

当財団では、2015年6月に「ハイブリッド水素研究会（座長：吉川 典彦 名古屋大学大学院工学研究科教授）」を立ち上げ、海外の先進的な事例を踏まえながら、中部圏をはじめとする我が国における実現性の高い水素供給に関する調査研究を進めています。今回は、2015年9月に実施したドイツ、オランダの水素に関する代表的な研究機関および企業での調査結果の概要について吉川典彦座長に報告いただきました。

ドイツ・オランダにおける新しい水素供給への取り組みについて

名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻 吉川 典彦 氏

*プロフィール

1974年3月 名古屋大学工学部航空学科卒業
1980年5月 カナダマクギル大学大学院機械工学科 Ph.D.
1980年9月 豊橋技術科学大学
1995年4月 名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻助教授
2000年12月 名古屋大学工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻教授（～現職）



1. 調査の背景と目的

現在ドイツでは、エネルギーシフトと呼ばれる基本政策のもと、再生可能エネルギーの利用とエネルギー利用の効率化の推進により、温室効果ガスの削減と原子力発電および石油・ガスの輸入からの脱却を進めている。電力供給における再生可能エネルギー導入割合の達成目標は、2015年40～45%、2035年55～60%、2050年80%とされている。

FIT（Feed-in Tariff program）と呼ばれる固定価格買い取り制度をいち早く導入して、再生可能エネルギーの利用拡大を進めてきた結果、2014年におけるドイツの発電用1次エネルギーに占める再生可能エネルギーの割合は26.2%（風力9.1%、バイオマス7.0%、太陽光5.7%、水力3.3%、廃棄物およびその他1.1%）に達している。これに対してほかの発電用エネルギーは、天然ガス9.5%、石油類5.4%、褐炭25.4%、石炭（褐炭を除く）17.8%、原子力15.8%である。ドイツでは国内で産出される安価な石炭（褐炭）が広く利用されてきたが、2014年に再生可能エネルギーに追い抜かれた。2014年の再生可能エネルギーによる発電量は、1990年の8倍、2000年の4倍となっており、主に風力と太陽光がけん引してきた。過

去10年ほどの傾向をみると、バイオマスと太陽光の伸びは鈍ってきており、相対的に風力の伸びが大きくなっている。2014年の再生可能エネルギーの設備投資額188億ユーロの内訳をみると、風力が65.1%と圧倒的に高く、2位の太陽光12.3%を大きく引き離し普及が進んでいる事が分かる。現在建設が進められているドイツ北部の大規模洋上風力発電はその象徴ともいえる（図1、図2）。



図1 ドイツにおけるウィンドファーム設置状況（2011年）

（出典：EnerGeoPolitics website）

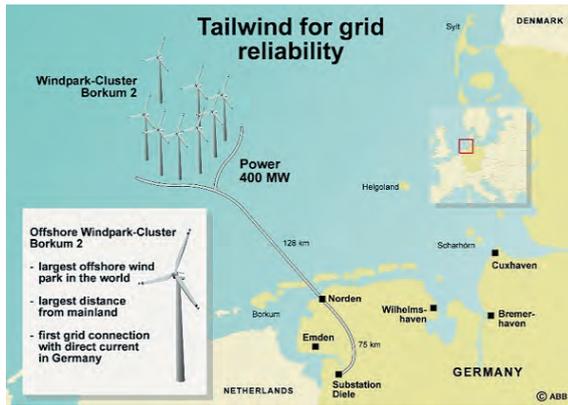


図2 ドイツにおける海洋ウィンドファーム計画
(出典：ABB website)

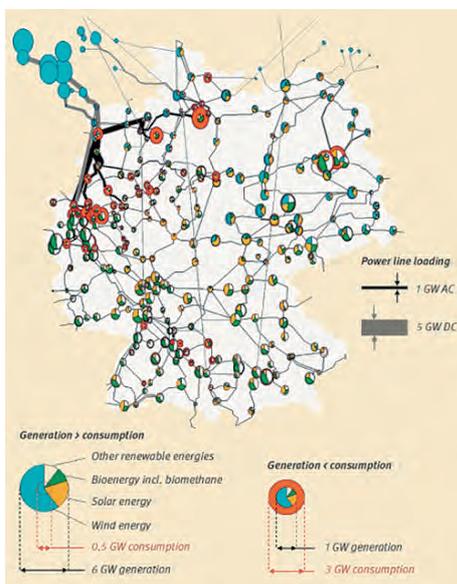


Illustration of the topological distribution of grid nodes in Germany with the corresponding ratio of offered to demanded energy.
© Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Kassel

図3 ドイツにおける再生可能エネルギーと電力需要バランスの分布図
(出典：Fraunhofer IWES website)

一方、ドイツにおける風力発電に適した場所は北部に偏在しており、南部の工業地帯に電力をいかにして供給するかが問題となっている（図3）。送電網による供給が現実的な方法であるが、現状のドイツの送電網の容量は不足しており、2,000 km以上の送電線の新設が必要とされている。このため、多額の投資と環境アセスメントのための長い時間が必要となる。そこで、再生可能エネルギーから生産された電力の余剰分を水素などのガス燃

料に一旦変換し、既存の天然ガスパイプライン網を用いて輸送し、必要に応じて発電や加熱に利用するという方法（電力ガス化技術：Power to Gas）が検討されている。

水素は反応性と単位質量当たりの発熱量が高く、二酸化炭素排出のないクリーンエネルギーである性質は大きな利点である。しかしながら、水素の利用においてはその性質からもたらされる主としてコストに関わるいくつかの問題がある。水素は、天然ガスなどのほかの燃料と比べて爆発危険性が高いため、安全対策コストが高くなる。また、既存の燃焼装置や発電装置の多くは水素100%の燃料に対応できないため、多くの追加設備投資が必要となり、全体として大幅なコスト高となる。加えて現時点での再生可能エネルギーからの水素製造コストが高いという問題がある。

水素燃料電池自動車の燃料としては、水素100%の燃料を高圧で供給・利用するエネルギーモデルが構築されてきたが、定置式エネルギー機器での水素利用に関しては、上述した理由から、天然ガスにある割合の水素を混合して既設のパイプラ

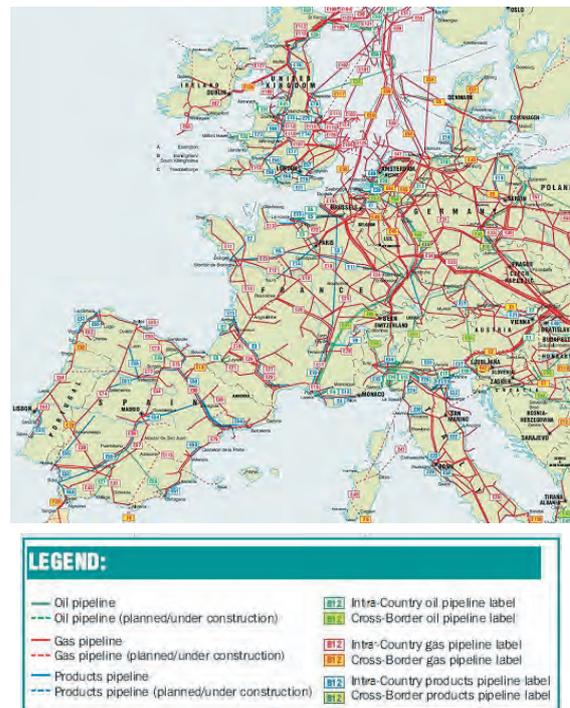


図4 ヨーロッパにおける天然ガスなどのパイプライン網
(出典：Theodora website)

イン網（図4）を用いて供給・利用する（Power to Gasの先駆けとなる）アイデアがヨーロッパで生まれており、その混合燃料はNaturalhy（Natural gas-hydrogen）と呼ばれている。水素の混合割合が30%程度以下であれば既存のインフラ設備を利用できる可能性があり、水素100%燃料の場合と比べて、新規設備投資の大幅な抑制が期待できる。現在ドイツでは、再生可能エネルギー由来の余剰電力で水素やメタンを製造し、天然ガス導管に注入するPower to Gas実証試験（図5）が進められている。

日本においても再生可能エネルギーの利用推進はエネルギーの基本政策に組み込まれており、特に太陽光発電は急速に拡大しており、2014年の新規設備容量の増加率は世界第2位である。しかしながら、再生可能エネルギーからの水素製造は進んでおらず、炭化水素化合物の化学プロセスやソーダ製造のプロセスから発生する水素（副産物）が主流である。プロセス副産物水素の価格が再生可能エネルギーを利用した場合よりも低いこともあるが、水素燃料が利用時における二酸化炭素削減の一方法としてのみ捉えられており、ドイツの様に再生可能エネルギーと結びついていないため

ある。ドイツにおける再生可能エネルギーは、市民が作り・使い・売るエネルギーという認識の下に普及してきており、市民が出資した協同組合が地域のエネルギーシステムを運営している場合も多く、エネルギー市場の変革をもたらした。今後こうしたすう勢は日本にも広がると予想される。2015年に公表された我が国の長期エネルギー需給見通しでは、2030年における電源構成に占める再生可能エネルギーの割合が22~24%と見込まれており、これは2014年のドイツの26.2%に近い値である。単純な数値の比較からの推測は早計かもしれないが、日本も今後10~20年以内に、現在のドイツの様に再生可能エネルギーに余剰が出る状況が考えられる。再生可能エネルギーにより発電した電力を燃料ガスへ変換して貯蔵・利用する方法（Power to Gas）は、十分検討に値する対応策の1つであると考えられる。そこで、再生可能エネルギーから水素を製造し、天然ガスと混合して供給・利用する取り組みの現状を把握し、実社会への水素混合燃料の導入可能性を探る目的で、ドイツ、オランダの代表的な研究機関および企業を訪問しヒアリング調査を実施した。

2. 調査結果

(1) 訪問先の概要

①Fraunhofer Institute of for Wind Energy and Energy System Technology

Fraunhofer-Gesellschaft（フラウンホーファー研究機構）は、健康・環境、安全・セキュリティ、モビリティ・交通、生産・サービス、コミュニケーション・知識、エネルギー・資源の6つの研究分野を扱う欧州最大の応用研究機関であり、「社会に役立つ実用化のための研究」をテーマに、多くの科学技術分野における応用研究を推進している。基礎科学推進を主目的とするMax-Planck-Institute（マックスプランク研究所）と共に、ドイツの科学技術の発展をけん引している。ドイツ各地に67の研究所とヨーロッパ、アメリカ、アジアおよび中東に研究センターおよび代表部が設置されてお



図5 ドイツにおけるPower to Gas実証試験のサイト
(出典：Fraunhofer IWES website)

り、職員数は約24,000名である。年間総研究費約20億ユーロのうち17億ユーロ超が委託研究によるもので、研究費総額の70%以上を民間企業からの委託契約や公共財源による研究プロジェクトから得ている。約30%はドイツ連邦政府および州政府から経営維持費として資金提供を受けている。今回訪問したFraunhofer Institute of for Wind Energy and Energy System Technology (Fraunhofer IWES) は、ドイツ中央部のKassel (カッセル) に位置し、風力発電を中心とする再生可能エネルギーの利用技術および制御システムの研究開発をおこなっている。年間研究費総額は3,000万ユーロ、職員は500名である。

②DNV GL

DNV GLは1864年に設立された自主独立財団で、ノルウェー・オスロに本拠地を置く。第三者認証機関、船級協会、オイル&ガス分野のリスクマネジメント、風力・電力送配電分野を主とする世界有数のサービス・プロバイダーで、職員数は

16,000人、世界100カ国に300の事務所を開設している。オランダ北部のGroningen (フローニンゲン) にあるDNV GLでは、環境保護とエネルギーシステムに関するコンサルティングなどを行っており、オランダを中心とする欧州における水素混合天然ガス供給に関するプロジェクト (Naturalhyプロジェクト) の成果を集積している。また、その後継事業であるHyreadyプロジェクトのリーダーを務めるIr. Onno Florisson氏が所属する。

③HYDROGENICS GmbH

HYDROGENICS社は1988年にカナダで創業した電気分解水素製造装置と固体高分子型燃料電池のメーカーであり、カナダ、ベルギー、ドイツに事業所を開設している。職員数は約150名で、他企業と協同で、風力発電装置に水電気分解水素製造装置と燃料電池を組み合わせた実証試験も行っている。ドイツ中北部のGladbek (グラードベック) の事業所では、Power to Gas実証実験や近隣のHerten (ヘルテン) で行われている水素利用実証事業 (H2HERTEN) にも電気分解水素製造装置を提供している。

④ETOGAS GmbH

ETOGAS社は、2007年にドイツ南西部のStuttgart (シュトゥットガルト) で設立された、メタン合成装置の設計とコンサルティングを事業とするスタッフ20名のベンチャー企業である。

(2) Fraunhofer IWESでのヒアリング調査

2015年9月4日にカッセルにある研究施設を訪問してDr. Ulrike Fuchs氏, Dipl.-Phys. Jochen Bard氏, Dr-Ing. Ramona Schroeer氏と面会し、ドイツのエネルギー事情に関する情報提供と再生可能エネルギーからのガス体エネルギーの製造・利用への取り組みについて情報提供を受けた。

(ヒアリング内容)

- 現在のドイツの再生可能エネルギーは、全体のエネルギー量の約26%を占めており、将来は40%を目標としている。
- 原子力発電所を廃止するという方針に変更は無

訪問日	訪問先(住所)と面会者
9月4日(金)	Fraunhofer IWES (Königstar 59, 34119 Kassel, Germany) Head of Division Energy Process Technology Dipl.-Phys. Jochen Bard Division Energy Process Technology Dr.-Ing. Romona Schroer Scientific Coordination and International Business Development Dr. Ulrike Fuchs
9月7日(月)	DNV GL (Energyweg 17, 9743 AN Groningen, the Netherlands) Principal Consultant Oil & Gas Ir. Onno Florisson
9月8日(火)	HYDROGENICS GmbH (Am Wiesenbusch 2, Halle 5, 45966 Gladbeck, Germany) Business Sales Manager B.A.Sc. Mark Kammerer
9月8日(火)	H2HERTEN (Doncaster-Platz 5-7, 45699 Herten, Germany) Member of Management Board Prof. Dr. Karl H. Klug
9月10日(木)	ETOGAS GmbH (Industriestraße 6, 70565 Stuttgart) Leiter Vertrieb Stephan Rieke



図6 訪問先と面会者

い。現在稼働中の発電所も予定通り廃炉にする。（現在ドイツでは9基の原子力発電所が稼働しており、8基は20年以上、1基は30年以上の期間稼働しているものである。2022年までに順次稼働停止となる。）

- 石炭燃焼発電は、低コストという大きなメリットがあるため、新規に3基設置することになった。（原料は、国内炭鉱産業保護の観点から国内炭を利用しているが、ロシアや東欧の石炭の3倍以上であり、エネルギーコスト上昇の要因となっているとの批判が多い。現在、外国からの石炭輸入量を増やす傾向にある。）
- エネルギー安全保障の観点から、過去にロシアが行ったパイプライン供給停止による混乱に代表されるようなリスクを低減するため、ロシアからの天然ガス輸入をできるだけ減らしたい。エネルギーソースの多様化を伴う水素利用は、1つの対応策であると考えている。
- 既存のガス供給パイプラインを用いて、天然ガス-水素混合燃料を供給するシステムを検討している。ドイツを含む欧州では天然ガスのパイプライン網が非常に発達しており、再生可能エネルギーを変換して得た水素や水素混合燃料は、既存のパイプライン上に大量に貯蔵することができる。このため水素や水素混合燃料の製造場所に、大規模な製品ガスの貯蔵施設を設ける必要がない。このことがPower to Gas検討のドライバーの1つになっている。



写真1 面会したUlrike Fuchsh博士、Jochen Bard氏、Ramona Schroeer博士（中央左から）

- 水素5～10%の混合は問題なく実施でき、既存のガスメーターをそのまま用いて、メーターの読み替えで対応することができる。それ以上の水素濃度の場合には、専用のガスメーターへの取り替えが必要となり、コスト高となるため現実的ではない。また、水素濃度が20%以上の場合には、配管などからの水素の漏出の影響があるため、その対応が必要となり、パイプライン全体の改修が必要となる。20%以上の高濃度水素利用システムを整備するには専用配管の新規設置が必要となる。

(3) DNV GLでのヒアリング調査

2015年9月7日にフローニンゲンの郊外にあるDNV GLを訪問し、Ir. Onno Florisson氏に面会して、オランダないしはEUにおける天然ガス-水素混合燃利用技術の開発状況と問題点に関する情報収集をおこなった。Florisson氏は、主に企業向けのNaturalhy利用システムのデザインを手がけており、EUからの研究資金を得て、研究を進めている。Naturalhyプロジェクトで明らかになった課題について情報提供を受けた。



写真2 フローニンゲン郊外にあるDNV GL

(ヒアリング内容)

- オランダは古くから天然ガスの産出国として知られ、オランダ北部に位置するGroningen（フローニンゲン）はその中核地である。オランダの天然ガスには窒素分が多いため、発熱量が低い低級なガスである。これらのガスは、国際パ

イプラインを經由してドイツなどへも供給されてきたが、近年は枯渇しつつあり、オランダ国外からの天然ガスの輸入は増加している。窒素分の多い天然ガスを利用してきたという歴史的背景から、天然ガスに水素を混合して利用する Naturalhy という新しいコンセプトは、オランダ国内で容易に受け入れられた。

- 欧州議会のEU指令2003/55/ECによる既存の天然ガスパイプライン網のグリーン化を受け、2004年5月から2009年11月の間、欧州諸国を中心とする39カ国が参加してNaturalhyプロジェクトが実施された。プロジェクト予算総額は1,730万ユーロ（約24億円）であった。
- プロジェクトでは、Naturalhyの製造、輸送、貯蔵、利用に係る個別技術の開発と、NaturalhyシステムのCO₂削減効果や経済性をシミュレーションにより評価した。実規模のシステムでの実証試験は行っていない。
- 厨房を模擬してNaturalhyが漏洩・爆発した場合の被害を検証する実験を行った。この結果、水素30%までは天然ガスの場合と比べて大きな違いはないが、それを超すと爆発の圧力上昇も顕著になり、被害が増大することが分かった。安全上の観点からは水素混合濃度は30%以下が望ましい。
- シミュレーションでは供給する水素として、化学工業からの副生水素を想定しており、十分な供給量が安定して確保できることを前提としている。なお、天然ガスの産出国であるオランダでは、安価な天然ガスを改質して水素を作る方法にも経済合理性があると考えている。
- 供給先の混合ガスの水素濃度に対する要求が多岐にわたるため、使用ガス機器の特性に合わせて水素濃度を制御する必要がある。例えば、天然ガスエンジンの場合には、10%以上の水素混入はノッキングを生じ、ピストンなどにより損傷を与える可能性がある。しかしながら、欧州における発達した天然ガスパイプライン網には多くのガスの出入ポイントがあり、水素濃度を一定に保って水素混合ガスを天然ガスパイプ



写真3 厨房内のガス爆発を模擬する野外実験装置（実験時には鉄骨の構造物の周囲をビニールシートで覆い、内部に水素混合ガスを注入・爆発させ、水素濃度の違いによる爆発の被害の違いを評価する。黄色のチューブは障害物を模擬したもの。）



写真4 面会したOnno Florisson氏

インで供給することは困難である。このことが Naturalhy を社会実装する上で大きな障壁となっている。

- Naturalhyシステムの需要側で、Naturalhyからパラジウム水素分離膜を用いて水素を引き抜き供給する技術開発をおこなったが、経済性の観点から実用化は困難と判断した。
- Naturalhyプロジェクトの後継事業として、Hyreadyプロジェクトを2015年末に立ち上げることを目指しており、60万ユーロの資金獲得を目指している。

(4) HYDROGENICS GmbHでのヒアリング調査

2015年9月8日にGladbeck（グラードベック）にある同社の工場にてMark Kammerer氏とProf. Dr. Karl Klug氏に面会し、同社の製品である電

気分解水素製造装置の情報提供を受けた後、ヘルテンにて進められている再生可能エネルギーからの水素の製造技術および水素利用実証事業（H2HERTEN）を視察した。Klug教授は長年にわたり電気分解水素製造装置の開発に携わっており、HYDROGENICS社創業者の一人でもある。

（ヒアリング内容）

- 電気分解水素製造装置には、アルカリ電解質（70% H_2O +30% KOH ）を用いたタイプと、PEM（Proton Exchange Membrane、プロトン交換膜）を用いたタイプがある。アルカリ電解質タイプ（10 Nm^3H_2/h 以上の大容量電気分解水素製造装置用）の耐用年数は60年となっており信頼性が高く、年間維持コストはイニシャルコスト7万ユーロ/kWの1～3%であり、

これまでに7万時間（約8年間）の連続稼働実績がある。また、HYDROGENICS社の主力商品であり、Power to Gas実証試験でも納入実績があり、PEMタイプは1 Nm^3H_2/h の小容量から大容量まで適応可能である。これまでに3万時間の連続稼働実績がある。水素製造効率は、両タイプとも同じ4.2kWh/ H_2Nm^3 である。

- 水素を移動体燃料に適用する場合、普通乗用車よりも、フリート運用が中心で水素充填設備じゅうてんの設置個所を限定でき、インフラ投資コストを抑制することのできるバス、トラックなどの方が普及の障壁が低いと考えている。また、水素燃料機関車への適用も視野に入れている。
- 再生可能エネルギーを用いたメタンやメタノールの合成はコスト高が予想されることから、普及には懐疑的である。



写真5 面会したMark Kammerer氏（左）とKarl Klug教授（中央）



写真7 石炭採掘場跡地に建つH2HERTEN実証施設（右）



写真6 製作中の水素製造装置（小型のPEMタイプ電気分解水素製造装置を採用したオールインワンコンテナタイプ）



写真8 HYDROGENICS社製大型PEMタイプの電気分解水素製造装置



写真9 水素燃料電池、蓄電池、キャパシタから成るシステム

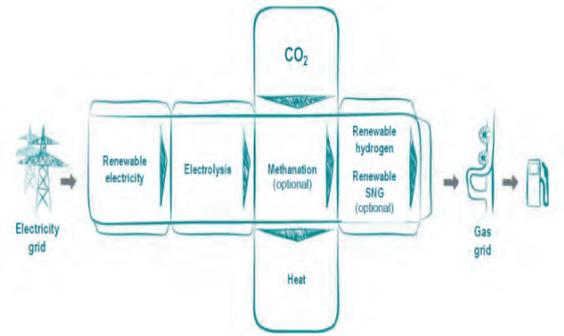


図7 ETOGAS社が考えるPower to Gasの概念図



写真10 再生可能エネルギーによる発電量および負荷変動に対する水素燃料電池、蓄電池、キャパシタによる給電追随性を評価するシミュレーションシステムのモニター画面



写真11 シュツットガルト郊外にあるETOGAS社が入居するオフィスビル

- 電気分解水素製造装置により水素を製造する場合、Lindeなどの工業用ガス会社製の副生水素と比較すると販売価格は高くなるが、Power to Gas実証事業のサイトなどで連続製造・供給できることと、製造工程におけるゼロエミッション化が可能である点がメリットである。
- Gladbeckに隣接するHerten（ヘルテン）にある水素の実証施設では、風力発電装置、蓄電池、キャパシタ、電気分解水素製造装置（HYDROGENICS社製）、水素貯蔵タンク、水素燃料電池などをネットワーク化したエネルギーグリッドを構築しており、コンピュータ制御により実証施設内の実負荷（照明、空調、動力、電気機器用電力負荷）に加え仮想的な負荷を与え、再生可能エネルギーやデマンドが変化した場合の負荷追随性を評価するコンピュータシミュレーションを実施している。

（5）ETOGAS GmbHにおけるヒアリング調査

2015年9月10日にStuttgart（シュツットガルト）の郊外にある同社にてDipl. -Ing. Stephane Rieke氏に面会し、メタン合成装置に関する情報提供を受けた。

（ヒアリング内容）

- ニッケル触媒を用いた反応装置により、水素と二酸化炭素を反応させメタンを合成する装置を開発している。原料である二酸化炭素は、工場やバイオマス発酵施設で発生するガスを想定している（図7）。
- これまでにいくつかのパイロットプラントの製作を受注しており、ドイツ国内のPower to Gas実証試験への納入実績もある。この中には、大気中のCO₂を回収してメタンの原料とするプロジェクトも含まれている。
- 現在の機器効率（生成メタン1Nm³に対する必

要投入エネルギー)は60%であり、40%は熱損失である。設備コストの高いことが課題であり、仮に10MW級の設備を製作した場合、イニシャルコストは1,900万ユーロ(約25億円)である。

3. 調査結果のまとめ

ドイツでは再生可能エネルギーから作られる電力に余剰が発生している。これを有効に利用するために、余剰電力を一旦水素やメタンに変換して貯蔵し、必要な時に利用するという方法は合理的ではあるが、設備コスト面で解決すべき課題があり、現時点では実施段階までには至っていない。また、Naturalhyに代表される様な画一的な天然ガス-水素混合燃料を広域供給するシステムの構築には、パイプラインに接続するさまざまなガス利用機器の特性に起因する大きな制約があることが明らかになった。最近のガス燃料の用途は、特に産業用分野において単に燃焼熱を利用するだけでなく、ガスを原料として改質反応により合成ガスを製造するなど多岐にわたっており、ガスエンジン、ガスタービンなどにおいても運転可能な混合水素の濃度範囲が大きく異なるためである。

今後の我が国の人口減少・労働力不足・需要減少を考え合わせると、広域エネルギー供給システムの維持は、コスト高にもなることもあり困難になると考えられる。さらには、今後利用が拡大する再生可能エネルギーを地産地消するのに親和性

が高いことから、分散型エネルギーシステムへの転換が進むものと考えられる。この時、分散型エネルギーシステムのもとで再生可能エネルギーの利用を最大化する方策として、Power to Gasのコンセプトを適用できるかも知れない。今回の調査で明らかとなった制約や解決すべき課題はあるが今後の発展に期待したい。

謝辞

今回の報文作成にあたり、企画、運営から現地調査にいたるまでご協力いただいた中部圏社会経済研究所の梅田良人博士に感謝します。

参考文献

- (1)「なぜドイツではエネルギーシフトが進むのか」田口理穂著、学芸出版社(2015年)
- (2) Fraunhofer研究機構 (<http://www.fraunhofer.jp/ja/aboutus/FhG.html>)



写真12 ドイツ鉄道で移動中の車窓から発電用風車群を望む。こうした風景はドイツ調査中数多く見られた。放牧地に牛と風車が同居している。