

File No. 83 グリーンアンモニア、ブルーアンモニアとグレーアンモニア

アンモニア (Ammonia) は分子式が  $\text{NH}_3$  で表される窒素無機化合物の一つで、化学肥料をはじめ、化学工業では最も基礎的な窒素原料として窒素化合物の合成に広く使われている。

アンモニアはイギリスのジョゼフ・プリーストリー (Joseph Priestley) によって 1774 年に発見と確定された。その後、窒素と水素を原料とするアンモニアの人工合成方法を発明したのはドイツのフリッツ・ハーバー (Fritz Haber) であるが、工業化されたのはドイツ BASF 社の技術者カール・ボッシュ (Carl Bosch) である。そのためにアンモニアの工業合成法はハーバー・ボッシュ法と呼ばれる。

アンモニアは窒素と水素を原料として合成されたものである。空気の約 70% は窒素で、その空気を  $-196^\circ\text{C}$  に冷却し、窒素を液体化して分離することで簡単に得られる。しかし、自然界に単体の水素が存在していないため、水素を得るには水の電気分解のほか、天然ガスの改質化や石炭のガス化などがある。その水素の由来と発生した二酸化炭素の処理により、アンモニアはグリーンアンモニア、ブルーアンモニア、グレーアンモニアに大別される (図 1)。以下はこの 3 種類アンモニアについて解説する。

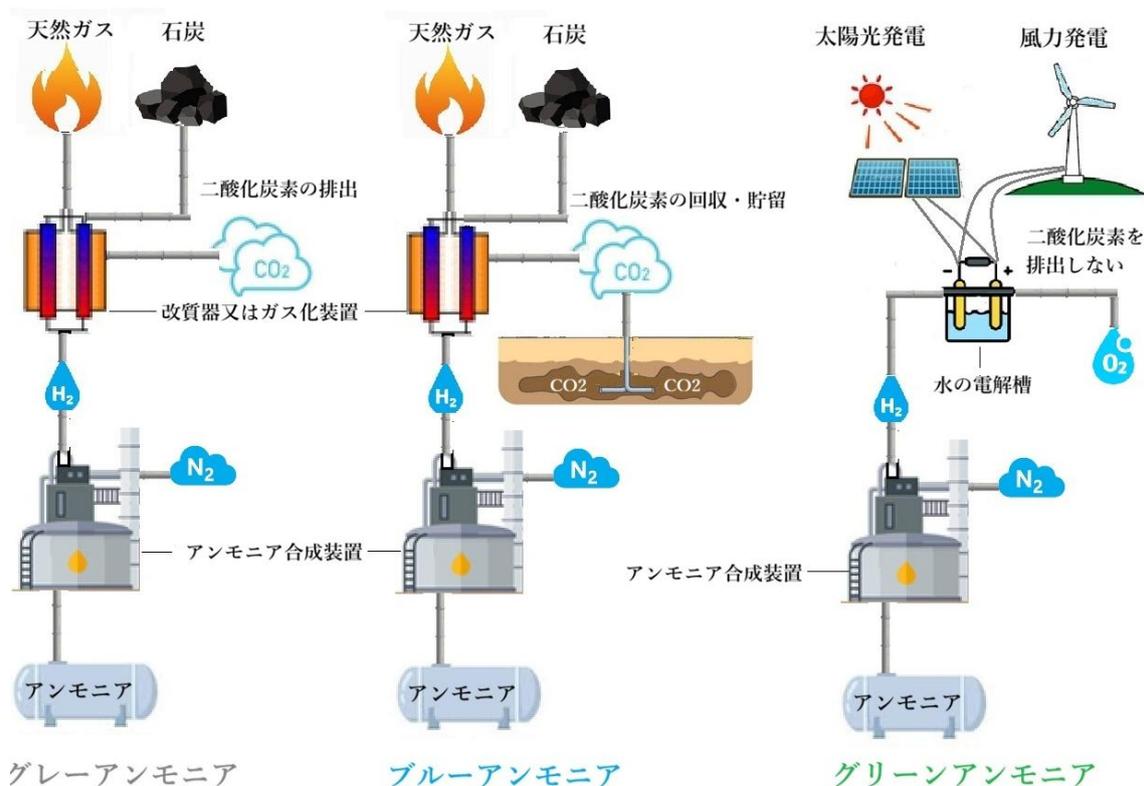
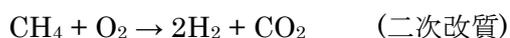
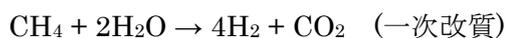


図 1. グレーアンモニア、ブルーアンモニア、グリーンアンモニアの合成模式図

## 一、 グレーアンモニア

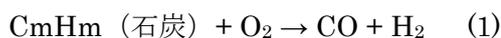
グレーアンモニアとは、天然ガスや石炭の化石燃料から水素を得る際に排出された二酸化炭素を回収せず、その水素を使用して合成されたアンモニアである。天然ガスや石炭から水素を得る工程には多量の二酸化炭素が排出される。その二酸化炭素が回収しない場合は、地球温暖化に助長されるので、グレーアンモニアと呼ばれる。

天然ガスを原料として水素を得る場合は水蒸気改質法を使用する。天然ガスほとんどメタン (CH<sub>4</sub>) である。天然ガスは触媒の作用で、水蒸気と反応して、水素と二酸化炭素を生成する。その反応式は、



理論上、水素 1kg を製造するには 2kg の天然ガスと 31.5MJ の熱エネルギーが必要となり、約 5.5kg の二酸化炭素を放出するという計算であるが、実際に反応に必要な熱エネルギーなども消費するので、水素 1kg を製造するには二酸化炭素が約 11.4kg 放出される。

一方、石炭を原料とする場合はガス化法を使用する。まず、石炭を燃やして、一酸化炭素と水素を生成する。生成された一酸化炭素がさらに水蒸気と反応して、二酸化炭素と水素を生成させる。その反応式は、



原料石炭の種類と発熱量によって、理論上水素 1kg を製造するには 3.5~5kg の石炭と 31.5MJ のエネルギーが必要となり、8~10kg の二酸化炭素を放出するという計算である。実際に反応に必要な熱エネルギーなども消費するので、水素 1kg を製造するには二酸化炭素が約 23~26kg 放出される。

ただし、1kg 水素から 5.66kg アンモニアが合成されるので、天然ガスを原料とする場合は、1kg アンモニアを合成するたびに約 1.9~2.1kg 二酸化炭素を排出する。石炭を原料とする場合はさらに多く、1kg アンモニアを合成するには 4~5kg 二酸化炭素を排出する。

天然ガスや石炭の化石燃料価格が安いので、それを原料にしてアンモニアを合成する方法が一番安い。国際市場におけるグレーアンモニアの価格は天然ガス価格に連動しているが、2026年1月現在では 320~350 ドル/トン程度で、円換算では 1kg あたり約 51~56 円である。また、財務省の通関統計によれば、2025年1~11月のアンモニア平均輸入価格が 57,647 円/トンである。

## 二、 ブルーアンモニア

ブルーアンモニアは、化石燃料から水素を製造する過程に放出された二酸化炭素の一部を回収・貯留することで、二酸化炭素排出量を実質的に削減した水素を使って合成されたアンモニアを指す。

水素合成工程から回収した二酸化炭素の貯留方法は主に圧力をかけて、液化してから地

下 800m 以下の、二酸化炭素が漏れにくい構造の地層（砂岩などすき間の多い帯水層、枯竭した油田・ガス田など）に圧入して閉じ込める。二酸化炭素は圧力 7.38MPa、温度 31.1°C 以上で超臨界状態に変化して、体積は気体の 1/300 程度に小さくなり、低粘性・高拡散という特性を持つ。その状態では地下地層に貯留する。CCS (Carbon Capture and Storage) 技術と呼ばれる。

また、回収した二酸化炭素は別の製品の製造に使うこともできる。これは CCU (Carbon Capture and Utilization) 技術と呼ばれる。

化石燃料から水素およびアンモニアを製造する過程に放出された二酸化炭素を全量回収することが不可能である。現在の技術では最大でも二酸化炭素の回収率が約 70% に留まる。従って、天然ガス原料のブルーアンモニアでも 1kg アンモニアを合成するには約 0.6~1.0kg 二酸化炭素を排出する。

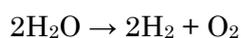
また、回収した二酸化炭素の液化と輸送、貯留地層への注入に多量のエネルギーが消費され、それなりの二酸化炭素も当然発生する。

コストの面では、ブルーアンモニアは二酸化炭素の回収・貯留費用が発生し、グレーアンモニアに比べて約 1.5~2 倍高い。国際市場にブルーアンモニアの実質取引が少なく、2026 年 1 月現在の参考価格としては FOB 約 500~800 ドル/トン (8~12.5 万円/トン) が要求されている。

### 三、 グリーンアンモニア

グリーンアンモニアとは、太陽光や風力などの再生可能エネルギー由来の電力で水を電気分解して得た水素を原料とし、合成されたアンモニアを指す。

水 (H<sub>2</sub>O) は酸素と水素から構成された物質で、電気を使って酸素と水素に分解することができる。その反応式は、



電解時に陰極（一極）に還元反応が起こり、水素が発生する。陽極（+極）に酸化反応が起こり、酸素が発生する。電解時に二酸化炭素が発生しない。従って、水の電解で生成した水素を回収して、原料として合成されたアンモニアはグリーンアンモニアと呼ばれるわけである。

純水は電気を通しにくい絶縁体で、純水のままでは電気分解が起こりにくく、高い電圧が必要である。水に水酸化ナトリウムなどの電解質を加えることで、水溶液中にたくさんのイオンが供給され、電流が流れやすくなる。

水 1mol (18g) を分解するのに約 286kJ のエネルギーが必要である。電力単位の W に換算すれば、79.4W となる。すなわち、理論上では水の電気分解を利用して 1kg の水素を得るには 35.75kWh の電力が必要となる。ただし、実際には過電圧や電解液の抵抗でエネルギーロスが生じ、電解時の水温度上昇や不純物・水に溶解している物質の種類によって効率が変わり、アルカリ水電解や PEM 水電解の効率は 60~75% 程度である。現状で水素 1kg

あたり約 45～60kWh 程度が目安である。

現実に太陽光や風力などの再生可能エネルギー由来の電力で水の電気分解を利用して、グリーンアンモニアを生産するにはまた多くの課題がある。一つはコストの問題で、再生可能エネルギーを得るには太陽光パネルまたは風力発電設備の設置コストと運営コストがかさむ。もう一つは太陽光発電や風力発電の出力が非常に不安定で、その電圧と電力の変動に対応する電解槽運転の難しさが半端ではない。

コストの面では、グレーアンモニアに比べて、グリーンアンモニアはその 2～3 倍以上高くなるだろう。国際市場にグリーンアンモニアの実質取引がなく、参考として、FOB が 700 ドル／トン（11 万円／トン）以上とされている。本邦の国内産業用大口電力料金 16 円/kWh で計算して、水素 1kg を得るには電気代だけで 720～960 円かかる。これを元に試算すれば、グリーンアンモニアの生産コストだけでは 16 万円／トン以上となる。ましてや太陽光や風力などの再生可能エネルギー電力の価格が高く、グリーンアンモニアの生産コストはさらに上昇するだろう。

上記 3 種アンモニアの特徴を表 1 にまとめた。

表 1. グレーアンモニア、ブルーアンモニアとグリーンアンモニアの特徴

項目	グレーアンモニア	ブルーアンモニア	グリーンアンモニア
原料	化石燃料 (天然ガスや石炭)	化石燃料 (天然ガスや石炭)	再生可能エネルギー (太陽光発電や風力発電の電力)
製造方法	天然ガスの改質または石炭のガス化で得た水素を原料にアンモニアを合成する	天然ガスの改質または石炭のガス化で得た水素を原料にアンモニアを合成する	水の電気分解で得た水素を原料にアンモニアを合成する
CO <sub>2</sub> 排出量 (天然ガスを原料とする場合)	1kg アンモニアを合成するには 1.9～2.1kg CO <sub>2</sub> を排出する	一部の二酸化炭素を回収・貯留するので、1kg アンモニアを合成するには 0.6～1.0kg CO <sub>2</sub> を排出する	CO <sub>2</sub> をほとんど排出しない
製造コスト	安い	グレーアンモニアの約 1.5 倍	現時点で最も高価、グレーアンモニアの 2～3 倍以上
技術成熟度	確立された技術	比較的確立された技術だが、貯留地層の安定性評価や CO <sub>2</sub> の漏洩防止	開発・実証段階、技術が未熟、安定性が欠く

		システムの確立に課題がある	
環境影響度	主に CO <sub>2</sub> の排出が環境への影響	CO <sub>2</sub> 排出量が減少するが、二酸化炭素の貯留場所確保と貯留後の影響が不明	CO <sub>2</sub> がほとんど排出しないが、太陽光パネルや風車設置は環境への悪影響がある
主な用途	化学肥料、化学原料など	化学原料のほか、火力発電の燃料	化学原料のほか、火力発電や輸送用燃料の脱炭素化に期待

ほかに、原子力発電を用いる水の電気分解で得た水素を原料にして合成されたアンモニアは「ピンクアンモニア」と呼ばれ、アメリカとフランスは導入に意欲的な態度を示している。