

空気と水からアンモニアの合成に成功し、 壮大なエネルギー資源革命を目指す

インタビュー：ジャーナリスト 小川 明

窒素1個に水素3個が結合した簡単な構造のアンモニア(NH₃)に今注目が集まる。刺激臭はあるが、人類に不可欠な分子だ。西林仁昭・東京大学大学院教授らはその効率的な合成に空気と水から常温常圧で成功した。二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスの実質的な排出を2050年までにゼロにするという日本政府の目標達成においても新しいアンモニア合成法は鍵を握る。その反応系を実験室で示した西林教授に到達点と実用化の可能性を聞いた。

「窒素社会」展望

小川 空気中の窒素を固定するアンモニア合成の意義から教えてください。

西林 1世紀前から普及しているハーバー・ボッシュ法に取って代わるアンモニア合成法の開発をやり始めたのは現在の製法にいろいろ問題点があるからです。次世代型アンモニア合成法を開発できれば、地球上のエネルギー資源や環境の問題を解決するという大きな視点で重要性

が再認識できます。

人類は今まで地球上の化石燃料の石油、石炭、天然ガスや地下資源のウランを探してエネルギー源にしてきましたが、限界があります。代わりは太陽光や風力などの再生可能エネルギーしかありません。再生可能エネルギーの一番の問題は電力しか生み出せないことです。電力は常に使う分だけ作らないと駄目で、貯めたり運んだりすることが難しいのです。

再生可能エネルギーをより幅広く使うためにエネルギーを貯

められる物質に置き換えることが必要です。その運び手(キャリア)の第一候補として、アンモニアが世界中で期待されています。アンモニアを新しいエネルギー源として利用する革新的な社会を「窒素社会」と提唱しています。昔は「アンモニア社会」と言っていました。何か臭そう、ということから、今は「窒素社会」と呼んでいます。

小川 アンモニアを軸としたエネルギー資源革命ですか。

西林 再生可能エネルギーを利用して、空気中の78%を占める窒素ガスと水からアンモニアを合成します。アンモニアは数気圧で液体になるので、貯蔵や運搬が簡単になります。利用方法は窒素と水素に分解して燃料電池に用いるか、火力発電所などでの燃料が考えられます。後者については火力発電所の混焼実

験で実証されており、利用する方は実用化が視野に入っています。窒素とアンモニア、水素、水という4つの小分子の変換反応を達成できれば窒素社会は実現します。一番の問題はアンモニア合成です。

常温常圧の反応系

西林 人間の体を構成する核酸やアミノ酸、タンパク質には窒素が入っています。これらの窒素の由来は空気中の窒素ガスです。人間は呼吸で窒素を取り入れているではありません。地球上に存在しているアンモニアは、ハーバー・ボッシュ法で窒素と水素から合成されるモノと、マメ科植物の根粒菌の酵素が窒素から合成するモノの2通りあります。化学工場と自然界での合成がほぼ半々です。原子2個

東京大学大学院工学系研究科
応用化学専攻 教授

西林 仁昭 氏



PROFILE

にしばやし・よしあき

1968年大阪府生まれ。91年、京都大学工学部石油化学科卒業。95年、同大学大学院工学研究科博士課程修了、博士号取得（工学）。同年、東京大学大学院工学系研究科助手。2000年、京都大学大学院工学研究科助手。05年に若手育成プログラムで東京大学大学院工学系研究科助教授（准教授）、16年、同システム創成学専攻教授、20年より同応用化学専攻教授。常温常圧での分子触媒による革新的アンモニア合成の研究で日本学術振興会賞や井上学術賞、文部科学大臣表彰科学技術賞、日本化学会学術賞などを受賞した。

(写真=宮沢一三)

からなる窒素分子の三重結合は極めて反応性に乏しく、解離するため高温高圧と鉄触媒が欠かせません。ハーバー・ボッシュ法には摂氏400〜600度、200〜400気圧が必要で、全人類が地球上で使用するエネルギーの数を使っています。

：ハーバー・ボッシュ法は、フリッツ・ハーバーが1909年に小ざじ4分の1の液体アンモニア製造に成功した特許を基に、カール・ボッシュが4年後の13年に工業化したアンモニア製造法である。空気中の窒素を固定するため高温高圧が必要で、莫大なエネルギーを消費する。ド

イツで誕生したこの製法は百年以上、改良に改良を重ねてほぼ完成して究極の効率まで達し、世界で年間2億トンが安く作られている。農作物を育てる窒素肥料の原料となり、20世紀以降の世界人口の急増を支えた。日本の生産量は年百万トン以下で少ない。

西林 アンモニアが窒素肥料となつて食料が生産され、人間の体をつくっています。昨今は半導体や液晶向けの窒素源としても需要が高まっています。人間が増える限りアンモニア生産は増え続けます。ハーバー・ボッシュ法の一番の問題は原料に水

素ガスを使っていることです。化石燃料からの水素ガス発生にはプロセス全体の約90%のエネルギーが使われており、大量のCO₂も排出します。化石燃料を使わないアンモニア合成法の開発は科学者にとって最重要検討課題の一つです。

小川 それは可能ですか。

西林 マメ科植物の根粒菌にある窒素固定酵素のニトロゲナーゼの活性部位が解明されています。鉄7個とモリブデン1個からなる複雑な硫黄架橋多核錯体です。活性部位の構造はほぼ分かっていますが、機能はまだ明らかになっていません。我々はニトロゲナーゼの機能だけをモ

デル化しようとしています。モリブデンを含む触媒で、常温常圧のアンモニア合成反応を2010年に見つけ、触媒活性を向上させる工夫をしてきました。還元剤としてヨウ化サマリウムを使うことでさらなる触媒活性の向上に成功し、アンモニアが効率よく合成できる反応系を19年に見つけました。今は、1分間に触媒当たり120当量の高速スピードで、窒素と水からアンモニアを合成できています。

電を食って生きる

西林 常温常圧の温和な条件下で窒素分子の三重結合を切断できるのがモリブデン触媒の素晴らしさです。また、当初の目標であったニトロゲナーゼを超える反応速度でアンモニア合成に成功しています。常温常圧のアンモニア合成としては我々の反応が世界で最速です。そもそも分子触媒を使った常温常圧のアンモニア合成は非常に難しく、現在でも世界で成功しているのは5つぐらいの研究グループ

かありません。その中で性能は我々が断トツです。次世代型アンモニア合成の基盤技術を開発したいと思っています。

実用化を達成するために必要なことは明らかです。ヨウ化サマリウムは反応後に2価から3価になります。この生成したサマリウム3価種を電気化学的手法で2価種に還元して再利用できれば道は開けます。我々の方法は間違いなく破壊的イノベーションにあたると思っています。今すぐハーバー・ボッシュ法に取って代わるのは難しいので、既存のプロセスを補完するところから始めていきます。最終的に既存の工場プラントは窒素と水からのアンモニア合成法で置き換わるでしょう。触媒の改良にも既に成功しています。当初は触媒当たりのアンモニア生成量は4千当量でしたが、今は6万当量まで、触媒能を15倍に高めることに成功しています。この結果が最終形態ではありませんが、工業化には十分なレベルであり、製造システムを開発する段階に達していると思っています。

アンモニアをエネルギーや水素のキャリアとして利用する空素社会を実現するには現在の数十倍以上の量が必要になります。CO₂を出さない再生可能エネルギーでアンモニアを作る必要もあります。そのためには空気中の窒素と水と太陽光からアンモニアを合成する反応の開発が欠かせません。ほとんど何もないところからエネルギーを作り出すので、中国の仙人が霞を食って生きたように、霞からエネルギーを作り出すプロセスになると思います。

：政府は2兆円のグリーンイノベーション基金の事業で、西林教授が開発した触媒系を改良して窒素と水を原料に用いるアンモニア電解合成のプロジェクトを採用した。出光興産が幹事企業となり、東芝や、アンモニアを製造している日産化学などのほか、西林教授ら大学の研究室も参加、今年3月から始まり、28年度まで約28億円で実用化研究に取り組む。

西林 実用化に向けて検討すべ

き事項はたくさんあり、開発に苦勞しています。いろいろな技術を持った企業の参加を募集しています。ハーバー・ボッシュ法は洗練されたプロセスです。この「百年の歴史を持つ巨人」に生まれたばかりのよちよち歩き技術がすぐ勝てるかといえは難しく、開発には時間がかかると思います。

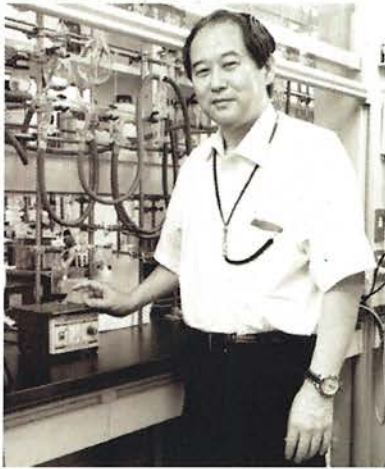
アンモニアは燃料

西林 水素ガスが必要なハーバー・ボッシュ法とは異なり、我々の方法では常温常圧で水と混ぜるだけでアンモニアがすぐ合成できます。需要に即した究極のオンデマンド型だと思っています。家庭用燃料電池のエネルギーが普及していますが、これに代わるアンモニアファームが開発可能です。日中に太陽光と水、空気からアンモニアを合成して家で貯めておいて、夜間にそのアンモニアから発電します。このシステムを車に導入すると、走りながらアンモニアを合成し、タンクに貯めたアンモニアで車を走らせることも

できます。つまり、水さえ入れておけば車を動かせます。アンモニアファームやアンモニア自動車開発は、新しい反応系だからこそのできると思います。

化石燃料を原料として利用するハーバー・ボッシュ法では、その製造過程で大量のCO₂を排出するグレーアンモニアしか合成できません。これでは、化石燃料を利用した火力発電と変わりません。CO₂を排出せず、再生可能エネルギーを利用するグリーンアンモニアを合成する必要があります。再生可能エネルギーは地球上で均一に分布しているのではなく、地域によって偏りがあります。地球規模で見ると、日本は再生可能エネルギーに決して恵まれているとは残念ながら言えません。より効率的に発電するには、太陽光なら中東、風力なら南米チリ沖です。最も効率的な地域で再生可能エネルギー由来の電気エネルギーを利用して合成したアンモニアを日本に運んできて、火力発電所の原料として使うことも想定されています。必要な技術システムは日本で開発する必要

未来技術の旗手たち



西林教授の研究室の実験室で

はありますが、グリーンアンモニアの大量生産の場所が海外ということとは十分にあり得ます。

小川 地球温暖化の抑制は差し迫った課題です。

西林 カーボンニュートラルにとつても我々のアンモニア合成技術は大きな貢献ができるでしょう。破壊型イノベーションにあたる新技術には懐疑的になることがあるかと思いますが、挑戦しないと前には進めません。特に、アンモニアは戦略的にも重要な化合物との認識が広まると同時に、グリーンアンモニアの合成技術を求める機運は高まつており、ガス会社や電力会社を含む多くの企業からその実用化が望まれています。

分子触媒で産業化

西林 実用化するには「死の谷」と言われるように解決すべき課題はたくさんあります。しかし、窒素と水からのアンモニア合成法はエネルギー資源のパラダイムシフト、エネルギー資源革命になる潜在力を持つ反応です。コスト面でも大量生産は可能と考えています。モリブデン錯体に代表される分子触媒は今後使用されるでしょう。分子触媒で実用化に堪えるような反応速度を達成できているのは世界で我々だけです。ただ、実用化まで展開できるかは例がないので、試行錯誤は必要です。大

学に比べて企業は集中的に人や物を投資できません。時代の要請は強いので、企業での飛躍に大変期待しています。小川 中小企業も参入する余地はありますか。西林 アンモニア合成を実用化する際に必要となる電解反応に関する技術はノウハウの塊

です。電極も反応装置も電解膜なども特化して技術を持つている中小企業はたくさんあると思います。そういう方々の強みを生かしていただけると大変有り難いです。前例がない反応です。さまざまな技術が必要になります。関連するノウハウを持たれている方々には、ぜひ協力いただければと思っています。

小川 窒素の固定は重要です。西林 私が学んだ京都大学工学部石油化学科の教授であったノーベル化学賞受賞者の福井謙一先生もそうおっしゃっていたとお聞きしています。当時は伝統もあり、基礎化学を大事にする雰囲気**（雰囲気）**が強く残っていました。現在の研究には、福井先生の最後の弟子でもある九州大学教授の吉澤一成先生らと理論計算で共同研究を行わせていただいています。

：化学工業を発展させたアンモニア合成ではノーベル化学賞をハーバーとボッシュが20世紀前半に、触媒固体表面の反応機構解明でドイツのゲルハルト・エルトル博士が2007年に受賞

している。CO₂排出削減が強く迫られる中で再びアンモニアに脚光が集まる…

西林 常温常圧の反応が実用化すればアンモニア合成で4人目のノーベル賞受賞者が出るでしょう。私は1995年に、モリブデンの窒素錯体を最初に合成された東京大学教授（現名誉教授）千鯛眞信先生の研究室の助手に採用していただいてアンモニア合成の研究を始めました。

それ以来、分子触媒を利用した触媒的アンモニア合成反応の開発について長年研究を行ってきました。目標は見えています。

：窒素は生体分子に柔軟性や個性をもたらししている。空気中にたくさんある安定な窒素の固定は人類の課題だった。それは20世紀初め、高温高压に触媒を組み合わせたハーバー・ボッシュ法で成し遂げられたが、製造過程でエネルギーを多く消費してCO₂も排出する。それに代わるアンモニア大量合成は果たして実現するか。西林教授らの野心的な企てに期待したい…