特集「水素社会を目指して」

解説(Commentary and Discussion)

エネルギーキャリアLCAへの期待: CO₂フリー水素、アンモニア導入を例に秋鹿 研一^{1,*}Expecting LCA Data of “Energy Carrier”: CO₂ Free Hydrogen and Ammonia as ExamplesKen-ichi AIKA^{1,*}

Synopsis:

Objective. The author tried to explain the energy and environmental issue with a way which amateur could understand. While explaining the energy flow in Japan, the author tried to give a model how CO₂ emission could be reduced in the future. Importance of CO₂ free hydrogen and the evaluation with LCA method is to be discussed.

Results and Discussion. The Japanese population and energy demand are subjected to decrease 1% annually up to 2050. In order to access to the government road map of CO₂ reduction 3 kinds of fossil fuels (oil, LNG and coal) must be reduced annually 2%, 1%, and 1% respectively. At the same time CO₂ free energy source (renewable, atomic, and CO₂ free hydrogen energy) must be increased to keep the total energy demand at an appropriate level. Importance of CO₂ free hydrogen energy is pointed out. The new technologies which are now under development are shown, especially for the case of utilizing ammonia as a fuel. Finally, two examples to introduce CO₂ free ammonia from abroad are shown. Tentative LCA are also discussed there.

Conclusions. Tentative values of carbon foot print of ammonia fuels are shown, which are about 1/4 and 1/10 of the value of gasoline for natural gas based ammonia with EOR operation and renewable electricity based ammonia, respectively. Further work is expected to examine these values in the future.

Keywords: Ammonia fuel; carbon foot print; CO₂ emission; CO₂ free hydrogen; energy carrier

1. はじめに

COP21を経て、世界は地球温暖化対策に向き合う最低限の合意が出来たと言えよう¹⁾。では、個人は、国はどうしたらよいかは簡単ではない。私たちは、この事態を出来るだけ正確に理解し、現実的に受け止め、個人で出来ることを行い、国レベルで出来ることに協力することしかないであろう。しかし問題の複雑さから「正確に理解する」ことは並大抵でない。温暖化に最も影響を及ぼすCO₂排出を抑えることを定量的に一般市民が理解することは簡単ではない。それにもかかわらず、市民がエネルギーを選択し、生活スタイルを選択し、国の将来のインフラ投資の是非を決めなければならない。この判断基準としてLCAは重要である。市民のエネルギー環境問題への理解増進の方法として「サイエンスコミュニケーション」の心得を科学者、技術者、教員などが身につけ、市民へ知識を橋渡しする、

あるいは市民との対話をするのが重要であろう。この解説ではこの立場から、国のエネルギー政策、データを読み取り、著者なりの理解を解説したいと考えている。対象を国のエネルギーフロー、エネルギーキャリア、後半ではCO₂フリー水素、アンモニアについて考察したい。未来のエネルギーキャリアについてはそれぞれのカーボンフットプリント²⁾が表示できるようになることも期待している。理解の仕方については専門家の批判を仰ぎたい。

2. 日本のエネルギーフローの理解

2013年エネルギー統計が2015年に発表された^{3,5)}。日本はCOP21での約束を2013年のデータに基づき目標値を掲げている(この部分次項3)。その議論の元となるエネルギーフロー図の概略を図1に示す。まずこの図の理解から始めよう。1次エネルギーとして示されるもののうち、

1 放送大学/〒150-0043 東京都渋谷区道玄坂1-10-7

1 The Open University of Japan / 1-10-7 Dogenzaka, Shibuya-ku, Tokyo 150-0043

* 連絡先 (Corresponding author), kenaika@c01.itscom.net

2013年度エネルギーフロー 2.1×10^4 PJ 図1 2013年度、日本のエネルギーフロー図³⁻⁵⁾

原子力、水力、(ソーラー、風力などの)新エネルギーは電力であり、年間発電量kWh単位をJ(ジュール)に変換してある。天然ガス、石炭、原油は利用された量kLを燃焼熱量Jへ変換して示している。この年の特徴は福島過酷事故を契機に、原子力全施設の運転見直しが行われ、原子力発電量が著しく少ないこと、それに伴い天然ガスのエネルギー量が多いことである。また、「水力、新エネルギー」7.5のうち、話題となっている「ソーラー、風力」は1.5%に過ぎないことも注意したい。投入エネルギー全体で 2.1×10^4 PJ(P、ベタ、は10の15乗を示す)となる。

次の2次エネルギー(エネルギー白書では転換エネルギー)では1次エネルギーを利用形態別、電力(事業)と燃料、に表現し直したに過ぎない。原子力、水力、新エネはそのまま電力となるが、天然ガス(15.1%)、石炭(14.4%)のかなりの部分が電力用に使われ、石油由来の発電(5.6%)はわずかである。電力事業42.8%のうち、膨大な(熱、送電)損失26.4%があり、有効に需要先へ提供される効率は38.3%である。需要先は「民生」、「運輸」、「産業およびオフィスへ」分れているが、省エネルギーセンター等での分類「民生、オフィス」「運輸」「産業」と異なるので注意しよう。燃料57.1%のうち燃料企業が製品として需要先へ渡す時には8.5%の損失を伴って、48.6%へ減っている(効率85.1%)。「民生」、「運輸」、「産業およびオフィス」の需要先で受けた65.1%のエネルギー(白書では最終エネルギー消費と定義)のうち46.5%が最終形態として有効な仕事や熱に使われている(効率71.4%)⁶⁾。

1次エネルギーから、次々使い勝手の良いエネルギー商品へ変換するたびに、回収できない低品質の熱として損失を生じているが、最終的に有効利用されたと計算されたエネルギーとの合計は100%である。エネルギーの量は

全体で保存され(熱力学第1則)ているが、エネルギーは質の高い状態(左)から低い状態(右)へ流れていることが分かり(熱力学第2則)、およそ200℃以下となった熱(低品質のエネルギー)は(産業部門では)ほとんど使われることなく環境へ放出される。この図の右の状態から左の状態へ戻ることがないことを私たちは体験から理解している。

最終形態にある「有効仕事および熱」は経済活動を支えるためのindexとして最も重要と考えられるが、残念ながらこの値は統計の取り方により異なる^{3, 6)}ので議論の基礎としない。廃熱部分を減らし、この値を確保すれば投入1次エネルギーは減る。このように産業、民生、運輸のあらゆるエネルギー変換の場で省エネルギーが進むことが求められている。日本の省エネ技術の代表的な成果として、自動車(1996年から18年間で12.1から22.6 km/Lへ燃費向上; 国交省自動車燃費一覧⁷⁾)、冷蔵庫(CO₂排出2007年314kg/yから2014年143kg/yへ減少; 資源エネルギー庁⁸⁾)などがある。ヒートポンプ・蓄熱センターによれば、家庭用の暖房・給湯、業務用の空調・給湯、産業用の空調・加温・100℃未満の乾燥でそれぞれの需要において燃焼式の熱源をすべてヒートポンプ式に転換した場合、約130MtのCO₂削減が可能と試算している⁹⁾。この値は経産省統計⁴⁾による2013年CO₂発生1235Mtの約10%に相当し、この分野での省エネの可能性が大きいことを示している。このような省エネ技術の適用が今後のCO₂削減の最も重要な部分であろう。

白書³⁾では、図1右端「最終状態」の経年変化データはないが、代わりに「需要先エネルギー(白書の最終エネルギー)」の経時変化が示されている。「投入1次エネルギー」のデータ、GDPデータも示されているので、経時変化を大掴みしてみよう。まず、1973年から2013年度までの41

年間にGDPは2.5倍増加したのに対し、同期間に「需要先エネルギー（白書の最終エネルギー）」は1.3倍の増加にとどまっている。2004年から2013年の10年間にはGDPは1.07倍増加したのに対し、「需要先エネルギー（白書の最終エネルギー）」は88.9%に減少している。この10年間に「投入1次エネルギー」は91.9%に減少し、人口増減はほとんどない¹⁰⁾。このように経済発展と共にGDPの増加は投入エネルギーの増加を伴うが、先進国はついにエネルギーの増加を伴わず、GDPを増加する時代に入っており、日本はその先頭を走っている（イギリスと共にGDP当たりのエネルギー消費が最も少ない¹⁰⁾）。

3. CO₂発生量の解析と予想

先進国は人口当りのエネルギー消費を増やさずにGDPを伸ばすことが期待され、日本は最近、その領域に達した¹⁰⁾。日本はこのような省エネの優等生ではあるが、さらなるCO₂削減を求められている。ここで、エネルギー白書³⁾の数字を元にCO₂削減の可能性を基礎化学と1次エネルギー量の年率一定変化を仮定して検討する。

日本は2015年に人口減少時代に入り¹⁰⁾、2050年までの予想を平均年率で近似するとおよそ（年率）1%の減少が続くとみなした。全エネルギーも年率1%減少（前述の通り2004年から10年間、人口増減がないにもかかわらず91.9%へ減少していることから、無理な前提ではない）、天然ガス、石炭も年率1%の減少、（資源寿命の短い）原油のみ年率2%減少を続けるとしてみよう。インフラ変換への対応、素材産業のさらなる進展もあるので、化石資源の急減はできない。原油のみ余計な減少を仮定しているが、

それを補うために再生可能エネルギー利用、CO₂フリーの水素利用、利用可能な原発の存続がある。2013年投入エネルギーを基準として、絶対値の年率変化を上記のごとく仮定した場合CO₂はどのように減少するであろうか？

ここで大胆な仮定をしてみよう。天然ガス、石油、石炭のモデル化合物をメタンCH₄（分子量16）、オクタンC₈H₁₈（114）、炭素C（12）として、その燃焼反応の熱化学方程式を以下に示す。

これらの式から、重量当りの発熱量は、メタン55 kJ/g、オクタン48 kJ/g、炭素33 kJ/gであり、燃焼熱量当りのCO₂発生量は、メタン50 g/MJ、オクタン64.6 g/MJ、炭素112 g/MJと計算できる。この値を利用し、2013年度エネルギー統計値（図1）から発生CO₂量を試算すると1424 Mtとなる。経産省⁴⁾ 環境省¹¹⁾ 統計、エネルギー起源排出量1235 Mtと若干異なるが、分子モデルが単純化しすぎているせいであろう。石炭のうち純炭素に近いものは無煙炭であり一般炭は水素分も含み、石炭の平均はCH_{0.1}程度が近似値として近いはずであり、正確なエネルギー起源CO₂排出量¹¹⁾は若干少ない。しかしここでは変化比較を目的とするので絶対値検討は免じる。（また、量は少ないがCO₂の1/10程度の寄与を持つメタン、N₂Oなども加えた温暖化ガス合計は2013年度1408Mtであり¹¹⁾、この議論も免ずる。）上記仮定を元に、排出量年次変化を2013年で100とした相対値で図2に示す図中の円の面積が相対値に対応している。2020年12%減少、30年30%減少、50年57%減少となり、

図2 CO₂排出量変化予測と化石資源の内訳；LNG（天然ガス）、Coal（石炭）、Petro（石油）。図中の円の面積が相対値に対応。

2030年の政府目標26%を達成できる。単純な結論であるが、化石資源を漸減しなければCO₂削減は達成できず、その年率が天然ガス、石炭1%削減、石油2%削減を仮定することで可能なことである。人口に見合う減少率より石油を年率1%余計に減少するだけで達成できるとも言えるが、継続的にこの減少を実行することは実際大変な変革であり、1人当りGDP(数値を予想していない)増加を守るために、原油減少分をCO₂発生のない非化石資源エネルギー(再生可能エネルギー、原子力、海外水素)で補う必要があり、この変化量も無視できない量である。一方、2050年にCO₂の80%削減という国の目標を達成するためには、この時期に石炭のさらなる削減(それを補償する再生エネルギー、海外水素などのさらなる増加)を必要とする。

次に投入1次エネルギーの合計と内訳の経年変化予測を図3に示す。投入エネルギーは2030年に84、2050年に69%に減ずる。内訳の天然ガス、石油、石炭%は図2(CO₂排出量)と異なり、「再生エネルギー(ren)、原子力(at)、海外水素(H₂)」が加わる。30年に「再生エネルギー、原子力、海外水素」合計で25%であり、国の予測24%³⁾とほぼ同じとなる。国の予測^{3,5)}では「再生エネルギー、原子力」としているが、再生エネルギーには当然「海外水素」¹²⁻¹⁵⁾が含まれるはずである。石油を1%余計に削減する補償として「国内再生エネルギー、原子力、海外水素」を相当程度供給すべきことが、30年以降より顕著になり、この割合は50年には45%にも達する。原子力に対する不確実性、国内再生エネルギーのコスト高を考えると、海外水素(および水素エネルギーキャリア)の重要性が年ごとに顕著になると考えられる^{脚注1)}。水素燃料電池ロー

ドマップにおいても30年以降(フェーズ2)の海外水素大量導入開始を想定している^{15, 16)}。

さて、ここでは「再生エネルギー、原子力、海外水素」からCO₂を発生しない扱いにしているが、施設建設も含めたLCA(ライフサイクルアセスメント)から考えると当然CO₂を出しているはずである。この部分;再生エネルギー、原子力などの施設、インフラ建設にかかる1次エネルギー(電力だけではない)は化石資源に帰せられている。ここでは議論しないが、再生可能エネルギー等への変換(施設建設、インフラ整備)に使われる化石資源エネルギーの検討(LCA)は別の課題である^{17, 18)}。

4. CO₂フリー水素、エネルギーキャリアについて

上述のように、CO₂削減のために将来CO₂フリー水素輸入が必要になる。この水素と昨今話題となっている「水素社会」;燃料電池自動車(FCV)、エネファームなどの燃料電池技術とはどのような関連があるのか?現在の燃料電池技術は民間住宅に使う、分散型エネルギー技術であり、全体量が少ないのに対し、輸入海外水素の時代では日本の産業での利用も含め、多量水素のバリューチェーンが構築されたとする。FCV,エネファームは現在小規模であり水素技術のさきがけといえるものであり、将来は水素発電、水素製鉄など産業での利用を含む、大規模なものを想定している。再生可能エネルギーからは通常電力が得られるが、これは大量貯蔵できず、輸送できない。これを液化水素^{19, 20)}、または有機ヒドライド(トルエン、水素系)²¹⁾、アンモニア²²⁾にかえて貯蔵、輸送する技術が必要である。この計画は90年代にWE-NETとして始まったが、途中で燃料電池技術をアウトカムさせる中で、一旦フェードアウトしたかに見えた。3.11大震災をきっかけに再認識され、経産省、内閣府などを中心に研究プログラムが出来た経緯がある¹⁴⁻¹⁶⁾。ここではLCAを主題とする関係上、この内容を詳しく述べることは避け、HP等で見いただきたい。図4にその概念を示すにとどめる。

図3 投入エネルギー変化予測とエネルギー資源の内訳; LNG(天然ガス)、Coal(石炭)、Petro(石油)、「ren/at/H2(再生可能エネルギー/原子力/海外水素)」。図中の円の面積が相対値に対応。

脚注1) 国内再生エネルギー、原子力、海外水素の内訳予測については議論の分れるところであるが、このモデルの延長線上で次のように予測してみる。現在、再生可能エネルギーの主体は(国内で増加の望めない)水力、バイオマスなどであり、約5分の1に過ぎないソーラー、風力の大幅な連続増加(年率約10%)を見込んで初めて総体で2%連続増加が期待できる。再生可能エネルギー増加は固定買い取り制度(国民の負担)により成り立ち、これまでの総額は2兆円を超えるとされるが、この事態が長続きするとは考えにくい。再生可能エネルギー2%の増加、不確定要素が大きい原子力については、20年に相対値5%、30年以降10%(国の予測)と仮定し、全体のエネルギー不足分をCO₂フリー水素(アンモニア含む)輸入とすると、全エネルギーに対する海外水素の割合は30年で3%、50年で12%にも達する。(数値はあくまでもモデルであるが、海外水素の導入が重要であることを指摘したい。)

図4 SIP エネキャリアの概念

5. エネルギー媒体としてのアンモニアについて

図4に示すように液化水素、有機ハイドライド、アンモニアをエネルギーキャリアとした研究開発が進んでいる。これらは製造法、輸送貯蔵法、利用法がそれぞれ異なる特徴を持っており一律に経済的優劣を比較できない。液化水素^{19, 20)}、有機ハイドライド²¹⁾については既にいくつかの解説があるので、ここではアンモニア合成、利用のエネルギー的側面から解説を試みたい。

アンモニアは世界で年間約1.7億トン生産され、化成品としては最大級(エチレンは約1.3億トン)である。その生産、輸送、貯蔵方法およびハンドリング技術は確立している。常温8.5気圧で液化するため、LPGと同じく貯蔵・輸送に優れている。体積水素密度および質量水素密度はそれぞれ12.1 kg/100Lおよび17.8重量%と高い²²⁾。海外水素導入予想例^{脚注1)}“30年に全エネルギーの3% (531 PJ)、50年に12% (1737 PJ)”の半分をアンモニアで輸入すると仮定した場合、その量は11.8 Mt/y、38.5 Mt/yとなりこれは日本での過去最大需要量4.56 Mt/yのそれぞれ、2.6倍、8.4倍となり、アンモニア燃料インフラ形成の参考となる。

アンモニア利用技術の開発状況はどうであろうか¹⁶⁾。江口らは従来の純水素用SOFC(固体酸化物形燃料電池)に対し、アンモニア燃料に適用する触媒はじめ各種部材を選定し、アンモニア燃料専用の新規SOFCスタックを開発した^{23, 24)}。アンモニア燃焼熱は分子あたり水素分子の1.35倍である(仕事への転換に関連するギブズエネルギーでは1.43倍)。1942年にベルギーのバスがアンモニアを燃料として走っていたように、立派な燃料でもある。小林らによれば、メタン/空気火炎に比べてアンモニア火炎長は長い

図5 アンモニア燃焼の火炎、メタンとの比較

が、メタン火炎の数倍程度である(図5)²⁵⁻²⁷⁾。NO_x発生も通常の化石燃料と同様に制御可能である。平成26年8月、産総研福島再生可能エネルギー研究センターで、世界で初めてアンモニアを燃料としたガスタービン発電の実証に成功した²⁸⁾。将来、アンモニアを火力発電用燃料として利用できれば、CO₂削減に大いに貢献できる。

6. 化石資源からのCO₂フリーアンモニアについて

CO₂フリーアンモニアとして、①天然ガスからのアンモニア合成において副生CO₂を地中貯留(CCS; Carbon dioxide Capture and Storage)または増産用圧入(EOR; Enhanced Oil Recovery)²⁹⁻³¹⁾するケースと②再生可能電力による水分解水素利用のケースが考えられる。現実的には、現行プロセスにEORを応用したケースが先に導入

されるであろう。CCSにおいて、排ガス中のCO₂回収が最もコストがかかる（約70%）といわれ³²⁾、そのために新しい燃焼方式、空気中の窒素を分離した酸素燃焼、などが提案されている³³⁾。一方、化石資源を獲得する場で水素またはアンモニアへ変換し、その場でCO₂を処理（CCS,EOR）できれば合理的であろう³⁴⁾。この場合、アンモニア合成プロセスとの共存がより好ましい³⁵⁾。なぜならば、化石資源（天然ガスでも石炭でも）のリフォーミングにおいて、窒素を分離する必要が無く空気を用いることで（CO₂は分離するが）、アンモニア合成の原料ガスが出来るためである³⁶⁾。天然ガスをメタン、空気を（4N₂+O₂）と仮定して反応プロセスと熱化学を式（4）－（6）に示す。

式（4）－（6）を加算して式（7）が得られる。

メタンを触媒上で水と反応させ、水素（およびCO₂）を作る（リフォーミング反応；式（4））が、この反応は吸熱のため、酸化（発熱）反応式（5）を必要とする。ここで空気を用いると酸素は消費され、窒素（および水、CO₂）が残るが、この2つの反応を窒素対水素が1対3になるように（アンモニア合成；式（6））一緒にすると式（7）が得られる。左辺7/16 CH₄に相当するメタン燃焼熱389.5 kJがNH₃ 燃焼熱382.6 kJと6.9 kJの発熱へ変化する。この発熱分はNH₃ 燃焼熱 382.6 kJのわずかに1.8%であり、無視できる量と考え、式（7）は物質収支と熱収支がほぼバランスする希有な反応といえる。式（4）、（5）終了後、生成物から水はなくなりCO₂のみを吸収（アミンによる）分離して、（N₂ + 3H₂）をアンモニア合成反応器へ導入してリサイクルすればよい³⁷⁾。1モルのアンモニアを生成するために7/16モルのメタン（および水、空気）を理論上必要とし、7/16モルのCO₂が分離副生する³⁷⁾。このように化石資源からのアンモニア合成プロセスは必然的にCO₂分離を伴っており、これを天然ガス田等へ戻せば容易にCO₂フリー燃料となり得る。ノースダコタBeulahにおいて2000年よりこの方法で石炭ベースのアンモニアが商業生産されているという³⁵⁾。

以上の解説は反応式だけからの検討であり、実際はリフォーミングプロセス（式（4））を高温で行わせる必要があり、その熱を全て回収できないため、プロセスを動かす上で余計なエネルギーを外部から必要とする³⁸⁾。環境省関連委員会では前者（工業プロセスのみ）を非エネルギー起源CO₂、後（外部供給）をエネルギー起源CO₂と分け

天然ガスを原料とするアンモニア合成（現行プロセス）

図6 天然ガスを燃料とするアンモニア合成のエネルギーダイアグラム

ている³⁹⁾。その問題を説明するために図6を用意した。

プロセス設計の立場からアンモニア合成に必要な理論エネルギーは22.6 GJ/t-NH₃（NH₃の燃焼熱382.6 kJ/molを1トンのアンモニアに換算）であると表現される。式（7）に示したように、左辺7/16 CH₄に相当するメタン燃焼熱389.5 kJ（23.0 GJ/t-NH₃に相当）がNH₃ 燃焼熱382.6 kJ/mol-NH₃（22.6 GJ/t-NH₃）と6.9 kJ（0.4 GJ/t-NH₃）の発熱へ変化する。この微量発熱分の有効利用も含めて、最新鋭の大型プロセスについてはおよそ11 GJ/t-NH₃のエネルギーを外部供給する必要があるという³⁶⁻³⁹⁾。工業プロセスから副産物として得られるCO₂はEORに利用し排出はせず、一方外部供給エネルギー（メタン利用）からの排出CO₂については分離回収を行わないとすると、11 GJのメタン燃焼エネルギーに対応するCO₂発生、すなわち0.55 t-CO₂/t-NH₃のCO₂発生（NH₃の燃焼熱22.6 GJ/t-NH₃で割り戻すと24.5 g-CO₂/MJ）と計算できる。これは、採掘、輸送分等が無視されているので、自動車用燃料のLCAとして用いられるWell to Wheel（本来は燃料の採掘、化工、輸送、利用までのカーボンフットプリント）^{脚注2)}に必要なデータとしては不十分であるが、ガソリンを燃料とする自動車のWell to Wheel^{脚注2)}（99 g-CO₂/MJ）⁴⁰⁾の約1/4に相当する。100%CO₂フリーは難しいが十分低い値と言えよう。

7. 再生可能電力による水分解水素利用アンモニア

水電解水素と窒素との反応によるアンモニア生成の化学式は、式（8）のごとく示され、これはアンモニア燃焼の逆反応式である。

脚注2) ここではカリフォルニアのデータ；採掘11 g、化工13 g、輸送2 g、燃焼73 gも含めた99 g/MJ⁴⁰⁾を用いる。ガソリンのモデル分子をオクタン（式2）をとすると既述のように燃焼CO₂は64.6 g/MJであるが、実際のガソリンは組成が異なり73 gと若干大きい。

従ってこの場合もアンモニア合成の理論エネルギーは 382.6 kJ/mol すなわち、22.6 GJ/t-NH₃ (NH₃の燃焼熱) のはずである。しかし、ここでは電力により水素を作るので、電気化学的にアンモニアを合成したと仮定したギブズエネルギー 339.2 kJ/mol、20.0 GJ/t-NH₃ を合成理論エネルギーとみなす^{脚注3)}。

このプロセスの場合、「電気分解による水素製造」と「水素と窒素からのアンモニア合成プロセス」が鍵となる。式(6)に示すようにNH₃を1モル得るためには水素が1.5モル必要なので、図7に示す通り水素製造までは20.9 GJ/t-NH₃ (水分解ギブズエネルギー 237.1 [kJ/mol-H₂] × 1.5 [mol-H₂/mol-NH₃] / (17 [g-NH₃/mol-NH₃]) × 1.0 × 10⁶ [g-NH₃/t-NH₃]) であり、電圧では1.23 V/e-molである。これは理論値であり、過電圧が必要となるが、1.7Vで高電流密度が得られると仮定しよう。窒素と水素からのアンモニア合成プロセスでの無駄になるエネルギー(ガスリサイクル、アンモニア分離など)を0.3V^{脚注4)}程度必要と仮定し³⁷⁾、合計2.0V (1モルのNH₃を得るための水電解のギブズエネルギーに換算すると、(2 [e-mol/mol-H₂] × 1.5 [mol-H₂/mol-NH₃] × (ファラデー定数 = 9.6485 × 10⁴ [C/e-mol]) × 2.0 [V] / 17 [g-NH₃/mol-NH₃]) × 1.0 × 10⁶ [g-NH₃/t-NH₃] = 34.0 GJ/t-NH₃) 必要(実績でなく、開発目標値)と考えよう。これを再生可能電力でまかなうた

めに環境省HP(表1)を引用する^{17, 18)}。風力発電の場合、CO₂排出量は25.4 g-CO₂/kWh (7.06 kg-CO₂/GJ)の試算があり^{17, 18)}、1トンのアンモニア当り240 kg (34.0 [GJ/t-NH₃] × 7.06 [kg-CO₂/GJ-NH₃])のCO₂排出となる。アンモニア燃料の発熱量あたりに直すと10.6 g-CO₂/MJ (240 [kg-CO₂] / 22.6 [GJ/t-NH₃])であり、これが輸送を除いたWell to Wheelと言えよう。海外から輸送する部分を評価していないが、前述したガソリンを燃料とする自動車のWell to Wheel^{脚注2)} (99 g-CO₂/MJ)⁴⁰⁾の1/10程度となり、CO₂フリーアンモニアに限りなく近いと言えよう。

8. おわりに

CO₂削減の道筋を理解するモデルを考察した。年1%人口減少、年1%エネルギー減少の中で原油のみ年2%減少すれば可能であり、全エネルギーの不足分を再エネ、輸入水素で補う、としたが、年1%の変化といえども絶対量は非常に大きい。また、省エネ技術の飽くなき進展も必要とされ、容易なことではない。国内の産業も消えてはならない。エネルギーキャリアは水素ステーション、発電に止まらず、鉄鋼、アルミ、シリコン(金属還元)、セメント(高温反応)などへの応用も期待される。アンモニアの発電への利用技術が開発されつつあるが産業への応用も期待したい。日本の課題は世界の課題でもあり、プログラムの成果も含め

図7 水電解水素からのアンモニア合成のエネルギーダイアグラム

表1 再生可能電力と火力のLCA (CO₂排出量) 比較^{17, 18)}

エネルギー源	g-CO ₂ /kWh	g-CO ₂ /MJ
風力	25.4	7.1
太陽光	38	10.6
LNG	473.5	131
石油	738.1	205
石炭	942.7	262

脚注3) 液体の水を気体の水素と酸素へ分解する反応は285.8 kJの吸熱である(エンタレピー変化は正)。この内容を2つに分けてみる。分子内結合の強い水分子がそれほどでもない水素や酸素分子へ変化させる化学的エネルギー部分と液体2分子が自由な気体3分子になる(自発的方向)状態に関係する部分がある。ギブズエネルギー部分(237.1 kJ)とエントロピー部分(48.7 kJ)に相当する。自由な方向へ自発的に進むエントロピー部分の量だけギブズエネルギー部分(仕事、電力)が少なくて済む、ことになる。逆反応である燃料電池反応では得られる電力(仕事)が燃焼熱に比べると少なくなるのも同じ原理である。

脚注4) 水の電解で1.5モルの水素分子(3電子)を作るのに、237.1 [kJ/mol-H₂] × 1.5 [mol-H₂/mol-NH₃] = 355.6 [kJ/mol-NH₃]のギブズエネルギーが必要である。一方、式(8)より、1モルのアンモニアを合成するためのギブズエネルギーは339.2 [kJ/mol-NH₃]なので、平衡だけを考えると355.6 [kJ/mol-NH₃]のエネルギー(仕事)が339.2 [kJ/mol-NH₃]のアンモニアになって、その差16.4 [kJ/mol-NH₃]が残ることになる。しかし、実際には、水の電気分解には過電圧を含めて1.7 [V]が必要であり、さらにプロセスを維持するエネルギーも必要となる。6節で述べた天然ガスからのアンモニア合成において11 [GJ/t-NH₃]、すなわち187 [kJ/mol-NH₃]の余計なエネルギーを計上したが、この内訳はおおよそ、2/3が天然ガスのリフォーミングまで、1/3がアンモニアの合成プロセスで必要(62 [kJ/mol-NH₃])と言われている。その値を援用し、前述の余ったエネルギーが有効に使えらると思って追加するエネルギーを計算すると、45 [kJ/mol-NH₃] (62-16.5)になる。この中身はポンプ動力、アンモニア深冷分離などでの損失である。さらに、窒素を空気からプレシャスウィングで得る仕事分などを45 [kJ/mol-NH₃]程度と考えると合計90 [kJ/mol-NH₃]が必要となる。これは、熱と仕事の両方含むが、このプロセスは全て電力で動くとして仮定し、このエネルギー90 [kJ/mol-NH₃]を水電解で1.5モルの水素を得る電圧に換算すると合計0.3V必要(= 90000 [J/mol-NH₃] / (2 × 1.5 [e-mol/mol-NH₃] / (ファラデー定数; 96485 [C/e-mol]))、と想定される。

新しいエネルギー技術が世界を牽引してほしい。将来の技術やインフラも含めて経済可能性FSについての検討も始まっているが不確定要素も大きい。その中で出来るとすれば、常識的なLCA計算であろう。化石資源由来アンモニアでもEORを伴えばガソリンの1/4程度、再エネ電力由来アンモニアはガソリンの1/10程度のカーボンフットプリントの試算を得た。仮定の多い計算であり、電力と発熱量の比較が煩わしい。本来は、プロセスの検討も出来るLCA専門家が、詳細なデータが蓄積されることを願う。本論文作成に当たり、貴重なコメントをいただいた工学院大学稲葉敦教授、放送大学酒井善則特任教授に感謝する。

(平成28年4月4日受付)

参考文献

- 1) 田中加奈子 (2016) : 化学工学, 80(1), 22-24
- 2) 稲葉敦 (2010) : J. Japan Inst. Energy, 89, 629-631
- 3) 経済産業省 資源エネルギー庁, エネルギー白書2015 第2部エネルギー動向 第1章国内エネルギー動向, 経済産業省 資源エネルギー庁ホームページ, 入手先 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015pdf/whitepaper2015pdf_2_1.pdf>, (参照 2016-2-6)
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁, 2013年度以降適用する標準発熱量・炭素排出係数一覧表, 経済産業省 資源エネルギー庁ホームページ, 入手先 <http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf>, (参照 2016-2-6)
- 5) 経済産業省 資源エネルギー庁, 長期エネルギー需給見通し関連資料, 経済産業省 資源エネルギー庁ホームページ, 入手先 <http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_02.pdf>, (参照 2016-2-6)
- 6) 中垣隆雄 (2016) : 化学工学, 80(1), 28-31
- 7) 国土交通省, 自動車燃費一覧(平成26年3月)4. (1) ガソリン乗用車の10・15モード燃費平均値の推移, 国土交通省ホームページ, 入手先 <<http://www.mlit.go.jp/common/001031306.pdf>>, (参照 2016-4-3)
- 8) 経済産業省, 資源エネルギー庁 (2015) : 省エネ性能カタログ2015年冬版, 12pp.
- 9) 一般財団法人 ヒートポンプ・蓄熱センター, ヒートポンプのCO₂削減効果, 一般財団法人 ヒートポンプ・蓄熱センターホームページ, 入手先 <<http://www.hptcj.or.jp/study/tabid/105/Default.aspx>>, (参照 2016-4-3)
- 10) 菊池康紀, 大久保達也 (2016) : 化学工学, 80 (1), 19-21
- 11) 環境省 エネルギー-工業プロセス分科会, 日本の温室効果ガス排出量の算定結果 平成27年3月温室効果ガス排出量算定方法に関する検討結果, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h2703/01.pdf>>, (参照 2016-3-21)
- 12) 嘉藤徹 (2015) : 日本エネルギー学会誌, 94(1), 7-18
- 13) 高木英行, 坂西欣也 (2015) : 日本エネルギー学会誌, 94(11), 1258-1266
- 14) 坂田興 (2015) : 日本エネルギー学会誌, 94 (11), 1243-1250
- 15) 経産省 水素・燃料電池戦略協議会, 水素・燃料電池ロードマップ～水素社会の実現に向けた取組の加速～, 経済産業省ホームページ, 入手先 <<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf>>, (参照 2016-3-27)
- 16) 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, JSTホームページ, 入手先 <<http://www.jst.go.jp/sip/k04.html>>, (参照 2016-2-6)
- 17) 環境省, 再生可能エネルギー設備の特性把握 (p92, 図4.1) 2009年時点で得られたデータに基づく電源別LC-CO₂排出量, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/recycle/report/h25-03/02.pdf>>, (参照 2016-3-21)
- 18) 今村栄一, 長野浩司 (2010) : 電力中央研究所報告 日本の発電技術のライフサイクル CO₂排出量評価－2009年に得られたデータを用いた再推計－, 106pp.
- 19) 神谷祥二 (2014) : 日本エネルギー学会誌, 93(1), 21-26
- 20) 堀川敦史 (2015) : ペテロテック, 38(9), 670-680
- 21) 岡田佳巳, 今川健一, 河合裕教 (2015) : ペテロテック, 38(9), 660-664
- 22) 小島由継 (2014) : 日本エネルギー学会誌, 93 (5), 378-387
- 23) 京都大学, 科学技術振興機構 (JST), 株式会社ノリタケカンパニーリミテド, JSTプレスリリース・アンモニアを直接燃料とした燃料電池による発電, JSTホームページ, 入手先 <<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20150722-6/index.html>>, (参照 2016-2-6)
- 24) Molouk A.F.S., Yang J., Okanishi T., Muroyama H., Matsui T., Eguchi K. (2016): J. Power Sources, 305, 72-79
- 25) 産業技術総合研究所, 科学技術振興機構 (JST), JSTプレスリリース・ガスタービンでアンモニアを燃焼させる発電技術～水素キャリアとしてのアンモニアの利用進展へ～, JSTホームページ, 入手先 <<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20140918-2/index.html>>, (参照 2016-2-6)
- 26) 産業技術総合研究所, 科学技術振興機構 (JST), JSTプ

- レスリリース・メタン-アンモニア混合ガスと100%アンモニアのそれぞれでガスタービン発電に成功～水素キャリアとしてのアンモニアを発電所の燃料に～, JSTホームページ, 入手先 <<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20150917/index.html>>, (参照 2016-2-6)
- 27) Hayakawa A., Goto T., Mimoto R., Arakawa Y., Kudo T., Kobayashi H. (2015): Fuel, 159, 98-106
- 28) 中鉢良治, 仁木栄, 辻村拓, 壹岐典彦, 産総研プレス発表・メタン-アンモニア混合ガスと100%アンモニアのそれぞれでガスタービン発電に成功, 産業技術総合研究所ホームページ, 入手先 <http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20150917/pr20150917.html>, (参照 2016-2-6)
- 29) 堀川愛子 (2015) : ペテロテック, 38(3), 194-201
- 30) 石田毅 (2015) : ペテロテック, 38(8), 592-597
- 31) 川崎晋平 (2015) : ペテロテック, 37(9), 668-672
- 32) Plasynski S. I. (2015): NETL CO₂ Capture Technology Meeting, Pittsburgh
- 33) 小野崎正樹, 牧野尚夫, 持田勲 (2015) : 日本エネルギー学会誌, 94(1), 218-223
- 34) Anderson H., Norsk H. (2002): World Hydrogen Energy Conference, Montreal, CAN
- 35) McFarlan A. (2012): Canmet ENERGY, The 9th Annual NH₃ Fuel Conference, San Antonio, TX, 121001
- 36) 秋鹿研一 (1994) : ペテロテック, 17(2), 127
- 37) 秋鹿研一 (2013) : ペテロテック, 36(4), 271
- 38) Dybkjaer I., Nielsen A. Ed. (1995): Ammonia, Springer-Verlag, Berlin, GER, 199-327
- 39) 環境省, 第Ⅱ編 温室効果ガス排出量の算定方法・Ⅱ-55 アンモニアの製造, 環境省 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度ホームページ, 入手先 <http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/manual/chpt2_4-0.pdf>, (参照 2016-2-6)
- 40) Aguila J. (2013): The 10th Annual NH₃ Fuel Conference, Sacramento, CA, USA