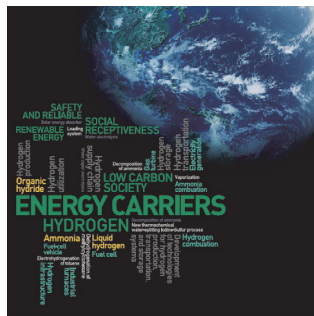


CO₂を排出しないエネルギー(アンモニア)CO₂ Free Energy (Ammonia)

戦略的イノベーション創造プログラム
(SIP)エネルギーキャリア⁽¹⁾

飯嶋 正樹^{*1}
Masaki Iijima

洲崎 誠^{*2}
Makoto Susaki

古市 裕之^{*3}
Hiroyuki Furuichi

米川 隆仁^{*4}
Takahito Yonekawa

仙波 範明^{*4}
Noriaki Senba

長安 弘貢^{*5}
Hiromitsu Nagayasu

パリ協定を守るためには今世紀後半には CO₂ の排出をゼロ化することが求められており、言い換えると CO₂ を排出しない燃料(CO₂ フリー燃料)が必要になると考えられる。その中でアンモニアはポータブルな燃料として運びやすく天然ガスから容易に製造できるとともに製造の際排出する CO₂ を回収貯留することで CO₂ フリー化を達成できる。アンモニアの製造の歴史は長く、現在世界的に比較的安価で流通しており、その直接燃焼による利用も戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)エネルギーキャリアの研究で可能となりつつある。CO₂ フリー燃料が使用されるような制度が整備され温暖化対策として利用されることを期待したい。

1. はじめに

1) パリ協定と CO₂ 排出ゼロ目標

2015 年 12 月にパリ協定が採択された。パリ協定全体の目的として、世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して 2℃未満に抑えることが掲げられた。そして、特に気候変動に脆弱な国々への配慮から、1.5℃以内に抑えることを目指すとしている。

そのための長期目標として、今世紀後半に、世界全体の温室効果ガス排出量を、生態系が吸収できる範囲に納める目標が掲げられた。これは、人間活動による温室効果ガスの排出量を実質的にゼロにしていこうという目標である。

パリ協定を守るためにはいずれにしてもあらゆる分野における CO₂ 排出削減や今世紀後半には CO₂ 排出量ゼロ化、さらにはネガティブエミッションと呼ばれる大気中の CO₂ を削減する手法の導入も必要になるとされている。

2) CO₂ フリー燃料の必要性

近年太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が進み、今後さらに電力の分野において再生可能エネルギーの比率は増加することになるが、将来的には再生可能エネルギーで賄えない時間帯での対応や電力の負荷調整機能、また再生可能エネルギーの利用が難しい一般産業の熱源や、輸送用途など CO₂ 回収貯留で対応できない分野において CO₂ を排出しない燃料のニーズは多岐にわたる。

我が国では WE-NET 計画以来水素エネルギーの利用の研究が推進されてきたが、最近ではエネルギーセキュリティの目的よりはむしろ温暖化対策の目的で水素利用が検討されている。

水素の運搬手段として、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアが検討され CO₂ を排出せず

*1 三菱重工エンジニアリング(株) CO₂・環境事業推進室 技師長

*2 三菱重工エンジニアリング(株) CO₂・環境事業推進室 室長

*3 三菱重工エンジニアリング(株) 計画部 部長

*4 三菱重工エンジニアリング(株) 計画部 グループ長

*5 総合研究所 主席プロジェクト統括

水素製造ができればあとはいかに経済的に水素を運搬し利用するかである。

いずれにしても、今後あらゆる分野で CO_2 を排出しない安価な燃料を提供することが求められるだろう。

3) SIP エネルギーキャリア

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の中の“エネルギーキャリア”として研究開発に取り組んでいるのは、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアの3方式である。その生産(石油・天然ガス・石炭からの生産と再生可能エネルギーからの生産)、輸送及び利用(水素としての利用とアンモニアの場合直接利用)について研究開発が 2014 年度から5年計画で進められて来た。化石燃料である石油、天然ガス、石炭から水素やアンモニアなどの CO_2 フリー燃料を生産する場合 CO_2 回収貯留(CCS)が不可欠となる。一方再生可能エネルギーにより生産した電力や高温の熱を用い水の電気分解により水素の安価な製造についても試験研究が行われた。

図1⁽¹⁾にエネルギーキャリアにおいて行われている試験研究の全体像を示す。

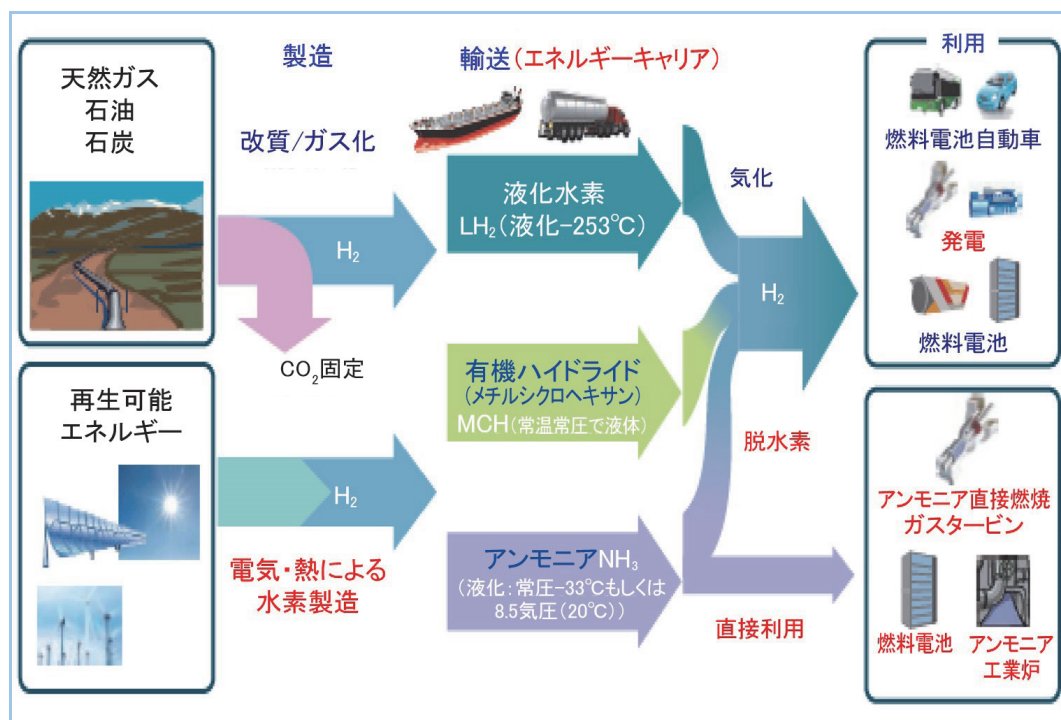


図1 エネルギーキャリアで行なわれている試験研究

2. SIP エネルギーキャリアの取り組み

1) 燃料としての試験研究

エネルギーキャリアの試験研究⁽¹⁾は 2014 年度から 2018 年度までの5年計画で下記の試験研究を行うとともに、水素を運ぶ3方式の評価を行っている。

- 高温太陽熱供給システム
- 熱利用水素製造
- CO_2 フリー水素利用アンモニア合成システム開発
- アンモニア水素ステーション基盤技術
- アンモニア燃料電池
- アンモニア直接燃焼
- 有機ハイドライドを用いた水素供給技術開発
- 液体水素用ローディングアームシステム開発とルールの整備
- 水素エンジン技術開発
- エネルギーキャリアの安全性評価

これらの水素製造や水素、アンモニアの利用研究を行うことで、水素の輸送方式も含めどのような方式が好ましいかを評価すること、また我が国が世界に先駆け、利用技術開発を行うことを目指して行われた。これらの試験研究の中で5年間の研究の後半ではアンモニアの直接利用研究に力をいれ、アンモニア直接燃焼としてガスタービン、レシプロエンジン、ボイラ、工業用炉及びアンモニアの固体酸化物燃料電池(SOFC)における直接利用などの試験研究が行われた。2017 年7月には中国電力の石炭火力発電所においてアンモニアの混焼試験が行われた。これらの試験研究において、アンモニアの直接燃焼において実用化の見通しが得られたことはエネルギーキャリアの試験研究の大きな成果であった。

2) 3方式の評価

我が国の場合、従来燃料である石油・天然ガス・石炭資源に乏しく、再生可能エネルギーを最大限導入しても、我が国のエネルギー全てをまかなうことは不可能とされており、どうしても海外のエネルギー源から CO₂フリー燃料を生産し輸入する必要がある。燃料のような大量の物質を輸送する場合、液体又はガス体の場合ではパイプラインが最も経済的であるが、長距離や海洋をまたいで輸送する場合液化して船輸送することになる。

水素の場合その液化温度が-253℃と極低温となるため、水素の液化動力が非常に大きく、また-253℃を保つのも容易ではない。

アンモニアの場合-33℃常圧下で液体となる。一方8.5気圧に加圧すれば常温でも液体であり取扱いがしやすく、直接燃料として利用できる利点がある。有機ハイドライトはトルエンに水素を添加してメチルシクロヘキサンとし常温、常圧下で輸送できるがメチルシクロヘキサンから水素を取り出す際に多大なエネルギーを必要とする。

これら理・化学的性質と現在世界的に流通していることから SIP の“エネルギーキャリア”においては、アンモニアが CO₂フリー燃料として重要な役割を果たすことが可能との結論になった。

表1⁽²⁾に圧縮水素、液体水素、有機ハイドライトとアンモニアの物理的性質を比較している。

表1 NH₃の物性と主なエネルギーキャリア

	水素含有率 (重量%)	水素密度 (kg・H ₂ /m ³)	沸点 (℃)	水素放出 エンタルピー 変化* (kJ/molH ₂)	その他の特性**
アンモニア	17.8	121	-33.4	30.6	急性毒性, 腐食性
メチルシクロヘキサン (MCH)	6.16	47.3	101	67.5	引火性, 刺激性
液化水素	100	70.8	-253	0.899	強引火性, 強可燃性, 爆発性
圧縮水素 (350 気圧)	100	23.2	—	—	
圧縮水素 (700 気圧)	100	39.6	—	—	

*: MCHトルエン(C₇H₈) (分子量 92)とMCH(C₇H₁₄) (分子量 98)の水素の差により水素を運ぶ



* 水素放出エンタルピー変化: 水素を取り出す際に必要となるエネルギー。

** “その他の特性”の記載事項は、MSDSの“危険有害性情報”のサマリーから引用。各物質の正確な特性については、それぞれの物質のMSDSを参照のこと。

3) アンモニアの有効性

アンモニアはその物理的性質がLPGとほぼ同じことから、LPG船を用いても輸送することが可能である。現在世界のアンモニア生産量は1.8億トン／年で、その80%程度が尿素等の肥料として用いられているが、約10%の1,800万トン／年が国際的に流通している。

アンモニアの現時点(2018年10月)の米国メキシコ湾岸の価格はFOBベースで250US\$/Tとなっている。この価格は1ミリオンBTU(MMBTU)換算で14.3US\$となり、原油価格

70US\$/BBL(13.5 US\$/MMBTU)(WTI 価格)と比較しても発熱量当り同等かやや高い程度の価格となっている。

アンモニアは常温で加圧すれば LPG と同じように液体となることから、ポータブルとなる燃料としてその最終利用の際に使いやすい。

特に輸送用燃料として使用する場合、常温での運搬が容易であることは非常に大きなメリットとなる。しかしながらアンモニアの毒性や漏れた場合の臭いの問題から一般家庭の近くでの使用には問題があると考えられ、発電所や工場及び貨物船等管理された場所での利用が中心となるのではないかとと思われる。

3. CO₂ フリーアンモニアの製造方法

現在アンモニアの製造方法としては、ドイツ人のハーバーとボッシュが 1913 年に実用化した鉄触媒を用い水素と窒素からの合成方法が現在でも使用されており、三菱重工エンジニアリング(株)(以下、当社)は 1958 年以降数多くのアンモニアプラントを世界各国に納入している。このアンモニア合成は現在では天然ガスを原料に用いる方法が一般的である。

天然ガスをスチームとともにスチームリフォーマで加熱しながら触媒を通すことで水素と CO に変換しそのあと空気を注入し、さらに空気中の酸素で燃焼させながらメタン分の残りを水素と CO に変換し同時に窒素を供給する。CO は触媒を用い水蒸気を添加して CO₂ と水素に変換し、その後 CO₂ を分離することで水素と窒素を生成し、この水素と窒素とからアンモニアを合成する。

図2は標準的アンモニアプラントである 2000T/D 規模のプラントにおける CO₂ のバランスを示す。アンモニアプラントにおいて約 2/3 の CO₂ がプロセス系から分離されており、スチームリフォーマや補助ボイラの排ガスから約 1/3 の CO₂ が排出されているが、この燃焼排ガスから CO₂ を回収しプロセス系からの CO₂ と共に地中貯留または Enhanced Oil Recovery (EOR) に利用すればこのアンモニアプラントは CO₂ フリーとなり、CO₂ を排出しないアンモニア燃料システムを構築することができる。

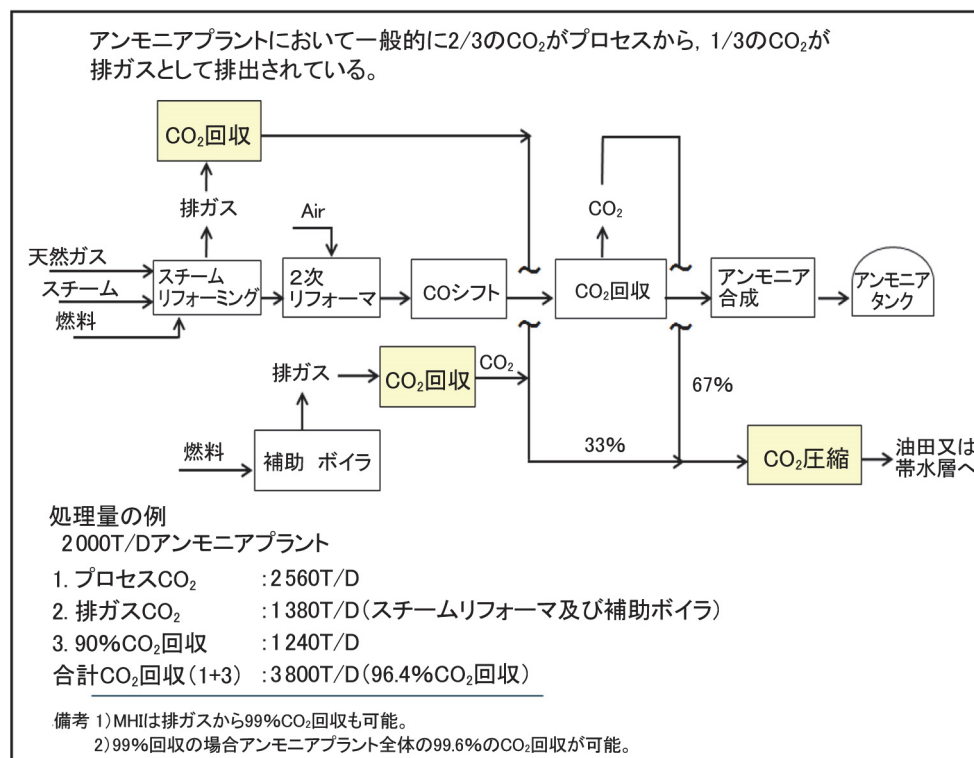
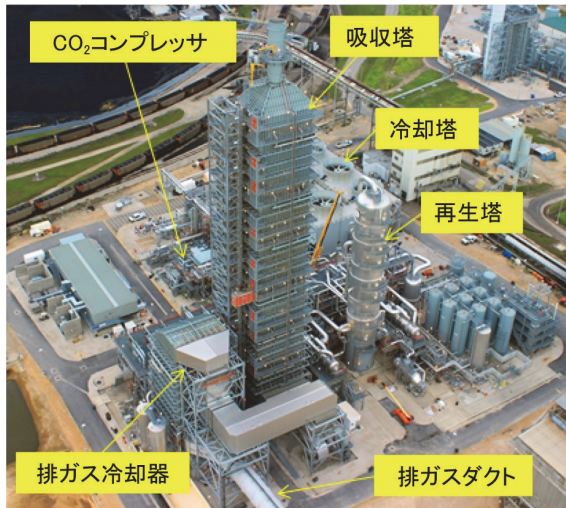


図2 アンモニアプラントの CO₂ バランス

当社は米国テキサス州の石炭火力に世界最大の CO₂ 回収装置を 2017 年 1 月に納入し、回収した CO₂ はウエストランチ油田において EOR 用に用いられ、原油の回収と共に CO₂ は油層に貯

留されている。図3は石炭火力からの CO₂ 回収装置の全景を示す。



NRG Energy, Inc. 及び JX Nippon Oil & Gas Exploration Corporation 社
Petra Nova プロジェクトの写真

図3 石炭火力からの CO₂ 回収装置

また同じく米国アラバマ州において Southern Company と共同して実施している石炭火力からの CO₂ 回収と回収した CO₂ の帯水層貯留実証試験 (SECARB^{※1} による実施) を 2011 年から行っている。図4は CO₂ 回収貯留プロジェクトの全体構成図を示す。このように CO₂ の回収貯留は商用ベースで行われており、アンモニアプラント排ガスからの CO₂ 回収と合わせ CO₂ フリーアンモニアの製造に関する技術は既に確立されている。

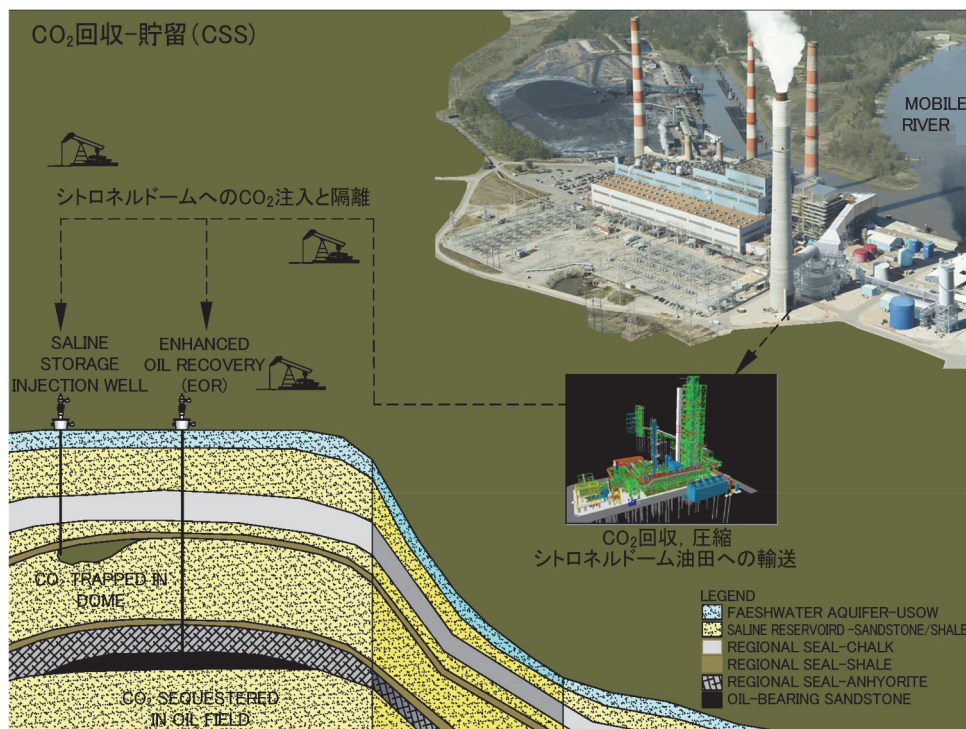


図4 CO₂ 回収・貯留プロジェクト全体像

プロセス系からの CO₂ はそのまま貯留でき、また当社が実績の多い燃焼排ガスからの CO₂ 回収技術 (関西電力(株)との共同開発による KM CDR Process^{®※2}) を用い燃焼排ガスからの CO₂ を 90% 回収し、プロセス系からの CO₂ と合わせ貯留することでアンモニアを製造する際に発生する 96% の CO₂ を貯留することができる。もし排ガスから 99% 回収した場合 99.6% の CO₂ が貯留でき、ほぼ完全に CO₂ を大気に排出せずアンモニアが製造できることになる。

この方法とは別に再生可能エネルギーから製造した電力を用い、水の電気分解と空気中の窒

素を分離してアンモニアを合成する方法も CO₂を排出しないアンモニア合成法である。現在世界各地で安価な天然ガスが多量に生産されているため 天然ガスから合成されるアンモニアの方が再生可能エネルギーから生産する方式よりはるかに安価に生産できる。

※1 米国 Southeast Regional Carbon Sequestration Partnership

※2 KM CDR Process[®]は、三菱重工エンジニアリング(株)の日本、米国、欧州連合(EUTM)、ノルウェー、オーストラリア及び中国における登録商標です。

4. アンモニアの燃料としての利用の歴史

アンモニアを燃料として使用することに違和感を覚える方もおられると思うが、第2次世界大戦中にベルギーにおいて 100 台のアンモニアバスが使われていた。

ディーゼル燃料が手に入らないため、必要に迫られてアンモニアを燃料として使用していたのである。

また、1959 年～1968 年にかけて米国空軍の X-15 有人ジェット戦闘機がアンモニアを燃料として高度 107960m マッハ 6.7 を記録している。10 万メートルの高度では気温が非常に低く 低温でも固まらないアンモニアが燃料として選ばれたものと考えられる。

5. まとめ

CO₂ フリー燃料の目的はあくまでも温暖化対策であり、パリ協定に基づく+2℃目標またはそれ以下を目指す場合、2050 年時点で世界の CO₂ 排出量を 1/2 に、また先進国は 80%削減しなければならず、そのためにはあらゆるところで使える CO₂ フリー燃料の重要性が増してくると考えられる。当社は CO₂ フリーアンモニアの製造技術を既に商用的に確立しており、いつでも供給できる状態にある。

しかしながらアンモニアは発熱量ベースで石炭や LNG より高く、原油と比較しても高いが、アンモニアを CO₂ フリー燃料として広く用いられるためには、導入の初期には何がしかの政策的インセンティブが不可欠にならうと思われる。

本報の作成に当たって“エネルギーキャリア”の研究開発を推進されて来られた戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の中の“エネルギーキャリア”の関係者の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)パンフレット, エネルギーキャリア 内閣府, 国立研究開発法人 科学技術振興機構
http://www.jst.go.jp/sip/pdf/SIP_energycarriers2016.pdf
- (2) アンモニア:エネルギーキャリアとしての可能性(その1)(その2) 塩沢文朗 国際環境経済研究所 主席研究員“水素エネルギーシステム”一般財団法人 水素エネルギー協会 2017 年 Vol.42
<http://ieei.or.jp/2017/05/expl170523/>
<http://ieei.or.jp/2017/05/expl170525/>