

水素社会への展望と課題

さいとうあきのり
齋藤 昭則

1. はじめに

地球温暖化が加速しつつあり、酷暑や干ばつの懸念、海面温度の上昇による大型台風の発生や豪雨災害などが危惧されている。地球温暖化のメカニズムについてはいくつかの説があり、必ずしも確定しているとは思われないが、大気中の二酸化炭素濃度の上昇による温室効果を主原因とする説が有力視されている。大気中の二酸化炭素濃度の上昇は、人類の活動を支えるエネルギーとして石炭・石油・天然ガスなどの化石燃料を多用していることが大きな要因である。そのため、化石燃料の使用を減らす取り組みがなされつつある。一方、化石燃料の埋蔵量は有限であり、人類の持続可能な活動のためには化石燃料以外のエネルギーを考えなければならない、との観点からも脱化石燃料への取り組みが重要性を増している。

なお、核エネルギーは二酸化炭素を発生しないが、その原料になっているウラン鉱は有限である。また、使用後の高濃度放射性物質の処理が困難であるという別の大きな問題をかかえており持続可能なエネルギーとは言い難い。

化石燃料ではない持続可能なエネルギーとして、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスなどの再生可能エネルギーが挙げられている。すでに世界中でこれらによる発電が進められており、現状に必要な電力の一部を担っている。しかし、再生可能エネルギーはエネルギー密度が低いので現状の人類の活動を支える全エネルギー量を供給するためには、想像を絶するような大規模な発電設備の構築が必要であろう。また、再生可能エネルギーは発電設備を設置する適地が限られることも欠点である。例えば日本国内の全エネルギー需要を想定する場合、国内に設置できる再生可能エネルギーの発電設備だけでは供給は不可能ではないかと思われる。そのため、現在、エネルギー源として海外から輸送している石炭、原油、液化天然ガスと同様に、再生可能エネルギーによる電力を輸送する必要があるものと考えている。

海外からの電力の長距離輸送を考える場合、電力ケーブルでは敷設の困難さや損失の発生で得策とは言えない。大容量電池を搭載した船、という考えもあろうと思うが、大容量で低コスト、長寿命な蓄電池が必要であり、これに対応できる蓄電池が現在では得られていない。そのため、電気エネルギーを水素に変換し、さらに水素を液体に変換して輸送する必要があるだろうと考えている。

こうした背景のもと、本レポートでは再生可能エネルギーによる電力を水素に変換、さらに液体への変換も含めて、人類の活動に必要なエネルギーを確保・輸送し、持続可能な社会を構築するための水素社会の展望とその課題を概説する。

2. 水素の生産方法

水素は地中に埋蔵されているものではないため、何らかの手段で生産する必要がある。水素は肥料や化学製品の製造に不可欠なアンモニアの原料であり、また石油精製にも使われるため、現在、世界で年間約 5000 億 Nm³ 生産されていると言われている⁽¹⁾。その約 40%がアンモニア製造、約 20%が石油精製に使われている。日本の国内需要は年間 150~200 億 Nm³ であり、その約 50%が石油精製に使われている。日本でエネルギーとして水素が使われているのは宇宙ロケット用の液体水素であり、年間 300~500 万 Nm³、国内需要のわずか 0.03%である。

このように水素は、現在、エネルギー用ではないが、かなりの量が生産されている。その生産方法は大部分が天然ガスの水蒸気改質によるもので、天然ガスが原料である。従って、現状の生産方法で得られた水素をエネルギーとして使うのでは、二酸化炭素の排出削減にはなり得ない。電気自動車は二酸化炭素を排出しない、と言っても、石炭や天然ガスの燃焼で発電した電気を蓄電池にためて使っているのでは、二酸化炭素を排出しないとは言えないと同様である。

ただし、水素の生産方法には表 1 に示すように種々の方法があり、この表の非化石資源利用(すなわち再生可能エネルギー利用)による電力での水の電気分解によれば、二酸化炭素の発生はなく、真に持続可能なエネルギーになり得る。上述の電気自動車も非化石燃料起源の電力を使うならば、同様に二酸化炭素を排出せず持続可能な移動手段と言える。

表1 水素の生産方法

	方法	原料	エネルギー	技術的開発レベル
化石資源利用	水蒸気改質	天然ガス、LPG・ナフサ	熱	実用化レベル
	部分酸化	LPG・ナフサ、原油、石炭	熱	実用化レベル
	接触改質	LPG・ナフサ	熱	実用化レベル
	コークス炉ガス	石炭	熱	実用化レベル
	電気分解	水	電力(化石燃料起源)	実用化レベル
非化石資源利用	電気分解	水	電力(非化石燃料起源)	実用化レベル
	熱化学分解	水	原子力、太陽熱	実証レベル
	バイオマス転換	バイオマス	熱、微生物等	実証レベル
	光分解	水	太陽光	基礎研究レベル

【出典】 http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt019j/0210_04_feature_articles/200210_fa02/200210_fa02.html

なぜ、現在は水素生産を天然ガスの水蒸気改質によっているのかは、生産コストが安いからである。将来、非化石燃料起源の電力コストが低減する、あるいは二酸化炭素の排出が国際的に深刻な問題として認識され、化石燃料に高額な炭素税がかかる、というような事態になれば、この状況は一変するものと考えられる。

以上述べたように、持続可能なエネルギー社会を実現するためには、**再生可能エネルギーによる発電 → 水の電気分解による水素製造(あるいは電気の直接利用)**の流れが大前提である。

水の電気分解は、従来は水にアルカリ物質を加えて電気分解するアルカリ水電解法が用いられてきたが、現在は効率の高い固体高分子水電解法が主流になっている。この固体高分子水電解法の基本構成を図1に、これを用いた市販の水電解装置の外観を図2に示す。

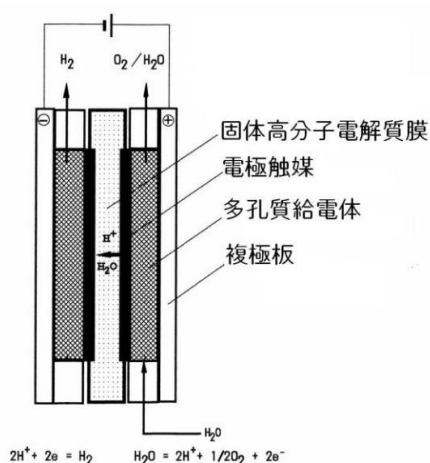


図1 固体高分子水電解法の基本構成



図2 固体高分子水電解装置の例

【出典】<http://www.hess.jp/Search/data/33-01-019.pdf> (神鋼環境ソリューション SH30D 型)

3. 水素の貯蔵と輸送

水素の貯蔵技術を表2(次ページ)に示す。

水素は常態では気体である。これをそのまま貯蔵・輸送しようとするとは極めて大きな容器が必要であり現実的ではない。そのため、気体で貯蔵・輸送しようとするならば圧縮して高圧にする必要がある。現在、一般的に高圧タンクで貯蔵・輸送する場合には35～45MPa(350～450気圧)に圧縮している。トヨタ自動車(株)や本田技研工業(株)で生産している水素を燃料にする燃料電池車では、航続距離を伸ばすために70～80MPa(700～800気圧)のかかなりの高圧で水素を搭載している。このための燃料タンクはカーボンファイバーで製作した特殊な高圧タンクである。

一方、水素を液体状態にすれば体積は気体の約 1/800になり、上記の気体水素80MPa(800気圧)と同等の体積になるので貯蔵・運搬に便利である。ただし、水素を液化するには-253℃の極低温にしなければならないので特別な液化装置が必要になる。この極低温の液化水素は真空

断熱層のある断熱容器で貯蔵・輸送するが、低温状態を維持するために液化水素自体の気化熱を利用している。そのため、常時、液化水素は蒸発し大気中に発散している。このボイルオフにより損失が発生する。液化水素での貯蔵・輸送を提唱している川崎重工業(株)では、ボイルオフの低減に向けた貯蔵容器の改良を行っており、ボイルオフ率は1日あたり蓄積量の0.4%以下としている⁽²⁾。

液体で水素を貯蔵・輸送する他の方法として、水素を含む液体化合物を使う方法がある。その一つにメチルシクロヘキサン(MCH)を使う方法がある。MCHはトルエンの水素化によって得られる。トルエンは代表的な芳香族炭化水素であるベンゼンの6個の水素原子の一つをメチル基で置換した構造である。トルエンと水素を化合させると二重結合が開いて6個の水素原子が結合する。すなわち、3個の水素分子が取り込まれることになる。MCHはベンゼンと類似の臭気があるが、毒性はほとんどなく常温で液体なので、このMCHを貯蔵・輸送する。水素を取り出したい時にはMCHを高温下で触媒に通すと、水素とトルエンに分離され水素が得られる。この方法を提唱している千代田化工建設(株)では、この方法で取り扱う水素を「スペラ水素」⁽³⁾と名付けて、MCHの合成と水素の分離を連続的に行うパイロットプラントを試作している。この方法の課題は毒性の強いトルエンを、合成するMCHとほぼ同量使用しなくてはならないこと、分離した水素には低濃度ではあるがトルエンが含まれるため、水素純度を上げるための装置が必要になることである。

水素を液体の状態に取り扱う別の方法として、水素ではなくアンモニアにして扱う方法がある。アンモニアの現状は2章で述べたが、アンモニアはそれ自体を燃料として使うこともできる。アンモニアは水素と窒素の化合物であり炭素を含まないため、燃料として用いた場合でも二酸化炭素を

表2 水素の貯蔵技術

状態	名称	摘要
気体		高圧で貯蔵・輸送(一般的には35~45MPa, 燃料電池車では70~80MPaでの搭載)。そのため昇圧装置や高圧タンクが必要。トヨタやホンダの燃料電池車で採用。
液体	液化水素	-253℃までの冷却が必要。ボイルオフによる損失あり。川崎重工が推進。
	メチルシクロヘキサン(MCH)	水素とトルエンの化合物。 $3H_2 + C_6H_5CH_3$ (トルエン) \leftrightarrow $C_6H_{11}CH_3$ (MCH) MCHには毒性がないが、トルエンには強い毒性があるため、トルエンの扱いに注意を要する。 千代田化工建設が推進。
	アンモニア(NH ₃)	水素と窒素の化合物。 $3H_2 + N_2 \leftrightarrow 2NH_3$ 劇物であり、強い刺激臭がある。 肥料の原料として大量に使われている。
固体	水素吸蔵合金	重量大。耐久性に課題。

排出しない。アンモニアは常温で0.8MPa(8気圧)に加圧すると液体状態になるので、LPGと同様の容器(ボンベ)に加圧状態で入れ貯蔵・輸送が可能である。課題はアンモニアが劇物であり強い刺激臭があること、また、アンモニア合成は1906年に発明されたハーバー・ボッシュ法が主流であるが、鉄系触媒を用いて高温・高圧下で水素と窒素を直接反応させるため、生産時にかなり多くのエネルギーを使うことである。これに対し、1998年に米国のKBR社で開発されたKAAPプロセスでは、ルテニウム系触媒を使うことによって低圧での反応が可能になった。さらに最近では東京工業大学の原亨和教授、北野政明准教授らが、バリウムを加えたカルシウムアミドにルテニウムのナノ粒子を固定化した触媒で、300℃以下という低温で、従来のルテニウム触媒の100倍高い効率でアンモニアを合成できることを発見した⁽⁴⁾。このように、より低温・低圧でアンモニアを合成できる触媒の研究が精力的に進められており、将来は生産時のエネルギーが大幅に低減されるものと予想される。

さらに、表2の最下段に記したように、水素吸蔵合金を用いて水素を固体の状態にして貯蔵・輸送する方法も提唱されている。しかし、主流とされていたニッケル系の水素吸蔵合金は重量が重く輸送には適さないもので、その後の展開は進んでいない。

以上のように水素を貯蔵・輸送する方法にはいくつかの方法が提唱されているが、決定的な方法はまだ確立されていない。この中で、筆者は水素をアンモニアにして貯蔵・輸送・使用する方法を支持したい。その理由は、アンモニアはすでにかなり大量に生産・使用されているからである。化学肥料業界資料⁽⁵⁾によると2017年度の世界全体の生産量は15,000万トンとのことであり、これだけの量が全世界に流通している。米国では毎年1,000万トン以上のアンモニアが生産されており、肥料として使用するためのパイプラインが州を縦断して建設されている(図3)⁽⁶⁾。

日本では過去には国内生産が多かったが、現在は原料(天然ガス)の安価な海外での生産に押され、国内での生産プラントが次第に稼働率を落とし輸入に頼る割合が多くなっている⁽⁵⁾。海外からのアンモニア輸送には、専用の輸送船が運行され、国内では大型トレーラーでの輸送が行われている。従って、アンモニアを輸送するためのインフラはすでに整っていると見える。

一方、アンモニアの課題として劇物であり強い刺激臭があると上述した。劇物としての取り扱いに注意を要することは言うまでもないが、刺激臭のあることは、むしろ少量の漏れに対して検知が容易になるとも考えられる。

以下の章ではアンモニアをエネルギーとして使う方法の検討結果を示す。

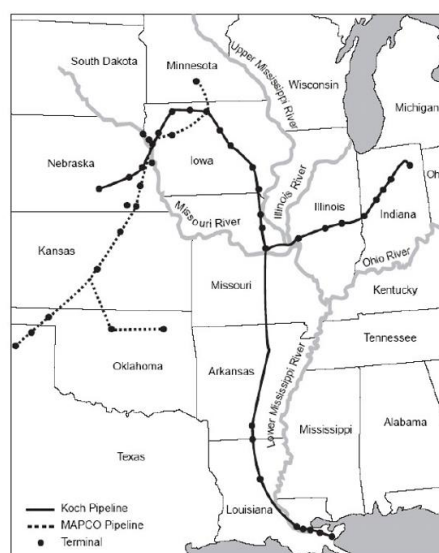


図3 米国のアンモニア輸送パイプライン網

4. エネルギー源としてのアンモニア

4.1 レシプロエンジン(火花点火エンジン)用燃料

アンモニアをエンジンで使う場合には、要求点火エネルギーが高く(ガソリンの約60倍)、火炎伝搬速度が遅い(ガソリンの約1/5)ため、ガソリンで運転する場合に対して、高エネルギー点火装置や火炎伝搬速度向上のための添加物(水素混合など)が必要となる。しかし、高負荷運転時にはアンモニア100%でも燃焼が安定する。また、耐ノック性が高いので、高過給が可能になる。

小池らは単気筒エンジンを用いて火花点火アンモニアエンジンの性能を調べ、この結果を用いて一般に使われている列型エンジンを想定した性能をシミュレーションで求めた⁽⁷⁾。結果を図4に示す。この結果から過給を行ったアンモニア100%エンジンの熱効率はディーゼルエンジンを越え、43%程度に達することが分かる。排出ガス中には、当然のことながら一酸化炭素(CO)と炭化水素(THC)は検出されない。二酸化炭素(CO₂)がわずかに検出されているが、これは大気中(Room; 実験室内)の二酸化炭素濃度である。当量比が小さい(燃料量が少ない)場合に窒素酸化物の排出が検出されているが、理論混合比付近(網掛け部分)ではほとんど検出されない。

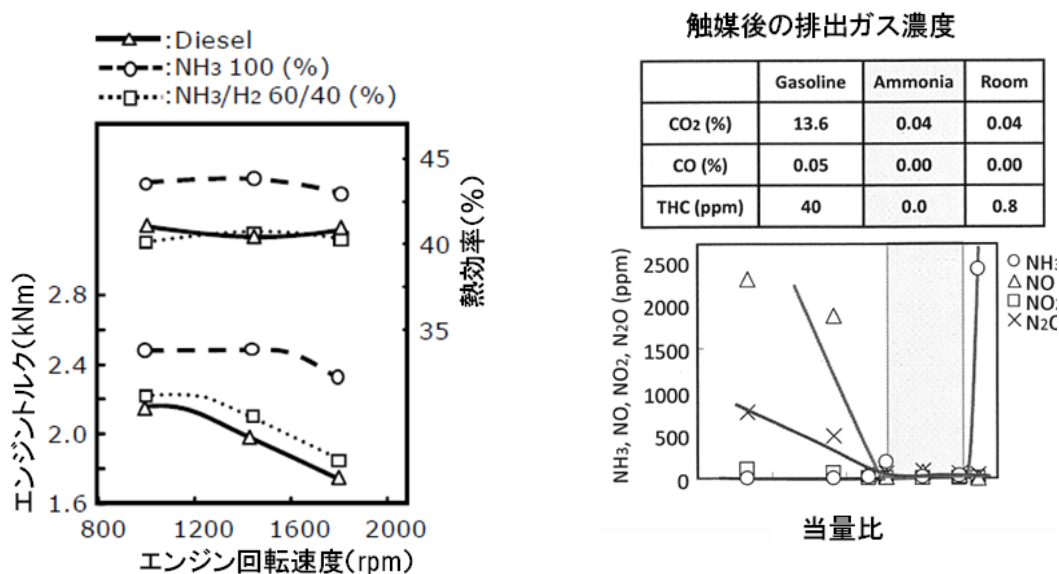


図4 アンモニア燃料レシプロエンジンの性能

これらの結果を参考にして、筆者が普通乗用車を対象にしてエネルギー源の重量(燃料+タンク重量)を調査し比較した結果を表3(次ページ)に示す。この比較ではガソリン車が最もエネルギー源の重量が小さく、ガソリンが移動体用のエネルギー源としては最も優れていることが分かる。貯蔵や給油などの取扱いも容易である。

一方、アンモニアエンジン車はアンモニアの熱量がガソリンの半分程度なので、燃料タンク体積・重量とも2倍程度に大きくなる。MCH使用の燃料電池車も、現状の燃料電池車よりも燃料+タンクの体積・重量は大きくなる。また、電気自動車用電池は最新の改良型でも体積・重量が大きく、移動体用のエネルギー源として適しているとは言い難い。

現在、世界の自動車保有台数は13億台と言われているが、そのほとんどはガソリンあるいは軽油を燃料にするレシプロエンジン車である。これはガソリンや軽油のエネルギー密度が高く、取り扱いも便利だからである。ただし、二酸化炭素を排出する。そのため、二酸化炭素を排出しない燃料電池車や電気自動車が次世代自動車と言われて普及が進められている。しかし、燃料電池には白金、蓄電池にはリチウムがかなりの量必要であること、高性能モータにはレアアースが必要であることなど、今後生産台数が増えた場合、こうした材料が不足するのではないかと懸念がある。この点、レシプロエンジンはアルミニウムや鉄が主体であり、これらはリサイクルも容易なので、アンモニアを燃料にするレシプロエンジンの選択もあるのではないかと考えている。

表3 乗用車用エネルギー源の比較

	走行距離	エネルギー源	燃料体積	エネルギー源重量	燃料タンク重量	燃料+タンク重量
ガソリン車 (例トヨタマークX)	650km	ガソリン (実燃費 10km)	65L	49kg	20kg (標準品)	69kg
アンモニアエンジン車： 推定(マークXベース)	同上想定	アンモニア (燃費同等)	170L	116kg (熱量換算)	37kg (LPG用)	153kg
電気自動車 (日産リーフe+)	570km (JC08)	電力 (電池容量： 62kWh)	約1155L (バッテリー体積)	440kg (バッテリー重量)	501kg (走行距離 650km換算)	501kg
燃料電池車 (トヨタMIRAI)	650km	(高圧)水素	122L	5kg	83kg	88kg
MCH燃料電池車：推定 (トヨタMIRAIベース)	同上想定	水素(MCH)	105L	MCH：81kg (水素：5kg)	38kg (標準品から 推定)	119kg

4.2 極超音速実験機(ロケット機)の燃料

1954年、米空軍、米海軍、NACAによってマッハ4以上の極超音速機の研究計画が決定された。これを受けてノースアメリカン社ではアンモニアを燃料にする高高度極超音速実験機を開発した⁽⁸⁾。X-15と名付けられた実験機の飛行写真を図5に示す。

この実験機のエンジンは液体アンモニアと液体酸素を用いるロケットエンジンであった。幾多の改良を重ね、200回に及ぶ試験飛行の中で、最高高度107960m、マッハ6.7を記録したとされている。

NACAはその後NASAに代わるが、このX-15での実験が米国の宇宙開発に多大な示唆を与えたとされている。なお、現在の宇宙ロケット用燃料には液体水素が使われている。



図5 アンモニア燃料極超音速実験機 X-15

4.3 ガスタービン用燃料

壹岐らはガスタービン発電機の燃料としてアンモニアを用いた実験を行っている⁽⁹⁾。トヨタ・タービンアンドシステム社(2018年に(株)トヨタエナジーソリューションズに社名変更)の灯油焚き50kW マイクロガスタービンをベースエンジンとして改造を行い、アンモニアで運転できるようにした。

試験運転の状況を図6に示す。運転は最初に灯油でスタートし、10分後からアンモニアの供給を始め、その後、灯油の量を減らして、20分後にはアンモニア100%運転に切り替えている。さらにアンモニア供給量を増やし、定常回転に達した後、運転が継続されているのが確認できる。

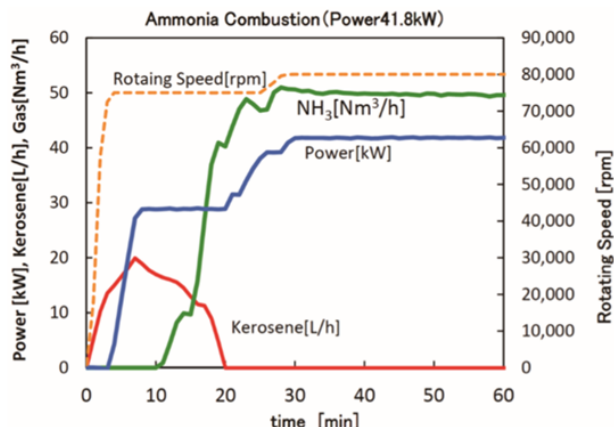


図6 アンモニア燃料ガスタービン発電機の運転状況

(株)IHI ではアンモニアと天然ガスを混焼する2000kW 級のガスタービン発電機を開発した⁽¹⁰⁾。

4.4 燃料電池の燃料

イスラエルの GENCELL 社では、アンモニアを燃料にする燃料電池(出力4kW)を開発し、販売している⁽¹¹⁾。図7にシステムの外観を示す。図中①のアンモニアクラッカーでアンモニアから水素を分離し、②の燃料電池に供給する。



1. Ammonia cracker
2. 4kW fuel cell generator
3. Energy bridge for regulating power output
4. Heat utilization unit for dissipating excess

図7 アンモニア燃料電池

5. アンモニアを使用したグローバル水素社会の構想

前章までに述べたアンモニアの特性を踏まえて、再生可能エネルギーを基にして水素を生産し、アンモニアに変換して人類の活動を支えるエネルギーとして使う持続可能な水素社会の構想を図8に示す。

グローバルには再生可能エネルギーとして広大な砂漠に太陽電池を設置して発電した電力を使う。この電力により水電解装置を作動させて水素を生産、さらにアンモニアに変換する。図ではこのアンモニアを日本に輸送する矢印のみを記しているが、同様に全世界に輸送する。もちろん、各国内に設置されている再生可能エネルギー発電装置による電力は、自国内(近隣諸国内も含む)の送電網での送電が基本になるが、送電網がない場合にはアンモニアでの輸送を行う。

日本では再生可能エネルギーの推進策としてFIT制度が施行され、各地で太陽光発電装置の設置が進んだ。しかし、FIT制度が終了時期を迎え、また、太陽電池の設置可能な土地が少なくなったことなどで、今後は海上での風力発電が有望である。秋田沖はその好適地になっている。ただし、沿岸付近に大型の風力発電装置を設置すると、景観を損なうことや低周波振動による健康被害が懸念される。このため、かなりの沖合に設置し、海上で水素、アンモニア変換を行い貯蔵・輸送するのが望ましい。

農業が主力産業である秋田県では、秋田沖に設置する海上風力発電によって生産したアンモニアを用いて窒素肥料として使うシステムを構築するのはどうであろうか。また、農業機械のエンジンを二酸化炭素を排出するディーゼルエンジンからアンモニアエンジンに代え、化石燃料を使わない持続可能な社会の先駆けを実現するという構想はどうであろうか。

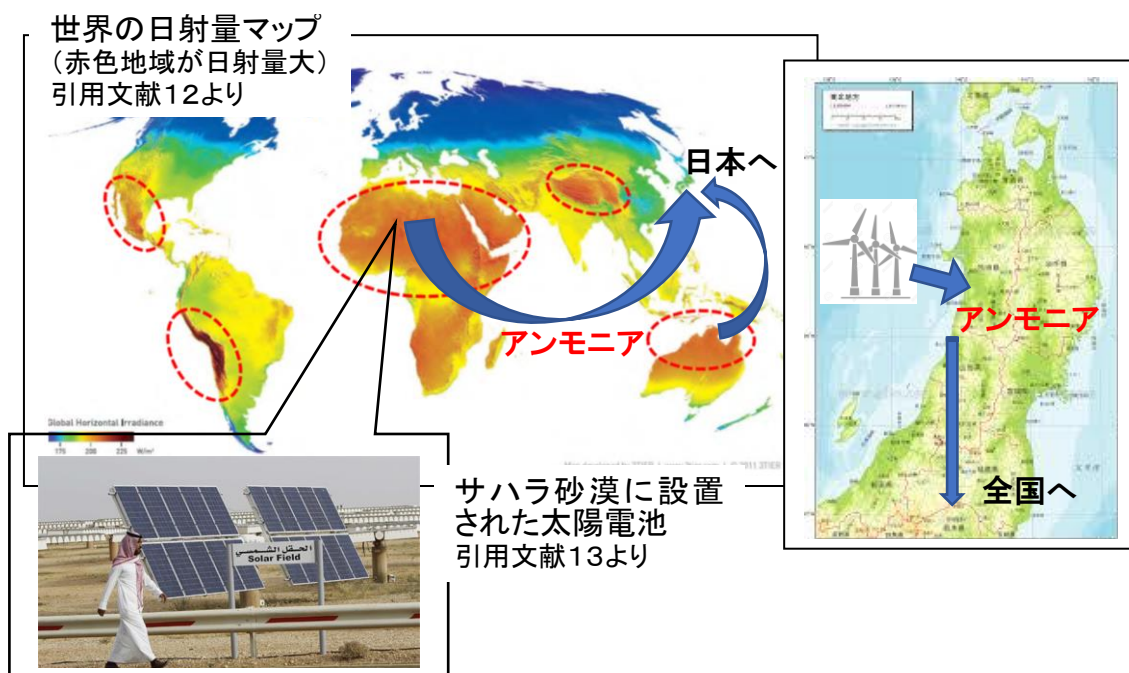


図8 グローカル水素社会の構想

6. むすびに代えて(窒素循環型社会)

再生可能エネルギーによって生産した水素さらにアンモニアをエネルギー源にすることで、化石燃料を使わない持続可能な社会を実現する構想を述べた。この構想は見方を変えると、大気中の窒素を循環させているとも言える(図9)。すなわち、

地上の水を原料にして水素を作り、大気中の窒素と化合させてアンモニアにし、これを肥料や燃料にする。使われたアンモニアは、窒素に戻り大気中に拡散する、というサイクルを繰り返すということである。

このような窒素循環型社会が実現すれば、地中の炭素には手をつけず持続可能な社会が成立するだろう、と考えられる。

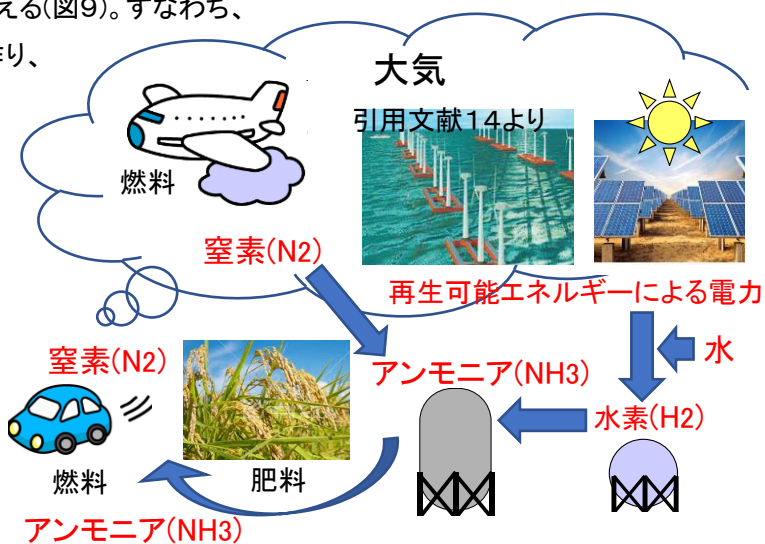


図9 窒素循環の姿

7. 引用文献

- (1) http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt019j/0210_04_feature_articles/200210_fa02/200210_fa02.html
- (2) <https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1402/25/news077.html>
- (3) <https://www.chiyodacorp.com/jp/service/spera-hydrogen/innovations/>
- (4) <https://www.titech.ac.jp/news/2018/040483.html>
- (5) [http://bsikagaku.jp/f-materials/USGS%20Ammonium%20Report%20\(2018\).pdf](http://bsikagaku.jp/f-materials/USGS%20Ammonium%20Report%20(2018).pdf)
- (6) <http://www.hess.jp/Search/data/33-04-020.pdf>
- (7) M. Koike, et al. ; Ammonia as a hydrogen energy carrier and its application to internal combustion engines, Sustainable Vehicle Technologies, Nov. 14-15, 2012, Gaydon, Warwickshire, UK
- (8) [https://ja.wikipedia.org/wiki/X-15_\(航空機\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/X-15_(航空機))
- (9) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcombsj/58/186/58_215/_pdf
- (10) https://www.ihl.co.jp/ihl/all_news/2018/technology/2018-4-18/index.html
- (11) <https://www.gencellenergy.com/our-products/gencell-a5/>
- (12) https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodench/suiso_nenryodench_wg/pdf/005_02_00.pdf
- (13) <https://money-academy.jp/saudi-solar-power/>
- (14) <http://www.eng.osakafu-u.ac.jp/Japanese/09koho/news/45/45-3.pdf>