

終 了 報 告 書

S I P（戦略的イノベーション創造プログラム）

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「CO₂フリー水素利用アンモニア

製造・貯蔵・輸送関連技術の開発」

研究題目「CO₂フリー水素からのアンモニア合成プロセスの構築及び実証」

研究開発期間： 平成 26 年 7 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日
研究担当者： 藤村 靖
所属研究機関： 日揮株式会社

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	2
3. 研究開発実施内容	4
3-1. 再生可能エネルギーからのアンモニア合成プロセスの最適化	
3-2. アンモニア合成実証試験	
3-3. AATG プロセスを用いたアンモニアチェーンの検討	
3-4. アンモニアを中心としたエネルギーキャリア実用化調査	
3-5. アンモニアチェーンの社会導入に向けた実証検討	
3-6. 天然ガスからの CO ₂ フリーアンモニアの供給可能性検討	
3-7. アンモニアの製造・輸送・貯蔵に関する規制調査と社会受容性検討	
3-8. まとめ	
3-9. 今後の課題	
4. 外部発表実績	52
5. 特許出願実績	53
6. 参考文献	53

図表一覧

図 1	CO ₂ フリーアンモニアをキャリアとするエネルギーサプライチェーン
図 2	従来法と再生可能エネルギーからのアンモニア製造プロセスの比較
図 3	低温低圧アンモニア合成プロセスのブロックフロー
図 4	アンモニア合成実証試験装置概略フロー図
図 5	アンモニア合成実証試験装置（合成プロセス部分） 外観写真
図 6	実験室規模試験と実証試験結果の比較
図 7	触媒層入口温度と反応器出口アンモニア濃度の関係
図 8	反応圧力と反応器出口アンモニア濃度の関係
図 9	H ₂ /N ₂ 比と反応器出口アンモニア濃度の関係
図 10	実証試験装置反応器内の温度・水素転化率のシミュレーション
図 11	産総研 FREA における CO ₂ フリーアンモニアバリューチェーン実証
図 12	CO ₂ フリー水素を用いたアンモニア合成試験結果
図 13	再エネ由来の CO ₂ フリーアンモニアを用いたバリューチェーン実証
図 14	アンモニア製造の負荷変動試験運転結果
図 15	触媒層入口温度と反応器出口アンモニア濃度の関係
図 16	CO ₂ フリーアンモニアサプライチェーン モデル図

- 図 1 7 Haber-Bosch 法における、プロセス CO₂ とユーティリティ CO₂
- 図 1 8 各ケースでのアンモニア製造コスト試算結果
- 図 1 9 技術進展条件適用におけるアンモニア製造コスト試算結果
- 図 2 0 アンモニア製造 装置構成図
- 図 2 1 ピークカットと必要 PV 容量
- 図 2 2 水素供給量および水素貯蔵量の経時変化（供給量一定）
- 図 2 3 水素供給量および水素貯蔵量の経時変化（供給量変動）
- 図 2 4 アンモニア製造コスト内訳
- 図 2 5 アンモニアプラントのブロックフロー
- 図 2 6 大型化アンモニアプラントのブロックフロー
- 図 2 7 社会受容性 調査・検討フロー
- 図 2 8 大規模商業発電開始（2025 年を想定）までのコミュニケーション活動イメージ例

- 表 1 実証試験スケジュール
- 表 2 マイルストーン条件における試験結果
- 表 3 従来型プロセス検討ケース
- 表 4 従来型プロセスケースにおける CO₂ 削減率検討結果表
- 表 5 従来型プロセスケースにおけるアンモニア製造コスト算出結果
- 表 6 実用化調査検討ケース一覧
- 表 7 設備仕様一覧
- 表 8 主要前提条件一覧
- 表 9 海外原料、海外ユーティリティ設定価格一覧
- 表 1 0 本検討における CO₂ 費用設定一覧
- 表 1 1 天然ガスケース 技術進展条件一覧
- 表 1 2 再エネベストケース 技術進展条件一覧
- 表 1 3 ケーススタディ 電解装置容量と稼働率
- 表 1 4 ケーススタディ 結果
- 表 1 5 アンモニア製造コスト試算結果
- 表 1 6 アンモニア製造コスト削減試算結果
- 表 1 7 CO₂ 回収率によるプラントコスト、エネルギー原単位の相対比
- 表 1 8 各社調査所掌概要
- 表 1 9 国内法整備調査を踏まえての重点確認項目一覧
- 表 2 0 米国現地調査・文献調査結果
- 表 2 1 ドイツ・フランス文献調査結果

1. 本研究の目的

世界のエネルギー消費量は、将来的な人口増加や生活水準の向上により大幅な増大が見込まれている。一次エネルギーとして従来の化石燃料（石油・石炭・天然ガス）への依存が続く場合には、CO₂発生量の増加とそれに伴う地球温暖化、さらにはこれに起因する各種被害の増加が懸念されている。こうした課題を回避するためには CO₂ 排出量の削減が急務であり、再生可能エネルギー（太陽光・太陽熱・風力など）や Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) の導入が必要とされている。

再生可能エネルギーによる発電の導入拡大が CO₂ 排出量削減策として期待されているが、地域的な偏在が大きな課題の一つであり、世界的に偏在の大きな再生可能エネルギーを国内で利用するためには、海外の適地で再生可能エネルギーを化学物質に変換し日本に輸送して利用する、「エネルギーキャリア」の導入が必須となる。再生可能エネルギーを水素やアンモニアなどのエネルギーキャリアへ転換することで、電力では困難な長距離輸送と長期貯蔵が可能になる。これにより、地域偏在の克服だけではなく、需給変動に合わせた再生可能エネルギーの供給システムが実現できる。

これに対して、石油・石炭・天然ガスに代表される化石燃料は、エネルギー源として安価であり、大量に消費されているため CO₂ の大量排出の元凶となっている。今後、CO₂ 排出量削減のためには、発電の更なる高効率化あるいは CCS との組み合わせが求められる。しかし、国内での大規模 CCS の普及による CO₂ 排出量削減は難しいと考えられるため、海外で化石燃料を原料として水素やアンモニアといったエネルギーキャリアへの変換を行い、その際に発生する CO₂ を CCS あるいは CO₂ を用いた石油増進回収 (CO₂-EOR) によって処理し、CO₂ 排出量を削減するスキームが想定される。こうしたスキームは、技術面・コスト面でのハードルが比較的低く、前述の再生可能エネルギー利用に比べて早期の商業化が期待できる。

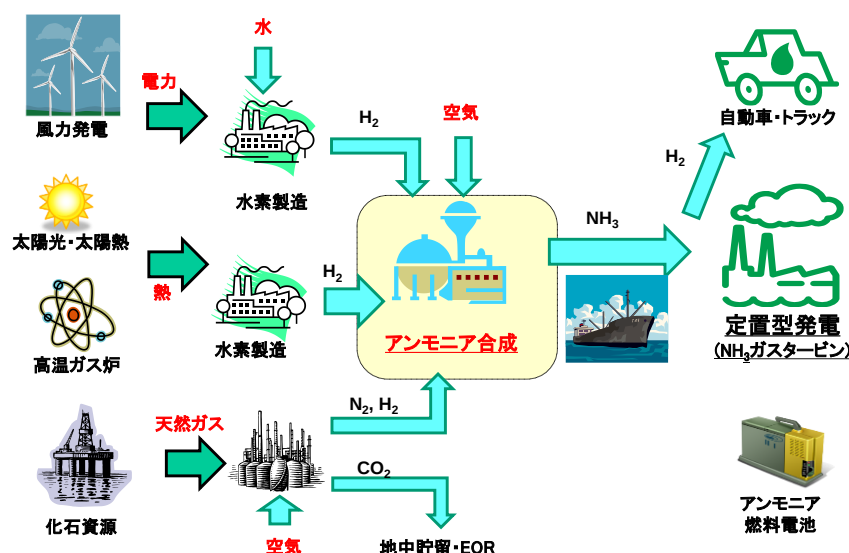


図1 CO₂フリーアンモニアをキャリアとするエネルギーサプライチェーン

水素を輸送するためのエネルギーキャリアの候補として、アンモニアは質量水素密度が 17.8 mass% と非常に高く、常圧で-33℃以下に冷却、あるいは 20℃で 0.86MPa 以上に加圧することで容易

に液化できるため、輸送が容易である。現状でも、アンモニア生産量の約 1 割にあたる年間約 1,800 万トンのアンモニアが貿易で世界を流通しており、液化アンモニアの製造・輸送・取扱技術は商業規模ですでに確立されている。

再生可能エネルギーや化石燃料を水素源とした CO₂ フリー水素を用いたエネルギーチェーンのイメージを図 1 に示す。本研究では、アンモニアチェーンのうち、再生可能エネルギーからのアンモニア製造技術開発を中心に、アンモニア製造・供給に関する下記の研究開発および調査検討を行った。

- ① 再生可能エネルギーからのアンモニア合成プロセスの最適化
- ② アンモニア合成実証試験
- ③ AATG プロセスを用いたアンモニアチェーンの検討
- ④ アンモニアを中心としたエネルギーキャリア実用化調査
- ⑤ アンモニアチェーンの社会導入に向けた実証検討
- ⑥ 天然ガスからの CO₂ フリーアンモニアの供給可能性検討
- ⑦ アンモニアの製造・輸送・貯蔵に関する規制調査と社会受容性検討

2. 研究開発目標とマイルストーン

本研究で取り組む各課題の研究開発目標とマイルストーンを下記に示す。

a) 再生可能エネルギーからのアンモニア合成プロセスの最適化

再生可能エネルギー由来の CO₂ フリー水素を用いて、エネルギーキャリアであるアンモニアの製造システム開発を目指し、本開発において開発される低圧・低温化で高い活性を有するルテニウム系触媒の特徴を活かした、高効率なアンモニア合成プロセスを検討する。

b) アンモニア合成実証試験

産総研と共に実証試験を実施し、スケールアップに必要なエンジニアリングデータを取得する。実証試験においてアンモニア合成反応器全体としての性能評価を行うとともに、各種条件でのアンモニア合成触媒の活性評価・寿命評価、ならびに再生可能エネルギーを想定したアンモニア合成システムの処理能力を変化させる試験を実施する。

c) AATG プロセスを用いたアンモニアチェーンの検討

天然ガスからのアンモニア製造における改質による合成ガス製造プロセスを、従来法から AATG プロセスに変更した場合のコスト、CO₂ 排出量削減およびエネルギー効率向上効果等の評価を大阪ガスと共同で実施する。

d) アンモニアを中心としたエネルギーキャリアの実用化調査

水素発電の導入初期および技術改良が行われたケースを想定し、化石資源の改質および再生可能エネルギーによる水素製造、アンモニア製造のコストを評価する。エネルギー総合工学研究所と連

携して、海上輸送、発電（ $\text{NH}_3 \cdot \text{NG}$ 混焼）までのチェーンのコスト・効率を検討し、発電コストを評価する。同様のケースで、液体水素および有機ヒドライドとの比較、化石燃料の改質からの CO_2 フリー水素製造ケースも評価する。これらの検討を通じて、エネルギーキャリアとしてのアンモニアの優位性を向上するために必要な開発課題を抽出する。

また、エネルギーキャリアとして CO_2 フリーアンモニアが導入された場合の日本のアンモニアの需要、燃料アンモニアの流通、価格形成の変化について調査を行う。

e) アンモニアチェーンの社会導入に向けた実証検討

国内での再エネによる地産地消型アンモニア製造および利活用について、北海道電力が実施するアンモニア製造設備の立地候補地点での再エネ設備設置用地（面積、価格等）、輸送費用等の調査データを基に、概算での実用化調査を実施する。

再生可能エネルギーからの電力を用いて水電解で水素を製造し、これを既設アンモニア製造プラントに供給して CO_2 フリー水素を含むアンモニアを製造するケースについて、技術面及び経済性の観点からフィージビリティを概略検討する。

f) 天然ガスからの CO_2 フリーアンモニアの供給可能性検討

石炭火力発電所でのアンモニア混焼を想定し、天然ガスを原料とした CO_2 フリーアンモニアの製造プロセスを検討する。さらに、三菱商事、丸紅、日本エネルギー経済研究所と連携し、米国、カタール、サウジアラビアでの CO_2 フリーアンモニア製造コスト評価のための条件設定を行い、それぞれのケースでのアンモニア製造プラントコストおよび運転コストを評価する。

g) アンモニアの製造・輸送・貯蔵に関する規制調査と社会受容性検討

大阪ガスと共同で海外のアンモニアサプライチェーンに関する法規制を調査し、これを国内法規制と対比することで、コスト面や立地等の観点で導入促進が期待できる項目を摘出する。さらに、国内での燃料としてのアンモニアの社会受容性向上を図る目的で、受容性の阻害要因の抽出を行い、社会実装へ向けたコミュニケーション戦略策定、および訴求シナリオを作成する。

3. 研究実施内容

3-1. 再生可能エネルギーからのアンモニア合成プロセスの最適化

(1) 目的

エネルギーキャリアとしての CO_2 フリーアンモニアを再生可能エネルギーから製造する事を目的に、これに適したアンモニア合成プロセスを検討する。

(2) 再生可能エネルギーからのアンモニア合成プロセスに求められる要件

現在、アンモニアは主に天然ガスを原料として年間約 1.8 億トンが生産されており、肥料や化学原料として用いられている。天然ガスからのアンモニア製造プロセスは、図 2 に示すように、天然ガスを改質して H_2 , N_2 からなる合成ガスを製造する部分と、合成ガスからアンモニアを合成する部分の 2 つに大別される。このプロセスは長年の実績があり、全体として省エネ化が図られており、最新プロセスの CO_2 排出原単位は約 1.6 ton- CO_2 /ton- NH_3 となっている。また、大型のアンモニア製造プラントの規模は 2000~3000ton/day のものが商業化されている。天然ガス改質プロセスで生成する CO_2 は分離回収されて一部は尿素原料などに利用されているが、多くは大気に放散されている。また、ボイラーや加熱炉からの燃焼排ガス中の CO_2 も現状では回収されずに大気に放散されている。このため、天然ガスから CO_2 フリーアンモニアを製造するためには、これらの CO_2 を CCS (CO_2 回収貯留) や EOR (石油増進回収) で隔離する事が求められる。

一方で、再生可能エネルギーを用いて CO_2 フリーアンモニアを製造する概略プロセス構成を図 2 に併せて示す。再生可能エネルギーからのアンモニア合成では、水素は再エネ電力を用いた水電解、窒素は空気分離によって製造し、これらを原料としてアンモニアを合成するプロセスとなる。

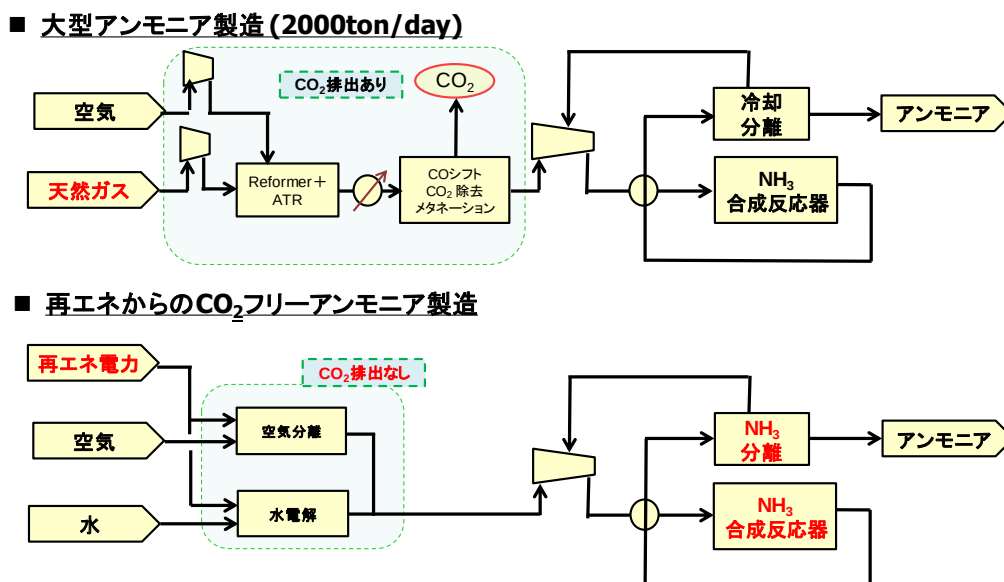


図 2 従来法と再生可能エネルギーからのアンモニア製造プロセスの比較

再生可能エネルギーからの CO_2 フリーアンモニア製造では、下記の 4 点が大きな課題となる。

- ① 原料となる再生可能エネルギーからの水素コスト
- ② 想定されるプラント規模・運用

- ③ 水電解水素を原料とすることの課題
- ④ 水素製造量の変動への対応

以下にそれぞれの課題とその対応について簡単に述べる。

① 原料となる再生可能エネルギーからの水素コスト

水電解で水素を製造する場合、水電解のエネルギー原単位は現状で約 $5\text{kWh}/\text{Nm}^3\text{-H}_2$ であることから、電解に用いる電力コストが水素コストに直接影響する。また、現状では水電解装置の設備コストも高い。3-4 章で述べる実用化調査の技術進展ケースのように、再エネ電力コストおよび水電解装置コストの低減や電解効率の向上が必要である。

こうした検討はすでに各水電解装置メーカーで進められていることから、本研究ではこうした開発技術が将来的に適用できると想定し、本研究での開発対象には含めていない。

② 想定されるプラント規模・運用

再生可能エネルギーからのアンモニア製造のプラント規模は、利用できる再生可能エネルギー量に依存する。例えば 500MW 太陽光発電を出発とする場合、太陽光発電の設備利用率を 40%、水電解の原単位を $5\text{kWh}/\text{Nm}^3\text{-H}_2$ とすると、得られる水素からのアンモニア製造量は約 480ton/day（各種ロスを考慮しない場合）に相当する。これは、現在の大型アンモニアプラント規模と比べるとかなり小さい。このため、小型でも安価なアンモニアが製造できるよう、エンジニアリング面での様々な工夫が求められる。

また、再生可能エネルギーからのアンモニア製造は分散型で多くのプラントが稼働する形態が想定される。この場合、 CO_2 フリーアンモニア製造事業者は、現在のアンモニアメーカーのように高温・高圧の化学プラントの運転経験を有していないケースも想定される。また、コスト面からも可能な限り運転・メンテナンス面で省力化した設備構成が求められる。

③ 水電解水素を原料とすることの課題

水電解水素を用いてアンモニアを製造する際の課題は、大きく、低い水素圧力と水素中の不純物の 2 点が挙げられる。現状、大規模に商業化されているアルカリ水電解法の場合、水電解で得られる水素の圧力はほぼ常圧であり、これを従来の Haber-Bosch 法の反応圧力である 14~30MPa まで昇圧する場合は、昇圧のためのエネルギーとコンプレッサのコストが増大するという課題が生ずる。また、水電解で得られる水素は、一般的に微量の水分と酸素を含んでいる。これらはアンモニア合成触媒の触媒毒となることが知られており、適切な前処理が必要になる。

④ 水素製造量の変動への対応

太陽光、太陽熱、風力といった再生可能エネルギーの発電量は時間とともに大きく変動するため、これに応じて水電解で製造される水素量も変動する。一方で、化学プロセスであるアンモニア合成は一定負荷での運転を前提としているため、両者の整合を図る必要がある。このためには、蓄電池や水素タンクなどを組み合わせる必要があるが、1 年を通じて一定負荷運転を実現するには大容量の蓄電池や水素タンクが必要となり、アンモニア製造コストの増大要因となる。

このため、3-5 章で述べるように、再エネ発電量のトレンドに応じて半日~半月のスパンでアンモニア製造量を変動させて水素製造量とバランスさせる運転が求められる。

(3) 再生可能エネルギーからのアンモニア合成プロセスの検討

前項で述べた再生可能エネルギーからのアンモニア合成プロセスの課題に関して、検討を行った結果を以下に示す。

① プラント規模

現在の天然ガスからのアンモニア製造プラントは、スケールメリットを考慮して大型化が進んでおり、2000～3000ton/day 規模のプラントが稼働している。再生可能エネルギーからのアンモニア製造は、前述の通り、出発となる再生可能エネルギーの発電量に依存する。しかし、スケールメリットやアンモニアの輸送のためのインフラ整備コストを考えると、小規模では採算性が低い。このため、将来的な大規模な再生可能エネルギー発電プラント規模を想定して、再生可能エネルギーからのアンモニア製造プラントの想定規模を 200～500ton/day とした。

② アンモニア合成条件

アンモニア合成反応は平衡反応であり、高圧・低温の条件で転化率は高くなる。一方で、低温では反応速度が低下するため、適切な反応温度・圧力を選定する必要がある。現在のアンモニア合成には、Harber-Bosch 法が用いられており、触媒には鉄系の触媒が用いられている。鉄系触媒は安価で長寿命であることが特徴であるが、反応には高温（370～510℃）・高圧（14～30MPa）を要する。一般的なアンモニア合成プロセスにおける反応器出口のアンモニア濃度は約 20%である。

前述の通り、再生可能エネルギーからのアンモニア製造では、水素は水電解により製造する。現状で大規模な水電解装置として商業化されているアルカリ水電解は、その構造上、高圧の水素を製造する事は難しく、ほぼ常圧の水素を製造する事が一般的である。この水素を従来の Harber-Bosch 法の反応圧力まで昇圧するには、多段の圧縮機と大きな圧縮エネルギーを必要とする。このため、再生可能エネルギーからのアンモニア製造では、可能な範囲で反応圧力を低下させる事が望ましい。一方で、反応圧力を下げることは平衡的に不利となることから、これを補うために、低温で高活性な触媒が必要となる。また、反応圧力を下げることは、圧縮エネルギーの面では有利となるが、生成アンモニアの冷却分離では不利となる。また低圧ではガスの実体積が増え、装置が大きくなるという問題も生じる。

このため、反応圧力をパラメータとしてプロセスシミュレーションと概算のコスト評価を行った。その結果、再生可能エネルギーからのアンモニア製造の反応圧力として 5～8MPaG、反応器入口温度 400℃以下と選定した。

③ 水電解水素への対応

水電解で製造した水素には、不純物として微量の酸素や水が含まれている可能性がある。また、空気で作製する窒素に微量の酸素が含まれる可能性がある。これらの含酸素化合物は一般にはアンモニア合成触媒の活性低下要因となる事が知られている。このため、再生可能エネルギーからのアンモニア合成プロセスでは、極低濃度の酸素と水素を低温で触媒反応させて水に転換する脱酸素反応器を前段に設置し、生成した水を吸着材で除去するプロセス構成とした。

④ アンモニア製造量変動への対応

再生可能エネルギーの発電量によって、水電解で製造される水素量は変動する。これらの短期的な変動は蓄電池や水素タンクを組み合わせることで平準化することが可能であるが、数日スパン以上の変動に対しては、アンモニア製造量を変化させることで対応することが現実的である。水素製造量に合わせてアンモニア製造量を変える運転方法には、いくつかの方法が想定される。比較検討の結果、供給水素量に合わせてアンモニア合成反応ループのリサイクルガス流量を調整して製造アンモニア量をバランスさせる運転方法を採用することとした。

⑤ エネルギーバランスとアンモニア分離技術

再生可能エネルギーを用いてアンモニアを製造する場合は、天然ガス原料のアンモニア製造と違って熱源として燃料を大量に使用することは難しいため、電動化と省エネ化を図ることが必要である。

アンモニア合成プロセスでの主なエネルギー消費は、原料ガスの圧縮、リサイクルガスの圧縮、原料ガスの加熱、生成したアンモニアの分離の4点である。このうち、ガスの圧縮には電動のコンプレッサを用いることが想定される。一方、アンモニア合成反応は発熱反応であるため、余剰の熱が発生する。このため、原料ガスの加熱は、反応器出口ガスとの熱交換でほぼカバーすることが出来る。

生成したアンモニアの分離は、現状では反応器出口ガスを冷却してアンモニアを液化させて分離する、冷却分離法が用いられている。しかし、高温の反応器出口ガスを冷却してアンモニアを液化分離し、未反応のガスを再度加熱してリサイクルすることはプロセス的にも複雑であり、高価な低温チラーを必要とするなど、改良の余地があると考えられる。

このため、熱駆動型のアンモニア分離技術として、 $MgCl_2$ や $CaCl_2$ などのアンモニアを吸蔵する能力を有する金属ハロゲン化物を用いた、アンモニア分離の可能性の検討を行った。吸蔵材候補を広島大および千葉大で選定し物性評価を行った。さらに、豊田自動織機で温度・圧力スイングによる吸蔵分離装置を検討した。その結果、プロセス的にはアンモニア分離は可能であるが、候補材ではアンモニアの吸蔵・放出に必要な熱量が大きく、アンモニア合成で生じる余剰熱でこれをカバーすることは難しいと判断され、吸蔵材を用いたアンモニア分離技術の開発は中断することとした。

結果として、再生可能エネルギーからのアンモニア製造におけるアンモニア分離は、従来法と同様の冷却分離法を用いることとした。

(4) 商業装置 (500 ton- NH_3 /day)のアンモニア合成プロセスの検討

アンモニア製造規模を 500ton/day と設定し、アンモニア合成プロセスを検討した。アンモニア合成プラントへの水素の供給圧は 0.1MPaG とした。図 3 にブロックフローを示す。

比較対象である既存プロセスの合成条件 (Base Case) は、近年のアンモニアプラントで一般的に用いられる条件とし、本開発がめざす低温低压プロセス (Study Case) との比較を行った。比較的大型の装置であることから、断熱反応器を採用した。

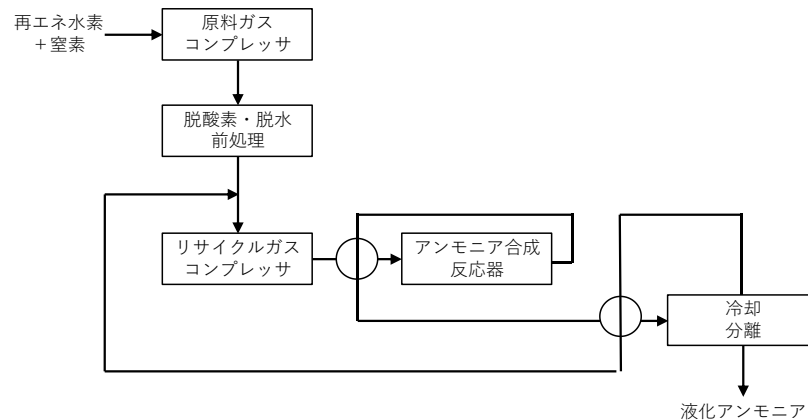


図3 低温低圧アンモニア合成プロセスのブロックフロー

① アンモニア合成プロセスの OPEX 試算

再生可能エネルギーからのアンモニア合成部分の運転費は、主に、ガス圧縮と冷却分離のためのエネルギーコストである。

低温・低圧のアンモニア合成では、既存プロセスに比べて水素の圧縮比を抑えることができるため、原料ガスの圧縮動力を約 15%削減することが出来る。一方で、低圧化によりリサイクルガス量が増大するため、リサイクルガスコンプレッサの所要動力は増大する。結果として、低温・低圧のアンモニア合成では原料ガス+リサイクルガスコンプレッサの動力として、約 10%削減できる。

② アンモニア合成プロセスの CAPEX 試算

両ケースでのアンモニア合成部分の設備コストを試算した。低圧化したことにより、機器の設計圧を下げることができ、反応器や塔槽類および熱交換器の CAPEX の低減効果がみられた。しかし、機器費の約半分を占める回転機（主にコンプレッサ）のコストの低減効果が小さいため、低温低圧プロセスによる CAPEX の削減効果は 5%との試算結果となった。

③ アンモニア合成コスト試算

前述の CAPEX と OPEX を基に、アンモニア合成コストを評価した。OPEX に関しては、①で検討した電力コストと触媒コストを考慮した。触媒コストとしては、本研究で開発した Ru/CeO₂ の触媒コストを想定した。

その結果、触媒コストを除いた比較では、低温低圧プロセスの方がコスト面で優位性がある事が確認された。一方で、触媒コストを加味したケースでは、低温低圧プロセスの方がわずかに安価ではあるが、両者には大きな差はないという結果となった。これは、近年のルテニウム価格の高騰影響が大きい。

（５）再生可能エネルギーからの CO₂ フリーアンモニア製造の事業化プラン

3-4 章で述べるように、再生可能エネルギーからの CO₂ フリーアンモニア製造の実用化には、アンモニア合成技術開発だけでなく、安価な再エネ電力や水電解装置の開発が必要である。こうした状況を踏まえて、再生可能エネルギーからの CO₂ フリーアンモニア製造の事業化のステップとして下記が想定される。

① 小規模な再生可能エネルギーからの CO₂ フリーアンモニア製造の商業実証

実証装置規模(20kg/day)から最終的な目標規模(500ton/day)にスケールアップするには、商業プラント用反応器の性能確認を含めた中間的な商業実証が必要と考える。規模感としては、実証の数 100 倍程度（数 ton～数 10ton/day）が想定される。

この規模感の場合、エネルギーキャリアとして日本に輸出することは積み出し設備が高価となるため現実的ではない。このため、アプリケーションとしては、3-5 章で述べるような地産地消的な用途で、製造するアンモニア価格が多少高くても許容できる用途が望ましい。あるいは、国内あるいは海外において余剰再エネが安価に入手可能な地域で、再エネの蓄エネルギー手段、系統のアンシラリーサービス、あるいは製品としての CO₂ フリーアンモニア販売といった事業での商業実証が考えられる。

② 再生可能エネルギーからの CO₂ フリーアンモニアの商業製造

本研究で目指す 200～500ton/day 規模の再生可能エネルギーからの CO₂ フリーアンモニア製造は、大規模な再エネ発電と組み合わせる必要がある。水素製造の設備コストの観点で、安定した再エネ電力であることが望ましく、水力、蓄熱付き太陽熱発電、メガウインドファームといった再生可能エネルギー源との組み合わせが想定される。ロケーションとしては、比較的に日本に近いこと、再エネ発電が海岸近くに設置するアンモニア製造プラントに比較的近いこと等が要件となる。

また、プラントコストの削減も必要である。再エネからのアンモニア製造の場合、プラント建設場所が必ずしも建設工事に適した場所とはならないことを考えると、プラントの標準設計化による設計コストの削減、設備のモジュール化による現地での建設コスト・工期の削減といった取り組みが必要となる。

3-2. アンモニア合成実証試験

(1) 目的

本研究で開発したアンモニア合成触媒とプロセスを実証することを目的として実証試験装置を建設し、新規アンモニア合成触媒の反応活性、寿命、負荷変動対応に関する試験を実施、商業装置の設計に必要なエンジニアリングデータを取得する。

本検討は産総研と日揮が共同で実施した。日揮は実証試験装置の基本設計を行うとともに、産総研と共同で試運転および実証試験装置を用いたデータ取得を実施した。さらに、産総研が担当する実証試験装置の機器の調達・製作、工事管理、法規対応などについて支援を行った。

(2) 実証試験装置の概要

実証試験装置は、産総研福島再生可能エネルギー研究所内に建設した。液体アンモニアの製造能力は20kg/dayである。実証試験装置の概略フローを図4に、外観写真を図5に示す。

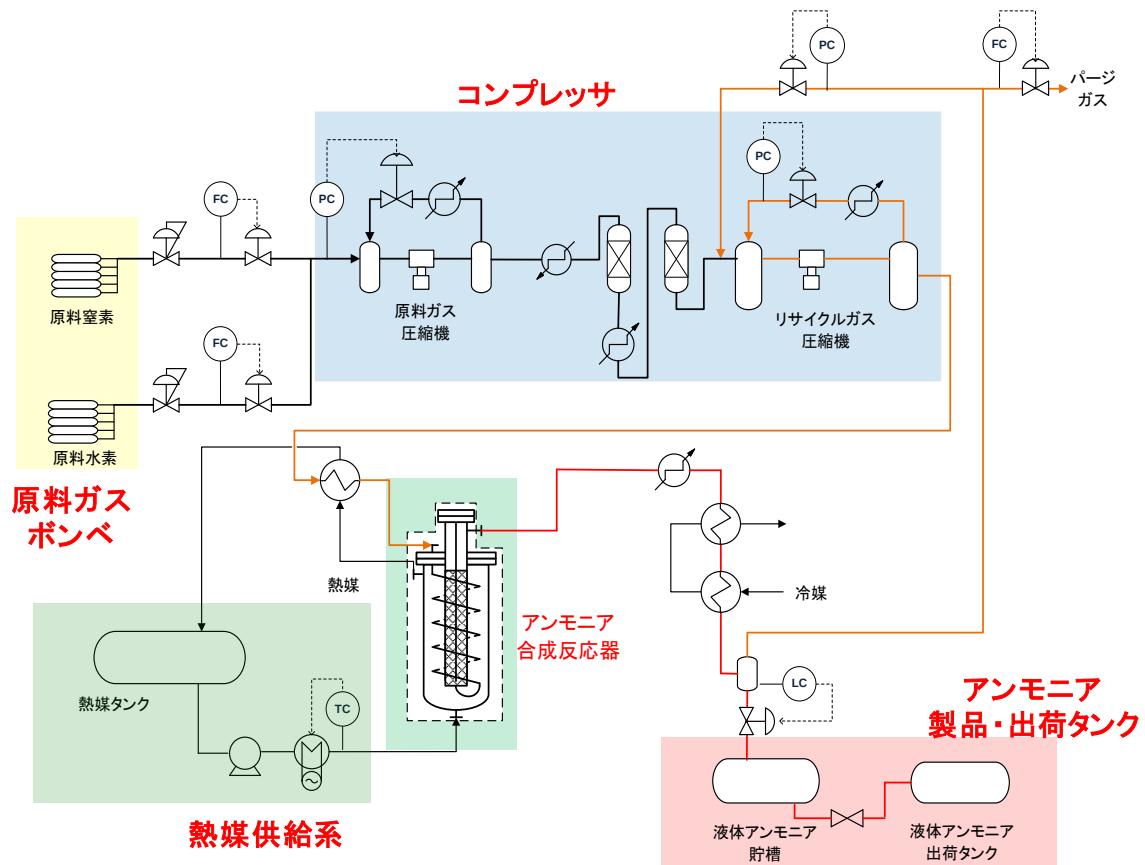


図4 アンモニア合成実証試験装置概略フロー図

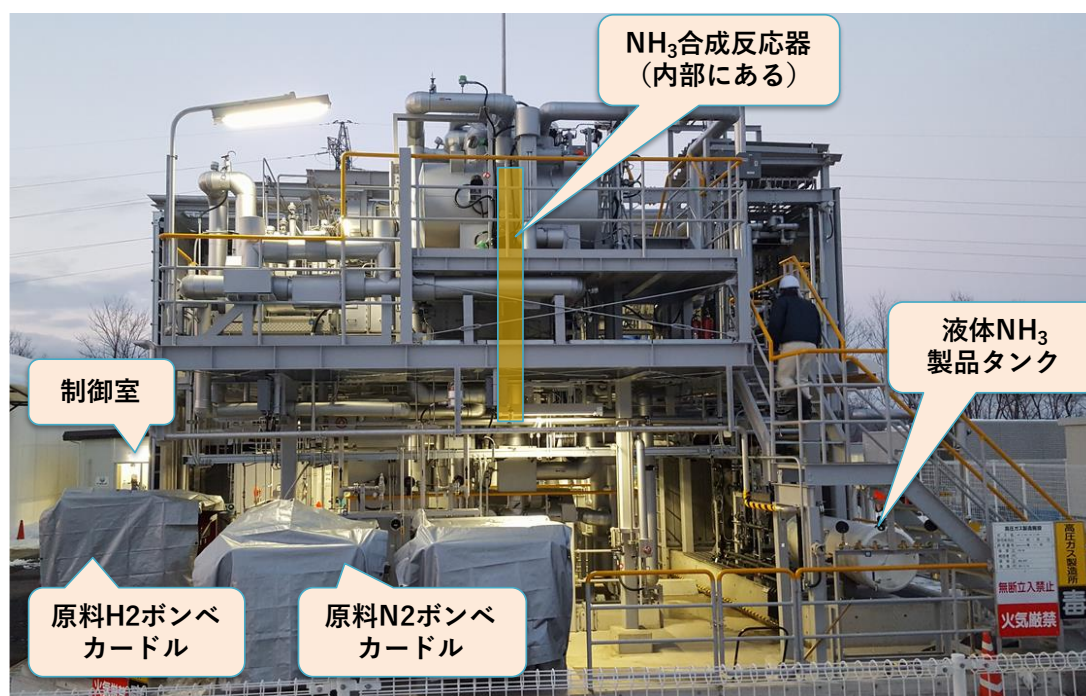


図5 アンモニア合成実証試験装置（合成プロセス部分）外観写真

以下に、本実証試験装置の構成を簡単に示す。

- 原料である窒素と水素はそれぞれポンベカードルより供給され、それぞれ流量調節弁にて所定流量に調節された後、混合されて原料ガス圧縮機に供給され、所定圧力（2.2~7.2MPaG）まで昇圧される。
- 昇圧された原料ガスは所定温度まで昇温されて脱酸素反応器に供給され、原料ガス中に含まれる酸素は水素と反応して水に転化される。冷却されたのち、脱水吸着器に供給され、水分、一酸化炭素および二酸化炭素が吸着除去される。
- 脱水吸着器を出た原料ガスはリサイクルガスに混合されて、リサイクルガス圧縮機に供給され、反応圧力（3.0~8.0MPaG）まで昇圧される。
- リサイクルガス圧縮機で反応圧力まで昇圧した反応器入口ガスは、熱媒により反応温度付近まで昇温された後、アンモニア合成反応器に供給される。反応器内でアンモニア合成反応により、反応器入口ガスの一部がアンモニアに転化される。
- アンモニア合成反応器は、内径 約 60mm、長さ 約 2500mm であり、最大で約 3L の触媒を充填できる。触媒層は 1Bed であり、反応器の外側に熱媒油を流すことで反応熱を除熱する等温型の反応器である。
- アンモニア合成反応器から出た反応生成ガスは冷却されてアンモニアを凝縮し、反応生成ガスから液体アンモニアとして分離する。分離後の液体アンモニアは製品として液体アンモニア貯槽に貯蔵する。
- アンモニアを除去した反応生成ガスは冷熱回収されて昇温された後、リサイクルガスとしてリサイクルガス圧縮機に戻される。

- 貯蔵した液体アンモニアは、必要に応じて液体アンモニア出荷タンクに充填する。出荷タンクは移動可能であり、本研究で製造した液体アンモニアは全てアンモニアガスタービンの燃料として提供した。
- 図4に示すアンモニア合成プロセス部分の他にも、ユーティリティ設備として、圧縮空気、冷却水、チラー、アンモニアスクラバー、非常用発電装置なども併せて設置した。

(3) 実証試験装置の基本設計

本実証試験装置は開発したアンモニア合成触媒の性能測定が目的のため、幅広い運転条件で運転を可能とする必要がある。また、再生可能エネルギー由来のCO₂フリーアンモニアの供給設備としての運転も想定して実証試験装置による試験条件の範囲を設定した。

基本設計においては、プロセス構成や制御方法を考慮してPFD（プロセスフローダイアグラム）を作成し、プロセス全体のマテリアルバランスを構築した。さらに、PFDをベースとして、反応器やコンプレッサなどの主要機器の仕様書を作成した。また、安全性評価として、HAZOP（Hazard and Operability Study）を実施し、安全性が不十分な可能性がある事項の洗い出しを行い、対応方針を決定して設計に反映した。

これらの基本設計をもとに、産総研が配管計装線図（P&ID）、レイアウト、機器詳細図などの詳細設計を実施した。

(4) 実証試験装置の調達・建設

機器の調達・製作は、産総研が中心になって行い、日揮は産総研の支援として、ベンダーが作成する設計図書のチェック、製作スケジュールの管理、完成品の検査等の業務を実施した。

建設工事は産総研が担当して2017年7月に開始し、12月末には建設工事がほぼ完了した。日揮は、産総研とともに、建設工事の品質・進捗・工程の管理を実施するとともに、工事の進捗に伴って生じる種々の課題に対して対応を行った。

(5) 試運転

2018年1月に高圧ガス保安法の完成検査を実施した後、日揮と産総研の共同で試運転を開始した。試運転では各種ユーティリティを立ち上げるとともに、機器単体の試運転を実施した。その後、触媒を充填し、窒素を用いた気密試験を実施し、窒素のみを用いてプロセス部分のガス流通試験を行い、計装機器類の動作確認および制御の調整、ヒーター類の動作確認を実施した。続いて熱媒を受け入れて、熱媒系の動作確認を実施した。

これらが完了した2018年3月にアンモニア合成触媒の水素還元処理を行い、3月26日の週にアンモニア合成試験と液化アンモニアの製造試験を実施した。その結果、液化アンモニアの製造を確認できたことをもって実証試験装置の全機器の性能を確認でき、試運転を完了した。

(6) 実証試験のスケジュール

開発した2種類の触媒の性能評価のスケジュールを表1に示す。まず、Ru/CeO₂触媒による反応試験を2018年4月から10月の間に実施した。さらに再生可能エネルギーを用いて製造されたCO₂フ

リー水素を原料としたアンモニア合成試験、および水素供給量を変化させた負荷変動試験を実施した。その後、10 月半ばに Ru/Cs/C 触媒に反応器内の触媒を交換し、その後約 1.5 か月間、触媒性能の評価試験を実施した。2018 年 12 月~2019 年 1 月にかけては、装置の保安検査等およびメンテナンスを実施した。その後、再度 Ru/CeO₂ 触媒に関するデータを追加で取得するための反応試験を行った。

表 1 実証試験スケジュール

触媒	実施項目	2018										2019		
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
Ru/CeO ₂	反応試験													
	再エネ水素での実証試験													
	変動実証試験													
—	触媒交換/還元運転													
Ru/Cs/C	反応試験													
—	装置メンテナンス													

(7) Ru/CeO₂ 触媒を用いた実証試験

2018 年 4 月より Ru/CeO₂ 触媒を用いた反応試験を実施した。当初の試験ではラボ試験で想定していた性能が得られなかったことから、触媒を取り出して原因を確認した。その結果、試運転時に触媒温度が想定以上に上昇したことが原因と確認できたことから、2018 年 5 月に触媒を充填しなおして還元処理後、触媒性能試験を実施した。Ru/CeO₂ 触媒による試験は、9 Run 実施し、積算運転時間 650 hr の試験において、延べ約 130 の反応条件で活性データの取得を行った。主要な試験結果を下記に示す。

① ラボ試験との触媒活性の比較

ラボ試験と実証試験では装置の規模が大きく異なり、触媒層内部の流動状態などが違っているため、実験室規模と同等の条件にて試験を実施し、触媒性能を比較した。図 6 に、触媒層入口温度 400℃、反応圧力 5.0MPaG、H₂/N₂ 比 1.0 mol/mol における反応時間と反応器出口アンモニア濃度の関係を示す。ラボ試験では触媒を細かく砕いて使用しており実証装置とは触媒の充填密度が大きく異なるため、反応時間を評価するに当たっては質量基準空間速度 (WHSV) の逆数を指標とした。図 6 より、実証装置で得られた触媒性能はラボ試験の結果はほぼ同等であった。

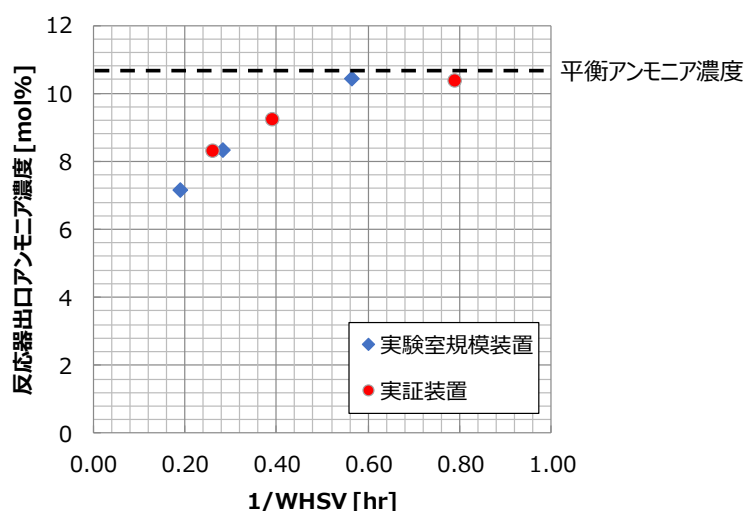


図6 実験室規模試験と実証試験結果の比較

(触媒層入口温度 400℃、反応圧力 5.0MPaG、H₂/N₂比 1.0 mol/mol)

② 触媒性能のマイルストーン性能の確認

本研究における触媒開発のマイルストーンとして、触媒層入口温度 400℃以下、反応圧力 5.0MPaG、GHSV=6,000 hr⁻¹の条件での水素転化率 24%以上、という指標が定められている。そこで、当該条件にて実施した試験の結果を表2に示す。設定した条件で、水素転化率は目標を上回る 25.4mol%を達成した。

表2 マイルストーン条件における試験結果

試験条件	触媒層入口温度	℃	400.2
	圧力	MPaG	4.98
	反応器入口ガス中の H ₂ とN ₂ の比 (H ₂ /N ₂ 比)	mol/mol	1.01
	GHSV	h ⁻¹	6,023
試験結果	水素転化率	mol%	25.4
	物質収支	wt%	99.6

③ 反応温度の影響

反応温度が反応性に及ぼす影響を確認するため、反応温度以外の条件を一定として触媒層入口温度を 300~400℃で変化させた試験を実施した。図7に、反応圧力 8.0MPaG、GHSV 6,000 hr⁻¹、H₂/N₂比 1.0 mol/molにおける触媒層入口温度と反応器出口アンモニア濃度の関係を示す。ここで、温度が高くなるにつれて平衡アンモニア濃度は低くなるため、反応性を評価するために反応器出口アンモニア濃度と各温度における平衡アンモニア濃度の比率も併せて示す。

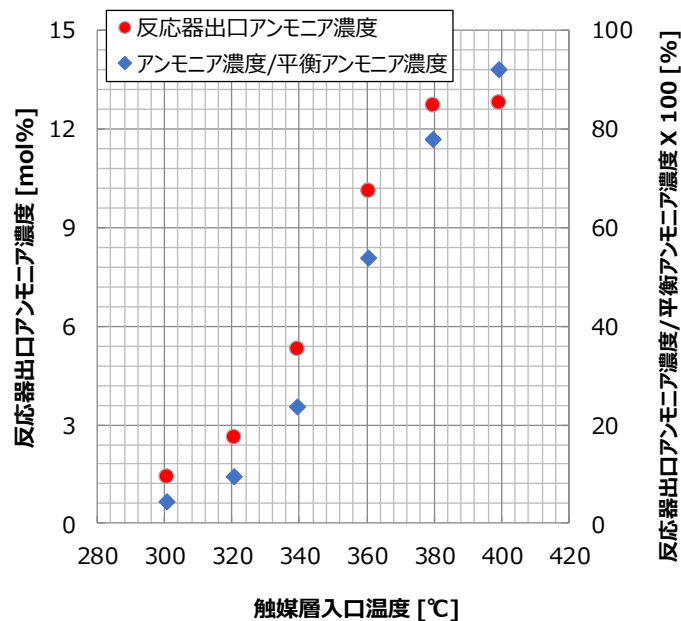


図7 触媒層入口温度と反応器出口アンモニア濃度の関係
(反応圧力 8.0MPaG、GHSV 6,000 hr⁻¹、H₂/N₂比 1.0 mol/mol)

図7より、触媒層入口温度 300℃でもアンモニア合成反応が進行することがわかる。温度の上昇とともに反応器出口アンモニア濃度は増大し、360℃以上の時に反応器出口アンモニア濃度は10mol%を超えた。

反応温度が低い条件では反応器出口の平衡アンモニア濃度は増大するが、実際のアンモニア合成反応器出口濃度は低く、温度が低い条件では反応速度が制約になっていることがわかる。一方で温度が比較的高い 380℃以上では、反応器出口アンモニア濃度は平衡アンモニア濃度の 80%以上であり、十分な反応速度が得られることがわかる。

④ 反応圧力の影響

反応圧力が反応性に及ぼす影響を確認するため、反応圧力以外の条件を一定として反応圧力を 3.0~8.0MPaG で変化させた試験を実施した。

図8に、触媒層入口温度 400℃、GHSV 6,000 hr⁻¹、H₂/N₂比 1.0 mol/mol における反応圧力と反応器出口アンモニア濃度の関係を示す。ここで、圧力が高くなるにつれて平衡アンモニア濃度は高くなるため、比較のために各圧力における平衡アンモニア濃度を点線で示す。

図8より、圧力の上昇と共に反応器出口アンモニア濃度が上昇した。この条件下ではいずれの圧力においてもアンモニア濃度はほぼ平衡近くに達している。Ru 触媒は担体によっては水素被毒の影響を大きく受けて、比較的低圧領域でアンモニア濃度のピークを示すケースがあるが、Ru/CeO₂ 触媒は、8MPa までの領域では圧力とともに生成濃度が増大する点が本開発触媒の特徴である。

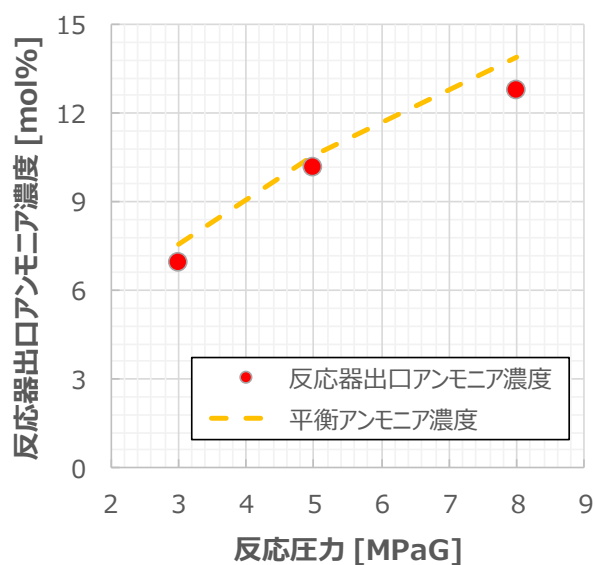


図8 反応圧力と反応器出口アンモニア濃度の関係
(触媒層入口温度 400℃、GHSV 6,000 hr⁻¹、H₂/N₂ 比 1.0 mol/mol)

⑤ H₂/N₂ 比の影響

H₂/N₂ が反応性に及ぼす影響を確認するため、H₂/N₂ を 1～3 の範囲で変化させた試験を実施した。

図9に、触媒層入口温度 400℃、反応圧力 5.0, 8.0MPaG における H₂/N₂ と反応器出口アンモニア濃度の関係を示す。

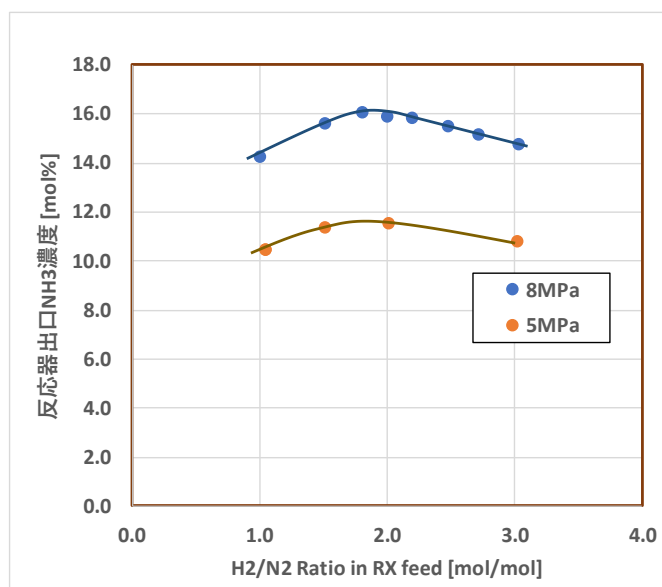


図9 H₂/N₂ 比と反応器出口アンモニア濃度の関係
(触媒層入口温度 400℃、GHSV 6,000 hr⁻¹)

図9より、いずれの圧力条件においても H₂/N₂=2 付近で最大のアンモニア濃度が得られることが

わかった。 $H_2/N_2=2$ で最大活性を示すのは Ru 触媒の特徴であり、Ru/CeO₂ も同様の特性であることが確認された。アンモニア合成反応としては $H_2/N_2=3$ の比率で消費されるため、プロセス構築上は、この触媒特性を考慮して反応器の運転条件を決定することが必要となる。

⑥ エンジニアリングデータの取得

前述した各種反応条件における触媒性能試験結果およびラボでの反応速度評価試験結果を基に、Ru/CeO₂ 触媒の反応速度モデルを構築した。この結果を基に、実証試験装置における反応器内の温度およびアンモニア濃度を計算した結果を図 10 に示す。シミュレーションと実測値がよく一致していることがわかる。

実証試験装置の反応器は等温型であるが、除熱が遅いため、反応器入口でアンモニア合成反応が進行し、触媒層温度が急激に上昇するとともに反応が進行する。温度が上昇してアンモニア合成反応の平衡に近くなると反応速度は低下する。その後は、除熱による温度の低下につれて平衡濃度が増大し、それに追従するようにアンモニア合成反応が進行することがわかる。

これらの解析結果より、触媒層 200mm 程度で反応ガスを冷却すれば、より効率的にアンモニア合成反応を進行させることができる事が推測される。このため、本実証試験で得られた各種エンジニアリングデータを用いて商業プラントの反応器構造の検討を行った。その結果、3～4 段の触媒層を用い、触媒層間で冷却するような構造が適切であることが明らかとなった。

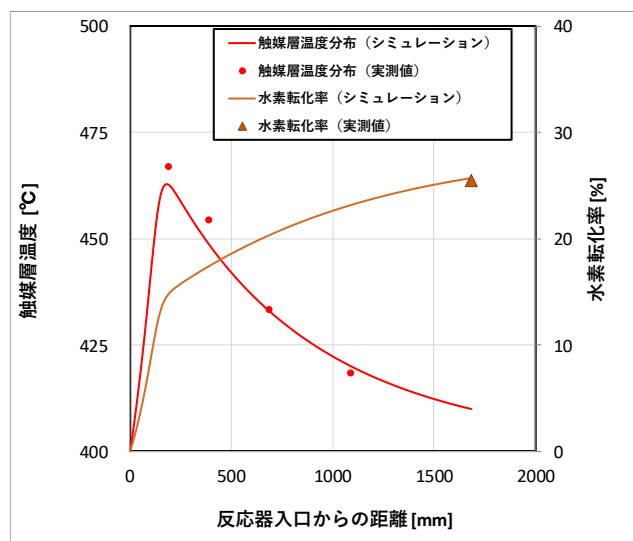


図 10 実証試験装置反応器内の温度・水素転化率のシミュレーション

(8) CO₂ フリー水素を用いたアンモニア合成とバリューチェーン実証

再生可能エネルギーを用いて製造された CO₂ フリー水素を用いたアンモニア合成と、合成した CO₂ フリーアンモニアを燃料としたアンモニアガスタービン燃焼試験を実施した。

CO₂ フリー水素は、産総研 FREA 内に設置されている 20kW の太陽光発電で得られた再エネ電力を、FREA に設置されている PEM 電解装置に供給して製造した。得られた CO₂ フリー水素は、圧縮してボンベカードルに充填して、実証試験の原料水素として使用した (図 11)。

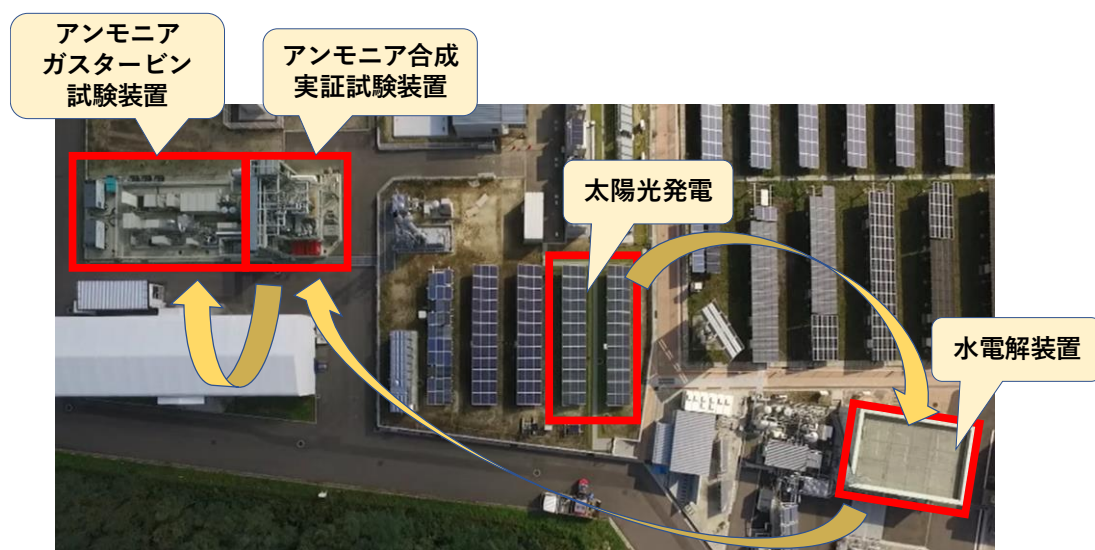


図 1 1 産総研 FREA における CO₂ フリーアンモニアバリューチェーン実証

図 1 2 にアンモニア合成試験の状況を示す。運転開始後 23 時間までは通常の購入した高純度のカードル水素を用いて試験を行い、その後原料水素を CO₂ フリー水素に切り替え、約 30 時間 CO₂ フリーアンモニア製造試験を行った。試験の条件は触媒層入口温度=400℃、反応圧力=5.0MPaG、GHSV=6,000hr⁻¹とした。

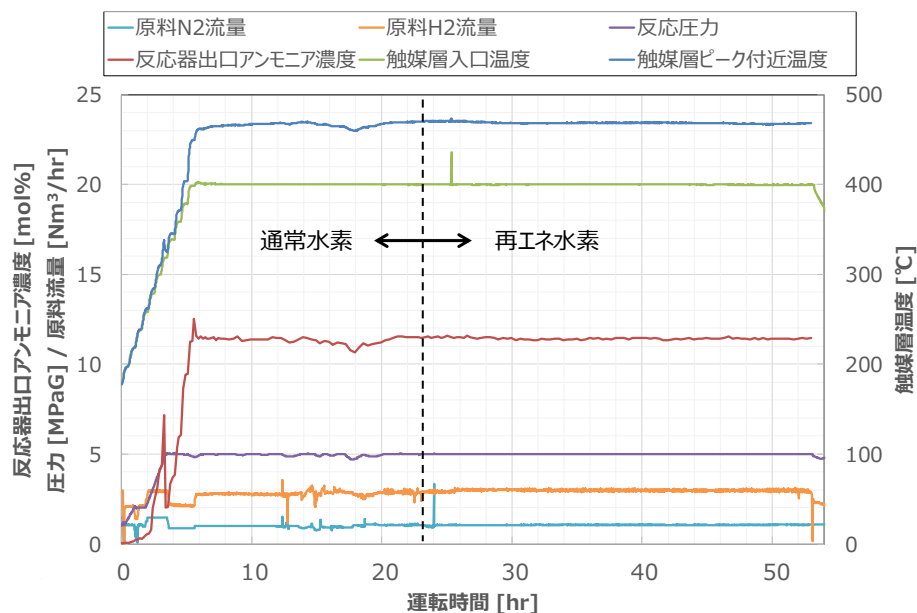


図 1 2 CO₂ フリー水素を用いたアンモニア合成試験結果

図 1 2 より、通常の購入水素から CO₂ フリーの再エネ水素に切り替えても運転状態に変化は見られず、その後も反応器出口アンモニア濃度も横ばいで安定しており、運転性や反応性に問題はないことが確認された。

本試験で製造した CO₂ フリーアンモニアは約 80kg であり、アンモニア移送タンクに充填して

それまでの試験で製造したアンモニアとともにアンモニアガスタービンの燃料として提供した。その結果、アンモニアガスタービンによるアンモニア専焼で安定した燃焼ができ、約 47kW の発電に成功した。

本試験では、図 1 3 に示すように、再エネ由来の CO₂ フリー水素を用いて、低圧でアンモニア合成を行い、これを用いてアンモニア専焼にて発電したものである。このフローは、再エネ出発のアンモニアキャリアのバリューチェーンを模擬的ではあるが一気通貫で実証したものであり、世界で初めての成功である。

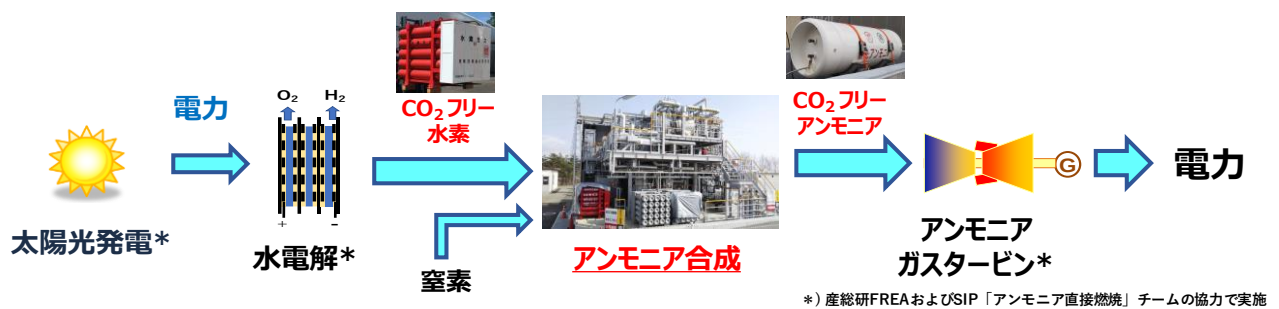


図 1 3 再エネ由来の CO₂ フリーアンモニアを用いたバリューチェーン実証

(9) アンモニア製造の負荷変動試験

CO₂フリー水素を再エネからの発電から製造すると場合、気象条件により再エネ水素の供給量が増減することは避けられない。この変動を吸収するためには蓄電池や大容量の水素タンクを設置する方策も考えられるが、いずれも高価であり経済性低下の要因となる。これらの影響を低減するためには、アンモニア合成プロセス自体も1～数日単位で生産量の変動運転することで、CO₂フリー水素製造量に追従することが必要なる。

このため実証装置にて、原料である水素の供給流量を計画的に増減させる運転を実施し、運転性に問題がないかを確認することを目的として試験を実施した。試験の条件は触媒層入口温度=400℃、反応圧力=8.0MPaGとし、およそ12時間ごとに原料の流量を変動させた試験を実施した。原料流量の変更は1～2時間程度をかけて実施した。

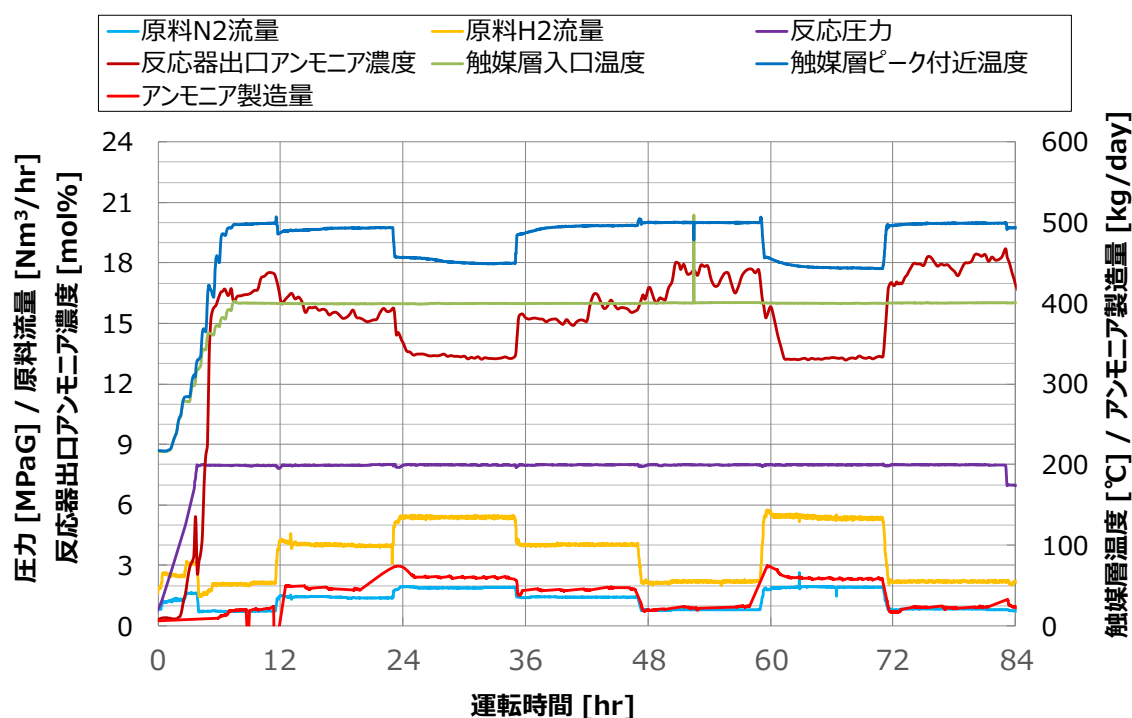


図1-4 アンモニア製造の負荷変動試験運転結果

図1-4に、原料のN₂およびH₂の供給流量、反応圧力、反応器出口アンモニア濃度、触媒層入口およびピーク位置の温度、およびアンモニア製造量の経時変化を示す。図1-4より、流量変化後も温度・圧力について大きな変動もなく、安定して運転できたことがわかる。一方で、原料流量が低い場合は、反応器出口アンモニア濃度の安定に時間を要することがわかった。これは低流量では装置全体のガスの置換に比較的長い時間がかかったことが原因と考えられる。また、アンモニア製造量は、条件変更時は変動が大きかったが、静定時は反応器出口アンモニア濃度と似た挙動を示しつつ、おおよそ安定していた。静定時で比較すると、アンモニア製造量は期待通り原料ガス供給流量に合わせて変動しており、最小の条件の製造量は最大の条件の製造量の40%弱程度であった。

(10) Ru-Cs/C 触媒を用いた実証試験

本研究にて開発した Ru-Cs/C 触媒について、実証試験装置を用いてアンモニア合成試験を実施した。

試験に際しては、Ru-Cs/C 触媒を充填した後に活性化前処理を実施してから、アンモニア合成反応活性評価を実施した。

Ru-Cs/C 触媒は Ru/CeO₂ 触媒と比較して低温での活性が高いことが特徴であることから、触媒層入口温度触媒層入口温度を変化させた試験を実施した。

図 15 に、反応圧力=8.0MPaG、GHSV=6,000 hr⁻¹、H₂/N₂ 比=1.0 mol/mol における触媒層温度と反応器出口アンモニア濃度の関係を示す。図 15 に、同じ条件での Ru/CeO₂ 触媒の活性の比較として示した。

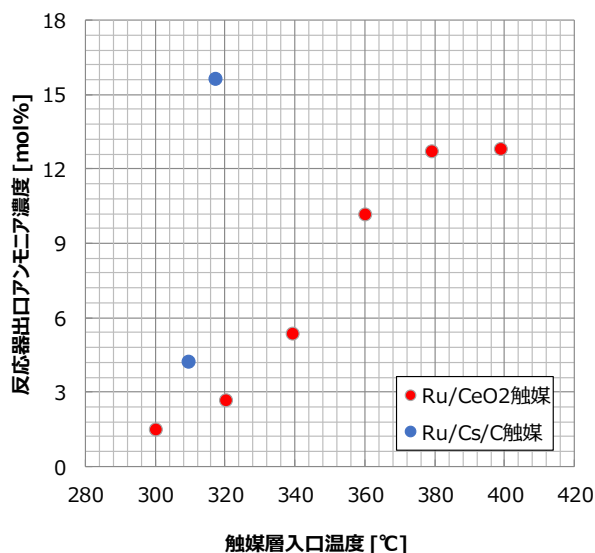


図 15 触媒層入口温度と反応器出口アンモニア濃度の関係
(反応圧力=8.0MPaG、GHSV=6,000 hr⁻¹、H₂/N₂ 比=1.0 mol/mol)

図 15 より、Ru-Cs/C 触媒はでは触媒層入口温度が 317.5°C という、Ru/CeO₂ 触媒からすると非常に低温の領域において、反応器出口アンモニア濃度 15mol% 以上に到達した。これは Ru/CeO₂ 触媒における触媒層入口温度 400°C でのアンモニア濃度以上の濃度であり、Ru-Cs/C 触媒は明らかに Ru/CeO₂ 触媒よりも低温活性が非常に高いことがわかった。

一方で、Ru-Cs/C 触媒を用いた時、触媒層入口温度を 310°C から 317.5°C にわずかに高くしただけで反応器出口アンモニア濃度が高くなる結果となっている。これは、触媒層内で反応が進行すると発熱により触媒温度が高くなり相乗的に反応速度が増大した結果である。このように、Ru-Cs/C 触媒は低温での活性は非常に高いが、活性が高いゆえに除熱などの反応器設計が非常にシビアとなることがわかった。

(1 1) 実証試験結果のまとめ

- 実証試験装置にて、ラボ装置とほぼ同等の反応成績が得られた。
- Ru/CeO₂ 触媒にて、本研究のマイルストーンである性能を確認した。
- Ru/CeO₂ 触媒を用いて、触媒性能に対する触媒層入口温度、反応圧力、GHSV、H₂/N₂ 比といった種々の反応条件の効果に関する試験を実施し、実装置で想定される多段反応器の設計に必要なエンジニアリングデータを取得した。
- Ru/CeO₂ 触媒を用いて、再エネ由来の CO₂ フリー水素を用いたアンモニア合成試験を行い、開発触媒で CO₂ フリーアンモニアを製造できることを確認した。さらに、製造したアンモニアをアンモニアガスタービンの燃料として用い、47kW の発電にも成功した。
- Ru/CeO₂ 触媒を用いて、アンモニア製造量の変動試験を実施し、負荷変動に対してスムーズに対応できることを確認した。
- Ru-Cs/C 触媒の低温活性が Ru/CeO₂ 触媒よりも高いことを確認した。

3-3 AATG プロセスを用いたアンモニアチェーンの検討

(1) 目的

本検討では、天然ガスから CO₂ フリーアンモニアを合成する際の水素・窒素合成ガス製造プロセスとして、大阪ガスと日揮で共同開発した AATG プロセスの適用性を検討した。AATG プロセスは従来型プロセスよりも効率的な炭酸ガス分離が可能であり、CO₂ フリーアンモニアの製造コスト削減や CO₂ 削減効果の向上に寄与できると考えられる。

本検討は大阪ガスと日揮が共同で実施し、日揮は従来型プロセスを用いたアンモニアプラントの CO₂ 回収量に応じた OPEX および CAPEX についての試算を担当した。最終的に大阪ガス株式会社にて AATG プロセスの試算結果との比較を行い、AATG プロセスの優位性について評価を行った。

(2) 従来型プロセス

現在の天然ガスからの水素・窒素合成ガス製造プロセスとしては、「プレリフォーマー(またはプライマリーリフォーマー)+Auto Thermal Reforming (ATR)」技術等が適用されている。従来型プロセスは、天然ガスの脱硫後にプレリフォーマーで低温水蒸気改質を行い、二次リフォーマーで高温改質を行っている。水蒸気改質法が用いられているプレリフォーマーは、吸熱反応に必要な熱を供給する必要がある、その熱を加熱炉にて燃料の燃焼反応により供給している。そのため加熱炉の煙道排ガス中からの低圧の CO₂ が大気に放散されることになる。それを回収するためにはアミン吸収プロセス等を用いた低圧 CO₂ 回収設備が必要となるが、これには追加の設備投資が必要となる。

(3) フィージビリティスタディ (FS) 前提条件の設定

大阪ガスと協議の上決定した。詳細については大阪ガスの報告書に記載した。

(4) プロセス条件

主な従来型プロセス条件を以下の通り検討した。

① 製造設備容量

アンモニア製造設備の原料として、窒素/水素比が 1:3 となる混合ガスを必要量供給できる設備容量とした。

② 従来型プロセスの酸化剤

合成ガスの窒素/水素比が 1:3 となるよう、空気を二次改質装置に供給した。

③ 従来型プロセスの S/C (供給スチーム量/原料ガス中のカーボン量比)

改質反応プロセスにおいてスチーム/カーボン比を大きくすることで合成ガス中の水素濃度が高まるため、一般的に用いられる数値として 3.2 を採用した。

④ 従来型プロセス (二次 Reformer) の出口圧力

原料のメタンの転化率が高く、一般的に用いられる 3.4MPaG を採用した。

(5) CO₂ 削減量に対する OPEX の評価

従来型プロセスにおける CO₂ 回収なしのケース(Base Case)を CO₂ の削減率 0%として、CO₂ 回収率を変えた 3 ケース (表 3) について、天然ガス消費量 (原料+ユーティリティ) と CO₂ 削減率を評

価した。検討結果を表5に示した。天然ガス消費量のうち、原料 NG はプロセスにて消費される天然ガス量であり、燃料 NG は動力や熱を得るために加熱炉またはボイラーにて使用された天然ガス量である。

表3 従来型プロセス検討ケース

Case	Case Description
Base	CO ₂ 回収なし
Case 1	Process CO ₂ 全量回収
Case 2	AATG Process CO ₂ 全量回収と等価 CO ₂ 回収 (CO ₂ 回収量は大阪ガス提供)
Case 3	CO ₂ 最大回収

表4 従来型プロセスケースにおける CO₂削減率検討結果

	Base	Case1	Case 2	Case 3
天然ガス消費量 (Base=100)	100	105	121	134
うち原料天然ガス	72	72	72	72
うち燃料天然ガス	28	33	49	62
CO ₂ 削減率 (%)	0	63	79	93

(6) 既存プロセスと AATG プロセスのアンモニア製造コスト比較

アンモニア製造コストの算出条件については、大阪ガスの報告書に記載した。

アンモニア製造コストは、従来型プロセスを用いた CO₂回収なしのアンモニア製造プラントで製造したアンモニア製造コストを 100 とした場合のコスト比として算出し、表5に示す結果が得られた。AATG プロセスを用いた場合の、アンモニア製造コストとの比較は大阪ガスの報告書に記載する。

表5 従来型プロセスケースにおけるアンモニア製造コスト算出結果

	Base	Case 1	Case 2	Case 3
アンモニア製造コスト (Base=100)	100	109	122	134

3-4 アンモニアを中心としたエネルギーキャリア実用化調査

(1) 目的

海外で CO₂ フリーアンモニアを国内発電所まで調達して、そのアンモニアによる国内発電の社会実装に向けて、そのアンモニアのサプライチェーンコスト、試算を行い、既存の火力発電システム（石炭火力発電、LNG 火力発電）との比較を行い、実現可能性を評価した。

本検討において、検討前提・条件の設定については、日揮とエネルギー総合工学研究所の共同で行った。コスト試算においては、日揮は UAE でのアンモニア製造コストを担当した。エネルギー総合工学研究所は、そのアンモニア製造コストを用いて、海外の積地基地～国内発電所までのサプライチェーンコストの試算および発電コスト試算を担当した。

(2) 検討条件

図 1 6 に本検討でのサプライチェーンモデルを示す。アンモニアは UAE で製造し、日本に海上輸送され、最終的に国内の発電所に供給されるモデルとした。

CO₂ フリーアンモニア製造として、以下の 2 つの方法で検討した。

(a) 天然ガス改質によるアンモニア製造で、排出 CO₂ を固定化。

(b) 再生可能エネルギーで製造した水素からのアンモニア製造

サプライチェーン評価では、UAE、日本それぞれの各工程で発生する CO₂ について、それぞれ、海外 CO₂ 費用、国内 CO₂ 費用を設定し、CO₂ 排出量に応じ、その費用も考慮してコスト評価を行った。海上輸送では、航海距離の大部分が公海のため、CO₂ 費用は考慮しない前提とした。また、コスト試算にあたって利益分は考慮しないこととした。

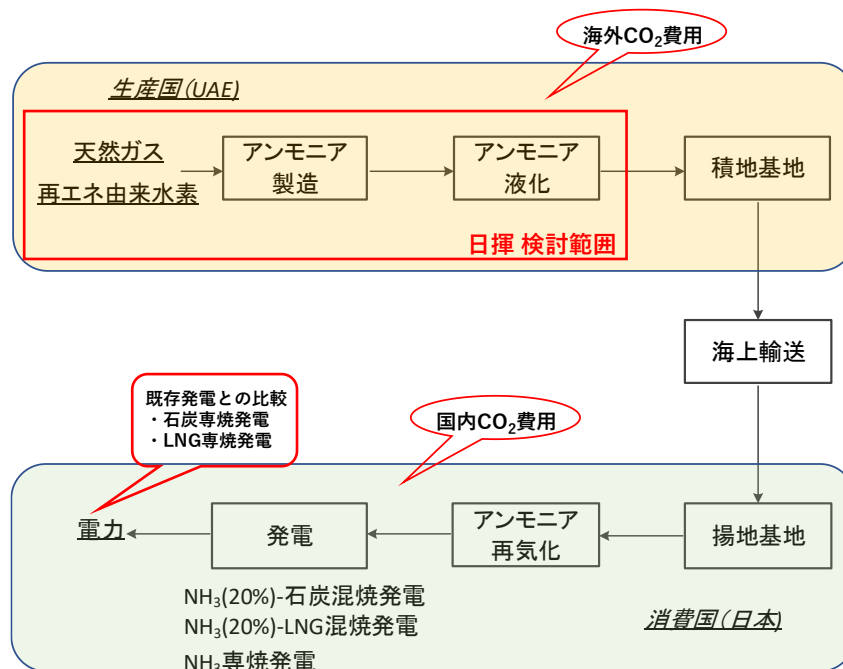


図 1 6 CO₂フリーアンモニアサプライチェーン モデル図

(3) 検討ケースおよび検討条件

表 6 に、検討ケースをまとめた。アンモニアの年間需要想定規模については、新エネルギー・産業技術総合研究機構（NEDO）「水素利用等先導研究開発事業/エネルギーキャリアシステム調査・研究/エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析」における国内への水素供給量に準拠しており、化学両論比ベースでアンモニア量へ換算した量とした。¹⁾ 再生可能エネルギーのケースにおいては、水電解装置のユニット規模、および再生可能エネルギー発電所の商業発電所規模を考慮し、化石燃料+CO₂ 固定化のケースに比べ、年間の需要想定規模（国内発電所手前での供給量）を少ない値に設定した。

天然ガスによるアンモニア製造では、天然ガス改質によるアンモニア製造として、その工程で排出される CO₂ を CCS により固定化する前提とした。以下、本ケースを「天然ガスケース」と呼ぶ。

再生可能エネルギーについては、太陽光発電、蓄熱式太陽熱発電による水電解の他に、水力発電を想定したケースも試算した。UAE にて水力発電方式は現実的にありえないが、安定かつ安価である、いわゆるアンモニア製造においてベストな再生可能エネルギーとして検討ケースに含めた。太陽光発電のケースを「PV ケース」、蓄熱式太陽熱発電のケースを「CSP ケース」、および水力発電を想定したケースを「再エネベストケース」と呼ぶ。

アンモニアの最終用途としては、国内発電用燃料に限定することとし、発電コストの評価リファレンスとして、石炭火力発電、LNG 火力発電を対象とした。それぞれの発電で発生する CO₂ 量に基づく国内 CO₂ 費用を考慮し、コスト評価を行った。

表 6 実用化調査検討ケース一覧

ケース分類	水素供給方法	NH ₃ 需要想定規模 (発電所手前)	特記事項
化石燃料+ CO ₂ 固定化	天然ガス(NG)改質	1.27 million t-NH ₃ /y	アンモニア製造の際に、排出CO ₂ を 固定化
再生可能エネルギー	太陽光(PV)発電による水電解	0.15 million t-NH ₃ /y	系統電源と接続しない仕様
	蓄熱込太陽熱(CSP)発電による水電解	0.15 million t-NH ₃ /y	同上
	水力発電による水電解 (再エネベストケース)	0.15 million t-NH ₃ /y	同上
リファレンス	石炭火力発電	-	国内CO ₂ 費用を考慮
	LNG火力発電	-	国内CO ₂ 費用を考慮

① 設備仕様

アンモニア製造プロセスとして、従来の工業プロセスである Haber-Bosch 法を採用した。アンモニア製造・液化拠点と積地基地は隣接している前提とし、UAE での陸上輸送は考慮しない。国内の揚地基地から発電所まではパイプラインでアンモニアを 50 km 輸送し、発電所内の気化器で再ガス化を行って発電所に供給する前提とした。

天然ガスケース、および各再生可能エネルギーのケースでは、年間アンモニア需要量が異なり、

各設備の仕様も異なる。各ケースでの各設備仕様を表7にまとめた。なお、再生可能エネルギーの各ケースについては、外部から各再生可能エネルギーによって発電された電力がその設備利用率に応じて水電解に供給される前提とし、水電解に必要とするその電力を外部購入する形でコスト試算を行った。

表7 設備仕様一覧

検討ケース	ユニット	ユーティリティ	設備容量	特記事項
天然ガスケース	アンモニア製造および液化	天然ガス	純度：99.99% プラント規模：1,925 MTPD×2 基	既設アンモニアプラント規模を参考に設定
PVケース CSPケース 再エネベストケース	水電解装置	電力	水電解装置設備規模：2.5 MW/ユニット 水電解装置タイプ：アルカリ水電解 水電解総受電規模：855 MW (PV)，175 MW (CSP/再エネベスト) 単位水素消費電力原単位：4.5 kWh/Nm ³ -H ₂	各再生可能エネルギーの設備利用率に対応して水電解装置規模を決定。設備利用率の低いPVケースのみ、12時間分の水素蓄圧設備を導入。
	窒素製造	電力	空気分離装置 115 TPD-O ₂ 規模	年間需要アンモニア量を基に設定
	アンモニア製造および液化	天然ガス	純度：99.99% プラント規模：460 MTPD×1 基	年間需要アンモニア量を基に設定

② 主要前提条件

表8に、主要前提条件の一覧を示す。運転期間は30年間とした。

表8 主要前提条件一覧

項目		単位	設定	特記事項
設備利用率	国内発電所	[%]	80	
	太陽光発電	[%]	20	
	その他設備	[%]	90	
為替レート		[円/USD]	121	2015年レート平均を採用
運転期間		[年]	30	

③ 考慮コストの定義

CAPEX および OPEX については、以下に示す費用を考慮した。

CAPEX：プラント建設費、撤去費用

OPEX：原料費、ユーティリティ費、人件費、修繕費、固定資産税、保険費、諸費、
一般管理費、CO₂費用

④ コスト単価試算方法

OECD 等がコスト試算方法で採用している稼働年数均等化原価法を採用した。²⁾ 割引率は、本検討では NEDO PJ に準拠し、5%とした。¹⁾

⑤ 建設費試算における基準年の設定

プラント建設費を参考値から試算するにあたり、本検討での基準年を2015年とした。

⑥ 単価設定

表 9 に、本検討で設定した単価一覧を示す。アンモニアによる大規模発電方式が導入されるタイミングとして、2030 年頃を想定しており、各化石燃料については現状の燃料価格より高めに設定を行った。

表 9 海外原料、海外ユーティリティ設定価格一覧

	項目一覧		単価	特記事項
海外原料	天然ガス(天然ガスケース)	[USD/MMBtu]	5.6	文献 ³⁾ による2030年想定ガス価格を設定
	電力(PVケース)	[US cent/kWh]	5.0	文献 ⁴⁾ を基に設定
	電力(CSPケース)	[US cent/kWh]	6.0	文献 ⁵⁾ を基に設定
	電力(再エネベストケース)	[US cent/kWh]	1.8	文献 ⁶⁾ を基に設定。水力発電想定
海外ユーティリティ	燃料ガス	[USD/MMBtu]	5.6	文献 ³⁾ による2030年想定ガス価格を想定
	系統電源電力	[US cent/kWh]	7.1	NEDO PJ条件を準拠 ¹⁾
	純水	[USD/t]	4	海水淡水化+純水製造 純水製造コスト一般値として設定
	工業用水	[USD/t]	1	海水淡水化 水製造コスト 一般値として設定

⑦ ランニングコスト

設備稼働期間中に下記のランニングコストが発生するものとした。各条件については、NEDO PJ の条件を準拠した。¹⁾

人件費：	建設費の 0.6 %
修繕費：	建設費の 2 %
諸費：	建設費の 0.6 %
一般管理費：	建設費の 1 %

⑧ 法定耐用年数、償却年数、および固定資産税

日本の減価償却方式に従うこととし、償却方法は、日本の法定耐用年数を償却期間とした定率法を採用した。固定資産税については、NEDO PJ の条件を準拠し、残存簿価の 1.4 %とした。¹⁾

⑨ 海外 CO₂ 費用の設定

図 1 7 に天然ガスからのアンモニア製法である Haber-Bosch 法の概要を示す。原料ガス由来の CO₂ は、アンモニアプロセスの中で分離・回収される。一方の燃料ガスから発生する CO₂ は燃焼排ガスとして、煙道から低濃度で排出される。原料ガス由来 CO₂ をプロセス CO₂、燃料ガス由来の CO₂ をユーティリティ CO₂ と定義する。両者には、「分離・回収」に要する費用の有無に伴う費用の差分を設定した。CO₂ 費用の設定一覧を表 1 0 に示す。

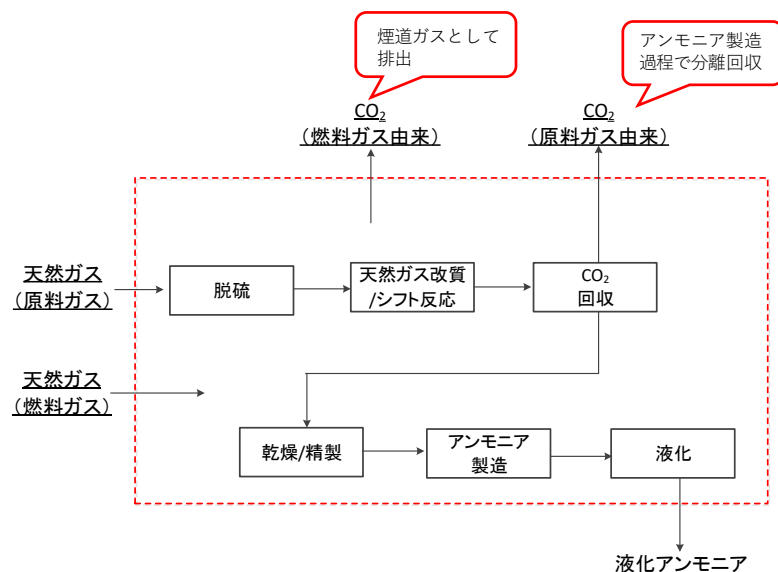


図 1 7 Haber-Bosch 法におけるプロセス CO₂ とユーティリティ CO₂

表 1 0 本検討における CO₂ 費用設定一覧

CO ₂ 費用	海外CO ₂ 費用 (プロセスCO ₂)	[USD/t-CO ₂]	35	「昇圧」+「輸送」+「圧入」 文献 ⁷⁾ を基に設定
	海外CO ₂ 費用 (ユーティリティCO ₂)	[USD/t-CO ₂]	50	「分離回収」+「昇圧」+「輸送」+「圧入」 文献 ⁷⁾ を基に設定

(4) 結果および考察

① アンモニア大規模発電 導入初期 (2030 年頃) を想定したアンモニア製造コスト試算結果

UAE で製造するアンモニア製造コスト (アンモニアプラント出口でのコスト) の各ケースでの試算結果を図 1 8 に示す。試算結果では、CCS を適用した天然ガスからのアンモニア製造がおよそ 400 USD/t-NH₃ と、全ケース中で最も安い結果であった。天然ガスケースに比べて他のケースでの「その他 OPEX」のコストが高くなっている理由は、ランニングコストが建設費に基づいて計算されているためであり、再エネケースは水電解装置等の建設費が割高であることが起因している。さらに PV ケースについては、設備利用率が低いため、必要なアンモニア生産量を確保するために高価な水電解装置を過剰に導入する必要があるため、再生可能エネルギーのケースの中でも特に高いコスト試算結果となった。CSP ケースと再エネベストケースについては、外部購入する水電解に要する電力コストの差がアンモニア製造コストに反映している。

再エネ電力が最も安価な再エネベストケースでもアンモニア製造コストはおよそ 550 USD/t-NH₃ であり、天然ガスケースと比べて高い結果となった。

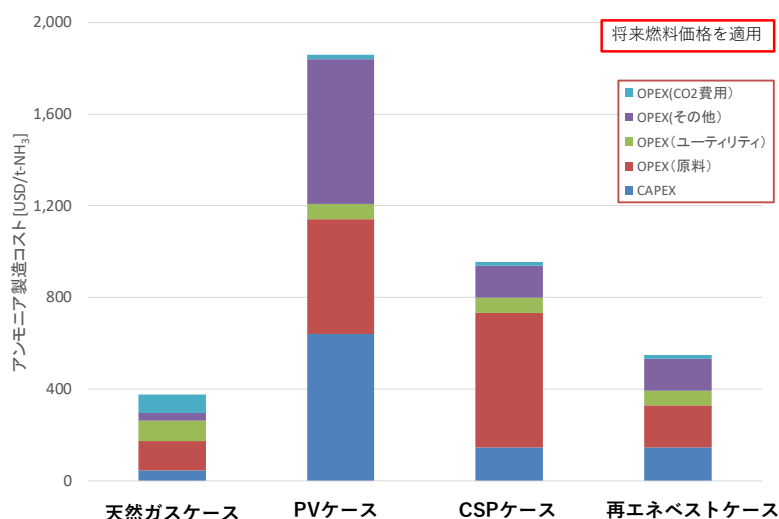


図18 各ケースでのアンモニア製造コスト試算結果

② 将来の技術進展によるアンモニア製造コスト低減検討

前項までの検討の結果を踏まえて、アンモニア製造コストに対して、大きく影響を与えると考えられる要素・技術に関して将来想定され得る技術進展度の調査を実施した。文献、有識者へのヒアリングをもとに想定した技術進展のベスト条件を技術進展条件と設定した。各パラメータの設定条件を表11（天然ガスケース）および表12（再エネベストケース）にまとめた。

この「技術進展条件」におけるアンモニア製造コストの試算を行い、前項までの検討で行った「導入初期条件」でのコスト試算との比較を行った。対象ケースとしては、「天然ガスケース」および再生可能エネルギーケースの中でのベスト条件である、「再エネベストケース」の2ケースを対象とした。

表11 天然ガスケース 技術進展条件一覧

パラメータ	天然ガスケース (導入初期条件)	天然ガスケース (技術進展条件)	設定理由
NH ₃ 製造エネルギー効率 (HHVベース)	60 %	70 %	文献 ⁸⁾ を基に設定
製造大型化	1,925 MTPD × 2系列	3,850 MTPD × 1系列	文献 ⁸⁾ を基に設定

表 1 2 再エネベストケース 技術進展条件一覧

パラメータ	再エネベスト (導入初期条件)	再エネベスト (技術進展条件)	設定理由
再エネ電力単価	1.8 US cent/kWh	1.0 US cent/kWh	文献 ⁹⁾ を基に設定
水電解 単位水素製造 エネルギー原単位 (相対比)	1	0.95	文献 ¹⁰⁾ を基に設定
水電解システムコスト (相対比)	1	0.65	文献 ¹¹⁾ を基に設定
NH ₃ 製造 用役用途 エネルギー消費原単位 (相対比)	1	0.95	社内検討より設定
製造大型化	460 MTPD ×1系列	1,000 MTPD ×1系列	最終目標規模と して設定

技術進展条件での各ケースのアンモニア製造コスト試算結果を、導入初期条件での結果と比較して図 1 9 に示す。再エネベストケースでは、大幅なコストダウンとなっており、安価かつ安定な再生可能エネルギー電力が調達できるエリアの探索、および水電解装置の技術進展・量産化によるシステムコストの低減が求められる。

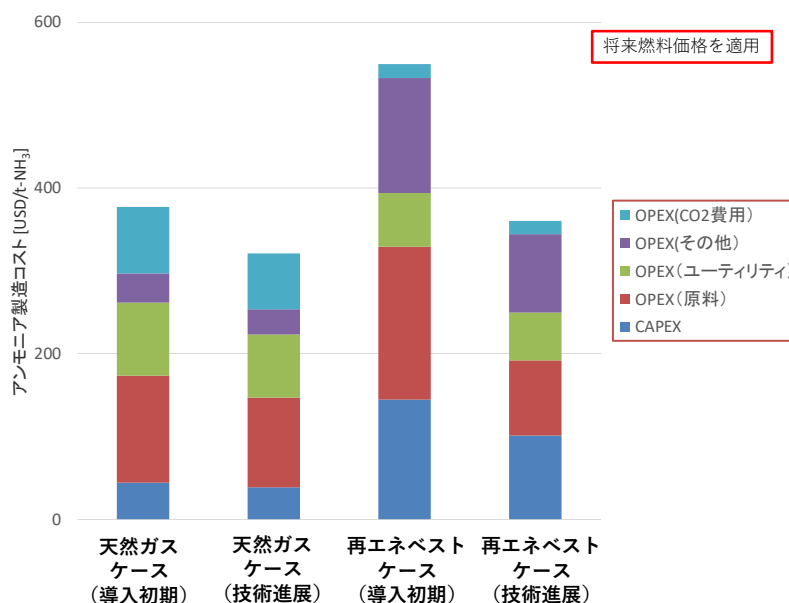


図 1 9 技術進展条件適用におけるアンモニア製造コスト試算結果

3-5. アンモニアチェーンの社会導入に向けた実証検討

(1) 目的

国内での再エネによる地産地消型アンモニア製造および利活用について、北海道電力が実施するアンモニア製造設備の立地候補地点での再エネ設備設置用地（面積、価格等）、輸送費用等の調査データを基に、概算での実用化調査を実施する。

(2) 地産地消型アンモニア製造および利活用

本検討では、北海道等の地方地域での課題を踏まえ、北海道で再生可能エネルギー（以下、再エネと略）由来の CO₂ フリー水素を用いたアンモニアの製造を検討した。再エネ由来の CO₂ フリー水素を使用したアンモニア合成は、特に小規模ではアンモニア製造コストが高くなるという課題がある。一方で、北海道にはアンモニア製造設備や海外からの輸入アンモニアの陸揚げ基地はないため、北海道内で流通しているアンモニアは、道外価格と比較して割高となっている現状もある。

こうした北海道のように水素の大量消費ニーズがなく、その供給価格が高価となる事が想定される地域において、再エネによる水素製造とこの水素を用いたアンモニア製造を行い、北海道内の発電所へ供給するモデルの構築を検討した。

① 地産地消型アンモニア製造プラントの装置構成の検討

太陽光発電(PV)の電力を用いて水電解により製造した水素と、空気から分離した窒素によりアンモニアを合成するプラントの装置構成を図20に示した。アンモニア合成装置にはアンモニア合成装置は FREA にて実証試験が行われている低温低压で活性に優れるルテニウム触媒を充填した反応器を想定した。またアンモニアの貯蔵設備としては、アンモニア輸送ローリーの容量を鑑みて5日分(9TPD、年産3000トンの場合45トン)の貯蔵容量を設定した。

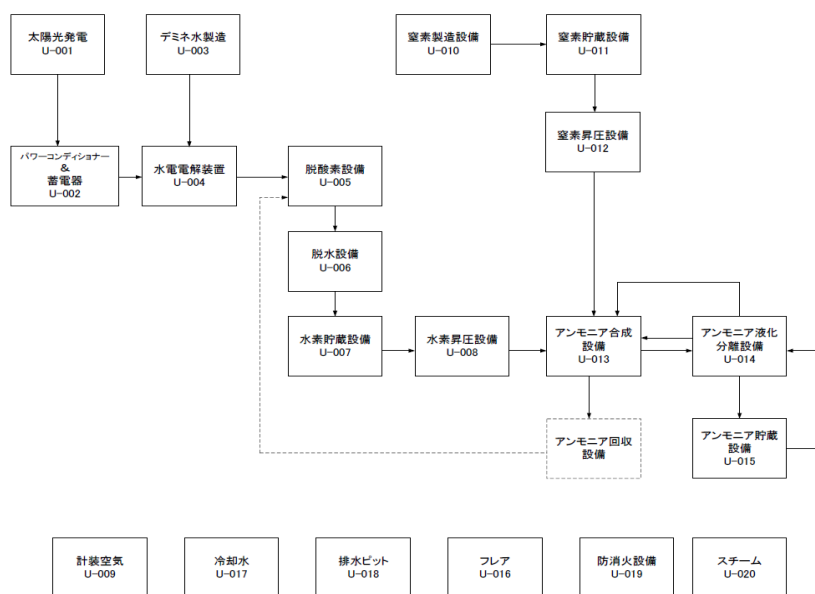


図20 アンモニア製造 装置構成図

② 太陽光発電（PV）の出力変動への対応

有力な候補地として選ばれた苫東地域近傍（北海道 苫小牧）および 奈井江・砂川地域近傍（北海道 滝川）における日射量データを解析して、アンモニア製造用原料水素の製造に必要な PV パネル容量の算出を行った。出力変動の対応策の一つとしてピークカットによる水電解装置及び水素タンク、蓄電池の容量削減効果について確認した。また蓄電池、水電解装置、水素タンクの最適な装置サイズをケーススタディによって検討した。

(a) ピークカット

苫小牧の実測日射量データを使用して、ピークカット効果の検討を行った。ピークカットは、ある一定以上の PV 出力があった場合にそれ以上の出力を捨てることで、変動幅を抑制するとともに設備利用率を改善するものである。PV パネルの定格出力（カットなし）を 1.0 として、ピークカットを行った場合の必要 PV 容量の計算結果を図 2 1 に示す。

ピークカットを行わなかった場合、9 TPD のアンモニア合成に必要な水素量を供給するための PV 容量は 24MW であるのに対し、ピークカット 0.6(最大出力は定格の 60%)のケースでは、必要となる PV 容量は 26MW に増大するが、増大割合は比較的小さい。ピークカットを小さくして捨てる割合をさらに増やしていくと、必要な PV 容量が急激に増加していくことがわかる。

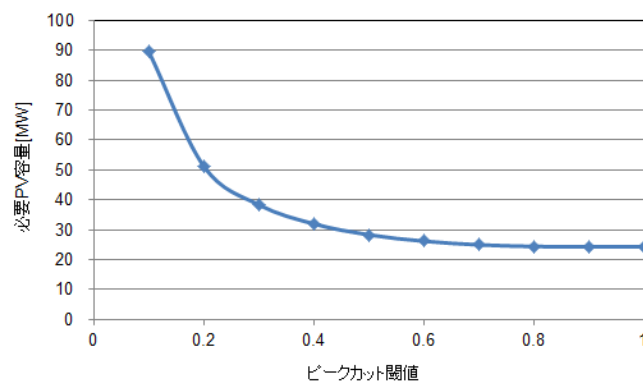


図 2 1 ピークカットと必要 PV 容量

(b) 変動吸収方法のケーススタディ

ピークカットの検討結果より、PV 容量の増加が小さく、かつ PV 以外の装置のサイズ削減効果が大きいと考えられる 0.6 の条件で、以下の 3 ケースにてケーススタディを行った。

Case 1：再エネ変動をすべて水素タンクで吸収する方法

Case 2：再エネ変動を蓄電池と水素タンクで吸収する方法

Case 3：再エネ変動をすべて蓄電池で吸収する方法

比較を容易にするため、模擬的に PV 容量を 1MW とした場合の、検討ケースごとの水電解装置と電解装置の稼働率を表 1 3 に示した。

表 1 3 ケーススタディ 電解装置容量と稼働率

		PVサイズ MW	電解装置サイズ MW	電解装置稼働率 %
Case 1	水素タンク	1	0.6	20.5
Case 2	蓄電池+水素タンク	1	0.25	50
Case 3	蓄電池	1	0.13	100

それぞれのケースにおける水電解装置、蓄電池、水素タンク容量と合計コストの相対値について表 1 4 に示した。水素タンクにて変動を吸収する Case 1 が最も装置コストが安価になり、水素タンクにて変動を吸収する方法についてアンモニア製造コストを評価することとした。

表 1 4 ケーススタディ 結果

PV容量 (NH3製造量)		1MW (0.35 TPD)		
発電量 ピークカット		0.6		
		Case 1	Case 2	Case 3
水電解装置容量	MW	0.6	0.25	0.12
水素タンク容量	Nm3-H2	17513	17207	NA
蓄電池サイズ	MWh	NA	2.9	79.4
相対価格		100	112	301

(c) 変動対応型アンモニア製造の検討

ケーススタディの結果より水素製造量の変動を水素タンクにて吸収する方法を採用したが、水素タンクの容量が大きく経済性の面でまだ課題がある。このため日射量の変動に応じてアンモニアプラントへの水素供給量（アンモニアの製造量）を変えることにより、水素タンクの容量削減の検討を行った。

図 2 2 にケーススタディ Case1 におけるアンモニアプラントへの水素供給量と水素タンクへの水素貯蔵量の 1 年間の経時変化を示した。水素供給量が一定であるため、日射強度の高い夏場に多くの水素が蓄えられ、日射強度の低い冬場に、夏場に蓄えた水素を使って供給量を維持するバランスになっていることがわかる。そのため、最大水素貯蔵量が大きく、大容量の水素タンクが必要となる。これに対して、水素製造量の変動に合わせてアンモニアプラントへの水素供給量を変化させた場合の水素供給量と水素タンクへの水素貯蔵量の 1 年間の経時変化を図 2 3 に示す。結果、水素貯蔵量の増減幅が小さくなり、水素タンクの容量を 70%削減することが出来ることが分かった。一方で、年間で所定のアンモニア製造量を得るためには、日射条件の良い時期に平均製造量以上のアンモニアを製造する必要がある、本検討ではアンモニア製造容量を 25%増大させる必要があることがわかった。

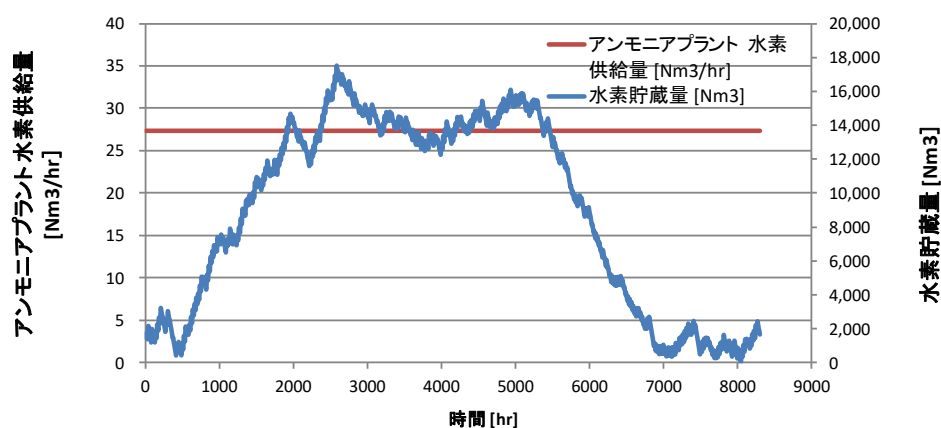


図 2 2 水素供給量および水素貯蔵量の経時変化（供給量一定）

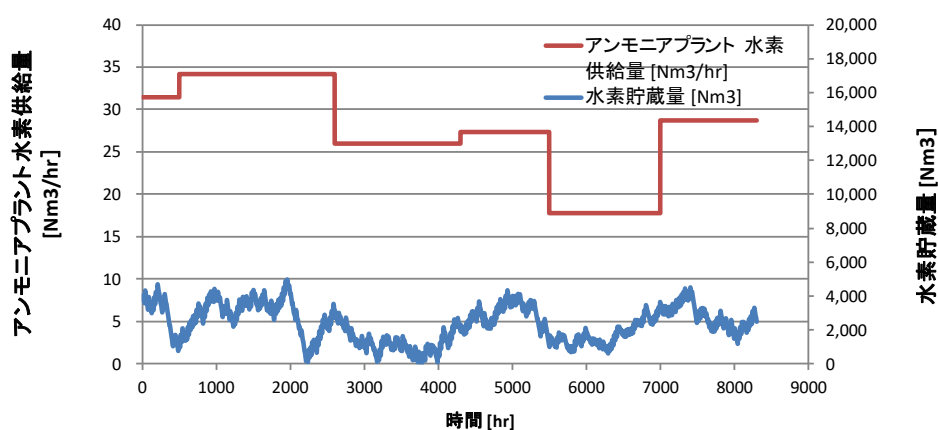


図 2 3 水素供給量および水素貯蔵量の経時変化（供給量変動）

(d) アンモニア製造コスト試算

前項 Case 1 と変動対応を考慮したケースの 2 ケースについて、年産 1000 トンと 3000 トンの場合におけるアンモニアの製造コストの試算を行った。なお装置の EPC コストについては 50% に当たる補助金を見込んだ試算となっている。

道内のアンモニア価格に対し競争力のある価格としてターゲット価格を設定し、その価格に対する相対価格について表 1 5 に示した。年産 3000 トンの場合、ピークカットやアンモニアの製造量を変動させるなどの工夫を行うことにより、ターゲット価格の 1.3 倍まで近づけることができた。

表 1 5 アンモニア製造コスト試算結果

アンモニア年生産量	1000		3000	
アンモニア製造量変動 (季節)	なし	あり	なし	あり
PV容量 MW	9		26	
発電量 ピークカット	0.6		0.6	
水電解装置容量 MW	15.6		15.60	
水素タンク容量 Nm ³ -H ₂	15200	44000	455000	130000
アンモニア製造装置容量 TPD	3	3.8	9	11.3
ターゲットアンモニアコスト %	243	183	195	133

③ コストダウン検討

アンモニア製造量について、季節的な変動吸収から数日程度の短期的な変動を行うとともに、変動を緩和するために少量の系統電力を使用することにより、水素タンク容量をさらに削減でき、ターゲットコストの約 1.2 倍まで近づけることができた (表 1 6)。

その一方で、年産 3,000 トンというスケールにおいて、これ以上のコスト削減は難しいと考えられる。そこで、製造規模拡大によるスケールメリットや本プロセス内における各ユニットコストの将来的な低減を見込んだアンモニア製造コストの再試算を行った結果を図 2 4 に示す。年産 6,000 トンまで生産規模拡大し、将来的に予想される各ユニットコストで再試算することにより、将来的にはターゲット価格と同等となる可能性が見いだされた。現状におけるアンモニア需要は 4,000 トン/年程度であるが、将来的にアンモニア混焼が導入されると考えるとスケールアップしたアンモニア製造量 6,000 トン/年の需要が生まれることは十分に考えられる。また、その際に必要となる PV 容量 53MW も、現在道内の既導入 PV 容量、北海道電力発電所内および近傍における PV 設備設置可能面積を考慮すると現実的な容量である。

表 1 6 アンモニア製造コスト削減試算結果

	ケース① ベースケース	ケース② コスト削減検討	ケース③ コスト削減&スケールアップ
アンモニア年生産量	3000	3000	6000
アンモニア製造量変動	季節毎	月毎	月毎
系統電力購入	なし	あり	あり
PV容量 MW	26	26	53
発電量 ピークカット	0.6	0.6	0.6
水電解装置容量 MW	15.6	15.6	31.2
水素タンク容量 Nm ³ -H ₂	130,000	22,500	45,000
アンモニア製造装置容量 TPD	11.25	11.25	22.5
ターゲットアンモニアコスト %	133	117	90

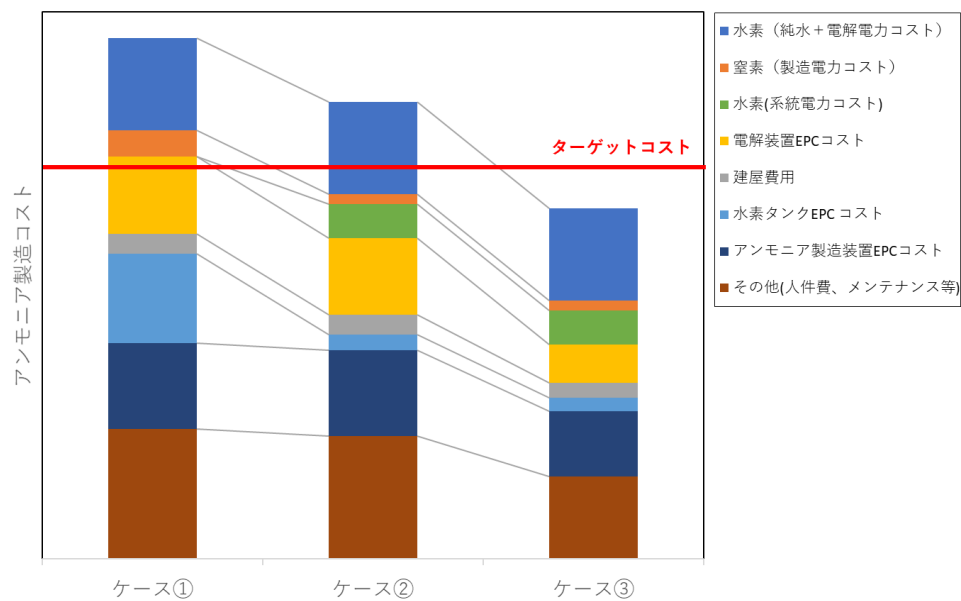


図 2 4 アンモニア製造コスト内訳

3-6. 天然ガスからの CO₂ フリーアンモニアの供給可能性検討

(1) 目的

3-4章のエネルギーキャリア実用化調査で述べたように、短期的には CO₂ フリーアンモニアを安価で製造する方策としては、天然ガスを原料として従来法でアンモニアを製造し、副生する CO₂ を回収して CCS あるいは EOR で隔離する方法である。この方法による CO₂ フリーアンモニアの日本への供給コストをより具体的な条件で検討する事を目的として検討を行った。

具体的には、米国、カタール、サウジアラビアにて天然ガスを原料にアンモニアを製造し、副生する CO₂ を CCS または CO₂-EOR 向けに CO₂ を供給することで CO₂ フリーアンモニアを製造するプラントを建設する場合の具体案策定、及びそのアンモニアの日本向け供給コストの概算評価を実施し、3 件の比較と供給可能性評価を実施した。本検討は、日揮、三菱商事、丸紅、日本エネルギー経済研究所が共同で実施したが、この中で日揮は全体の共通条件設定およびアンモニア製造プラントのコスト評価を担当した。

さらに、アンモニア製造プラントの大型化によるコストダウンの可能性を検討するため、ATR を用いた大型プラントを採用した際のコスト低減効果を評価した。

(2) 検討条件

既存のアンモニア製造プロセスである Haber-Bosch 法では、原料である天然ガスの改質工程で高圧の水素・窒素混合ガスを製造する際に、排出される煙道ガス中に大量の CO₂ が含まれ、また、混合ガス合成工程においても大量の CO₂ が発生している。そこで、Haber-Bosch 法でのアンモニア製造に、CO₂ の回収システムを組み合わせることによる、CO₂ フリーアンモニアプラントのコスト検討を行った。

アンモニアプラントとして、天然ガスを原料とした Haber-Bosch 法を採用し、シングルトレイン最大規模である 3,300ton/day を設定した。プロセスガスから CO₂ 除去装置により分離回収される CO₂ は全量、および加熱炉やボイラーから排出される燃焼排ガス中の CO₂ は 90%程度回収することとした。また、プラント内で消費する電力・蒸気は、スタートアップ時を除き、プラント内で自給することとした。

回収された CO₂ は常圧から圧縮し、CO₂ パイプラインにて取合いのポイントまで輸送することとした。製造されたアンモニアは常圧、マイナス 33℃の冷凍タンクに貯蔵され、立地によりアンモニアパイプラインにてローディング設備まで輸送し、輸送船に供給する。図 2-5 に CO₂ フリーアンモニアプラントのブロックフローを示した。

また、日本向けのアンモニア供給コスト検討では、三菱商事、丸紅、日本エネルギー経済研究所にて各々の場所でのプロジェクトを想定して経済性評価の前提条件を決定した。各検討の前提条件詳細は各機関の報告書を参照のこと。

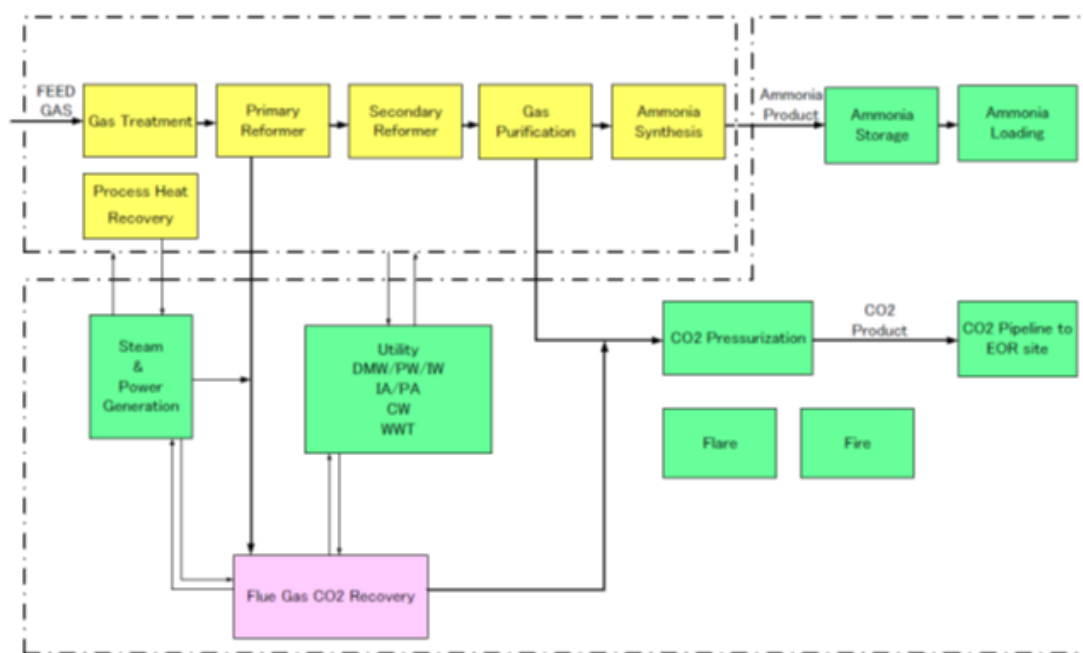


図 3 2 アンモニアプラントのブロックフロー

(3) 検討結果

CO₂フリーアンモニアプラントのプロセス検討の結果、主要機器のサイジングにより機器コストを算出し、米国、カタール、サウジアラビアでのプラントの建設費の概算コストを算出した。建設コストの算出においては、近年の建設コストの動向も加味して検討を行った。さらに、各々の前提条件と場所ごとでの原料・ユーティリティ・ケミカル・触媒の消費量など運転に必要な情報をまとめた。北米と中東では、中東の方が外気温が高く、それが 2%程度のエネルギー原単位悪化になることがわかった。

表 1 7 に、中東での、プロセスおよび煙道排ガスからの CO₂ 回収を行った場合、プロセスからの CO₂ 回収のみの場合、CO₂ 回収なしの場合の CO₂ 回収率とプラントコスト、エネルギー原単位の相対比を示す。

表 1 7 CO₂回収率によるプラントコスト、エネルギー原単位の相対比

ケース	CO ₂ 回収率	プラントコスト	エネルギー原単位
プロセスおよび 排ガス CO ₂ 回収	約 95%	100%	100%
プロセスのみ CO ₂ 回収	約 62%	約 85%	約 95%
CO ₂ 回収なし	0%	約 80%	約 91%

上記の情報をもとに、三菱商事、丸紅、エネルギー経済研究所にて各々の場所で、プラントコスト、運転に必要な原料・ユーティリティ・ケミカル・触媒に関する費用、人件費、海上輸送費などを考慮して、日本への CO₂ フリーアンモニア供給価格を日本エネルギー経済研究所が算出した。

(4) アンモニアプラントの大型化検討

現行プロセスの延長線での大型化には、Steam Methane Reformer でスケールメリットがあまり出せないこと、および圧縮機のサイズが制約となってくる。そこで、より大規模な改質に適した酸素吹き Auto Thermal Reformer (ATR) を採用することでサイズの制約を取り除き、スケールメリットも出せるようにした大型化検討を実施した。ブロックフローを図 2 6 に示す。

アンモニア生産量は Single Train として可能な 7,000 ton/day と設定した。ATR 採用のもう一つのメリットは、プロセスから回収できる CO₂ の割合が大きいことであり、CO₂ 回収も含めたエネルギー原単位の向上も見込める。そのため、CO₂ の回収はプロセスからの CO₂ のみとし、その他の設定は 3,300ton/day と同様とした。さらに、コスト試算をおこなった結果、3,300ton/day と比較して、以下のことがわかった。

- ・生産量あたりのプラントコストは約 25%低減
- ・CO₂回収率は 10%程度低下（排ガスからの CO₂回収なし）
- ・エネルギー原単位は 10%程度向上

以上のことから、ATR を採用して大型化することでさらなるアンモニア製造コスト低減が可能なことが示唆された。

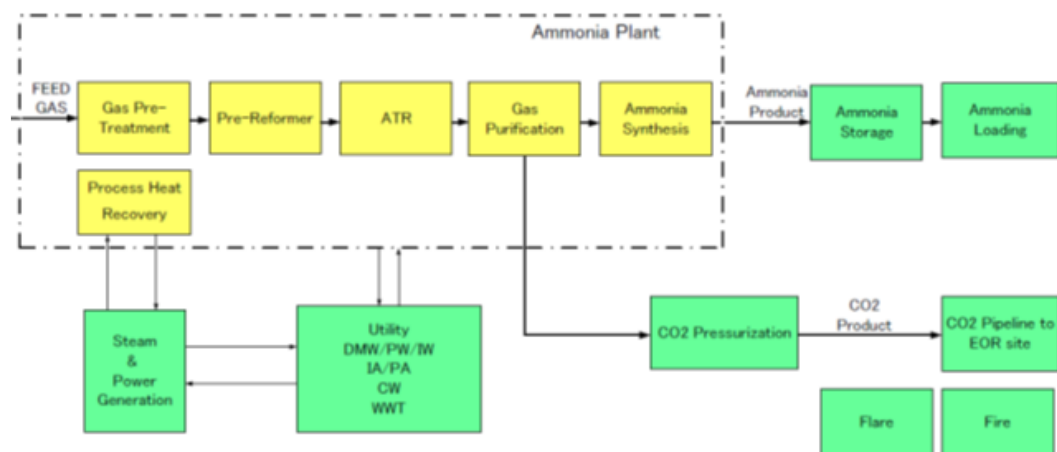


図 2 6 大型化アンモニアプラントのブロックフロー

3-7. アンモニアの製造・輸送・貯蔵に関する規制調査と社会受容性検討

(1) 目的

エネルギーキャリアとしてのアンモニアを将来、燃料用途として国内に導入する場合、現状の国内アンモニア流通量をはるかに上回る規模のアンモニア供給のインフラ整備が必要となる。その場合、現行のアンモニアに関わる法規制・ガイドラインではその整備にコスト面・運用面で影響を及ぼす可能性もあり、大量のアンモニア導入に向けた法整備が今後、重要な課題となる。

本検討では、予備調査として SIP「エネルギーキャリア」の中で行っていた国内法規制調査の共有、および国内アンモニア利用事業者へのヒアリングを行い、コスト面、運用面で影響が大きいと思われる項目の抽出を行い、抽出項目を中心に海外でのアンモニアに関する法規制・ガイドラインの調査を実施した。そのうえで国内法規制との比較を行い、相違点の抽出、およびその抽出結果を踏まえての考察を行った。

また、エネルギーキャリアとしてのアンモニアを国内火力発電の燃料として社会実装する場合、アンモニアの持つ優位性、物性、安全対策等の観点でアンモニアの認知度を高め、社会としてアンモニアの導入意義を効果的に伝えて社会受容性を高めていくことは、早期導入に向けて重要な課題である。本検討では、アンモニアの物性、燃料用途としての認知度調査、アンモニア物性等のリスク認知に関する検討、および他の技術開発での社会受容性の観点での取り組みから見えてくる課題等を基に、社会受容性を効果的に高めるコミュニケーション戦略、および訴求シナリオの策定を行った。

(2) アンモニアの製造・輸送・貯蔵に関する規制調査

① 実施内容・調査所掌

アンモニアの受入、貯蔵、および気化設備を対象に、対象国の法令の規定内容を整理した。

対象国：米国、ドイツ、フランス

対象法令：国内の下記法令に相当する法令の調査。下線法規制を重点的に調査する。

電気事業法、高圧ガス保安法、労働安全基準法、毒物及び劇物取締法、港則法

本調査は大阪ガス株式会社と日揮の2社で行った。各社の調査所掌を表18に示す。国内法整備調査の把握・分析をまず両者で行った。日揮は、海外現地調査・文献調査を担当した。大阪ガスは、その調査結果を用いた国内との比較・検討を担当した。

表 1 8 各社調査所掌概要

項目	調査内容	担当
国内法整備調査の把握・分析 (予備調査)	国内揚地～発電所までの範囲で、既存の国内法整備調査内容を共有、および経済性・運用面での影響が大きいと思われる項目を抽出する。海外調査にあたり、確認すべきポイントを整理する。	大阪ガス 日揮
国内アンモニア関連事業者 ヒアリング	アンモニア製造もしくは利用している国内事業者へ法規制面でのヒアリングを実施。	大阪ガス
海外法規制調査 (現地調査・文献調査)	米国現地調査、および米国・独・仏3か国の文献調査を実施。 海外アンモニア/尿素メーカーおよびアンモニアを大量に扱う事業者を対象に現地ヒアリングを実施。	日揮
海外調査結果との比較・考察	海外調査結果を基に、国内との比較・相違点の抽出を行い、需要側での利便性から緩和が必要と思われる箇所を指摘・考察内容をまとめる。	大阪ガス

② 海外法規制調査

事前検討として行った、国内法整備調査の把握・分析を通して、海外法規制調査で特に確認すべきと判断した重点項目を表 1 9 に記す。

表 1 9 国内法整備調査を踏まえての重点確認項目一覧

確認項目
防液堤/液化アンモニア貯蔵タンク種類
ガスの漏洩・廃棄に係る除害対応
アンモニアを含む排水処理（緊急時対応）
タンク定期点検
SCC (Stress Corrosion Cracking : 応力腐食割れ) 対策
保安物件までの距離/保安区画

(a) 米国現地調査・文献調査

米国現地調査を 2018 年 8 月上旬に実施し、アンモニアの取り扱いに関する安全教育機関、アンモニアを冷媒とした冷凍設備を保有する事業者、およびアンモニアメーカーを訪問した。また、米

国法規制の文献調査も実施した。

米国現地調査・文献調査概要を表 20 にまとめた。各項目で、国内法規制内容との違いがみられた点を赤字で記載している。特に、貯蔵タンク構造・防液提の考え方では、国内がタンク二重殻構造に防液提を設ける、「三重」の防液策を講じているのに対して、米国では二重殻構造タンクのみ、もしくは一重殻構造タンク＋防液提という「二重」の防液策としている点、また SCC 発生抑制のために、米国運輸省にて国内流通するアンモニアの仕様として所定濃度での水添加を「連邦法」として規定している点、最近の貯蔵タンクでは、開放点検を行うことによる酸素混入が起因の SCC 発生リスクを避け、開放点検を行わない方針とする事業者もいる、といった点が主な特筆すべき内容であった。

(b) ドイツ、フランス 法規制文献調査

EU では EU による法規と各国独自の法規制があり、各国によってその対応が異なる。

ドイツ、フランス両国の法規制、およびガイドラインとしてアンモニアの主用途の一つである、肥料分野の業界ガイドライン“Fertilizer Europe”に関する文献調査結果概要を表 21 にまとめた。特徴的であったのは、EU では RBI (Risk Based Inspection) と呼ばれる検査方法を決めていく手法の導入が進められている。これは、事業者が「Probability of Failure」および「Consequence of Failure」と呼ばれるそれぞれの評価シートに記載されている各項目に事業者がポイントを付けて評価し、双方のポイントをマトリックスにあてはめ、そこに該当するレベルに応じて点検方法を決めていくというやり方である。タンク構造・防液提の考え方、SCC 発生抑制の考え方は米国の調査結果とほぼ似た内容であった。

表 2 0 米国現地調査・文献調査結果

項目	米国
アンモニアに関する法体系	連邦法が上位法律として存在するが、最終的に各州法を遵守する必要あり。 州法は連邦法に基づく様々な解釈がなされ、連邦法より厳しい基準、推奨。 連邦法で、P S M、R M P、R A G A G E P に従う規定あり。 Best Design Practiceを参照する推奨あり。 ⇒業界方針や組織団体に従い設計。
貯槽タンク構造/防液堤	タンク設計：連邦法で規定なし。 防液堤：連邦法で防液手段を講じる要求あり。 二重殻の場合、外タンクがSecondary Containmentの役割を果たす為、 防液堤不要。
ガス漏洩/廃棄に係る除害対応	連邦法で設置義務は無く、自社基準で設置。 フレア燃焼による除害を行うケースが多数。 フレア対処ができない緊急時は大気放出+水カーテンでアンモニア吸収対応 を行う事業者もある。 漏洩時の報告義務は州によって考え方が異なる。
タンク定期点検	法律義務はなく、API基準に従い、自社で点検実施期間を決定する。 近年、開放点検実施時の空気混入によるSCC発生リスクが高まる懸念から、 建設後は開放点検は行わない事業者もある。
SCC対策	SCCを防ぐ目的として、LNH ₃ への0.2-0.5%の水分含有及び濃度管理が 米国運輸省により規定されている。
発電所境界線距離 保安区画	境界線距離：同法によりタンク壁面-工場境界線まで90m以上。 ⇒貯槽量に限らず一律規定。 保安区画：法律上規定がなく、保安区画という概念が無い。

表 2 1 ドイツ・フランス文献調査結果

項目	ドイツ	フランス
	EUガイドライン	(Fertilizer)
アンモニアに関する法体系	EU法規を基にアップデートした内容を国法として規定している。	フランスの法律はEU法規をそのまま適用している。
貯槽タンク構造/防液堤	規定なし。 ・タンク種としては、漏れリスクの少ない常圧低温（-33℃）を推奨。PC式タンクの適用実績あり。 ・米国と同様のSecondary Containment思想に基づき、貯槽量を担保できる大きさと防液手段を講じれば防液堤は不要と考えられる。 ・タンク設置方法は、LNH ₃ 冷熱によるグラウンドの凍結防止を防ぐ為に高床式or接地+ヒーターの2方法を推奨。	規定なし。
ガス漏洩/廃棄に係る除害対応	除害設備に関する規定はなし。 但し、国の定める排出基準を満たすようにフレアでの適切な燃焼と未燃ガスの安全弁による拡散の設計計算を行うことが要求されている。 ・除害対応として水吸着法が推奨されており、蒸気雲発生を防ぐ為にミスト噴射によるスプレー式を推奨。	規定なし。
アンモニア排水処理	規定なし。 特になし。	規定なし。
タンク定期点検	規定なし。 ・従来は、EN473（欧州統一規格）に基づいて内部検査を実施。磁粉探傷検査が主流。 ・近年ではタンクの開放検査は熱応力と酸素の侵入要因となる為、RBIプロセスに基づいたタンク検査プログラムを決定する事を推奨としている。	規定なし。
SCC対策	規定なし。 SCCを防ぐためにLNH ₃ に水を0.2%含有するorステンレス鋼を使用する事を推奨している	規定なし。
発電所境界線距離 保安区画	国内法律では規定なし。 Seveso IIIでは、『保安物件と適切な距離を取る必要がある』との記載のみ。 具体的な距離に関する基準は無い。 特になし。	

(3) アンモニアの社会受容性に関する検討

① 調査内容

大きく分けて下記の調査・検討を実施した。図27に本調査フローをまとめる

a) アンモニア利用技術の特性整理

アンモニアの化学的特性・リスクに関する情報整理を行った。また、アンモニアを燃料として社会実装する意義、必要性に関する項目の整理を行った。以上の項目整理を踏まえ、現在のアンモニアの公衆への認知レベルを推定した。さらに一般向けアンモニア認知調査（アンケート）を実施し、認知レベルの確認、および認知向上への効果的な情報提供手法を検討した。

b) 他事例の分析

発電用燃料用途としてのアンモニアと同様に、近い将来で社会導入が求められる他の科学技術開発での社会受容性状況を調査する。社会受容性の観点で重要となる要素、向上へのプロモーションにあたって阻害となる課題点などを抽出した。

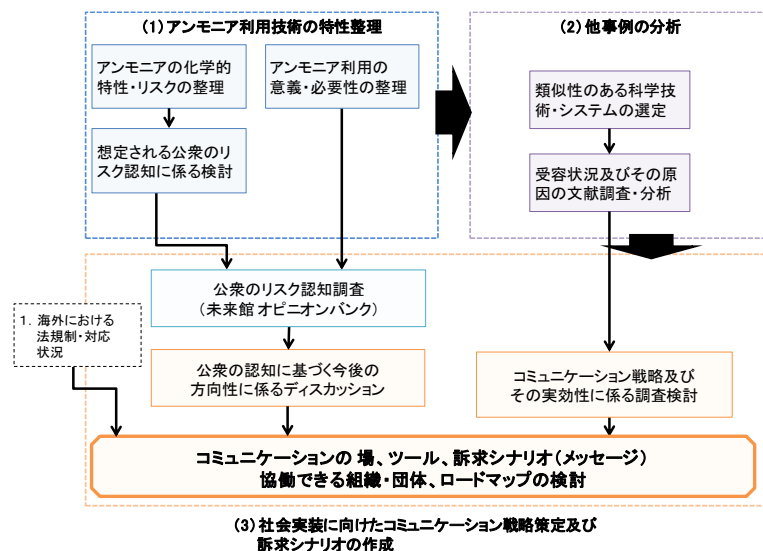


図27 社会受容性 調査・検討フロー

① アンモニア利用技術の特性整理

文献調査、および関係先ヒアリングを通して、アンモニアの刺激臭以外のリスクに対する公衆の認知は総じて低い状況と考えられる。主なポイントを以下に示す。

✓ アンモニアの特性に対する低い認知度

アンモニアの刺激臭については、公衆の認知度は比較的高いものの、腐食性・毒性、および可燃性については、総じて認知度が低いと想定される。

✓ 他物質と混同して安全性に対する懸念が増長される可能性

硝酸アンモニウムや硫酸アンモニウム等、アンモニアとは別の物質のリスク情報が、アンモニアと混同されてマスメディア等により拡散し、本来の物性とは異なる誤った認識が広まる恐れも想定される。

- ✓ アンモニア実物を用いたコミュニケーションの機会が稀

刺激臭を有する特性上、科学館等での実験材料としてアンモニアを導入することが難しい。また学校の教育課程で理科実験の実施数も少なくなっている。

以上を踏まえると、アンモニアはネガティブにとらえられる可能性のある特性（におい、毒性など）を有し、それが他の物質と混同されるおそれもあるため、より積極的に早期の情報提供を展開していく必要があると考えられる。一方で、アンモニア単体を対象としたコミュニケーション活動は難しいと考えられるため、「エネルギーセキュリティ」や「地球温暖化問題」といったより大きな枠組みの一部としてアンモニアの導入意義を公衆へ伝えていくやり方が望ましい。

上記を踏まえて、公衆のアンモニア認知調査として、日本科学未来館のアンケート用端末機「Opinion Bank」を用いて、来場者を対象としたアンケートを実施した。アンケートでは、アンモニアに関するいくつかの情報を提示することによりアンモニア燃料利用に対する意向がどう変化するのか、その効果測定を行った。

アンモニア燃料利用に対する意向に対して法令・規制情報の提供はネガティブに作用し、アンモニアの利用に関する情報の提供はポジティブに作用する傾向を確認した。さらに、アンモニア燃料利用に関する情報提供の前後でCO₂排出削減策に関する意向を調査したところ、情報提供後にCO₂を排出しない新たな燃料導入に前向きな回答が増加したことも確認できた。これらのことから、情報提供内容および方法の工夫により、アンモニア燃料利用に対する関心および期待を効果的に高めることができると考えられた。

② 他事例の分析

社会受容性を考える上で参考になる他事例として、ゲノム編集技術に関する社会受容性およびその向上に向けた取り組みを調査した。ゲノム編集をリファレンスとした理由としては、アンモニアと同様に、技術的に確立されつつあり社会実装に近い段階の科学技術であること、先行技術開発である「遺伝子組み換え技術」が社会で広く受容されているとは言えない状況を踏まえて取り組みを行っていることより、訴求シナリオ策定に有益となると判断したためである。また、ゲノム編集技術に関する調査の他に、科学技術の普及に向けたコミュニケーション活動を専門に行っている企業の担当者に対するヒアリングも併せて実施し、効果的なアプローチ方法についても調査を行った。

以下、得られた知見のポイントをまとめる。

- ✓ 都合の悪い情報も含め、まず事実を知ってもらう姿勢が信用構築に不可欠。情報だけではなく、実物を見せることも効果的
- ✓ 慎重な態度を示す人々とも関係構築を目指す姿勢を示す
- ✓ 早期にコミュニケーション活動を始めることの重要性（技術開発の初期段階からコミュニケーション活動が始めることが重要）

③ 社会実装に向けたコミュニケーション戦略策定および訴求シナリオの作成

(a) コミュニケーション戦略策定

発電用燃料としてのアンモニア早期導入に向けて、理解活動を含むコミュニケーション理論をベースに、既に社会に存在するリソースをうまく活用して、短期間で計画的かつ効率的にコミュニケーション活動を推進することが重要となる。以下、大きなポイントとして2つ示す。

- コミュニケーション対象に合わせた目標設定およびそのコミュニケーション活動

まず、公衆に対するコミュニケーション活動を行い、アンモニアの燃料利用が広く認知されている状態を形成する。その後にアンモニア混焼設備設置地域におけるコミュニケーション活動を開始できるよう、同地域におけるステークホルダー分析を実施し、調査結果に基づくコミュニケーション計画を作成する。

- 専門人材の知見を踏まえて洗い出したツール、専門的な知見を有する人材の準備

基本的なコミュニケーションツールの作成が喫緊の実施事項である。公衆が見たくなる、アクセスのしやすい、わかりやすい、といった情報が、公衆向け広報・PRの土台となるツールに特に求められる要素といえる。

さらに、既にコミュニケーションの場・機会・能力を有する組織・人材等との協働も必要と考える。これにより、科学技術コミュニケーションの専門家等の視点も取り入れられ、効果的なツール作成およびイベント実施が可能となると同時に、その相手側にとっても新たな科学技術を知る良い機会ともなり、Win-Winな関係構築もできると考える。

(b) 訴求シナリオ策定

コミュニケーション対象として、「公衆向け」、「アンモニア混焼発電設備設置地域」および「アンモニア慎重派」それぞれに対する訴求シナリオ検討を行った。

「公衆向け」では、アンモニアの燃料利用に係る基本的情報に対して、コミュニケーション対象に共感してもらえるメッセージを付加することが重要である。「事実」「解釈」を的確に述べて、それに対する「評価・判断」は相手に任せる、という手法をとることが有効と考えられる。

一方、「アンモニア混焼設備設置地域」に対しては、事業主体や実際の安全確保の仕組みに係る情報を補足メッセージとして提示する。また、「アンモニア慎重派」に対しては、関係構築を目指す姿勢を示し、他技術を否定するものではないこと、および「社会で決める」ことの重要性を示す。

④ 今後のコミュニケーション活動のイメージ

2017年末に経済産業省が発行した「水素基本戦略」において、アンモニアを用いた大規模発電が2025年頃に導入開始と明記されている。これまでの調査・検討で得られた知見を基に2025年頃の商業発電開始までに求められるコミュニケーション活動のイメージの一例を図28にまとめた。

前述のとおり、現状のアンモニアの刺激臭以外の公衆認知度は低く、誤解に基づくネガティブイメージの形成を避けるため、積極的に早期の情報提供を行うことが効果的といえる。例えば図28に示した「基本広報ツール」を早急に整備し、それを活用した公衆向け広報・PRを進めていくことが求められる。

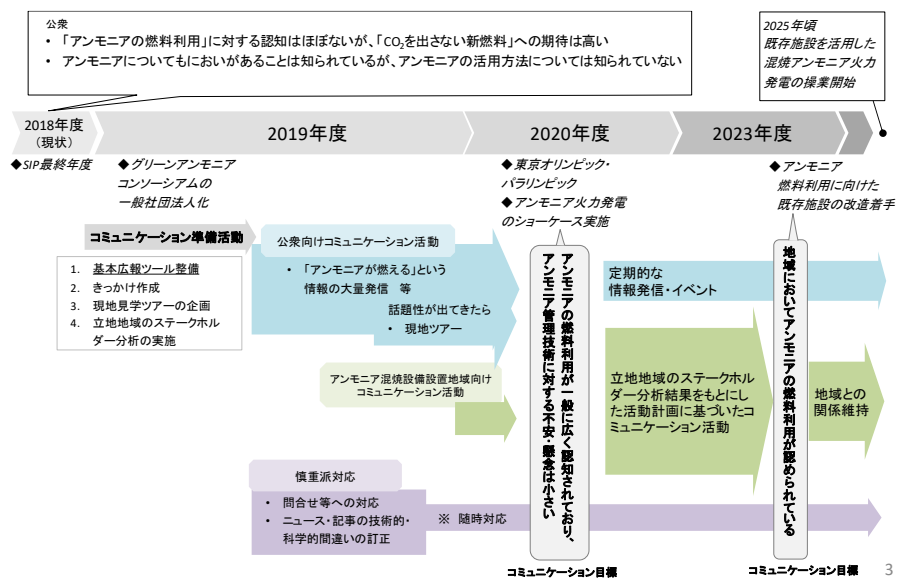


図 2 8 大規模商業発電開始（2025 年を想定）までのコミュニケーション活動イメージ例

3-9. まとめ

本研究の研究成果を下記にまとめて示す。

- エネルギーキャリアとしてのアンモニア製造技術として、再生可能エネルギーからの CO₂ フリーアンモニア合成プロセスの開発を行った。合成プロセスに必要とされる要件を整理し、開発するアンモニア合成触媒の使用条件、目標値を設定した。さらに、低温・低圧でのアンモニア合成プロセスの優位性の検討を行い、消費エネルギーおよびプラントコストの面で優位性を有することを確認した。一方で、Ru 触媒のコスト低減が課題であることも明らかとなった。
- 本研究で開発したアンモニア合成触媒の実証試験装置を設計し、産総研福島再生可能エネルギー研究所に建設した。この実証試験装置について、開発した 2 種類の触媒の性能評価試験を実施し、開発した触媒が目標とする性能を有することを確認した。また、アンモニア製造の負荷変動試験を実施し、問題なくアンモニア製造量を変動させることができることを確認した。一連の試験で、商業装置の反応器設計に必要なエンジニアリングデータを取得し、反応器シミュレーションを構築した。
- この実証試験装置を用いて、CO₂ フリーアンモニアのバリューチェーンを模擬的に実証する試験を実施した。太陽光発電の電力で水電解を行って CO₂ フリー水素を製造し、これを原料として実証試験装置で CO₂ フリーアンモニアを製造した。電解水素を原料としても安定にアンモニアを合成できることを確認した。さらに、製造した CO₂ フリーアンモニアをアンモニアガスタービン燃料として提供し、安定して燃焼でき 47kW の発電にも成功した。このようなバリューチェーン全体の実証は世界初である。
- 天然ガスから CO₂ フリーアンモニアを製造する改質プロセスとして AATG プロセスに関し、既存プロセスでの CO₂ 削減時の効率、CAPEX, OPEX を検討した。この結果を基に、大阪ガスにて AATG ケースの結果と比較してとりまとめた。
- 発電燃料としてのアンモニア製造価格、および最終的な発電単価を推算する実用化調査を行った。まず、水素発電の導入初期を想定し、天然ガス改質、太陽光、水力、蓄熱付き太陽熱の各ケースについて、アンモニアを製造するためのコストを算出した。さらに、将来的な技術改良を考慮した技術進展ケースでのアンモニア製造コストを検討した。
- 国内での再エネによる地産地消型アンモニア製造および利活用の実用化調査について、北海道における太陽光発電からの電力を用いた水電解による水素製造、アンモニア製造プロセスを検討した。コスト低減には、太陽光発電変動への対応がポイントであり、プロセス構成および運転方法による対応に関して最適化検討を行うことで、目標とするコストに近づくことができた。
- 短期的には CO₂ フリーアンモニアを安価に製造する方策として、天然ガスを原料として従来法でアンモニアを製造し、副生する CO₂ を回収して CCS あるいは EOR で隔離するケースにおける CO₂ フリーアンモニアの日本への供給価格の検討を行った。米国・カタール・サウジアラビアを候補地として、それぞれの場所で CO₂ フリーアンモニアを製造する場合の設備コストおよび運転コストを算出した。これを基に、他機関で日本へのアンモニア供給価格を算出し

た。

- エネルギーキャリアとしてのアンモニアの大量導入に向け、法規制面での将来的な対応の必要性について、エンジニアリングの観点から検討を行った。まず、コスト面、運用面で影響が大きいと思われる項目の抽出を行い、海外での法規制・ガイドラインの調査を実施した。この結果と国内法規制との比較より、今後検討を要する項目を抽出した。
- エネルギーキャリアとしてのアンモニアの社会実装に向けて、アンモニアに対する社会受容性を高めていくことが重要である。このため、アンモニアに関する認知度調査、リスク認知に関する検討、他の技術開発での社会受容性への取り組みを基に、社会受容性を効果的に高めるコミュニケーション戦略および訴求シナリオを策定した。

以上のように、本研究では、CO₂フリーアンモニアの製造から供給に関わる幅広いテーマに取り組んだ。本研究を通じて、短期的には天然ガスからのCO₂フリーアンモニア供給が現実的なコストで実現可能なことが確認できた。また、再生可能エネルギーを用いた低温・低圧でのアンモニア合成技術の開発を行い、実証試験を通じて商業化可能な技術であることが確認された。

さらに、社会実装の際に課題となる法規制や社会受容性についても検討を行い、今後取り組むべき方向性を明確にすることができた。

3-10. 今後の課題

研究課題毎に、今後の課題を下記に示す。

- 再生可能エネルギーからの CO₂ フリーアンモニア製造については、①商業化に向けたスケールアップ、②再エネ変動を考慮した統合実証の2つが課題となる。
①のスケールアップについては、数 ton～数 10ton/day 規模の商業実証 PJ を進める必要があり、これに適した案件の開拓が必要となる。本研究で検討した、北海道での地産地消型のアンモニア製造も将来的な候補の一つである。
- ②の統合実証については、再エネ発電を水電解・アンモニア製造に直接つなげることで、再エネ発電の変動に応じた全体の統合運転/変動運転の実証が考えられる。この実証は、産総研 FREA の設備を有効に利用する事がコスト・時間の観点でも効果的と考えられることから、この統合実証を進めてゆきたい。
- 2020 年代半ばの石炭火力でのアンモニア混焼導入に向けて、短期的には天然ガスからの CO₂ フリーアンモニア製造の実現が求められる。今年度検討した、米国・カタール・サウジアラビアの案件について、より具体的なフィージビリティスタディを進めるとともに、他の候補地についても検討を進める必要がある。これらの検討には、相手国との協議が必要となることから、METI をはじめとした各関連機関との協力が必要となる。
- アンモニアに関する国内法規制については、今後の社会実装を睨んでその優先順位を整理し、必要に応じて規制緩和などを規制官庁に働きかけていく必要がある。また、社会受容性の面では、アンモニアに関する一般公衆の認知の拡大が急務である。これらの取り組みにおいては、行動主体となる組織体を作り、そこが中心となって活動していく必要がある。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 0 件

<査読なし(総説等含む)> 3 件

- 甲斐・沖田(日揮)「CO₂フリーアンモニア合成技術開発」、配管技術、2018 年 7 月号
- 藤村(日揮)、「CO₂フリー水素利用アンモニア合成システム開発」、技術情報協会「水素の製造、輸送・貯蔵技術」
- 藤村(日揮)、「再生可能エネルギーからの新規アンモニア合成技術開発」、OHM、2018 年 12 月号

(2) 学会、展示会等発表

<招待講演> 国内 0 件、海外 0 件

<口頭発表> 国内 1 件、海外 3 件

- Y.Fujimura (JGC), et. al., "SIP Energy Carriers - Ammonia Synthesis Process from CO₂-Free Hydrogen", World Hydrogen Technology Conference(WHTC) 2017,
- 平岡一高(日揮)、ほか「CO₂フリーアンモニア混焼発電サプライチェーンのコスト評価」、エネルギー資源学会 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
- K.Hiraoka(JGC), et. al., "Cost Evaluation Study on CO₂-free Ammonia and Coal Co-fired Power Generation Integrated with Cost of CCS", NH3 Energy + (2018)
- M.Kai(JGC), et. al., "Small scale ammonia plant design and applications", NH3 Energy + (2018)

<ポスター発表> 国内 0 件、海外 0 件

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内 4 件、海外 0 件

- 藤村(日揮)、「アンモニアを中心としたエネルギーキャリアの開発動向」、化学工学会中国四国支部 2014 年度セミナー (2014 年 11 月)
- 藤村(日揮)、「アンモニアによるエネルギーキャリアの開発動向」、日本機械学会関西支部 第 340 回講習会 (2015 年 11 月)
- 藤村(日揮)、「水素キャリアとしてのアンモニアサプライチェーン技術開発」、東京ガスコンビナートセミナー2018 (2018 年 8 月)
- 藤村(日揮)、「CO₂フリー水素利用アンモニア合成システム開発の進捗と CO₂フリーアンモニアサプライチェーンの将来像」、日本計画研究所 JPI 特別セミナー (2018 年 11 月)

(3) プレス発表

- 2018/05/28 日揮プレスリリース「アンモニア合成実証試験装置が完成・運転を開始」
新規アンモニア合成触媒を用いたアンモニア合成プロセスの実証試験装置が産総研 FREA に完成し、運転を開始したことを発表。

- 2018/10/19 日揮プレスリリース「再生可能エネルギー由来の水素を用いたアンモニア合成と発電に世界で初めて成功」

再生可能エネルギーによる水の電気分解で製造した水素を原料とするアンモニアの合成、および合成したアンモニアを燃料としたガスタービンによる発電に世界で初めて成功したことを発表

(4) マスメディア等取材による公表

- 化学工業日報、2016年10月18日「日揮 CO₂出さずアンモニア 福島で合成法実証」
- 化学工業日報、2018年5月28日「アンモニア低温低圧プロセス 日揮、新触媒で実証開始」
- 日経産業新聞、2018年10月19日「日揮、発電システム開発」
- 電気新聞、2018年10月22日「日揮など 水素製造・発電を一貫」
- Nitrogen+Syngas 誌、“Small scale ammonia plant design and applications”, July - August 2018
- 化学工業日報、2018年10月22日「再エネ由来水素でアンモニア 日揮・産総研が発電成功」
- 日刊工業新聞、2018年10月25日「アンモニア燃料で発電 日揮と産総研」
- 電気新聞、2018年12月19日「再エネ使用で低価格化へ -日揮発電用アンモニア製造」

5. 特許出願実績 なし

6. 参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合研究機構（委託先）一般財団法人 エネルギー総合工学研究所；水素利用等先導研究開発事業 エネルギーキャリアシステム調査・研究エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析，平成 26 年度～平成 27 年度成果報告書，（2016）
- 2) Organization for Economic Co-operation and Development (OECD); Projected Costs of Generating Electricity, (2010)
- 3) 日本エネルギー経済研究所；アジア/世界エネルギーアウトLOOK 2016
- 4) 新エネルギー・産業技術総合研究機構；TSC Foresight Vol. 11 太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて，（2016）
- 5) The National Renewable Energy Laboratory (NREL); Advancing Concentrating Solar Power Technology, Performance and Dispatchability, (2016)
- 6) 新エネルギー・産業技術総合研究機構；再生可能エネルギー技術白書 第 2 版 (2013)
- 7) 地球環境産業技術研究機構(RITE)；二酸化炭素地中貯留技術研究開発，2005 年度経済産業省補助事業成果報告書 （2006）
- 8) 牧野功； 3. アンモニア・尿素製造技術の概要と進化①， 化学工学， 第 81 巻, 第 4 号，（2017）
- 9) The International Renewable Energy Agency(IRENA); Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Hydropower, (2012)
- 10) 新エネルギー・産業技術総合研究機構；水素利用等先導研究開発事業 平成 29 年度成果報告会 報告資料 (2017)
- 11) 経済産業省 水素・燃料電池戦略協議会 CO₂ フリー水素ワーキンググループ；CO₂ フリー水素ワーキンググループ報告書 （2017）