

【産業競争力懇談会2012年度 研究会 最終報告】

【太陽エネルギーの
化学エネルギーへの変換と利用】

2013年3月13日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エクゼクティブサマリ】

本研究会では、無尽蔵ともいえる太陽エネルギーを貯蔵・輸送が容易な化学エネルギーに変換し利用することで、将来にわたり持続可能で国際競争力を有するエネルギー供給体制を実現することを目標とした。

本プロジェクトの基本的考え方

我が国の一次エネルギー消費は、その約85%を石油、石炭、LNGなどの化石資源に依存している。これまでに2030年に向けたいくつかのエネルギー供給シナリオが検討されたが、いずれにおいても化石資源への依存度が高いことには変わりはない。

しかし、化石資源は有限である。世界においては人口増加や新興国の経済発展に伴い、化石資源の消費は増加の一途をたどり、2050年には2010年度比で1.7倍に増加すると予想されている。これは、地球環境保全の観点から見てもサステナブルな状況ではない。また、こうした中で我が国が、今後とも化石資源に依存し続けることは、エネルギー供給安定性の確保の面からも問題である。

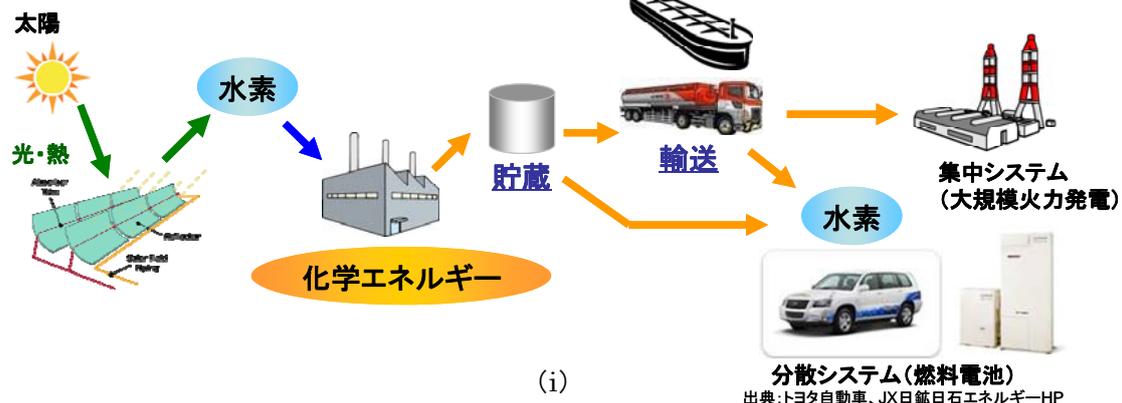
中長期的な視点に立てば、太陽光、太陽熱、風力、地熱などの再生可能エネルギーを最大限に導入し、基幹エネルギーの一つとして利用を図ることが必要である。そのためには、経済的、技術的に合理性のある形で普及を進めることが重要であり、国内での導入拡大と共に、量的に豊富で経済性にも優れる海外からの導入も検討されるべきである。

再生可能エネルギーの中でも、太陽エネルギーはその賦存量がほぼ無尽蔵であり、究極のエネルギー源と言えるが、その安定的利用を図るためには、太陽エネルギーが時間的かつ地理的に偏在しているという問題を克服しなければならない。そのためには輸送・貯蔵に適したエネルギー形態への変換が必要となる。その形態としては電気エネルギー、機械エネルギー、熱エネルギーなどがあるが、本研究会ではエネルギーキャリアとしての効率が高く、長距離輸送、大量貯蔵が容易な「化学エネルギー」に着目した。

化学エネルギーは、化学結合を利用して物質内にエネルギーを蓄える物質である。中でも水素は、地球上に豊富に存在する水から製造できること、利用時にCO₂等を排出しないことから重要な物質である。しかし、水素は気体では単位体積あたりのエネルギー密度が小さく、貯蔵・輸送が容易ではない。そのため、水素をエネルギー密度が高く、常温常圧下で液体となり、輸送・貯蔵が容易な化学エネルギーへ変換することを考える必要がある。また、水素自体を大量、安価に入手するための技術開発も必要である。

こうした化学エネルギーが利用可能になると、大規模発電のような集中システムでの利用と共に、燃料電池やガスエンジンへの利用によって、レジリエンスに優れた分散型エネルギー社会の構築も可能となる。また、これまで燃焼に消費されていた化石資源をより有用な原料として使用できるようになる。

実現イメージ(例)



検討の視点と範囲

研究会では、これまでに我が国で進められている検討を踏まえつつ、水素をエネルギー源とする化学エネルギーについて広く検討した。また、これらの化学エネルギーのコストの相当部分を占める水素について、太陽エネルギーから安価に製造する方法についても検討した。

1. 化学エネルギーの検討

水素自体のエネルギー密度を高め利用する方法（高圧化、液化、水素吸蔵材の利用）と液体化学エネルギー（有機ハイドライド、アンモニア等、ジメチルエーテル、GTL燃料）へ変換し利用する方法について検討した。その結果、常温、常圧に近い条件の下で液体となる化学エネルギー（以下、液体化学エネルギーとする）が、エネルギー密度が高く、取扱性、保存安定性にも優れていることから更にその可能性について検討することとした。

	取扱い性 (常温常圧近くで液体か否か)	保存安定性	エネルギー密度(MJ/L)	備考
高圧水素	× (沸点:-253℃)	○ (ボンベ貯蔵)	× (2.8)	水素としてそのまま利用可能。 体積密度が低く、大量貯蔵・輸送に不向き。
液体水素	× (沸点:-253℃)	△ (冷却必要、蒸発有)	○ (8.4)	水素としてそのまま利用可能。 冷却に大量のエネルギーが必要。
水素貯蔵材	× (固体)	○～× (不安定な物質も有)	○～× (NH3BH3:9.2) (Ti-Cr-V-H:3.5)	吸蔵量、水素の取り出しやすさ、繰り返し利用を同時に満足できるのが現時点ではない。
液体化学エネルギー	○ (液体)	○ (安定)	○ (メチルシクロヘキサン:5.7) (アンモニア:13.3)	常温常圧付近で液体のため取り扱いやすく、また安定性も良い

2. 液体化学エネルギーの検討

液体化学エネルギーに求められる特性としては、輸送・貯蔵の容易さ、取扱や安全性に加えて、地球温暖化への影響も考慮されるべきとの観点から、研究会では有機ハイドライドのメチルシクロヘキサン、アンモニアが有望と考えた。なお、ジメチルエーテルやGTLと同じ合成法で得られる液体燃料も太陽エネルギーからの安価な水素があれば、CO₂との反応で得られる合成ガスから製造できるため対象となりうるが、既に我が国の研究開発プロジェクト※で取り上げられていることから詳細検討の対象からは除外した。

※経産省グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発

1) メチルシクロヘキサン

水素を水素化反応によりトルエンに固定化し、メチルシクロヘキサンとして貯蔵・輸送する。利用時は脱水素反応で取り出した水素を利用する。同時に生成するトルエンは回収し再利用する。メチルシクロヘキサンやトルエンは汎用化学品として流通しており、輸送・貯蔵などは実績ある技術を利用できる。

想定用途：脱水素反応で得た水素は、燃料電池自動車、定置用燃料電池（直接水素型）での利用の他、ガスエンジン発電で化石燃料と混焼も可能。太陽光発電などの変動を吸収しながらエネルギーを備蓄し、地域の分散電源の核となりうる分散型自然エネルギー備蓄回生システムへの利用も検討されている。この他、将来的には水素をガスタービンによる大規模発電に利用することも考えられる。

課題：水素化、脱水素、水素精製において、更なる高効率化が望まれる。繰り返し利用時の品質管理が課題であり、大規模な実証試験で確認する必要がある。また、水素ガスを經由せず、直接エネルギーを変換するさらに高効率な変換技術の開発も重要である。分散型自然エネルギー備蓄回生システムの場合、構成要素である水電解、水素化、脱水素、エンジンコジェネレーションの技術開発とともにトータルシステムとしての電力回生効率の更なる向上が課題であり、実証試験を通し技術確立する必要がある。

2) アンモニア (NH₃)

CO₂ を発生せず直接燃焼が可能で、第二次世界大戦中に欧州でバスなどの内燃機関用燃料として利用された実績がある。水素と空気中の窒素を原料とする、完成された技術であるハーバー・ボッシュ法で製造する。比較的穏やかな条件 (-33°Cもしくは20°C、0.86MPa) で液化するため、貯蔵・輸送は容易である。肥料用途を中心に広く流通しており、インフラ技術は構築されている。

想定用途：直接燃焼するので燃料として大規模に利用できる可能性がある。大規模発電用ガスタービンのほか、エンジン燃焼による発電、工業炉の熱源としての利用が想定される。脱水素反応により得られる水素を利用することも可能であり、燃料電池の燃料としても利用できる。

課題：発電技術の実証と大型化が課題である。具体的には、タービン発電やエンジン発電は実証研究および大型化の検討、燃料電池については SOFC 直接導入型等での性能向上が課題である。アンモニアの製造、貯蔵・輸送技術はすでに確立されているが、エネルギー供給用ではない。そのためエネルギーとして大量に利用する際には、貯蔵・輸送関連インフラの増強が必要となる。

3. 水素製造法

太陽エネルギーから水素を安価にかつ大量に製造する方法について、現状を整理した。

1) 太陽光・太陽熱発電+水の電気分解による水素製造

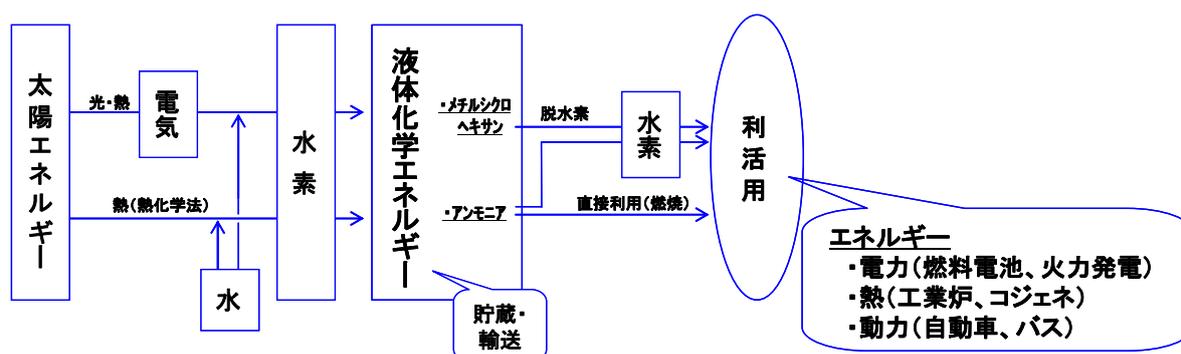
太陽光発電は設備がコンパクトであるが、時間や天候、季節により発電量が変動する。太陽熱発電は海外のサンベルト地帯のような日照量が豊富な地域に限られるが、蓄熱により安定発電が可能で発電効率が太陽光発電より高く大規模発電に向くとされる。いずれも発電効率の向上、コストダウンが課題である。得られた電気を用いる水の電気分解も、エネルギー効率の向上、電極部材等の耐久性向上やコスト改善、トータルシステム設計等、精力的に研究開発が行われている。

2) 太陽光による直接水素製造 (人工光合成)

光触媒を用いた化学反応で電気を經由せずに水素を製造する。現在のエネルギー変換効率は0.5%以下であり、実用化には相当の研究開発が必要であるが、10%の変換効率を目指した国家プロジェクトが開始されているなど国内外で研究が行われている。

3) 太陽熱による直接水素製造 (熱化学法)

例えば IS 法では、ヨウ素 (I) と硫黄 (S) を循環する熱化学反応により水から水素を製造するなど、熱エネルギーを直接化学エネルギーに変換する。40%以上のエネルギー変換効率が達成できる可能性があり、蓄熱技術を利用すると昼夜を問わず水素製造が可能となる。反応温度 (900°C) が高いことが課題であったが、600°Cでの反応を可能にする触媒が見出され、設備の材料コストの低減とトラフ型などの安価で安定な太陽集熱法の利用による、安価な水素製造が可能となることが期待されている。



普及シナリオ

- ・ **分散型システム**：技術的な完成度が高いメチルシクロヘキサンを用いた分散型システムの実証から拡大していくと考えられる。また、燃料電池自動車の本格普及が始まる 2025 年を目処に水素ステーションへの水素供給手段として、メチルシクロヘキサンの利用ニーズが高まる。定置型燃料電池も水素やアンモニアを用いた SOFC を中心に家庭用からビルや地域のコージェネ用の中規模へと普及が進むと考えられる。
- ・ **集中システム**：アンモニアのガスタービン発電が直接燃焼の実証を経て大型化が進み、最終的には火力発電所における実証を経て本格導入となる。
- ・ **水素製造**：化学エネルギーの製造に必要な水素は、研究開発が進んでいる発電＋水電解の実証実験が先行し、分散型エネルギー備蓄回生システムで利用される。大量の化学エネルギーが必要となる集中システムには、熱化学法など革新的な水素製造法（直接水素製造法）による安価な水素の利用が想定される。なお、太陽エネルギーによる安価な水素製造法が実用化されるまでは、未利用の中小ガス田からの安価な天然ガスや海外の水力発電等の安価な電力を用いて製造した水素を活用する。
- ・ **直接水素製造や化学エネルギーへの変換**：国内に必要な要素技術を確認するが、実証検討以降は、将来の事業化を見据えサンベルト地帯などの豊富で安価な太陽エネルギーが得られる海外で行う。

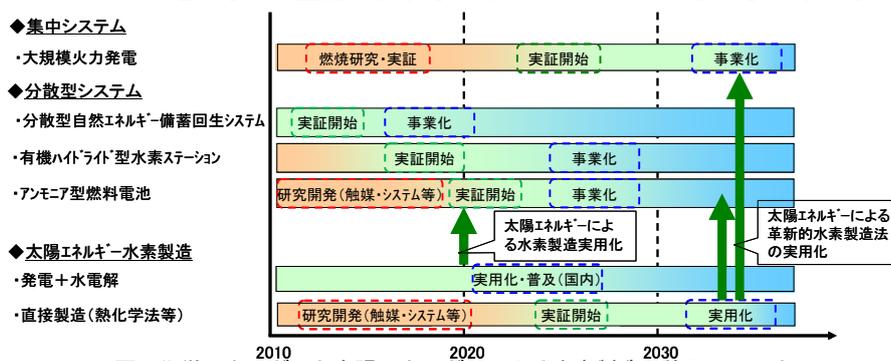


図 化学エネルギーと太陽エネルギーによる水素製造の普及シナリオ

産業競争力強化のための提言と施策

豊富な資源である太陽エネルギーを化学エネルギーであるメチルシクロヘキサンやアンモニアに変換し、基幹エネルギー源の一つとして普及させるためには、以下の取り組みに重点を置くべきである。また、産業界は下記施策が円滑に進むよう、技術研究組合等の主体的な取り組み体制を構築する予定であるが、一方で国には、省庁を横断したシームレス、かつタイムリーな支援を期待する。

- ① **実証研究**：エンジン燃焼、アンモニアを用いたガスタービン発電などの利活用技術や有機ハイドライドを利用した水素ステーションの実証検討。
- ② **研究開発**：燃料電池の性能向上やアンモニア燃焼の理論研究、水素を経由せず直接エネルギー変換する技術などについて、アカデミアを活用しながら実証研究と並行して実施。水素製造に関して、水の電気分解の効率向上、コストダウン、熱化学法などの直接水素法研究の重点的实施。研究の進捗、社会情勢を勘案した化学エネルギー開発戦略の適宜見直しとエネルギー政策への反映。
- ③ **安全性評価**：大量に使用されることによる、利用条件における曝露、長期毒性などの評価の早期着手。
- ④ **ビジネスモデル構築**：実証、普及に当たって必須となるサンベルト地帯との国際協力関係を含む win-win のビジネスモデルの構築。
- ⑤ **規制緩和**：実証ステージまでに一定の安全情報の裏付けがあるもの、対策を講じたものについて、危険物、化学物質取扱に関する保安規定等の緩和の実現。

【目 次】

はじめに	1
1. 本プロジェクトの基本的な考え方	3
2. 化学エネルギーの検討	
1) 水素の利用状況と高圧化、液化の開発状況	7
2) 水素吸蔵材料	9
①水素吸蔵合金	
②無機系物質（ケミカルハイドライド、および、軽金属物質）	
③炭素系物質	
3) 液体化学エネルギー	10
①有機ハイドライド（シクロヘキサン、メチルシクロヘキサン、デカリン）	
②アンモニア (NH ₃)、ヒドラジン (NH ₂ NH ₂)、過酸化水素 (H ₂ O ₂)	
③ジメチルエーテル、GTL燃料	
4) 化学エネルギーのまとめ	13
3. 液体化学エネルギーの検討	
1) メチルシクロヘキサン	13
2) アンモニア	20
4. 太陽エネルギーを一次エネルギーとして水素を製造する方法についての検討	
1) 太陽光・太陽熱+水の電気分解	26
2) 太陽光による直接水素製造（人工光合成）	28
3) 太陽熱による直接水素製造（熱化学水素製造）	29
5. 普及シナリオ	30
6. 産業競争力向上のための提言と施策	32

【はじめに】

2011年に世界人口が70億人を突破した。2050年には90億人に増えるとともに、新興国でのエネルギー消費が大幅に増えることが予測されており、一次エネルギーの主体である化石燃料の需要は高まる一方である。

わが国においては、これまでも産業界のみならず、国家レベルでもエネルギー需給のあり方について議論がなされており、地域分散型エネルギー社会の構築、クリーンな再生可能エネルギーへの転換が期待され、各種施策が進められているが、化石燃料が大きな役割を果たすことには変わらない上に、太陽光や風力などの自然エネルギーを本格普及させた場合にコストと共に電力供給の安定を確保するためにエネルギー貯蔵が必要になるなど、3E（安定供給、環境適合性、経済合理性）+S（安全性確保）の全てを満たす技術については依然として確立されていないのが現状である。

このような状況において、サステイナブルでクリーンな大量のエネルギー源を確保することは、改めての人類の悲願である。

COCNでは、これまでに我が国産業界が進めてきた各種エネルギー施策も踏まえながら、中長期的な観点でのエネルギー供給のあり方について検討を行った。

分散型エネルギー供給と大規模エネルギー供給を組み合わせながら、適切なコストでエネルギー資源の安定供給を実現することができることは、我が国の製造業のみならずあらゆる産業の国際競争力を確保する原点であるとともに、これら技術は、先進国、新興国への展開を通じて、世界の持続的発展に寄与するものである。

本提言が実用化されることにより、我が国がエネルギー供給技術で世界をリードすることになり、日本の産業競争力が強く持続する源泉となることを期待する。

産業競争力懇談会
会長（代表幹事）
榊原 定征

【プロジェクトメンバー】

（プロジェクトリーダー）

住友化学株式会社 顧問 中江 清彦

（メンバー）

J X 日鉱日石エネルギー株式会社 中央技術研究所 吉岐 英
J X 日鉱日石エネルギー株式会社 研究開発企画部 立石 大作
シャープ株式会社 研究開発本部 柿本 誠三
シャープ株式会社 東京支社 中西 健司
シャープ株式会社 研究開発本部 山口 孝好
住友化学株式会社 理事 塩沢 文朗
住友化学株式会社 技術・経営企画室 花岡 秀典
株式会社住友商事総合研究所 新技術企画室 薄井 徹太郎
ソニー株式会社 先端マテリアル研究所 石田 祐一
東芝マテリアル株式会社 開発・技術部 大冢 秀行
パナソニック株式会社 渉外本部 仁木 輝記
株式会社日立製作所 ディフェンスシステム社 青木 純一
株式会社日立製作所 ディフェンスシステム社 秋本 修
株式会社日立製作所 中央研究所 石川 敬郎
三菱化学株式会社 石化開発部門 横山 寿治
京都大学大学院 工学研究科 平尾 一之
独立行政法人産業技術総合研究所 研究環境安全本部 島田 広道
独立行政法人産業技術総合研究所 副研究統括 中岩 勝
独立行政法人産業技術総合研究所 環境・エネルギー分野研究企画室 佐藤 剛一

（オブザーバー）

経済産業省 製造産業局 化学課 機能性化学品室長 山崎 知巳
公益社団法人新化学技術推進協会(JACI) 専務理事 井田 敏
公益社団法人新化学技術推進協会(JACI) 部長研究員 宮崎 進

（事務局）

住友化学株式会社 技術・経営企画室 滝川 宏司

【本 文】

本研究会は、無尽蔵ともいえる太陽エネルギーを貯蔵・輸送の容易な化学エネルギーに変換し必要時に利用することで、再生可能エネルギーの安定的かつ積極的な利活用を実現するとともに、CO2 を発生しないクリーンで国際競争力を有するエネルギー社会を中長期的な観点に立って構築することを目標とする。

1. 本プロジェクトの基本的考え方

我が国の一次エネルギー消費量は、その約 85%を石油、石炭、LNG などの化石資源に依存している。これまでに 2030 年に向けたいくつかのエネルギー供給シナリオが検討されたが、いずれにおいても化石資源への依存度は 75~83%^{*}と高いことには変わりはない。

各分野で投入／消費されている化石燃料：再生可能エネルギーの導入のポテンシャルの大きさ
 -2010年エネルギーバランス表から ⇒ 原子力等の各エネルギーへの依存度は現状ベースと仮に仮定-

(単位: 100万石油換算トン)	石炭等	原油・石油製品	天然ガス・都市ガス	水力発電	原子力発電	新エネルギー	電力計	合計
一次エネルギー国内供給	120	212	96	18	61	8		514
	428							
エネルギー転換及び自家消費								
電気事業者	-54	-13	-57	-16	-61	-1	83	-119
自家発	-14	-10	-4	-2	-0	-7	16	-19
(発電に投入される化石燃料計)	152							
最終エネルギー消費	36	178	35	0	0	4	89	342
産業部門計	36	65	18	0	0	3	36	157
製造業計	36	57	18	0	0	2	36	148
(製造業で消費される化石燃料計)	110							
民生部門計	1	28	17	0	0	1	51	97
家庭用	0	18	10	0	0	0	26	54
(家庭用に消費される化石燃料計)	28							
運輸部門計	0	82	0	0	0	0	2	84
(運輸部門で消費される化石燃料計)	82							

*エネルギーバランス表においては、発電に要するエネルギーの消費を負の値(-)で表記し、発電により得られた電力を正の値で表記している

しかし、化石燃料は有限な資源である。現在、世界では石油に限っても毎日 8,200 万バレルが消費されている(BP Statistical Review of World Energy, June 2011)。これは、石油をドラム缶に詰めてつなげた場合、地球 1 週半の距離に相当する。また、これまでに生産した石油量および確認埋蔵量は共に約 1 兆バレルと言われており(本村ら：石油・天然ガスレビュー, 2007)、現在の使用量のままだでも約 40 年で枯渇することになる。近年、シェールガス等の非在来型化石資源の生産・利用が増加しているが、やはり有限の資源であることに変わ

^{*} 2012 年に示された電力エネルギーの3つの選択肢における、原発ゼロシナリオ、25%シナリオをエネルギーバランス表に当てはめると共に、最終消費エネルギー20%削減、発電電力量 10%削減を行った場合の一次エネルギー供給における化石燃料依存率を試算した値。

りはない。

2011年に70億人を越えた世界人口は、2050年には90億人に達すると予想されており、新興国の経済発展、生活文化の向上に伴って、エネルギー需要の増加が予測されている。日本エネルギー経済研究所のアジア/世界エネルギーアウトルック2012によれば、2010年に117億トン（石油換算）であった世界の一次エネルギー消費量が2050年には1.8倍の207億トン（石油換算）（内、化石燃料は、2010年の103億トン（石油換算）が2050年に1.7倍の174億トン（石油換算））になると予想されている。また、化石燃料の消費増大に伴って、地球環境への負荷も増大する。中長期的に見てこれはサステイナブルな状況にはない。こうした状況の中で、我が国が今後とも長期に化石燃料に依存し続けることは、エネルギー供給安定性の確保の面から見ても問題がある。

中長期的な視点に立つならば、太陽光、太陽熱、風力、地熱などの再生可能エネルギーを最大限に導入することが必要である。その際、化石燃料への依存率を下げ、基幹エネルギーとするためには、国内で経済的、技術的合理性のある形で導入拡大に努めることは言うまでもないが、量的に豊富で経済性にも優れた海外の再生可能エネルギーを国内に導入することも考えなければならない。また、エネルギー技術の実用化に時間がかかることを考えれば、早急にこうした取り組みを始める必要がある。

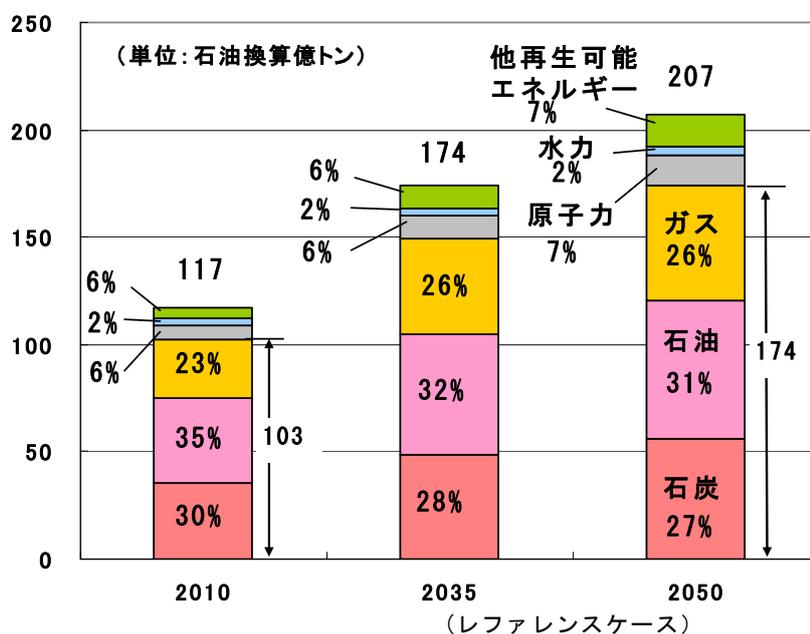


図 世界の一次エネルギー消費

(出典: アジア/世界エネルギーアウトルック2012: 日本エネルギー経済研究所)

太陽、風力等の再生可能エネルギーは、こうした資源制約、環境制約を解決する役割を担い得るエネルギー源である。中でも太陽エネルギーは、地球での年間エネルギー消費量16TW-yに対し、23,000TW-yという圧倒的な量が賦存しており (A Fundamental Look at Energy

Reserves for The Planet by Richard Perez & Marc Perez)、究極のエネルギー源といえる。しかし、太陽エネルギーは昼間のみ得られること、天候や季節により得られる量が変わること、地球上で効率的に得られる場所が“サンベルト地帯”と呼ばれる地域に偏在していることなど、安定的に利用するためには、時間的かつ地理的に偏在するという問題を克服しなければならない。そこで、エネルギーを必要な時に使うために溜めておき、必要な場所で使うために輸送・貯蔵するためのエネルギー形態に変換することが必要となる。

太陽エネルギーを光エネルギーや熱エネルギーとして地表に供給し、変換・貯蔵する場合のエネルギー形態としては、電気エネルギー、熱エネルギーなどがあるが、本研究会ではエネルギーキャリアとしての効率が高く、大量貯蔵、長期間貯蔵、および長距離輸送が容易でエネルギー変換効率が高い、化学結合を利用して物質内にエネルギーを蓄える「化学エネルギー」に着目した。実は、「化学エネルギー」に変換して再生可能エネルギーを利用するという考え方は、決して新奇な考え方ではない。産業革命以来、人類が利用してきた石炭、石油、天然ガス等の化石燃料も、古代の太陽エネルギーが姿を変えた「化学エネルギー」である。

「化学エネルギー」としては、地球上に豊富に存在する水や空気など普遍的な材料から製造できること、エネルギー密度が高い物質であること、さらに利用に当たってCO₂等を排出しないクリーンな物質である等の条件を同時に満足することが望ましい。これらの条件を勘案した場合、水素は重要な候補である。水素は水の分解反応により製造可能であり、利用時にはCO₂を排出しない。水素に変換することで変動や地域の偏りが大きい太陽エネルギーの大規模・長時間貯蔵や、長距離輸送が可能となり、太陽エネルギーを安定的かつ積極的に活用する社会の実現に貢献できると考えられる。

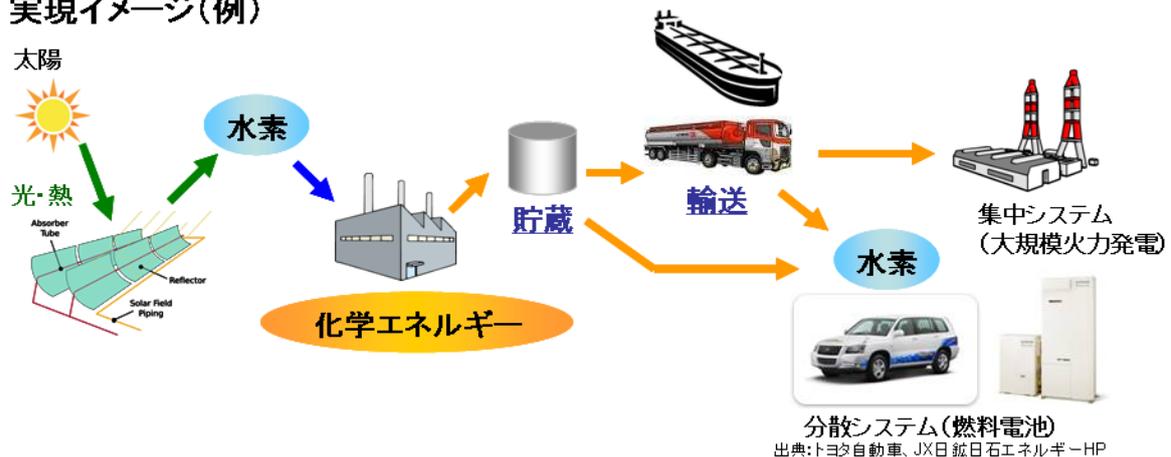
しかし、水素は通常気体であり、単位体積当たりのエネルギー密度が低いため、貯蔵・輸送の観点では不利である。高圧化や液化によりエネルギー密度を高めることが可能であるが、高圧化して大量に貯蔵したり、輸送するには大型の高圧ガス設備、多数の高圧容器が必要となる。また水素は-253℃まで冷却することで液化が可能であるが、液化水素はLNG（液化天然ガス）など他の液化ガスよりも蒸発しやすく、液化する動力も大きいことから、エネルギーロスが問題と指摘されている（水素利用技術集 Vol.3）。

このため、水素をエネルギー密度が高く、常温常圧に近い条件で液体となり、貯蔵・輸送が容易な「化学エネルギー」に変換する検討を行うことが重要であり、その変換および利活用に関する技術開発を進めていく必要がある。また同時に、化学エネルギーの原料となる水素についても、経済的に、かつ、大量に製造するための技術開発が必要である。

本研究会では上記の観点から太陽エネルギーを一次エネルギーとして、これを貯蔵・輸送可能な「化学エネルギー」に変換し、利活用するというスキームを実現する方策を考えることとした。本スキームが実現し、太陽エネルギーが基幹エネルギーレベルの量で導入されると、エネルギーセキュリティの確保に資すると共に、これまで燃焼に消費されていた化石燃焼を有用な資源として使うことができるようになる。また、集中発電などの大規模エネルギー施設で利活用されると共に、レジリエンスの観点から大規模集中電源のみに依存しない分

散型エネルギー社会が構築される。さらには、変動の激しい再生可能エネルギーの平準化による電力需給バランスの適正化も可能となる。またここで構築された技術は、他の先進国、新興国にも輸出できるものであり、我が国産業の国際競争力の向上に役立つ上に、地球規模でのエネルギー問題の解決に資することになるなど、サステイナブルなエネルギー社会の実現に大きく貢献するものとなる。

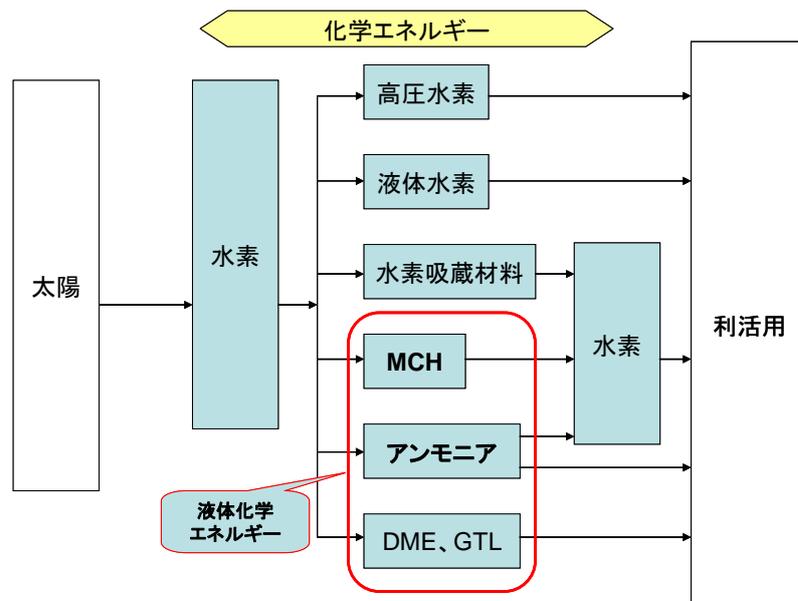
実現イメージ(例)



2. 化学エネルギーの検討

研究会では、これまでに我が国で進められている検討を踏まえつつ、どのような化学エネルギーに変換すべきか利活用の観点から検討した。

最初に、現在、検討が進められている化学エネルギーの現状について広く検討を行った。



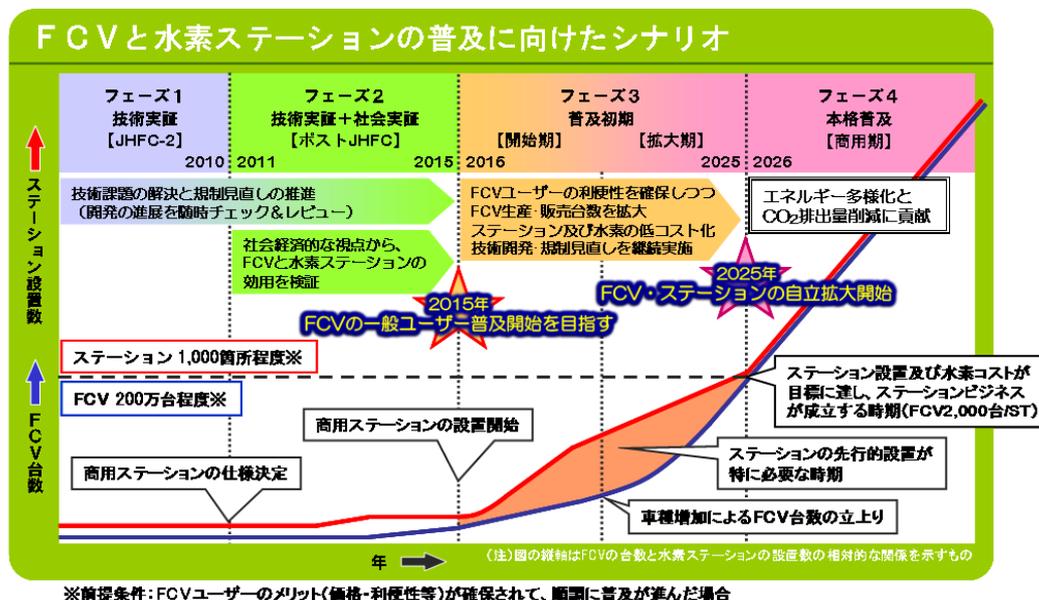
具体的には、(1) 水素の利用状況と高圧化、液化の開発状況についてまとめると共に、(2) 水素吸蔵材料、(3) 液体化学エネルギーの特徴と現状についてまとめることとした。

1) 水素の利用状況と高圧化、液化の開発状況

水素は化石燃料のみならず、再生可能エネルギーなど様々な一次エネルギーから製造することができる。水素の入手および製造については、当面は現状と同じく、製油所、工場等からの副生水素や化石燃料の水蒸気改質により製造される水素を用いることになるが、将来的な利用の拡大に向けては水蒸気改質と CCS を組み合わせた CO₂ を排出しない水素製造技術の確立や再生可能エネルギーを用いた水の分解による水素製造技術の開発が必要になると考えられていることから、そのための様々な研究開発が進められている。

水素は通常状態では体積エネルギー密度の低い気体であることから、輸送にあたっては、物理化学的な変換を加えることでエネルギー密度を高めている。具体的には水素を高圧(15～20MPa)で充填したボンベやカードル(複数の容器を枠組みに固定した集合設備)を積載した貨物輸送車両や、液体水素ローリーによって実施されている。

水素の利用法として有力視されているのは燃料電池向けの燃料であり、利用段階で CO₂ を排出することなく、高いエネルギー効率で電力に変換できるうえに排熱も利用するコジェネレーションも可能である。このため、民生・産業部門の分散電源システムや輸送用途の有力なエネルギー源の1つとして一層の活用が期待される^{*}。燃料電池自動車と水素供給インフラの普及に向けた取り組みでは、具体的な目標を設定したシナリオが公表されており、シナリオにおいて2025年の燃料電池自動車の普及台数は200万台程度としている(2010年3月 燃料電池実用化推進会議)。定置式燃料電池については、エネルギー・環境会議において、家庭用燃料電池の導入目標を2020年度時点で140万台、2030年時点では530万台を目指すとしている(平成24年9月14日“革新的エネルギー・環境戦略”)。



FCCJ WEB サイト http://fccj.jp/pdf/22_csj.pdf より

^{*} 2008年度に産業競争力懇談会(COCON)にて実施した「燃料電池自動車・水素供給インフラ整備普及プロジェクト」では、燃料自動車・水素供給インフラ普及実現のための現実的な普及施策・制度・体系等に関する国レベルでの検討の必要性が提言されている(2009年3月6日 産業競争力懇談会報告書)。また燃料電池実用化推進会議(FCCJ)は、燃料電池の実用化

水素の利用拡大を図るためには、大量の安価な水素を製造することと並んで、輸送・貯蔵性を改善することが重要な課題である。

輸送・貯蔵性の改善のため、物理的に水素のエネルギー密度向上を図る施策として、検討されている高圧化と液化の2つの方法について以下に現状を概観する。

・高圧化

高圧化による水素供給は、最も一般的な水素の流通形態であり、産業ガス業界が長年にわたって事業を行っている。一般に15～20MPa程度に圧縮した水素を鋼製の高圧容器（ボンベ）やそれを束ねたカードルを用いて、更に大量の水素は長尺の高圧容器を束ねた専用のトレーラーを用いて運搬し、各種の産業用途で利用されている。

燃料電池自動車や水素ステーション向けの圧力容器としては、輸送・貯蔵効率を高めるために更なる高圧化（35～70MPa）が検討され、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）を利用した複合容器が開発されており、安全性や耐久性においても実用可能なレベルに至りつつある。但し、CFRP複合容器は現状では高価であるため、低コスト化を図ることが課題である。また水素の漏洩、爆発のリスクがあることから、安全性を確保した上で低コスト化に向けた技術開発が必要である。また、水素ステーションで高圧水素を取り扱う際の規制合理化といった環境整備も必要である。

・液化

水素は液化することにより、体積が気体の1/800となり、35MPa高圧水素の2.8MJ/Lに対し、8.4MJ/Lと高いエネルギー密度が実現する。重量あたりの発熱量が大きいためロケット用燃料として、また高純度水素を得られることから半導体分野の還元剤などに供給されるなど、近年は様々な産業用途にも利用が拡大している。

液体水素の運搬・貯蔵は真空断熱構造を持つ可搬式コンテナ、小型コンテナ、ローリーなどの方法によって行われている。ただし、LNGに比べて沸点が低く（LNGが -161°C に対し、液体水素は -253°C ）、潜熱が小さく蒸発しやすいため、外部からの侵入熱により徐々に気化（ボイルオフ）する。如何に運搬容器、貯蔵容器の断熱性能を高め、気化による損失を防ぐかが大きな課題であり、高い断熱性能を有する材料、貯蔵技術などの研究開発が行われている。

気化損失の低減という課題はあるものの、液体水素の高いエネルギー密度は大量の水素を輸送するには適していると言える。将来、海外の化石燃料を原料に製造した水素や再生可能エネルギーを利用し製造した水素を液体水素として、液体水素タンカーで日本に運搬し利用することも検討されている〔出典：エネルギー総合工学研究所「CO₂フリー水素チェーン実現に向けた構想研究」成果報告書（平成24年3月）〕。

と普及に向け、国への政策提言等を行っている。）

2) 水素吸蔵材料

水素吸蔵合金など水素を吸蔵・貯蔵し、加水分解や熱分解により水素を発生する固体物質。無機物質、炭素系物質に大別されるが、いずれも気体水素の 1/1000 以下の体積密度で貯蔵できることが特徴である。

水素貯蔵については、NEDO の燃料電池・水素技術開発ロードマップにおいて、2030 年に 7.5 重量%、5kg-H₂/70L の目標が掲げられており、種々の水素吸蔵材料の開発が進められている。以下、重量密度、体積密度の向上を目指して開発されてきた材料を中心に概観する。

①水素吸蔵合金

水素と反応して金属水素化物を形成し、加熱などにより吸蔵した水素を放出するという性質を有する物質であり、比較的温和な条件で水素の吸蔵・放出が可能である。その一方で、金属を用いるため、軽量化が困難なことや水素吸蔵・放出の過程での反応熱の速やかな除去に課題を有することが指摘されている。水素吸蔵合金の開発例としては、トヨタが 2001 年に発表した、BCC 構造を有する Ti-Cr-V 合金 (2.2 重量%) を燃料電池自動車に搭載した FCHV-3 がある。FCHV-3 は、水素搭載量 3.5kg (タンク重量 120kg、体積 120L) で航続距離 300km を実現したが、充填時の発熱により充填時間を要する (30~60 分)、-40℃で水素放出ができないなどの課題を有していた。低温始動性を改善した AB2 構造を有する Ti-Cr-Mn-H 系合金は、-40℃でも水素の放出が可能であるが、有効水素量が 1.8 重量% (296k) と先の BCC 型よりも小さく、車載に適した材料や貯蔵システムの開発は現在も進められている。

②無機系物質 (ケミカルハイドライド、および、軽金属物質)

軽元素の水素化物であり、加水分解や加熱により水素を放出する。公知物、新規物質を含め水素吸蔵材として物性が幅広く研究されている。

加水分解により水素を発生する物質としては、NaBH₄ が研究されており、白金触媒の添加により 15 分で、理論吸蔵量 (10.9 重量%) の水素を発生することが報告されている (Int. J. Hydrogen Energy, 2002, 27, 1029-1034)。しかし、加水分解反応により、副生成物として NaBO₂ が発生する。この副生成物の回収・再利用は可能ではあるものの (J. Power Sources, 2004, 125, 22-26)、容易な操作ではなく、再利用については複雑なリサイクルシステムが必要になると考えられる。また、CaH₂ をシート状に固形化し、ポータブルな水素源とする方法も開発されている。現状は水添加による水素発生反応のみでリサイクルが課題であるが、新たな無機材料の添加により、光照射などで再生可能となる材料の開発も行われている。

加熱により水素を発生する物質としては、Mg 系材料や、ボラン系材料などが研究されている。ナノ複合物質の Mg (Nb₂O₅) は 4.5 重量%の水素の吸蔵を実現しているが、放出に 300℃を要することが課題である (J. Alloys Compd., 2006, 420, 46-49)。マグネシウムアミド Mg (NH₂)₂ と水素化リチウム (LiH) の混合物は、5.5 重量%の水素吸蔵量で 150℃での放出を実現するが、放出に 2 時間以上を要するなどの課題がある (Materials Science Forum, 2010,

654-656, 2935-2938)。アンモニアボラン(NH₃BH₃)は、水素吸蔵量が19.6重量%、15.3kgH₂/100Lと高密度であるが、水素発生は熱分解に伴うものであり、アンモニアやジボランのほかやジボランのような不安定物質がを副生する(J. Phys. Chem. C. 2012, 116, 5957-5964)。アンモニアボランの分解物に関する問題点を解決するものとして、NaH-NH₃BH₃が提案されているが、加圧水素化によるリサイクルが困難である。

③炭素系物質

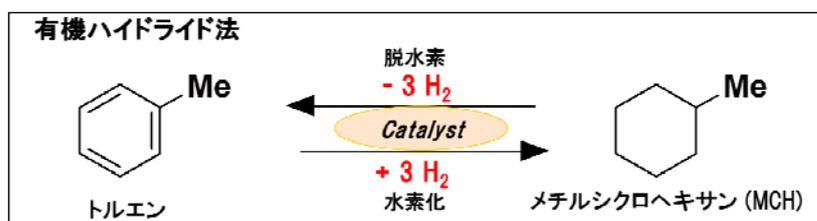
スーパー活性炭と呼ばれるグラフェンの架橋物は、5重量%の水素を吸蔵するが、吸蔵には-200℃という低温が必要である。

以上のように、重量密度、体積密度の向上を目指して水素吸蔵材は種々研究されており、NaBH₄やCaH₂などのようにモバイル電源向けの小型の水素発生装置の水素源として有望なものが既に開発されている。その一方で水素吸蔵、放出条件が実用的でない、可逆的な再生が困難である、水素重量密度が小さいなどの課題を有しており、大量の水素を貯蔵・輸送するための材料としては、現時点では実用化が難しいと考えられる。

3) 液体化学エネルギー

①有機ヒドライド(シクロヘキサン、メチルシクロヘキサン、デカリン)

トルエンなどの芳香族化合物を化学エネルギー(水素キャリア)として利用する方法である。すなわち、水素を水素化反応によりトルエンなどの芳香族化合物に固定化し、メチルシクロヘキサンなどの対応する水素化物(有機ヒドライド)として、貯蔵・輸送を行い、利用時には脱水素反応によって取り出した水素を使用する。脱水素反応に伴い生成するトルエンなど芳香族化合物は、回収することにより再利用できる。



有機ヒドライドと芳香族化合物の組み合わせは数多く存在するため、水素貯蔵量や物理的、化学的性状から目的に応じて適切なものを選定する必要がある。次表に水素貯蔵量(水素発生量)、水素化および脱水素の反応性、毒性、利便性(常温で液体か否か)および原料入手性の観点から評価した結果を示す。例えばデカリンは水素貯蔵量が最も高いが、対応する芳香族化合物であるナフタレンの融点は80℃と高く、常温で固体のため化学エネルギーとしての利便性が悪い。次に水素貯蔵量が高いのはシクロヘキサンであるが、対応する芳香族化合物であるベンゼンは発がん性が指摘されており、安全性の観点から致命的な問題がある。1-メチルデカリン、2-メチルデカリン、2-エチルデカリンは原料入手性に問題がある。

またジメチルシクロヘキサンは相対的に水素貯蔵量が低い。一方、メチルシクロヘキサンはどの項目も良い評価となり、水素を貯蔵・輸送する化学エネルギーとして最も適していると考えられる。

メチルシクロヘキサンとトルエンは、汎用の化学品として大量に流通している。また常温・常圧で液体であり、石油製品同様、取扱い性が良い。更にガソリンと同様に危険物第4類第1石油類に分類され、ケミカルタンカー、タンクローリーで輸送したり、石油タンクで貯蔵、備蓄することが可能である。すなわちその利用にあたっては既存のインフラを最大限活用することができる。

表 有機ハイドライド特性一覧

水素化物	水素キャリア	水素発生量 mass% ¹⁾	水素発生量 Nm ³ /L ¹⁾	反応性	毒性	利便性 (融点)	原料入手	総合 評価
シクロヘキサン	ベンゼン	◎ 7.19	◎ 0.62	◎	× 発ガン性	△ 5℃ 閉塞の恐れ	◎ 化学製品あり	×
メチル シクロヘキサン	トルエン	○ 6.16	○ 0.53	◎	○	◎ -95℃	◎ 化学製品あり	◎
ジメチル シクロヘキサン	キシレン	△ 5.39	△ 0.46	◎	○	○ 13～48℃	◎ 混合キシレン	△
デカリン	ナフタレン	◎ 7.29	◎ 0.71	○	○	× 昇華性 80℃ 閉塞の恐れ	◎ 化学製品あり	×
1-メチル デカリン	1-メチル ナフタレン	○ 6.62	○ 0.65	○	○	○ -31℃	× 入手困難	×
2-メチル デカリン	2-メチル ナフタレン	○ 6.62	○ 0.65	○	○	△ 34℃ 閉塞の恐れ	× 入手困難	×
2-エチル デカリン	2-エチル ナフタレン	○ 6.06	○ 0.59	○	○	△ 15℃ 閉塞の恐れ	× 入手困難	×

◎:優れている, ○:適している, △:問題点あり, ×:致命的な問題点あり 1)水素化物に対する値

②アンモニア (NH₃)、ヒドラジン (NH₂NH₂)、過酸化水素 (H₂O₂)

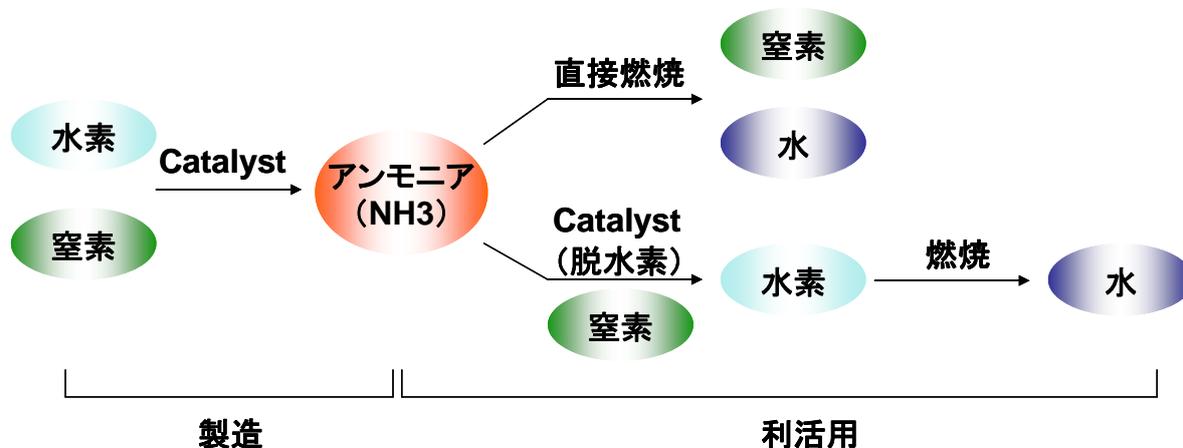
水素と窒素あるいは酸素により構成される化合物。燃焼・分解等によるエネルギーの放出により、窒素と水、あるいは、酸素と水に分解するため環境適合性が高い。

アンモニア、ヒドラジン、過酸化水素が候補として考えられるが、ヒドラジンは猛毒、過酸化水素はわずかなショックや高い反応性により爆発しやすいなど不安定であり、取り扱いが容易ではない。

一方、アンモニアは安定な化合物であり、-33℃もしくは 0.8MPa (20℃) で液体となる。現在は、化石燃料の水蒸気改質により製造される水素と大気中の窒素から、ハーバー・ボッシュ法により世界で約 1.5 億トン/年が製造され、肥料用途を中心に広く利用されている。ハーバー・ボッシュ法は、約 100 年前に完成され、その後、多くの改良を加えられて極めて完成された工業技術となっている。貯蔵・輸送は LPG と同様の設備で可能であり、大量に流通している。米国では、中西部の穀倉地帯を中心に、長距離のアンモニアのパイプラインが施設されている。日本でも日常的に鉄道やローリーで運搬され、タンクで貯蔵されている。このように、輸送・貯蔵インフラ技術はすでに確立している。

アンモニアは、有機ハイドライド同様に脱水素により水素を製造し、エンジンや燃料電池の燃料に用いる用途もあるが、CO₂ を発生せずに直接燃焼させることが可能であるという特

微を生かして、脱水素の工程を経ることなくエンジン・タービン燃焼や燃料電池に用いることが可能である。この用途が確立すると再生可能エネルギーの利用効率は、大幅に高まる。



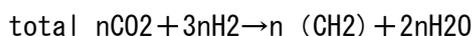
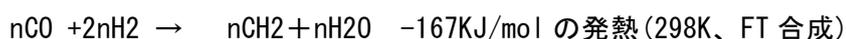
③ジメチルエーテル、GTL 燃料

ジメチルエーテル (DME) 及び Gas to Liquids により製造される合成液体燃料 (GTL 燃料) は、石油に比べると安価であるが取り扱いにくい気体の天然ガスを、扱いやすい液体燃料とする目的で研究開発された化学物質。いずれも化石燃料の改質（水蒸気や酸素、二酸化炭素との加熱）により得られる合成ガス (CO+H₂) を経由して製造される。天然ガスの液化技術が進んだこと、石油の価格が一定以下に収まっていることなどから普及が遅れていたが、GTL については、カタールやマレーシアでは実用化が始まっている。日本では石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) と日本 GTL 技術研究組合、日本 DME 協会などで検討が進められ、基本技術は確立されている。

DME の沸点は、-24.9℃であり、既存の LPG 設備が利用できる。一方、GTL 燃料はガソリン同様に常温常圧で液体であるので、貯蔵・輸送設備や燃焼設備はそのまま活用できる。

原料として天然ガスを用いずに、本検討のように太陽エネルギーから得られる水素を原料として DME または GTL と同じ合成法により液体燃料を製造する場合、合成ガスを得るためには天然ガスに代わる炭素源が別途必要となる。このとき、CO₂ を利用できれば、環境適合性の点からも好ましく、また水素製造装置と CO₂ 発生源が近接していれば、容易に製造できると考えられる。

<CO₂ と水素から HC を製造>



ただし、本案は原料に CO₂ を使うものであり、短期・中期の研究課題として既に国の研究開発プロジェクト※で取り上げられているため、詳細な検討の対象からは除外した。

※経産省グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発

4) 化学エネルギーのまとめ

以上、水素の現状及び貯蔵・輸送性を改良する種々の取り組みについて概観した。

気体の水素が課題とする貯蔵・輸送における課題を”取扱いやすさ“、“貯蔵安定性”として評価した。

表 化学エネルギー特性まとめ

	取扱いやすさ (常温常圧近くで液体か否か)	貯蔵安定性	エネルギー密度(MJ/L)	備考
高圧水素	× (沸点:-253°C)	○ (ボンベ貯蔵)	× (2.8)	水素としてそのまま利用可能。 体積密度が低く、大量貯蔵・輸送に不向き。
液体水素	× (沸点:-253°C)	△ (冷却必要、蒸発有)	○ (8.4)	水素としてそのまま利用可能。 冷却に大量のエネルギーが必要。
水素貯蔵材	× (固体)	○~× (不安定な物質も有)	○~× (NH3BH3:9.2) (Ti-Cr-V-H:3.5)	吸蔵量、水素の取り出しやすさ、繰り返し利用を同時に満足できるのが現時点ではない。
液体化学エネルギー	○ (液体)	○ (安定)	○ (メチルシクロヘキサン:5.7) (アンモニア:13.3)	常温常圧付近で液体のため取り扱いやすく、また安定性も良い

各論に記したように各化学エネルギーは、それぞれ特徴を有している。一部では実用化に向けた取り組みが始まっているものもあるが、化学エネルギーの開発にあたっては、用途をにらみつつ、それぞれの特徴を生かした開発を進めていく必要がある。中でも液体化学エネルギーは、石油同様に取扱いやすさ（常温常圧近くで液体である）と貯蔵安定性（長期安定性）に優れ、既存のエネルギー機器、インフラ技術との親和性が高い。こうしたことから、本研究会では液体化学エネルギーに焦点を当てて検討を行った。

3. 液体化学エネルギーの検討

水素を基幹エネルギーとして大量に普及させるには、貯蔵・輸送性に優れる液体化学エネルギーが最も望ましい。液体化学エネルギーの中で、常温・常圧近くで液体であり、取扱いの安定性に優れているメチルシクロヘキサンとアンモニアについて、さらに詳細な検討を行った。

検討においては化学エネルギーの製造、貯蔵・輸送、利活用といったサプライチェーン全体を考慮すると共に安全性、コスト、課題の視点も加え行った。

1) メチルシクロヘキサン (MCH)

触媒を用いた脱水素反応により水素とトルエンを生成する。トルエンは水素化反応により、再びメチルシクロヘキサンに戻り、繰り返し利用できる。メチルシクロヘキサン、トルエン共に汎用化学品として一般に利用されており、製造、輸送、貯蔵など、これまで石油製品を取り扱ってきた実績にもとづいた技術を活用できる。脱水素反応により得られる水素は燃料電池自動車への供給、定置式燃料電池（直接水素型）や発電機による発電用途、また分散型自然エネルギーの備蓄回生システムへの利用などが想定される。

①キャリア特性

メチルシクロヘキサンは水素を運ぶ“器”であり、それ自体が消費されるものではない。すなわち繰り返し利用することができる点が特徴と言える。また常温・常圧で液体であることから石油製品と同様に扱うことができる。

②製造

メチルシクロヘキサンは工業的にはニッケルなどを活性成分として含む水素化触媒を用いて、水素とトルエンを 100~200℃、常圧~2MPa 程度の圧力で反応させることにより製造されており、低毒性溶剤などとして利用されている。一方、トルエンはナフサの改質により得られる改質ガソリンやナフサなどの熱分解で副生する分解ガソリンから抽出法などによってベンゼン、キシレンとともに製造されている。ガソリンの主要成分であると共に、アルコール類や油類を良く溶かすため接着剤や塗料の溶剤として広く一般に利用されている。

化学エネルギーによる水素の大量輸送・貯蔵・利用を考える場合、大量のトルエンを調達する必要がある。前述のようにトルエンは既に汎用化学品として大量に製造、利用されている実績があり、大量の水素を輸送・貯蔵する化学エネルギーとしてのポテンシャルを有している。

表 トルエンの製造能力／生産量

	(単位:百万トン)			
	世界		うち日本	
	2010年	2016年(予想)	2010年	2016年(予想)
生産能力	28.8	31.1	2.3	2.3
生産量	20.5	25.2	1.4	1.4
生産余力	8.3	5.9	0.9	0.9

出典:世界の石油化学製品の今後の需要動向(H24.6経済産業省製造産業局化学課)

上表に示すように、日本におけるトルエンの生産余力は 90 万トンである。トルエンは繰り返し利用が可能のため、仮にこの生産余力を利用してトルエンを製造した場合、20 年後には累積量として 1,800 万トンのトルエンを調達できる。これにより貯蔵可能な水素は約 130 億 Nm³ と見積もられる。(財)エネルギー総合工学研究所の報告書〔出典:日本エネルギー学会大会 講演要旨集(19)280-281, 2010〕をもとに計算すると、130 億 Nm³ の水素をトルエンに添加してメチルシクロヘキサンに転換するためには、処理量 210 万トン/年の水素添加装置が 11 基、また同規模の脱水素装置も 11 基必要となる。

③貯蔵・輸送

メチルシクロヘキサン、トルエンともに、ガソリンなどの石油製品と類似の扱いが可能であり、輸送や貯蔵においても大きな技術的課題はない。前述の(財)エネルギー総合工学研究所の報告書では、メチルシクロヘキサンの海上輸送も検討されており、それらの前提をもとに計算すると、130 億 Nm³ の水素をメチルシクロヘキサンとして海外から輸送するには、インフラの規模感とし

て、20万トンタンカー22隻、国内の受け入れタンクは10万kLタンク45基（メチルシクロヘキサン用とトルエン用の合計として）が必要と試算される。

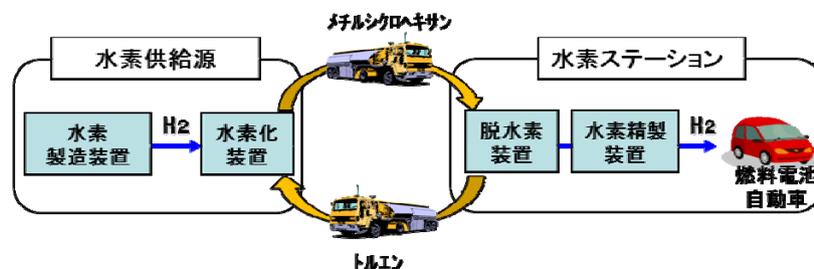
④利活用

a) 燃料電池自動車への利用

燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）のシナリオでは、2015年の燃料電池自動車が普及開始後、2015～2025年を普及初期、2025年以降を本格普及期と位置づけ、目標を2025年に燃料電池自動車200万台、水素ステーション1,000箇所程度としている。

水素ステーションでの水素供給方法の1つとして、製油所で製造した水素を高圧容器に充填しトレーラーで輸送することが考えられているが、燃料電池自動車の本格普及期には、より大量の水素が必要となり、高圧容器による輸送のみならず、輸送効率の高いメチルシクロヘキサンで水素を運び、水素ステーションで脱水素した水素を燃料電池自動車に供給することも考えられる。この方法は、製油所などの水素製造拠点から遠隔地にある水素ステーションへの輸送、また在庫の確保や備蓄においても有効である。すなわちメチルシクロヘキサンは、FCCJの燃料電池自動車、水素ステーションの普及に向けたシナリオに寄与できる技術である。

燃料電池自動車の燃費を100km/kg-水素、年間の平均走行距離を9,500kmとした場合〔出典：燃料電池システム等実証研究（第2期JHFCプロジェクト）報告書 平成23年3月〕、燃料電池自動車200万台へ水素を供給するには21億Nm³/年の水素が必要であり、仮にメチルシクロヘキサンで輸送した水素で全てを賄うとすると、必要なトルエン量はのべ290万トンとなる。



b) 大規模発電所への利用

メチルシクロヘキサンから脱水素できる水素を燃焼し得られる熱量は7,400MJ/トンである。故に1,800万トン（日本の生産余力の20年分）のトルエンが輸送できる水素を燃焼した場合に得られる熱量は約1,330億MJ、発電効率60%とした場合の発電量は約220億kWhと見積もられる。これは2010年度の日本の発電量の約2.2%に相当する。

c) 分散電源への利用

離島やビル、工場などの一部に数MW以下のエンジンやタービン発電機が設置されている。このような分散電源は送電ロスが少ない、コジェネシステムにすることで電気だけでなく熱まで利用することで省エネ化できるといった特徴がある。現在は計画停電や非常時への対応のために常用発電機のほかに小型の非常用発電機を導入するところも増えてきている。

メチルシクロヘキサンは水素のキャリアであるため脱水素してトルエンを回収してサイクル

させる。そのため脱水素反応が必須である。脱水素反応は吸熱反応で熱源を必要とするが、分散電源の場合はエンジンやタービンの高温排ガスを利用して脱水素反応を行うことができ効率のよいシステムを構築することができる。脱水素反応は 450～300℃の範囲で行われるため、エンジン発電機と吸収式冷凍機によるコジェネシステムの場合、エンジンの排気ガスは 500℃程度、吸収式冷凍機の動作は 300～80℃なので、エンジンと吸収式冷凍機間の温度に脱水素システムを組み合わせることができる。メチルシクロヘキサンから供給した水素は水素エンジンでの発電はもちろん、メタンや重油など機関燃料へのブレンドによる混合燃焼も可能で、燃焼効率を向上するとともに、太陽光由来の水素を利用することによる CO2 削減効果も大きい。

一方、国内では太陽光発電や風力発電の導入が進んでいる。これらの電力は変動が大きいため一定の割合を超えると系統電力に供給することが難しい状況になってくる。そこで、電池などを組み合わせて、出力調整を行い系統へ供給するシステムが開発されている。しかし、太陽光や風力発電は瞬時の変動のほか季節の変動も大きく、夏や冬の電力使用量が大きな季節での運用方法が課題である。例えば夏と冬の電力使用量のピークカットのために、春と秋に太陽光の電力を備蓄し、夏と冬のピークに利用するといった利用方法が有効である。

このような太陽光の備蓄システムにメチルシクロヘキサンを活用したシステム例を以下に記す。このシステムにおいては、変動の大きな太陽光発電電力を水電気分解装置により一旦水素に変換する。次いで水素を水素添加装置でトルエンと反応させメチルシクロヘキサンとして貯蔵する。貯蔵したメチルシクロヘキサンは必要に応じて脱水素し、得られた水素を軽油などの燃料と共にディーゼルエンジンで混合燃焼して電気と熱に回生することで、安定したエネルギー供給可能な分散エネルギー・システムとなる。下図にシステム構成を示す。

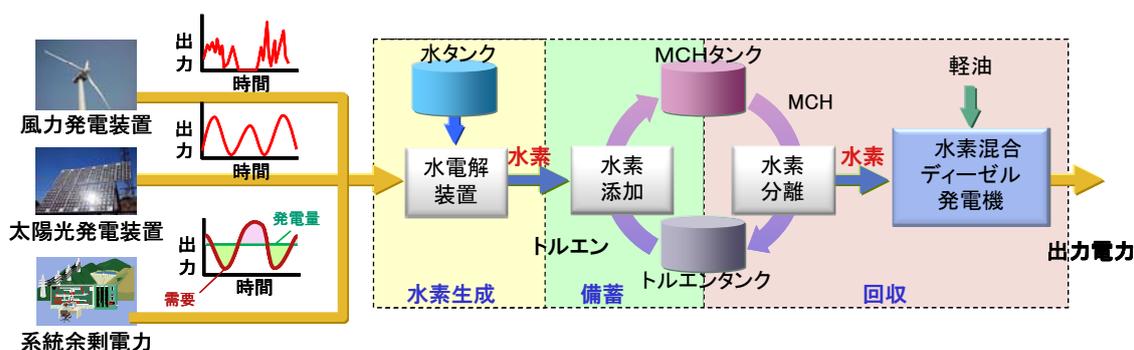


図 分散型自然エネルギー備蓄回生システムの概要

このエネルギー備蓄回生システムは、メチルシクロヘキサンのエネルギー貯蔵密度が高いこと、ガソリンのように取り扱えることなどの特徴を活かした大規模なエネルギー備蓄や、水電解及び脱水素反応の高速応答性を活かすことにより、電池のような役割も担うことができる。次図に運用イメージを示す。

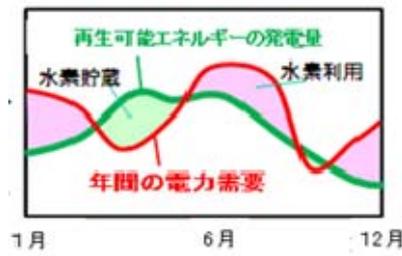


図 電力の季節補完

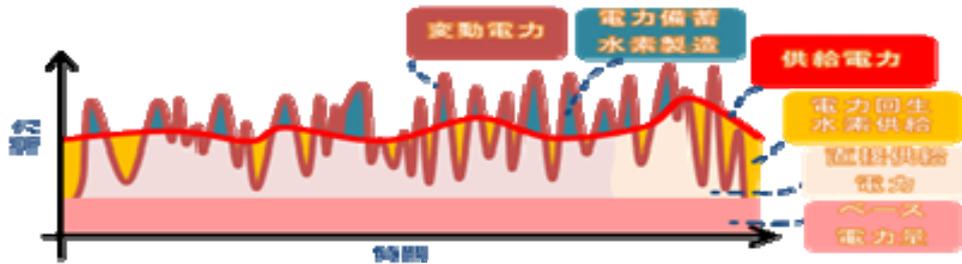
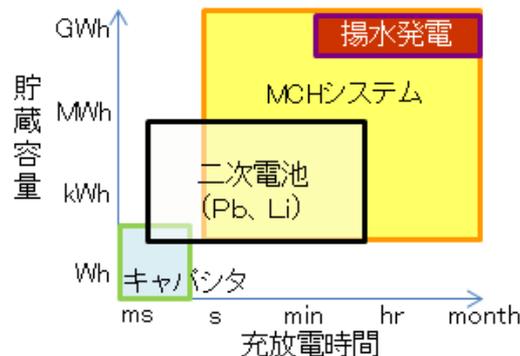


図 リアルタイム出力調整

大規模な備蓄が可能であるという特徴を活かして、春や秋の太陽光発電電力を備蓄し、夏、冬のピーク時にシフトさせる季節補完が可能である。また高速応答性の特徴を活かして需要電力に対してリアルタイムで余剰の太陽光発電電力を水素に変換し、電力不足時には水素を取り出し電力供給を行うといった出力変動調整が可能である。すなわち、揚水発電で例えば雪解け水などを夏に利用するような季節単位での需要変動への対応機能と、リアルタイムの変動調整に有効な電池のような機能を同時に提供することができる。さらにメチルシクロヘキサンは液体なので輸送供給も可能なため、エネルギー貯蔵量はタンクの容量で自在に設定することができ、ピークカットはもちろんのこと、そのほか、非常時向けに 72 時間や計画停電向けには 3 時間といった対応も可能である。



将来には太陽光発電、風力発電、地熱発電及びバイオ燃料などの地産地消の再生可能エネルギーを用いた循環型のエネルギー・システムを活用したエネルギーの変換・輸送・備蓄および分散型コージェネシステムによる地域熱電供給を行い、低炭素、省電力社会を構築する。次図に社会システムとしてのグリッドの概念を示す。



図 分散型自然エネルギー備蓄回生システムを利用した社会システム概念

⑤安全性

メチルシクロヘキサン、トルエンとも汎用化学品として世の中に大量に流通している。またガソリンに含まれる成分であり、ガソリンと同様に危険物第4類第1石油類に分類され、ガソリンと同様の取り扱いが可能である。ガソリンは長年にわたってガソリンスタンドを通じて広く一般ユーザーに供給されており、安全性・利便性ともに十分な社会受容性を得ている。故にガソリン同様に取扱いが可能なメチルシクロヘキサン、トルエンを利用することに対する社会受容性も高いと考えられる。なおトルエンは劇物、向精神薬原料、悪臭物質、第一種特定化学物質に該当し、様々な届け出が必要になっている。例えば、第一種特定化学物質であるため、PRTTR制度（化学物質排出移動量届出制度）により、排出量や移動量を届け出ることが義務付けられている。しかしながら物質自体は汎用化学品であり、従来の取り扱いに倣い、必要な管理の下で使用することが可能である。

	メチルシクロヘキサン	トルエン	ガソリン
分子式	C7H14	C7H8	C4~C12
分子量	98.18	92.14	(石油系炭化水素)
常温での状態	液体	液体	液体
比重(水=1)	0.87	0.8	0.7~0.8
引火点	4°C	-6°C	<-21°C
	第4類第1石油類	第4類第1石油類	第4類第1石油類
発火温度	480°C	258°C	約250°C
爆発限界(空気中)	1.1~7.1vol%	1.2~6.7vol%	1.3~7.1vol%

⑥コスト

ガソリンなどの石油製品と同等の扱いが可能であり、既存の石油輸送用ローリーや船舶、石油タンクや油槽所など、石油製品の流通インフラを活用できる特徴を有するため、新たなインフラ投資を抑えることが可能であり、コスト面からの高い社会受容性を有していると考えられる。特殊な輸送機器類等も不要なため、普及に対して比較的速やかな対応が可能と考えられる。前述の(財)エネルギー総合工学研究所の試算では海外からの有機ハイドライドの輸送コストも分析されておりコスト概要は以下のとおりである。

表. 有機ハイドライドの水素輸送コスト分解					
	水素添加	海上輸送	国内タンク	脱水素	合計
年経費 (円/Nm ³ -H ₂)	2.59	4.04	0.87	5.84	13.34
【前提】供給精製水素: 70億Nm ³ /年、金利: 4%、海上輸送2万km					

水素を輸送用燃料として捉えた場合、NEDOのロードマップによれば、2030年頃の水素供給コスト目標は約60~40円/Nm³である。上表の(財)エネルギー総合工学研究所の試算では、メチルシクロヘキサンを海上輸送し、脱水素するまでの費用は13.4円/Nm³-H₂と見積もられている。これには海外における水素製造コストおよび輸入したメチルシクロヘキサンを水素ステーションまで運ぶコストが含まれていないが、水素ステーションまでの輸送は、前述のように既存の流通インフラが利用できるため、大きなコストにはならないと考えられる。故に、太陽エネルギーを利用した水素の製造コストが約46~26円/Nm³-H₂程度となれば、輸送用燃料として利用できる。

⑦課題〔技術面〕

有機ハイドライドの製造・利用において、最大の課題は、メチルシクロヘキサンの脱水素が吸熱反応 ($\Delta H=198\text{kJ}$) のため、水素を取り出すために熱を供給する必要がある点である。エネルギー効率を高めるためにも反応に必要な熱を有効に利用できる熱交換効率の高い脱水素反応器システムが必要である。さらに、熱源としてエンジン発電機等と組み合わせ、機器からの排熱を利用してシステム全体としての総合エネルギー効率を向上しうるとようなコージェネレーションシステムの開発が求められる。将来的には、脱水素ではなく発熱反応である酸化脱水素の形でエネルギーを取り出すような革新的な転換技術が望まれる。

次にメチルシクロヘキサン・トルエンの転換で重要な役割を担う触媒の性能を向上させる必要がある。トルエンの水素化は、大きな発熱反応であり、プロセスとしては除熱のために多管型やスラリー型の反応形式が用いられることが多い。一方、一般にメチルシクロヘキサンの脱水素反応では、350~400℃近い高温が必要であり、また芳香族化合物が生成することから、芳香族の縮合反応による炭素質(コーク)形成しやすく、触媒の活性低下を招きやすい。有機ハイドライドをエネルギーとして大規模に利用して行くうえでは、これらの水素化・脱水素化で用いる触媒やプロセスのさらなる性能向上が望まれる。特に脱水素においては、触媒活性を上げて反応温度をできるだけ下げること、触媒耐久性の向上が期待できる。

さらに、取り出した水素をできるだけ少ない投入エネルギーで精製できる水素精製(トルエンの分離・除去)が求められる。通常、水素精製ではPSA(Pressure Swing Adsorption)が用いられるが、有機ハイドライドの場合は水素とトルエンの分子サイズは大きく異なっており、分離膜を用いて分子ふるいによる水素の分離精製も有効と考えられる。またこの考え方をさらに進めて、脱水素反応と同時に、生成する水素を膜分離等で分離回収する反応分離型の反応器を用いることで、より低温かつ高効率で水素を取り出すことが可能になる。このように、触媒の高性能化やプロセスの高度化によって、さらなるエネルギー効率の向上が期待できる。

最後に鍵となるのが有機ハイドライドの品質管理である。有機ハイドライドの特徴のひとつは、メチルシクロヘキサントルエンを繰り返し利用する点にあり、それによる不純物の蓄積が懸念される。不純物は水素化・脱水素化の触媒にダメージを与える恐れがあるほか、有機ハイドライドとして有効でない成分が増えることで全体の効率低下を招く恐れがある。不純物の蓄積は、有機ハイドライドの製造・利用過程（水素化・脱水素反応）における副生物生成、利用・流通過程での混入の2通りが考えられる。副生物の生成については、水素化・脱水素化において副生物の生成ができるだけ少ない反応条件で製造・利用することが重要であり、選択性の高い触媒系が望まれる。利用・流通過程での混入を防ぐためには、品質管理が重要となる。流通管理を供給時のみではなく回収時にも適用するとともに、不純物について適切な仕様を設定し、管理することが必要となる。

また分散型自然エネルギー備蓄回生システムについても同様であり、反応システム、流通システムなどの最適化が必要であり、その実用化には低コスト化が重要である。

⑦-2 課題〔運用面（法規制等）〕

トルエンの水素化によるメチルシクロヘキサンの製造は大規模に実施されており、法律上、必要となる規制緩和項目はない。またメチルシクロヘキサン、トルエンは既に双方とも汎用化学品として大量に流通していることから、現行のケミカルタンカーやローリーによる輸送に必要な規制緩和項目はないと言える。但し、原油タンカーを転用する場合はケミカルタンカーに求められている条件を満たすよう船倉などの構造に改良を加え、ケミカルタンカーとしての認証を船籍のある担当省庁から受ける等の必要がある。

水素ステーションでの水素供給を想定した場合、水素ステーションでメチルシクロヘキサンから脱水素反応により水素とトルエンを製造することになる。水素は圧縮するため圧縮水素の製造となり高圧ガス設備に該当し、高圧ガス保安法による届け出の対象となる。またトルエンの製造は、消防法における危険物製造所に該当し、高圧設備の処理量が30Nm³/日以上の場合、高圧設備との距離を20m以上とすることが定められており、水素ステーションの敷地が大きくなる要因となる。またトルエンが危険物であることから、メチルシクロヘキサンの脱水素反応によるトルエンの製造に関しては、建築基準法における危険物の製造事業を営む工場に該当する可能性があり、現状では市街地での立地は制限される恐れがある。

これらの規制の緩和に対しては、実証試験によって安全性を示すとともに、安全性を確保するような技術基準を作成し、消防法での高圧ガス設備との保安距離の緩和、並びに建築基準法において建築可能地域の緩和が図れるような十分なデータの取得が必要と考える。

2) アンモニア

肥料として広く世界に普及している化学品。製造、輸送・貯蔵技術はほぼ確立されている。現在は化石燃料と水および空気（窒素）から製造しているが、本検討では太陽エネルギーの変換により得られる水素と空気（窒素）から製造することを目標とする。

アンモニアは可燃性物質であり、燃焼により水と窒素を与えることから、CO₂ を発生させずに直接燃焼させることが可能である。第二次世界大戦中に欧州で実際にバスなどの内燃機関用燃料として利用された実績がある。熱分解により、水素と窒素に分解させ水素を取り出して、電気エネルギー等に転換することも可能である。

アンモニア燃料の歴史

アンモニアバス
(ベルギー、1943年)



アンモニア自動車 Rjukan
(イタリア、1933年)



X-15(米国、1959~1968年)



Source:
Worth a try, Research and Development in Norsk Hydro
through 90 years (Norsk Hydro, Oslo 1997, page 125)
Ammonia - a fuel for motor buses (E. Kroch)
Ammonia Fuel Network

①キャリア特性

常温・常圧では気体であるが、沸点が -33.4°C であることから容易に液化が可能。また、 20°C では 0.86MPa に加圧することでも液化する。

②アンモニアの製造

アンモニアは、世界で約1.5億トン(2010年)、日本においては約130万トンが生産されているが、現在はナフサや天然ガスなどから得た水素を、鉄系触媒下で、 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ 、 $20\sim 40\text{MPa}$ で窒素と反応させることで製造するハーバー・ボッシュ法(H/B法)のみが実用化されている状況。H/B法は、100年前に開発された高温・高圧条件の製造技術であるが、高度に確立された技術であり、発熱反応であることから、他の工程に熱を供給するなどエネルギー的には有利なプロセスである。

本検討において想定するプロセスは、従来のH/B法の原料(化石燃料と空気)とは異なり、水素と空気中の窒素との反応となる。このとき、空気中の窒素は深冷分離により単離・精製することになり、エネルギーが必要となるが、そのエネルギー量は主原料の水素製造エネルギーと比較して十分に小さい。

また、H/B 法は 2000t/day (60 万 t/y) 程度のプラントが最もコスト競争力があると言われており、アンモニアを用いた火力発電が天然ガス火力発電と同程度の発電能力を発現すると仮定し (エネルギー効率を 60%とする)、130 基で生産した場合、日本の発電量 (年間 約 1 兆 kWh) の 30%を賄うことになる。

尚、上記に示した 2000t/day のアンモニアの製造のためには、350t/day の水素が必要となる。この量の水素を太陽エネルギーによる発電と水の電気分解 (エネルギー変換効率 70%) で製造するためには、太陽光発電 (設備利用率 12%) では 52km²、太陽熱発電では 14km² (設備利用率 41%) の適地の確保が必要となる ([参照発電実績]太陽光発電：米倉山太陽光発電所、太陽熱発電：Andasol 発電所)。

③貯蔵・輸送

-33.4℃に冷却するか、常温で 0.8MPa に加圧するかの状態を液化状態を保ちながら貯蔵・輸送する。

アメリカではアンモニアパイプラインが敷設されており、肥料として地表に大規模に散布するなどの活用が図られている。その他、国内外で液体アンモニアタンクを積載した貨物輸送車両や、液化アンモニアローリーによって輸送している。

海上輸送は、LPG 同様に-33℃に冷却するケミカルタンカーを利用する。常温・常圧で運搬できる石油タンカーよりはコストがかかるが、液体水素 (-253℃)、LNG 船 (-169℃) ほどの冷却は不要である。

現在世界で運航しているアンモニア用のケミカルタンカーは、最大 5 万 t 級であるため、石油や LNG 同様に 20 万トン級以上の大型化を行えば運搬コストが下げられると考える。貯蔵は、常温加圧式、低温中圧式、完全冷却式の 3 つの方法がある。

今後インフラ設備の新設が必要であるが、アンモニアは世界中で流通している化学品であり、貯蔵・輸送に関しては技術的に大きな問題はない。

④利活用

アンモニアは、脱水素により窒素と水素に分離して、得られる水素を燃料等に用いることができる。アンモニアの脱水素については、メチルシクロヘキサンと同様に脱水素が吸熱反応であるために熱の供給が必要なこと、脱水素触媒や反応・精製装置等の設備が必要であるなどの課題がある。一方で、アンモニアの脱水素による副生物が大気中に大量に存在する窒素のみであることから、副生物の回収が不要である、水素の高純度化を必要としない用途では副生物を分離することなく燃料として用いることができる等の利点を有する。得られた水素については燃料電池をはじめとして、水素や有機ハイドライドの項に詳述しているように、これまでに水素の利活用で検討されている用途が考えられる。燃料電池として高温駆動する SOFC 用燃料としての用途を考えた場合、燃料電池の排熱でアンモニアの熱分解が可能であるため、新たな熱源を必要とはしない。脱水素を行う場合においても、熱分解に用いる触媒は、

高価なルテニウムのみならず、安価なニッケル系触媒（Ni/Al₂O₃系）でも 550°C でアンモニアを分解する性能を発現することが江口らから報告されている（JST ワークショップ報告書 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／12WR04 江口氏講演資料参照）。

アンモニアは前述の通り、燃焼により環境に無害な水と窒素に分解することから、直接燃焼させることも可能である。直接燃焼では脱水素を経由する場合と比較して、補助熱源が不要となることに加えて、利活用時の設備が大幅に簡略化できることから、その特性を活かした利活用が注目されている。

アンモニアを燃料として直接燃焼する取り組みは、第二次世界大戦時にベルギーでバスの内燃機関用燃料として実用化された実績がある。また、米国などにおいてタービン燃料として用いるための実用化研究が行われている。燃焼機構の解析などの基礎的な研究も行われているが、これらの研究はやや古い時代のものが多い。こうした研究の中で、アンモニアの燃焼時に懸念される NO_x については、比較的多くの論文が発表されており、アンモニア燃焼時の NO_x の発生は、サーマル NO_x ではなく、フュエル NO_x であるが、化石燃料の燃焼で生成するサーマル NO_x との比較等を通して問題のないレベルであることが報告されている（Mechanical Engineering JULY (1974) 22）。既存の大規模火力発電所においては、脱硝目的ではあるものの、アンモニアが直接吹き込まれる形で既に使用されており、火力発電設備への導入も行われている。

小型実機での短期的な直接燃焼試験の結果、化石燃料同等の性能を発揮できることも確認されている。したがってアンモニアは従前に実用化が検討されていた自動車エンジン等の発動機に加えて、タービン発電等の火力発電用の燃料としての用途が期待できる。発電用燃料としては、今後、大型のガスタービンにおける長期実証試験などで、実用性が確認されれば大規模発電にも展開が可能になる。特にコンバインドサイクル等の高効率発電技術が実現すれば、天然ガス火力発電で実証されているような約 60% の高いエネルギー効率での大規模電力供給を期待することができる。

さらには、アンモニアを燃料電池用の燃料に用いる検討も行われている。固体酸化物型燃料電池（SOFC）は運転温度が 700°C 以上であり、アンモニアが分解温度以上の高温となるため、アンモニアを直接導入しても水素を導入する場合と同じく作動することが期待されている。SOFC は家庭用から大型化の検討が進められており、1,000KW 級以上の中規模発電への展開が期待できる。この他、アニオン交換膜を用いて 100°C 以下の低温で作動する直接アンモニア型燃料電池の研究も進められている。

後述する様に、アンモニアは強い刺激臭と急性毒性を有していることから、まずは管理された区域での取り扱いで対応が可能な中規模発電やバス・トラック等の大型車両の燃料向けから普及が始まると考えられる。ただし、一旦アンモニアがタービン・エンジンの燃料、あるいは、燃料電池の水素源として利用可能ということが分かると、（コスト競争力次第ではあるが）さまざまな分野で急速にアンモニアの利用が進んでいくものと予想される。

⑤安全性

アンモニアは、強アルカリ性で刺激臭を有し急性毒性があり、劇物の指定を受けていることから取扱時には健康に配慮する必要がある。このため一定の管理下で取り扱うことが望ましい。ただし、被曝による影響はアルカリによる喉などの炎症であり、メタノールのように神経障害を起こすものではなく、発がん性や長期毒性が懸念されるような報告はない。アンモニアは海洋や家畜・肥料から年間 6,000~7,000 万トン自然発生し、大気中に蒸散しているといった人間には古くからなじみのある物質である。また、農業用の液体肥料や窒素質肥料、化学品原料として広く流通している他、通常の下で発火はせず、冷蔵庫の冷媒などの形で一般家庭の場でも用いられている。刺激臭を有することから、万が一漏洩しても健康障害があらわれる濃度よりもはるかに低い濃度で感知できる。

⑥コスト

(財) エネルギー総合工学研究所の試算では、海外からの水素キャリアとしてのアンモニアの輸送コストが分析されており、コスト概算は以下の表の通りである(詳細は、JST ワークショップ報告書 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/12WR04 村田氏講演資料参照)。

表 アンモニアの水素輸送コスト分解

	アンモニア合成	海上輸送	国内タンク	小計	アンモニア分解(脱水素)	水素精製	合計
年経費 (円・Nm ³ -H ₂)	3.73	2.8	1.56	8.09	3.34	1.98	13.41

(前提) 供給精製水素 70 億 Nm³/年、金利 4%、海上輸送 2 万 km

アンモニア分解により水素を取り出す場合は、精製を含めて 13.41 円/Nm³-H₂ となるが、脱水素を行わずにそのまま燃料として利用する場合は、8.09 円/Nm³-H₂ であり、5.32 円/Nm³-H₂ 安価になる。実際には、上記コストに加え、海外での水素製造コストと用途によっては国内での輸送コストが必要になるが、いずれにせよ直接利用することがコストの面からは望ましい。

アンモニアは、現在は基本的には化石燃料の改質により製造されており、30~50 円/kg で取引されている。これを水素の価格に換算すると、20~30 円/Nm³-H₂ (1.6~2.7 円/MJ) となる。用途により目標コストは異なっており、高い順に、ガソリン(輸送用燃料) > 都市ガス(燃料電池) > LNG(火力発電) となっているが、LNG のコスト(約 1 円/MJ) が化石燃料を原料とする現状の製法によるアンモニアのコストとほぼ同じであることから、現在のアンモニア取引価格が最終的な目標になる。以下に述べるように H/B 法によるアンモニア製造コストの 8 割を水素のコストが占めるため、安価な水素の供給が実現することが重要である。

⑦技術課題

アンモニアの製造については、当面は H/B 法が工業的にも極めて完成度の高い技術であることから、この技術を利用することが適当であると考えられるが、究極的には、水と窒素（空気）への太陽エネルギーの照射によるアンモニアの製造のような革新的な製法が望まれる。なお、新製法を検討する際は、アンモニアの製造コストの約 8 割を水素の製造コストが占めることに留意する必要がある。貯蔵・輸送については、基本インフラは既に確立されているため、大規模化を視野にいれたコストダウンが将来的な課題となる。

一方で、アンモニアのエネルギーとしての利活用については、実用化に向けての課題抽出とそれに対する技術開発が必要となる。エンジンやタービン用途の直接燃焼については、実証化を視野に入れた効率向上と大型化の研究を行う必要がある。脱水素を経由する利活用については、アンモニアを定量的に水素と窒素に分解する熱分解触媒技術が既に開発されているものの、熱源を必要とすることから、エネルギーロスにつながる。従って、効率的なエネルギー利用を実現するため、水素の燃焼等によって発生する排熱の利用によるアンモニア熱分解のような効率的なシステム設計、および、利活用の形態に応じた低温でのアンモニア分解触媒の開発が必要になると考えられる。直接アンモニア燃焼に関しては、エンジン発電、ガスタービン発電等の発電分野、工業炉などの工業分野等における大型燃焼設備における燃料としての実用性の確認するために実証試験を行う必要がある。また、1,000KW 級の SOFC 型燃料電池についても一部で研究が進められているが、今後、基礎的段階から実証へと研究を加速していくことが望まれる。

4. 太陽エネルギーを一次エネルギーとする水素製造法の検討

これまでの検討により液体化学エネルギーを実用化させるためのスキームと課題について整理した。

メチルシクロヘキサン、アンモニアともに製造や輸送のコストは大きくないので、これらの実用化のためには、安価な水素を大量に製造する技術が重要である。

現在、水素製造の大半は化石燃料の水蒸気改質により製造されている。化石資源に依存することなく太陽エネルギーにより水素を製造する方法として合理的な方法は、原料の普遍性や環境適合性を勘案すると水の分解である。太陽エネルギーの集積・変換、および、水の分解による水素製造について、現在研究されているもののうち、大量の製造に有望な技術について整理することとした。

エネルギー源としての太陽エネルギーを用いる方法は、太陽光を使う方法と太陽熱を使う方法に大別される。また、水素製造法は、太陽エネルギーを電気に変換してから水の電気分解により製造する方法と直接製造する方法に分類される。

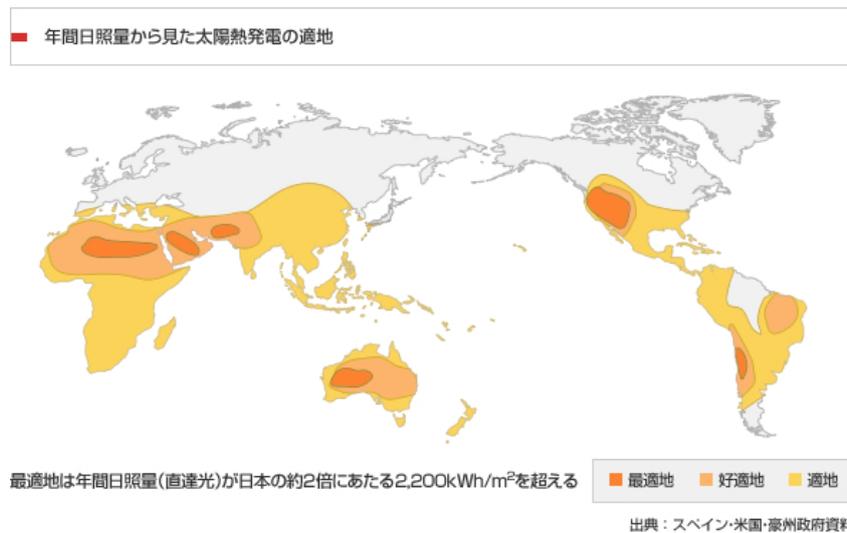


図 サンベルト地帯

(出典: <http://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/mclibrary/evolving/vol03/page3.html>)

1) 太陽光・太陽熱発電+水の電気分解

太陽光発電、太陽熱発電、および、水の電気分解はそれぞれの要素技術が確立、商業化されているため、組み合わせにより原理的には水素の製造が可能である。但し、経済合理性を満たすためには、変動する自然エネルギーに対する耐久性を備えたトータルプロセス設計や要素技術ごとのエネルギー変換効率の向上とコストダウンを達成するための技術開発が必要となる。また、化学エネルギーが基幹エネルギーとしての役割を担うためには大型化の検討も必要となる。

・太陽光発電

光エネルギーを半導体により電気エネルギーに変換する発電方法。発電に用いる半導体の種類により、無機系（シリコン系や化合物半導体系）、有機系（色素増感型や有機薄膜型）に大別され、実用化が進んでいるのは無機系である。太陽光発電は設備がコンパクトである為、比較的小規模の発電にも向くことから、一般家庭向け、及び中～大規模発電（メガソーラー等）向けに普及が進んでいる。発電特性やコストパフォーマンスの向上のため、半導体材料や集光法の開発が進められている。我が国は発電効率の面では世界最高水準（一般的なシリコン型で10～15%）を達成している。

太陽光発電は発電が日中に限られるという本質的な問題があるため、安定した電力を供給することが困難という問題を有する。連続プロセスが化学品の安価製造に必須であることから、水素やそれを原料とする化学エネルギーを効率よく製造するためには、電力の平準化や不安定電力に対応可能な製造プロセスの開発等の対策が必要となる。また、経済合理性の高いエネルギー源とするためには、量産性や製造コストの課題を克服していく必要がある。効率向上に向けた取り組みも行われているが、現状では、単位面積当たりの発電量、及びコス

トの両立には至っておらず、太陽光発電によって一次エネルギー供給の相当部分を代替するような大量の水素を製造するためには、電力平準化に加えて、太陽電池のコストパフォーマンスの向上に関する技術開発が不可欠と考えられる。

(国内メガソーラーの発電能力に基づく推算では、設備利用率を12%とした場合は山梨県や千葉県に相当する敷地面積、14%とした場合は鳥取県に相当する敷地面積で日本の電力量の30%を賅える。電力貯蔵の為、水電解を通して化学エネルギーに変換し、利活用する場合においては、変換効率の観点から、更に大きい敷地面積が必要となる)

メガソーラー概要

<http://www.tepco.co.jp/csr/renewable/megasolar/index-j.html>

施設名	浮島太陽光発電所	扇島太陽光発電所	米倉山太陽光発電所
所有者	川崎市	東京電力	山梨県
最大出力(kw)	7,000	13,000	10,000
推定発電電力量(約 万Kwh /年)	740	1,370	1,200
CO2排出削減量(推定、約 t)	3,100	5,800	5,100
敷地面積(約 ha)	11	23	12.5
太陽電池パネル枚数(約数)	38,000	64,000	80,000
設備利用率	12%	12%	14%
日本の総発電量の30%に必要な施設数	40,541	21,898	25,000
日本の総発電量の30%を賅う為の面積(km2)	4,459	5,036	3,125

参考面積:山梨県 4,465km²、千葉県 5,156km²、鳥取県 3,507km²

・太陽熱発電

スペイン、米国などの海外ですでに実用化されており、今後普及が拡大することや予想されている技術。アフリカ北部や中東の他、カリフォルニア、オーストラリアなどの直達日射量が豊富で大気が乾燥しているサンベルト地帯が適地であり、太陽エネルギーを鏡に集熱して熱媒を加熱し、水蒸気タービンにより発電する。熱エネルギーは熱媒体(蓄熱材)に蓄えることが可能であるため、原理的には24時間連続の水素製造が可能。集熱方法には種々の方法が提案されているが、トラフ型、フレネル型が最も安価かつ安定な集熱が可能であるとされている。発電効率が20%以上のものも実現できているが、集熱設備や水蒸気タービン発電設備などが必要になるため、太陽光発電より大きな規模の設備が必要である。

集熱がサンベルト地帯に適したエネルギー集積方法である一方で、水蒸気タービンの駆動や水の電気分解をおこなうためには水が必要である。従って、適地は直達日射量と十分な水を同時に確保できる地域となる。太陽熱発電による化学エネルギーの確保を想定した場合、直達日射量の観点から、日本国内に適地が少ないため化学エネルギーの製造を海外に依存することになる。このため化石燃料同様に日本への輸入が必要となることから、輸送コストが発生する。化学エネルギーの経済合理性を確保するためには、こうしたサンベルト地帯の国々の関係者との良好な協業関係を構築するためのビジネスモデルも検討する必要がある。

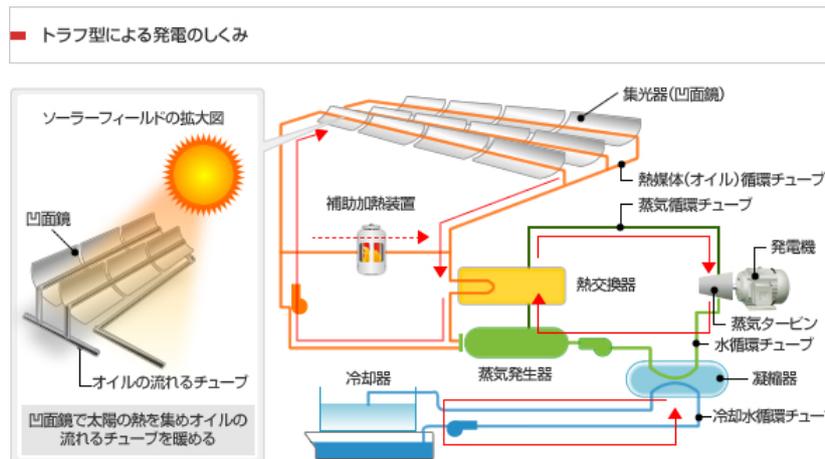


図 太陽熱発電(トラフ型)システム

(出典：<http://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/mclibrary/evolving/vol03/page3.html>)

・水の電気分解

水の電気分解は、その方式により、アルカリ水電解、固体高分子水電解、水蒸気水電解に大別される。長い歴史を有するアルカリ水電解が低コストで大型化が可能であるのに対し、固体高分子水電解は水素製造密度が高い、水蒸気水電解は高効率である等の違いを有しており、水素製造の用途（規模／純度／効率）に応じて利用・開発が進められている。

アルカリ水電解は、基本構成が他のシステムに比べて単純化可能であるため、低コスト化が期待できるが、電解システムの高温化が最も有効である。電解温度が 120℃以上になると、電気分解での自立運転条件を超え、熱回収が可能となり他工程への熱エネルギー供給が可能となる。

固体高分子水電解、水蒸気水電解は、原理的にはそれぞれ固体高分子型 (PEFC)、固体酸化物型 (SOFC) 燃料電池の逆の反応である。このうち、水蒸気水電解で従来の作動温度である 800～1000℃より低い 600℃付近での作動が実現すれば、前述の太陽熱での作動が可能となる。

2) 太陽光による直接水素製造（人工光合成）

光エネルギーの照射により発生する半導体の強い酸化還元作用を利用して水を分解し、直接水素を製造する。1968年に、本多、藤嶋がチタニア系触媒による水素発生を発表して以降、効率改善が図られており、我が国が技術的に世界をリードしている。基礎研究が精力的に進められてはいるものの、現在のエネルギー変換効率は 0.5%以下であり、実用化には相当の研究開発が必要であると考えられる。我が国では H24 年度 経産省プロジェクトで H33 年度末にエネルギー変換効率 10%を目指した検討が進められている。

太陽光発電と同じく、水素製造が日中に限られることが課題の一つとして挙げられる。

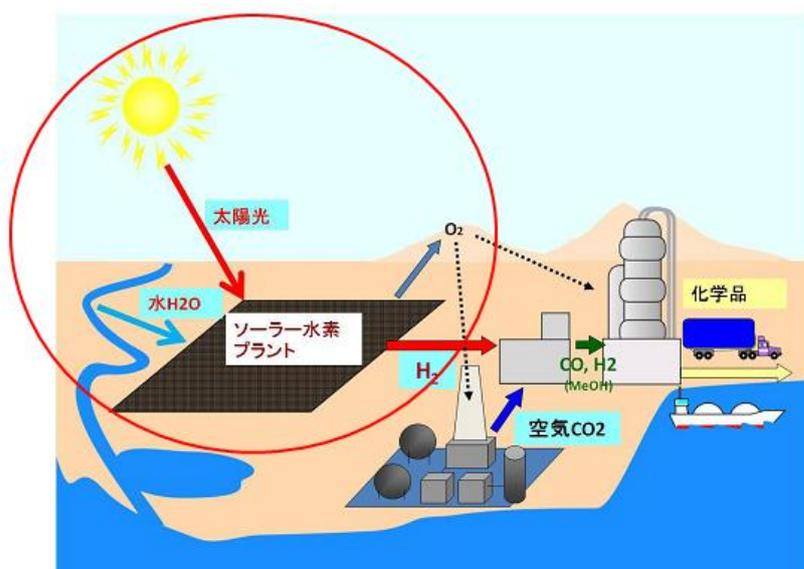


図 人工光合成イメージ

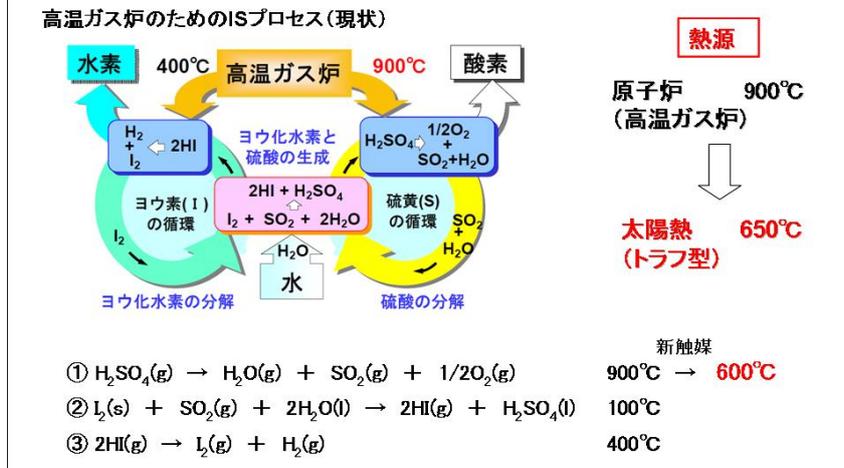
(出典：経済産業省ホームページ)

3) 太陽熱による直接水素製造 (熱化学水素製造)

太陽熱発電と同じく集光熱により熱媒を加熱するが、太陽熱発電が熱を用いた水蒸気タービンで発電するのに対し、熱化学法では、熱エネルギーを直接化学エネルギーに変換する。例えば、IS法では、ヨウ素(I)と硫黄(S)を循環させる熱化学反応により水から水素を製造する。太陽熱発電+水電解による水素製造と比較した場合、水蒸気タービン発電と水電解の二つの設備を熱化学反応の設備に一体化できる、エネルギー変換効率 40-45%程度の水蒸気タービン発電が不要なことから、より高いエネルギー変換効率を期待できる等の利点が考えられる。IS法については、日本では日本原子力開発機構(原研)で高温ガス炉等の高熱を利用する観点で研究が進められていた。これまでは硫酸分解の反応温度が 900℃と高いことから、従来は太陽熱の利用が困難、高価な材料が必要といった課題が指摘されていたが、最近、熊本大とトヨタの共同研究によって 600℃の反応を可能にする触媒が見出され (Chem. Commun., 2011, 47, 9591-9593)、熱源に安価なトラフ型やフレネル型太陽熱集光が使える領域に近づくとともに、熱化学反応プロセスの建設に従来材料を用いることができる可能性が出ている。本技術が実用化されると、より安価な水素製造が可能となることが期待される。

今後、基礎及び実証研究を進め、実現可能性を詳細に検討することが課題である。

熱化学水素製造サイクルの低温化



5. 普及シナリオ

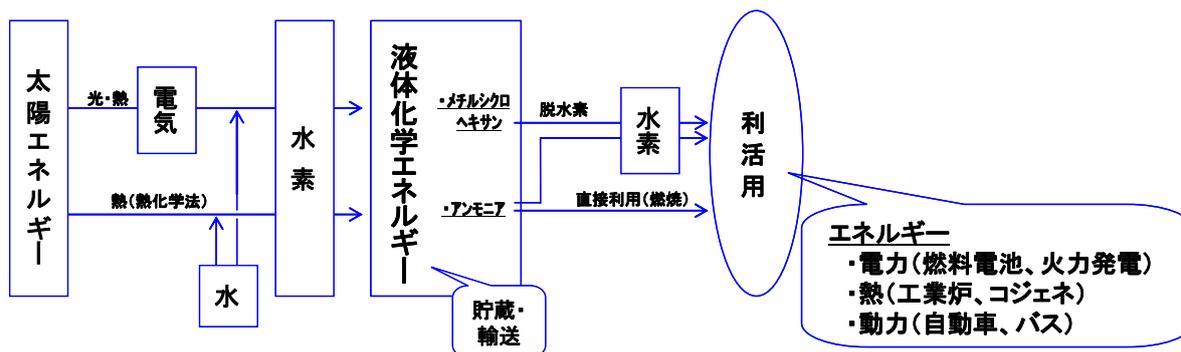
本研究会においては、基幹エネルギーとなり得る規模で太陽エネルギーを化学エネルギーに変換して利活用する場合の候補として、水素をベースとする各種材料を検討する中で、貯蔵・輸送性に優れ、エネルギー密度が高いメチルシクロヘキサンとアンモニアといった液体化学エネルギーに焦点を当て検討を深めてきた。

メチルシクロヘキサンは、国内で再生可能エネルギーを普及させる場合に問題となる電力平準化に利用されるなど、分散型のエネルギー・システムに適している。また、燃料電池自動車が本格普及した際、燃料である水素を水素供給源から水素ステーションに効率的に輸送したり、水素を貯蔵する手段として有効であることもわかった。

アンモニアは、直接燃焼が可能であることを生かして、既存の燃焼設備の燃料置き換えを図りながら、大規模発電施設への普及が可能であることがわかった。また、分散型エネルギー・システムの固体酸化物型燃料電池 (SOFC) の燃料として用いることができることがわかった。

また、各化学エネルギーの実用化を実現するには、利活用技術を実証レベルと研究レベルの両面から進めることと、太陽エネルギーから水素を安価に製造する技術も必要であることが明らかとなった。

これらを実現するシナリオについて、以下のように考えた。



太陽エネルギーにより製造した水素を化学エネルギーとして利活用する際、主な用途として分散型システムと集中システムの2つが考えられる。また燃料電池自動車への水素供給も用途として想定される。

分散型システムについては、発電設備に供する為の脱水素や燃料電池技術の実証、副生物のリサイクルシステムの確立などの技術の目処が見えたものから実用化が始まると考えられる、まずは、メガソーラーなどの電力の不安定性を化学エネルギーへの変換による変動吸収により解消し、電力不足時や災害時に発電供給するとともに発電時に発生する熱エネルギーも地域に供給する分散型自然エネルギー備蓄回生システムの技術完成度が高いことから、実証が早期に始まると考える。本技術については、離島や地域レベルでの実証から規模を拡大していき、技術の進展に応じた普及・展開が行われると考える。定置型燃料電池についてもアンモニアの直接燃焼、脱水素触媒の性能向上やシステムの大型化などの要素技術が確立されると、普及が始まっている家庭用途に加えて、SOFCによるビルや地域のコージェネ用の中規模用途への実用化が実現する。

燃料電池自動車の本格普及期には、より大量の水素供給が必要となる。高圧ガスに比べ、エネルギー密度の高い化学エネルギーの利用は、水素供給拠点から遠隔地にある水素ステーションへの水素輸送手段、大量水素の貯蔵（在庫確保や備蓄）手段として有効であり、2025年の燃料電池自動車の本格普及期に向けてニーズが高まると考えられる。故に有機ハイドライド型水素ステーションの実証試験が必要である。まずは製油所などで化石燃料から製造された水素、将来的には海外の再生可能エネルギーから製造した水素を用いた有機ハイドライドを利用することが想定される。

集中システム用途である、大規模発電用への導入を図るためには、まず、アンモニアのガスタービン発電での直接燃焼の実証研究により燃焼特性を把握することが第一段階となる、その後、大型化を進め、最終的には火力発電所設備での実証を経て本格導入となる。

また、化学エネルギーの製造に必要な太陽エネルギーからの水素については、まずは完成度の高い発電+水の電気分解の実証実験が先行し、分散型エネルギー備蓄回生システムで利用されるなど、地域レベルの分散型エネルギー・システム向けに実用化がはじまると考えられる。大量の化学エネルギーが必要となる集中システム向けには、熱化学法などの革新的な直接水素製造法から製造された安価な水素の利用が想定される。なお、太陽エネルギーによるコスト競争力のある水素製造法が実用化されるまでは、未利用中小ガス田の安価な天然ガ

スや海外の水力発電等の安価な電力を用いて製造した電解水素を活用する。

また、直接水素製造法や化学エネルギーへの変換技術、製造・貯蔵などの基本技術は国内で確立し、実証実験以降の研究開発は、将来の事業化を見据えて太陽エネルギーの豊富なサンベルト地帯など海外で行うことが必要である。

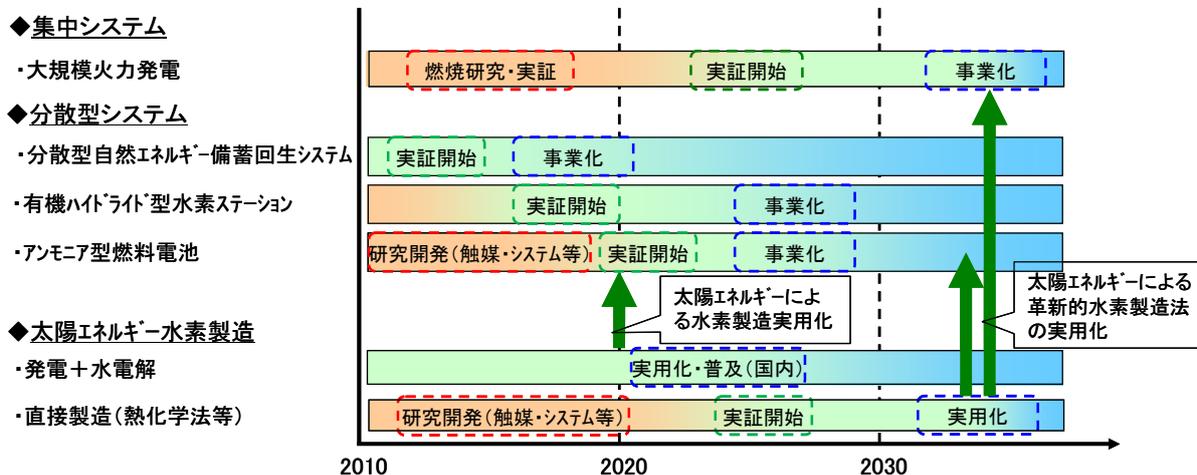


図 エネルギー供給システム実用化・普及シナリオ

6. 産業競争力向上のための提言と施策

上記の普及シナリオから明らかなおおりに、化学エネルギーの利用に向けた検討に関しては、新たなエネルギー・システムといった新たな社会システムの構築につながるものであることから、広範な産業分野（化学材料、エンジニアリング、電気、機械、運輸、発電事業者など）の関係者の参加とともにアカデミアからの参加を得て、必要に応じ、実証段階から基礎研究段階にまで遡った幅広い研究開発を連携して進める必要がある。

本構想の実現に向けて、関心企業は技術研究組合等を設立するなど産業界が主体的に取り組む体制を推進する予定である。加えて、開発テーマの性格を踏まえれば、関係省庁にはシームレスでタイムリーな支援を得ることも重要と考えている。こうした考えをもとに、構想の実現に向けて効果的な実施体制の構築に努めていきたい。

特に重要な施策を以下にまとめる。

1) 利活用の実証研究

アンモニアのエンジン燃焼、タービン燃焼による発電や、メチルシクロヘキサンの脱水素のエンジン燃焼などの実証研究を通じて、技術を蓄積すると共に化学エネルギーの技術的可能性を確認する。

有機ハイドライドを利用した水素ステーションの実証検討も必要である。

2) 研究開発

アンモニアの燃焼や燃料電池の研究および水素ガスを経由せず直接エネルギー変換する技術については、未解明の事象も多いことから、実証研究を行うと共に、アカデミアとの連携を構築しながらの基礎検討が必要である。

メチルシクロヘキサンからの水素取り出しと発電設備の開発など、複数の要素技術が関連する研究開発については、各々の基礎研究を連携させ、強固な基盤技術とするための開発体制の構築も不可欠である。

水素製造に関しても、水の電気分解の効率向上、コストダウンの検討や、熱化学水素法などの革新的水素製造法の研究を重点的に行うことが重要である。

これら多岐にわたる分野の研究への継続支援が必要であるが、一方で研究の進捗や社会情勢を勘案して、化学エネルギー開発戦略を適宜見直すことで、エネルギー政策に反映させることも必要である。

3) 安全性評価

エネルギー材料は大量に扱うこととなるので、アンモニアやメチルシクロヘキサンの利用条件における曝露や長期毒性などの安全性評価も早期から並行して行うことが望ましい。

4) ビジネスモデルの構築と知財権確保

化学エネルギーを基幹エネルギーとする場合、大量の水素と化学エネルギーは海外から調達することになる。サンベルト地帯は、中東・北アフリカなど石油や天然ガスの調達国に限らず、オーストラリア、米国などにも広がる。政情が安定し、協力関係を構築できる国において実証段階からの検討を行うことが考えられる。こうした国々の関係者と効果的な協業関係を構築できるようなビジネスモデルを構築することが必要である。

このとき、関連要素技術を含めたエネルギー・システムに係る主要な知的財産を戦略的に確保しておくことも重要である。

5) 必要な規制緩和（研究開発段階及び普及段階）

実証ステージとなるものについては、一定の安全情報の裏付けのあるものや安全対策を講じたものについては、危険物、化学物質取扱に関する保安規定の緩和などを実現することが必要である（例：メチルシクロヘキサンを利用した水素ステーションの場合、水素の高圧設備とメチルシクロヘキサンの脱水素装置間には、定められた保安距離が必要であり、ステーションの敷地が大きくなる要因になる）。

化学エネルギー 基礎物性比較

	高压水素 (*1)	液体水素	メチルシクロ ヘキサン	アンモニア	ジメチル エーテル	ガソリン
状態(常温、常圧)	気体	←	液体	気体	気体	液体
沸点(°C)	-253	←	101	-33	-24	30-220
貯蔵状態	気体 (常温、高压)	液体 (-253°C)	液体 (常温、常圧)	液体 (-33°C)	液体 (-24°C)	液体 (常温、常圧)
利用状態	直接利用	←	脱水素し、水素 を取り出し	直接利用	直接利用	直接利用
エネルギー密度, MJ/l	2.8	8.4	5.7 (*2)	13.3	19.3	32.9
燃焼熱(LVH) (MJ/kg)	120	120	7.4 (*2)	18.5	28.8	45.1
CO2発生量 (kg-CO2/kg)	0	0	0 (*2)	0	0.96	3.18

*1 35MPa(350気圧)

*2 取り出した水素基準

活動記録

2012年

7月31日 第1回研究会

9月7日 第2回研究会

10月5日 第3回研究会

11月5日 第4回研究会

12月5日 第5回研究会 広島大学 小島由継教授講演

2013年

2月4日 第6回研究会

産業競争力懇談会（COCN）

東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 6 号 〒100-8280

日本生命丸の内ビル（株式会社日立製作所内）

Tel : 03-4564-2382 Fax : 03-4564-2159

E-mail : cocn.office.aj@hitachi.com

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 中塚隆雄