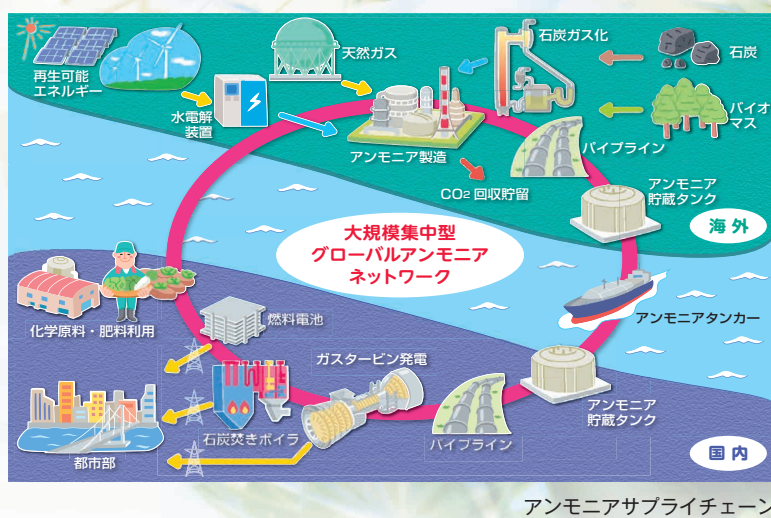
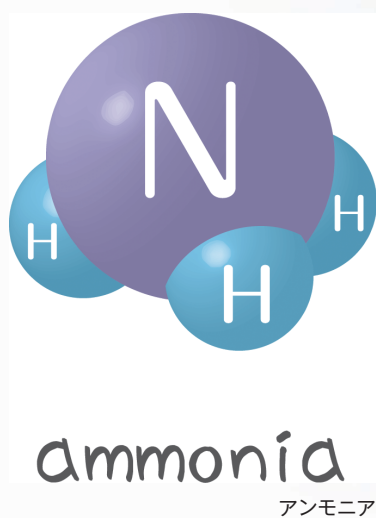


アンモニアによるカーボンニュートラルの実現に向けて

生産から利用までのサプライチェーンの構築

グリーン成長戦略の成長事業と期待される燃料アンモニアについて、エネルギーキャリアそして燃料としての特徴と、サプライチェーン構築に向けた IHI の取り組みを紹介する。



1. カーボンニュートラル化

実質炭素排出量ゼロ化に向け、2020年12月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定され、日本はスタートラインに立った。成長が期待される重要分野に、CO₂を排出しないカーボンニュートラル燃料である水素・アンモニア産業が挙げられ、2050年で発電量の10%を担い、それに先駆けて2030年に導入を開始することが想定されている。

ボイラ・蒸気タービン (BTG) やガスタービン (GT) などの火力発電は、2018年度時点で、発電によるCO₂排出量は4.6億tと国内総排出量の4割を占め、その削減が強く求められている。変動性再生可能エネルギーを主力電源として、大量導入することが計画されているが、その場合においても、負荷調整機能やアン

シラリー機能に優れた火力発電は、電力システムの安定運用のために必要である。そのため、火力発電へのカーボンニュートラル燃料の導入は、即効性のあるCO₂削減対策となるばかりか、将来の電源構成においても必要となる。アンモニアは、肥料や化学原料として長く利用されてきた一方、燃料としてはなじみが薄いですが、水素キャリアの一つとして、海外の安価な再生可能エネルギーで製造して輸送、利用されることが期待されている⁽¹⁾。

本稿では、カーボンニュートラル燃料そして水素キャリアとしてのアンモニアの特徴と、製造から利用技術の状況、そしてサプライチェーン構築に向けた取り組みと課題について紹介する。なお、各開発の詳細は本号の別稿を参照いただきたい。

2. 水素エネルギーキャリア

燃料生産から利用までのライフサイクルで CO₂ 排出を増やさないカーボンニュートラル燃料は、バイオマス由来か水素由来に大別される。バイオマスは、国内に加えて海外より輸入され、ボイラ発電などに利用されているが、国内発電量をすべて賄う資源量の確保は難しい。それに対して、水素は、電力と水があればどこでも製造可能である。広大な土地があり気象条件が適する海外地域では、安価な再生可能エネルギーで水素を生産し、輸出することが検討されている⁽¹⁾。また、化石資源を原料として、ガス化、改質プロセスによっても水素は製造可能で、製造プロセスで排出される CO₂ を回収・地下隔離することでカーボンフリー水素を得ることができる。

しかし、水素は密度が低く容積当たりの燃焼発熱量は小さいため、輸送効率を改善するために、高圧化、液化、吸蔵、さらには他の物質に変換することが検討されている。アンモニアの燃料の特徴について、メタンと水素との比較を右上表に示す。大量輸送する船舶では、容積当たりの輸送効率が重要で、液体アンモニアの容積当たりに含まれる水素量は液体水素の 1.7 倍、燃焼発熱量は 1.5 倍となり、水素エネルギーキャリアとしての優れた特性をもつ。また、アンモニアの大気圧の沸点は -33.4℃で、汎用冷凍機により液化し容易にハンドリングができる。

2.1 アンモニアの生産と貯槽・輸送

アンモニアの大量製造技術は、窒素と水素から合成するハーバー・ボッシュ (HB) 法により 20 世紀初頭に確立し、これで生産される肥料は、世界の食糧生産を支えている⁽²⁾。現在、世界で年間約 2 億 t 近く生産され、2 000 t/日規模の製造設備が各地で稼働しており、数万 t クラスの液化ガスタンカーで輸送される国際取引商品である。

製造プロセスは、成熟した技術であるが、燃料利用では生産規模が桁違いに拡大されるので、設備のスケールアップにより、製造コストのさらなる低減が期待される。また、再生可能エネルギーと水電解で製造される水素は低圧である場合が多く、HB 合成プロセスの反応器の圧力は 10 ~ 30 MPa で、水素ガス昇圧に大きな動力を必要とする。低圧低温で作動する合成触媒はさらなる生産効率向上のブレークスルー技術で

項目	単位	アンモニア	水素	メタン
沸点 @ 大気圧	℃	-33.4	-252.5	-161.5
液 密 度	kg/l	0.674	0.071	0.422
蒸 発 熱	kJ/l	923	36	79
燃 焼 発 熱 量	MJ/l	12.5	8.5	21.2
可 燃 範 囲	vol%	15 ~ 28	4 ~ 75	5 ~ 15
最大燃焼速度	m/s	0.09	2.91	0.37
断熱火炎温度	℃	1 750	2 120	1 970

燃焼特性の比較

あり、研究開発が世界で進められている。

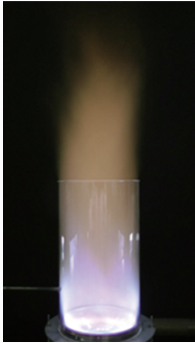
貯蔵設備については、IHI は液体アンモニアタンクや払出し設備の設計、施工に関して半世紀以上の経験がある。アンモニアは、劇物に指定される管理物質であり、扱いには専門的な知識や技術が必要で、高圧ガスや冷凍などさまざまな利用分野に応じてガイドラインや法制度が整備されている。低温貯蔵設備は、外部への漏えいを防ぎ断熱性を高めるため、金属二重殻タンク式シングルコンティンメントか PC (プレストレストコンクリート) タンク式フルコンティンメントに分かれ、PC タンクでは防液堤が外槽を兼ねる。材料については、銅は腐食するため電気製品など注意を要し、タンク内のサブマージポンプは、モーターとポンプを絶縁したマグネティックカップリング構造を採用する必要がある。一方、漏えいアンモニアを除害するには水噴霧が有効である。これらの設計、運用については、法制化されており、安全な利用技術が確立されている。

2.2 アンモニアの燃料としての特性

アンモニアの燃焼総括反応式は、 $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ で表され、水と窒素が生成され、大気と水循環系を通して地球を循環する。アンモニアの燃料としての利用例は、第二次世界大戦下ベルギーの公共バスや、1960 年代にアメリカ空軍の最速有人飛行を達成した X-15 のエンジンがあるが、それらは特殊な社会環境や目的に限られる⁽³⁾。しかし、今後燃料として広く利用されるには、当然であるが環境、安全そして経済性に配慮しなくてはならない。

メタンと比較して、燃焼発熱量は重量当たり約 4 割で、断熱火炎温度は 220℃ 低下するが、自立燃焼には十分な発熱量、燃焼温度がある (上表)。しかしながら、燃焼速度はメタンの 1/4 程度で、次ページ上図に示すように長炎化して、燃焼距離や燃焼安定化に配慮した設計が必要となる。また、燃料中に窒素を含むことから、量論比に対して酸素過剰で燃焼させると

(a) アンモニア火炎



(b) メタン火炎



アンモニア燃焼火炎

NO_x を生成するが、燃料過剰では亜酸化窒素 (N₂O) そして未燃アンモニアが生成する。一方、アンモニアおよびその分解ラジカルは、NO_x と直接反応して窒素に還元する。これらのアンモニア燃焼特性を考慮、活用することで、安定性と NO_x 抑制を両立するボイラ、ガスタービンなどの燃焼技術が開発され、実用化へ大きく進展した。

2.3 燃料アンモニアによる発電技術

IHI は、アンモニアのエネルギーキャリアとしての可能性に注目し、2014～2018 年度に実施された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⁽⁴⁾ に参加し、各種の発電技術開発を実施した。

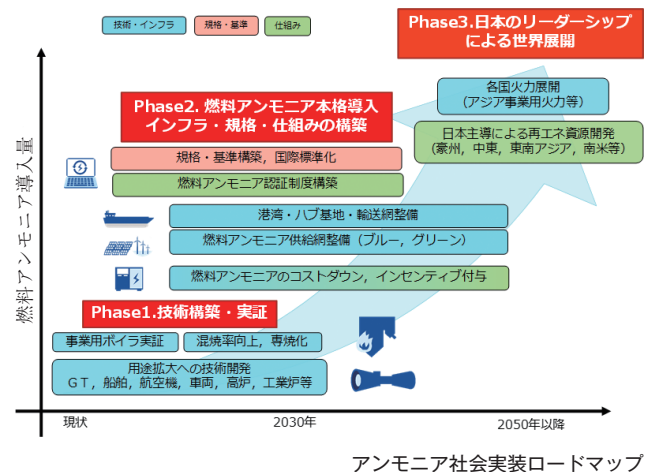
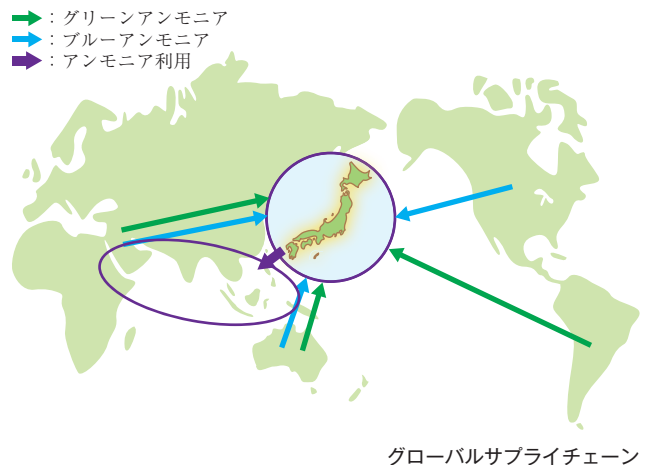
2014 年よりガスタービンでのメタン混合燃焼 (以下、混焼) 技術開発に取り組み、また、翌 2015 年より石炭火力ボイラ向けにアンモニアと微粉炭混焼技術の開発に着手した。石炭火力発電ボイラと同じ構造の微粉炭焚き燃焼バーナを改造したアンモニア混焼バーナを開発し、微粉炭専焼と同等かそれ以下の NO_x 排出に抑制できることを実用規模の燃焼試験で実証した。こ

の成果は、ガス処理設備などの大きな改造なく微粉炭火力発電設備へアンモニアを導入できる可能性を示しており、カーボンニュートラル燃料の早期実装の最右翼として期待されている。燃料アンモニアの利用可能性を広げるため、ボイラ、ガスタービンでの高混焼率化や専焼発電技術開発に加えて、船用内燃機関やローカルエネルギーネットワーク向けに固体酸化型燃料電池 (SOFC) の技術開発を進めている。

3. サプライチェーンの構築

発電容量 1 000 MW の石炭火力発電設備に 20% アンモニア混焼を適用した場合、年間の燃料アンモニア需要は 50 万 t 以上となり、これは現在の日本のアンモニア需要のおよそ半分近くに相当する。経済産業省が取りまとめた「燃料アンモニア導入官民協議会 中間取りまとめ」⁽⁵⁾ においては、2050 年で年間 3 000 万 t のアンモニア需要が想定されており、既存のインフラより桁違いに大規模なサプライチェーンの構築が必須となる。

製造については、スピードと規模を重視したサプライチェーンの構築期から、持続性のある恒久的供給網への段階的移行が必要である。まずは、大量生産技術が確立している天然ガスなど化石資源から改質やガス化により水素を作り、その際に排出される CO₂ は、CO₂ 回収・利用・貯留 (CCUS) により地下固定化して、窒素との反応によりカーボン排出量がニアゼロとなるブルーアンモニアを生産する。アンモニア製造プラントユニットの最大生産規模は現状約 3 000 t / 日であるが、数倍規模の大型ユニット化により、生産コストを削減できる。また、安価な原料の確保や、CO₂ 回



収・固定化コストの低減についても重要である。将来的には、持続的サプライチェーンの確立に向けて、再生可能エネルギーと水電解で製造した水素を原料としたグリーンアンモニアへ移行させる。これに適した地域は、地下資源と再生可能エネルギー資源の双方が豊富にあるオーストラリア、中近東、北米、チリなどであり、それら地域では将来のエネルギー輸出を見込んだプロジェクトが複数検討されている。グリーンアンモニアは、現状では水電解水素のコストが高いことなどからブルーアンモニアに対して生産コストは高くなるが、水電解装置の大型化、高効率化などの開発による低価格化が進められている。

アンモニアの輸送に関しては、液化ガス船による輸送はすでに行われているが、最大船型となるVLGC (Very Large Gas Carrier) でのアンモニア輸送、大型受け入れ基地の整備が必要となる。現在、カーボンニュートラルポートの議論が進められ、アンモニアの貯蔵タンクについては、LNGのようなPCタンクの採用が考えられるが、アンモニアによる応力腐食割れ耐性のある材料開発や施工検討を日本がいち早く進めることで、国際規格化をリードすることができる。

アンモニアの利用は前述のとおり、火力発電への利用による大規模な需要を開拓した後、産業用加熱炉などの用途への展開が期待できる。利用側の需要拡大を進めることで、供給側への参入も増やしつつ受け入れインフラも整え、規模の大型化によりコストダウンを図り、さらに利用側が増えるといった展開を図っていく。なお、サプライチェーンの構築には、ハードの開発以外に、サービスや規格などソフト面の開発、整備も必要となる。標準・基準作成に当たっては、アンモ

ニア利用に興味をもつ企業が集まる一般社団法人クリーン燃料アンモニア協会 (CFAA) において、議論、検討が進められる予定で、IHI はこれらにも積極的に参加するとともに、国際標準化も含め世界での普及を進めていく。

4. アンモニアが運ぶさらなる価値

アンモニアが運ぶものは、エネルギーのほかに冷熱や水もある。液体アンモニアの蒸発熱はLNGや液体水素に比べて圧倒的に大きく、冷熱は倉庫や地域冷房、さらにはデータセンターの冷却への利用が考えられる。また、燃焼排ガスからは、輸送される液体アンモニアとほぼ同じ容積の水を理想的には回収でき、水が不足する地域や離島では、エネルギーに加えて水の供給にもなる。大量導入されることで、これらを活用した構想や技術開発も今後期待される。

アンモニアによるエネルギーサプライチェーンは、日本発のモデルであり、世界に先駆けて実現することにより、アジア、アフリカなど化石資源に頼らざるを得ない地域への、ハード、ソフトの輸出へもつながる。IHI は、新たなビジネス創出の機会と捉えて、お客さまや関係機関と共に技術開発、事業開発をとおりて貢献していく所存である。

参考文献

- (1) International Energy Agency : The future of hydrogen, (2019)
- (2) 牧野 功 : 技術の系統化調査報告, 第12集, 国立科学博物館, 2008年, pp.209 - 271
- (3) Ammonia Energy Association : <https://nh3fuelassociation.org/introduction/>, (参照 2021.4.9)
- (4) 国立研究開発法人科学技術振興機構 : SIP 終了報告書, 2019年
- (5) 資源エネルギー庁 : 燃料アンモニア導入官民協議会 中間取りまとめ, 2021年

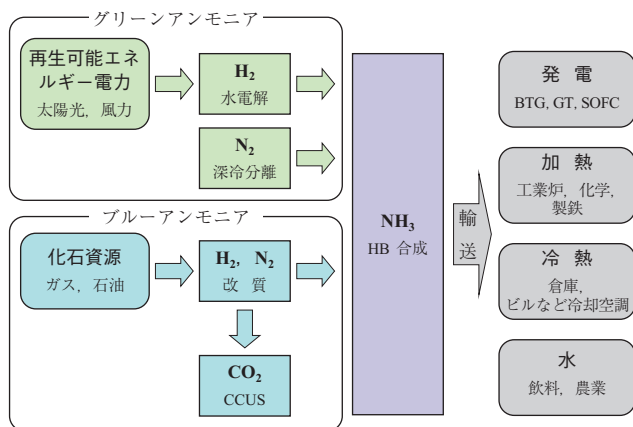
問い合わせ先

株式会社 IHI

戦略技術統括本部 戦略技術プロジェクト部

電話 (03) 6204 - 7741

<https://www.ihi.co.jp/>



アンモニアが運ぶ価値