

省エネ型の合成法模索

	アンモニア	メタノール	液体水素	圧縮水素 (350気圧)	水素吸蔵合金
	NH ₃	CH ₃ OH	H ₂	H ₂	LaNi ₅ H ₆
水素含有率 (重量%)	17.6	12.5	100	100	1.4
水素密度 (kg-H ₂ m ⁻³)	121	99.5	70.8	23.2	98.6
沸点 (°C)	-33	65	-253	-253	-
その他の課題	毒性あり エネルギー損失	毒性あり エネルギー損失 炭素含む	ボイルオフ	ボンベ重量	材料コスト高

同志社大学伊藤靖彦教授の資料を元に作成

ハーバー! を超える
ボッシュ! を超える

アンモニア社会の実現に向けて

最も単純な構造をした窒素化合物アンモニア。肥料の原料として世界人口の増加を支えてきた重要な物質だが、エネルギー物質としての側面は知られていない。100年前に工業化された合成法「ハーバー・ボッシュ法」がいまだに唯一の大産生産手段であり、膨大なエネルギーを消費するプロセスだからだ。アンモニアを小さいエネルギーで作れないことには、エネルギー利用はできない。アンモニアのエネルギーとしての可能性に賭け、省エネ型の新たな合成法を模索する研究の最前線を追った。

(池田勝敏)

まずアンモニアのエネルギー発生する。一方アンモニアは窒素しか排出しない。アンモニアのエネルギー利用に向け研究を進めている同志社大学の伊藤靖彦教授は「貯蔵や輸送のインフラが整っていないこともメリット」と指摘する。

アンモニアの最大の優位性は貯蔵のしやすさだ。沸点は水素と比べて高く室温で、少し圧力を加えるだけで簡単に液化する。直接エネルギーとして使えるし、必要に応じて水素を取り出せる。アンモニア分子の構造は一つの窒素原子が三つの水素原子とつながった単純な形で、水素を豊富に含む。

長所ばかりに見えるが、アンモニアには毒性がある。ただ長年扱ってきたため安全な取り扱いについて豊富な経験があるほか、現在使用されている燃料と危険度が変わらないとの欧州の国家機関の報告もあり「総じて恐れることはない」(伊藤教授)との見方が多い。

毒性よりも深刻な課題が、合成に膨大なエネルギーを消費することだ。アンモニア合成は、1913年に実用化されたハーバー・ボッシュ法が100年近くたった今でも唯一の大産生産の手段だ。水素と空気中の窒素から触媒を使ってアンモニアを作る方法だが、窒素は一つの窒素原子が三重結合で結び付いており極めて安定な気体。この結合を切り離すために400-550度C、200-400気圧という過酷な環境で反応を進める必要があるのだ。

しかも、原料の水素は化石燃料に頼っている。世界で年間1.5億ト以上をばらばらアンモニアが生産されており、ハーバー・ボッシュ法と水素の製造を含めると、全人類の消費エネルギーの数%以上をアンモニア合成に使っているとの指摘もある。アンモニアのエネルギー物質としての特性を生かし低炭素社会につながるには、ハーバー・ボッシュ法にとって代わる省エネ型の合成法を確立しなければならない。課題を乗り切るヒントは自然界の豆にありそうだ。

貯蔵・輸送で利点 膨大な消費エネ 課題

アンモニアの最大の優位性は貯蔵のしやすさだ。沸点は水素と比べて高く室温で、少し圧力を加えるだけで簡単に液化する。直接エネルギーとして使えるし、必要に応じて水素を取り出せる。アンモニア分子の構造は一つの窒素原子が三つの水素原子とつながった単純な形で、水素を豊富に含む。

長所ばかりに見えるが、アンモニアには毒性がある。ただ長年扱ってきたため安全な取り扱いについて豊富な経験があるほか、現在使用されている燃料と危険度が変わらないとの欧州の国家機関の報告もあり「総じて恐れることはない」(伊藤教授)との見方が多い。

毒性よりも深刻な課題が、合成に膨大なエネルギーを消費することだ。アンモニア合成は、1913年に実用化されたハーバー・ボッシュ法が100年近くたった今でも唯一の大産生産の手段だ。水素と空気中の窒素から触媒を使ってアンモニアを作る方法だが、窒素は一つの窒素原子が三重結合で結び付いており極めて安定な気体。この結合を切り離すために400-550度C、200-400気圧という過酷な環境で反応を進める必要があるのだ。

しかも、原料の水素は化石燃料に頼っている。世界で年間1.5億ト以上をばらばらアンモニアが生産されており、ハーバー・ボッシュ法と水素の製造を含めると、全人類の消費エネルギーの数%以上をアンモニア合成に使っているとの指摘もある。アンモニアのエネルギー物質としての特性を生かし低炭素社会につながるには、ハーバー・ボッシュ法にとって代わる省エネ型の合成法を確立しなければならない。課題を乗り切るヒントは自然界の豆にありそうだ。

ハーバー! を超える ボッシュ! を超える

アンモニア社会の実現に向けて

〈中〉

自然界には空気中の窒素から常温常圧の温和な条件下でアンモニアを合成する微生物がいる。マメ科植物の根に共生する根粒菌だ。ニトロゲナーゼという酵素を使って窒素を取り込むことで知られるがそのメカニズムはよくわかっていない。ただニトロゲナーゼの活性部位にあるモリブデンがキー元素になっているとされる。

東京大学の西林仁昭准教授はニトロゲナーゼの分子構造をモデルにモリ

触媒的 な合成実現

課題は水素と電子の供給源

業的成功をおさめたハーバー・ボッシュ法を塗り替えるには「化学量論反応ではなく触媒反応でないとけない」(同)。

これまでハーバー・ボッシュ法の膨大なエネルギー消費を解決しようと西林氏を含め世界中の研究が2003年報告され

た。ノーベル化学賞受賞者の米シュロック博士が合成したモリブデン錯体は自身の成果を「アンモニアをエネルギーとして合成に成功したのだ。ただシュロック氏の錯体は立体的にかき高く合

成するのに手間がかか

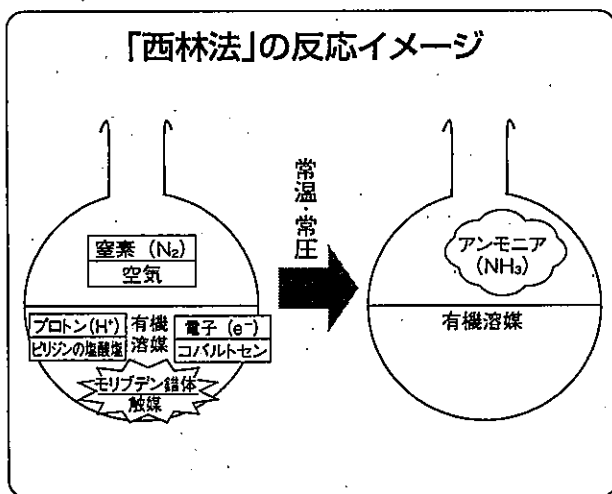
る。西林氏の成果は「市

場的に設置した反応装置に光と水を与えてアンモニアを貯蔵し必要に応じてエネルギーを取り出すといった未来のエネルギー社会をイメージする。その実現に乗り越えなくてはならない課題がある。今回開発した合成法

研究者が挑んできたが、反応条件を温和にするのみで化学量論反応の成果がほとんどだった。

数少ない触媒反応の中で西林氏が「化学量論から触媒反応への高い壁を越えた」と評価する成果が2003年報告され

10時間で収率50%を達



では窒素以外に水素と電子が必要になるが、その供給源を試薬に頼っていた。試薬は窒素の合成法の可能性を探っている。そこでキーとなるものは、水素と電子の供給源を、水素源、電

技術が電気化学だ。

同志社大学の伊藤靖彦教授は水の電気分解でよく知られる。電気化学反応を使った新たなアンモニア合成法の実用化に挑んでいる。電解質に漬けた二つの電極に窒素と水を供給し電気を流すことでアンモニアを合成できる。原理はこうだ。

陰極に供給した窒素が電子を受けて窒化物イオンとなり電解質に溶ける。このイオンが陽極に供給した水素と反応しアンモニアができる。

この方法は化学的に安定な「熔融塩」を電解質に採用したのがポイント。水溶液だと窒化物イオンが水と反応し思つよ

うな合成ができない。反応条件は300度Cと高温だが加圧は不要だ。理論的には外部から電圧を50ミカかければ合成できる。温度は違つが水の電気分解の理論電圧が25度Cで1.23ミカである

これを考えると簡単に合成できることがわかる。さらに伊藤氏は「原料の水素を化石燃料に頼っているのは省エネにならない」として改良を重ね、水素の代わりに水を使う

化に注力している。理論電圧は1.17ミカ。

電気化学反応で合成

安定な「熔融塩」、電解質に採用

「ハーバー!」を超えろ
アンモニア社会の実現に向けて

〈下〉

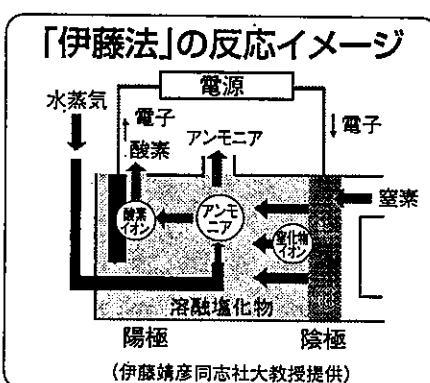
方法は考案。実際にアンモニア合成に成功した。熔融塩中の窒化物イオンに水蒸気を当てて反応させアンモニアを作る。同時に生じる酸素イオンは陽極で酸素ガスとして出す。今はこの方法の実用

実際には電解質や電極には多い。伊藤氏は「基本的な技術のめどはたつており2-3年で達成できる」と自信をみせる。

アンモニアの単位重量あたりに要するエネルギーがハーバー・ボッシュ法よりも低くなるからだ。ただ、気体の水蒸気と液体中の窒化物イオンを効率的に反応させる気液反応装置の開発など課題

を指す西林仁昭東京大学准教授は伊藤氏の研究動向に注目する。反応に必要な電子の供給源を「ストロカカむ試験から電気に置き換えよう」として

いるため。伊藤氏は「電力を太陽光発電からとつ



能になつた。その業績は当時の食糧危機を救ったとして「空気がパンを作った」と表現された。「20世紀のアンモニアの役割が世

てくれればどこでもエネルギーを貯蔵・利用できる」と伊藤氏は「肥料原料であったとすると21世紀はエネルギーとしての役割が期待できる」と（西林氏）。アンモニアエネルギー社会を描く研究者たちが、世紀を超えた課題に挑んでいる。