる課題を下記に例示する。

- ① 窒素と水からのアンモニアの電解合成
- ② トルエンと水からのメチルシクロヘキサン電解合成
- ③ 高効率水電解のための材料開発
- ④ 半導体光触媒による光合成的キャリア生産技術
- ⑤ 熱化学サイクルによるキャリア生産

コラム9 キャリア変換のエネルギー

エネルギーキャリアの生産、キャリア間の変換、キャリアの利用においては当然、エネルギーの出入りが生じる⁽²⁾。水素を基とする、有機ヒドライド（メチルシクロヘキサン）、アンモニアの例をとり、エネルギーダイヤグラムを図C6に示した。水を水素と酸素に分解するためには H_2 当たり237 kJ/mol、1.23 Vのエネルギーが必要である（電気化学反応を考え、ギブズエネルギー換算で論じる）。この反応は、既存技術としては、再生可能エネルギーを基とする電力で水電解により行うことができる。また、固体光触媒や金属錯体を用いた人工光合成反応により太陽光から水素をつくることや、熱化学法を用い太陽熱から水素をつくる方法も将来的には可能性がある。水素から有機ヒドライドやアンモニアを合成する際には発熱反応となり、エネルギー損失をすることになる。この熱をいかに利用するかも課題である。また、水と前駆体（トルエンや窒素）から直接有機ヒドライドやアンモニアを電力や光や熱で合成できれば、この発熱の損失は生じない。熱力学的には水を分解するより容易な反応であるが、この技術は未成熟である。

有機ヒドライドやアンモニアを利用する際に、水素に変換してから利用しようとする、水素化で発熱した分のエネルギーを供給しなければならない。特にメチルシクロヘキサンでは得られる水素のエネルギーの1/4程度のエネルギーを脱水素に要するため、このエネルギーをいかにして得るかが課題である。水素を燃料電池やエンジンで利用する際の廃熱や、他の化学プロセスの廃熱利用が有力視されるが、特にオンボード型の小型のシステムなどではどのようにこのエネルギーを得るかは大きな課題となる。直接有機ヒドライドやアンモニアを燃料として、水と前駆体を排出する燃料電池が開発されれば熱力学的理論出力電圧は小さくなるが、脱水素に要する熱の心配は全くなくなる。直接型燃料電池は直接電解合成の逆反応であり、原理的には可能であることが示されているが、実用化までの技術課題は山積している。また、脱水素を熱ではなく電気化学的に行い電気エネルギーで投入するという考え方もある。熱的な脱水素は反応器の熱容量のために、起動停止が困難な場合が多い。電気化学的な反応は電池を考えれば明らかのように、熱触媒反応などよりも起動停止は容易である。電気化学と触媒化学を融合した、エネルギー変換デバイスに関する学術体系の構築が必要である。

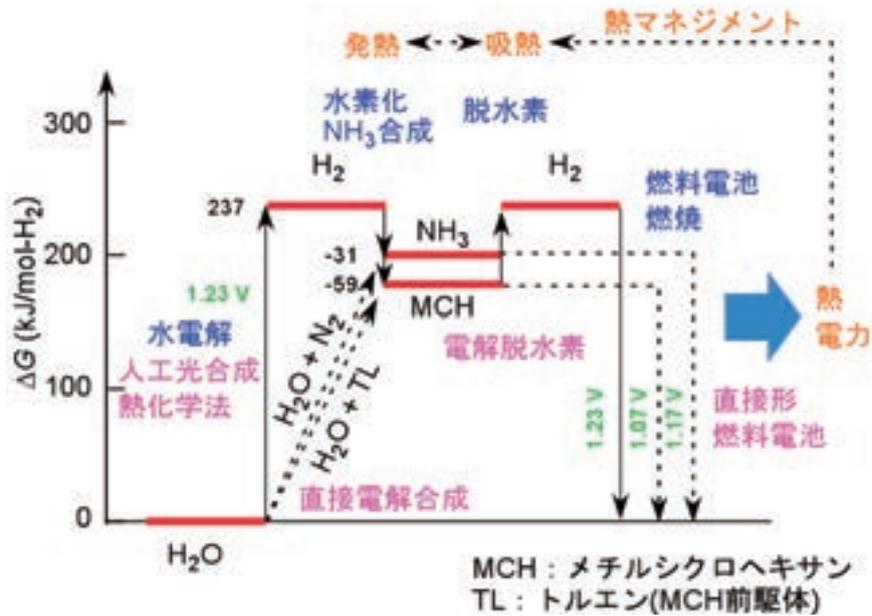


図 C9 有機ハイドライドやアンモニアをエネルギーキャリアとして用いるときのエネルギーダイアグラム。電気化学反応を想定し H₂ ベースの ΔG で示してある。水素化・脱水素過程のエネルギー授受が課題となる。青文字の技術は既存のもので実用的な研究課題が残されていて、桃色字の技術は未成熟なものである。また、熱マネジメントに関して熱工学、化学工学、プロセス工学的な視点も重要である

コラム 10 再生可能水素エネルギー

自動車会社各社が 2015 年に燃料電池自動車 (FCV) を市販すると発表したのを受けて、水素インフラに関わる技術開発は急激に進められている。図 C10 に NEDO が掲げるロードマップを示す⁽³⁰⁾。このロードマップによると、水素の基となるエネルギーは、化石資源の水蒸気改質 (圧力振動分離法 (PSA)・膜反応器) と電力による水電解である。水素エネルギーは 1974 年、当時の通商産業省工業技術院において開始された「サンシャイン計画」に盛り込まれた研究課題であるが、40 年近くを経た現在でも導入はほとんど進んでいない。化石資源に依存するエネルギー社会では、化石資源自体がキャリアであるため、そのまま輸送や貯蔵ができるため、他のキャリアへ変換して用いる必要性は乏しいことが原因である。

一方、再生可能エネルギーの豊富な外国においては、再生可能エネルギーからキャリア生産は既に進んでいる。日本におけるアンモニア生産では、水素源は天然ガス改質や石炭ガス化などの化石資源であるが、諸外国では再生可能エネルギーからのアンモニア生産は珍しくない⁽³¹⁾。古くはノルウェーのリューカンにおいて、ハーバー・ボッシュ法が実用化される前の 1911 年に、水力発電所の電力を用いて、放電法により硝酸カリウムの製造がなされていたが、放電法は効率が悪いことから後に水電解とハーバー・ボッシュ法に置き換わっている。ノルウェーでは数千 $\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$ 規模の水電解プラントが多い。またカナダのトレイルでは 1939 年より、水力発電所の電力による水素生産が 17,000 $\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$ 規模で行われている。エジプトのアスワンにおいてもナイル川のアスワンダム水力発電を利用し 1960 年より電解水素とハーバー・ボッシュ法によってアンモニアおよびそこから得られる窒素肥料を生産している⁽³²⁾。水電解の規模は 37,000 $\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$ でアンモニア生産量は 400 トン/日である。

このように、再生可能エネルギーによる電力からのキャリア生産は古くから組み込まれているが、上に紹介した例はすべてが水力発電によるものである。水力発電は変動がなく、大型の化学プラントと組み合わせるのには好都合である。今後、導入が見込まれる再生可能エネルギーは風力、太陽光、太陽熱などの変動型エネルギーである。例えば、ハーバー・ボッシュ法は現在ではエネルギー効率を極限まで磨きこまれた人類の誇るべき化学技術であるが、高温高圧であり熱マネジメントも複雑で、毎日のように運転停止を繰り返すことはできない。これまで水素エネルギーの製造で用いられていた、化石資源の水蒸気改質器や大型水電解システムと異なった、自動車用燃料電池のように頻繁な変動に対応できるような、キャリア生産プロセスが必要である。

コラム 11 エネルギー研究領域における表面界面科学の基礎研究の貢献

電極や触媒表面で有機ハイドライドからどのように水素原子・水素イオンが引き抜かれていくかを理解することは重要な基礎研究課題である。図 C11 に示すようにシクロヘキサン（注 2）が触媒や電極などの金属表面に吸着した際にはシクロヘキサン環を金属表面に平行に吸着し、環と金属表面に挟まれた C-H 基 3 箇所の C-H 結合が非常に弱められている (CH Softening) ことが、表面振動分光法で明らかになっている⁽³³⁾。このことから、この 3 本の C-H 結合が最初に切断されることが推測されているが、残りの 3 つの H 原子がどのように切断されるかはいまだによくわかっていない。また、シクロヘキサンがこのように平行に吸着し各 C 原子から水素が 1 つずつ引き抜かれればベンゼンに戻り、キャリアとしてエネルギー産出地で水素化して再利用できる。しかし、例えば平行に吸着せずに C 原子 1 つから 2 個の水素が引き抜かれてしまった場合、副生成物生成の引き金になる。何百回、何千回の再生を可能とする水素化・脱水素の電極や触媒には、原子分子レベルでの表面構造制御が求められる。実験的および計算機化学的な反応機構の解明は重要である。

(注 2) 古くは有機ハイドライドとして、ベンゼン⇄シクロヘキサン系が注目されていた時代があるがベンゼンの発癌性や、それに伴う規制強化で、現在ではトルエン⇄メチルシクロヘキサン系が主に用いられる。

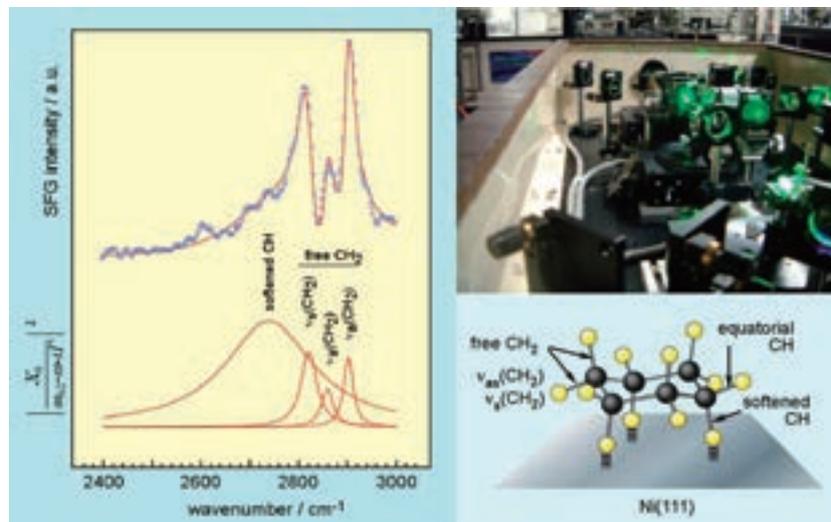


図 C11 金属（ニッケル）単結晶表面に吸着したシクロヘキサンの C-H 結合が緩くなり脱水素されやすいことを示す和周波発生分光スペクトル（左図）、非線形分光装置写真（右上）と吸着モデル図（右下）⁽³³⁾

(2) キャリア間の相互変換技術

キャリア間の高効率変換技術にも研究課題が存在する。例えば、水素と窒素からアンモニア合成反応は数百気圧を必要とする高圧反応であるが、常圧で合成ができれば簡素なシステムで水素をアンモニアとして貯蔵できる。また、水素は現時点で燃料電池やエンジンで利用することが比較的容易であるため、各キャリアから水素への変換技術の開発は重要である。例えばメチルシクロヘキサンなどの有機ヒドライドでは、前駆体のトルエンが水素のキャリアの役目を果たし、何回も繰り返し水素化・脱水素が行えなければならない。有機ヒドライドの分解や酸化など副反応を極限まで抑える触媒技術の開発が必要である。特に、脱水素時は温度が高くなるため、副反応を併発しやすく、これを抑える技術に研究課題が残る。水素化・脱水素が選択的に水素を放出する反応は吸熱反応であり、このエネルギーが問題となるが、再生可能エネルギーに基づいた電力による電気化学的な水素の放出や、キャリアのエネルギーを用いた熱発生プロセスの構築も研究課題である。また、各キャリアから水素への変換は吸熱反応である場合が多い、この熱エネルギーをどのように得るかも課題である。通常は触媒反応として熱でエネルギーを供給するが、電気化学反応で吸熱分のエネルギーを電力として投入する可能性も考えられる。

本課題群に含まれる課題を下記に例示する。

- ① 常温常圧アンモニア合成触媒開発
- ② 有機ヒドライド水素化・脱水素触媒の副反応抑制
- ③ 有機ヒドライド水素化・脱水素触媒の非希少材料化
- ④ 有機ヒドライド・アンモニアの水素化・脱水素プロセスの熱設計
- ⑤ 有機ヒドライド・アンモニアの水素化・脱水素プロセスのオンボード化

(3) キャリアの電力や動力としての利用技術

キャリアを電力や動力として利用する技術の開発は、キャリア生産、変換の技術と同時に推進しておく必要がある。アンモニア、有機ヒドライド、メタノールなどのキャリアの直接燃料形燃料電池は、キャリア利用において極めて効率的な方法だが、その技術レベルは未熟であり本領域で推進すべき研究である。例えば、これらの直接燃料形燃料電池が現在の水素燃料形燃料電池と同程度の性能になれば、燃料電池車の燃料として、これらのキャリアを積載する可能性も出てくる。水素に改質しないで用いることができるシステムは簡素であり、自動車用、家庭用などの小型分散型発電機器に容易に導入することができるので、これらのキャリアの普及を強く促進するものである。電解合成と燃料電池の両方が実用レベルになれば、これらは二次電池と全く同等であり、電力を蓄え、必要な時に放出できるデバイスになる。

アンモニアは直接燃料としてレシプロエンジンやタービンを作動させることができるが、燃焼特性が一般的な燃料と大きく異なるために、その実現には多くの研究開発が必要になる（コラム 12）。未燃ガスの処理なども炭化水素燃料と大きく異なるので、排ガス処理にも課題が残る。また、キャリアの改質器をエンジンと組み合わせ、有機ヒドライドやアンモニアから水素を取り出し水素エンジンを動作させることができるが、エンジンの廃熱が改質器の適正な熱源となるような熱設計を詳細に検討する必要がある、エンジンシステムとして確立させることも課題となる。

また、上記を含めた3項目について、燃料電池や電解システム、変換触媒には貴金属が使用されることが多い。希少材料を使わずして、求められる性能を得るための研究開発も中長期的な課題である。

本課題群に含まれる課題を下記に例示する。

- ① キャリアを直接燃料とする形燃料電池の電極触媒開発
- ② 脱水素反応器と燃料電池の複合システムの設計
- ③ 非希少材料を用いた直接キャリア燃料形燃料電池の開発
- ④ エンジンと脱水素反応器の複合システムの設計
- ⑤ キャリア燃料直接投入型のエンジンと排ガス処理技術の開発

コラム 12 アンモニアエネルギー社会

有機ハイドライドは経済産業省の WE-NET (World Energy Network) プロジェクト (1993~2002) の頃よりエネルギーキャリアとして取り組みがなされている比較的古くから研究されているキャリアである。近年、アンモニアがエネルギーキャリアとして有望であるという見識が広がり、2006年に米国エネルギー省 (DOE) の水素エネルギーの部局ではアンモニアのエネルギーキャリアとしての可能性をレポートとしてまとめている⁽³⁴⁾。これによると、米国には肥料および化学原料のアンモニア輸送のため、図 C12で示されるように4,950 kmにも及ぶアンモニアパイプラインが既に使われていて、アンモニアをエネルギーキャリアとして使う場合に有効に利用できるとしている。アンモニアは世界中で年1億4,000万トンも生産され流通しているの、インフラが整っていることがメリットの一つである。特に米国においては、アンモニア燃料の協会 (NH₃ Fuel Association) があり、アンモニア燃料の学術会議 (Annual NH₃ Fuel Conference) が2004年より毎年開催されている。また、アイオワ州立大学に併設されているアイオワエネルギーセンターでは再生可能エネルギーの一環としてアンモニアエネルギーの部門を置き上述の協会と共同し活発な研究活動を進めている⁽³⁵⁾。米国のアンモニアエネルギーに対する期待は諸外国より顕著である。



図 12 米国のアンモニアパイプライン (左図、DOE 資料)⁽³⁴⁾、米空軍と NASA により 1959 年に開発されたアンモニアを燃料とするノースアメリカン X-15 型試作機 (右上図)、アンモニアエンジン (右下図、右上下図はアイオワエネルギーセンター資料)⁽³⁵⁾

(4) キャリアの社会受容性評価やライフサイクル評価、安全性評価

本領域で検討されるキャリアが、社会に取り入れられるかどうか、経済性、既存インフラ、ライフサイクル評価、安全性、環境影響などの評価が課題として挙げられる。有機ハイドライドなどでは小規模ながら、風力発電からのキャリア生産の実証実験が進められているが（コラム 13）、他のキャリアについても同様な取り組みを通じて経済性や安全性の検討も必須である。当然、上記の 3 項目に含まれる課題から、有望な変換技術が開発されれば、どのキャリアが有望かという評価は変化していくものと考えられる。各種の変換技術の開発の進捗を睨みつつ、有望なエネルギーシステムを提案していくことが課題である。

本課題群に含まれる課題を下記に例示する。

- ① 各種キャリアの経済性評価、フィージビリティスタディ
- ② 各種キャリアが環境中に漏えいしたときの環境負荷性の検討
- ③ 各種キャリアの人体への毒性、健康影響性の評価
- ④ 各種キャリアの爆発などに関する安全性の検討
- ⑤ 既存インフラの流用性や社会の法規制などの検討

様々な再生可能エネルギー、およびそれを基とした電力からキャリアへの変換、キャリア間の変換、キャリアの利用法について図 4 にまとめた。多くの変換技術は未成熟であり、現状の技術では多段階の経路を経て変換する必要がある。多段階の変換はエネルギー損失が大きい。また、既存の技術でも変換効率が十分でないものも多く、また多量の希少材料使用や、材料劣化が激しいなどの問題点をはらむものも多い。



図4 様々なエネルギーキャリア間の変換 (赤字で示される変換技術は既存技術は存在するが更なる進化が必要なもの、黒字で示される変換技術は有用であるが基礎研究段階にあり、今後その実用化の可能性を探るべきものである。)

コラム 13 地域におけるエネルギーキャリアへの取り組み

日本国内の陸地において風力発電に向いている地域は北海道など一部にしかない。日本最北端の稚内市では、稚内新エネルギー研究会と(株)フレイン・エナジーによって、風力発電で水素を生成し、その水素を有機ハイドライド化し貯蔵する実験を2008年から行っている^(36,37)。風況のよい稚内で発電したエネルギーを有機ハイドライドに変換し貯蔵、輸送する試みを進めている。自然エネルギーが豊富な地域で、エネルギーキャリアを生産し、消費地に送ろうとする視点は重要であり、将来は地域規模ではなく地球規模で国家的に考えるべきであろう。本研究領域は、このような取り組みに、より高効率にキャリアを生産し利用する技術を提供し、このような取り組みにおいて露呈した現在の技術の問題点を解決するものである。例えば、上記の稚内市の取り組みにおいても、有機ハイドライドが風力発電の電力と水から高効率で直接電解合成できれば、気体水素の量や圧力を管理する必要がなくなり、また水素化反応装置も要らなくなるので運転停止の容易なシンプルなプロセスになる。経済産業省などと密接に連携し、実証実験への可能性も視野に入れた研究開発も必要である。また、化石燃料が廉価に存在する現時点で、行き過ぎた実証試験は、コストが見合わないために頓挫することになる。再生可能エネルギーの導入状況を見極めながら、慎重に実社会に導入できるように、先を見据えた息の長い研究開発が必要である。



図 C13 稚内新エネルギー研究会・(株)フレイン・エナジーによる風力発電からのエネルギーキャリア（有機ハイドライド）生産の共同公開実験（左写真）⁽³⁶⁾。稚内公園の風力発電設備（右写真）。製造した有機ハイドライドは札幌に輸送され環境・エネルギー・まちづくりサミット」の中で水素自動車デモンストレーションに使用された

4章 研究開発の推進方法および時間軸

① 研究開発の推進方法

エネルギーキャリアに関する基盤技術研究には、中立的な立場からシステム全体を俯瞰できる大学、公的研究所などを中心とした、幅広い研究分野の研究者の連携が必要である。電気化学と触媒化学が再生可能エネルギーを基とした電力からのキャリア生産、キャリア間の変換、キャリアの利用技術において中核となる研究分野である。これらの化学は、表面科学、計算機化学、物理化学、材料科学などの基礎科学によって支えられているものであり、キャリアの基盤研究を推進するにあたっては、これらの基礎科学の推進も充実する必要がある。例えば、固体酸化物型電解質を用いた燃料電池や電解技術は固体イオニクスの研究分野であり、化学のみならず機械工学分野の研究者も非常に多い。これらの分野間の協調によってキャリアの基盤研究は推進されるものである。図3には研究課題群の周囲に関連する諸学会の例が記されている。このような多くの学会を包括した広いコミュニティの協力が必要である。

また、電気化学と触媒化学に関するキャリアの基盤研究においては、化学工学的アプローチも重要である。電極材料や電解質材料の化学的性質は、変換プロセスにおいて最も重要なファクターとなるが、物質移動や熱移動など微視的および巨視的サイズにおける化学工学的過程がプロセスの性能を決めていることも多い。化学反応から物質・熱移動までをマルチスケールで検討できる視野をもつ研究者の参画が必須である。学術界においては、電気化学、触媒化学、化学工学は学会体系が別個であり、これらすべての学会で活躍している研究者は多くない。本研究領域では、これらの分野を統合したエネルギーキャリア技術に関する研究プラットフォームを提供する必要がある。

エネルギーキャリアに関する技術は、社会に直接貢献できるものでなければならない。このため、産業界からの参画、特に産業界から大学、公的研究所の研究者への意見が伝わるシステムが重要である。特に石油会社、ガス会社、電力会社、化学会社などエネルギーやキャリアに密接に関連する企業は、研究の進捗状況を俯瞰し把握する必要がある。さらに、産業界から現状の技術の問題点、開発課題が大学、公的研究所の研究者へフィードバックされることが重要である。例えば、燃料電池技術の研究開発において、大学、公的研究所の研究者が主体となっていくが、スケールアップ、実証実験などが必要な段階にある研究課題においては、文部科学省の下での研究支援のみならず、経済産業省においてさらに実用化を目指した加速研究開発が必要になる。このため文部科学省、経済産業省との連携の下に、本研究領域は展開すべきものであり、研究開発の進捗が目覚ましい課題群については、早急な経済産業省からの開発支援が望まれる。エネルギーキャリアに関しては、既に小規模の実証実験が始まっている例もある。大学、公的研究所の中の研究に留まらず、経済産業省のプロジェクトとして実社会につなげる取り組みが必要である。研究成果は、エネルギー政策担当者、人文社会の研究者、一般国民にも広く提供されるべきものであり、社会の様々な分野の専門家と意見交換を行いつつ、研究は推進されるべきである。また、エネルギー関連技術の研究開発であり、得られる知財は国益上重要である。研究成果を公開する前に知財の権利化については十分に検討が必要で、そのサポート体制も必要である。

② 時間軸に対する考察

社会に貢献可能なエネルギーキャリアの研究開発を進めるにあたって、前節で述べた大学、公的研究所の研究者が主体となって行う基礎的研究と、スケールアップ、実証実験などが必要な応用研究のそれぞれを同時に進めることが肝要である。基礎的研究課題においては、文部科学省の下での研究支援により、特定のキャリアに限ることなく、広い視点でのエネルギーキャリアの製造・貯蔵・利用の各要素技術を3年～5年程度のスパンで行う必要がある。一方で、経済産業省の研究支援による、より実用に近いフェーズにおいては、キャリアのもととなる水素製造の高度化をまず進めるべきであり、それに引き続いて文部科学省支援による基礎研究の中でエネルギー効率・コストなどの観点から最適化された技術の実用化を進めるべきと考えられる。このような文部科学省、経済産業省との連携の下で時間的な位相の違いを持たせた基礎・応用研究の展開を進めるとともに、さらには実用化が視野に入った時点でインフラ整備・利用機器展開での公的な支援が必要になると考えられる。これらが円滑かつ連続的に進められることで、再生可能エネルギーの大量導入を視野に入れた大規模なエネルギーキャリア利用が可能になると考えられる。その際の中長期ロードマップイメージを図に示す。最終的にはエネルギーキャリアの海外生産・国内備蓄を行うことで、再生可能由来電力の25～35%に相当する量を導入可能になると考えられる⁽¹³⁾。

本研究領域は長期にわたるであろう再生可能エネルギーの社会導入に沿って進める必要があるため、自ずと長期的な研究推進になる。3年程度の短期間では再生可能エネルギーの社会導入はそれほど進んでいないため、研究成果の活用もできず意味のない研究になりかねない。ところどころで研究の進捗状況を吟味しつつ、10年先まで続く息の長い研究体制を敷くことが重要である。さらには本領域の研究推進が終了した後に、研究成果を精査し実用化の可能性の高い技術に課題を絞りながら、エネルギーキャリアに関する新たな領域を立ち上げることが望ましいと考えられる。本領域の課題は、携帯電話、液晶テレビのように一過性の技術ではなく、人類が永遠に取り組みなくてはならない課題群であることに留意しなければならない。

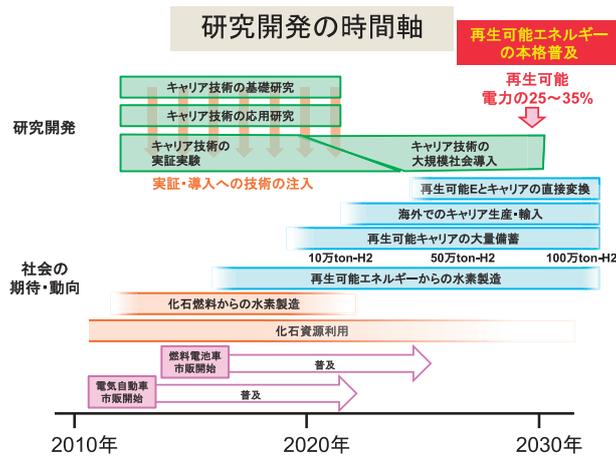


図3 中長期スパンでのエネルギーキャリアの展開。再生可能エネルギー：2030年までに3,000億kWh（3倍）以上開発は国家戦略室・革新的エネルギー・環境戦略（平成24年9月14日エネルギー・環境会議決定）による⁽¹³⁾

付録 1 検討の経緯

① 検討の経緯

研究開発戦略センター（CRDS）では、科学技術に対する社会の期待に応え、豊かな持続性社会を実現するための最重要課題として取り組むべき研究開発戦略を提言している。特に、エネルギー・環境に関わる研究領域は社会の基盤を成すものであり、我が国が世界に貢献し、また世界の科学技術をリードする上で最も重要視されるべき課題である。平成 23 年 8 月 19 日に閣議決定された第 4 期科学技術基本計画においても⁽¹⁴⁾、東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故により露呈された我が国のエネルギーの脆弱さと、地球規模でのエネルギー・資源の獲得競争激化は特に指摘されるところである。

エネルギーキャリアに関わる研究戦略は、現在の化石資源に頼るエネルギー社会を将来的に何にどのように置き換えていくかに関わり、我が国の環境（Environment）、エネルギー（Energy）、経済（Economy）の 3E の視点から最も重要な領域である。現在、震災を経た我が国では、新たなエネルギー基本政策を明確にできないままにある。特に、原子力発電の問題は、我が国のこれまでの原子力政策とも深く絡み、にわかに原子力の廃止や推進などを判断し得ない状況にある。世界各国を見渡すと、近年の再生可能エネルギーの導入は顕著であり、その有効利用は極めて重要な課題である。そして、再生可能エネルギーの有効利用は、我が国のグリーンイノベーションの中核をなすべき科学技術領域でもある。

これらの社会情勢を鑑み、CRDS の環境・エネルギーユニットでは、平成 23 年度にエネルギーキャリアの変換技術に関する研究領域の提言の骨子をまとめた。その後、平成 23 年度中に CRDS 環境・エネルギーユニットによる専門家へのヒアリング調査、科学技術振興機構（JST）戦略研究推進部における領域調査や、文部科学省内における省内検討などの各機関における検討状況を受け、平成 24 年 5 月に本領域をさらに深く検討するために CRDS 内に「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術チーム」を環境・エネルギーユニットと JST 戦略研究推進部の構成員によって発足させた。平成 24 年 7 月には下記のワークショップを企画、開催し、客観性および信頼性のある提言を目指した。CRDS の所定の審査過程を経た上で、平成 24 年度末において本研究領域を CRDS より戦略プロポーザルとして提言するに至った。

② ワークショップの概要

平成23年7月28日に、科学技術未来戦略ワークショップ「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術」を開催し、キャリア研究の現状と、国として研究投資を重点的に行うべき課題を、専門家との議論を通じて広く俯瞰し整理するとともに、研究を支援する場合の内容や方策について検討を行った。詳細は報告書⁽¹⁵⁾を参照されたい。以下にワークショップの要点をまとめる。

セッション1においては「再生可能エネルギー導入に向けたエネルギーキャリア技術の必要性」として、社会におけるキャリアの必要性や経済性、社会受容性など広い視点から、大学、シンクタンク、石油企業の有識者から講演を頂き、討論を進めた。日本の再生可能エネルギーの賦存量は日本の基幹エネルギーとなるには不十分であることが紹介され、外国からの輸入は避けられないことが確認された。また、揚水発電などによって電力平準化は図られているが、これも用地が限定的であり再生可能エネルギーの長期変動や大規模導入に耐えられないことが紹介された。再生可能エネルギーを価格的に最も安く電力に変えられる風力発電は魅力的な手法であるが、これを利用するためには風況の良い高緯度地域での発電が必要で、そのエネルギーの輸送には水素や他のキャリアで運ぶという現実的な選択しかないことが示された。さらに、再生可能エネルギーの豊富な地域と連携し、日本にエネルギーを輸入するシステムを構築できれば、再生可能エネルギーは我が国の基幹エネルギーとして位置付けられるようになり得ることが紹介された。

また、再生可能エネルギーによって得た電力をキャリアに変換して大陸間輸送した場合のフイージビリティスタディについても紹介された。各種のキャリアを用いた場合のコスト計算が紹介され、どのキャリアもコストは非常に近く、技術がわずかでも成長すれば、どのキャリアが有力か変わり得ることが示された。また、再生可能エネルギーの価格は化石資源の価格よりは高くなり、政策的な再生可能エネルギー導入の必要性なども議論された。

有機ハイドライドのような既存の石油インフラを利用しやすく、安全性や環境性が石油に近いキャリアは、社会に導入しやすいことが説明された。石油や天然ガスに関する既存インフラを利用することは、設備コストを低減し早期の導入が見込める。また、有機ハイドライドの水素化・脱水素の変換は無駄な熱の出入りがあり（コラム9）、これをいかに無くすかも重要な研究課題であることが紹介された。このために、電力と水からの有機ハイドライドの直接合成などの技術の必要性が指摘された。

セッション2においては「再生可能エネルギーまたはそれを基とした電力からのエネルギーキャリアへの変換」と題し、キャリアの生産技術に関する様々な要素技術の現状が大学研究者から紹介された。電力と水から、有機ハイドライドやアンモニアを直接生産することは、水素を生産することよりも原理的に小さいエネルギーで行えることから、その直接生産プロセスはに期待される技術であるが、基礎研究レベルにあることが説明された。研究室レベルで実現はしているが、まだ実用化には程遠く、多くの研究者による推進が必要であることが議論された。我が国の電解工業技術や電池技術は世界に秀でているため、これを応用したキャリアの電解合成技術の重要性が確認された。

再生可能エネルギーから水素が得られれば、CO₂と反応させて、既存の様々な化石燃

料と同等なものが合成できることが紹介された。これは既存の化石燃料によるインフラをそのまま利用できるが、将来的にはCO₂をどのように得るかなどの本質的な問題も含んでいる。

金属や低酸化状態金属酸化物は酸化する際にエネルギーを放出するキャリアである。マグネシウムのような金属は、工夫をすると金属空気電池として用いることができることが紹介された。これはLiイオン電池よりも容量が大きく、電気自動車の実用化を推進できる可能性がある。放電した後の酸化マグネシウム（金属塩）から金属に戻すプロセスをいかに再生可能エネルギーで行うかがポイントであることが示された（コラム7）。

人工光合成のように太陽光エネルギーから電力を介さずに直接キャリアに変換することは、人類の昔からの夢の科学技術である。この技術の現状について説明がされ、ここ数年で急速に進展していることや、世界中で大きな研究プロジェクトがあり、極めて注目されている分野であるが、依然日本が最先端を進んでいることが説明された。

セッション3においては「エネルギーキャリアから電力・動力への変換」と題し、キャリアを電力や熱、動力で利用する技術が大学研究者から紹介された。キャリアから直接電力に変換する直接形燃料電池は高温型、すなわち脱水素反応と電極反応が一体化したものでないと難しいことが述べられ、真の直接形燃料電池はまだ基礎レベルにあることが説明された。脱水素反応と電極反応を上手く組み合わせた燃料電池が現時点では有力であることが説明された。燃料電池のエネルギー損失と、脱水素反応の吸熱を上手くバランスさせ組み合わせることが肝心であることが示された。

アンモニアなど直接燃焼させて使えるキャリアの自動車エンジンでの利用は、燃焼特性の違いからハードルが高いことが説明された。キャリアはエンジンの廃熱で脱水素反応させ、得られる水素でエンジンを回すことが短期的には有望であることが示された。

セッション4においてはすべてのセッションを振り返り総合討論を行った。キャリア変換技術の効率を決めている問題点を確認し、克服する方法について議論が進められた。またキャリアは安全性や環境性についての検討が十分に必要であることが議論された。キャリアを社会に導入するために必要なことについて議論が進められた。再生可能エネルギーの導入は、市場経済任せでは導入が進まないの、国の主導が必要であることが指摘された。

以上から、本戦略プロポーザルで提言する内容が、我が国が取り組むべき最重要課題のひとつとして適切であるということが確認された。

ワークショップのプログラム、参加者リストを以降に記す。

ワークショッププログラム

- ・日時：平成 24 年 7 月 28 日（土）9：30～17：00
- ・場所：科学技術振興機構（JST）東京本部地下 1 階 JST ホール
（東京都千代田区四番町 5 - 3 サイエンスプラザ）
- ・オーガナイザー 笠木伸英 JST-CRDS 上席フェロー
- ・プログラム

総合司会 久保田 純（CRDS 特任フェロー／東京大学 准教授）

9:30～10:00 開会挨拶、開催趣旨の説明

笠木 伸英（JST-CRDS／東京大学名誉教授）

WS 課題設定（戦略スコープ紹介）

久保田 純（CRDS 特任フェロー／東京大学）

セッション 1 再生可能エネルギー導入に向けたエネルギーキャリア技術の必要性

10:00～10:30 偏在する自然エネルギーの輸送・貯蔵の必要性 再生可能エネルギーとその貯蔵・輸送 太田 健一郎（横浜国立大学）

10:30～11:00 キャリアを用いた地球規模でのエネルギーの貯蔵・輸送のフィージビリティ 村田 謙二（エネ総工研）

11:00～11:30 将来のエネルギーキャリア ～その課題と期待～

壺岐 英（JX 日鉱日石）

セッション 2 再生可能エネルギーまたはそれを基とした電力からのエネルギーキャリアへの変換

12:20～12:45 マグネシウム文明の夜明け 矢部 孝（東京工業大学）

12:45～13:10 再生可能エネルギーによる電解でのエネルギーキャリアの生産

光島 重徳（横浜国立大学）

13:10～13:35 アンモニアの電解合成による製造 伊藤 靖彦（アイ' エムセップ）

13:35～14:00 再生可能エネルギーと CO₂ からの有機燃料生産 椿 範立（富山大学）

14:00～14:25 太陽光からのエネルギーキャリア生産に向けた人工光合成の現状と課題

井上 晴夫（首都大学東京）

セッション 3 エネルギーキャリアから電力・動力への変換

14:40～15:05 アンモニア燃料電池など様々なキャリアの直接及び間接形燃料電池

江口 浩一（京都大学）

15:05～15:30 水素を介しない充電可能な高容量有機ハイドライド燃料電池の開発

市川 勝（東京農業大学）

15:30～15:55 エネルギーキャリアと自動車

首藤 登志夫（首都大学東京）

セッション 4 総合討論

15:55～16:55

モデレータ 関根 泰（CRDS フェロー／早稲田大学）

16:55～17:00 まとめ・閉会挨拶

笠木 伸英（JST-CRDS）

ワークショップ参加者リスト

(敬称略、所属・役職は WS 開催時点)

氏 名	所 属	役 職
講演者 (講演順)		
太田 健一郎	横浜国立大学 大学院工学研究院 グリーン水素研究センター	センター長／ 特任教授
村田 謙二	(財) エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部	副参事
壺岐 英	JX 日鉱日石エネルギー株式会社 中央技術研究所水素・FC 研究所 水素貯蔵・輸送グループ	グループ マネージャー
矢部 孝	東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻	教授
光島 重徳	横浜国立大学 大学院工学研究院 機能の創生部門	教授
伊藤 靖彦	アイ' エムセップ株式会社	代表取締役／ 京都大学名誉教授
椿 範立	富山大学 大学院理工学研究部 工学系 分子反応工学分野	教授
井上 晴夫	首都大学東京 大学院都市環境科学研究科	教授
江口 浩一	京都大学 大学院工学研究科 物質エネルギー化学専攻	教授
市川 勝	東京農業大学 総合研究所	客員教授
首藤 登志夫	首都大学東京 大学院理工学研究科 機械工学専攻	教授
エネルギーキャリアチームメンバー		
笠木 伸英	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	上席フェロー／ 東京大学名誉教授
久保田 純	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット／ 東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻	特任フェロー／ 准教授
関根 泰	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット／ 早稲田大学 理工学術院 先進理工学部	フェロー／ 教授
鈴木 至	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー
中村 亮二	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー
宮下 永	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー
徳山 亜季	JST 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ	主査
上田 孝	JST 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ	主任調査員
府省関係者		
村上 正吾	内閣府 政策統括官 (科学技術政策・イノベーション担当) 付総合科学技術会議事務局 総合科学技術会議事務局 "	参事官 (グリーン イノベーション担 当)
篠崎 資志	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	環境エネルギー 課長
福井 俊英	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	環境科学技術 推進官
鈴木 せいら	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	総括係
工藤 研一	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	科学技術・ 学術行政調査員
吉田 健一郎	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	企画官

嘉藤 徹	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	研究開発調査官
高田 優	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	研究開発専門職
石田 豊和	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	研究開発専門職
北岡 康夫	経済産業省 製造産業局 ファインセラミックス・ナノテクノロジー材料戦略室	産業戦略官
鈴木 俊男	経済産業省 製造産業局 ファインセラミックス・ナノテクノロジー材料戦略室	産業技術企画調査員
JST 関係		
金子 博之	経営企画部 科学技術イノベーション戦略室 グリーンイノベーション戦略チーム	チームリーダー
嶋林 ゆう子	経営企画部 科学技術イノベーション戦略室 (グリーンイノベーション戦略チーム)	主査
永井 諭子	低炭素社会戦略センター 企画運営室	主査
門平 卓也	低炭素社会戦略センター／物質・材料研究機構 つくばイノベーションアリーナ推進室	客員研究員／ 主任エンジニア
古川 雅士	戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ	調査役
鈴木 ソフィア沙織	戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ	副調査役
中本 信也	研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
福田 哲也	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー
増田 耕一	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー

付録 2 国内外の状況

再生可能エネルギーの導入は CO₂ の排出削減のため、各先進国で精力的に取り組まれている（コラム 3 参照）。全電力における再生可能エネルギーの割合が急速に伸びているドイツやスペインでは太陽光や風力の割合が大きいため、電力変動の問題を抱えている。このため、ドイツにおいては余剰電力により CO₂ からメタンを生産し、天然ガス網に送るというプロジェクトが SolarFuel という名で行われている（コラム 4）⁽³⁾。2015 年に 20 MW 級での実証試験を目指している。これは、太陽光や風力と、水と CO₂ から有用炭水化物と O₂ が得られるために人工的な光合成であるとプロジェクトは述べている。天然ガス網はエネルギー貯蔵に十分な容量があるのは明らかであり、現在の天然ガスインフラを用いながら化石資源の利用を減らす効果が見込まれる。また、バイオ燃料生産のように太陽光のエネルギー変換効率が 0.5% というのではなく、60% 程度の変換効率が得られるとしている。（注：これは、電力からの変換効率であるので正しい比較ではない。太陽電池の効率を 10% とすれば 6% である。）また、イギリスで日本の企業が、再生可能エネルギーによる発電に余剰があるときに、水素を生産し燃料電池車に供給する試験を始めている⁽¹⁶⁾。

また、古くより水力資源の豊富な北欧では、電解水素を基にした HyNor⁽¹⁷⁾ や The Scandinavian Hydrogen Highway Partnership⁽¹⁸⁾ など、車社会のための水素供給実証実験が盛んである。このため、水電解技術や燃料電池技術には高い興味もたれている。しかし、燃料電池車の市販が始まっていない現在では、水素インフラの普及に重点が置かれ、貯蔵可能なキャリアに変換するという技術では SolarFuel が優れている。

一方、米国では DOE によって ElectroFuels プロジェクトが進んでいる。これは再生可能エネルギーによる発電や、原子力発電などから CO₂ と水を用いて、ブタノールやディーゼル燃料など既存の自動車の代替燃料として用いることのできる炭化水素類を生産するための基礎研究である。特に微生物的な電気化学反応を利用するところに特徴がある。また、米国では NSF（National Scientific Foundation）の The Powering Planet プログラム（2008～）の頃より、Solar Fuel という言葉は、再生可能エネルギーを基とした化学燃料として、広く使われている。特に The Powering Planet では、ナノ構造制御された光電気化学手法により人工光合成的に Solar Fuel を生産することが注目されていた。

国内における、エネルギーキャリア研究は通商産業省（現経済産業省）の WE-NET（World Energy Network, 1993～）⁽⁹⁾ の頃より注目を集めている研究分野である。WE-NET では 8 年間にわたり、企業を中心とした研究投資が行われた。経済産業省による企業中心のプロジェクトであったために、比較的有力視されていた液体水素や有機ハイドライド技術の進展には多大なる成果を与えた。現在の燃料電池自動車や水素ステーションの技術は WE-NET の成果であるといっても過言ではない。しかしながら応用研究に偏っていたために、本プロポーザルで提言している各種の変換技術についての基礎研究は注力されていなかった。

現在、我が国においては米国・ドイツの「Solar Fuel」のような再生可能エネルギーに基づいて生産された化学燃料を示すような言葉は普及していなく、欧米諸国に比べて再生

可能エネルギーによる燃料生産に関して遅れているといわざるを得ない。

韓国、中国などのアジア諸国において、再生可能エネルギーに基づいたキャリアの生産について、学术界産業界からの注目度は高くない。太陽電池やリチウムイオン電池については韓国、中国は目覚ましい発展を遂げているが、再生可能エネルギーからのキャリア生産の科学技術については、欧米先進国に十分な例がないために追従すべきものがない。特に韓国は、地勢的に我が国と同様、自然エネルギーが豊富とは言い難く、再生可能エネルギーの導入は我が国と同様に明らかに再生可能エネルギー先進諸国に遅れている。一方、中国は再生可能エネルギーの賦存量が豊富であり、その導入は進んでいる。しかし、いまだ再生可能エネルギーからのキャリアの生産の科学技術は持ち合わせていない。再生可能エネルギーからのキャリア生産の技術において、中国は再生可能エネルギー導入量の豊富さから、日本より技術開発が優位に立つ可能性があり、予断は許せず一刻も早い我が国の研究開発が必要である。

付録3 専門用語解説

1) エネルギーキャリア

狭義ではエネルギー媒体となる高い化学エネルギーをもった化学物質。化学燃料。現在の人類が用いているエネルギーキャリアは液化石油ガス、ガソリン、軽油、重油などの石油由来の物質、メタンなど天然ガス、炭素を主成分とする石炭である。力学的にエネルギーをもった物体（風力の風（大気）など）もエネルギーキャリアと表現できなくはないが、本プロポーザルでは化学エネルギー媒体と定義する。

2) 有機ハイドライド

トルエンに水素を反応させるとメチルシクロヘキサンになる。これは脱水素反応によりトルエンと水素に戻すことができる。このメチルシクロヘキサンのようなものを有機ハイドライドもしくはケミカルハイドライドと呼ぶ。トルエンでなく CO_2 を用いジメチルエーテル、メタン、メタノールなどに水素を変換する場合もあり、広義にはこれも含まれる。

3) アンモニア

NH_3 であり水素と空気中の窒素から生産される。この水素のために人類の消費するエネルギーの約 1% が使われるとされている。生産されたものの 8 割は肥料用途に使われ人類の食料生産を支えている。

4) 電解合成

合成反応を電気化学的に行うこと。水から水素と酸素を得ることは分解反応であるので、電気分解と呼ぶが、例えば窒素と水から電気化学的にアンモニアを得た場合には電解合成と呼ぶ。

5) 直接形燃料電池

燃料直接形燃料電池の意。水素以外のキャリアを燃料として運転できる燃料電池。狭義にはキャリアと生成物とのギブスエネルギー差に相当する起電力が得られる燃料電池。燃料電池内で熱的に脱水素反応が起き、水素燃料電池として反応が進行しているものも広義には含む。

6) 熱化学サイクル

太陽熱や原子炉（高温ガス炉）などを高温源として幾つかの化学反応を繰り返すことによって高エネルギー物質を生産する方法。水からの水素生産には IS 法などが提案されている。熱機関の一種であり、高温源と低温源がなければエネルギー物質は生産できず、カルノー効率（熱力学第二法則）によって温度差で効率が支配される。

7) 人工光合成

光化学的反応を用いて、光エネルギーから高エネルギー物質を生成すること。狭義には自然の光合成を模倣した錯体の光化学反応を利用した化学エネルギー物質生成である。広義には固体光触媒など半導体材料を光励起し、その表面で化学エネルギー物質を生成することも人工光合成もしくは人工光合成的反応と呼ぶこともある。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁、エネルギー白書 2011
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2011/index.htm>
- 2) 山地憲治編（水素エネルギー社会）エネルギー資源学会（2008）
- 3) SolarFuel GmbH 社 HP <http://www.solar-fuel.net/en/contact/>
- 4) U.S. Department of Energy
<http://arpa-e.energy.gov/ProgramsProjects/Electrofuels.aspx>
- 5) NEDO 二次電池技術開発ロードマップ (Battery RM2010)
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100519a05j.pdf>
- 6) (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 資源備蓄備蓄データ
http://www.jogmec.go.jp/jogmec_activities/stockpiling_oil/deta/index.html
- 7) 「世界スマートシティ総覧 2012」、日経BPクリーンテック研究所
- 8) 内閣官房 国家戦略室 日本再生戦略 <http://www.npu.go.jp/saisei/green/>
- 9) 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET)
<http://www.ena.or.jp/WE-NET/index.html>
- 10) 水素・燃料電池実証プロジェクト (JHFC)
<http://www.jari.or.jp/jhfc/>
- 11) NEDO 定置用燃料電池大規模実証研究事 http://www.nedo.go.jp/activities/ZZ_00347.html
- 12) The 2011 Fuel Cell Patent Review、FuelCellToday
- 13) 内閣官房 国家戦略室、政策、エネルギー・環境会議
<http://www.npu.go.jp/policy/policy09/pdf/20120924/20120924.pdf>
- 14) 文部科学省、第4期科学技術基本計画
http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/kihon/main5_a4.htm
- 15) 科学技術振興機構・研究開発戦略センター (JST/CRDS)、ワークショップ報告書 (12WR04):
再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術
<http://crds.jst.go.jp/type/workshop/201212280000>
- 16) 2012/10/24 2:04 日本経済新聞 電子版「余剰電力、水素で貯蔵 東芝が英で11月から実験」
- 17) HyNor <http://hynor.no/>
ノルウェー水素道路プロジェクトー HyNor ー日本語要約、北島暁雄、日本機械学会誌、2010, Vol 113, 862
- 18) The Scandinavian Hydrogen Highway Partnership
<http://www.scandinavianhydrogen.org/>
- 19) NEDO 日射量データベース閲覧システム
<http://app7.infoc.nedo.go.jp/colormap/colormap.html>
- 20) NEDO 再生可能エネルギー技術白書、平成22年7月
http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyosyo_index.html
- 21) 3TIER <http://www.3tier.com/en/>
- 22) 中部電力 HP、太陽光発電・風力発電の出力変動例

- http://www.chuden.co.jp/energy/ene_energy/newene/ene_data/dat_hendo/index.html
- 23) 経済産業省、平成 22 年度（2010 年度）におけるエネルギー需給実績（確報）、平成 24 年 4 月 13 日
http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/resource/pdf/r120413_honbun.pdf
- 24) 資源エネルギー庁、石油備蓄の現況、石油精製備蓄課、平成 23 年 2 月
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/sekiyubi/pdf/h23/110215oil.pdf>
- 25) 苫東石油備蓄株式会社 HP <http://www.tomabi.co.jp/index.html>
- 26) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構「石油ガス国家備蓄基地の建設状況」平成 19 年 2 月 27 日
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g70227a07j.pdf>
- 27) U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, “Mineral Commodity Summaries 2012” <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf>
- 28) 日本アルミニウム協会 <http://www.aluminum.or.jp/basic/japanindustry.html>
- 29) 2011 Fuel Cell Technologies Market Report、US DOE
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/2011_market_report.pdf
- 30) 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010
http://www.nedo.go.jp/news/other/FF_00059.html
- 31) Sustainable Hydrogen Generation (SusHGen), School of Chemical Engineering and Advanced Materials, Newcastle University, UK.
<http://research.ncl.ac.uk/sushgen/>
SusHGen Spring School、Svein Sunde 教授 講演資料（同 HP 内）
- 32) The Egyptian Chemical Industries Company -KIMA-、HP
<http://www.kimaegypt.com/en>
- 33) Kubota, J; Wada, A; Domen, K, J. Phy. Chem. B, 2005, 109, 20973-20978.
- 34) DOE “Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy”
http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/nh3_paper.pdf
- 35) アイオワエネルギーセンター資料
http://www.iowaenergycenter.org/wp-content/uploads/2012/03/NH3_formatted2010.pdf
- 36) 株式会社フレイン・エナジー <http://www.hrein.jp/event/080716ex.htm>
- 37) 稚内新エネルギー研究会 <http://www.rera-vie.jp/>

■プロポーザル作成メンバー■

総括責任者	笠木 伸英	上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	久保田 純	特任フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	鈴木 至	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	関根 泰	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	中村 亮二	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	宮下 永	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	伊藤 浩吉	特任フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	徳山 亜季	主査	(JST 戦略研究推進部)
	上田 孝	主任調査員	(JST 戦略研究推進部)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2012-SP-08

戦略プロポーザル

再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けた エネルギーキャリアの基盤技術

STRATEGIC PROPOSAL

Fundamental Technology of Energy Carriers for
Transportation, Storage and Utilization of Renewable Energy

平成 25 年 3 月 March 2013

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット
Environment and Energy Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7番地
電 話 03-5124-7481
ファックス 03-5124-7385
<http://crds.jst.go.jp/>
© 2013 JST/CRDS

許可無く複写/複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated
without written permission. Application should be sent to crds@jst.go.jp.
Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC
AA TAATC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA CCTAACT CTCAGACC
0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

