

## 第 134 回 オンライン特別技術懇談会の講演記録

### 日時・場所

2022 年 9 月 17 日(土) 13:30~16:00

ZOOM によるオンライン開催 参加人数 34 名

### 講演記録

#### 1. 超高齢社会の SDGs と革新的医療研究の潮流

講師 赤澤 敏之 氏 SCE・Net 会員、(現) 北海道立総合研究機構 道総研フェロー、化学工学会 フェロー、室蘭工業大学 非常勤講師、ホクレン肥料株式会社 特任技監

国連の持続的開発目標(SDGs)を達成し超高齢社会の健康寿命を延伸するため、整形外科や口腔外科領域では、高齢者や患者の生活の質(QOL)を脅かす骨折、骨疾患、歯周病、脊椎感染症に対する治療法と予防対策の確立が急務である。骨や歯の硬組織は人体を保護し、運動や咬合咀嚼を円滑に行う機能を担っている。QOLを維持し健康科学を充実させる医療には、バイオマテリアルの開発と普及が必要である。

我々は、医歯工業研究者や医師との連携協力により、動物やヒト組織を利活用した生体模倣バイオマテリアル、バイオセラミックスの改質技術、再生医療・細胞工学・感染症予防技術を検討し、医療産業の振興と関連機関の技術支援を図ってきた。

骨再生医療では、生体模倣性材料、ヒト脱灰象牙質マトリックス(DDM)、バイオフィルムの洗浄除去・殺菌技術の開発が重要である。市販医薬品や生物資源を利用して、超音波処理や金属積層造形法により組織適合性に優れたバイオマテリアルを開発し、骨再生医療への応用事例を紹介した。電解水(EW)の超音波照射は、硬組織界面の洗浄・殺菌に加え適度な微小亀裂を誘導するため、EWのpHと有効塩素濃度の選定により難治性骨髄炎や感染症の治療、骨微小損傷部の効果的設計や硬組織の再生、円滑な骨代謝、骨再生医療への応用が期待される。

生物資源の利活用と界面化学の革新により、細胞と材料のハーモニーを実現したバイオマテリアルの科学と医療は2030年までのSDGsを達成し、持続可能な社会・経済システムの構築に貢献するだろう。(赤澤敏之 記)

#### 2. エネルギーキャリアとしてのアンモニア

講師 秋鹿(あいか)研一 氏 工学博士 東京工業大学 名誉教授 沼津高専 客員教授 沼津中央高校 理事長

##### 2-1. はじめに

まず、エネルギーキャリアに関してSIPで実施してきた経過、展望を私見を交えながら、脱炭素政策への展開をお話しする、次にアンモニアを燃すとどうなるのか、NO<sub>x</sub>発生の問題等についてお話し、最後に今話題になっているブルーアンモニアとグリーンアンモニアについてお話しする。

## 2-2. SIPエネルギーキャリア技術開発の成果と脱炭素政策への展開

- (1) メタンがブルーで燃えるのと異なり、アンモニアは赤い炎を出して燃える。
- (2) 3つの歯車の絵で示すが、最初の歯車は、日本でアンモニアをエネルギーとして使う技術をやってみようという動きです。日本でALCAからSIPに拡大し、その後継として現在CFAAという財団が出来、多くの企業が参加している。次の歯車は、2003年に米国ではAmmonia Fuel Associationという組織ができ、それが4~5年前にAmmonia Energy Associationに名前が変わった。それは、アンモニアが国のエネルギー政策上重要であるという認識を古くからもっていたことを示す。日本がこの分野で成果を挙げたことにより、この2番目の歯車が回り始めた。3番目の歯車は欧州で主にオランダを中心として、アンモニア会議が生まれ、その歯車も回り始めて、世界的な動きとなった。
- (3) SIPの技術開発成果を簡単に纏める。この開発の前はウキペディアにはアンモニアは燃えて多量のNO<sub>x</sub>を出すと書かれていたが、この研究の成果がでると、ウキペディアの記述はアンモニアがきれいに燃え、NO<sub>x</sub>の発生は制御できると変わった。もう1つ大きな流れは、電力中研が可成り大型の石炭火力発電炉を持っており、この中にアンモニアを投入して一緒に燃やすことができるかをやり、2017年1月に可能であることが分かった。担当者はN<sub>2</sub>Oが出ないかを非常に心配していたが、全く発生しないことが分かりプレス発表した。併せて中国電力の水島火力発電所で7月の2週間実機で1%のアンモニアを混ぜて運転した。そこでも同様な結果が得られ、NO<sub>x</sub>も増えずにうまく燃えることが実証され、電気新聞に掲載された。これに電力業界は驚き、これが恐らく発端となり、アンモニアがエネルギーとして使えることが分かってきて、天然ガスから作るブルーアンモニア、再エネから作るグリーンアンモニアを安価にできる海外から運び、日本で使う絵が現実味を帯びてきた。
- (4) 経産省は以前、液体水素と有機ハイドライドを水素のキャリアにすることで進んでいたが、2019年のG7の会議で、経産省が日本の水素キャリアとして何がいいのかIEAに答申し、アンモニアがベストであるというレポートが届いた。そこで、経産省のなかでもアンモニアをどう扱うか議論され始めた。経産省としてオフィシャルにアンモニアをエネルギーとして出したのは2020年3月の新国際資源戦略であり、その中に「燃料アンモニアの利用拡大」が文書として出た。その中で懸念されたNO<sub>x</sub>排出が技術開発により制御可能であることが記され、初めて火力発電、工

業炉や船舶等のエネルギーとして使えるだろうとされた。この年の秋に管政権になり12月に新しいロードマップができ、そこにアンモニアというキーワードが入るようになった。2020.12.25の経産省のホームページにその「Background and concept」が掲載され、新しいロードマップが発表された。その中で14の成長分野の中に「Fuel ammonia」が新しく入った。急に政策が変わったことに懸念もあったが、これによりマスコミ報道が増え、企業の関心などが高まった。

- (5) アンモニアは輸送しやすくインフラもできているので、海外からの輸送するときのハブ港を2ヶ所（茨城県と瀬戸内海）作って全国に運ぶ構想が出た。第2段階はグリーンアンモニアであり、そのロードマップもできた。その中で、2030年頃にグリーンアンモニアも実用化され、それまではブルーアンモニアであることが記された。産業としては、実証できている石炭火力発電での混焼があり、面白いのは船のエンジンである。海外では大型船の燃料は全てアンモニアにするということで、中国、韓国、欧州は進んでいる。アンモニアの輸入元は、始めはサウジのブルーアンモニアで、豪州パースのブルーアンモニア、ヒューストンのブルーアンモニア、カナダのブルーアンモニアであり、量は少ないが始まっている。グリーンアンモニアは商社などが投資を始めて、豪州、中東、チリなどからも計画がでてきている。
- (6) アンモニア、水素が地球を救うことができるかと、エネルギーフロー図でその量を考えた。2016年化工誌に書いたが、2013年をスタートとし毎年1%エネルギーを減少させる、毎年天然ガスを1%、石油を2%、石炭を1%減らし、再エネは2%ずつ増やし、原子力は国の方針に沿って2020年までは全体の5%、2030年以降は全体の10%とし、天然ガス、石油、石炭を燃焼させた時のCO<sub>2</sub>排出量を算出した。そのような条件で見積もると、エネルギーは2013年に比し2050年には6割位に減少する。一方CO<sub>2</sub>は2050年では精々75%しか減らず、2050年にゼロには達せず、とても無理だと思っていた。このCO<sub>2</sub>不足分を埋めるのがCO<sub>2</sub>フリーアンモニアである。2050年のエネルギーの内の水素の半分をCO<sub>2</sub>フリーアンモニアとして輸入すると仮定する。そうすると、2050年には現在の世界需要の40%強、7200万トンのアンモニアを日本が使うことになる。そのためには海外に大型プラントを沢山作らなければならない。それには今から真剣に考えておく必要がある。最近その仮定を作り直し、もう少しドラスティックに考え、全エネルギーは同じく年率1%減らすとし、天然ガスは2%減、原油は3%減、石炭は5%減、再エネは2030年から50年に年率5%から2%に増、原子力は前と同じ仮定にした所、それでもCO<sub>2</sub>排出量は2030年に46%減、2050年でも70~80%減となり、これでもゼロエミッションにはならず、如何に大変であるか改めて認識した。数値を確かめながら計画していかないと絵に書いた餅になる。この場合でも同じ仮定で海外から補うCO<sub>2</sub>フリーアンモニア量を計算すると、2030年に2500万トン、2050年に3500万トンが必要となる。一方、経産省もCFAAのデータをベースに2050年にアンモニア燃料消費量を

3000万トンと、同程度の数値を出している。経産省は少しずつアンモニアを増やす計画であるが、私の計画はすぐにでもアンモニアを増やさないと、削減計画が実現しないと考えている。

- (7) 私の考えるいわゆる Aika モデルと政府予測—2030年までアンモニア輸入量が少ない予測—のずれが何かである。2030年にCO<sub>2</sub>排出量を46%削減するためには、石炭火力の毎年5%削減を2014年まで積み上げ—2020年現在これまで実行していない—、石炭のみで52%減としなければならない。この時点で輸入される水素の半量がアンモニアと仮定し、全て石炭との混焼へ使うと、アンモニア混焼率21%となり、政府のアンモニア輸入数字はこの1/8になる。これでは間に合わないと言うのが私の意見である。石炭輸入をドラスティックに減らす代わりにアンモニア輸入をドラスティックに増やし続けなければ計画は成立しないと考える。

### 2-3. 化石資源燃焼によるNO発生とアンモニア燃焼によるNO発生の違いと共通点

- (1) アンモニアが燃えるということはどういうことかである。
- (2) アンモニアをどんどん燃やせばいいじゃないか、沢山生産すればいいじゃないかと言う一方、地球環境の方々は今地球上の窒素循環が非常に問題であると指摘している。2018年の環境白書によると、窒素をバクテリアが消化できなくなり地球を滅ぼすかもしれないと言う。CO<sub>2</sub>の削減よりもっと大きな問題が窒素にある。肥料を100畑に播くと、半分が植物に吸収され、半分が畑に流出し地中に残る。植物に吸収された内、食料に使われるのは100の内の31で、食品ロス、消化されるのは14になる。畑に残るアンモニアはバクテリアによって徐々に酸化され、うまくやれば最終的にフリー窒素としてバクテリアが回収してくれるが、これが今追い付いていない状況である。すなわち、反応性窒素の年生産量が陸上バクテリアによる年間処理能力を超えていると環境学者は警告を発している。地球の中の窒素循環であるが、陸地（大陸）に入るN量、海へ流出するN量、それぞれから大気に放出されるN量がある。ハーバーボッシュ以前(1860年)とそれ以降(1995年)で比較すると、外から入るN量は1995年では、1860年には殆どない化石資源の燃焼による多量のN量(NO<sub>x</sub>として)が入り、有機農法によるN量も倍程度に増大、一方、自然界によるN固定量は変わらない。一番大きいのはハーバーボッシュ法により反応性のN量が肥料として投入されていることである。陸地に残存するN量は $60 \times 10^{12}$ g 毎年増加し、これが限界にきているとの指摘である。
- (3) 今、化石資源を使ってエネルギーを得ているが、それにアンモニアが加わったらどうなるかをNO<sub>x</sub>の視点から考えてみる。燃焼から生じるNO<sub>x</sub>は吸収されたり、触媒によって変換されたりし、この技術は日本が一番進んでいる。一方、NO<sub>x</sub>と同時に多環芳香族が発生、これは発がん性物質であり、NO<sub>x</sub>と反応したりする。化石

資源の燃焼を制御することは非常に重要である。日本は1975年から発電所の脱硝装置をどんどん増やすことで、全NOx量が1960年代に比し2010年には約70%減になり、現在はもっと減っている。日本ではNOx抑制はできているが、世界全体では不十分であり、日本の脱硝技術を海外に輸出する必要がある。

- (4) アンモニアが燃えるということをもう一度紐解く。1940年ベルギーのバスが1年間アンモニアで動いていた。水性ガスとの混焼で、アンモニアタンク、COと水素のポンペを積んでいた。何の改良もなく事故もなく走っていたようである。その後も90年代、2000年代に多くのアンモニア自動車が登場した。米国のピックアップトラック、イタリアでトヨタ車にアンモニアを入れて走行した例、起亜はアンモニア自動車を少し出していたこともある。各社今、乗用車は無理かもしれないが、船については大型船は全てアンモニアの計画になった。MAN社はアンモニア焚機関を搭載した船舶の開発を進めている。
- (5) もう一つ考えなければならぬことがある。アンモニアを燃焼させて得られるエネルギー量は、水素とも天然ガスとも同程度で遜色がなく、ガソリンより劣る。ガスの膨張も殆ど同じである。その意味でエネルギー的には、充分アンモニアは内燃機関の燃料として価値があり、むしろノッキングしないと言われている。建設省の海事研究所のデータによると、普通にアンモニアをエンジンに入れて廻すと、結構アンモニアがリークしたり、CO<sub>2</sub>が出たり、N<sub>2</sub>が出たりする。しかし、工業炉でアンモニアを燃焼させた時の大阪大学の赤松研究室のデータによると、普通にメタンとアンモニアを混焼しようとする、従来技術ではNOxが2000ppm位でしてしまうが、2段燃焼とか最適化燃焼をすると、殆ど出ないように制御できる。またアンモニア100%の専焼でも普通ではNOxが2000ppm以上出るが、2段燃焼とか最適化燃焼では混焼と同程度までに抑えられる。混焼でも専焼でも2段燃焼の最適化燃焼により、加熱炉の環境基準値以下に抑えられる。これは、アンモニアの還元過程で生じる窒素酸化物をアンモニアで再還元させるために、アンモニアを炉内に再循環させてNOxを減らしていると考えられる。(アンモニア燃焼のNOx制御に関しては東北大学小林・早川研究室が発表された論文で説明されたが、ここでは省略する。) また電力中研は、石炭火力発電で石炭にアンモニアを投入した時、石炭専燃時に比較してNOxを増加させないために、アンモニア投入位置を探る実験を行った結果、工夫すればアンモニアがうまく燃えることが分かった。それでもNOxがでる。その最後に出るNOxは何かだが、Fuel NOxではなく、空気中の窒素と酸素が反応したNOxである。メタンが酸化するとき少し過剰な酸素を残して燃焼する式を作る。そのとき平衡計算をして1300℃位で発生するNOxは900ppm位で、これは防ぐことができず、炉から出た後取り除いている。アンモニアを燃焼する場合でも同じことをすれば、結局アンモニアは全部燃え、酸素と窒素が残り、それからできるNOxは平衡的に決まるので、天然ガスの燃焼であろうとアンモニアの燃焼であろうとも、で

きる NOx 発生量は殆ど同じであるというのが私の見解である。ですから NOx は平衡論的には同じで、アンモニア燃焼で NOx が沢山出るということはなく、制御できるが、ゼロではなく。それは空気中の酸素と窒素の反応によって生じるものである。

- (6) もう一つ問題なのは N<sub>2</sub>O である。環境省のデータによると、畑に肥料を播いたとき、肥料が残った後 N<sub>2</sub>O としてどの位放出されるのかをみると、1%位残って N<sub>2</sub>O になる。これは莫大な量で、N<sub>2</sub>O の温暖化係数が CO<sub>2</sub> のその 298 倍のため、CO<sub>2</sub> に比べて膨大な量、燃料として MJ 当たり 100g の CO<sub>2</sub> が発生する。今、知らず知らずに農業で使っている肥料からの N<sub>2</sub>O による温暖化の割合が非常に大きい。それに対してボイラーで上手に燃焼させれば ppm 程度の N<sub>2</sub>O しかでず、N<sub>2</sub>O による温暖化の影響は無視できる程小さい。アンモニアを燃焼させると N<sub>2</sub>O が出て、その影響が大きいと言われるが、それは環境省のデータから否定することができる。

#### 2-4. ブルーアンモニアとグリーンアンモニアの課題と展望

- (1) ブルーアンモニアは天然ガスから作るが、でてきた CO<sub>2</sub> をどこかで埋める必要がある。グリーンアンモニアは再エネのプラントが高いという欠点がある。2002 年にノースダコタ州の Beulah という所で、石炭をガス化して CO<sub>2</sub> と水素にし、CO<sub>2</sub> も回収して、メタノールにしたりアンモニアにしたりしている。そこで、CO<sub>2</sub> を回収してカナダにパイプラインで送っている。DOE の援助であるが、2002 年にそういうことを既にやっており、Beulah という所からカナダの SASKATCHEWAN に向かって、途中 10ヶ所位の廃油フィールドを経由、そこで CO<sub>2</sub> を販売している。こういうビジネスが成り立つ位、いわゆる CCS とか EOR という技術はやるべき所ではやっている。日本ではなかなかこういう場所はないが、海外ではこういう所が沢山あり、そこで CO<sub>2</sub> を埋めてもらいアンモニアを持ってくる。三菱重工・日石グループは、ヒューストンの近くの油田を掘るとき、近くの火力発電所の CO<sub>2</sub> をここに埋め戻す事業を NEDO のプロジェクトで実証実験をしている。
- (2) カリフォルニアは環境に厳しい州だが、カリフォルニア州政府はいかなる燃料でも燃料の MJ 当たりの CO<sub>2</sub> の排出量 (GFP: Carbon Foot Print) をチェックしている。ガソリンの例であるが、油田を掘削時に 11g/MJ、輸送時で 1g/MJ、精製時で 13g/MJ、運転時に 73g/MJ、合計で 99gCO<sub>2</sub>/MJ となるが、それよりアンモニアが低いといけない。例えば石炭をガス化してその時出る CO<sub>2</sub> がどの位かという、簡単に回収できる部分と簡単に回収できない部分があるのを計算してみた。石炭を水蒸気改質する反応は非常に大きな吸熱で、CO<sub>2</sub> と水素がでるが、この CO<sub>2</sub> はプロセス反応から出る濃い CO<sub>2</sub> なので、簡単にアミンで吸収して分離できる。一方この吸熱を取り戻すために余計に石炭を燃さなければならない。その時出る CO<sub>2</sub> 量が合計すると非常に多い。今度天然ガスからアンモニアを作る時、改質して CO と水素を作るが、それを窒素含有した空気でする。その時、できた CO をシフト反応により CO<sub>2</sub> に

して、これをアミンで回収する。それで合成ガスにしてアンモニア合成する。このプロセスのCO<sub>2</sub>は今でもピュアなCO<sub>2</sub>として尿素製造に使ったり、販売したりする位、回収は簡単である。この水蒸気改質の吸熱のために天然ガスを余計に使って出るCO<sub>2</sub>を考慮して、比較してみた。ブルーアンモニアでは天然ガスから作ったアンモニアはMJ当たり24.3g位のCO<sub>2</sub>が発生、輸送まで含めたWell to wheelでは50gCO<sub>2</sub>/MJと推定され、また、天然ガスからの水素は30.2g、石炭から作ったアンモニアは61.5g、石炭から作った水素は73.4gと大きい。天然ガスから作ったアンモニアの場合、CO<sub>2</sub>発生量が最も少なく、Well to wheelでは50gCO<sub>2</sub>/MJと推定され、カリフォルニアのガソリン（99gCO<sub>2</sub>/MJ）の半分である。ブルー水素のCFP値はアンモニアよりも大きい上、海上輸送用に加工する場合には更に不利になり、Well to wheelの値からすると問題となる。勿論、石炭や褐炭から製造したアンモニアや水素にすればよいとの意見もあるが、Well to wheel のCFP値が73.4gCO<sub>2</sub>/MJと非常に大きくなる。この値は石炭や褐炭の直接燃焼値（112 gCO<sub>2</sub>/MJ）の66%に相当し、燃焼CO<sub>2</sub>を回収すれば価値は上がるがコストもかさむ。

- (3) 再エネを使って電解で水素を作る時は過電圧が影響する。アンモニア合成に必要な水素を水から作るには理論上1.23V(ギブスエネルギー355.6 kJ/mol/NH<sub>3</sub>)が必要である。水の電解が問題となってくる。
- (4) アンモニアを大量に製造しているYARAという世界で一番大きい肥料メーカーの主張をそのホームページでみる事ができる。すなわち、天然ガスからアンモニアを作るとき沢山のCO<sub>2</sub>を出すかも知れない。けれども窒素肥料は木を育てることで、CO<sub>2</sub>を減らしており、減る量は天然ガスからアンモニアを作るときよりも10倍位多いという。植物が吸収したCO<sub>2</sub>は食料にもなり、バイオマス（バイオ燃料）にもなる。そのようなキャンペーンを行っている。私は前にアンモニアを肥料として土に播くのは温暖化に大きな影響があると言った。そのとき言及しなかったのは植物がCO<sub>2</sub>を吸うことであり、YARAはその影響が大きいことを強調している。
- (5) 私は国際会議ではよく、アンモニアがワインのボトルだとすると、ラベルにWell to wheelの値と値段を書いて世界中に売り出すべきだと言っている。
- (6) 2週間位前の今、大変なことが起こっていることが分かった。2022.8.25のNHKの記事“アメリカ アンモニア増産 クリーンなエネルギーにも期待”([https://www3.nhk.or.jp/news/contents/ohabiz/articles/2022\\_0825.html](https://www3.nhk.or.jp/news/contents/ohabiz/articles/2022_0825.html))を紹介する。
- (7) 私は1年程前から南アフリカとの共同研究を始めている。南アフリカの西の砂漠の近辺は世界最高の太陽光密度2,800kWh/m<sup>2</sup>/年である。南アフリカは今年2月に水素ロードマップを改定して、ここでグリーン水素とアンモニアを製造する計画にした。アンモニアを製造するのは我々との共同研究の影響があったようである。アンモニアを作ってヨハネスブルクの近くの石炭産業地区に水素源として供給する。あ

るいは肥料として供給するというロードマップができています。SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development) という開発計画への技術協力で、JSTとJICAの支援を得て、南アフリカのノースウェスト大学のバサラーボフ教授と日本の沼津高専と日本の6大学の協力を得た共同研究で、再生可能エネルギー水素を用いたアンモニア合成システムの研究開発ということで、水電解、アンモニア合成、分離の新材料開発及びシステム制御の研究を進めています。

(文責・飯塚弘)