

講演2：「水素、アンモニア利用の課題」(塩沢文朗)の概要

1. カーボンニュートラル達成の課題と水素、アンモニアの重要性

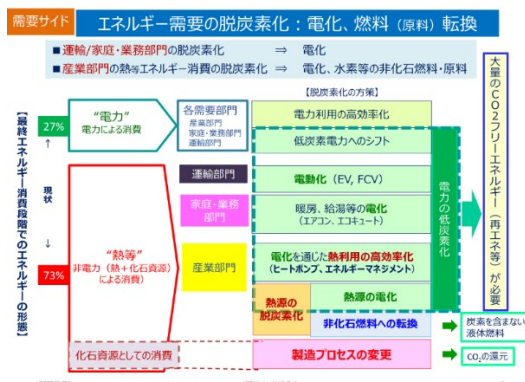
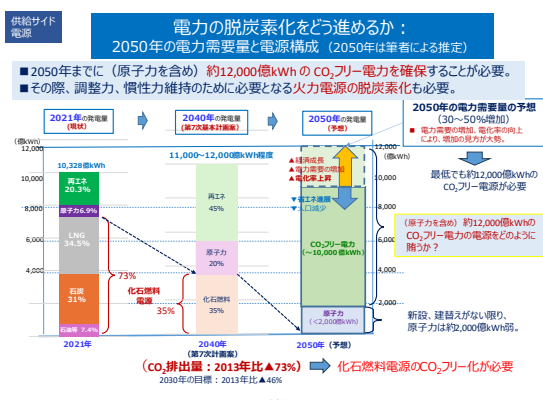
(1) カーボンニュートラル達成の課題

・カーボンニュートラル達成のためには、以下が重要：

- ① 電力利用の高効率化 と 電源の脱炭素化
- ② 熱利用の高効率化 及び 熱源、燃料の脱炭素化のための電化と非化石燃料への転換
- ③ 原料の脱炭素化のためのプロセス転換

中でも、今後の電化の進展による電力需要の増加から、電源の脱炭素化が重要。

- ・電源の脱炭素化には、大量の CO₂フリーエネルギーが必要。しかし、国内再エネ、原子力、(及び CCS)の大量導入には、多くの課題あり。
- ・また、再エネ電源の割合が高まるにつれ、調整力、慣性力の確保手段が重要となり、そのため火力電源の燃料の脱炭素化が必要 → CO₂フリー燃料が必要。
- ・さらに、輸送部門、産業分野の燃料転換、脱炭素化のためのプロセス転換にも、大量の CO₂フリーエネルギー／原料が必要。



(2) 日本にとって、水素、アンモニアは、安価な CO₂フリーエネルギーの大量導入手段

- ・日本は、質・量ともに再エネ資源に恵まれていない。
- ・また日本には、再エネ資源豊富な地域との間に送電線やパイプラインが存在しない。
- ・このため日本は、海外の安価な再エネ資源を輸送可能な化学エネルギー(水素)として導入することが必要。

【日本にとっての水素、アンモニア導入の意義】

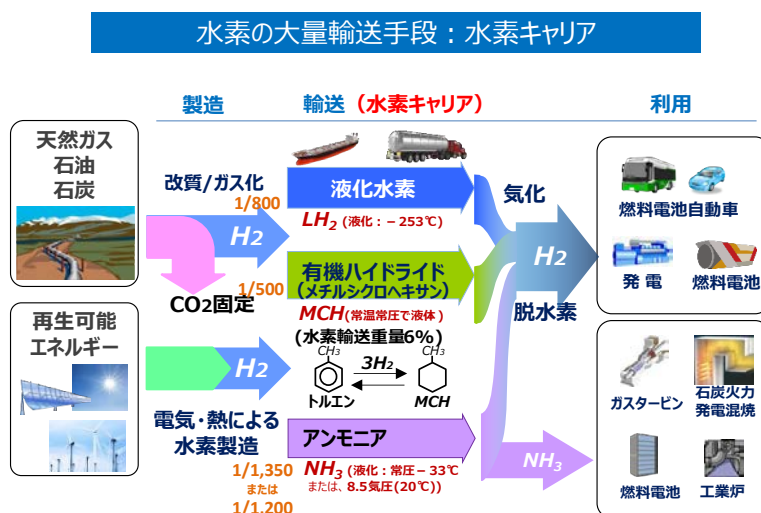
○エネルギー供給面：海外からの安価な CO₂フリーエネルギーの導入手段

- エネルギー需要面：
 - ・電源の脱炭素化 + 調整力としての火力発電の脱炭素化の手段
 - ・燃料の脱炭素化(産業部門、運輸部門)の手段
 - ・原料の脱炭素化(鉄鋼、化学)の手段
 - ・炭素のリサイクル・有効利用の手段

⇒ 安価 な水素等を 大量 かつ 安定的 に導入できるようにすることが必要

2. 水素をどのように運ぶかー水素キャリアー

- ・しかし、水素は体積当たりのエネルギー密度が小さいため、大量に運ぶことが難しい。
- ・そのため、水素を大量に輸送するための手段が必要 ⇒ 水素キャリアの必要性
- ・水素キャリアとして、液化水素、アンモニア、MCH(メチルシクロヘキサン)が有力と考えられ、それらの利用のため技術開発等が進められている。



- ・液化水素、アンモニア、MCH には、物性に起因する問題や大規模サプライチェーン構築上の課題から、それぞれ有利、不利な特徴があり、それらを整理すると以下ようになる：

各水素キャリアの特徴（まとめ）

【注意】 ・以下は各キャリアの特徴を、定性的に記述したものの。
 ・実際のキャリアの「優位性」と「課題評価」は、キャリアから再変換後に得られる水素の用途や輸送量/距離、使用環境等によって異なり得るので、実際の使用局面ごとに経済性評価を含め、定量的かつ総合的に行う必要がある。

	優位性	課題
液化水素	<ul style="list-style-type: none"> キャリアから水素への変換が、原則不要。高純度の水素が得られる。 	<ul style="list-style-type: none"> マイナス253℃の極低温物質の取り扱いが必要。 液化の際のエネルギーロス、一定量のボイルオフが不可避。 サプライチェーン構成技術の多く（液化、貯蔵、輸送）が開発途上。特に大量輸送のための輸送船は開発段階。 新規の輸送、貯蔵インフラを建設する必要。 特に火災、爆発に対する防止対策が必要。。
MCH	<ul style="list-style-type: none"> 常温で液体。 既存のガソリン等用の輸送、貯蔵設備の転用可能。 	<ul style="list-style-type: none"> キャリアから水素への変換（脱水素）の際に、相当量のエネルギーの投入が必要。 トルエンとMCHの2系列の貯蔵設備が必要。 水素密度が小さいため、輸送、貯蔵インフラの規模が大。 高純度の水素が必要とされる用途には、精製が必要。 脱水素設備の大型化と、脱水素後のトルエンに残る不純物の低減が必要。 トルエンには毒性あり。
液化アンモニア	<ul style="list-style-type: none"> LPGと同様の比較的マイルドな条件で液化。（LPG用の貯蔵、輸送施設が転用可能。） 現状、大量のアンモニアは国際間で流通しており、成熟した貯蔵、輸送インフラ技術が存在。 キャリアから水素に変換せずに、ボイラ、タービン等の燃焼機器で脱炭素燃料として直接利用可能。 分解して水素キャリアとして利用することも可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 毒性物質としての取り扱いが必要。 分解して水素として利用するためには、一定のエネルギー/コストを要する。 高純度の水素が必要とされる用途には、精製が必要。

2025/1/31

IEEシシボジウム

25

3. アンモニアは、(水素に再変換することなく)CO₂フリー燃料として利用可能

- アンモニアは、これらの3つのキャリアの中では体積当たりのエネルギー密度が最大。また、既に世界で大量に生産され、大量に流通していること等から、有力な水素キャリアの性質を有している。
- さらに、内閣府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」(2014-18)の研究開発の成果により、アンモニアは、水素に再変換することなく、直接CO₂フリー燃料としてボイラーやガスタービンで使用できることが明らかにされ、CO₂フリー燃料として注目されることとなった。

CO₂フリー燃料としてのアンモニア

■アンモニアは、水素に再変換（クラッキング）することなく、CO₂フリー燃料として利用できることが明らかにされた。（←SIP「エネルギーキャリア」の成果）

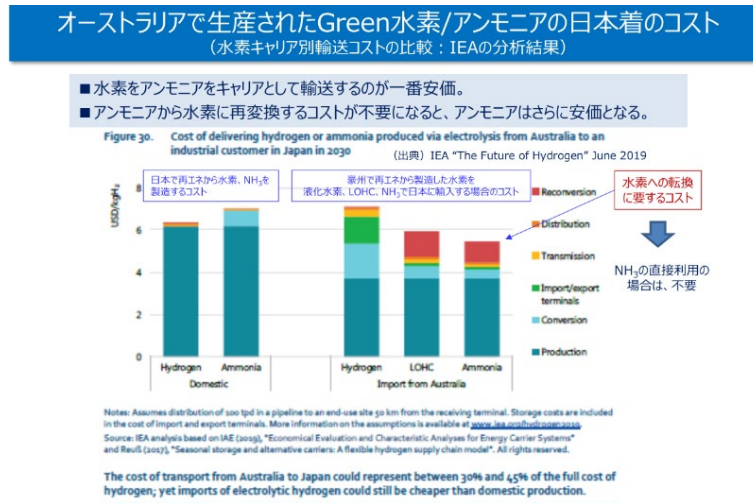


2025/1/31
 SIP 戦略的イノベーション創造プログラム
 Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

IEEシシボジウム

29

- また、コスト的にも3つの水素キャリアの中で、アンモニアがもっとも安価なCO₂フリー燃料となり得ることが、内外の諸機関の分析で明らかとなった。



2025/1/31

IEE1シンポジウム

30

4. 水素、アンモニアの導入は、今後どのように進んでいくか？

① ブルーからグリーンへ

- ここしばらくの間は、ブルー(水素、アンモニア)がグリーン(水素、アンモニア)に比較して安価であり、水素、アンモニアの導入は、一部の例外を除いてブルー水素、アンモニアの導入から進むだろう。

② 発電分野では、

- 石炭火力はアンモニアの混焼/専焼、
- ガス火力は、①今後の火力発電の役割の変化、②水素、アンモニア燃焼の特性(発電効率等)と高混焼、専焼技術開発の進展スピード、③水素/アンモニア火力発電用燃焼機器の国際市場の大きさと拡大の速さ等によって、水素またはアンモニア混焼/専焼の選択が行われると見ている。

③ 国際海運の分野では、IMO(国際海事機関)による脱炭素化規制により、外航船はアンモニア燃料、内航船は水素燃料という方向で燃料のCO₂フリー化が進む可能性大。

④ その他の分野(自動車向けのCO₂フリー燃料、産業向けのCO₂フリー原燃料等)は、それらの用途に要求される原燃料の性質や量的規模の大きさによって、水素/アンモニアの選択が行われるだろう。

⇒ その場合、問題となるのは、水素が選好される分野でも、その必要となる水素をどのように運んでくるかということ。

水素、アンモニアの導入は、今後どのように進んでいくか？

➢ “Blue” → “Green”
 (留意事項: “グリーン”に対するユーザの選好、天然ガス価格の変動リスク、カーボンプライシング導入の影響)

➢ 発電分野への水素エネルギーの導入は、アンモニアが先行。
 - 既存石炭火力の脱炭素化 → アンモニア
 - ガス火力の脱炭素化 → 水素、アンモニア

➢ 輸送分野
 - 乗用車分野: 電池 (+水素)
 - トラック、バス分野: アンモニア、水素?
 - 海運分野 内航船: 水素
 外航船: アンモニア

➢ 産業分野
 - 鉄鋼、石油化学: 水素
 - 工業炉: 水素、アンモニア

■ 水素とアンモニアの競合/補完関係

- (補完関係) Green水素 ⇒ Greenアンモニアの原料
- (競合関係) 水素で運ぶ? or アンモニアで運ぶ?

(水素とアンモニアの競合関係を左右する重要な要因)

液体水素 (+MCH) の製造・輸送技術の進展スピードとコスト低減の可能性

⇔

アンモニア分解水素製造技術の改良とアンモニア分解水素のコスト

必要とされる大量の水素をどのように運ぶか？

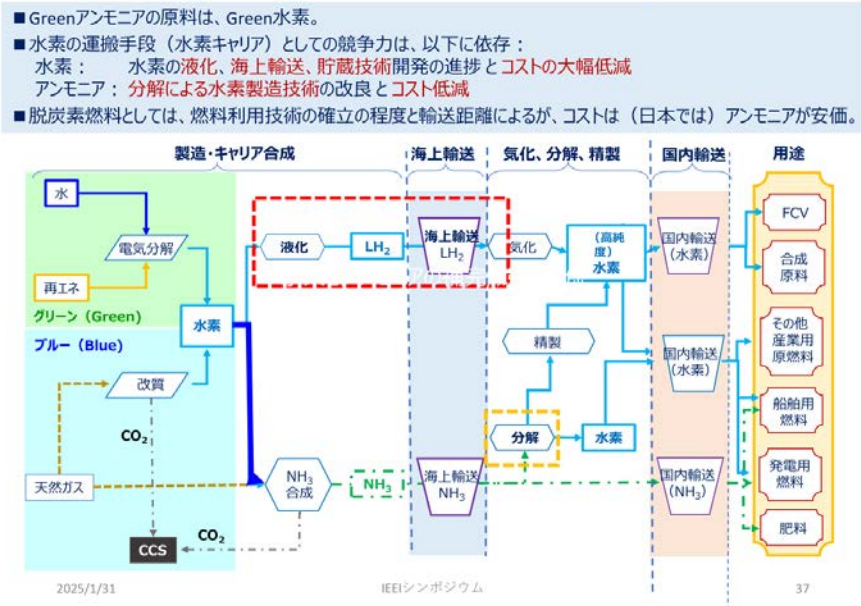
2025/1/31

IEEIシンポジウム

36

- 水素とアンモニアには、以下のような補完/競合関係があるが、水素の導入を図るか、アンモニアを用いて水素の導入を図るかの選択は、
 - 液体水素 (+MCH) の製造・輸送技術の進展スピードとコスト低減の可能性 と
 - アンモニア分解による水素製造技術の改良とアンモニア分解水素のコストによって決まって来るものと考えている。

水素とアンモニアの補完/競合関係



2025/1/31

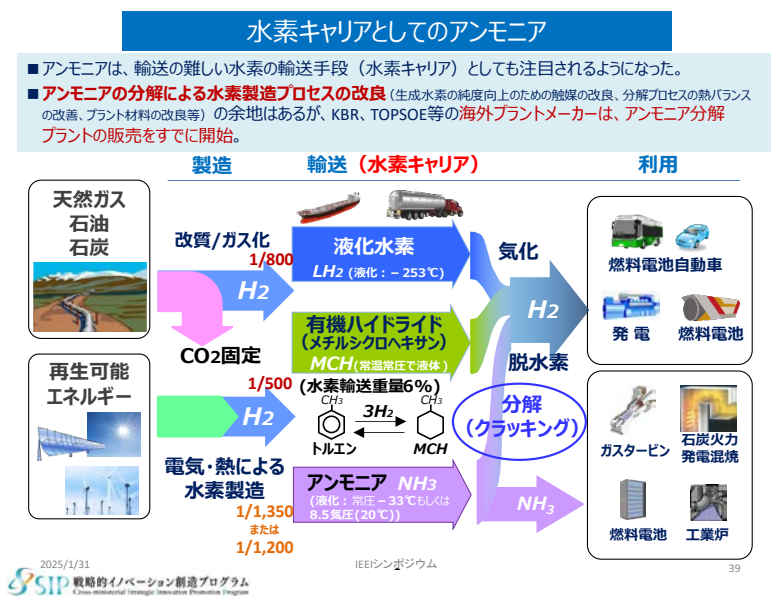
IEEIシンポジウム

37

5. 水素キャリアとしてのアンモニア

- アンモニア分解による水素製造技術が実用化段階に近いレベルにあること、アンモニアの輸送コストが水素の輸送コストより安いことから、水素の利用用途でもアンモニアで運び、そのアンモ

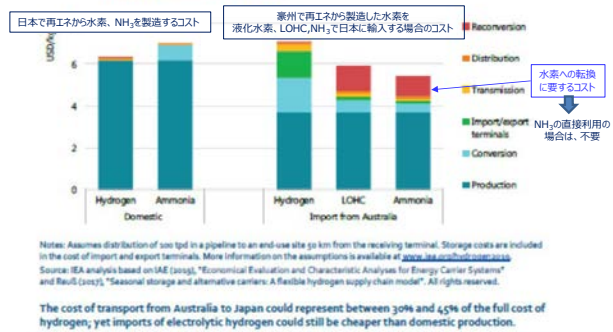
ニアから水素を製造する方式、すなわちアンモニアを水素キャリアとして利用する方法が、欧州等で実装され始めている。



オーストラリアから日本に 水素キャリアを用いてGreen水素を供給する場合のコスト比較（2030年）

(出典) IEA "The Future of Hydrogen" June 2019

- オーストラリアから日本にGreen水素を導入する場合、水素キャリアとしてアンモニアを用いる方法が（アンモニアを水素に再転換（分解）するコストを考慮しても）もっとも安価。（右グラフ）
- そのコストは、水素を日本国内で製造するよりも安価。（左グラフとの比較）
- アンモニアを直接利用する場合は、それが最安価。（右グラフ）



6. 水素、アンモニアの安全性

- ・ 「アンモニアは危険な物質」と言われることがよくあるが、これは世論をミスリードしかねない乱暴な言い方。
- ・ 水素、アンモニアに限らず、化学物質には、健康や環境に害をもたらす何らかの「有害性」があり、強弱はあるものの、それぞれ異なった性質の有害性を有している。また、こうした有害性は、水素キャリアに限らず、化学物質の集合体であるガソリンや都市ガス、灯油等の化石燃料にも存在する。
- ・ したがって、どの物質について「〇〇は△△より危険だとか、安全だ」と単純にラベル付けする

のは不適當。

水素キャリアの有する健康、環境リスク

水素キャリア、化石燃料等有する有害性 (Hazard)

- すべての水素キャリア（+化石燃料）は、何らかの有害性をもつ。
- アンモニアの有する有害性は、急性毒性と水生環境有害性。長期の慢性毒性は知られていない。
- 水素は爆発性、MCHに不可欠なトルエンは、急性、慢性毒性を有する。

■EUのCLP基準（分類、表示、包装基準）における有害性の強度分類

		有害性 高 ← 1 2 3 4 → 有害性 低							
有害性の側面		NH ₃ サブライチエン	水素 液化水素 サブライチエン	MCH サブライチエン	トルエン	ガソリン	メタン	プロパン	
物理化学的有害性	可燃性ガス	2	1				1	1	
	高压ガス	高压ガス	高压ガス				高压ガス	高压ガス	
	引火性液体			2	2				
健康有害性	急性	3							
	皮膚腐食性、皮膚刺激性	1B		2	2				
	慢性	生殖細胞変異毒性					1B		
		発がん性					1B		
		生殖毒性				2			
		特定標的臓器毒性（単回）			3	3			
		特定標的臓器毒性（反復）				2			
吸引呼吸器有害性			1	1	1				
環境有害性	水生環境有害性（急性）	1							
	水生環境有害性（長期）			2					

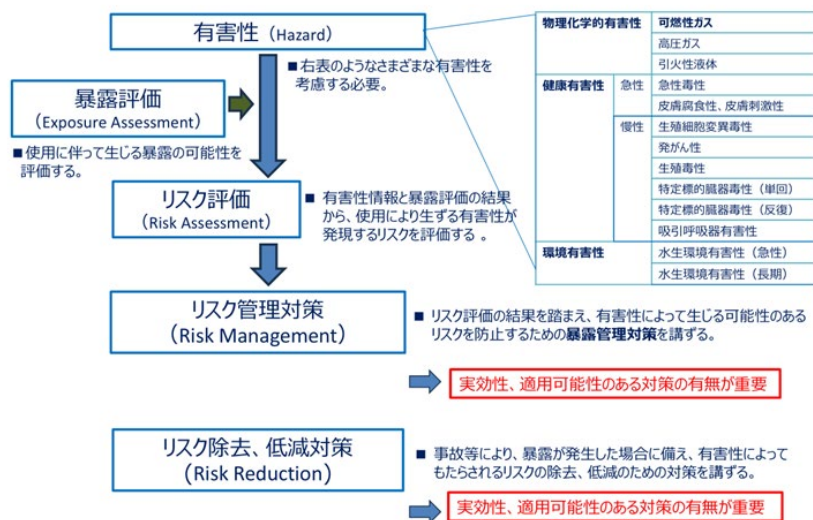
2025/1/31

IEEシンポジウム

45

- ・ 化学物質が有するどのような有害性も、「暴露管理」が可能であれば、健康や環境にもたらずリスクを適切に管理することが可能。
- ・ 重要なことは、どの物質も物質の有害性に応じて、専門家による適切なリスク管理の下で使用される必要があるということ。そのうえで、ある物質の利用が可能かどうかの判断は、実効性のある適切なリスク管理対策が技術的に存在するか、また、経済的に実施可能なコストでその対策が適用できるかということ。

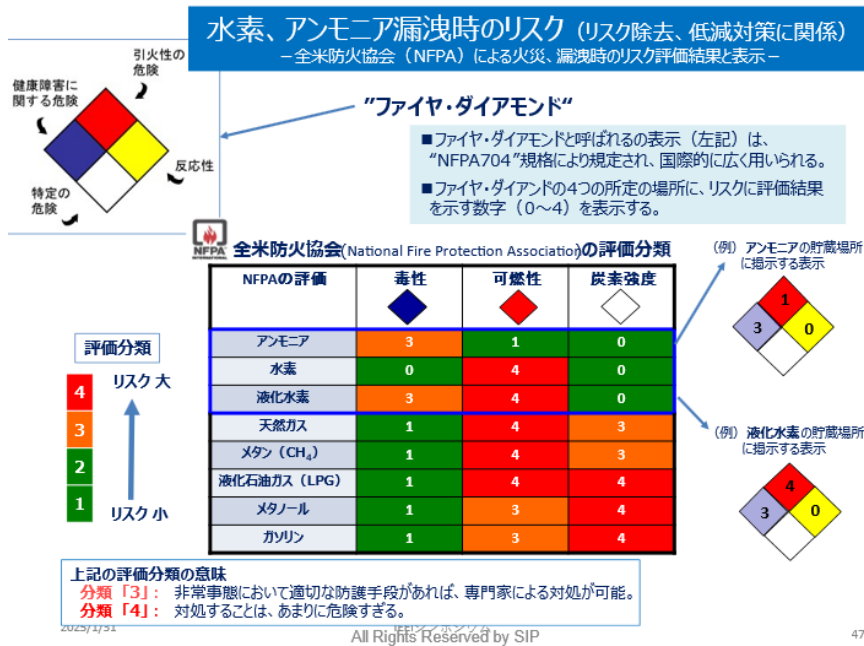
【参考】化学物質の有害性とリスク管理対策について



2025/1/31

IEEシンポジウム

46



⇒ アンモニアには、実効性、適用可能性のあるリスク管理対策、リスク低減・除去対策が存在しており、アンモニアは、これまでも長きにわたり適切に取り扱う経験が蓄積されているもの。

今後、取り組み強化が必要な課題

- ・万一の事故時(漏洩時)に備えた、事業者を始め、事故対応に当たる関係者の教育・訓練。
- ・Public Acceptance 増進のための対話機会、必要な情報の提供。

7. 今後の展望

- ・ 昨今の物価、人件費等の高騰により、水素、アンモニアの供給者、需要者の双方において投資リスクが増大。多くの(特にグリーン水素/アンモニア)のプロジェクトが中止されたり、停滞したりしている状況。
- ・ しかし、以下の理由から、日本ではブルーアンモニアの導入は増大していくと考えている:
 - 脱炭素に向けた時代の流れは続いており、投資リスクの増大の中でもファーストムーバーによる導入活動は続いている。
 - 脱炭素に向けた各国政府の支援措置やカーボンプライシングの導入等の規制措置が導入されることにより、脱炭素社会における市場環境の予見性が高まりつつある。
 - ブルーアンモニアの製造コストの透明性は高く、そのコストは、以下のスライドの計算式により推定可能。そして推定されるブルーアンモニアの製造コストは、本来的に安価。
 - 米国大手石油会社は、水素、CCSビジネスにも熱心であり、米国でのブルー水素、アンモニア関連のプロジェクトは今後とも進展する可能性。

【参考】天然ガスを原料とするNH₃の製造コスト（変動費ベース）の推計

G: 天然ガスコスト (\$/MMBtu)

A_V: NH₃製造コスト（変動費ベース） (\$/ton-NH₃)

$$A_V (\$/\text{ton-NH}_3) = G (\$/\text{MMBtu}) \times \sim 30$$

G = 3 \$/MMBtuの場合、A ≒ 90 \$/ton-NH₃

最新のNH₃製造プラントのエネルギー効率 = 28~29 GJ/ton-NH₃
1 GJ = 1.055 MMBtu

$$\text{プラント渡しNH}_3\text{コスト} = A_V + A_C + P + \text{CCS} + \text{Freight}$$

A_C: NH₃製造に係る固定費

P: 利益

CCS*: CO₂処理代

*CCS: 天然ガスを原料とするアンモニアプラントから排出されるCO₂のCCSコストは、排出されるCO₂の約2/3がプロセスからの排出で、CO₂濃度が約97%と高いため、通常の排ガスからのCO₂処理に要するCCSコストに比べて安価。(30-50\$/t-CO₂程度)