

## 5.1 革新型原子炉

### 5.1.4 熱エネルギー利用システム

加藤之貴

#### 1 イントロダクション

原子力エネルギーの利用先として移動体市場を考え、この市場での原子力エネルギー活用の道筋を検討する。原子力エネルギーは電力源としてこれまでに普及をしており、今後も従来技術の改良により普及が拡大することが予想できる。一方、近年、世界的に化石燃料の逼迫感が強まり、また京都議定書を代表とする二酸化炭素発生削減のため、脱化石燃料の動きが加速している。化石燃料は移動体向け燃料として重要である。原子力エネルギーが移動体用化石燃料の代替になることは将来非常に有効であるといえる。すなわち原子力エネルギーが二酸化炭素をほとんど排出しないシステムであること、また資源量として世界市場に対応しえるからである。

しかしながら原子力エネルギーの移動体分野への活用については様々な制約があり、また技術選択の必要があり、この分野への普及に向けての道筋を検討する必要がある。とくに従来技術をこえた革新的なエネルギー変換、輸送技術が必要である。すなわち、原子力エネルギーから二次的なエネルギー媒体への変換、媒体輸送、移動体での駆動力への変換においてそれぞれに高効率、安全性、環境性そして経済性が求められる。

移動体市場では内燃機関が既に良く普及し、低コストを実現し、エネルギーの一次資源から、輸送、市販までの社会基盤が整備されている。新しいエネルギーシステムの既存システムを超えての普及には高い技術障壁がある。

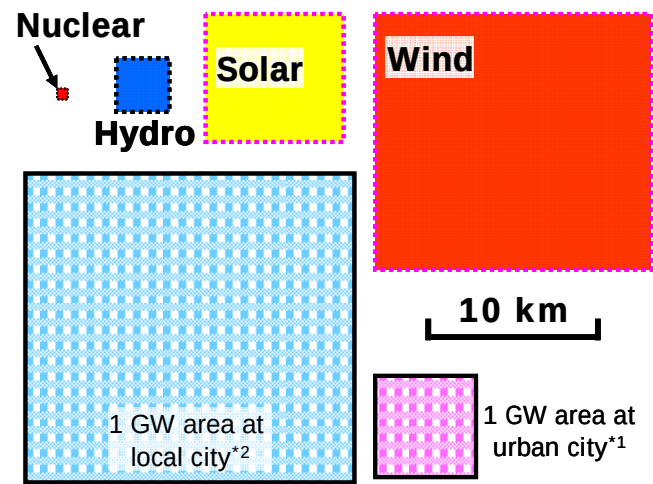
このため市場のニーズに耐える移動体向けの原子力エネルギーシステムには革新的な技術が必要となる。革新性の実現には原子力技術と非原子力技術の協働が一つの手法と考えられる。本論では化学反応を用いたエネルギー貯蔵、変換技術と原子力エネルギーを協働した新しいシステムを検討する。

化石代替エネルギーの選択： 二酸化炭素の排出抑制を条件とすれば、化石燃料に代わりえるエネルギー源は再生可能エネルギーおよび原子力エネルギーである。図 1 および表 1 に 1 GW 基準の消費地域面積と、再生可能エネルギー・原子力発電所の所要面積との比較を示した。1 GW 消費地（約 30 万人）のために再生可能エネルギーを用いるには、水力、太陽光、風力の順に広域を要し、都市部においてはその地域面積以上の広大な面積を要する。よって再生可能エネルギーは、エネルギー密度が希薄なため、所要面積・体積が膨大であり、わが国国内での量的な確保は困難であるといえる。また非定常なため、生成エネルギーの貯蔵が必要であり、そのための追加的な装置とそのエリア、コストが必要となる。原子力は所要面積の制約が小さく、安定供給の観点から、化石代替エネルギー源の有力候

補になりえる。

表－1 1 GWe (30 万人) のための所要面積

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 原子力                    | 0.51 km <sup>2</sup> |
| 太陽光                    | 67 km <sup>2</sup>   |
| 風力                     | 248 km <sup>2</sup>  |
| 水力                     | 11 km <sup>2</sup>   |
| 都市地域（横浜市内）の 1 GW 消費エリア | 40 km <sup>2</sup>   |
| 近郊地域（八戸市）の 1 GWe 域     | 369 km <sup>2</sup>  |



Example cities are Yokohama for \*1 and Hachinohe for \*2, Japan.

図－1 1GW 基準の消費地域面積と、再生可能エネルギー・原子力発電所の所要面積との比較  
(都市域(\*1)として横浜市、郊外域(\*2)として八戸市を例とした。)

移動体用エネルギーキャリアの選択：

自動車レベルの移動体の出力はおよそ 5～50 kW 程度である。一方で原子炉からのエネルギー出力は 100MW～1GW 程度であり、両者には規模の差が  $10^4 \sim 10^5$  倍程度の差がある。よって、原子力エネルギーを移動体で利用するにはエネルギーの利用側の規模にあわせた小口分配が可能であることが必要となる。また、原子力の通常利用エネルギー形態は電気である。電気は電力源から利用側までの電線の接続を必要とし、移動体に直接利用できない。以上より化石燃料に代替するエネルギーキャリアが重要となる。原子力由来のエネルギーキャリアとしては、

1) 水素：原子力発電による電気分解、原子炉出力熱による熱化学水分解サイクルによる

製造

2) 蓄電池：原子力発電による電気の貯蔵

3) 合成燃料：原子炉出力熱による炭化水素の水熱分解、原子力発電による電気分解で生成した水素による水素添加反応による製造

が考えられる、これらには一長一短があり、今もそれぞれの手法が独自の進化をしているため、現在、一つを選択することは困難である。先ずはこれらが混在した形態が具体的な目標であり、これらの按分が最適化されたベストミックスの状態を模索することが実用的と考える。

本論では水素をエネルギーキャリアとして取り上げる。理由として水素は製造にエネルギーが必要であるが、原料が主に水であり、利用後はやはり水に戻るため、水素自身は環境負荷が少ない。また、電力のみならず、熱により製造が可能である。よって電力利用の蓄電池に対して対応できるエネルギー源の多様性がより広いと期待できる。また、水素製造によりオイルシェールなどの低質原油の軽質化、また合成燃料の製造が可能となり化石燃料の資源量の拡大に貢献可能である。

以上より原子力エネルギー利用の水素が化石燃料代替のエネルギーキャリアの将来の代位候補と期待できる。原子力水素は移動体用燃料に活用できる。また、化石燃料の資源量拡大に貢献する点で価値がある。

## 2 現状

現在の原子力水素は純水素の製造に主眼がおかれている。熱化学水素製造として硫黄・ヨウ素の液体反応を利用した SI サイクルが日本原子力研究機構（JAEA）や米国、フランスなどの海外の研究機関で研究開発が行われている。米国で原理が提案されたこの手法では、JAEA が世界で最初に連続水素製造に成功している。また、気固系では鉄、カルシウム系の UT-3 サイクルが実験室スケールでの水素製造実証が試みられている。水の電気分解は従来より最も普及した確実な水素製造方法である。近年は高温水蒸気電気分解が水素製造効率が高いことから注目され、日本、米国などで試験が進められている。高温耐久型セラミック複合型電極を用いての高効率水素製造が実証されている。

水素システムの一つの課題は水素の貯蔵、輸送の点にある。高分子電解質型燃料電池（PEMFC）などの燃料電池は水素を燃料として利用するためにそれ自体はクリーンエネルギーシステムになりえる。しかし水素は気体であり、水素の貯蔵、輸送には何らかの、多大な仕事・エネルギーを要する。さらには爆発限界の広い水素を安全に供給するには高度な技術的配慮が必要ある。よって、燃料電池の普及には、燃料電池技術のみならず、燃料水素の安全・安価な供給方法の確立が必須である。わが国のエネルギー関連の調査会においても燃料電池の普及において水素の製造、運搬、貯蔵に係る技術開発の必要性が指摘されている<sup>1,2)</sup>。

とくに移動体向け燃料電池については消費場である移動体までの水素の効率的な輸送・供給技術が重要である。移動体利用の水素供給システムにおいては軽量・コンパクト、素早い応答性、振動耐久性、頻繁なスタート&ストップ操作への耐久性そして低コストが望まれる。最近の実用燃料電池自動車には 35~70 MPa 程度の圧縮水素を充填した水素シリンダーが利用されている<sup>3)</sup>。また、移動体むけの圧縮水素を供給する水素ステーションの実証試験も進んでいる<sup>4)</sup>。

圧縮水素利用の燃料電池水素供給プロセスでは水素は水素含有原料から製造され、圧縮貯蔵される。その後、水素シリンダーに充填され、移動体内で利用される。この水素プロセスにおいては次の課題がある。すなわち、

- (1) 水素製造エネルギーとともに、生成水素の貯蔵・輸送のためのエネルギー消費が少くない。この削減が望まれる。
- (2) 水素は高い爆発性を持つため、高圧水素を搭載しての一般道路の移動は非常な注意を要する。
- (3) 水素原料に水ではなく、炭化水素を選択すれば水素製造の過程で二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 等が発生する。水素燃料としてはCO<sub>2</sub>の分離が望まれ、環境面からはCO<sub>2</sub>の固定化、ゼロエミッション化が望まれる。

### 3 目標とメリット

上記の課題への対案として、ここでは従来技術とは異なる新しい水素製造・輸送システムの可能性について述べる。この技術は水蒸気燃料改質を基としている。例えばメタンを水素原料とした場合、水蒸気燃料改質反応は主に以下の改質主反応、式(1)、と一酸化炭素(CO)転換反応、式(2)、を経て進む。



反応(1)は通常 700℃前後の高温を必要とし、そのための熱供給・耐熱技術が必要となる。さらに他の炭化水素も水蒸気燃料改質が可能である。灯油、ガソリン等の高級炭化水素は液体燃料として輸送が簡易であり水素原料として期待できるが、より高温での改質が必要である。

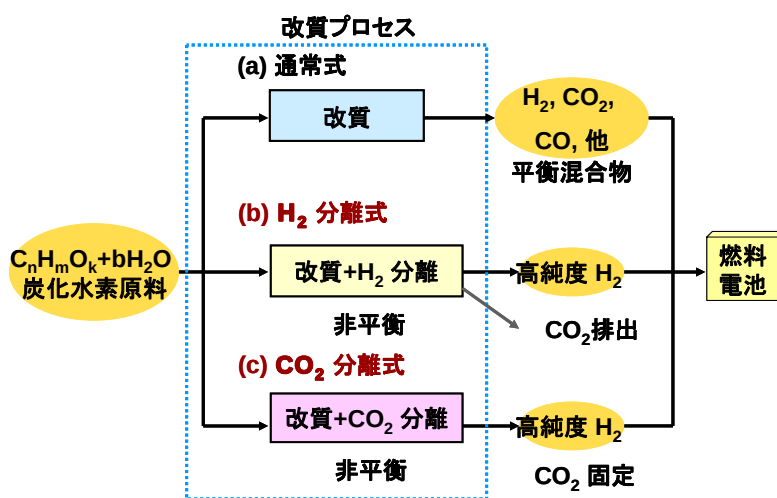
通常の燃料改質で得られる生成物は、水素、CO<sub>2</sub>および他の副生物と残留原料が混在する混合気である。当然ながら反応平衡以上に改質は進行しないため、原料の水素転化率に制限がある。いま、ある分離プロセスにより、式(1)、(2)中の水素またはCO<sub>2</sub>が系より分離されたとすると、Le Chatelierの法則にしたがい、正反応が促進され、通常反応平衡以上に水素生成が促進されることが可能となる。ここでは、この分離操作と通常反応平衡をこえる反応促進現象を含めて反応の非平衡化と定義する。この非平衡化により、高効率な水素製造が期待できる。

非平衡化の観点から燃料改質プロセスは図 2 のように分類できる。すなわち通常改質、水素分離型非平衡改質、二酸化炭素分離型非平衡改質（図 2(a)-(c)）である。通常の改質で得られる生成物は反応平衡未満の水素、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ と残留原料が混在する混合気である（図 2(a)）。とくにPEMFC燃料電池では $\text{CO}$ 被毒の点で別途 $\text{CO}$ 転換処理プロセスが必要となる。そこで図 2(b)のように混合気より水素を選択的に分離する方式がある（水素分離式燃料改質と定義）。この方式では以下の効果が期待できる

- (1) 反応系が非平衡化し改質正反応が促進され、水素収率が向上する。
- (2) 水素の高純度化が可能。
- (3) 非平衡化により吸熱反応である改質温度の低下が期待できる。低温で改質反応平衡転化率は下がるが、非平衡状態を維持し水素を系から連続的に取り出すことで、総括転化率が向上できるためである。

さらに、図 2(c)のように系から $\text{CO}_2$ を除去する方式がある（二酸化炭素分離式燃料改質と定義）。同じく、式(1)(2)の正反応が促進され、水素収率向上および水素高純度化ができる。この場合効果(1)～(3)とともに、

- (4)  $\text{CO}_2$ の固定化が可能、  
が特徴となる。



図ー2 燃料改質型水素製造における非平衡化操作の手法とその効果

### 3.1 二酸化炭素分離式燃料改質

二酸化炭素分離式燃料改質方式が上記(1)～(4)の点から水素輸送に適する可能性がある。そこでこの非平衡操作技術による水素製造方法、さらにこれを応用した炭素リサイクル水素システムについて下記に述べる。

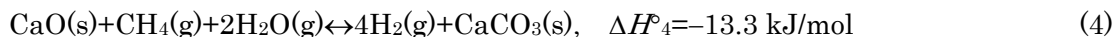
#### 改質原理:

改質反応生成ガス中の $\text{CO}_2$ 分離手法の候補として、酸化カルシウム/二酸化炭酸系

(CaO/CO<sub>2</sub>)の炭酸化反応性の利用がある<sup>7, 8, 9)</sup>。



メタン改質反応(1)・(2)と式(3)が単段で同時に反応するとすれば、次式が成立する。



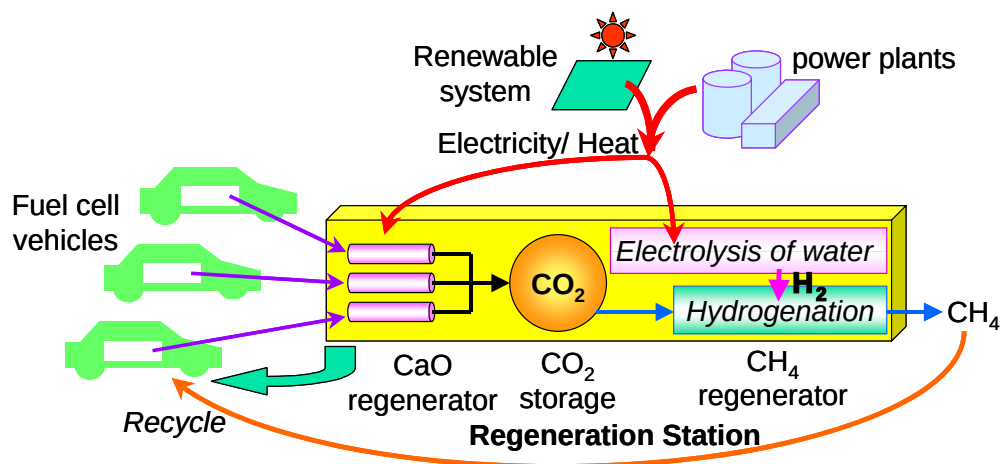
この反応の改質反応としての利点は、以下の通りである。

- (1) 改質反応生成物のCO<sub>2</sub>がCaO固体に固定化できる。
- (2) 気相生成物は高純度水素になりえる。
- (3) 反応が非平衡化され、改質正反応が促進され水素収率が向上する。
- (4) 非平衡化によりCOの転換反応も促進され、CO濃度を軽減できる。
- (5) 全体の反応は発熱反応ゆえに外部加熱無く進行可能である。
- (6) 単段で、シンプルに高純度水素供給が可能となる。
- (7) 生成する炭酸カルシウムは、加熱し脱炭酸反応が進行し、酸化カルシウムとして再生でき、本改質へ再使用できる。
- (8) 反応(4)を On-board(移動体上)で行うことで、結果的に水素圧縮のリスクを省略し、化学的に水素を輸送できる水素キャリアになりえる。
- (9) 脱炭酸プロセスで結果的にCO<sub>2</sub>を高純度に回収できる。
- (10) 回収CO<sub>2</sub>を適切に炭化水素再生することで、ゼロCO<sub>2</sub>エミッション方式の炭素リサイクル型水素システムが成立する。

式(4)の利用自体は古くから行われているが、利点(8)・(10)を生かした水素システムとしての利用は新しい。

### 3.2 炭素リサイクル水素キャリアシステム

式 4 の改質方法を利用することでCO<sub>2</sub>を排出しない移動体燃料電池むけの水素キャリアシステムが構成できる。図 3 に提案する炭素リサイクル水素キャリアシステムを示す<sup>10)</sup>。これは地域に分散させた改質パッケージ・炭化水素再生ステーションを中心とした水素システムである。各燃料電池移動体は式 (4) を行う酸化カルシウムと改質触媒とを混合充填した、改質パッケージおよび改質原料である炭化水素と水を搭載する。水蒸気改質をパッケージ内で進行させ、発生する高純度水素を燃料電池に供給し駆動する。水素供給を終了後、パッケージは地域の再生ステーションに回収される。ステーションではOff-peak電力、再生可能エネルギー源や高温プロセスからの電力または高温熱を受けてパッケージを 850℃程度に加熱しCaO再生を行う。生成したCO<sub>2</sub>は回収・貯蔵され、続くCO<sub>2</sub>処理プロセスで炭化水素に再生される。このために別途電気分解などにより水素製造を行い、CO<sub>2</sub>水素化によるメタン／メタノール／エタノールなどの炭化水素再生を行う。再生されたパッケージおよび炭化水素原料は燃料電池車で再び水素供給に用いられる。これにより、ゼロCO<sub>2</sub>エミッションとなる炭素リサイクル型の水素キャリアシステムが構築できる。

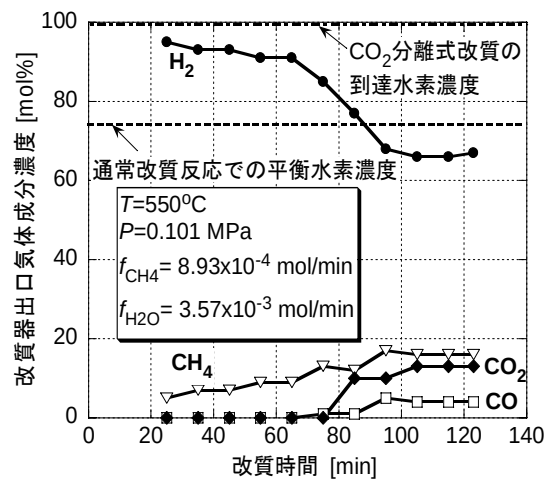


図－3 炭素リサイクル水素キャリアシステムの構成<sup>10)</sup>

### 3.3 改質器評価

実験室規模の二酸化炭素分離式燃料改質器によるメタン水蒸気改質実験の結果例を図 4 に示す<sup>9)</sup>。内径 15mm、酸化カルシウム粒子 8.1g、ニッケル触媒粒子 2.7gを混合充填し、水蒸気／メタンモル比＝4.0、改質反応温度 550℃、大気圧下で実験を行った。横軸は改質時間、縦軸は反応器出口ガス組成（キャリアガス、凝縮成分を除く）を示す。初期 60 minあたりまで、非平衡で改質反応が進み通常の改質改質反応平衡（点線）を越えて水素生成が進み、94 mol%水素生成が確認されている。一方でCO<sub>2</sub>吸収によりCOの転換反応も促進され、CO<sub>2</sub>、CO濃度は 1%以下であった。また通常は 700℃以上を要する改質反応の低温化が可能になっている。

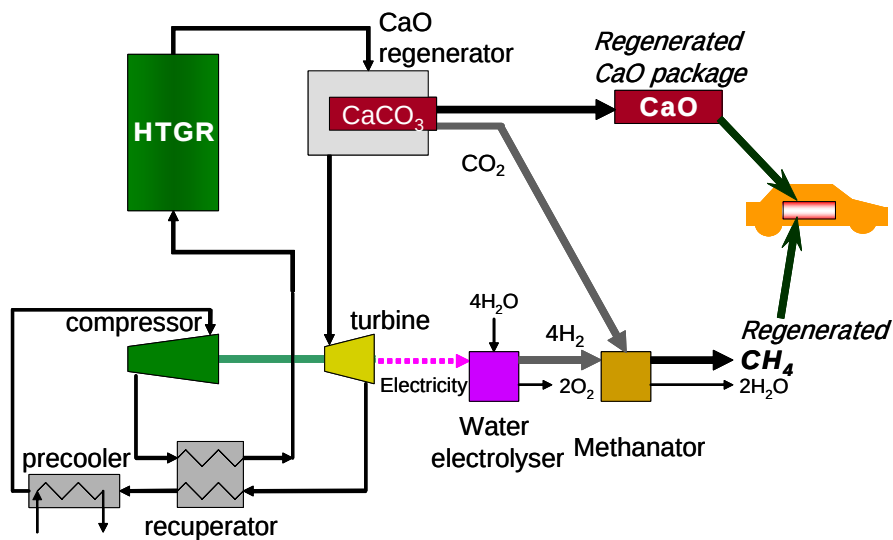
一連の実験結果を基に、走行距離 100 kmあたり水素 1.0 kgを消費する燃料電池移動体を想定し、各水素貯蔵方法、蓄電方法の貯蔵密度を比較した。車 1 台あたりの改質パッケージの所要CaO充填量は 7.9 kg、9.6 literで、反応メタン、水改質原料を加えた総合量は 14.4 kg、28.7 liter（メタンを貯蔵圧力 17.5 MPaとして）であり、5.5 kgのCO<sub>2</sub>が回収できると見積もられた。鉛蓄電池で同等距離走行に必要な蓄電池重量は約 400 kg、リチウムイオン型蓄電池で同 100 kgである<sup>15)</sup>。また、70 MPa圧縮水素で同量を貯蔵すれば 25.6 literの容器を必要とする。さらに金属水素化物 5.0 wt%貯蔵の場合 20 kgを要する。以上から提案の改質パッケージは他の蓄電池・水素システムに比較してもコンパクト、軽量な水素輸送媒体になると期待できる。



図－4 二酸化炭素分離型の燃料改質水素製造実験結果<sup>9)</sup>

原子力との協同化：

高温ガス炉（HTGR）と炭素リサイクル水素キャリアシステムの協働化システムの例を図 5 に示す。ここでは高温ガス炉の一次ループの高温部を炭酸カルシウムの分解に利用し、残りを発電、水素製造、二酸化炭素からの炭化水素再生に利用する。これにより、HTGR が持つ質的エネルギー（エクセルギー）を無駄なく活用できる。本システムは HTGR の高温熱の活動利用の一例である。



図－5 高温ガス炉と炭素リサイクル水素キャリアシステムの協働化システムの例

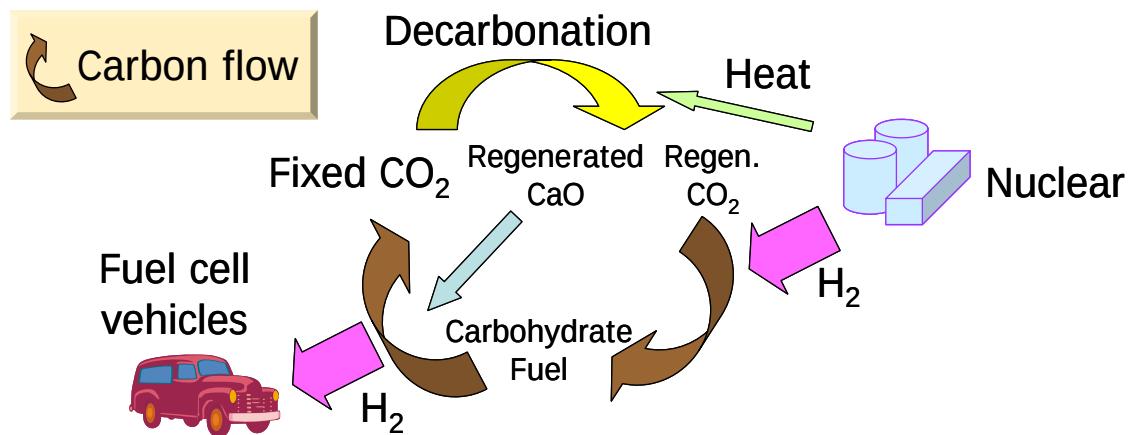


#### 4 課題

移動体の需要に応じた原子力水素の供給には量的な制約がありこの解決が課題である。

炭素リサイクル水素システムは炭素を媒体に、炭素ゼロエミッションで水素を供給する点で価値がある。炭素の循環流れの観点からそのシステムを描いたものが図 6 である。原子力からの熱で炭酸カルシウムが酸化カルシウムに再生され、二酸化炭素は原子力水素にて炭化水素燃料に再生される。

いま、燃料電池自動車が 1 台あたり 100km 走行し、その際水素を 1.0 kg 消費すると仮定する。所要水素を全て電気分解で製造する場合、原子力発電所 1GWe 電気出力、1 基で役 55 万台分の水素が供給できる。日本国内全体の自動車 7500 万台が全て燃料電池に置き換わった場合には、1GWe 原子炉 136 基が必要である。現状 55 基に対して、2 倍以上の増設が必要となる。このため、二酸化炭素ゼロエミッションの点で価値があるが、原子炉の量的な対応に限界があり、化石燃料から水素エネルギーへの完全な移行には長い期間を要することが予想される。

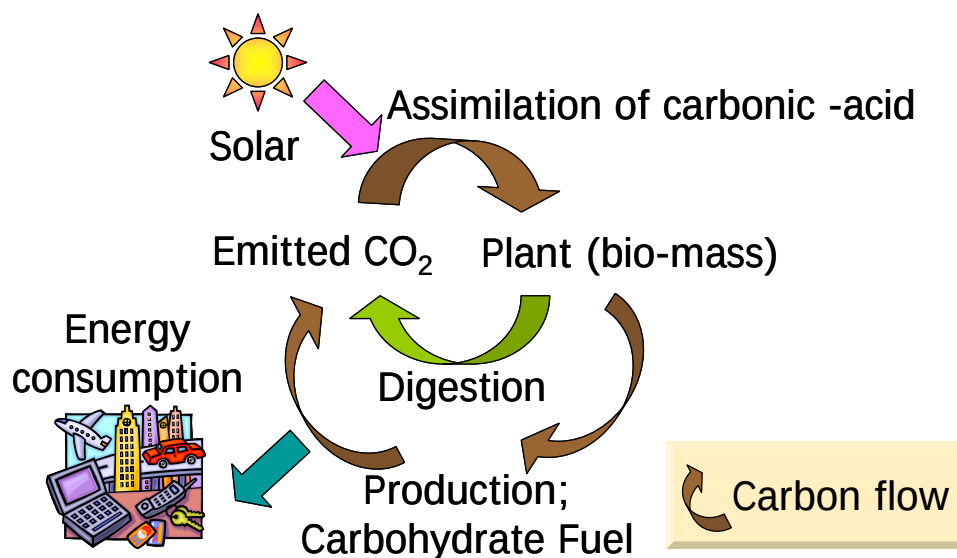


図ー6 炭素リサイクル水素システムにおける炭素フロー

カーボンニュートラル水素システム：

バイオマス由来の炭素利用は地球系内において炭素が循環再利用されており、カーボンニュートラルなシステムとしてとらえられる。図 7 にカーボンニュートラルシステムの炭素循環サイクルをしめす。ここでは炭化水素燃料からエネルギー消費の際に発生する二酸化炭素は植物に回収される。植物では炭酸同化作用により再び炭化水素に再生される。このシステムは太陽光をエネルギー源としている。産業革命以前の持続的なエネルギーシステムであった。現在、トウモロコシなどの農業生産物を利用した発酵によるエタノールなどの炭化水素燃料（バイオフューエル）が市場を広めている。このシステムの実現が理想であるが、現代社会エネルギー需要に量的な対応ができず、全ての需要を満たすことは困難

である。すでにトウモロコシなど農作物由来の燃料に関しては、食料供給側との間に資源争奪があり、市場間に軋轢が生じている。



図ー7 カーボンニュートラルエネルギーシステムにおける炭素循環

## 5 ロードマップ

原子力アシスト型カーボンニュートラルエネルギーシステム：

バイオマス利用型のカーボンニュートラル水素システム量的な対応ができない一つの要因は炭化水素生産収率が低いことである。概ねバイオマス原料中の炭素の 1/3 が有用な炭化水素水素に変換できるが残り 2/3 は消化、分解限界などがあり、活用されないままに大気に二酸化炭素として排出される。バイオマスの炭素をより収率高く利用するにあたり原子力が活用できる。原子力発電から製造された水素をバイオマスに添加することで効率のよい炭化水素燃料の製造が可能であり、理論的には従来の 3 倍近い燃料が得られることになる（図 8）。ここでは原子力エネルギーはバイオマスのエネルギーを支援する側であり、図 6 の原子力ベースの水素システムに対して、原子力の負担が減るため、より現実的な対応が可能となる。

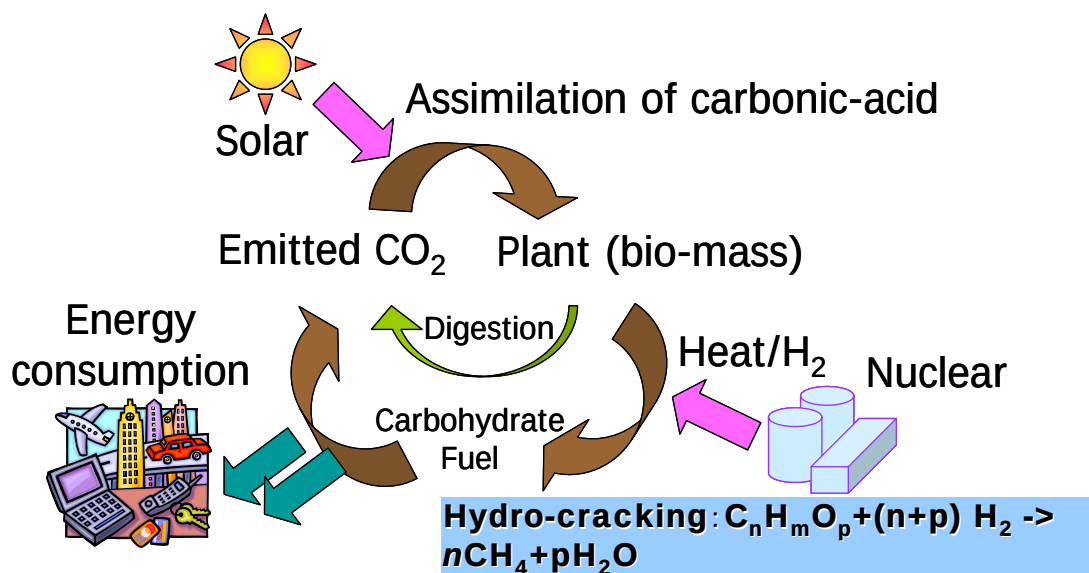
バイオマスの国内排出量はおよそ火力発電利用基準で 17GWeに相当する<sup>11)</sup>。仮に原子力による支援が可能であれば、バイオマス由来のエネルギーを概ね 3 倍、51GWe程度まで活用できる。全自動車での水素需要の 1/3 に相当する。

よって、原子力の普及に伴い、まずは原子力アシスト型カーボンニュートラルエネルギーシステム、ついで、炭素リサイクル水素システムへと移行することが合理的であると考えられる。よって今後は原子力アシスト型と、炭素リサイクル型を複合したエネルギーシステムが期待できる。

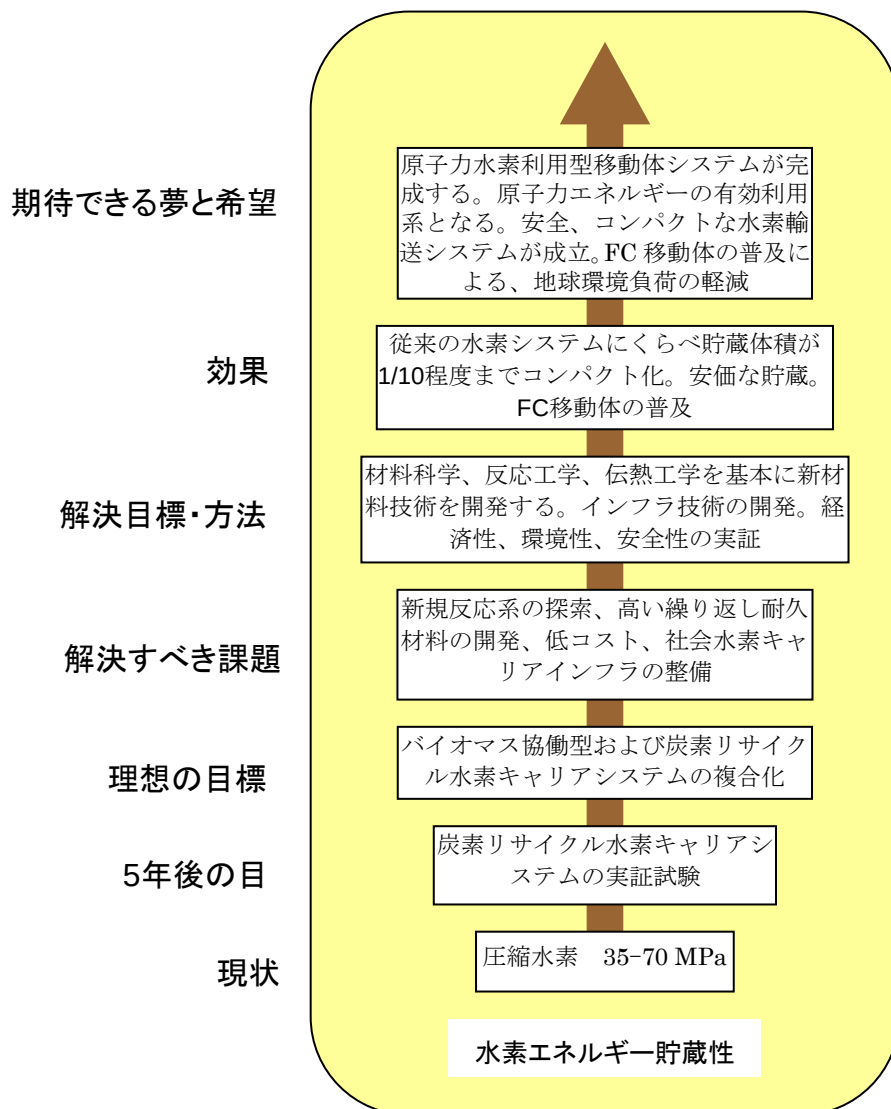
他のエネルギー貯蔵・水素システムに比較して、本水素キャリアシステムは化学反応を利

用した高密度なエネルギーキャリアの可能性の一例といえる。

図－9 に本技術の将来にむけたロードマップをしめす。



図－8 原子力アシスト型カーボンニュートラルシステム



図ー9 原子力水素システムのロードマップ

## 6 サマリー

分散型システムにおけるエネルギーメディアとして水素の利用普及を図るには、合理的な水素製造および、安全、安価な水素輸送技術の確立が重要である。原子力は量的な対応が可能な非二酸化炭素排出系エネルギー源である。原子力をエネルギー源に非平衡技術を利用した水素製造は新しい水素製造の可能性を持っている。この特性を生かすことで、分散型システムへの水素供給の手段の一つとなりえよう。二酸化炭素分離型改質器は移動体への利用に可能性があり。コンパクトな炭素リサイクル型の水素キャリアシステムを構築できる可能性がある。とくに高温ガス炉との協働が期待できる。移動体燃料の原子力水素へ

の移行には、日本の場合、現状の 3 倍の原子炉を必要とし、整備には長時間を要する。これに対し原子力アシスト型カーボンニュートラルシステムは中期的に二酸化炭素循環型システムとして有効である。将来的には両技術をベストミックスしたシステムが望まれよう。これらの技術が来るべき原子力利用型分散エネルギーシステム社会へ貢献することを期待したい。

## 引用文献

- 1) 燃料電池実用化戦略研究会編： ”燃料電池実用化戦略研究会報告” (2001)
- 2) 総合資源エネルギー調査会：“基本計画部会報告書-エネルギー基本計画” (2003)
- 3) トヨタ自動車株式会社：“TOYOTA FCHV BOOK” (2003)
- 4) 大阪ガス株式会社：環境・社会行動レポート 2003、52 (2003)
- 5) 白崎義則ら：化学工学会 第 35 回秋季大会要旨集, X202 (2002)
- 6) Yabe, T. et al.: Proc. of 4th International Symposium on Beamed Energy Propulsion (ISBEP4), Nara, Japan, (2005)
- 7) Balasubramanian, B. et al.: Chem. Eng. Sci., 54, 3543 (1999)
- 8) 特開 2001-3054 (2001)
- 9) Kato, Y. et al.: J. Chem. Eng. Japan, 36, 860 (2003)
- 10) Kato, Y., et al.: Chem. Eng. Res. Design, 83(A7), pp. 900-904 (2005)
- 11) 堀尾、野田、骨太のエネルギーロードマップ、化学工学社(2006)