

従来のアンモニアおよび ブルーアンモニア、グリーンアンモニア

神山 慶太・廣瀬 聡

1. はじめに

アンモニアは、炭素原子を含まず燃焼時に二酸化炭素を排出しないため、製造時に二酸化炭素排出を低減することで、ライフサイクルにおける二酸化炭素排出を抑制できる。そのため近年では、脱炭素燃料としてのアンモニアが注目されている。また、アンモニアは水素原子を含むため、水素エネルギーキャリアとしても有力な候補に挙げられている。更に、既存インフラによる大量輸送が可能なことから、脱炭素社会の早期実現に貢献できると考えられている。弊社は、過去50年間で蓄積してきたアンモニアプロセスのプラントエンジニアリング経験を駆使し、脱炭素燃料としてのアンモニアの普及拡大、社会実装に貢献していきたいと考えている。

本稿では、アンモニアのマーケットの現状と動向について解説し、次に、従来のアンモニア製造プロセスとして、各ライセンス技術の特色を紹介する。最後に、新しいアンモニアとして、ブルー／グリーンアンモニアの概要と課題、アンモニア合成、利用に関する新技術の開発動向について述べる。

2. アンモニアマーケットの現状と動向

アンモニアは基幹化学品の一つであり、世界のアンモニア生産量は2019年で約2億トンである。現在、アンモニアの大部分は肥料用途で消費されており、一部が工業用アンモニアとして利用されている。工業用アンモニアの主な用

途は、カプロラクタム、アクリロニトリルなどの有機窒素化学品、尿素ならびに硝酸である。世界のアンモニアの貿易量は、生産量の約1割である2,000万トンである¹⁾。

これに加えて今後は、脱炭素燃料や水素キャリアなど、新たなアンモニア需要が大きく伸びると予想されている。

例えば日本政府は、2030年時点で年間300万トン、2050年には年間3,000万トンの燃料アンモニアバリューチェーンを構築することを目標に掲げている¹⁾。

また、世界のエネルギー需要増の7割はアジア太平洋地域で発生し、同地域では、2040年でも電源構成の4割である1,820 GWを石炭火力が占めると考えられている。仮にこの電力の1割がアンモニア燃焼により供給されると考えた場合、年間2.5億トンの発電用燃料アンモニアの需要が創出されると考えられる²⁾。

更に、水素よりもエネルギー密度が高いアンモニアは、船舶用脱炭素燃料として大きな期待が寄せられている。船舶用燃料アンモニアの需要は2030年から徐々に増え始め、2070年に年間約2億5,000万トンへと拡大すると考えられている³⁾。

アンモニアは海上輸送、陸上輸送および貯蔵といったインフラが既に商業的に稼働しており、取り扱い技術も既に確立している。従って、脱炭素燃料としてのアンモニアも、既存インフラを活用した大量輸送が比較的容易に可能であることから、他の脱炭素燃料と比較して高い優位性がある。

3. アンモニア製造プロセス

アンモニア製造プロセスは、BASF社が1910年代に商業



Conventional Ammonia, Blue Ammonia and Green Ammonia
Keita KAMIYAMA
2008年 東北大学理学部生命科学研究所修了
現在 東洋エンジニアリング(株)次世代技術開拓部 リサーチエンジニア
連絡先: 〒275-0024 千葉県習志野市茜浜 2-8-1
E-mail keita.kamiyama@toyo-eng.com

2022年7月27日受理



Satoru HIROSE
1991年 東北大学工学研究科材料化学修了
現在 東洋エンジニアリング(株)次世代技術開拓部 リサーチエンジニア
連絡先: 〒275-0024 千葉県習志野市茜浜 2-8-1
E-mail satoru.hirose@toyo-eng.com

化して以降、鉄系合成触媒を使用したハーバー・ボッシュ法を起点として、世界的な肥料需要の伸びと共に改良、開発が進められてきた。1世紀以上の歴史の中で、エネルギー効率の改善、製造コストの低減が図られたことで、現在では非常に成熟したプロセスとなっている。本項では、アンモニア製造プロセスについて、ライセンサー各社の保有技術の特色を紹介する。

3.1 KBR社

KBR社は、合成ガス精製に深冷分離によるガス精製装置(Purifier)を組み込んだプロセス(Purifier™プロセス)を標準プロセスとする。Purifier™のプロセスフローを図1に示す。

Purifier™プロセスの特徴は、合成ガス製造セクションで不純物(メタン、アルゴン等)を除去し、窒素過剰でPurifierに供給される合成ガスをアンモニア合成に最適な水素/窒素比3:1に調整することが可能な点にある。これにより、従来法より高純度の合成ガスをアンモニア合成ループに供給できる。また原料組成、特に原料の窒素分に対して水素/窒素比が調整可能なことから、条件に合わせたフレキシブルな設計が可能となる。

PurifierPlus™プロセスは、KRES™と呼ばれるKBR社の保有する水蒸気改質技術をPurifier™プロセスに組み込んでいる。KRES™は、自己熱改質型反応器(ATR)と熱交換器型水蒸気改質反応器(リフォーミングエクスチェンジャー)をコンパクトに組み合わせた技術であり、比較的高価とされる

水蒸気改質炉の小型化を実現している。

KBR社は更に、Purifier™プロセスに同社保有技術である熱交換器型水蒸気改質反応器(Kellogg Reforming Exchanger System, KRES™)をオプションとして組み込んだプロセス(PurifierPlus™プロセス)を提供している。

3.2 thyssenkrupp社

thyssenkrupp(ティッセンクルップ)社は、同社保有技術であるダウンファイアリング型の水蒸気改質炉(Uhde Steam Reformer)を採用し、アンモニア合成工程には、中圧(11 MPa)のOne-through ammonia converterと、高圧(20 MPa)の2基のアンモニア合成管を合成ループに組み込んだUhde dual-pressure processを提供している。

3.3 Topsoe A/S社

Topsoe A/S社は、同社保有技術であるサイドファイアリング型の水蒸気改質炉を採用した技術を従来技術として提供している。更に近年では、断熱予備改質器(Pre-reformer)に加えて、同社保有技術である低スチーム/カーボン比(S/C = 0.6)を実現した自己熱改質器(Auto Thermal Reformer, ATR)を採用したSynCOR Ammonia™プロセスを提案している⁴⁾。

SynCOR Ammonia™プロセスでは、比較的高価とされる水蒸気改質炉を加熱炉+断熱予備改質器+ATRに置き換えることが可能になる。一方で、ATRに供給する酸素と、アンモニアの原料となる窒素を供給するために大型の空気分離器を別途必要とする。

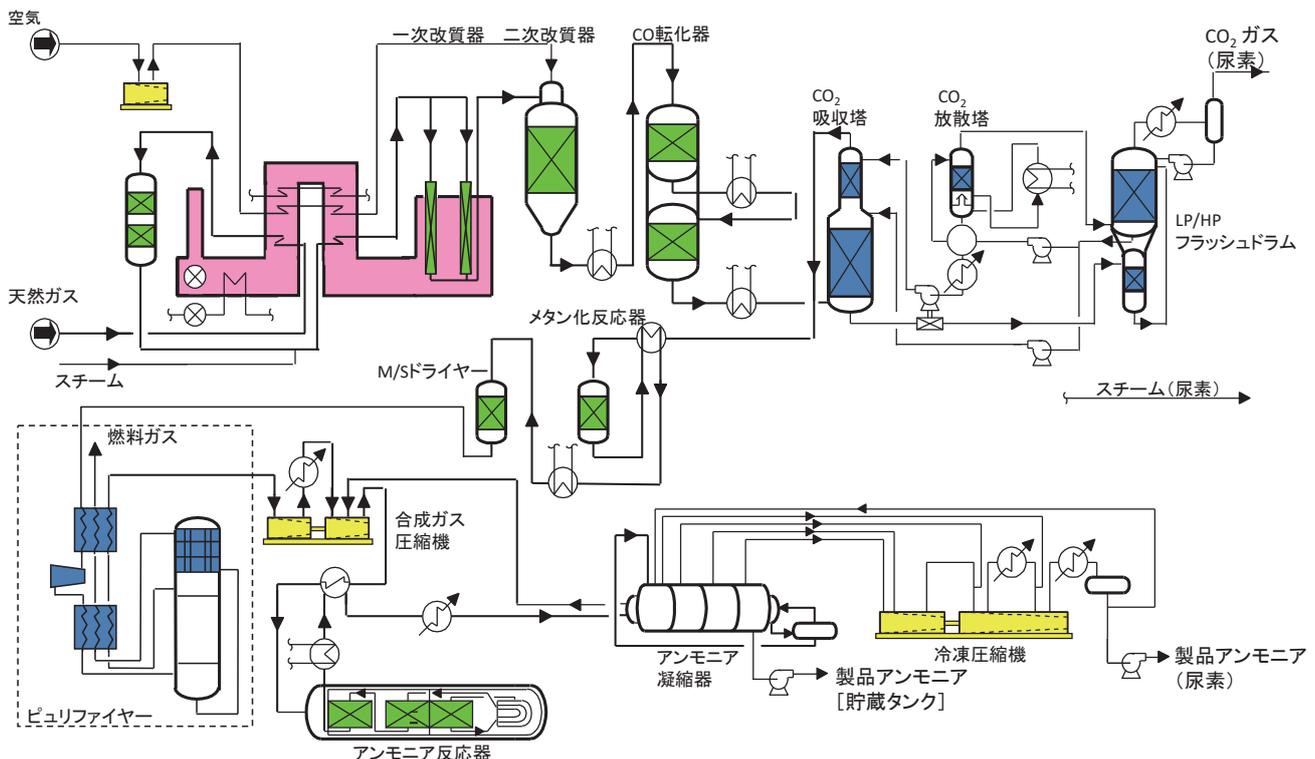


図1 KBR社 Purifier™プロセスフロー図⁵⁾

4. ブルー／グリーンアンモニア

脱炭素燃料や水素キャリアとしてのアンモニアは、ライフサイクルにおける二酸化炭素排出を抑制するため、製造プロセスにおいて二酸化炭素の排出を抑制した「低炭素アンモニア」であることが不可欠である。本節では、代表的な低炭素アンモニアであるブルーアンモニアおよびグリーンアンモニアについて述べる。

4.1 二酸化炭素排出量と推定製造コスト

ブルー／グリーンアンモニアの製造フローと二酸化炭素排出量、および推定製造コストを図2に示す。

ブルーアンモニアは化石資源を原料とするが、従来のアンモニア（グレーアンモニア）の水素製造工程で発生する二酸化炭素をCCS (Carbon Capture & Storage) やCCU (Carbon Capture & Utilization) によって排出を抑えた水素（ブルー水素）から製造する点異なる。二酸化炭素の回収手法によるが、グレーアンモニアの製造プロセスから直接排出される二酸化炭素排出量を100とすると、ブルーアンモニアの排出量は0～30に低減が可能である。

グリーンアンモニアは、風力や太陽光などの再生可能エネルギーを利用し、水電解により製造される水素（グリーン水素）と、空気から分離した窒素を反応させて製造する。そのため、製造プロセスから直接排出される二酸化炭素排出量は0である。

製造コストについて、ブルーアンモニアは基本的に従来のアンモニア製造プロセスにCCSやCCUを追加することで製造できる。グレーアンモニアの製造コストを100とすると、ブルーアンモニアは120～130程度と推定される。

一方でグリーンアンモニアは、再生可能エネルギーの変動対応、安価で高効率な水電解技術の開発といった技術的課題が現時点では解決していない。そのため、グレーアン

モニアの製造コストを100とすると、グリーンアンモニアの製造コストは300～400と推定されている。

4.2 ブルー：プロセス大型化への取り組み

前述の通り、ブルーアンモニアの製造プロセスは従来のアンモニア製造プロセスと変わらない。そのため、プロセスの大型化により、更なる製造コストの低減が期待できる。

前述のライセンサー3社は、燃料用アンモニアの大規模バリューチェーン確立を見据え、現状の最大規模である1系列3,300トン／日級のアンモニアプラントを、1系列日産6,000トン／日級まで大型化する取り組みを提唱している。

例えばKBR社は、豊富な実績を持ち信頼性の高いPurifier™プロセスを1系列のまま6,000トン／日まで延長したAmmonia 6000™プロセスを提案している⁶⁾。またTopsoe A/S社も、同社のSynCOR Ammonia™プロセスにより、1系列にて6,000トン／日以上規模を設計可能としている⁴⁾。

4.3 グリーン：プロセスの最適化とターンダウン運転

グリーンアンモニアは、従来のアンモニア製造プロセスに追加して、水電解装置、水素貯蔵設備、水素圧縮機などの設備を考慮する必要がある。これらの設備はプラント全体の建設コストの大きな割合を占めるため、これらの設備構成の最適化が、グリーンアンモニアの製造コスト低減のための重要な課題となる。

更に、これらの設備追加を最小限に抑えるためには、再生可能エネルギーの変動を、極力アンモニアプラントのターンダウン運転で吸収することが望ましい。近年、前述のライセンサー3社は、プラントのターンダウン運転により変動を吸収する方法を提案している。3社は、10～20%ロードまで絞った低ロード運転を達成可能なターゲットとしている。

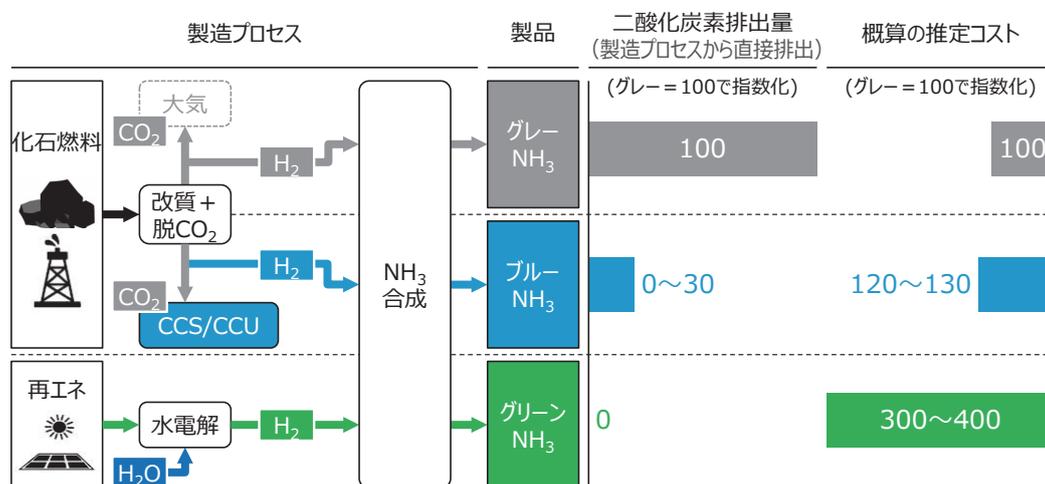


図2 ブルー／グリーンアンモニアの二酸化炭素排出量と推定製造コスト

5. アンモニアの新技术開発動向

アンモニアの合成、利用等に関する新技术の研究は、以下で紹介する例の通り、現在も活発に続けられている。

5.1 アンモニア合成に関する技術開発

NEDO「グリーンイノベーション基金事業」では、アンモニア製造コスト低減を目的に、アンモニア合成新触媒の開発とグリーンアンモニア電解合成技術開発が進められている。新触媒の開発は、製造コストの低減を実現できるアンモニア製造新触媒をコアとする国産技術を開発することを目的に、千代田化工建設(株)、東京電力ホールディングス(株)、(株)JERA(以下、JERA)が中心となり、3つの開発チームによる新触媒の競争開発を中心として、触媒開発と技術実証をおこなうことが計画されている。電解合成は、出光興産(株)らが中心となり、東京大学 西林教授が開発した触媒系を改良し、水と窒素を原料として電解反応を活用して常温常圧で製造する方法を確立する。また、多層カートリッジによりスケールアップデータを取り、実用化を検証する計画である⁷⁾。

5.2 石炭火力発電のアンモニア混焼実証

石炭火力発電にて、微粉炭とアンモニアを混焼する技術の実証が進められている。主な技術課題であったNO_x発生は、二段燃焼バーナを使用することで克服されつつある。

(株)JERAおよび(株)IHIは、NEDOの助成事業「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業」に参画している。世界で初めて、大型の商用石炭火力発電機において石炭とアンモニアの混焼による発電をおこなうことを目的としており、ボイラーの収熱特性や排ガス等の環境負荷特性を評価し、アンモニア混焼技術の確立を目指す。JERAの碧南火力発電所4号機(発電出力：100万kW)において、2024年度にアンモニア20%混焼を実施する計画である⁸⁾。

5.3 再エネ・アンモニア製造統合システムの実証

日揮ホールディングス(株)は、旭化成(株)と共同で、2021年度～2030年度のNEDO事業「グリーンイノベーション基金事業」に参画している。本事業において、アルカリ水電解とアンモニア製造プロセスの組み合わせ、再生可能

エネルギーの変動に対応して各設備の運転条件を最適化する統合制御システムの開発を実施している。また、福島水素エネルギー研究フィールド(FH2R)を第一候補地として、水電解装置とアンモニア製造プロセスの実証設備を計画中である⁹⁾。

6. おわりに

アンモニアは脱炭素燃料であり、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」重要分野にも挙げられており、社会実装に向けたロードマップも示されている。弊社を含め、国内外の企業によって、ブルー／グリーンアンモニアのサプライチェーン構築に向けた具体的な案件創出や技術開発が活発に進められている。

ブルー／グリーンアンモニアの開発においては、アンモニア製造プラントの大型化、水電解装置、水素貯蔵設備、水素圧縮機などを含めた全体プロセスの最適化、合成、利用になどでの新たな技術開発などが課題として挙げられている。弊社は、これらの課題に対する技術検討や関係各社との協力を通じて、ブルー／グリーンアンモニアの普及拡大、社会実装に貢献していきたいと考えている。その活動の一環として、弊社は日揮ホールディングス(株)と2022年4月に燃料アンモニアプラントのEPC事業に関するアライアンス契約を締結し、燃料アンモニア事業者に対してその構想段階からEPCに至るまで一体となって取り組むことを発表した。本アライアンスにより、燃料アンモニアの利用拡大を加速させ、脱炭素社会の実現を目指している。

引用文献

- 1) 経済産業省：燃料アンモニアサプライチェーンの構築, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/005_05_00.pdf
- 2) IEA: World Energy Outlook 2019, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf>
- 3) IEA: Energy Technology Perspective 2020, https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf
- 4) TOPSOE: SYNCOR AMMONIA™ - NEW PROCESS FOR GRASSROOTS PLANTS, <https://www.topsoe.com/our-resources/knowledge/our-products/process-licensing/syncor-ammoniatm-new-process-for-grassroots-plants?hsCtaTracking=36501b90-fdc0-424f-85da-b99c42c893d4%7Cac8b08e0-1bf7-41fb-9ea0-a4cbdd2e4221>
- 5) KBR Catalogue: Purifier™
- 6) KBR Catalogue: Single Stream 6000 MTPD Ammonia Plant (2018)
- 7) NEDO: ニュースリリース, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101502.html
- 8) (株)JERA: プレスリリース, https://www.jera.co.jp/information/20210524_677
- 9) NEDO: 2022WG 報告資料, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/009_05_00.pdf