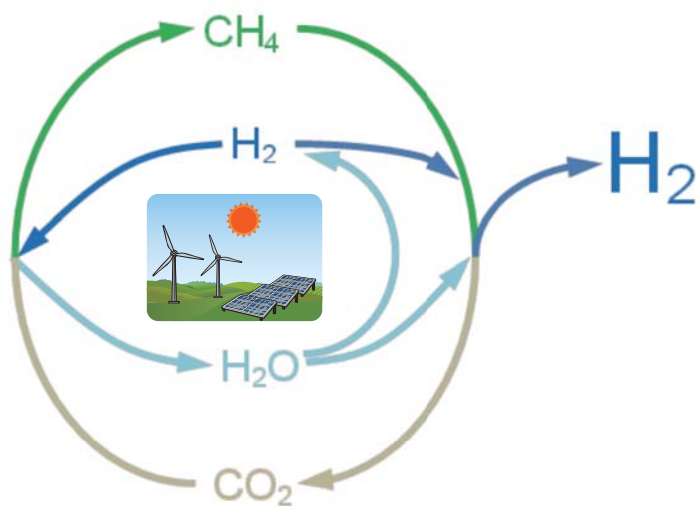


「CO₂排出量削減への新しいアプローチについて」

～水素混合燃料技術の展開と金融メカニズムの活用～
(ハイブリッド水素供給に関する調査研究報告書)



2016年4月

公益財団法人 中部圏社会経済研究所

(写真)

• Twin Blue Marbles

出典 : <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=8108>

はじめに

気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change：IPCC）5次評価報告書によると、2010年における温暖化に対する各温暖化ガスの寄与率は、化石燃料由来（主に燃焼による）のCO₂が65.2%、メタンの放出が15.8%、CO₂吸収植物の減少（森林減少等）によるCO₂の増加が10.8%、一酸化二窒素が6.2%、フロンガスが2.0%とされており、化石燃料の燃焼利用によって人為的に排出されるCO₂の削減が最も重要な課題である。

従来からCO₂などの排出量削減の重要性は、多くの場で議論され指摘されてきたが、地球規模での実効性のある対策と枠組みは構築されていなかった。2015年11～12月にパリで開催されたCOP21では、最大の排出国である米国と中国のCO₂などの排出量削減目標が示され、初めて国際的な削減枠組みに参加することが表明された。また、インド等の発展途上国も積極的な参加を表明し、地球規模のCO₂排出量の削減実現に向け大きく前進した。我が国もエネルギー基本計画や長期エネルギー需給見通しに基づくCO₂などの排出量削減目標を示した。COP21パリ協定は罰則規定等の強い強制力をもたないものの、5年毎の成果報告と削減目標明示を定めるなど実効性を高める工夫がされており、我が国は、長期エネルギー需給見通しの実現に向けて、明確かつ具体的な道筋をつけ、環境技術を活かした国際貢献を強化することが求められることになる。

CO₂排出量の削減には、従来から社会実装・実証が進められている主要な方法として、省エネルギー技術によるエネルギー消費の抑制、木質燃料やバイオエタノール等のカーボンニュートラルな燃料の利用、太陽光、風力、水力などの再生可能エネルギーの利用があるが、他にも新しい方法がいくつか提案されている。

本調査研究では、新たな環境・エネルギー分野でのイノベーションや市場メカニズムを用いた取り組みとして、将来実現が期待できる2つの方法を取り上げる。

1つは、水素を天然ガスなどの既存の化石燃料に混合して供給・利用するエネルギーシステムである。我が国で現在提唱されている水素社会では、水素燃料電池自動車に代表される様に純度100%の水素燃料の利用が主に考えられている。しかしながら、高純度水素燃料による社会を実現するためには、水素チェーン（製造、輸送、貯蔵、利用）の全てにおいて爆発安全性を確保した専用システムを新規に構築する必要があり、膨大なコストと時間がかかる。現在ドイツを中心に実証が進むPower to Gas（PtG）は、天然ガス等の既存の燃料に安全な濃度の水素を混合し、既存の天然ガス供給ネットワークや利用機器を活用する方法である。水素を利用することにより需要端におけるCO₂排出量の削減を着実に進めることができ、実効性を伴う現実的なCO₂排出量の削減方法であると言える。利用される水素は、現時点では、製造工程でCO₂の排出を伴うが、コスト・効率の点で有利な化石燃料由来の水素が中心になると考える。その後、次第に再生可能エネルギー由来の水素に移行していくことが期待される。そこで、ドイツ、オランダ、アメリカの状況をレビュー

した上で、中部圏における水素混合燃料の可能性と適用のための課題などについて整理する。

もう1つは、CO₂排出量取引という金融メカニズムをインセンティブとして用いる方法である。現状では、我が国では東京都など導入する自治体はあるものの、全国規模のキャップ&トレード型の排出量取引は設けられておらず、いち早くキャップ&トレード型排出量取引を導入したEUでも改良途上である。今回のCOP21により温度上昇許容目標（2℃）と国際的なCO₂削減枠組みが確立したこともあり、中国など途上国を含め各国で準備されてきた排出量取引の整備が進むことが期待される。取引市場が各国で整備され安定して機能すれば、世界的な排出CO₂ 1トン当たりの価格が見えてくることから、排出量削減にかかる費用の目安を算定できることになる。パリ協定では21世紀後半のネットゼロエミッションをめざしており、CO₂排出量は次第に減少する様に政策がとられると見込まれる。今後、炭素税や排出量取引を通じて、排出コストは上昇する見込みであり、排出量取引技術の開発・普及がすすみ、CO₂の排出量削減に効果的に寄与するものと期待されている。

これら2つの方法は現在のところ社会の注目度は高くないが、10-20年後を見据えて着実な実効性が期待でき、実現可能性もあると考えられることから、現時点において調査し、適用可能性を検討するとともに、課題を明確化しておく価値が十分にあると考えた。

本報告書作成に当たっては、中部圏社会経済研究所内にハイブリッド水素研究会を組織して、海外における水素供給実証事業を中心とする調査と検討を行った。また、「金融メカニズムの活用」に関しては、本分野の有識者である株式会社三井物産戦略研究所 本郷尚氏に執筆頂いた。

2016年4月

公益財団法人 中部圏社会経済研究所

[ハイブリッド水素研究会委員]

座長 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 吉川 典彦
豊橋技術科学大学機械工学系准教授 中村 祐二

[外部執筆者]

株式会社三井物産戦略研究所 国際情報部 メガトレンド調査センター
シニア研究フェロー 本郷 尚

(敬称略)

Note 1：本報告書中の“天然ガス”は天然ガスと天然ガスを原料とするメタン主成分の都市ガス（ガスグループ13A）の両方を指すものとする。

Note 2：本報告書中のガスの発熱量は総発熱量（高位発熱量）基準とする。

Note 3：公益財団法人という中立的な立場から、個社名や商品名をできるだけ避けて記述した。

目 次

はじめに

要約

第1章 CO ₂ 削減のための再生可能エネルギーと水素利用の現状と課題……………	1
第2章 パイプラインで水素を供給・利用するエネルギーモデルについて……………	6
1. パイプラインによる水素供給に関する歴史と動向	
2. オランダとドイツにおけるPtGへの取り組みについて	
3. 米国におけるPtGへの取り組みについて	
第3章 水素混合燃料技術による水素の供給・利用について……………	21
1. 水素混合燃料による水素供給・利用の概念	
2. 太陽光発電の余剰電力のガス化による利用促進について	
3. 水素混合燃料技術を適用したエネルギー供給モデルについて	
4. 水素混合燃料技術の実装に向けた課題	
(1) Explicit水素を供給する場合	
(2) Explicit水素によるメタンを製造してImplicit水素として供給する場合	
第4章 水素混合燃料の燃焼に関する特徴と適用上の制約について……………	30
1. 検討の対象とする天然ガスと水素について	
2. Explicit水素と13Aガスを混合した燃料の燃料特性について	
3. Explicit水素により製造したメタンを13Aガスに混合する燃料の燃焼特性について	
4. Explicit水素とExplicit水素から合成したメタンを13Aガスに混合した燃料について	
第5章 中部圏における水素混合燃料技術の適用性について……………	41
1. 中部圏9県における再生可能エネルギーの利用可能ポテンシャル	
(1) 中部圏9県の再生可能エネルギーの導入ポテンシャルと分布について	
(2) 水素化利用の対象とする再生可能エネルギーについて	
2. 太陽光発電電力の水素混合燃料としての利用について	
(1) 太陽光発電電力の水素化利用の考え方	
(2) 中部圏9県の太陽光発電の想定導入量の算定	
(3) 水素混合燃料の利用による再生可能エネルギーの利用促進およびCO ₂ 削減効果の推定	

第6章 金融メカニズムによるCO ₂ 排出量の削減について.....	52
1. 炭素税および排出権取引とは	
2. 経緯と動向	
3. 現状と課題	
4. 金融メカニズムによるCO ₂ 削減について	
5. 課題解決のための方策と今後の展望	
参考資料.....	62
おわりに.....	68
参考文献.....	70

要 約

地球温暖化の最大要因は、化石燃料の燃焼利用によって人為的に排出されるCO₂であり、その削減が最も重要な課題となっている。CO₂の排出量削減のためには地球規模での取り組みが重要であり、実効性のある対策とそれを実行するための枠組みの構築が必要とされていた。2015年11～12月にパリで開催されたCOP21では、温度上昇許容目標（2℃）が決まるとともに最大の排出国である米国と中国が初めて削減の枠組みに加入することを表明し、削減目標を示した。また、インド等の発展途上国も積極的な参加を表明した。我が国もエネルギー基本計画やエネルギー長期需給見通しに基づき、2030年までに2013年比で26%削減（GHGのCO₂換算値）する目標を示した。COP21パリ協定は罰則規定等の強制力をもたないものの5年毎の成果報告などを定めており、今後我が国も削減に向け、より強い取り組みが求められることになる。地球規模のCO₂排出量削減の実現に向け大きく前進した2015年は、気候変動問題への取り組みの歴史的転機とされている。

CO₂の排出量削減には、従来から社会実装・実証が進められている主要な方法として、省エネルギー技術によるエネルギー消費の抑制、木質燃料やバイオエタノール等のカーボンニュートラルな燃料の利用、太陽光、風力、水力などの再生可能エネルギーの利用があるが、10～20年後の将来を見据えた実現可能性の高い2つの新しい方法が提案されている。1つは、再生可能エネルギーの利用を促進するために、再生可能エネルギーにより製造した水素を天然ガスなどに混合した燃料を既存のインフラを用いて供給・利用するエネルギーシステムである。本システムは、再生可能エネルギーの利用促進と水素の利用に伴う安全対策などのコスト増の回避という2つの課題を解決し、CO₂の排出量削減を無理なく実現する方法である。2つは、CO₂排出量取引市場という金融メカニズムを用いる方法である。CO₂排出量取引市場は、我が国では確立されておらず、欧米ではこれまで充分機能していないと評価されてきたが、今後は、COP21パリ協定で策定されたCO₂排出量が次第に減少するシナリオのもと、炭素税制、技術開発による排出量削減と連携して機能し、排出量削減に効果的に寄与するものと期待される。これら2つの方法は、現在のところ社会の注目度は高くないが、10～20年後を見据えたCO₂排出量削減において着実な実効性が期待でき、実現可能性が高いと考えられることから、気候変動問題への取り組みの歴史的転機と言われる今、我が国への適用性を検討するとともに課題を明確化することは十分意義があると考え調査研究をおこなった。

調査研究報告書では、CO₂排出量削減のための再生可能エネルギー導入と水素利用の現状と課題について整理した上で、ドイツの電力ガス化利用（Power to Gas：PtG）をはじめとする欧米での取り組み状況をレビューし、水素混合燃料の適用性を検討した。次に、水素混合燃料による中部圏における再生可能エネルギーの利用促進とCO₂排出量削減の可能性を評価し、適用上の課題を整理した。また、もう1つのCO₂削減のアプローチ方法として、金融メカニズムによるCO₂削減の現状と今後の展望と課題を整理した。

第1章の「CO₂削減のための再生可能エネルギーと水素利用の現状と課題」では、CO₂削減のための再生可能エネルギーと水素利用の現状と課題を整理した上で、今後再生可能エネルギーの利用を推進する上で、課題となる接続容量の限界や、水素の利用にあたり課題となる、供給安全性の確保およびインフラ形成コストなどを解決するための新しい水素エネルギー供給システムとして、水素と天然ガスに混合して燃料として供給する技術モデルの必要性を示した。

第2章の「パイプラインで水素を供給・利用するエネルギーモデルについて」では、我が国と欧米におけるパイプラインによる水素供給の歴史を振り返り、EUにおいて先導的に実施された、天然ガスに純水素を混合して供給・利用する概念を検討するプロジェクト Naturalhyの成果と抽出された課題を整理した。その上で、現在、ドイツおよびアメリカにおいて実証が進められている再生可能エネルギーにより発生させた余剰電力により水素を製造し、既設の天然ガスのパイプラインを利用して供給するPtGの構想と課題について述べた。

第3章の「水素混合燃料技術による水素の供給・利用について」では、我が国におけるCO₂削減のための再生可能エネルギーと水素の利用に関する現状と課題を踏まえ、水素混合燃料による水素の供給・利用の可能性と課題を、ドイツのPtGをはじめとする欧米の概念などを参考に整理した。次に、我が国のエネルギーインフラの現状を踏まえ、水素混合燃料を供給・利用する新しいエネルギーモデルの概念について述べた。混合する水素として、いわゆる純水素分子（Explicit水素）とExplicit水素とCO₂から合成したメタンに陰的に含まれる水素（Implicit水素）の概念を導入した。

第4章の「水素混合燃料の燃焼に関する特徴と適用上の制約について」では、水素を天然ガスに混合した燃料の燃焼特性を評価した上で、供給・利用において制約となる条件を整理した。混合の対象とする天然ガスは、天然ガスを原料として製造・供給されている、現在の我が国の代表的な都市ガスである13Aガスとし、これに再生可能エネルギーや化石燃料などにより製造したExplicit水素およびImplicit水素を混合した燃料の燃焼特性を検証した。

第5章の「中部圏における水素混合燃料技術の適用性について」では、中部圏9県における再生可能エネルギーの資源量として利用可能ポテンシャルを整理した上で、太陽光発電の余剰電力を水素化して、天然ガスパイプラインを用いて供給・利用する場合について、製造できる水素量とCO₂削減効果などを推定した。

第6章の「金融メカニズムによるCO₂排出量の削減について」では、CO₂の排出量削減を金融メカニズムで扱うための排出量取引および炭素税の考え方はじめ、排出量取引を中心とする金融メカニズムによるCO₂排出量削減の現状と課題について整理するとともに今後期待できる効果と展望について述べた。

第1章 CO₂削減のための再生可能エネルギーと水素利用の現状と課題

本章では、CO₂削減のための再生可能エネルギーと水素利用の現状と課題を整理した上で、今後再生可能エネルギーの利用を推進する上で、課題となる電力系統の接続容量の限界や、水素の利用にあたり課題となる供給安全性の確保およびインフラ形成コストなどを解決するための新しい水素エネルギー供給システムとして、水素を天然ガスに混合して燃料として供給する技術モデルの必要性を示す。

世界の大気中のCO₂濃度は上昇を続け、2015年に遂に月平均値が400ppmに達した。パリ協定で合意した温度上昇を2℃未満に抑える（表1-1参照）ためのカーボン budgets^(注1)は急速に減りつつあり、CO₂排出量の削減に直ちに取り組み、結果を出さなければならぬ状況にある。

表1-1 AR5 WGIIIにおいて収集・分析されたシナリオの主な特徴

2100年のCO ₂ 換算濃度 区分レベル (濃度ppm)	細区分	RCP シナリオの 相対的 位置	累積CO ₂ 排出量(GtCO ₂)		2010年比のCO ₂ 換算 排出量変化(%)		温度変化(1850-1900年平均比) ^(注)					
			2011~ 2050年	2011~ 2100年	2050年	2100年	21世紀に下記の温度水準未満に留まる可能性(%)					
			2100年の 温度変化(°C) ^(注2)				1.5°C	2°C	3°C	4°C		
430未満			430ppmCO ₂ 換算未満では限られた数のモデルしか研究されていない									
450 (430-480)	全体幅	RCP2.6	550-1300	630-1180	-72~-41	-118~-78	1.5-1.7 (1.0-2.8)	どちらかと言えば低い	低い			
500 (480-530)	オーバーシュートなし		860-1180	960-1430	-57~-42	-107~-73	1.7-1.9 (1.2-2.9)	どちらかと言えば高い				
	530ppmをオーバーシュート		1130-1530	990-1550	-55~-25	-114~-90	1.8-2.0 (1.2-3.3)	どちらも同程度				
550 (530-580)	オーバーシュートなし		1070-1460	1240-2240	-47~-19	-81~-59	2.0-2.2 (1.4-3.6)	低い		高い		
	580ppmをオーバーシュート		1420-1750	1170-2100	-16~-7	-183~-86	2.1-2.3 (1.4-3.6)		どちらかと言えば低い		高い	
(580-650)	全体幅	RCP4.5	1260-1640	1870-2440	-38~-24	-134~-50	2.3-2.6 (1.5-4.2)					
(650-720)	全体幅		1310-1750	2570-3340	-11~-17	-54~-21	2.6-2.9 (1.8-4.5)					
(720-1000)	全体幅	RCP6.0	1570-1940	3620-4990	18~-54	-7~-72	3.1-3.7 (2.1-5.8)	低い*	低い	どちらかと言えば高い		
1000超	全体幅	RCP8.5	1840-2310	5350-7010	52~-95	74~-178	4.1-4.8 (2.8-7.8)		低い*	低い	どちらかと言えば低い	

出典：IPCC第5次評価報告書の概要－第3次作業部会（気候変動緩和）－（環境省ホームページ）

我が国において2015年に策定された長期エネルギー需給見通しでは、高効率エネルギー利用機器の開発・投入や省エネルギー行動の徹底と1次エネルギーに占める再生可能エネルギーの割合を高めることなどが方針として示された（図1-1参照）。

高効率エネルギー機器については、これまでにコージェネレーションシステムや燃料電池、ヒートポンプあるいはLEDなどに代表される高効率エネルギー機器が開発されてきており、今後の更なる高効率化が期待されている。再生可能エネルギーの利用については、FIT制度がインセンティブとなり、比較的設置の容易な太陽光発電システムが再生可能エネルギーの導入量の増加を牽引してきた。今後、FIT価格にもよるが、昼夜安定した出力の得られる（陸上・洋上）風力発電、バイオマス、地熱などの利用拡大が期待される中、接続容量の増加にともない発生すると考えられる系統受け入れ制約の解消が課題の1つとなっている。

また、2次エネルギーである水素を燃料として利用することにより、需要端における

(注1) カーボン budgets：気温上昇をあるレベルまでに抑えようとする場合のCO₂等の温室効果ガスの累積排出量（過去の排出量+これからの排出量）の上限。

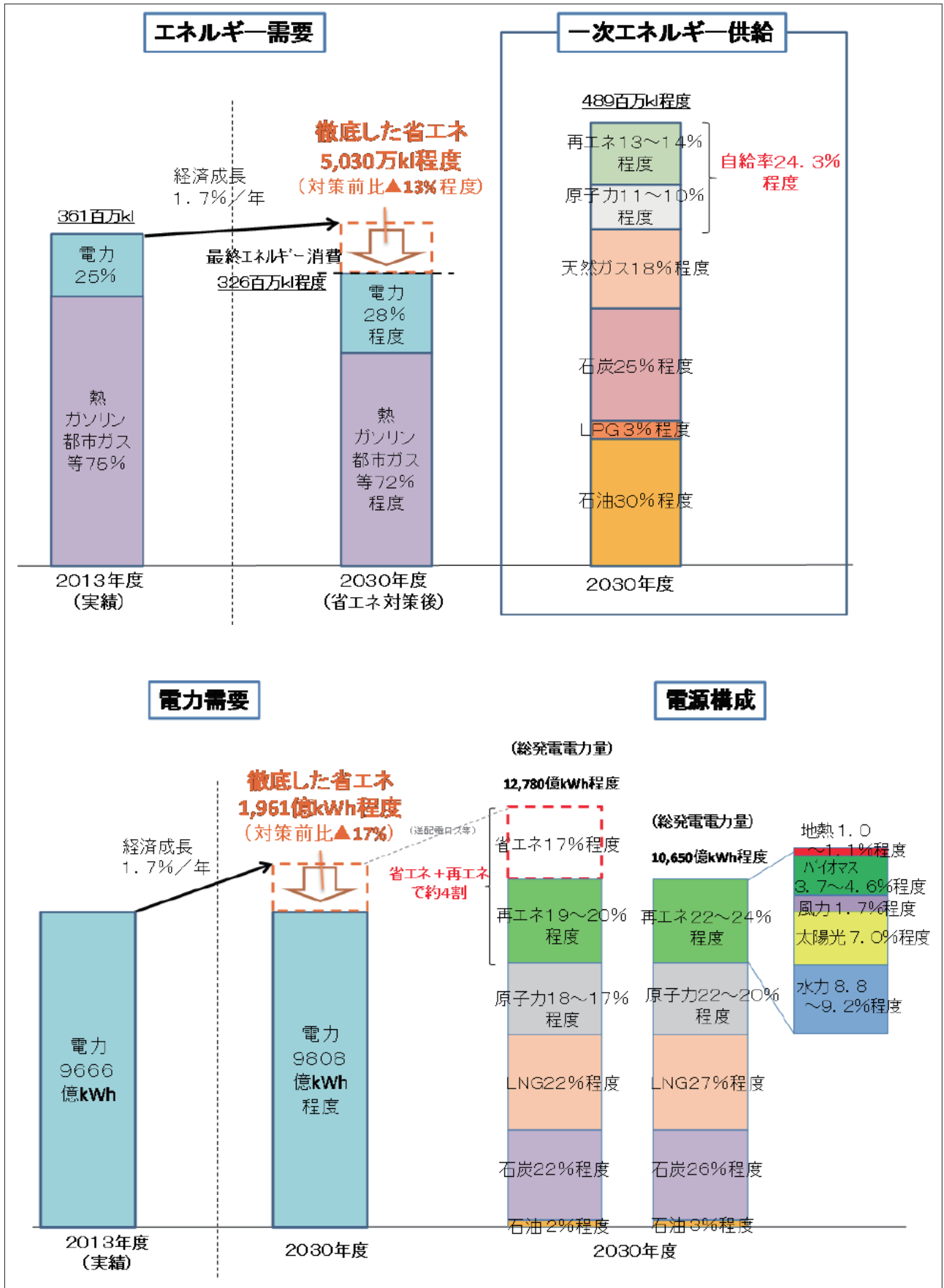


図1-1 エネルギー長期需給見通し

出典：経済産業省資源エネルギー庁ホームページ

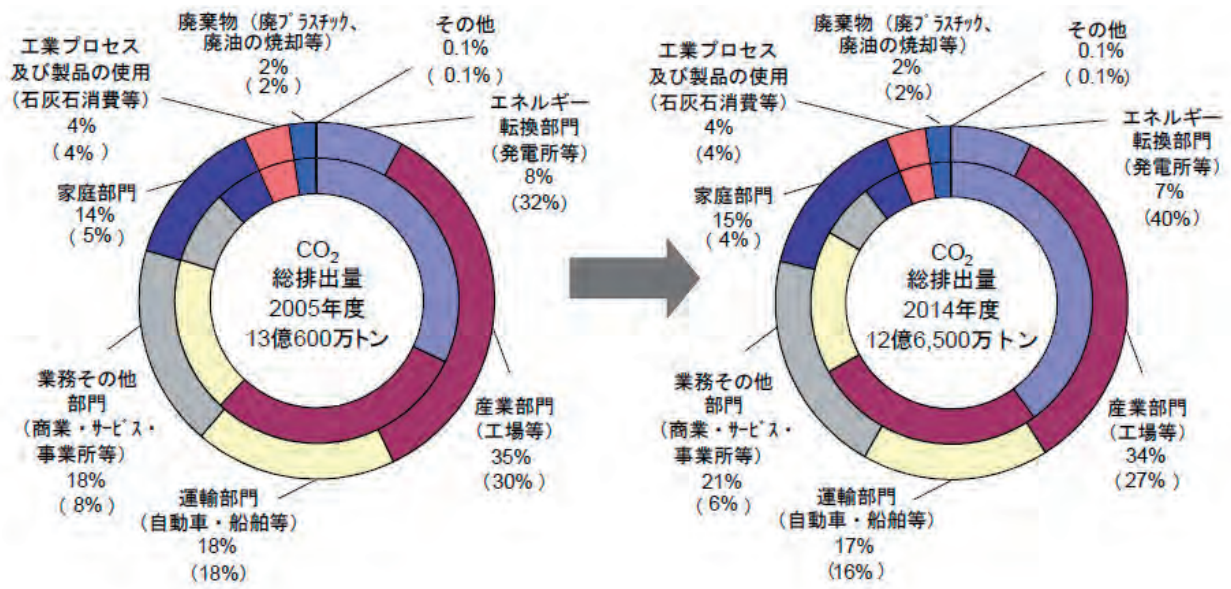


図1-2 CO₂排出量の比較

出典：環境省ホームページ

CO₂の排出をゼロにするシステムが将来の水素エネルギー社会の中で考えられている。

2014年に燃料電池自動車（FCV）の販売が開始され、我が国のCO₂排出量の16%（電気・熱配分前：2013年環境省データ、図1-2参照）を占める運輸部門についてはゼロエミッション化が進み始めた。2016年に公表

されたFCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオでは、2030年に累計65万台の車両がFCV化されると想定している（図1-3参照）。全国の車両台数が約8,130万台（平成27年12月末現在）であることから、65万台のFCVによるCO₂排出量の削減が全体に占める割合は1%未満と想定される。ただし、FCVの燃料である水素の製造工程においては、再生可能エネルギーから水素を製造する場合を除くと、CO₂排出量削減の問題は解決されていない。燃料電池を用いる電動車両であるFCVはエネルギー変換効率が高いため、Well to WheelのCO₂排出において内燃機関を用いる車両の平均CO₂排出量を下回っているの

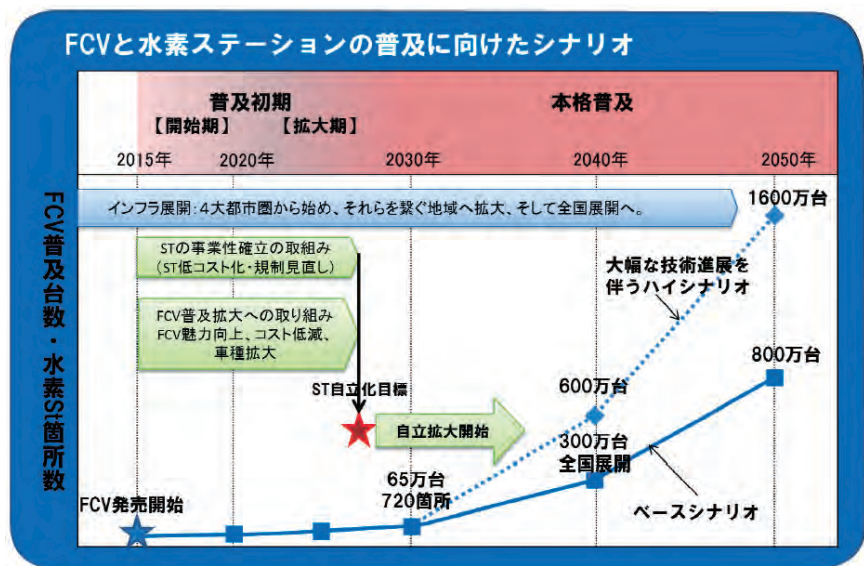


図1-3 FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ

出典：FCCJのシナリオ（2016年公表）

(注2) FCCJ：Fuel Cell Commercialization Conference of Japan（燃料電池実用化推進協議会）

(注3) Well to Wheel：油井で原油を採掘してから車輪を動かすまで（燃料消費やCO₂発生量を計測するために対象とする範囲の規定）

が実態であり（図1-4参照）、水素燃料の製造工程からのCO₂排出量削減は今後の重要な課題である。

温室効果ガスの排出量を2030年度に2013年度比-26.0%の水準に抑制するという我が国の目標を達成し、将来に渡ってCO₂排出量削減を進めていくためには、図1-2に示す様に、CO₂排出量の40%を占めるエネルギー転換部門、約27%を占める産業部門、業務その他部門、家庭部門での削減を着実に進める必要がある。

発電所等のエネルギー転換部門については、電源構成における再生可能エネルギー割合の増大に加え、CCS機能の追加や高純度水素供給をベースとする純水素ガスタービン発電技術などが、将来の水素社会の中で検討されているが、特に純水素専用のサプライチェーンの構築については膨大な時間とコストが必要になると考えられる。

産業部門、業務その他部門、家庭部門におけるCO₂排出量の削減を進めるためには、高効率エネルギー機器・システムの導入や省エネ行動の促進という従来からの利用時の取り組みや需要端における再生可能エネルギーの利用拡大に加え、供給される燃料自体についても再生可能エネルギーや水素の利用による低炭素化が、電源構成における再生可能エネルギー導入の促進と同様に必要であると考えられる。

水素の利用にあたっては、水素固有の物性、特に燃焼・爆発性の高さが問題となる。表1-2に示す様に、水素と空気の混合気の可燃濃度範囲（4-75%）は既存燃料と比較して非常に広く、最小着火エネルギー（約0.02mJ）は桁違いに小さい。また、最大層流燃焼速度（3.1m/s）は、メタン（天然ガスの主成分）と空気の混合気（40cm/s）の約8倍速い。水素は、広い濃度範囲で容易に着火し、急速に燃焼する燃料である。水素は他の燃料と比較して非常に軽く、拡散速度も速いことから万一、漏えいした場合も上方へ速やかに散逸するため、実際の爆発危険性は低いとする考え方があるが、漏えい滞留した場合を考えると、爆発危険性が高いという事実に対する保安の確保は不可欠である。こ

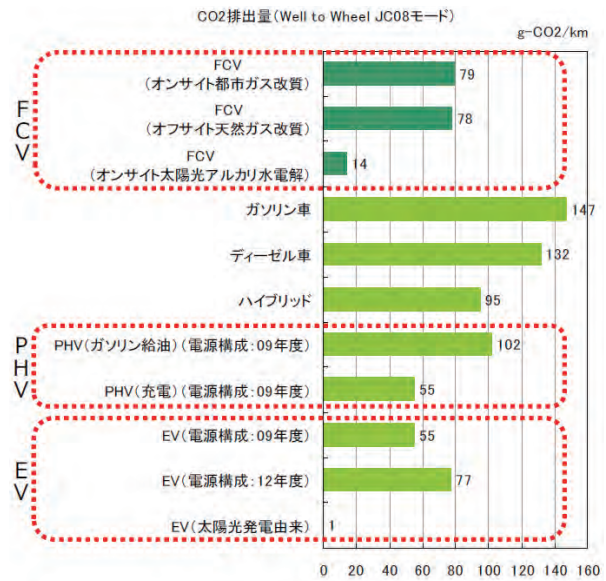


図1-4 CO₂排出量 (Well to Wheel) の比較
出典：水素・燃料電池戦略ロードマップ（平成28年3月22日改訂）

表1-2 水素の燃焼に係る物性

	水素	既存燃料			空気
		天然ガス	LPG	ガソリン	
重さ (相対値)	1	8	22	50	15
拡散速度 (相対値)	100	25	20	8	-
燃焼範囲 (空気中濃度 vol%)	4%~75%	5%~15%	2%~10%	1%~7%	-
最小着火エネルギー	0.02mJ	0.29mJ	0.26mJ	0.24mJ	-
自然発火温度	570℃	580℃	450℃	300℃	-
金属の脆化 (高圧下)	有り	無し	無し	無し	-

出典：一般社団法人エンジニアリング振興協会ホームページほか

(注4) CCS : Carbon dioxide Capture and Storage (二酸化炭素の回収・貯蔵)

のため、水素の供給を純水素の形でおこなう場合を考えると、安全確保のための専用設備が必要となり、その整備に多大なコストと時間が必要となる。

地球温暖化対策で求められていることは、限られたコストと時間の中で確実に温度上昇を目標値内に抑制することである。現在水素社会として指向されている純水素を供給するエネルギーシステムは理想的ではあるが、達成するまでのコストと時間がかかり過ぎる面があると考えられる。

本調査研究では、これら複数の問題や課題を解決するために、「再生可能エネルギーの利用が可能」、「既設のインフラを最大限活用できる」、「高純度水素供給に伴う危険性の回避」という価値条件を満たす水素エネルギー供給システムが有効であると考え、その核となる技術モデルとして水素を天然ガスに混合して燃料として供給する技術を提案するとともに、その効能についてCO₂削減の観点から検証する。

第2章 パイプラインで水素を供給・利用するエネルギーモデルについて

本章では、我が国と欧米におけるパイプラインによる水素供給の歴史を振り返り、EUにおいて先導的に実施された天然ガスに純水素を混合して供給・利用する概念を検討するプロジェクトNaturalhyの成果と判明した課題を整理する。その上で、現在ドイツおよびアメリカにおいて実証が進められている再生可能エネルギーにより発生させた余剰電力により水素を製造し、既設の天然ガスのパイプラインを利用して供給するPower to Gasの構想と課題について述べる。

1. パイプラインによる水素供給に関する歴史と動向

ガス体燃料である水素を国内の製造場所から需要地に連続して安定供給するためには、パイプラインによるエネルギーシステムが有効である。

パイプラインで水素を含む燃料を供給・利用するエネルギーモデルの歴史は温暖化対策の歴史よりも古く、例えば、我が国の都市ガス事業では、かつて石炭の乾留や石油の改質により生成した水素を45%程度含むガスを供給することが主流であった。その後、燃焼時にSO_xの発生がなく、NO_xやCO₂発生量の少ないメタンを主成分とする化石燃料である天然ガスを原料とするガスが主流となった。天然ガスは、世界に広く分布して賦存していることから、エネルギーセキュリティの強化につながるとともに、改質ガスよりも単位体積あたりの発熱量が高いことから、導管の輸送効率を高めることにつながった。

近年では、IGF21計画^(注5)の進展もあり、図2-1に示すガスグループ上の13Aガスおよび12Aガスと呼ばれる天然ガスを原料とする高発熱量の都市ガスに集約される傾向にある。また、ガス事業者によっては、変動の大きいLPG価格の影響緩和と原料調達先の多様化などへ対応するため、LPGによる天然ガスの増熱をおこなわず、供給するガスの熱量を13Aガスの燃焼性の範囲内で引下げる動きもある。パイプラインによる水素の供給は、北九州市にある製鉄工場間で行われている。製鉄原料であるコークスを製造する工程で発生

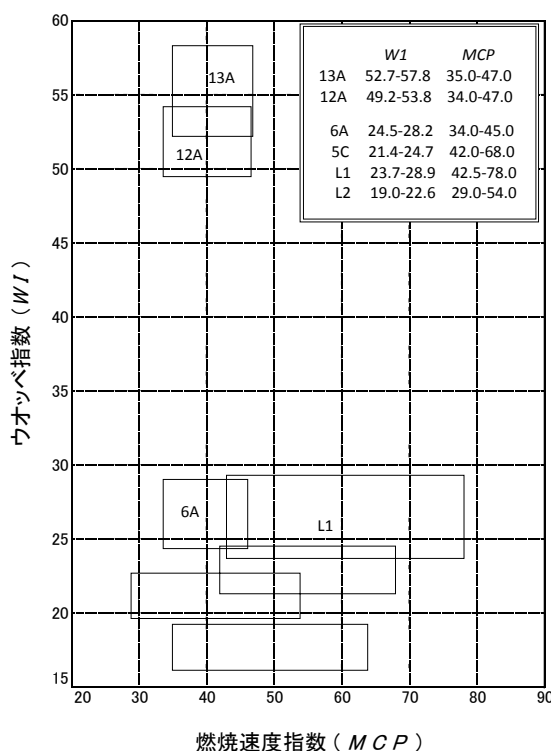


図2-1 各ガスグループの燃焼速度指数(MCP)とウobble指数(WI)

出典：都市ガス工業概要(消費機器編)(一般社団法人日本ガス協会)

(注5) IGF21計画：1990年に通商産業省資源エネルギー庁(当時)により提案された「INTEGRATED GAS FAMILY 21計画」を受けて、日本ガス協会および日本ガス石油機器工業会が策定。IGF21計画では、2010年を目途に、全国の都市ガスのガスグループを天然ガスを中心とした高カロリーガスグループ(13A、12A)へ統一することを目指し、全国のガス事業者が熱量変更を実施。

したオフガス中に含まれる水素を精製・輸送し、鋼材を加熱する際の酸化を防止するための保護ガスとして利用している。我が国では、水素は図2-2に示す様に石油産業における脱硫精製の原料、アンモニア製造の原料、石油化学の原料などとして製造・利用されている。また、製鉄工程などで発生する水素あるいは水素を含むガスはそれぞれの加熱や自家発電用の燃料として利用されている。水素の製造と利用は多くの場合、それぞれの事業所においてエネルギーバランスの中に組み込まれているため、これら水素を外販供給すると、エネルギーバランスが崩れる分、他の化石燃料により補充する必要性が生じ、新たなCO₂の発生を伴う。

欧州では、フランス、ベルギー、ドイツ、オランダやイタリアにおいて、工業的に生産した純水素を専用の長距離パイプラインで供給するシステムが古くから利用されている。これら水素は産業用の原料などとして工場に供給されており、家庭や商業施設など一般のガス需要家への燃料としての供給はなされていない。アメリカでは、図2-3や図2-4に示す様に、メキシコ湾に面するテキサス州やルイジアナ州で、石油や天然ガスから製造した水素を輸送するパイプラインが使われている。欧州同様、水素は産業用の原料などとして利用されており、一般需要家への燃料としての供給はなされていない。

水素の利用によりCO₂の排出量を削減する目的で、EUにおいて2004年から5年間、オランダGasunieのとりまとめにより、天然ガスに水素を混合して既設の天然ガス導管を用いて供給・利用するシステムの安全性や経

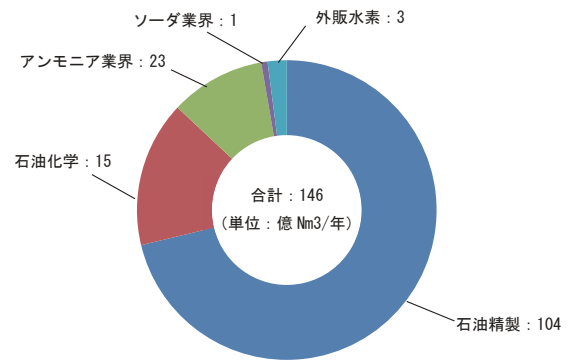


図2-2 国内における工業用水素利用

出典：水素の製造、輸送・貯蔵について 経済産業省資源エネルギー庁燃焼電池推進室資料（平成26年4月14日）をもとに作成

表2-1 世界の水素パイプライン

場所	材料	操業年数	口径 (mm)	距離 (km)	圧力 (MPa)
AGEC, アルジェリア	Gr.290 (5LX X42)	1987年～	273	3.7	3.8
Air Products, ヒューストン	—	1969年～	114-324	100	0.3-5.5
Air Products, ミッドランド	ASTM 106	—	102-305	48.3	3.4
Air Products, テキサス	鋼 (天然ガス転用)	23年以上	114	8	5.5
Air Products, テキサス	鋼	20年以上	219	19	1.4
Air Liquide, ドイツ	鋼 (SAE 1016)	1938年～	168-273	240	～2.5
Air Liquide, フランス	炭素鋼	1966年～	各種	290	6.5～10
Gulf Petroleum Canada, モントリオール	炭素鋼	—	168	16	—
ICI, Billingham, イギリス	炭素鋼	—	—	15	30
NASA-KSC, フロリダ	316SS	28年以上	50	1.6-2	42
Phillips Petroleum, テキサス	ASTM A524	1986年～	203	20.9	12

出典：水素エネルギー社会（山地 憲治著）



図2-3 欧州における水素のパイプライン

出典：水素エネルギー社会（山地 憲治著）に加筆

経済合理性などを実験とシミュレーションにより総合的に検証するプロジェクトNaturalhyが実施された。Naturalhyでは水素混合燃料の利用面では、現代の天然ガス導管網に接続されているさまざまなガス利用機器ごとの許容限界が示された。また、水素混合燃料を天然ガス導管網を利用して供給するシステムが今後の純水素供給に対応するためには、水素混合燃料から水素を分離する技術の開発が課題であることが示された。現在、Naturalhyの後継事業として、水素混合燃料の供給・利用事業を検討するためのコンサルティングをおこなうプロジェクトHyreadyが立ち上がっている。

ドイツにおいては、数年前から再生可能エネルギーによる電力により水素を製造し、供給・利用するPower to Gas (PtG) と呼ばれる実証が進められている。PtGでは、天然ガス等の既存の燃料に安全な濃度の水素を混合したガス、あるいは水素とCO₂から合成したメタンを混合したガスを既存の天然ガス供給ネットワークを利用して供給するもので、既存の天然ガス利用施設を変更することなく利用するコンセプトは、Naturalhyの延長上にあるものと考えられる。Naturalhyとの大きな違いは、再生可能エネルギーにより発生させた電力を用いて水を電気分解して得られた水素の利用を想定していること、さらには、バイオマス発酵や工業プロセスから発生するCO₂と再生可能エネルギーで製造した水素からメタンを製造し、天然ガス導管網を利用して供給・利用するモデルを視野に入れた実証をおこなっていることである。供給・利用に係るインフラ投資コストを抑えて、再生可能エネルギーを用いて製造した水素を利用するPtGは、現実的なCO₂の削減方法であると考えられる。2015年から天然ガスに風力発電で製造した水素2%を混合して供給する実証が開始されており、家庭用や業務用の一般需要家において調理や暖房用途に問題なく利用されている。

米国では2012年にNRELが、FCV用水素インフラコストの推算とあわせて既設の天然ガス導管網を利用して水素混合燃料を供給するために検討すべき項目を示した。翌2013年には、Naturalhyプロジェクトの成果や現在進行中のPtGプロジェクトを踏まえ、追加設備コストや水素混合燃料からの純水素の分離に必要なエネルギーなどを評価している。2015年にはSempra Energy傘下のSouthern California Gasは、米国版PtGの実証をCalifornia大学Irvine校やNRELとの連携のもと全米で初めて開始することを公表している。

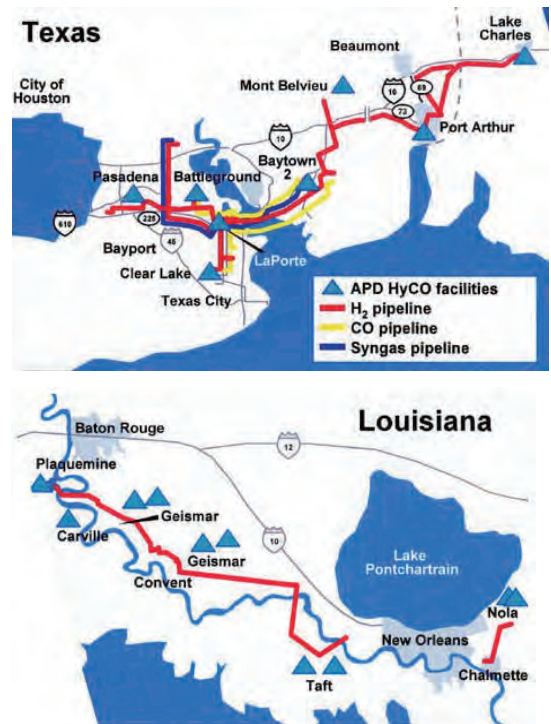


図2-4 米国における水素のパイプライン
出典：水素エネルギー社会（山地 憲治著）に加筆

(注6) NREL (National Renewable Energy Laboratory) : エネルギー省所属の国立再生可能エネルギー研究所

2. オランダとドイツにおけるPtGへの取り組みについて

水素は、反応性と単位質量当たりの発熱量が高く、CO₂排出のないクリーンエネルギーである水素の性質は大きな利点である。しかしながら、水素は、天然ガスなどの他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。そして、既存の燃焼装置や発電装置は、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る。また、水素製造時にCO₂を発生しない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。



図 2 - 5 ヨーロッパにおける天然ガスなどのパイプラインネットワーク

出典：Theodora ホームページ

純水素燃料を高圧で供給・利用するエネルギーモデルは、FCVの燃料を供給するために構築されてきたが、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インネットワーク（図 2 - 5）を用いて供給・利用する（PtGの先駆けとなる）アイデアがヨーロッパで生まれており、その混合ガスはNaturalhy (Natural gas-hydrogen) と呼ばれている。

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カ国が参加したプロジェクトNaturalhyが実施された。プロジェクトの中心的役割を担ったのは、Naturalhyのアイデアを提唱したオランダのガス会社の技術者であり、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。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。窒素分が多く発熱量の低い低級なオランダの天然ガスは、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。近年は枯渇しつつあり、国外からの天然ガスの輸入が増加しているが、窒素分を多く含む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。

Naturalhyでは、実際の天然ガスパイプラインを用いた実証試験はおこなわれていないが、水素混合燃料の製造、輸送、貯蔵、利用にかかわる個別技術の開発とCO₂削減効果や

経済性についてシミュレーションによる評価をおこなっている。シミュレーションで扱う水素は、十分な供給量を安定して確保できることから、化学工業からの副生水素を想定している。厨房を模擬してNaturalhyが漏洩・爆発した場合における被害の検証実験の結果、水素濃度が30%までは天然ガスの場合と比べて大きな違いはないが、30%以上では、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。

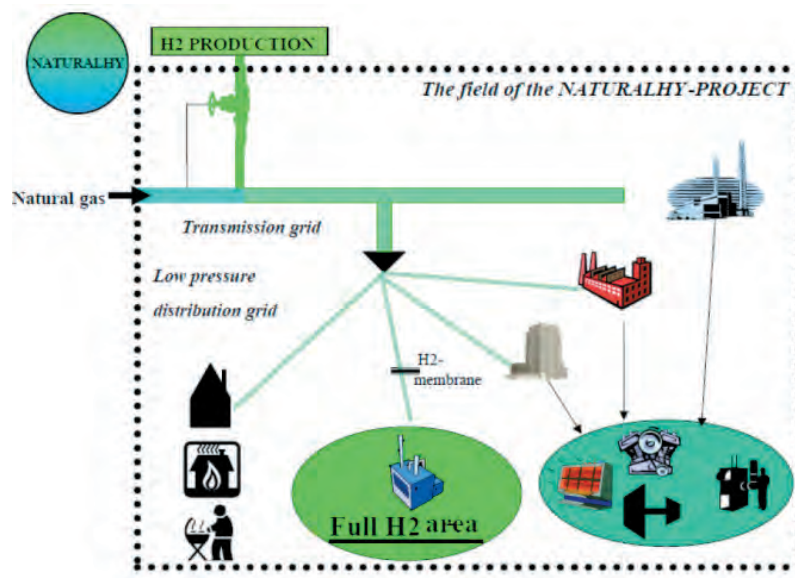


図 2 - 6 Naturalhyの概念図

出典：College of Enropeホームページ



写真 2 - 1 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。）

出典：Onno Florisson, "Naturalhy project"

Naturalhyの水素濃度については、需要家側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、天然ガスエンジンへの供給試験の結果、10%以上の水素濃度はノッキングを生じ、ピストンなどに損傷を与える可能性が示された。需要家側でNaturalhyから水素を引き抜き、純水素を供給するためパラジウム膜による水素分離技術の開発がおこなわれたが、現在でも研究開発段階にある。また、欧州において発達した天然ガスパイプラインネットワークは、Naturalhyを供給する上での有力なインフラであるが、多くのガスの出入ポイントがあり、一様な水

素濃度の混合ガスを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の障壁の1つとなっている。

オランダにおいて天然ガスに純水素を混合する燃料の検討がNaturalhyでおこなわれた後、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PtGの実証試験がドイツで開始された。2015年には、一部の天然ガスパイプラインに風力発電により製造した水素を2%混合して供給する実証が始まり、家庭での暖房やレストランなど業務用厨房での調理において、従来の天然ガスと同様に利用されている。

欧州では、自動車など輸送部門におけるCO₂削減に対する強い要請があり、再生可能エネルギーを用いてカーボンニュートラルな水素を製造し、自動車用燃料として供給するための基盤整備の一環としてPtGへの取り組みが提唱された。

PtGを輸送系（自動車）燃料供給へ適用した場合のCO₂削減効果は、3つのシナリオ別に評価された。シナリオ1（Secn.1）は、PtGを導入せずに、車両をガソリンエンジン自動車やディーゼルエンジン自動車から天然ガス自動車にシフトする場合。シナリオ2（Secn.2）は、車両をガソリンエンジン自動車やディーゼルエンジン自動車から天然ガス自動車にシフトし、かつPtGを導入する場合。シナリオ3（Secn.3）は、車両をガソリンエンジン自動車やディーゼルエンジン自動車から天然ガス自動車と燃料電池車へシフトし、かつPtGを導入する場合である。

図2-7は、3つのシナリオ実現のために必要となる燃料構成を示す。シナリオ1では化石燃料である天然ガスが主体であるが、シナリオ2や3ではPtGにより合成されたメタンが主体となっている。

図2-8は、各シナリオにおいて、削減されるCO₂排出量を試算した結果を示す。シナリオ1で、化石燃料を天然ガスにシフトするだけで21%のCO₂削減量が見込まれる。シナリオ2と3では、PtGを導入することで、シナリオ1の3~4倍程度の削減効果を得ることができる。PtGで必要となる再生可能エネルギーによる電力を試算すると、シナリオ2と3を実行するために、2010年の電力需要の約2倍の約600TWh/年（6×10¹⁴Wh/年）が必要となる。ドイツは、欧州の中でも風力発電などの再生可能エネルギーの導入が盛んであり、2011年時点で約29GW（2.9×10¹⁰W）の発電能力を持つウィンドファームが国内

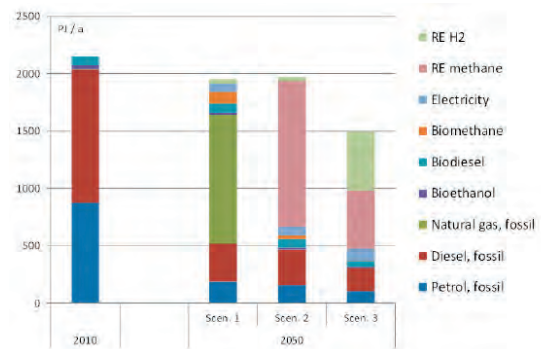


図2-7 シナリオ1~3の実現のために必要となるエネルギー源の試算結果

出典：Power-to-Gas (PtG) in transport Status quo and perspectives for development (BMVI報告書)

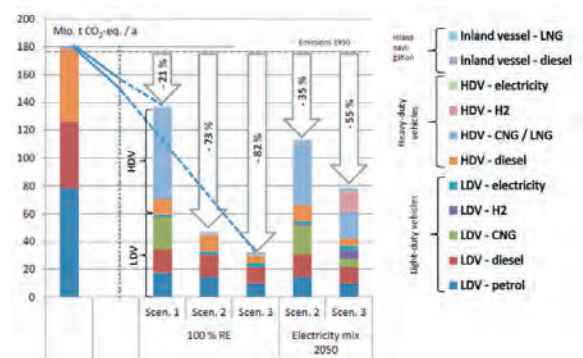


図2-8 シナリオ1~3におけるCO₂の削減効果の試算

出典：Power-to-Gas (PtG) in transport Status quo and perspectives for development (BMVI報告書)

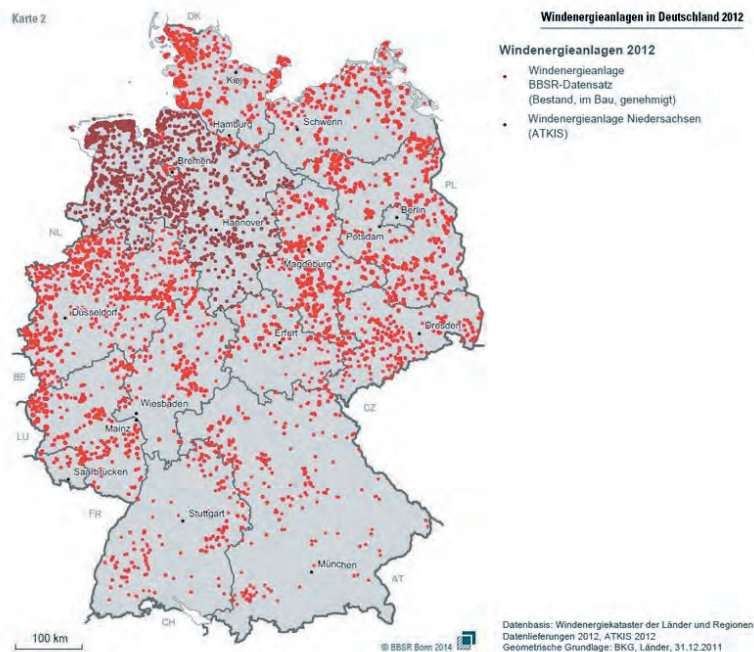


図2-9 ドイツにおけるウィンドファーム設置状況（2012年）
 出典：Erneuerbareenergin ホームページ

各所に設置済されている（図2-9参照）。今後、陸上のみならず海上にも大規模ウィンドファームを設置する構想があり、2050年までに常時68.5GWを達成することは十分可能であると考えられている。

PtGに取り組むもう1つの動機に、再生可能エネルギーの利用促進がある。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によるCO₂排出量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、40～45%（2015年）、2035年55～60%（2035年）、80%（2050年）とされている。再生可能エネルギーにより得られた電力は、送電ネットワークにより全国各地へ供給されることが望ましいが、現在のドイツの送電網の容量は不足しており、容量不足を解消するためには、2,000km以上の送電線の新設が必要とされている。このために必要な多額の費用と環境評価に長い期間を要することが問題となっている。PtGは、現在の電力網で吸収しきれない電力をガス化して利用することができるため、再生可能エネルギーの導入促進の有力な手段として期待されている。

また、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による天然ガス供給の停止による混乱に代表されるリスクを低減するため、ロシアからの天然ガス輸入を出来るだけ減らしたいという考え方がある。国産の再生可能エネルギーの利用によるエネルギーソースの多様化を伴うPtGは一つの対応策であると考えられている。

図2-10にドイツの天然ガスパイプラインネットワークを示す。ドイツ国内の主要都市は全てパイプラインでつながっているため、このパイプラインを利用してPtGにより得ら

れた水素や、メタネーション反応（第4章で詳述）により水素をCO₂と反応させて製造したメタンを連続供給すれば、メタンの輸送に長距離トレーラなどを稼働させる必要はなく、PtG起源のガスを供給するための設備投資を抑えることができる。ドイツの天然ガスパイプラインネットワークへのガスの流入ポイントは主に北部に位置しており、ガス供給の流れは北から南へが主体となる。ウィンドファームも北部に位置していることから、従来の天然ガスの流れに乗せて長距離パイプラインを利用するメリットが示唆される。PtGにより製造した水素や合成メタンは全国に張り巡らされた天然ガスパイプライン上に大量に貯蔵することができる。また、岩塩地下空洞など既存の大容量ガス貯蔵施設をそのまま利用できる。このためPtGにより水素や合成メタンを製造する場所に大規模な貯蔵施設を設ける必要がない。このことが、PtGを推進する理由の1つとなっている。

メタネーションのために必要なCO₂には、バイオマス由来のカーボンニュートラルなCO₂を用いることが望ましい。そこで、プラントなどでバイオマスの直接燃焼により得られるCO₂やバイオマスのメタン発酵に伴い発生するCO₂を利用することが検討されている。バイオマスの直接燃焼により得られる約77億N^⑦m³のCO₂全てが、メタン化された場合、得られる合成メタンは約276PJ（約2.76×10¹⁶J）である。この量は現在ドイツで消費されている（航空部門を除く）燃料消費量の約12.9%に相当する。なお、ドイツにおける自動車の年平均走行距離14,000 km/台で換算すると、約1,400万台/年分に相当する。バイオマスのメタン発酵に伴い発生するCO₂を利用する場合、メタン発酵により生産するメタンを毎年5億6,000N^⑦m³とすると、毎年得られるCO₂は約3億3,000N^⑦m³となる。これをメタネーションで利用すると、合成メタンが11PJ（1.1×10¹⁶J）得られる。この量は、60万台のハイブリッド天然ガス自動車で年間消費される燃料に相当する。このように、バイオマス利用に伴い発生する副生CO₂を利用すれば、相当量の合成メタンを製造することができるため、PtGのためにわざわざ化石燃料を燃焼させるなどしてCO₂を作る必要はない。



図2-10 ドイツ国内における天然ガス用のパイプライン
 出典：NATURAL GAS INFORMATIO, IEA (2012)

⑦ N^⑦m³：標準状態（0℃，1気圧）に換算した1m³のガス量。

図2-10に示す様に、ドイツの天然ガスパイプラインネットワークへのガスの流入ポイントは主に北部に位置しており、ガス供給の流れは北から南が主体となる。ウィンドファームも北部に位置していることから、従来の天然ガスの流れに乗せて長距離パイプラインを利用するメリットが示唆される。

ドイツの積極的な取り組みに牽引され、欧州各国のPtGに対する関心は高い。再生可能エネルギーからの電力利用と長期エネルギー貯蔵が可能で、長期的な展望を描くことのできるエネルギー変換・利用システムは、ドイツのPtGとノルウェーの水力発電しかないと言われている。ただし、水力発電は地理的制約があり、実現できる国に限られるため、PtGに比べると一般的ではない。この点においても、PtGの普及にける期待は大きい。

図2-11に、PtGによる水素混合燃料および合成メタン混合燃料の製造（赤）、輸送・貯蔵・供給（黄）、利用（青）のフロー図を示す。風力発電を起点とし、得られた電力を系統に供給し、水電解装置により水素を製造する。さらに、この水素からメタネーション反応により合成メタンを製造する。得られた水素と合成メタンは岩塩地下貯蔵施設などに一旦、貯蔵された後、需要に応じてガスタービンや燃料電池に供給され、発電に利用されるとともに、産業用燃料、輸送用燃料として供給される。同時に、天然ガスパイプラインネットワークへ払い出される。

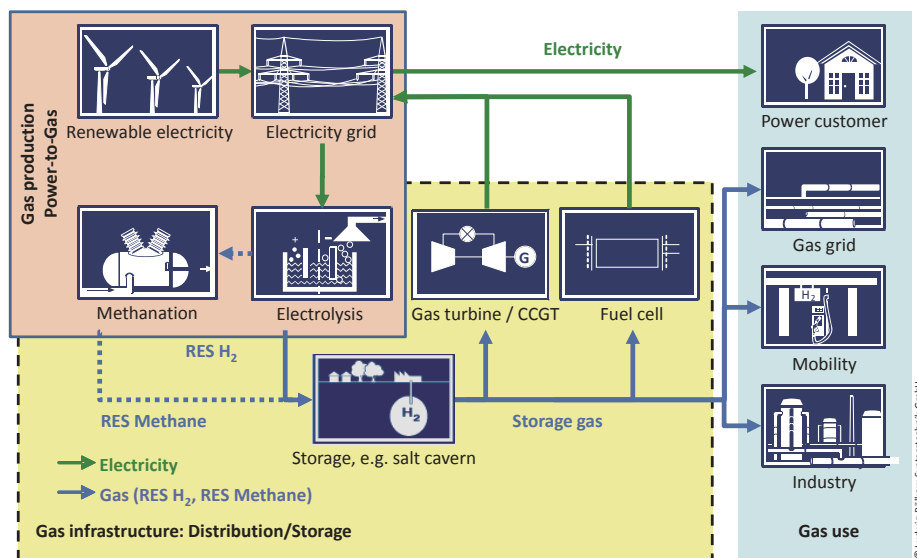


図2-11 PtG利用フローの一例

出典：Power-to-Gas (PtG) in transport Status quo and perspectives for development (BMVI報告書)

図2-12は、PtG関連プロジェクトの拠点マップを示す。PtGで水素を製造する拠点、PtGで合成メタンを製造する拠点、PtGで製造した水素を燃料電池自動車に供給する拠点など現在27の拠点をプロジェクトが実施されており、そのうち直接的に輸送部門に関係する拠点は8つある。ドイツ国内に広く展開されていることがわかる。

PtGにより製造した水素を天然ガスパイプラインに注入して供給する場合の濃度の制約について、Fraunhofer研究所にヒアリングをおこなった結果、水素濃度10%までの混合

は既存の天然ガス供給システムを変更することなく実施でき、既存のガスマ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。より高濃度の水素を供給する場合は、専用のガスマーターへの取替えが必要となり、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、配管等からの水素漏洩に対する対策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ためには、専用配管の新規設置が必要になるなどの見解を得た。

PtGの基幹技術である水電解装置について、PtGの実証事業に納入実

績のあるHYDROGENICS社にヒアリングをおこなった結果、水電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年であり信頼性が高い。これまでに7万時間（約8年間）の連続稼動実績がある。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%である。PEMタイプは水素製造能力が1 Nm^3/h の小容量から大容量まで適応可能である。これまでに3万時間の連続稼動実績がある。1 Nm^3 あたりの水素製造効率は、両タイプとも同じ4.2 kWh/Nm^3 である。水電解装置により水素を製造する場合、工業用の副生水素と比較すると水素の価格は高くなるが、PtGの実証事業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。水素を用いたメタンやメタノールの合成はさらなるコスト高が予想されるなどの情報を得た。

水電解装置とともにPtGの基幹技術であるメタネーション装置について、PtGの実証事業に納入実績のあるETOGAS社にヒアリングをおこなった結果、メタネーションの原料である CO_2 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。また、大気中の CO_2 を回収してメタンの原料とする考えもある。現在の機器効率（生成メタン1 Nm^3 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）程度になると想定されるなどの情報を得た。



図2-12 ドイツ国内におけるPtG関連プロジェクトの拠点マップ
出典：Power-to-Gas (PtG) in transport Status quo and perspectives for development (BMVI報告書)

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であるが、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。PtGにより、再生可能エネルギーから得た電力を、燃料ガスへ変換して貯蔵・利用する方法は、十分検討に値する対応策の一つであると考えられる。

3. 米国におけるPtGへの取り組みについて

米国の2014年の電源構成は、石炭40%、天然ガス26%、原子力20%、水力6%、再生可能エネルギー6%、石油1%である。連邦政府の政策により、シェールガスを含む天然ガスと再生可能エネルギーの利用が拡大している。特に、再生可能エネルギーが急速に拡大しており、ドイツに追いつきつつある。米国のエネルギー自給率は約90%であり、各州のエネルギー事情は、州内のエネルギー資源やエネルギー産業により大きく異なるが、電力販売量の一定割合を再生可能エネルギーから供給することを義務づけるRPS（Renewable Portfolio Standard）プログラムを導入している29の州（2011年時点）を中心に、再生可能エネルギーの導入が加速している。このため、米国においてもドイツ同様、再生可能エネルギーの余剰分の利用が課題となっている。特に、風力発電の割合が増加する中、夜間の余剰電力の利用が大きな課題である。蓄電池の性能向上開発は進められているが、大量の余剰電力を蓄積するには、コスト・性能が不十分であり、現実的な解決策とはなっていない。電気自動車の夜間充電による利用も期待されているが、電気自動車の普及にはかなりの時間がかかるとみられている。

欧州でのPtGへ取り組み動向を受け、米国においてもPtGに対する注目が高まっている。これまでに、エネルギー省（Department of Energy：DOE）が展開している燃料電池技術開発用の政府プログラムの一環として、水素と天然ガスの混合燃料を既設の天然ガスパイプラインを用いて各地に供給・利用することにより、CO₂の排出量を削減する技術の実装可能性が検討されている。検討は、DOE所属のNRELが中心となっておこなわれ、PtGにより製造した水素を、米国の天然ガスパイプラインネットワークシステムを利用して供給する場合の課題を、シミュレーションにより検討している。

米国の天然ガスパイプラインネットワークシステムは、図2-13に示すように、ガス田、貯蔵施設やLNGターミナから天然ガスを集めるGathering Line、精製や成分を調整した天然ガスを大口需要家や都市部の需要地に向けて高圧で圧送するTransmission Line、City Gateにて圧力を調整（減圧）して、付臭をおこなった後、需要家に向けて供給するDistribution MainsとDistribution Service Linesの4種類のパイプラインから構成されており、上流側から下流側に至るガスの流れに従って、成分や圧力が変化する。

全米における天然ガスパイプラインネットワークを、図2-14に示す。青は州間パイプライン、赤は州内パイプラインである。パイプラインは送電線ネットワークに匹敵するほ

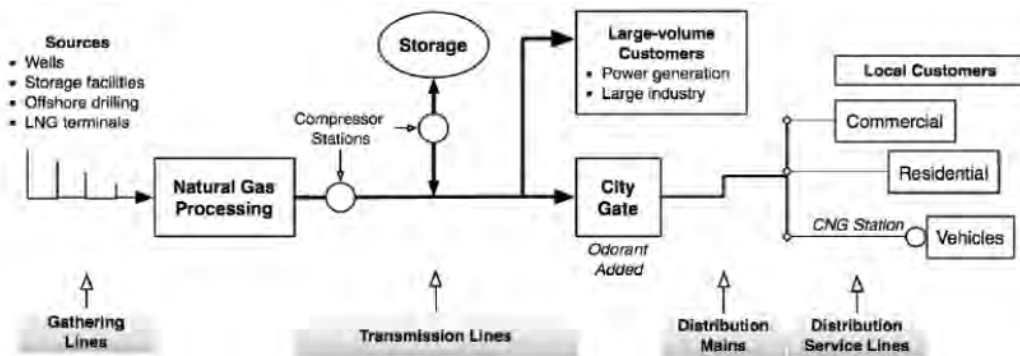


図 2-13 米国の天然ガスパイプラインシステムの模式図
 出典：Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks (NREL報告書)

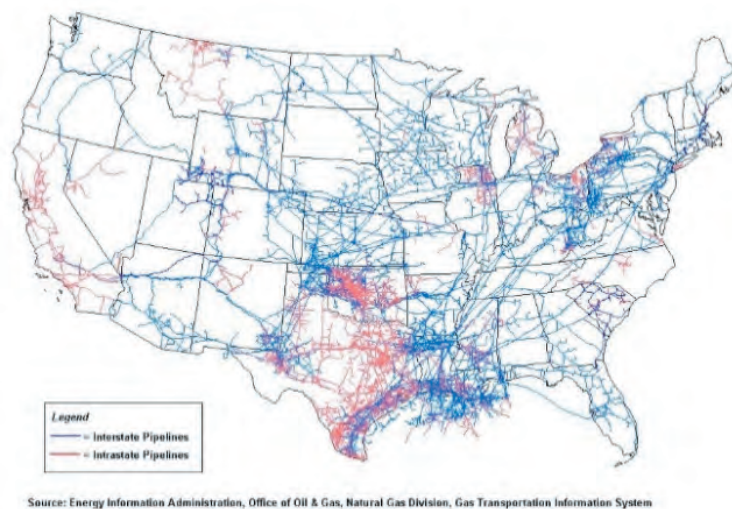


図 2-14 全米の天然ガスパイプラインネットワーク
 出典：Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks (NREL報告書)

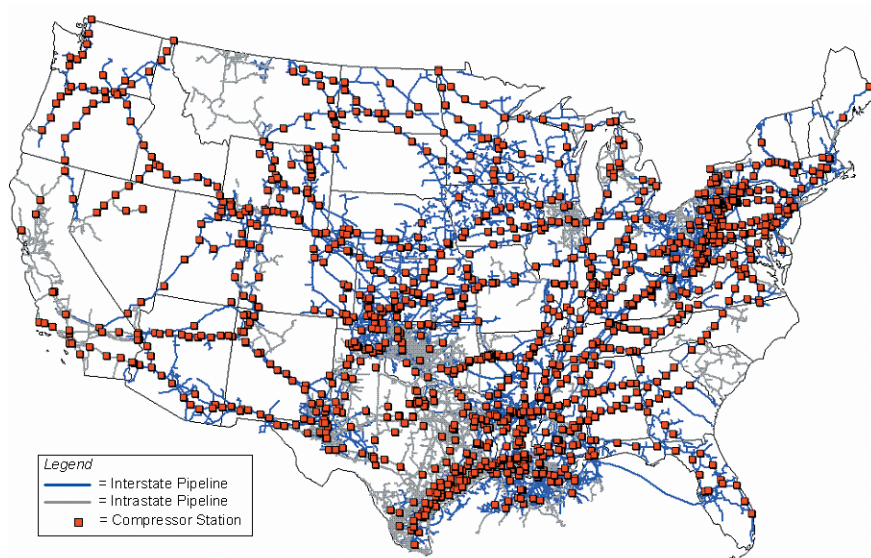


図 2-15 全米の天然ガスパイプラインネットワーク上に配置されたコンプレッサステーション (赤点)
 出典：Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks (NREL報告書)

ど発達しており、全米各地の都市に接続している。このため、天然ガスパイプラインを活用することで、PtGで製造した水素を広く需要家に供給することができ、CO₂削減を国全域でおこなうことが可能になる。

図2-15は、州間パイプライン上に設置された高圧コンプレッサーを示す。これらコンプレッサーにより圧送されてきた水素混合燃料から、PSA (Pressure Swing Adsorption、圧力変動吸着) により純水素を分離・抽出して、燃料電池などに供給する場合、PSAを駆動するために圧力エネルギーが必要となる。この時、図2-13に示すCity Gateでは、Transmission Linesで圧送された天然ガスをDistribution Mainsへ供給するため、減圧操作がおこなわれる。そこで、City GateにPSAを設置し、水素混合燃料のもつ自圧でPSAを駆動することにより、供給コストを削減することができる。PSAによる水素分離の原理を図2-16に示す。

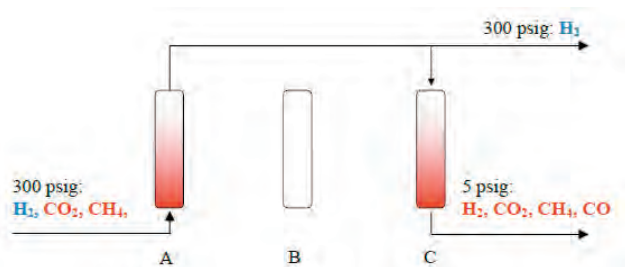


図2-16 PSAによる水素分離の原理
CO₂やCH₄を選択的に吸着する物質を充填した吸着塔に加圧した混合ガスを供給することにより、水素のみが分離・抽出されえる。その後、塔内を減圧することによりCO₂とCH₄が分離・抽出される

出典：Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks (NREL報告書)

水素混合燃料を供給するパイプラインが、何らかの理由で損傷を受け、火災発生する場合のリスクは、式2-1に示す様に、パイプラインの損傷、着火、火災発生 of 3つの事象について、それぞれ確率を評価し、3つの確率の積により評価することができる。

$$Risk = Frequency\ of\ Pipeline\ Failure \times Probability\ of\ Ignition \times Consequences\ of\ the\ Fire \dots\dots\dots 式\ 2 - 1$$

天然ガスに混合する水素濃度をパラメータとして、パイプラインからの離隔距離によるリスクの変化を評価した結果、図2-17に示す様に、リスクが無くなる離隔距離は、水素を混合しない場合は約260m、25%の水素を混合した場合は約310mであることが判明している。また、同じ離隔距離であれば、水素を含まない天然ガスよりも水素混合燃料の方がリスクが低いことが判明した。また、図2-18に示す様に、水素を含まない天然ガスと25%の水素を混合したガスでは、パイプラインの直径に依らずリスクはほぼ同じであることが判明している。これらの結果は、既設の配管に流す水素混合燃料の水素濃度などの検討に反映される。

NRELに対して、米国におけるPtGの実現性についてヒアリングをおこなった。この結果、パイプラインを経由する連続・大量供給のメリットに加えて、需要地近くで供給ガスの自圧を利用して水素を分離れば、十分経済合理性がある。また、メキシコ湾岸地域にあ

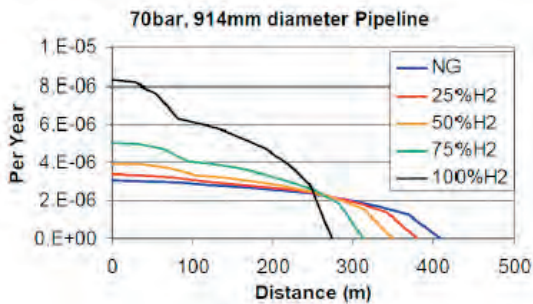


図 2-17 914mm直径配管におけるリスクに与える配管長さおよび混合配分の影響

出典：Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks (NREL報告書)

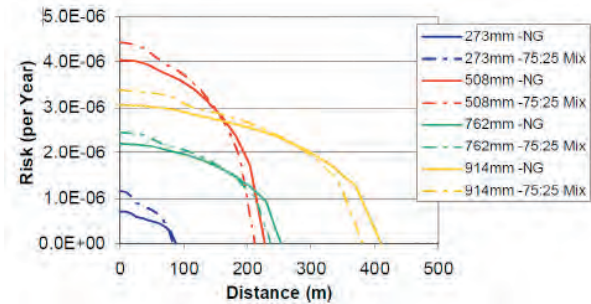


図 2-18 25%水素混合燃料におけるリスクに与える配管長さおよび配管直径の影響

出典：Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks (NREL報告書)

る岩塩空洞を利用した天然ガスの地下貯蔵施設（貯蔵圧力は800psi=5.5MPa）を、水素混合燃料の供給においてもそのまま利用できることから、十分可能性があるとの見解を得た。また、これまでに、水素の天然ガスパイプラインへの注入する場合の評価は実施済であるため、今後はドイツで実証が進むPtGによる合成メタンを天然ガスパイプラインへ注入する場合の検討が中心になるなどの見解を得た。

欧州で先行しているPtGへの米国での取り組みは、現在実証計画が提示された段階にある。当面、NREL、カリフォルニア大学アーバイン校（UCI）および南カリフォルニアガス（SoCal）が連携して、UCIキャンパス内のマイクログリッドで実証をおこなうことが計画されている。

UCIに対してヒアリングをおこなった結果、これまでに風力発電および太陽光発電による電力をキャンパス内のマイクログリッド側で受け入れ、平滑化するシステム技術の開発や系統電力使用料削減の評価などを実施してきている。また、米国で初めてキャンパス内の天然ガスの導管に、水素を10%注入した結果、漏洩発生がなかったことを報告している。これらの知見を踏まえ、今後、Sothorn California Edisonから66kVで給電を受け、12kVで配電をおこなっているキャンパス内のマイクログリッドに、水の電気分解装置（6kW）、ガスタービン（13.5MW）、蒸気タービン（5.5MW）、冷熱発生用冷凍機（8台）、冷熱蓄熱装置（4,500,000Gal/60,000ton/h）、を接続し、電力・熱の需給バランスの最適化検討と電気分解水素のガス導管網への注入など、米国初の本格的なPtG実証を行う予定であるとの情報を得た。

SoCalに対するヒアリングをおこなった結果、天然ガスパイプラインネットワークへ注入する水素濃度は当面5%を想定しており、水素は水の電気分解により製造する予定である。カリフォルニア州は、全米でも環境保全に対する法律が特に厳しく、目標値は非常に高いことから“Test Case”と言われている。PtGに限らず、CO₂削減には相当なコストが必要となるため、エネルギー供給事業者にとっては、どれくらいまで頑張れるか試されている面がある。これまで、目標値は未達になることが多く、最終的には目標達成のために必要となるコストが負担可能かどうかというバランス論で対応が決まるとみられている。

米国のCO₂削減目標は、2030年までに国内の既存の火力発電所からのCO₂排出量を32%削減（対2005年比）するものであり、これをPtGだけに頼って達成することはできないと考えられている。そのため、化石燃料を利用する大規模火力発電所でのCO₂対策として、米国では多くのCCSプロジェクトが進められているとの情報を得た。

第3章 水素混合燃料技術による水素の供給・利用について

本章では、我が国におけるCO₂削減のための再生可能エネルギーと水素の利用に関する現状と課題を踏まえ、水素混合燃料による水素の供給・利用の可能性と課題をドイツのPower to Gasをはじめとする欧米の概念などを参考に整理する。次に、我が国のエネルギーインフラの現状を踏まえ、水素混合燃料を供給・利用するエネルギーモデルの概念について述べる。

1. 水素混合燃料による水素供給・利用システムの概念

第1章で述べたとおり、高度なCO₂削減目標を達成するためには、化石エネルギーの高効率利用だけでは限界がある。この時、化石燃料を水素化利用したとしても、水素の製造過程でCO₂が発生するため、再生可能エネルギーをできるだけ利用する必要がある。再生可能エネルギーの利用や水素の利用が抱える問題を解決するために、主要な課題と対応策を整理すると同時に、新しい水素供給システムに求められる概念と具備すべき機能を規定した上でシステムを検討する。

<再生可能エネルギーと水素利用における課題と対応策>

○再生可能エネルギーによる電力は、系統へ供給して利用するのが第一選択肢であるが、再生可能エネルギーの出力変動や需給バランスの変化に対応するため、系統受け入れ容量には制約がある。このような制約のもと再生可能エネルギーの利用を促進する必要がある。

(対応策)

- ・再生可能エネルギーで発生させた電力により水を電気分解し、生成した水素を天然ガスに混合し、既設の天然ガスパイプラインを用いて供給する。

○再生可能エネルギーの余剰分を水素化して利用する場合、高純度水素として扱うためには、水素固有の燃焼・爆発特性から高度な安全対策が必要であり、多大なインフラ投資コストが発生する。特に、都市ガス工場などの製造場所から需要地までパイプラインにより高純度水素を送る場合は、供給から利用に至るまで新規インフラ構築に莫大な費用が発生する。

(対応策)

- ・FCV用の高圧・高純度水素は、オンサイト水素ステーション内で製造・供給することにとどめる。
- ・低圧・高純度水素は、改質型定置式燃料電池内でオンデマンドで製造・利用する。または、オンサイト水素ステーションなどで製造し、純水素型燃料電池で利用する地産地消を基本とする。
- ・水素配管は最小限に抑え、水素の輸送・貯蔵は、既存の天然ガスインフラを最大限利

用してできるだけ変更コストを掛けずに利用できるシステムとする。

- 燃料電池から燃焼利用まで、現在天然ガスパイプラインに接続されている全てのエネルギー利用機器をできるだけ変更コストを掛けずに利用できるシステムとする。

○既設の天然ガスパイプラインを利用して水素を送る場合、受け入れ水素濃度に制約がある。

(対応策)

- CO₂と水素の反応（メタネーション）により製造した天然ガスの主成分であるメタンを天然ガスに混合し、既設の天然ガスパイプラインを用いて供給する。このとき、バイオマスなどの再生可能エネルギーの利用にともない発生するCO₂や化石燃料の利用にともない発生するCO₂を捕集し、循環・再利用することにより、大気中へのCO₂放出量を削減する。
- メタネーションをおこなうための再生可能エネルギー由来の水素や外販可能な副生水素が不足する場合は、オンサイトで天然ガスを高効率改質して製造した水素を供給・利用する。この時発生するCO₂を捕集し、循環・再利用することにより、大気中のCO₂放出量を削減する。

これら課題解決のための対応策に含まれる価値条件は、「再生可能エネルギーの利用が可能」、「既設のインフラを最大限活用できる」、「高純度水素供給に伴う危険性を回避できる」に集約される。これら価値条件を満たす新しい水素供給システムは、水素を天然ガスに混合した燃料を、既存の天然ガスパイプラインを用いて供給し、既存の天然ガス利用機器をそのまま利用できるシステムとなる。

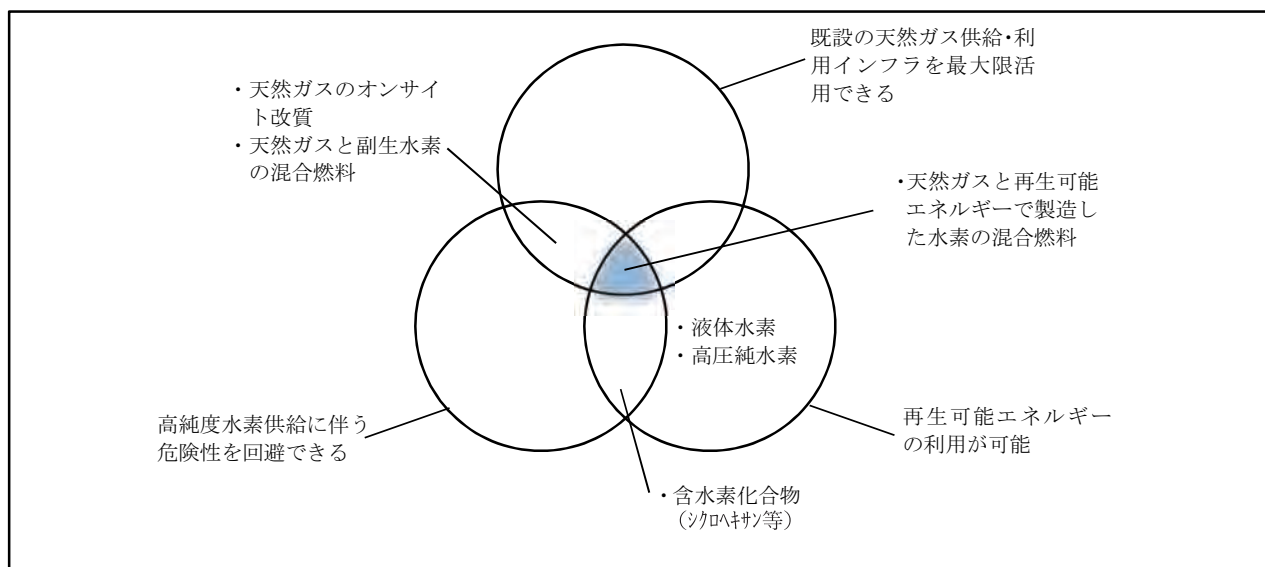


図3-1 水素を供給するための燃料の形態

このシステムを成立させるためには、混合する水素の形態に関する工夫が必要である。水素は自然界では単離して存在せず、色々な形で他の原子と結合し、形を変えた物質とし

て存在している。本報告書では、この様に陰的な状態で存在している水素をImplicit水素、独立した状態で純水素分子として存在している水素をExplicit水素と呼ぶこととする。Implicit水素を含む物質には、炭化水素燃料であるメタン（CH₄）や水（H₂O）などがあり、メタン1分子には水素が2分子分、水1分子には水素が1分子分含まれている。第1章で述べたとおり、同じ燃料でもExplicit水素とImplicit水素を含むメタンでは爆発安全性に大きな違いがある。そこで、水素混合燃料供給システムでは、製造・輸送・貯蔵プロセスから成る水素の供給において、爆発危険性の高いExplicit水素の供給を最小限にとどめ、Explicit水素とCO₂から天然ガスの主成分であるメタンを合成してImplicit水素として供給する。これにより、既存の天然ガスパイプラインによる水素の供給量の制約がなくなり、高純度水素用の「輸送」、「貯蔵」に係る新たなインフラ投資コストをできるだけ抑えるとともに、グリッドエネルギー供給の強みである連続・安定・大量供給機能を活用することができる。高圧・高純度の水素を必要とする燃料電池自動車に対しては、オンサイト水素ステーションで水素

混合燃料の改質により純水素を製造・圧縮し地産地消する。

水素混合燃料システムで供給する再生可能エネルギーによる水素が不足する場合は、外販可能な化石燃料由来の余剰副生水素を利用する。

また、メタンの合成に用いるCO₂は、バイオマス利用に伴い発生するCO₂や化石燃料を利用する生産工程で発生するCO₂を捕集し、循環あるいは再利用する。これにより水素製造自体から発生するCO₂の排出を削減する。天然ガスパイプラインに接続されるオンサイト水素ステーションやオンサイト水素ステーションを含むローカルエネルギーセンターの整備が進むに従い、低圧・純水素配管を接続し水素を供給するプラットフォームとして拡張し、将来の水素社会の構築にむけて、継続的に整合・機能することができる。また、既設インフラである天

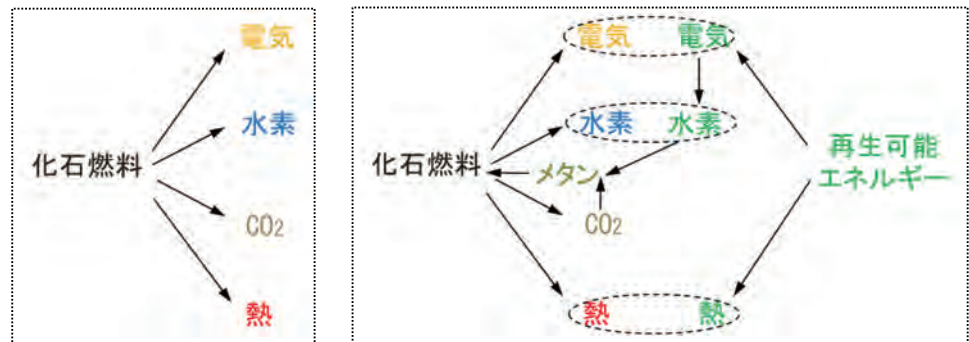


図3-2 再生可能エネルギーの水素化利用によるCO₂排出量の削減
 左：化石燃料のエネルギー変換とCO₂の排出（現状）
 右：再生可能エネルギーによる水素とメタンの製造・利用とCO₂の循環利用によるCO₂排出量の削減

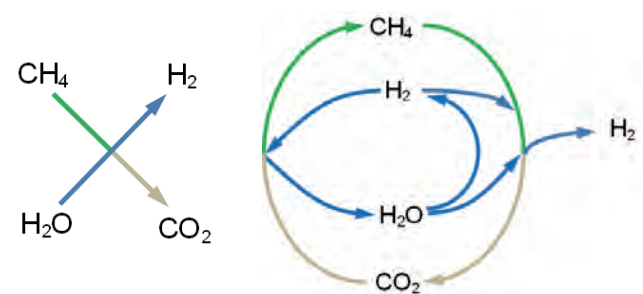


図3-3 水素製造・利用におけるマテリアルフロー
 左：海外または国内（オフサイト／オンサイト）で化石燃料を用いて水素を製造（現状）
 右：国内（オフサイト）で再生可能エネルギーを用いて水素を製造し、水素混合燃料技術により天然ガスパイプラインを用いて供給する。また、メタン利用に伴い発生するCO₂を水素と反応させ、再度メタン化することにより循環利用する。

然ガスパイプラインや都市ガス導管網を用いて水素を供給し、既設の燃料電池やコージェネレーションで高効率利用するシステムであることから、水素混合燃料技術は既存天然ガスインフラの機能を高度化する技術でもある。

このエネルギー供給システムと高効率エネルギー機器（燃料電池など）と高効率エネルギーシステム（コージェネレーション）を合わせて利用することおよび、燃料電池自動車への供給燃料の低エミッション化により、我が国のCO₂排出量削減目標を十分に達成できるだけでなく、本エネルギー供給システムを新たなプラットフォームとして将来の水素利用社会を構築することができる。

2. 太陽光発電の余剰電力のガス化による利用促進について

水素混合燃料技術により再生可能エネルギーを利用する例として、太陽光発電の利用を考える。太陽光発電により発生させた電力を、電力系統に連系する場合、図3-4に示す様に、電力需要の変化と太陽光発電の変化に対して、系統側の出力を変化させることにより、電力需要に対する乖離を回避している。このとき、送電線や変圧器の容量などにより決まる接続容量の限界が、再生可能エネルギーの系統を用いた利用の限界となる。FIT制度の買い取り価格がインセンティブとなり、設備形成が比較的容易な太陽光発電（特に遊休地を活用した大規模太陽光発電（メガソーラー））の系統連系が急速に増加した結果、各電力会社の系統の空き容量が少なくなっている。これら送電線や変圧器などの容量を増強する工事費用は、太陽光発電事業者側の負担であり、再生可能エネルギーの利用促進の障害となる可能性がある。また、2015年には、電力会社が太陽光発電事業者に対して、需給状況に応じて発電抑制を補償金なしで無制限に求めることができる新たなルールが設けられ、状況によっては太陽光発電の利用が抑制される可能性がある。

水素混合燃料技術を用いることにより、余剰再生可能電力を水素化し、系統の負担を軽減すると同時に、太陽光発電事業者における捨電を回避することができる。図3-5は、将来太陽光発電の導入がさらに進んだ場合の

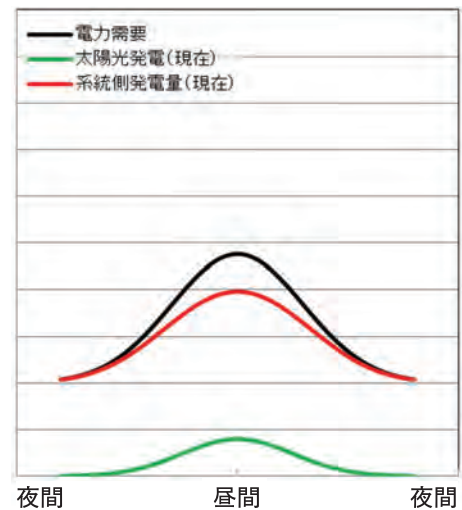


図3-4 太陽光発電と電力需要の変化に対する系統側の出力調整のイメージ

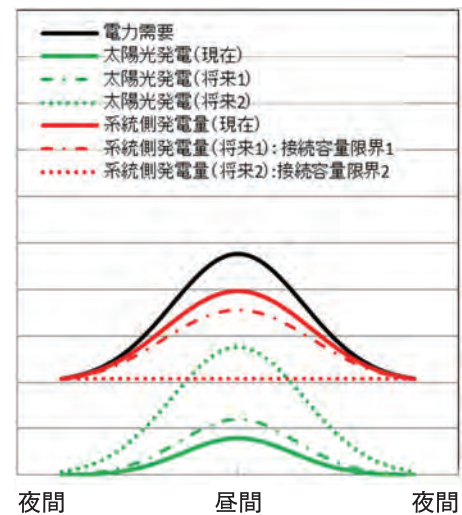


図3-5 太陽光発電と電力需要の変化に対する系統側の出力調整のイメージ

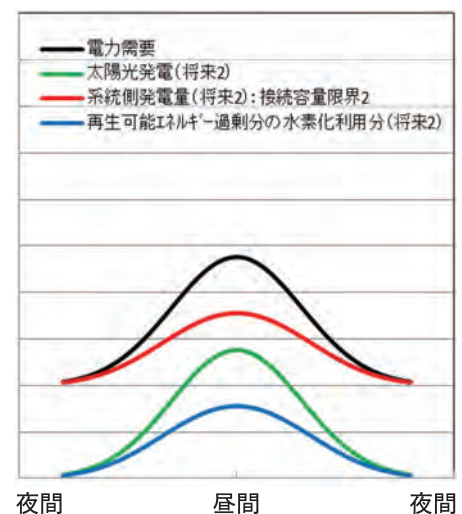


図3-6 太陽光発電と電力需要の変化に対する系統側の出力調整のイメージ

系統側の出力抑制を模式的に示す。図中、接続容量限界 2 はこの模式図上で考えられる限界であり、後述する水素混合燃料技術により解消される太陽光発電の利用限界を論じるために示したものである。実際には、ある接続容量限界 1 で太陽光の受け入れが限界となる（この限界は、空き容量がなくなる接続容量で決まると考えられる）。これに対し、系統から見て過剰となる太陽光発電による電力を水素化して利用することにより、系統とバランスをとる関係を模式的に図 3 - 6 に示す。このシステムでは、生成した水素の輸送、貯蔵、利用のチェーンが機能する限り、太陽光発電の余剰電力を吸収することができる。

3. 水素混合燃料技術を適用したエネルギー供給モデルについて

再生可能エネルギーの利用は、次のアルゴリズムに従うものとする。再生可能エネルギーにより得られた電気や熱はエネルギー利用効率の観点からできるだけ地産地消することとし、発生場所において需要のない電力や余剰となる電力を、電力系統へ供給する。接続容量限界を超える電力は、天然ガスパイプラインのある場所であれば、水の電気分解により水素を製造し、Explicit水素として天然ガスに混合して天然ガスパイプラインに供給する。または、メタネーション技術によりメタンを製造し、Implicit水素として天然ガスに混合して天然ガスパイプラインに供給する。図 3 - 7 は、利用可能なエネルギー供給インフラと水素混合燃料技術の組み合わせを示す。

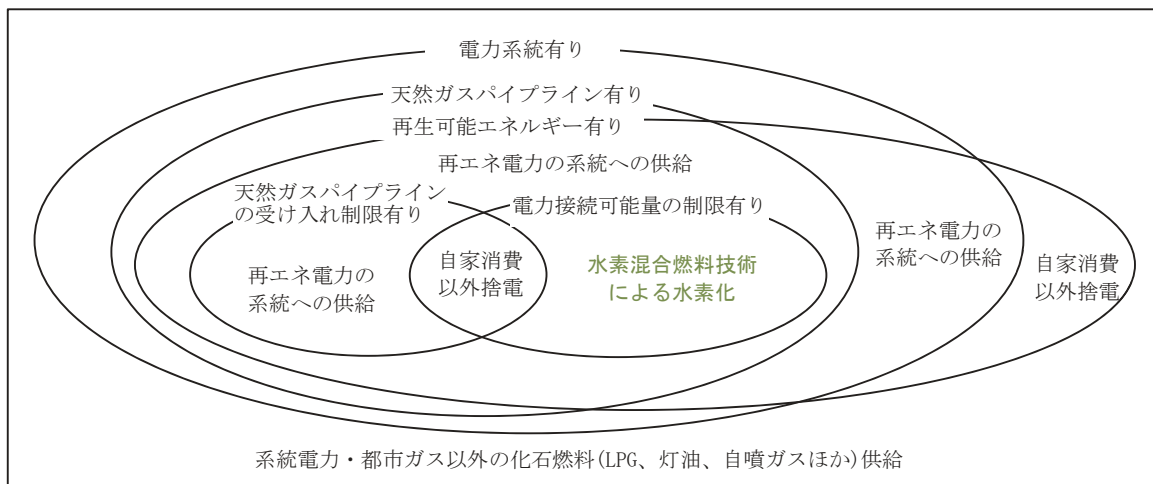


図 3 - 7 エネルギー供給インフラと水素混合燃料技術の組み合わせ

水素混合燃料技術により水素を供給するために必要な条件は、インフラとして「天然ガスのパイプラインがあること」であるが、水素を製造するための主な条件は「再生可能エネルギー（電力）の導入ポテンシャルがあること」となる。さらに、Explicit水素からメタンを製造し、Implicit水素として供給するための主な条件として、「CO₂を利用できること」が加わる。

ドイツと異なり、山岳により平野部が隔てられた島国である我が国では、天然ガスの長距離パイプラインが発達しておらず、都市ガス導管は平野部に集中して敷設されている。

このため、水素混合燃料技術の適用先は、都市ガス導管もしくは天然ガスパイプラインによるガス供給を受けている事業所などが候補になると考えられる。図3-8は、インフラおよび原料の条件による、再生可能エネルギーの水素化利用の方法を示す。Explicit水素による水素混合燃料を製造・供給するために必要な条件（C、D領域）を満たす可能性があるのは、都市ガスを利用している工場、下水処理場、ごみ焼却場、発電所、製油所、製鉄所、都市ガス工場、メガソーラー発電所、風力発電サイト、オンサイト水素ステーションなどが考えられる。

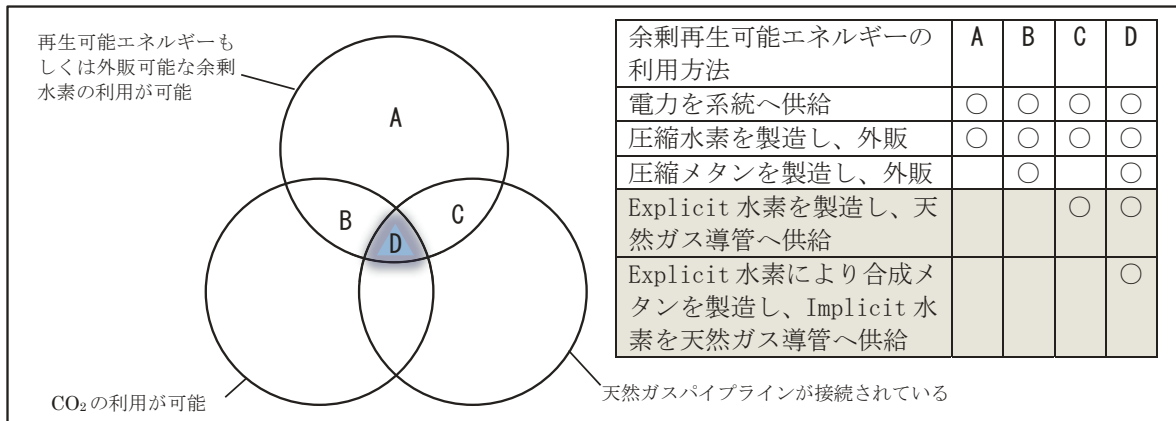


図3-8 インフラおよび原料の条件による再生可能エネルギーの水素化利用方法

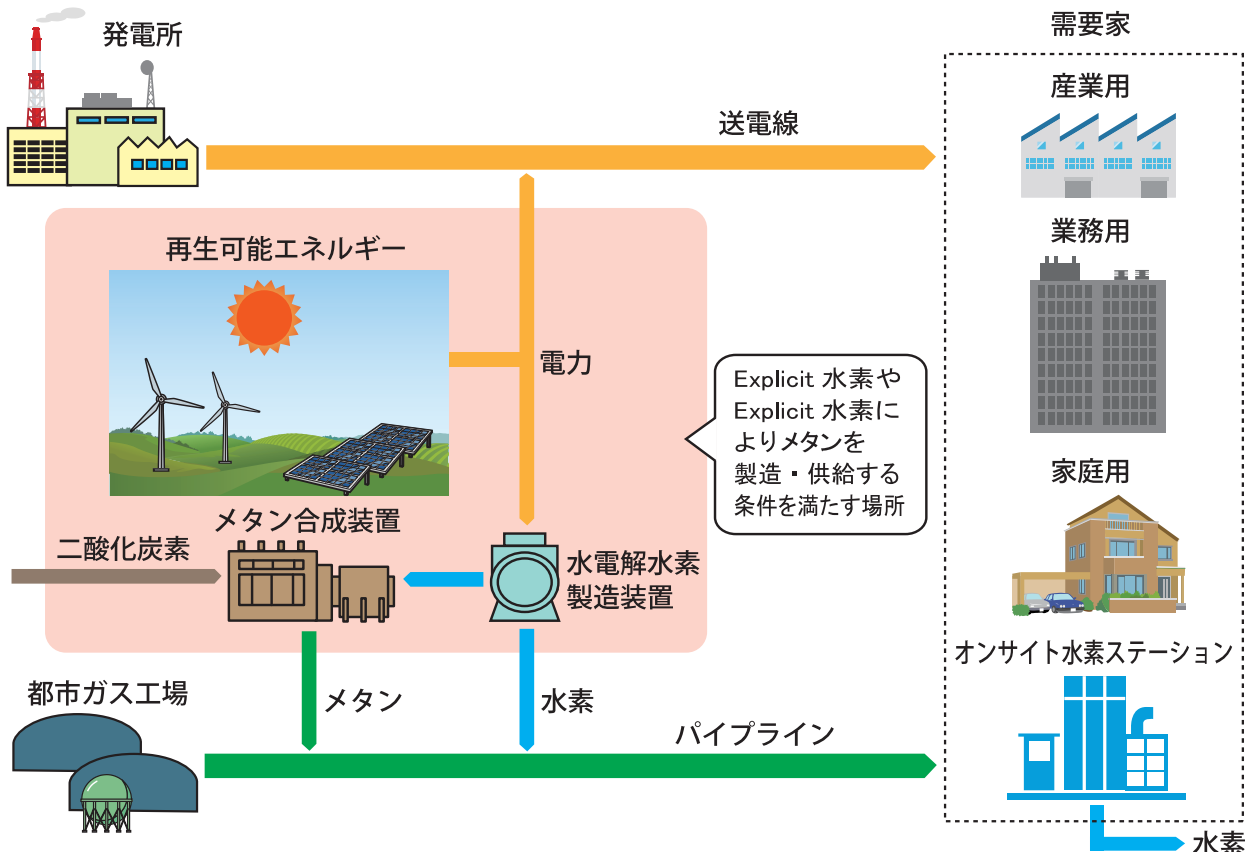


図3-9 水素混合燃料技術のエネルギーインフラへの組み込み例

Explicit水素によりメタンを合成し、Implicit水素を製造・供給するために必要な条件（D領域）を満たす可能性があるのは、Explicit水素を製造・供給できる場所の内、CO₂が発生もしくは、CO₂の受け入れが可能な場所となる。図3-9に水素混合燃料のエネルギーインフラへの組み込み例を示す。

4. 水素混合燃料技術の実装に向けた課題

水素混合燃料技術による水素の供給方法には、Explicit水素を供給する方法、Explicit水素によりメタンを製造し、Implicit水素として供給する方法およびExplicit水素とExplicit水素により合成したメタンを併せて供給する方法の3つが考えられる。それぞれの特徴と課題を以下に述べる。

(1) Explicit水素を供給する場合

Explicit水素の製造・供給には、原料である水の電気分解による水素製造装置に加え、パイプラインに製造した水素を圧入するコンプレッサーなどが必要となる。水素製造装置については、表3-1に示すように、現在商品化されているアルカリ式電気分解装置の効率が65~82%（HHV基準）、設備コストが850~1,500US\$/kWであり、更なる効率の向上と設備コストを削減するための技術開発が必要である。

表3-1 水の電気分解装置などの効率と設備コスト

Application	Power or capacity	Efficiency*	Initial investment cost	Life time	Maturity
Steam methane reformer, large scale	150-300 MW	70-85%	400-600 USD/kW	30 years	Mature
Steam methane reformer, small scale	0.15-15 MW	~51%	3 000-5 000 USD/kW	15 years	Demonstration
Alkaline electrolyser	Up to 150 MW	65-82% (HHV)	850-1 500 USD/kW	60 000-90 000 hours	Mature
PEM electrolyser	Up to 150 kW (stacks) Up to 1 MW (systems)	65-78% (HHV)	1 500-3 800 USD/kW	20 000-60 000 hours	Early market
SO electrolyser	Lab scale	85-90% (HHV)	-	~1 000 h	R&D

* = Unless otherwise stated efficiencies are based on LHV.

** = All investment costs refer to the energy output.

出典：Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells, IEA

Explicit水素混合燃料の利用開始にあたっては、13Aガスの燃焼性の範囲内での変化であっても、産業用分野でのメーターの設定変更などが発生する。現在設置されている業務用・産業用の質量流量メーターでは、熱量の換算をおこなう機能がなく、設定の変更による対応ができないため、新たな対応が必要となる。また、ドイツのPower to Gasの実証で開始された水素混合天然ガス（水素濃度2%）の供給では必要とされていない

が、水素濃度によっては、例えばガスエンジンでの点火タイミングの調整といった利用機器側での変更が発生する。火炎長の管理を厳密におこなう必要のある用途については、燃焼器のガスノズルの調整などが必要になる。

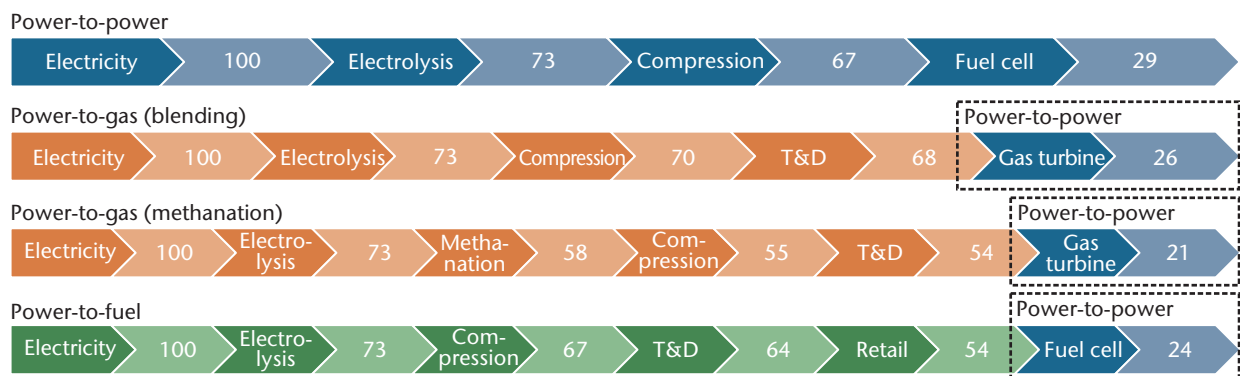
Explicit水素混合燃料の供給により、熱量が低下する分、燃料使用量が増加する。このため、供給圧を上げる必要があるが、これに伴い、ガス導管内のガス流速が増大する。この結果、ガス導管内壁面での粘性による抵抗が増加するが、水素は天然ガスと比較して粘性係数が小さい。例えば、293K、0.103MPa ($1.03 \times 10^5 \text{Pa}$) における水素とメタンの粘性は、それぞれ0.0088mPa・sと0.0108mPa・sである。結果として、粘性抵抗の増大は抑制される方向に働くと考えられる。

天然ガスへのExplicit水素の混合により、断熱火炎温度が上昇し、空気中の窒素と酸素の反応によるサーマルNO_xの生成が促進されるため、水素混合燃料の燃焼器の設計にはNO_xの発生を抑制する工夫が必要となる。Explicit水素を供給する場合の燃焼特性に起因する制約は、第4章で述べる。

(2) Explicit 水素によりメタンを製造してImplicit水素として供給する場合

メタンの製造・供給には、Explicit水素の製造・供給で必要となる設備に加え、メタン合成装置、CO₂の受け入れ装置などが必要となる。メタン合成装置は、現在、ドイツにおけるPtG実証試験に試験的に供用されている段階にあり、現在の効率58%のさらなる向上と、設備コストの削減のための技術開発が必要とされている。また、メタン合成のためのCO₂を入手するための設備（燃焼排ガスからのCO₂の分離・捕集、バイオガスからCO₂の分離・捕集、DAC：Direct Air Capturingなど）とCO₂の輸送・貯蔵に関するコストが発生する。

CO₂とExplicit水素からメタンを合成する反応は、水蒸気改質反応の逆反応であり、1体積のメタンを製造するのに4体積の水素が必要となる。本反応は発熱反応であるが、



Note: The numbers denote useful energy; except for gas turbines, efficiencies are based on HHV; the conversion efficiency of gas turbines is based on LHV.

図3-10 水の電気分解による水素の製造およびメタンの合成の効率

出典：Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells, IEA

反応を進めるためには、外部からの活性化エネルギー相当の熱エネルギーの投入が必要となる。この熱エネルギーをCO₂の発生を伴わずに供給するためには、未利用排熱を利用できる環境で、反応をおこなうことが望ましい。Explicit水素により合成したメタンおよび、これらを併せて供給する場合の燃焼特性に起因する制約は、第4章で述べる。

Explicit水素の製造・供給とメタンの製造・供給のため設備の設置が必要となるため、敷地に余裕のない事業所で発生する再生可能エネルギー電力の余剰は、系統へ供給し、敷地に余裕のある事業所で発生する再生可能エネルギー電力の余剰は、水素化してパイプラインへ供給するという接続の優先順位が考えられる。

第4章 水素混合燃料の燃焼に関する特徴と適用上の制約について

本章では、水素を天然ガスに混合した燃料の燃焼特性を評価した上で、供給・利用において制約となる条件を整理する。混合の対象とする天然ガスは、天然ガスを原料として製造・供給されている現在の我が国の代表的な都市ガスである13Aガスとし、これに再生可能エネルギーや化石燃料などにより製造したExplicit水素およびImplicit水素を混合した燃料の燃焼特性を検証する。

1. 検討の対象とする天然ガスと水素について

天然ガスの組成は産ガス国により異なり、例えば、オランダのGroningenで産出される天然ガスに含まれるメタン濃度は約81%であるが、1969年に我が国が初めて輸入したアラスカ産の天然ガスには99%以上のメタンが含まれる。現在、我が国が輸入している天然ガスには、表4-1に示すとおり、90%程度のメタンが含まれるものが多い。本調査研究で水素混合燃料の対象とする天然ガスは、表4-1に示す天然ガスを原料として製造・供給される都市ガスであり、約99%の都市ガス需要家が利用している13Aガスとする。第2章で示したとおり、13Aガスとは、燃焼速度に関する燃焼速度指数（MCP）が35から47、発熱量に関するウォッベ指数（WI）が52.7から57.8の間にあるガスであり、ガスグループの中では、燃焼速度が遅く、発熱量が一番大きいガス種である。実際に都市ガス事業者が供給している13Aガスの組成は、各事業者が輸入している天然ガスの違いもあり異なるが、本調査研究で扱う13Aガスの組成は、表4-2に示すとおりとし、総発熱量は45.1939 MJ/Nm³とする。

表4-1 我が国が輸入している主要な液化天然ガス

産出地	アラスカ	ブルネイ	インドネシア 東カリマンタン	インドネシア 北スマトラ	オーストラリア	マレーシア	カタール
成分 (モル%)	CH ₄	99.81	90.48	89.48	89.61	87.40	91.00
	C ₂ H ₆	0.07	5.11	5.21	8.03	8.24	5.05
	C ₃ H ₈	0.00	2.89	3.63	1.55	3.34	2.86
	i-C ₄ H ₁₀	0.00	0.63	0.79	0.34	0.40	0.53
	n-C ₄ H ₁₀	0.00	0.81	0.87	0.40	0.54	0.44
	C ₄ H ₁₀	0.00	0.04	0.01	0.03	0.03	0.01
	N ₂	0.12	0.04	0.01	0.04	0.05	0.11
総発熱量 (MJ/Nm ³)	39.7	44.5	45.2	44.0	45.3	44.0	44.1

出典：都市ガス工業概要（製造編）（一般社団法人日本ガス協会）から抜粋

表4-2 検討の対象とする13Aガスの組成

成分ガス	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	総発熱量 (MJ/Nm ³)
濃度 (モル%)	0.9	0.05	0.03	0.01	0.01	45.1939

この13Aガスを空気と混合して燃焼する場合の、混合ガスの燃焼下限界（ L_l ）と燃焼上限界（ L_u ）を表4-3に示す各可燃性ガスの燃焼下限値と上限値を用いて、式4-1に示すLe Chaterierの式により求めるとそれぞれ約4.47%と約14.63%となる。

$$L = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{N_i}} \dots\dots\dots (式 4 - 1)$$

L : 混合ガスの燃焼限界 (%)
 N : 成分ガス中の各可燃ガスの燃焼限界 (%)
 n : 成分ガス中の各可燃ガスの濃度 (%)
 i : $H_2, CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}$
 但し、 $\sum n_i = 100$

表 4 - 3 可燃性ガスの燃焼限界

成分ガス	燃焼限界 (※)	
	下限	上限
水素 (H_2)	4.0	75.0
メタン (CH_4)	5.0	14.0
エタン (C_2H_6)	3.0	12.5
プロパン (C_3H_8)	2.1	9.5
ブタン (C_4H_{10})	1.8	8.5

(※) 可燃性ガスに理論空気量の空気を混合して燃焼する場合の燃焼限界

出典：都市ガス工業概要（消費機器編）（一般社団法人日本ガス協会）から抜粋

混合する水素としては、再生可能エネルギーにより発生させた電力により、水を電気分解して生成する水素のほか、製油所で製造する際に CO_2 の大気放散を伴わない水素、製鉄所やソーダ工場などで発生する水素で、燃料などとして利用されていない外販可能な副生水素などが対象になると考えられる。

2. Explicit水素と13Aガスを混合した燃料の燃料特性について

水素混合燃料の燃焼特性を把握するためには、燃焼下限界、燃焼上限界、 MCP 、 WI を知ることが必要である。13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合の燃焼限界を、式 4 - 1 により求めた結果を、図 4 - 1 に示す。添加割合が50%を超えるあたりから燃焼範囲が急速に拡大することがわかる。図 4 - 2 に、13Aガスの主成分であるメタンにExplicit水素を添加して生成したガスを空気と混合し、燃焼させた場合の層流燃焼速度を実験により求めた結果を示す。層流燃焼速度は、Explicit水素濃度が0から25%程度まで直線的に増加するが、25%以上の濃度では急速に増加し、爆発的な燃焼に移行することがわかる。

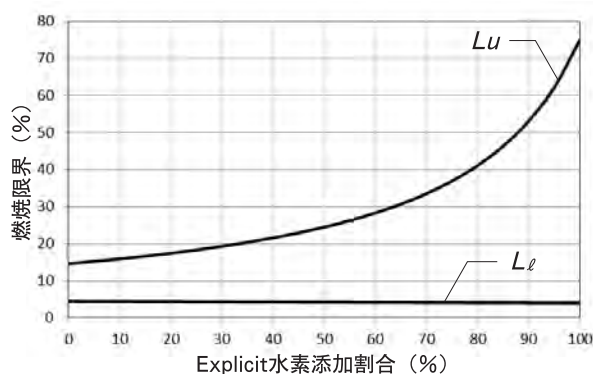


図 4 - 1 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合の燃焼限界の変化

図 4 - 3 から図 4 - 8 に、Explicit水素を13Aガスに混合する燃料において、添加する

Explicit水素の量を変化させた場合の燃焼に係る特性の変化を示す。CO₂原単位は、13Aガスの発熱量と等価の混合ガス量を求めた上で評価している。計算に用いた条件を表4-4に示す。

図4-6から、Explicit水素の添加量が50%まではCO₂排出原単位の大きな低下が期待できないが、50%を超えると急激に減少することがわかる。図4-7に、CO₂排出原単位削減率の変化を示す。これらの結果から、Explicit水素によりCO₂排出量を大幅に減らすためには、高濃度の水素を添加する必要があるが、図4-2に示したように、Explicit水素の濃度が30%を超えると燃焼・爆発特性が大きく変化するため、後述するように、これらを合わせて検討する必要がある。

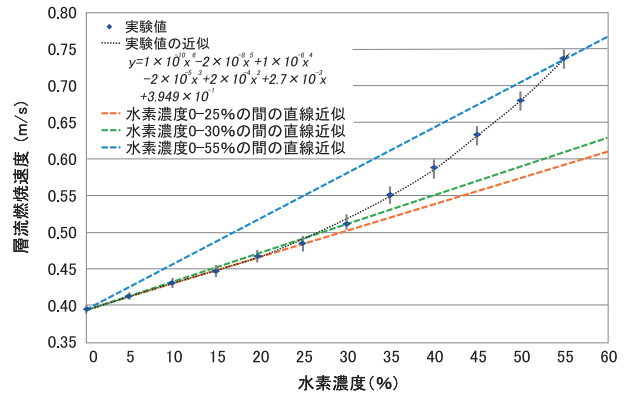


図4-2 メタンに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合の層流予混合火炎の燃焼速度

出典：名古屋大学工学研究科航空宇宙工学専攻 勝間田 剛
平成23年度修士論文（指導教官吉川典彦教授）に加筆

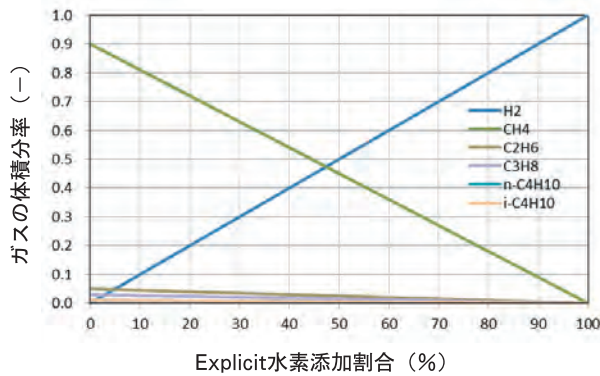


図4-3 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合の組成の変化

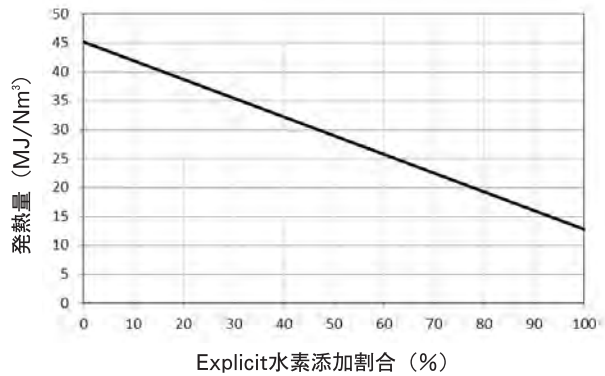


図4-4 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合の発熱量の変化

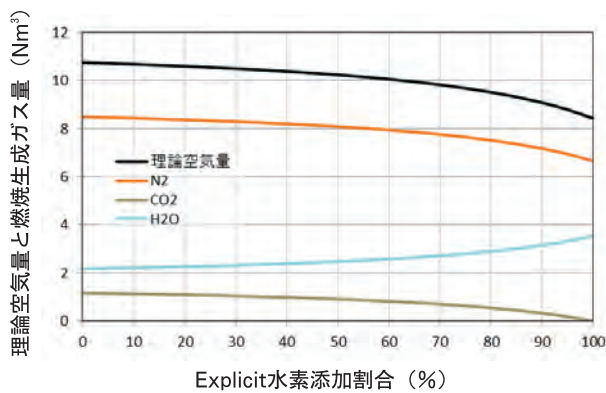


図4-5 13Aガスに添加する水素の濃度を変化させた場合のExplicit水素混合ガス1Nm³に対する理論空気量と燃焼生成ガス量の変化

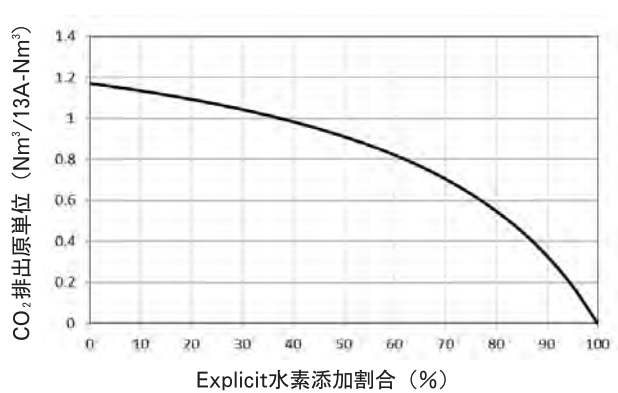


図4-6 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合の単位熱量あたりのCO₂排出原単位の変化

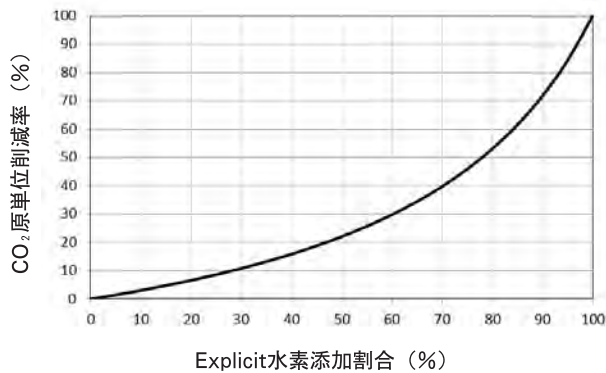


図 4 - 7 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合のCO₂排出原単位削減率の変化

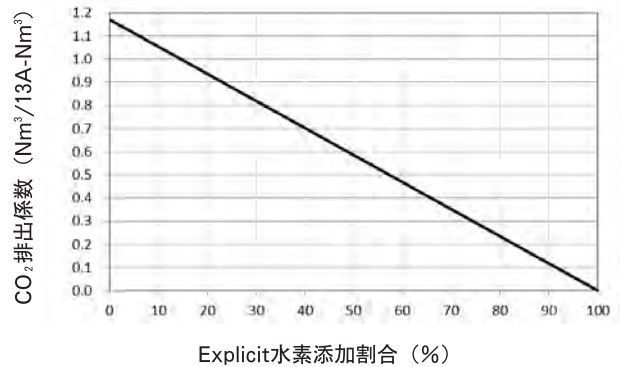


図 4 - 8 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合のCO₂排出係数の変化

図 4 - 9 と図 4 - 10 に、13AガスにExplicit水素を添加した場合のMCPとWIの値を、それぞれ式 4 - 2 と式 4 - 3 により求めた結果を示す。

$$MCP = \frac{\sum(S_i \times f_i \times A_i)(1-K)}{\sum(f_i \times A_i)} \dots\dots\dots (式 4 - 2)$$

S_i : 混合ガス中の各可燃性ガスの燃焼速度であって、表 4 - 4 に掲げる値

f_i : 混合ガス中の各可燃性ガスに係る係数であって、表 4 - 4 に掲げる値

A_i : 混合ガス中の各可燃性ガスの含有率 (%)

K : 減衰係数であって、次の式により算出した値

$$K = \frac{\sum A_i}{\sum(a_i \times A_i)} \left\{ \frac{2.5CO_2 + N_2 - 3.77O_2}{100 - 4.77O_2} + \left[\frac{N_2 - 3.77O_2}{100 - 4.77O_2} \right]^2 \right\}$$

a_i : 混合ガス中の各可燃性ガスの補正係数であって、表 4 - 4 に掲げる値

CO_2 : 混合ガス中の二酸化炭素の含有率 (%)

N_2 : 混合ガス中の窒素の含有率 (%)

O_2 : 混合ガス中の酸素の含有率 (%)

i : H₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀

表 4 - 4 燃焼速度指数算定のための各係数

成 分	S_i	f_i	a_i
水 素	282	1.00	1.33
メ タ ン	36	8.72	2.00
エ タ ン	41	16.6	4.55
プ ロ パ ン	41	24.6	4.55
ブ タ ン	38	32.7	5.56

出典：都市ガス工業概要（消費機器編）（一般社団法人日本ガス協会）

$$WI = \frac{H}{\sqrt{d}} \dots\dots\dots (式 4 - 3)$$

H : ガスの発熱量 (kcal/Nm³、MJ/Nm³、Btu/scfなど)

d : ガスの比重 (空気= 1)

この結果から、Explicit水素の添加濃度が25%までであれば、Explicit水素混合燃料のMCPとWIは、13Aガスの燃焼範囲にとどまることがわかる。

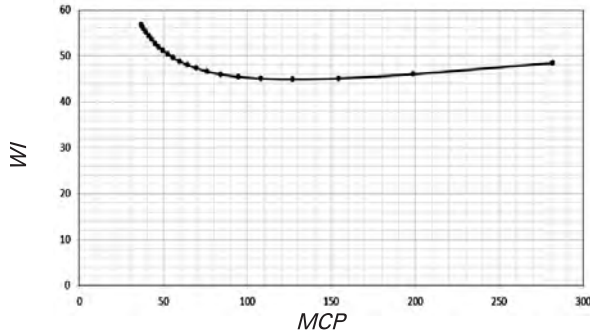


図 4 - 9 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合のMCP-WIの変化

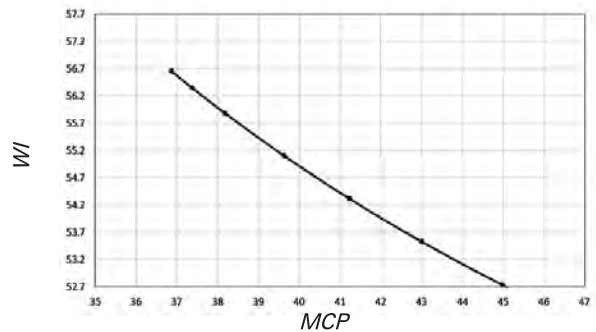


図 4 - 10 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合のMCP-WIの変化を13Aガス燃焼範囲で示したもの (図 4 - 9 の一部)

現在の都市ガス導管網に接続されているさまざまなガス利用機器の内、13Aガス仕様のガスエンジンは、メタン価 (MN) が65以上の燃料ガスであればノッキングを発生しないように設計されている。天然ガスのMNは、純メタンのMNを100として、CARB基準による式 4 - 4 により求めることができる。式 4 - 4 により対象としている13AガスのMNを求めると約75.6となる。

$$MN = 1.624 \times (-406.14 + 508.04 \times RHCR - 173.55 \times RHCR^2 + \dots\dots\dots (式 4 - 4)$$

$$20.17 \times RHCR^3) - 119.1$$

ここで、

$$RHCR = (CH_4 \times 4 + C_2H_6 \times 6 + C_3H_8 \times 8 + (i-C_4H_{10} + n-C_4H_{10}) \times 10 + (i-C_5H_{12} + n-C_5H_{12}) \times 12 + (C_6H_{14} \text{以上}) \times 14) / (CH_4 \times 1 + C_2H_6 \times 2 + C_3H_8 \times 3 + (i-C_4H_{10} + n-C_4H_{10}) \times 4)$$

但し、

- CH_4 : 天然ガス中のメタン濃度
- C_2H_6 : 天然ガス中のエタン濃度
- C_3H_8 : 天然ガス中のプロパン濃度
- $i-C_4H_{10}$: 天然ガス中のイソブタン濃度
- $n-C_4H_{10}$: 天然ガス中のノルマルブタン濃度

Explicit水素は、燃焼速度が非常に速く、天然ガスに添加した場合、濃度によってはノッキングを起こすことが、第2章で述べたNaturalhyでの実験で判明している。そこで、13AガスにExplicit水素を添加した場合、ノッキングが発生する限界濃度を把握する必要がある。天然ガスにExplicit水素を添加した場合のMNを計算するために、13Aガスに添加するExplicit水素濃度を0%から100%まで変化させた場合の燃焼下限界の変化特性（図4-11）に基づき、純水素のMNを0として、式4-4を修正して求めたMNの変化を、MCPとWIの変化とともに3次元表示した結果を、図4-12に示す。図中、Explicit水素の濃度10%（黄色で示した点）でMNが約65となり、ノッキング発生限界に達することがわかる。このとき、MCPは約40、WIは約50であり、ともに13Aガスの範囲にある。

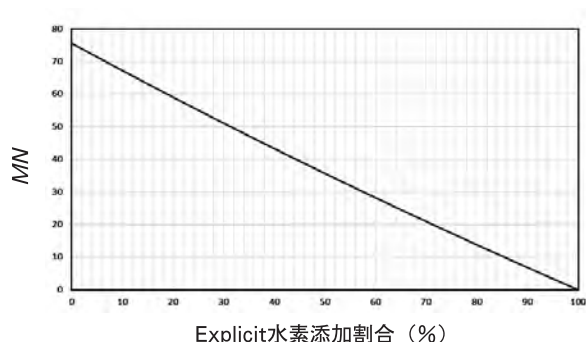


図4-11 13Aガスに添加するExplicit水素の濃度を変化させた場合のMNの変化

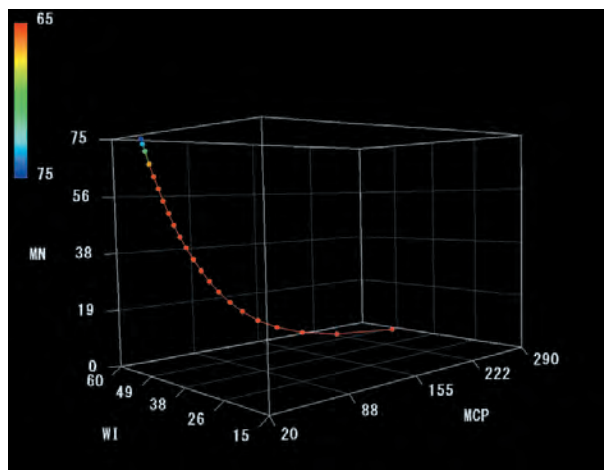


図4-12 MCP-WI-MN空間で表示した13AガスにExplicit水素を添加した場合の燃焼特性の変化

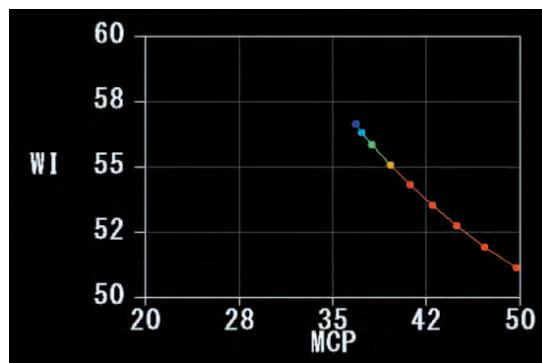


図4-13 MCP-WI平面上で表示した13AガスにExplicit水素を添加した場合の燃焼特性の変化

第2章で述べたとおり、NRELやNaturalhyでの検討の結果、天然ガスへのExplicit水素の混合割合が、50%以上で水素脆性の発生が懸念されている。30%以上では、図4-1で示したように、燃焼・爆発範囲（特に燃焼上限界）が拡大するとともに燃焼速度の顕著な増大が起き爆発的な燃焼に移行する。20%では、Naturalhyでの検証の結果、ガスエンジンで発生するノッキングによるピストンヘッドの損傷が報告されている。これらの知見

に加え、Explicit水素を混合する天然ガスを13Aガスとし、燃料転換などの大規模な供給・利用インフラの変更をおこなわないためには、燃焼特性が13AガスのMCP-WIの範囲内にあり、かつ、ガスエンジンの設計基準の1つであるMN65以上を確保できる10%程度がExplicit水素混合割合の上限であると考えられる。

都市ガスの導管網を用いて水素を供給する方法として、13Aガスに高濃度のExplicit水素を添加して供給し、ガス利用機器側でガス分離膜を用いて水素を分離し、純水素型燃料電池で利用するとともに、残りの13Aガスを導管網に再注入ことにより、膨大なコストが必要となるガス転換を回避できるとする考え方が提案されている。しかしながら、都市ガス導管網への高濃度Explicit水素混合に対する安全対策が必要になることと、熱量低下に伴う導管輸送効率の低下などが懸念される。また、ガス分離膜については、Naturalhyで要素技術開発への取り組みがなされたが、現在も研究開発の段階にある。ガス分離膜にPdを用いる場合、分離効率の観点から70%以上の水素濃度が必要であり、分離膜を駆動するために400°C程度に加熱する必要がある。さらに、分離膜の1次側と2次側で圧力差が必要となる。膜分離で必要となる圧力の有効利用については、NRELの検討では、高圧天然ガスパイプラインの需要地近くのCity Gateと呼ばれる圧力調整地点で発生する減圧分を利用して膜分離をおこなうことで、経済性を改善する方法が提示されている。いずれにしても、ガス分離装置には技術課題が残されており、設備コストおよび運転コスト発生の問題があること、ガス分離後のガス組成は導管に接続されるさまざまなガス利用機器の構成により大きく影響され、組成の制御が難しいと想定されることから、添加するExplicit水素の濃度は、13Aガスの燃焼範囲内であつ、熱量引下げの範囲にとどまる10%程度にとどめるのが現実的であると考えられる。Explicit水素の混合燃料の製造と供給に必要な主な設備と原料については第5章で述べる。

3. Explicit水素により製造したメタンを13Aガスに混合する燃料の燃焼特性について

13Aガスに混合するメタンは、Implicit水素とCO₂を用いて、以下に示すSabatier反応により合成することができる。この反応はメタンの水蒸気改質反応の逆反応であり発熱反応である。



図4-14から図4-18に、Implicit水素により製造したメタンと13Aガスの混合燃料において、添加するメタンの量を変化させた場合の燃焼に係る特性の変化を示す。

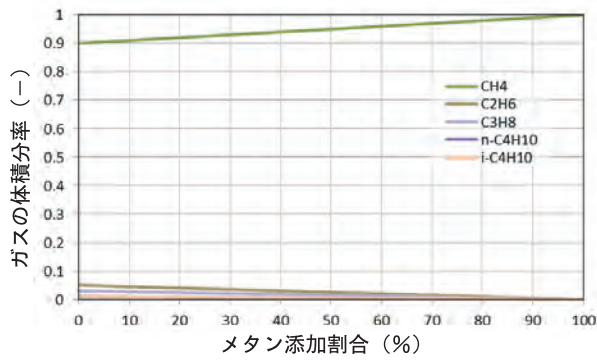


図 4-14 13Aガスに添加するメタンの濃度を変化させた場合の組成の変化

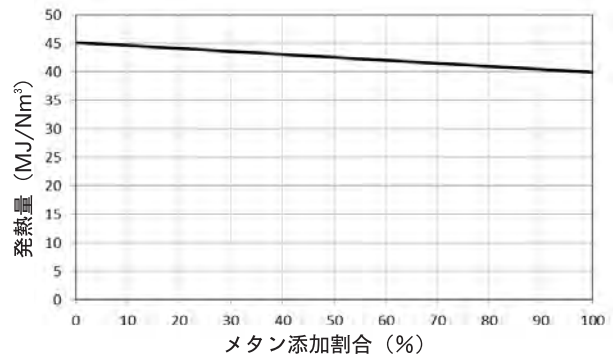


図 4-15 13Aガスに添加するメタンの濃度を変化させた場合の発熱量の変化

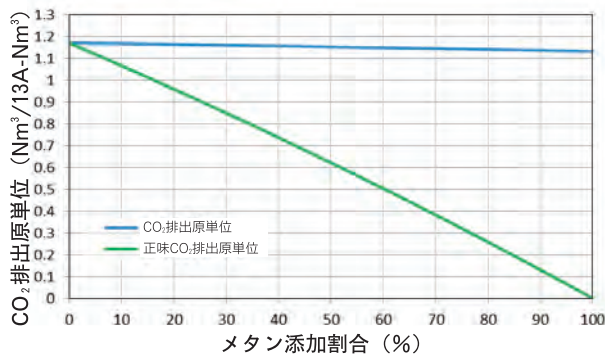


図 4-16 13Aガスに添加するメタンの濃度を変化させた場合のCO₂排出原単位の変化

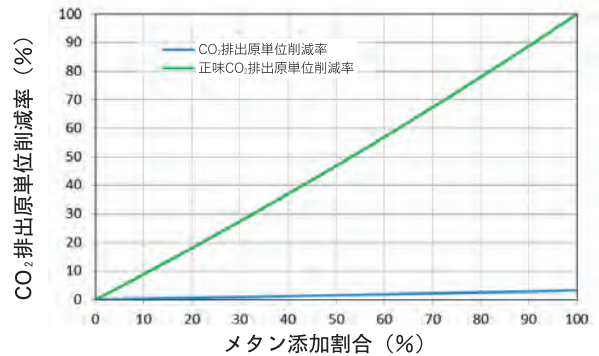


図 4-17 13Aガスに添加するメタンの濃度を変化させた場合のCO₂排出原単位削減率の変化

メタンの合成に利用するCO₂として、下水汚泥や農林水産物の非食部および食品系廃棄物などのバイオマス発酵により発生したCO₂や化石燃料の燃焼により発生したCO₂を捕集し、再利用するのであれば、新たな環境負荷を発生させることにはならない。さらには、メタン混合燃料の燃焼に伴い発生するCO₂を再度捕集し、循環利用するシステムを構築できれば、CO₂は系内での移動はあるが固定化されたのと同様となり、化石燃料由来のCO₂であればCO₂ゼロエミッション、バイオマス由来のCO₂であればCO₂ネガティブエミッションにつながる。図4-16、図4-17、図4-18は、化石燃料としてのメタンならびにカーボンニュートラルの水素と上述したCO₂を原料として合成したメタンについて、メタン添加量の変化に伴うCO₂排出原単位、CO₂排出原単位の削減率、CO₂排出係数の変化を示す。メタン混合燃料のCO₂排出原単位については、13Aガスと熱量等価の条件で評価している。バイオマス由来のCO₂や循環するCO₂を

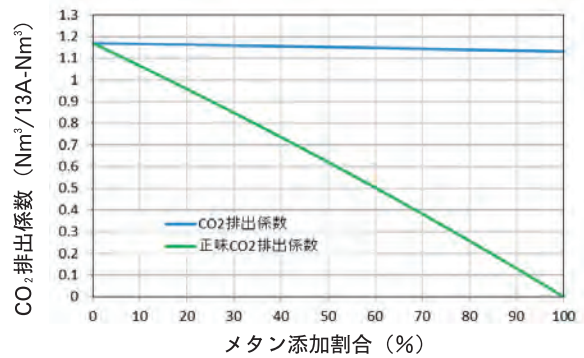


図 4-18 13Aガスに添加するメタンの濃度を変化させた場合のCO₂排出係数の変化

利用する方法は、正味CO₂排出原単位の変化が示すように、極めて有効なCO₂削減方法である。いずれにしてもExplicit水素によるメタンの合成では、メタン1モルを合成するために必要な原料CO₂1モルと水素4モルを安価に安定して利用できることが重要である。

Explicit水素とCO₂からメタンを合成してImplicit水素を混合する場合、図4-19、図4-20に示すように、燃焼特性はメタンの濃度によらず、13AガスのMCP-WIの範囲にあり、また、MNはメタン濃度の増大に従い100に漸近することから、混合濃度の制約はない。一方、天然ガスへ混合するExplicit水素の許容量は限られることから、水素混合燃料の主体は、Explicit水素とCO₂から製造するメタンによるImplicit水素となる。Explicit水素により製造したメタンを13Aガスに混合する燃料の製造と供給に必要な設備と原料については、第5章で述べる。なお、合成したメタンにエタン、プロパン、イソブタン、ノルマルブタンを添加し、13Aガスと同じ成分であるSNG（合成天然ガス）を製造して13Aガスに混合する場合、当然のことながら、混合に伴うMCP、WI、MNの変化はなくなる。

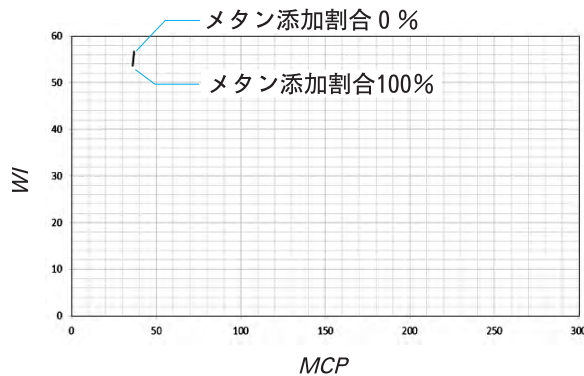


図4-19 13Aガスに添加するメタンの濃度を変化させた場合のMCP-WIの変化

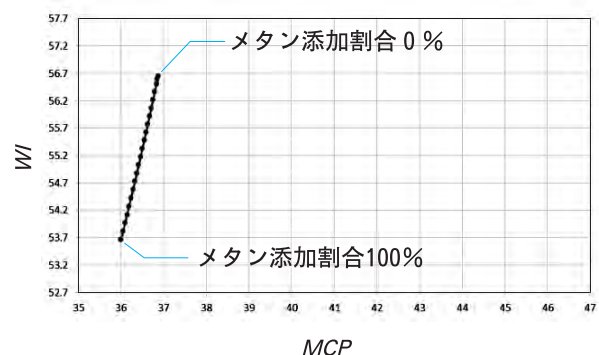


図4-20 13Aガスに添加するメタンの濃度を変化させた場合のMCP-WIの変化
(図4-19の拡大図)

4. Explicit水素とExplicit水素から合成したメタンを13Aガスに混合した燃料について

図4-21から図4-23に一例として、13Aガスに10%の水素を添加したガスに、Explicit水素により製造したメタンの量を変化させて混合した場合の、燃焼にともなうCO₂排出量の変化を示す。Explicit水素とメタンを13Aガスに混合した燃料においても、Explicit水素とバイオマス由来のCO₂や循環利用するCO₂から合成したメタンは、CO₂排出量の削減に極めて有効である。

また、13AガスにExplicit水素を添加することによりMNが低下するが、メタンを添加することにより回復することができる。一方、

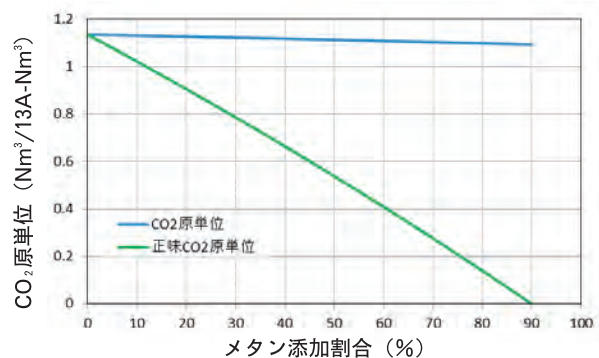


図4-21 13Aガスに10%の水素を混合したガスに添加するメタンの濃度を変化させた場合のCO₂排出原単位の変化

13AガスにExplicit水素を添加することによりMCPは増大し、WIは低下する。これに対し、13Aガスにメタンを添加する場合は、MCPは減少する方向に作用するが、WIについてはExplicit水素同様、低下させる方向に作用する。このため、Explicit水素とImplicit水素を併せて供給する場合、Explicit水素の添加によるWIの低下効果とメタンの添加によるWIの低下効果が重畳し、13Aガスの燃焼範囲からの逸脱が促進される（図4-23参照）。図4-24に、添加するExplicit水素の濃度をパラメータ（0%、3.5%、10%、20%、30%）として、混合するメタンの濃度を変化させて、MCP-WIの範囲を調べた結果を示す。添加するメタンの全ての混合濃度において、13AガスのMCP-WI範囲を逸脱しないExplicit水素の混合濃度の上限は約3.5%であることがわかる。但し、メタンの混合量の制約にこだわらなければ、MNが65となる10%の濃度までExplicit水素を混合できることは先に述べた。図4-25は、Explicit水素、Explicit水素により合成したメタン、およびExplicit水素とExplicit水素により合成したメタンを併せて供給する場合の、水素の供給形態別のCO₂排出量削減率と水素消費量の関係を示す。Explicit水素によるメタン1モルの合成には、4モルのExplicit水素が必要になるが、図4-25に示す様に、13Aガス1モルの発熱量と等価の燃料として燃焼させる条件で整理すると、同じCO₂排出量削減率に対して、Explicit水素を利用する方が水素の利用効率が悪いことがわかる。例えば、CO₂排出量を10%削減するとき、10%のExplicit水素を13Aガスに混合したガスにExplicit水素により合成したメタンを混合する方法では、必要な水素量は約0.266モル必要であるが、Explicit水素のみによる方法では、約0.356モル必要となる。

Explicit水素の利用は、これらの結果に加え、添加割合によりMCP-WIやMNの制約が増えることを考えると効果が低いと言える。ドイツのPtG実証では、2015年から天然ガ

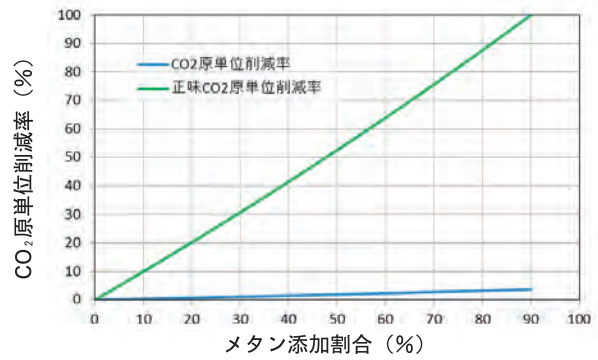


図4-22 13Aガスに10%のExplicit水素を混合したガスに添加するメタンの濃度を变化させた場合のCO₂原単位削減率の変化

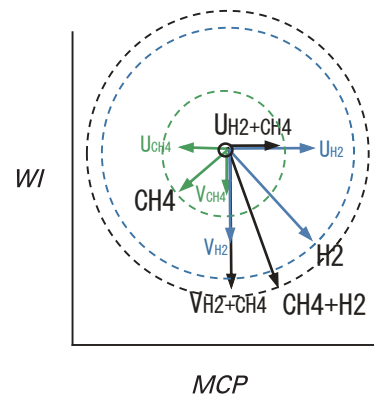


図4-23 水素とメタンの添加によるMCPとWIの変化の傾向

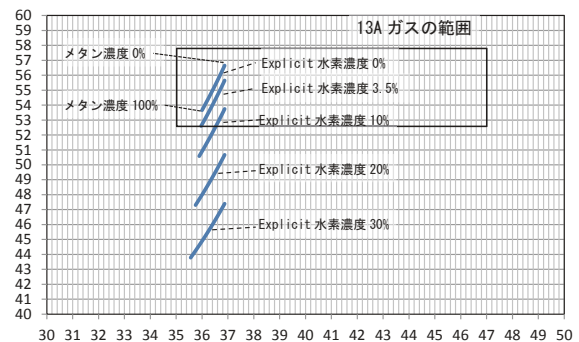


図4-24 13Aガスに添加する水素濃度をパラメータとしてメタンの濃度を变化させた場合のMCP-WIの変化

スに2%のExplicit水素を添加している。今後の計画は発表されていないが、本調査研究での考察と同じ考え方であれば、段階的に、Explicit水素により合成したメタンにシフトしていく可能性がある。

なお、Explicit水素、Implicit水素ともに、再生可能エネルギーの利用可能量が律速となり、十分な水素を確保できない場合は、化石燃料である在来型ガスや非在来型天然ガスを改質して供給することになる。

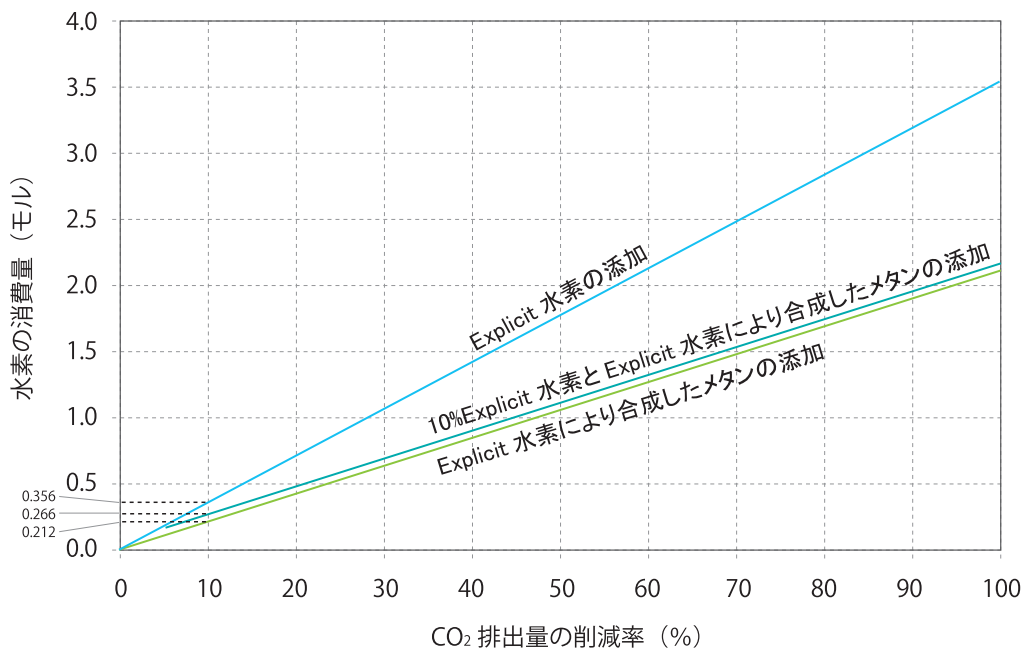


図 4 - 25 CO₂ 排出量の削減率に対する水素の消費量

第5章 中部圏における水素混合燃料技術の適用性について

本章では、中部圏9県における再生可能エネルギーの資源量として利用可能ポテンシャルを整理した上で、太陽光発電の余剰電力を水素化して天然ガスパイプラインに供給・利用する場合について、製造できる水素量とCO₂削減効果などを試算する。

1. 中部圏9県における再生可能エネルギーの利用可能ポテンシャル

(1) 中部圏9県の再生可能エネルギーの導入ポテンシャルと分布について

表5-1は、我が国の主要な再生可能エネルギーである太陽光発電、風力発電、バイオマス、地熱および中小水力の導入ポテンシャル（エネルギー資源量）について、経済産業省ならびに環境省が試算した結果を示す。太陽光発電と風力発電の導入ポテンシャルが、特に大きいことがわかる。地熱は、自然公園内に多く賦存していることから、導入ポテンシャルは小さくなる。

表5-1 我が国の主要な再生可能エネルギーの導入ポテンシャル（※）と賦存量

再生可能エネルギーの分類	導入ポテンシャル・賦存量	単位	備考	
太陽光発電	住宅（既設+新增設）	91,000,000	kW	屋根、屋上、側壁を含む。経済産業省試算。でき得る限り設置する場合（例：公共系建築物などの屋根、側壁および窓のうち10m ² 以上のもの、低未利用地の管理施設屋根、壁面および窓ならびに未利用部分、荒廃した耕作放棄地などのうちすべて（1.050km ² ））。環境省試算。
	公共系建物、その他業務分野、産業分野	52,000,000	kW	
	低・未利用地	27,000,000	kW	
	耕作放棄地等	70,000,000	kW	
風力発電	陸上	280,000,000	kW	
	洋上	1,600,000,000	kW	
バイオマス	廃棄物系	16,171,994	kW	経済産業省試算値510PJ/年を換算。
	未利用系	17,123,000	kW	経済産業省試算値540PJ/年を換算。
地熱		4,930,000	kW	自然公園外の賦存量。
中小水力		14,400,000	kW	

※導入ポテンシャル：エネルギーの採取・利用に関する種々の制約要因による設置の可否を考慮したエネルギー資源量。「種々の制約要因に関する仮定条件」を設定した上で推計される値で賦存量の内数。（出典：「平成24年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書（環境省）」。自然要因（標高、傾斜など）、法規制（自然公園、保安林）などの開発不可地を除いて算出したエネルギー量（経済産業省）。

出典：NEDO再生可能エネルギー技術白書に加筆

表5-2および図5-1から図5-3は、環境省が試算した中部圏9県における風力発電と太陽光発電に関する導入ポテンシャルを示す。風力発電については、今後の技術開発課題が残る洋上風力発電を対象外としている。太陽光発電については、住宅用等と公共系等に分けて試算しており、それぞれの具体的な推計対象を、表5-3、表5-4に示す。

表 5 - 2 風力発電と太陽光発電の導入ポテンシャル

	風力発電 (億kWh/年)	太陽光発電 (億kWh/年)						
		住宅用等	公共系等					
			公共系建物	発電所・工場・物流施設	低・未利用地	耕作放棄地		
富山県	18	71	22	49	2	5	3	39
石川県	258	33	21	12	3	3	3	3
福井県	126	48	16	32	2	3	2	25
長野県	83	93	51	42	5	6	6	25
岐阜県	178	69	43	26	7	8	6	5
静岡県	173	116	72	44	13	15	8	8
愛知県	166	161	107	54	4	29	10	11
三重県	265	64	43	21	3	9	5	4
滋賀県	152	43	23	20	5	6	4	5
合計	1,418	698	398	300	44	84	47	125

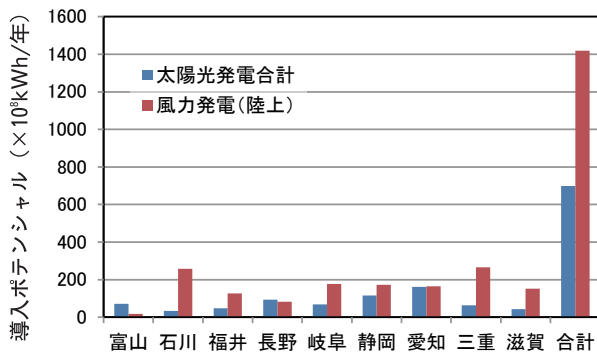


図 5 - 1 太陽光発電と風力発電の導入ポテンシャル

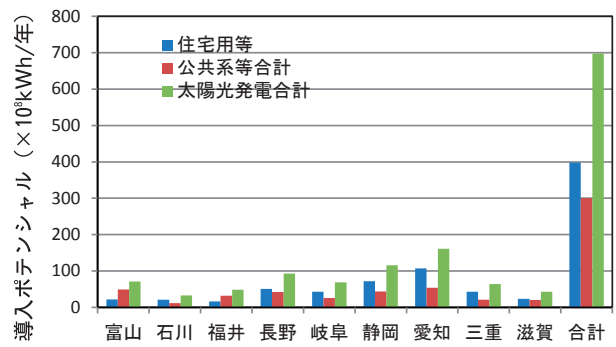


図 5 - 2 太陽光発電の導入ポテンシャルの内訳

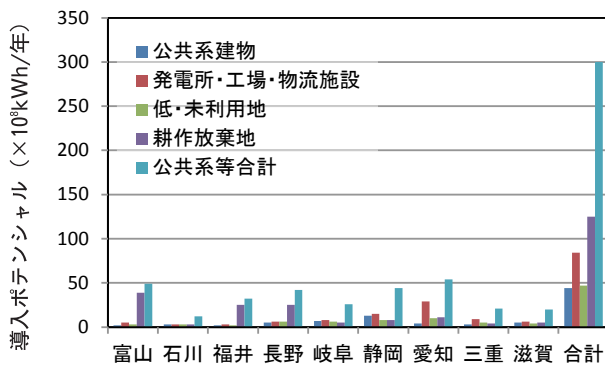


図 5 - 3 公共系等太陽光発電の導入ポテンシャルの内訳

出典：平成24年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書（環境省）に加筆

表 5 - 3 住宅用等太陽光発電の推計対象カテゴリー

大分類	中分類	小分類
商業系建物	商業	小規模商業施設
		中規模商業施設
		大規模商業施設
	宿泊	宿泊施設
住宅系建物	住宅	戸建住宅用
		大規模共同住宅・オフィスビル
		中規模共同住宅

表 5 - 4 公共系等太陽光発電の推計対象カテゴリー

大分類	中分類	小分類
公共系建築物	庁舎	本庁舎
		支庁舎
	文化施設	公民館
		体育館
		その他の文化施設
	学校	幼稚園
		小学校・中学校・高校
		大学
		その他の学校
	医療施設	病院
	上水施設	上水施設
下水施設	公共下水	
	農業集落排水	
道の駅	道の駅	
発電所・工場・物流施設	発電所	火力発電所
		原子力発電所
	工場	大規模工場
		中規模工場
		小規模工場
倉庫	倉庫	
工業団地	工業団地	
低・未利用地	最終処分場	一般廃棄物
		産業廃棄物安定型
		産業廃棄物管理型
	河川	堤防敷・河川敷
	港湾施設	重要港湾
		地方港湾
		漁港
	空港	空港
	鉄道	J R・私鉄
	道路（高速・高規格道路）	S A
		P A
		法面
		中央分離帯
	都市公園	都市公園
	自然公園	国立・国定公園
	ダム	堤上
	海岸	砂浜
観光施設	ゴルフ場	
耕作放棄地	耕作放棄地	

出典：平成24年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書（環境省）に加筆

(2) 水素化利用の対象とする再生可能エネルギーについて

第3章で述べたとおり、再生可能エネルギーで得た電力は、まず系統に連系して利用する。それでも余剰となる電力は水素化し、水素混合燃料として天然ガスパイプラインを利用して供給する。このためには、再生可能エネルギーの発生している場所に、天然ガスパイプラインが整備されている事が、条件の一つとなる。図5-4、図5-5、図5-6は、中部圏の電力系統図に太陽光発電の導入ポテンシャルと風力発電の導入ポテンシャルの分布をそれぞれ重ねた図および、中部圏の天然ガスパイプラインの敷設状況を示す。電力系統は、太陽光発電および陸上風力発電の導入ポテンシャルの分布を良くカバーしている。一方、天然ガスのパイプラインは、都市部の太陽光発電のポテンシャルの分布を比較的カバーしているが、陸上風力発電の導入ポテンシャルの分布は、あまりカバーしていないことがわかる。そこで、都市部における天然ガスパイプラインと導入ポテンシャルの分布の重なるの多い太陽光発電を水素化利用の対象として考える。この時、太陽光発電の導入ポテンシャルの試算対象の内、住宅用等太陽光発電については、発電量が小さく、電力を水素に変換する設備の設置場所も限られると考えられることから、大容量の太陽光発電を設置できる公共系等太陽光発電を対象とする。

我が国は島国であり、天然ガス資源に乏しいことから、海外からLNGの形態で天然ガスを輸入する必要があった。また、国土の中央に山脈が走り、エネルギーの各需要地が、太平洋側の山間の中を縫って帯状に分布している。このため、各需要地の近くに多数のLNG基地が建設されてきた。我が国においてドイツなど欧州諸国や北米にみられるような天然ガスパイプライン網が発達していない主な理由は、風土の違いにある。エネルギーインフラとしての電力系統網と天然ガスパイプラインの整備状況の相違が、Power to Gasと本調査研究で考える水素混合燃料技術における再生可能エネルギー利用の違いとなる。

2. 太陽光発電電力の水素混合燃料としての利用について

(1) 太陽光発電電力の水素化利用の考え方

太陽光発電をエネルギーインフラで受け入れる際の基本的な考え方は、図5-7に示す様に、まず、住宅用等太陽光発電を電力系統で受け入れた後、公共系等太陽光発電から2030年の太陽光発電の導入目標である電源構成の7%を達成するために必要な電力を充当することとする。この時、余剰となる公共系太陽光発電での電力を水素化し、Explicit水素またはExplicit水素からメタンを合成し、Implicit水素として利用するアルゴリズムに従うものとし、水素化によるガス量、CO₂削減量などを評価する。

太陽光発電の出力特性から、日中に発生する水素をExplicit水素（上限3.5%~10%：第4章参照）として、天然ガスパイプラインで受け入れると、昼夜で組成変動が大きくなるため、一旦貯蔵して、昼夜で水素混合濃度が均一になるようにして導入するか、メタンとして100%Implicit水素の形で利用することが望ましい。なお、図5-5に示したとおり、

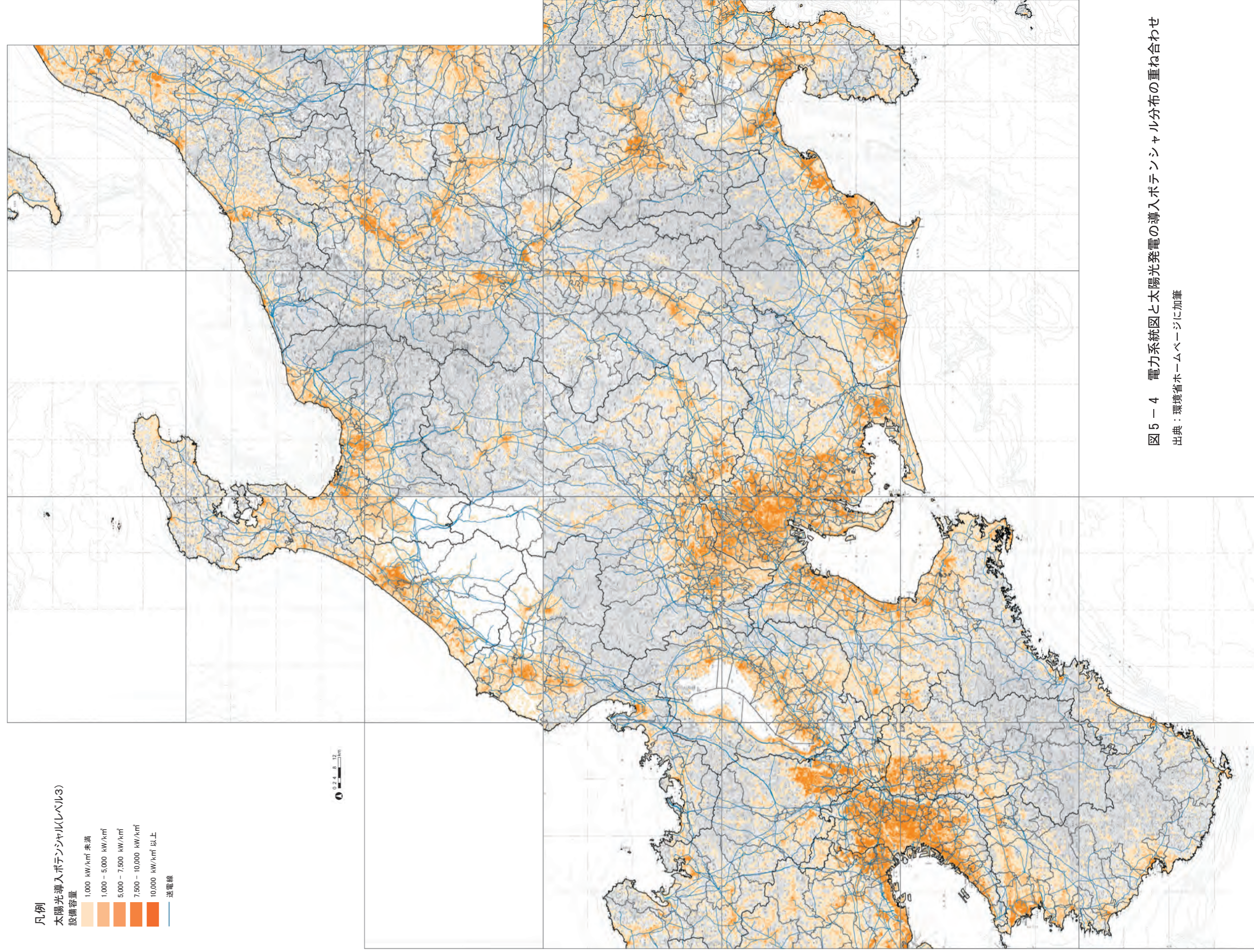


図5-4 電力系統図と太陽光発電の導入ポテンシャル分布の重ね合わせ
出典：環境省ホームページに加筆

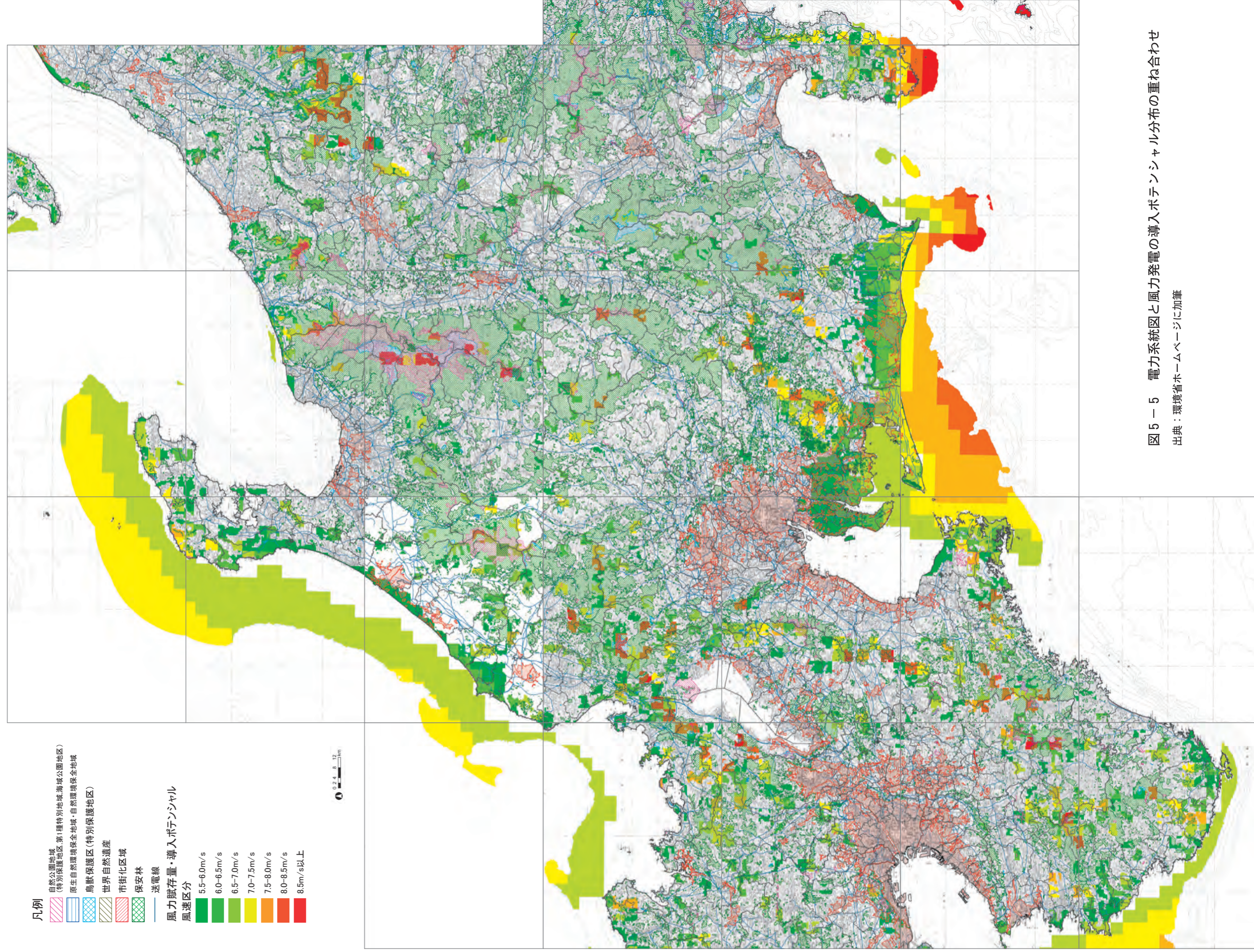


図5-5 電力系統図と風力発電の導入ポテンシャル分布の重ね合わせ
出典：環境省ホームページに加筆

事業者	100万kWh以上の送電容量	所 有 者	送電容量	稼働率	稼働率	2017年(推定)	2018年(推定)
日本電力	2,000,000	日本電力	1,000,000	48%	48%	2,000,000	2,000,000
東電	1,500,000	東電	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
中部電力	1,500,000	中部電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
北電	1,500,000	北電	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
京浜東北電力	1,500,000	京浜東北電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
信託電力	1,500,000	信託電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
三井物産	1,500,000	三井物産	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
中部電力	1,500,000	中部電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
京浜東北電力	1,500,000	京浜東北電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
信託電力	1,500,000	信託電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
三井物産	1,500,000	三井物産	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
中部電力	1,500,000	中部電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
京浜東北電力	1,500,000	京浜東北電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
信託電力	1,500,000	信託電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
三井物産	1,500,000	三井物産	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
中部電力	1,500,000	中部電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
京浜東北電力	1,500,000	京浜東北電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
信託電力	1,500,000	信託電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
三井物産	1,500,000	三井物産	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
中部電力	1,500,000	中部電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
京浜東北電力	1,500,000	京浜東北電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
信託電力	1,500,000	信託電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
三井物産	1,500,000	三井物産	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
中部電力	1,500,000	中部電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
京浜東北電力	1,500,000	京浜東北電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
信託電力	1,500,000	信託電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
三井物産	1,500,000	三井物産	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000

100万kWh以上の送電容量	所 有 者	送電容量	稼働率	稼働率	2017年(推定)	2018年(推定)
中部電力	中部電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
京浜東北電力	京浜東北電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
信託電力	信託電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
三井物産	三井物産	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
中部電力	中部電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
京浜東北電力	京浜東北電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
信託電力	信託電力	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000
三井物産	三井物産	1,500,000	48%	48%	1,500,000	1,500,000

凡 例

- 輸送線
- 輸送線(輸送能力)超過
- 輸送線(輸送能力)不足
- 輸送線(輸送能力)不足(2段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(3段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(4段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(5段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(6段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(7段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(8段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(9段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(10段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(11段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(12段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(13段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(14段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(15段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(16段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(17段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(18段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(19段階)
- 輸送線(輸送能力)不足(20段階)

1:500,000

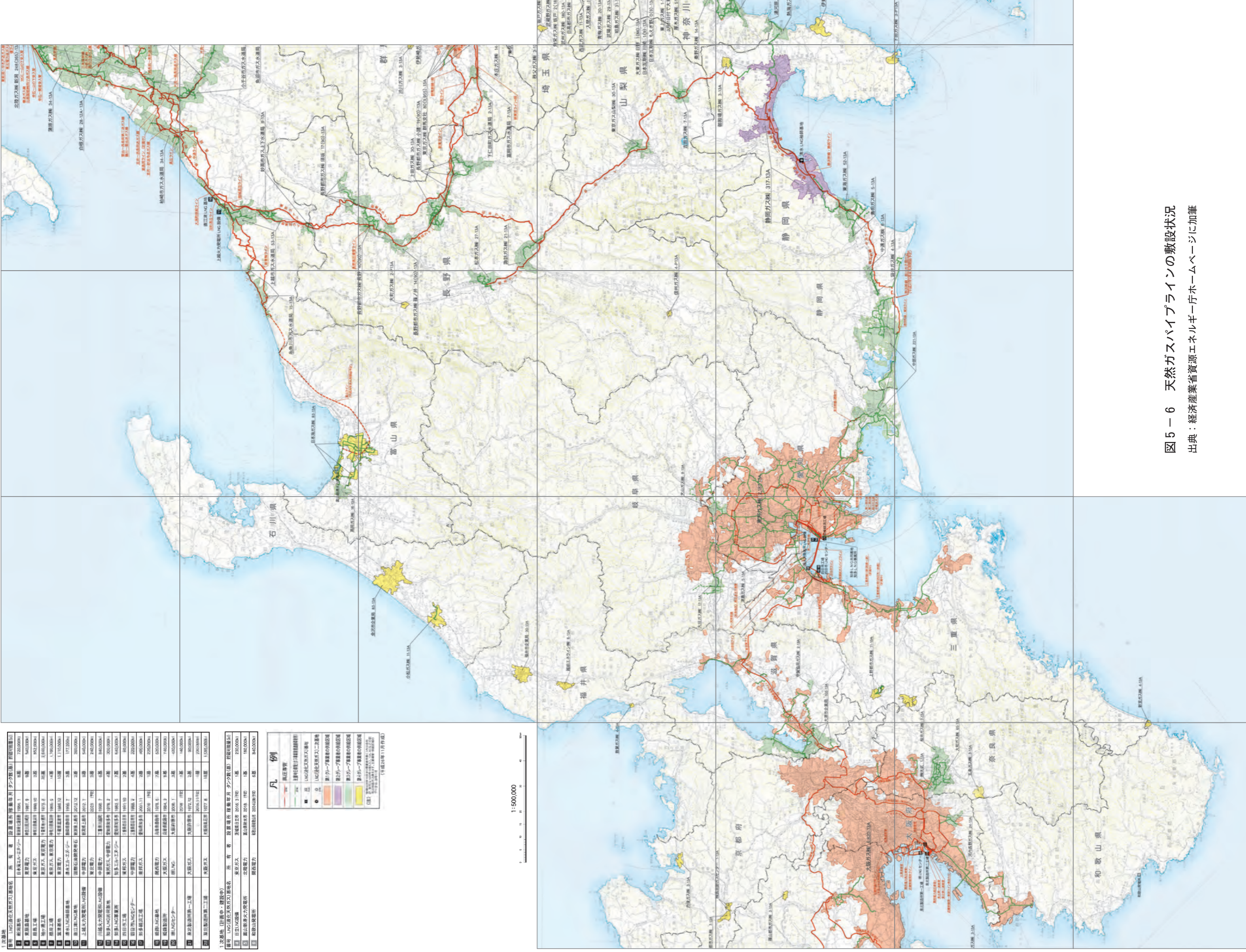


図5-6 天然ガスパイプラインの敷設状況
出典：経済産業省資源エネルギー庁ホームページに加筆

陸上風力発電の導入ポテンシャル分布は、山地帯に集中していることから、電力系統に連系して、利用することが妥当と考えられる。電力系統への連系の許容量を超える場合は、水の電気分解により水素を製造した後、圧縮水素の形でExplicit水素としてメタン合成をおこなうサイトへ輸送して利用することも考えられる。

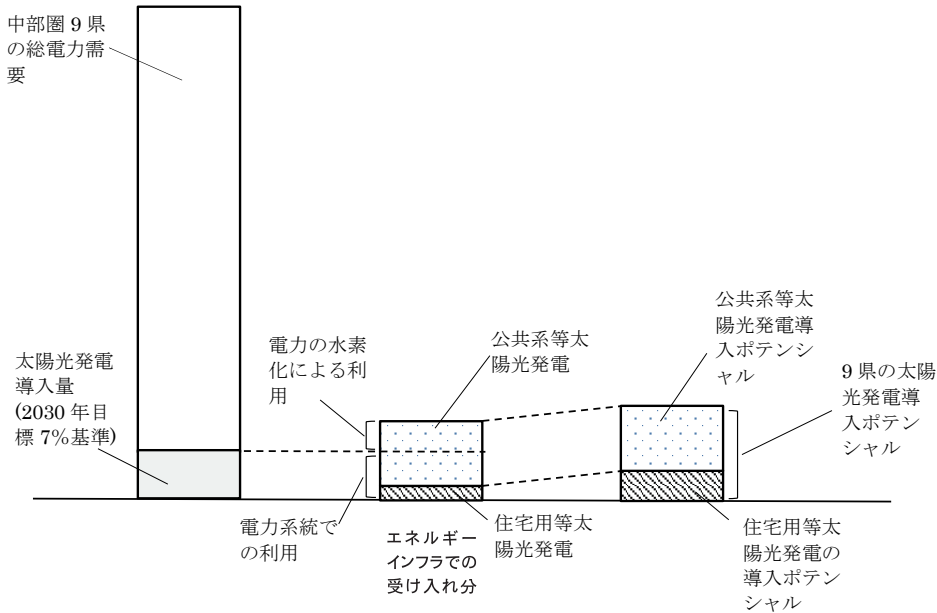


図5-7 太陽光発電のエネルギーインフラでの受け入れの考え方

(2) 中部圏9県の太陽光発電の想定導入量の算定

エネルギー長期需給見通しでは、2030年時点において、再生可能エネルギーが電源構成に占める導入目標は、太陽光発電が7%、風力発電が1.7%とされている。そこで、2030年における中部圏9県における太陽光発電と風力発電の導入率についても、それぞれ7%と1.7%であると仮定しかつ、中部圏9県の2015年の総電力需要、約1,945億kWh/年が2030年度も同一水準であると仮定して、再生可能エネルギーによる電力量を求めると、太陽光発電約136億kWh/年と風力発電約33億kWh/年となる。ここで、表5-5に示す様

表5-5 太陽光発電導入設備容量に基づく年間発電量（移行認定分および新規認定分、2015年11月現在）

	10kW未満		10kW以上					設備容量合計(kW)	
	うち自家発電設備併設		うち50kW未満	うち50kW以上500kW未満	うち500kW以上1,000kW未満	うち1,000kW以上2,000kW未満	うち2,000kW以上		
富山県	47,078	497	131,672	40,183	28,860	17,046	39,584	6,000	178,750
石川県	40,599	412	159,016	51,598	26,913	38,069	42,435	0	199,614
福井県	38,225	279	91,226	31,730	19,743	12,132	27,623	0	129,451
長野県	272,482	1,521	528,056	296,031	102,920	50,829	72,776	5,500	800,538
岐阜県	198,208	3,597	512,279	286,780	89,700	68,919	66,880	0	710,487
静岡県	395,466	6,444	767,215	355,980	99,827	80,465	153,469	77,474	1,162,681
愛知県	617,885	19,243	948,618	446,304	155,474	98,940	97,792	150,110	1,566,503
三重県	181,045	4,533	675,004	240,576	80,941	91,689	182,118	79,680	856,049
滋賀県	149,072	6,957	330,731	127,274	72,579	56,267	63,611	11,000	479,803
合計(kW)	1,940,059	43,482	4,143,817	1,876,455	676,957	514,354	746,288	329,764	6,083,876
合計(kWh/年)†	2,039,390,174	45,707,858	4,718,978,993	2,136,907,216	770,918,677	585,745,994	849,872,205	375,534,902	6,758,369,167

(† 10kW未満太陽光発電の年間平均設備利用率を0.12、10kW以上太陽光発電の年間平均設備利用率を0.13として推算)

出典：経済産業省 再生可能エネルギーの導入量等に関する検討

出典：経済産業省資源エネルギー庁 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト

に、住宅用等および公共系等の太陽光発電の現在の認定済み系統接続容量に基づく電力量は、約68億kWh/年であることから、表5-6に示すとおり、2030年の導入目標に基づく太陽光発電の想定利用量約136億kWh/年との間に約68億kWh/年の差がある。今後、住宅用等太陽光発電の年間最大利用可能量約291億kWh/年と公共系等太陽光発電の年間最大利用可能量約378億kWh/年を資源として、どのようにして目標を達成していくかが課題となる。

表5-6 年間電力需要に対する太陽光発電の想定導入目標量と現在の接続量（設備容量基準）

	年間電力消費量 (kWh/年)	想定導入電力量 (2030年目標7% 基準)(kWh/年)	住宅用等最大利 用可能量(kWh/ 年)	公共系等最大利 用可能量(kWh/ 年)	住宅用等および 公共系等最大利 用可能量(kWh/ 年)	認定済み10kW未 満発電量(kWh/ 年)	認定済み10kW以 上発電量合計 (kWh/年)	認定済み総発電 量(kWh/年):再 掲	認定済み総発電 量に占める10kW未 満の発電量の割合(%)	認定済み総発電 量に占める10kW 以上の発電量の 割合(%)
富山県	12,396,000,000	867,720,000	2,200,000,000	4,900,000,000	7,100,000,000	49,488,048	149,948,495	199,436,543	25	75
石川県	8,932,000,000	625,240,000	2,100,000,000	1,200,000,000	3,300,000,000	42,677,214	181,087,173	223,764,386	19	81
福井県	8,506,000,000	595,420,000	1,600,000,000	3,200,000,000	4,800,000,000	40,182,118	103,888,645	144,070,763	28	72
長野県	15,913,000,000	1,113,910,000	5,100,000,000	4,200,000,000	9,300,000,000	286,433,184	601,350,401	887,783,584	32	68
岐阜県	15,976,000,000	1,118,320,000	4,300,000,000	2,600,000,000	6,900,000,000	208,356,155	583,383,097	791,739,252	26	74
静岡県	33,416,000,000	2,339,120,000	7,200,000,000	4,400,000,000	11,600,000,000	415,714,280	873,704,214	1,289,418,494	32	68
愛知県	63,701,000,000	4,459,070,000	2,200,000,000	10,700,000,000	12,900,000,000	649,520,186	1,080,286,406	1,729,806,593	38	62
三重県	21,064,000,000	1,474,480,000	2,200,000,000	4,300,000,000	6,500,000,000	190,314,399	768,694,100	959,008,499	20	80
滋賀県	14,556,000,000	1,018,920,000	2,200,000,000	2,300,000,000	4,500,000,000	156,704,592	376,636,463	533,341,054	29	71
合計	194,460,000,000	13,612,200,000	29,100,000,000	37,800,000,000	66,900,000,000	2,039,390,174	4,718,978,993	6,758,369,167	30	70

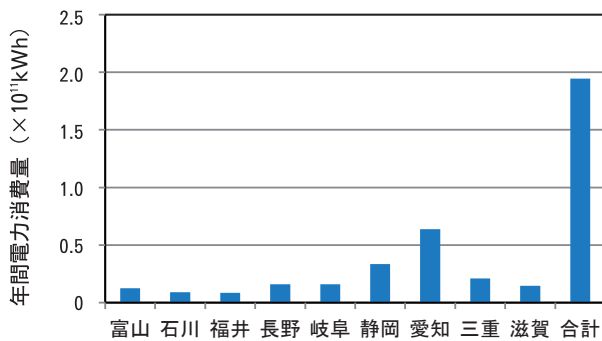


図5-8 年間電力消費量

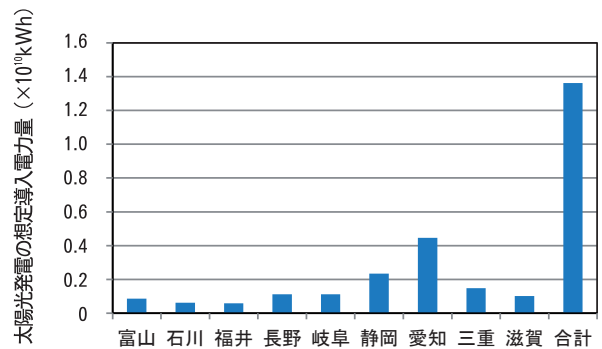


図5-9 太陽光発電の想定導入電力量
(2030年目標7%基準)

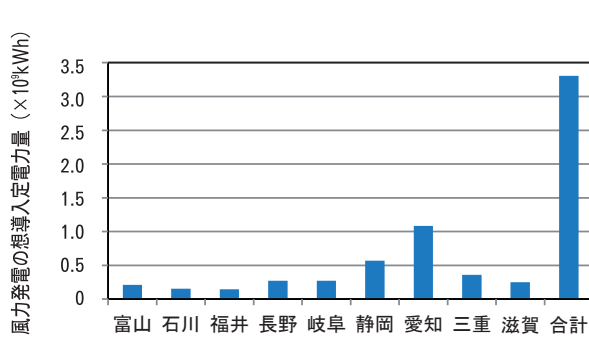


図5-10 風力発電の想定導入電力量
(2030年目標1.7%基準)

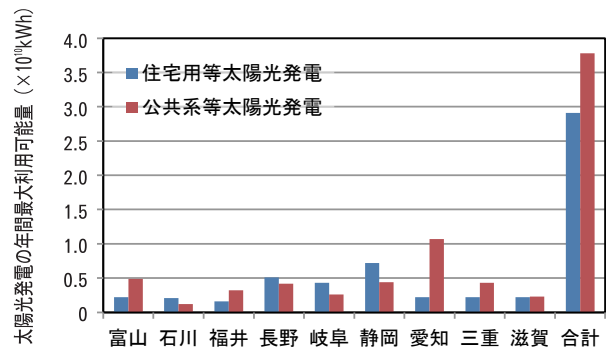


図5-11 太陽光発電の年間最大利用可能量

出典：経済産業省 資源エネルギー庁 都道府県別エネルギー消費統計調査（2013）

(3) 水素混合燃料の利用による再生可能エネルギーの利用促進およびCO₂削減効果の推定
 近年、各電力会社から公表されているように、連系可能量の問題が顕在化してきている。一方、FIT制度における太陽発電調達価格についても、引き下げられる傾向にある(表5-7参照)。このため、住宅用等と公共系等太陽光発電の2030年の目標達成に向けた最終的なシェアは不明であるが、住宅系太陽光発電にもっばら対応すると考えられる、出力10kW未満の接続容量と公共系太陽光発電にもっばら対応すると考えられる、出力10kW以上の接続容量の割合が、2015年11月時点の接続容量の割合30:70(表5-6参照)で推移すると仮定して、表5-8に示す値を用いて試算をおこなうと、表5-9に示す様に、目標達成に向けた住宅用等からの今後の接続電力量は、約21億kWh/年、公共系等太陽光

表5-7 平成28年度調達価格および調達期間

太陽光	10kW以上	太陽光	10kW未満		風力	20kW以上	20kW未満	洋上風力	20kW以上
			出力制御対応機器設置義務なし	出力制御対応機器設置義務あり					
調達価格(税抜)	24円	調達価格	31円	33円	調達価格(税抜)	22円	55円	調達価格(税抜)	36円
調達期間	20年間	調達期間	10年間	10年間	調達期間	20年間	20年間	調達期間	20年間

水力(全て新設設備設置)	1,000kW以上 30,000kW未満	200kW以上 1,000kW未満	200kW未満	水力(既設導水路活用)	1,000kW以上 30,000kW未満	200kW以上 1,000kW未満	200kW未満
調達期間	20年間	20年間	20年間	調達期間	20年間	20年間	20年間

地熱	15,000kW以上	15,000kW未満	バイオマス	メタン発酵ガス化発電	未利用木材燃焼発電		一般木材等燃焼発電	廃棄物燃焼発電	建設資材廃棄物燃焼発電
					2,000kW未満	2,000kW以上			
調達価格(税抜)	26円	40円	調達価格(税抜)	39円	40円	32円	24円	17円	13円
調達期間	15年間	15年間	調達期間	20年間	20年間		20年間	20年間	20年間

出典：平成28年度調達価格及び調達期間についての委員長案一覧

表5-8 推算に用いた値

水電解水素製造装置の電力原単位 出典：水素エネルギーシステムVol.33, No.1 (2008)	4.5kWh/H ₂ -Nm ³
水の電解効率 出典：Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells, IEA	73%
メタネーション反応におけるメタン化効率 出典：Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells, IEA	58%
本調査研究で対象とする13AガスのCO ₂ 排出係数	1.17Nm ³ /Nm ³
メタンの総発熱量	39.9MJ/Nm ³
13Aガスの総発熱量	45MJ/Nm ³

表5-9 余剰太陽光発電電力による水素、メタン、13Aガスの製造量とCO₂削減量

	導入目標達成に必要な住宅用等の今後の導入量(kWh/年)	導入目標達成に必要な公共系等の今後の導入量(kWh/年)	公共系等の未利用電力(kWh/年)	公共系等の未利用電力で製造できる水素量(Nm ³ /年)	公共系等の未利用電力で製造できるメタン量(Nm ³ /年)	公共系等の未利用電力で製造できるメタン等価の13Aガス量(Nm ³ /年)	公共系等の未利用電力の水素化利用で削減できるCO ₂ 量(Nm ³ /年)	公共系等の未利用電力の水素化利用で削減できるCO ₂ 量(t-CO ₂ /年)
富山県	200,485,037	467,798,420	4,432,201,580	719,001,590	104,255,230	92,439,638	108,154,376	212,446
石川県	120,442,684	281,032,930	918,967,070	149,076,880	21,616,148	19,166,318	22,424,592	44,048
福井県	135,404,771	315,944,466	2,884,055,534	467,857,898	67,839,395	60,150,930	70,376,589	138,240
長野県	67,837,925	158,288,491	4,041,711,509	655,655,423	95,070,036	84,295,432	98,625,656	193,729
岐阜県	97,974,224	228,606,523	2,371,393,477	384,692,720	55,780,444	49,458,661	57,866,633	113,667
静岡県	314,910,452	734,791,054	3,665,208,946	594,578,340	86,213,859	76,442,955	89,438,258	175,682
愛知県	818,779,022	1,910,484,385	8,789,515,615	1,425,854,755	206,748,940	183,317,393	214,481,350	421,303
三重県	154,641,450	360,830,051	3,939,169,949	639,020,903	92,658,031	82,156,787	96,123,441	188,814
滋賀県	145,673,684	339,905,262	1,960,094,738	317,970,924	46,105,784	40,880,462	47,830,140	93,952
合計	2,056,149,250	4,797,681,583	33,002,318,417	5,353,709,432	776,287,868	688,308,576	805,321,034	1,581,881

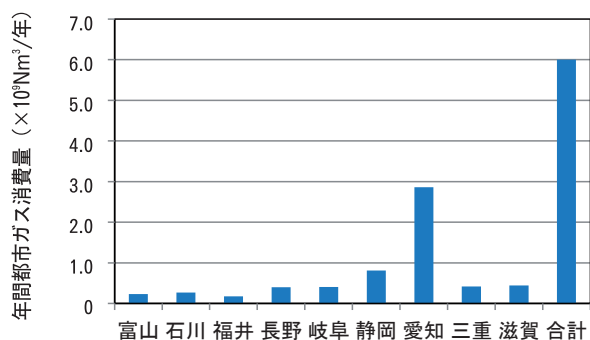


図5-12 年間都市ガス消費量

出典：経済産業省 資源エネルギー庁 都道府県別エネルギー消費統計調査

発電からの今後の接続電力量は、約48億kWh/年となる。この結果、住宅用等太陽光発電の未利用導入ポテンシャルの年間最大利用可能量は、約270億kWh/年、公共系太陽光発電の未利用導入ポテンシャルの年間最大利用可能量は、約330億kWh/年となる。これらの内、公共系太陽光発電の未利用導入ポテンシャルの年間最大利用可能量約330億kWh/年を、水素化して利用する場合、製造可能なExplicit水素は、約54億Nm³/年、Explicit水素とCO₂から合成可能なメタンは、約7.8億Nm³/年となる。このメタン量を都市ガス13Aに熱量等価で換算すると約6.9億Nm³/年となり、中部圏9県の年間都市ガス消費量約60億Nm³/年の約12%に相当する。この結果削減されるCO₂量は、約8.1億Nm³/年、約158万t-CO₂/年と推算される。

第6章 金融メカニズムによるCO₂排出量の削減について

本章では、CO₂の排出量削減を金融メカニズムで扱うための排出量取引および炭素税の考え方をはじめ、排出量取引を中心とする金融メカニズムによるCO₂排出量削減の現状と課題について整理するとともに、今後期待できる効果と展望について述べる。

1. 炭素税および排出権取引とは

企業や産業界の団体などが参加するCOP21の会議で頻繁に登場した言葉の一つが、Carbon Price（炭素価格）であった。以前からCarbon Priceは、気候変動問題への経済学的なアプローチとして専門家の間では使われていたが、2014年のリマ会合の頃から企業のトップマネジメントも使うようになり、日本でも炭素価格が使われる機会が増えている。しかし、炭素価格は、異なる意味で使われていることも少なくないため、改めて整理する。

炭素価格は、政策ツールとしての炭素価格と企業におけるリスクマネジメントツールとしての炭素価格に分けられる。排出量を抑制、削減するための政策手法は多様であるが、排出量総量や排出原単位などの絶対的な規制以外に、排出量に税金を課すことで排出量を減らす方向に誘導する炭素税や、排出総量や排出原単位を規制するが、規制達成のために排出枠のやり取りを認める排出量取引などの経済的手法に分かれる。確実に「減らす」ということであれば、数値による絶対的規制や規制の対象外からのオフセットクレジットの流入を認めず、対象排出量の枠内だけで取引を認める排出量取引が効果的である。他方で、企業の負担軽減も考えつつおこなうということであれば、炭素税さらには排出量取引が優れている。炭素税の場合、価格上昇による削減効果は、上昇幅が相当に大きくなる限り、限定的と考えられており（価格効果）、税収増を如何にCO₂の排出量の削減に使っていくかが重要になる（税収効果）。つまり炭素税は、CO₂排出量の多い設備のコス

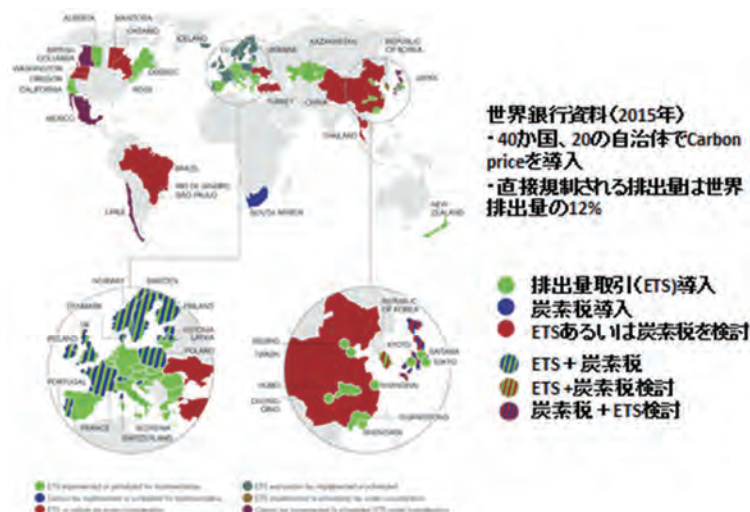


図6-1 Carbon Price（政策）の普及

出典：世界銀行資料から作成

トを課し、得た収入を少ない投資の支援に使うという所得分配の仕組みが基本である。排出量取引でオフセットクレジットを使うことで、コスト上昇を抑えることはできるが、流入した分だけ多く排出出来るということになる。この場合、世界全体で減らすということを目指していると考えられる。

企業にとっては、排出規制が導入されれば対応を取ることが必要になる。排出にかかるコストを政府が示すのが炭素税であり、市場が示すのが排出量取引である。数値規制に対応するためには設備投資やビジネスモデルの変更が必要になるが、そのコストも企業にとっては炭素価格の一つである。COP21で示されたように、炭素排出規制は強化され、炭素価格が上昇すると見込まれる。企業は、炭素価格上昇を前提に投資決定をおこなったり、企業戦略を見直す必要がある。ここで使われる炭素価格は、企業内部の価格であり、internal carbon priceあるいはshadow priceと呼ばれている。企業内で使われる価格ではあるが、一部の企業では公開している。

公開しているのは、「気候変動問題に十分に対応しており、炭素価格が上昇することは経営に織り込み済み」というメッセージを込めているからと考えられる。炭素価格は政策によって左右されるものであり、不確実性が高いため、経営判断や経営指標に使う際には、複数のシナリオ、例えば、高価格シナリオ、低価格シナリ、それに標準シナリオなどを設定しているのが普通である。公表された価格は、経営に対する一種のストレステストとも捉えられ、高い価格が示されていることは不思議なことではない。

気候変動対策は、低炭素型商品には追い風であるが、どのくらい効果があるものか定量化することが企業には必要である。炭素価格の上昇が見込まれるが、いつ頃、どのくらいの価格になるかをシナリオで示せば、投資判断も客観的に出来るし、またイノベーションの目標ともなる。企業内価格としての炭素価格は、排出量取引のように直接商業価値を与

表 6 - 1 Internal Carbon Price (企業内の2030年の想定価格)

企業名	価格 (ドル/トン)
ExxonMobil	80
Conoco Philipps	6-51
Statoil	50
Shell	40
ENI	40
Canadian Oils Sands	11.3
Eon	22.45-44.9
ENEL	12.35
Suez Environment	24-48
Xcel Energy	9-34
EDF, ENGIE, AEP, Duke Energy など	公表せず
Walt Disney	10-20
Societe Generale	11.22

出典：CDP資料から作成

えることにはならないが、低炭素型投資や商品にとっては、間接的なインセンティブと言えなくもないであろう。

2. 経緯と動向

国際取引においては、CDMなどの京都メカニズム、国内制度としては、EU ETSの2つの市場が世界の排出量取引の中心であるが、いずれも需要低迷による低価格が続いている。しかしながら、構造変化も起きている。2009年のコペンハーゲン会合は、新しい枠組み合意を目指しながらも土壇場で合意できなかったが、世界的な気候変動対策強化を見越して、様々な国で排出量取引制度が検討された。その検討が今、独自の排出量取引として動き出そうとしている。

Cap & Trade型の排出量取引（ETS）の中で動きが活発なのは北米と中国である。北米は米国、カナダとも連邦として排出量取引を導入しているわけではないが、州が気候変動政策、特に排出量取引を牽引していることが特徴である。カルフォルニア州が連携の中心であり、カナダのケベック州との市場統合を実現し、ワシントン州、オレゴン州など西部地域の州、ニューヨーク州など9州が参加するRGGI（Regional Greenhouse Gas Initiative）などとの協力を深め、また、カナダのオンタリオ州、マニトバ州とも連携を合意している。ETSの統合にはいくつかの条件が整うことが必要である。第一は、エネルギー構造、産業構造の相違を踏まえた上での気候変動政策の調和である。政策の調和がなければ、炭素価格の乖離が大きくなり、いずれ破たんする。また、他の市場の過不足を吸収するだけの大きさがあるETSが中心になることが、成功の要素となる。北米は電力を含めエネルギー市場の統合が進み、また産業政策でも協調しているなど、政策面のハードルは低く、また、排出量が他をはるかに上回るカルフォルニア州が牽引しており、統合成功の要素が整っている。メキシコやブラジルの自治体とオフセットクレジットの供給について合意しているなど、自治体による国境を越えた協調が先行事例となっており、今後の展開が注目されている。

米連邦環境局（EPA）が進める電力部門の削減政策Clean Power Planは、州毎に排出係数を決め、達成手段は州に任せている、一方で、州を超える排出量取引も可能であり、むしろ従容している。2022年からの完全実施を予定しているが、石炭を多く使う州などを中心に反対意見もあり、裁判にもなっている。このため2016年2月9日に、連邦最高裁が各州の準備を止めるべきとの判断を出し、準備にブレーキがかかった格好となっている。もともと、自治体が先行、連邦が後押しする形へと展開していたものであり、自治体が独自に進めることは、可能と思われるが、どのような影響が出るかフォローが必要であろう。

中国では、2012年以降、北京市、上海市など7つの自治体で排出量取引が始まった。2017年には全国規模に拡大させる計画であり、現在は実験フェーズとされている。中国は高い経済成長を続けてきたが、地域格差が大きく、中国国内の南北問題ともいわれるほどである。排出量取引の導入にあたっては産業の地方分散、所得の再分配の効果も期待され

ている。世界第4位の製鉄会社宝鋼集団の拠点である上海市の宝鋼製鉄所は、コスト削減のため地方移転を求めていたが認められていなかった。上海市での排出量取引の導入に際して、長年の懸案だった移転が認められたなどの事例もある。全国規模に拡大した際に、削減目標をどのように設定するかが注目される。また、中国は、CDMクレジットの最大供給者であり、EUや日本からのCDMクレジット需要が急減した後は、国連気候変動枠組条約事務局の支援を得て、C-CERという中国版CDMを立ち上げている。需要として想定されているのが、国内のETSであり、国内の産業構造転換、地域振興政策のもとで、どのような使われ方をするのか注目したい。

オフセットクレジット創出を目的とした排出量取引で最も進んでいるのは、日本のJCMである。既にインドネシア、ベトナム、タイ、メキシコ、サウジアラビアなど16か国と協力の枠組みを合意している。COP21で合意されたパリ協定でも、両国の合意があれば、二重計上を避けることを前提として、ホスト国での削減量を他国の削減のために活用することが認められており、JCMの環境が一層整ったと評価されている。クレジットの需要とホスト国側に残る削減量の取扱いが課題と考えられる。

気候変動枠組条約が対象としているのは、加盟各国の排出量である。国際航空、国際海運は各国の主権の外にあり、削減のための新しい取り決めは、それぞれ国際民間航空機関(ICAO)、国際海事機関(IMO)が考えることになっている。国際航空においては2020年で排出をピークにすることが合意されており、現在、オフセットの仕組みを検討しているところである。国際航空の輸送量の伸びは今後も続き、航空機の燃費改善だけでは増加を抑えることは出来ないことから、オフセットクレジットを国際航空部門以外の削減活動に求めることにしたものである。2030年までの10年間に、10億トン以上の需要が見込まれ、新しい需要として期待されている。具体的にどのようなクレジットが利用可能かは決まっていないが、JCMや日本の国内クレジットであるJクレジットも認められる可能性もある。また、国際海運は、現時点では燃費改善による削減だけであるが、オフセット取引活用の可能性もないわけではない。

3. 現状と課題

2015年12月の第21回気候変動枠組条約パリ会合で合意されたパリ合意/パリ協定は、気候変動問題への取り組みにおいて歴史的な転機と言われる。第一の理由は、長期目標の合意である。産業革命前に比べて温度上昇を2℃以内に抑える2℃目標が合意され、また努力目標として1.5℃が掲げられた。温度目標が合意されれば、排出可能量も決まる。将来どこかの時点で排出量増加をゼロにする必要があり、「21世紀後半には、人為的な排出量と吸収量をバランスさせる」ことが合意されている。また法的拘束力なしでは、削減目標は守られないのではないか、との議論もなされてきた。削減目標自体はパリ協定に盛り込まれていないが、2℃目標達成のために、5年毎に見直すグローバルストックテイク(棚卸)も行われるなど、実効性を確保する仕組みが合意されている。世界全体の長期目標を

合意し、途上国を含むすべての国がそれぞれに目標を掲げ、また実施状況や目標への到達を分析することを合意したわけであり、これまでにない大きな変化と言える。

しかし、排出量取引を含め詳細なメカニズムは、これからの検討であり、走りながら考え、調整していくことになる。国際排出量取引協会（International Emission Trading Association）が、各国約束草案をもとに調べたところ、排出量取引など市場メカニズム活用を打ち出した国は、86か国に上る。多くの途上国が、市場メカニズムに関心を寄せる背景には、CDMを活用した再生エネルギー事業への投資が数多くみられたことがある。技術移転と資金協力を同時に行う仕組みとして注目されたというわけである。

パリ合意では、国際排出量取引は、2つに分けて取り扱われている。第一は、国連が管理する仕組みであり、これは、引き続き検討することになっている。他方、排出量取引の認知の向上もあり、各国で独自の仕組み作りも行われている。こうした仕組みに基づく排出削減量/クレジットの国際移転に関しては、当事国の合意で可能とされている。日本が進める二国間クレジット制度（Joint Credit Mechanism、JCM）は、各国が独自に進める仕組みの一つであり、今回、合意により、国際的な後押しを受けたと政府は評価している。しかし、二国間の仕組みの場合には「二重計上」（double count）を避けるとの条件が付けられていることに留意が必要である。二重計上の明確な定義はなされておらず、国連管理型の仕組みの議論のフォローも必要である。

排出量取引が活発になったのは、2005年以降である。2005年2月の京都議定書の発効によりCDMクレジットが商業価値を得たこと、また2005年から始まったEU ETSの影響が大きい。排出量取引は、斬新な仕組みであったこともあり、取引が活発になると政策効果についてさまざまな議論がなされた。当時、排出量取引の課題とされていたのは、①価格高騰の可能性、②排出量取引で排出量が本当に減るのか、③排出枠/排出削減目標の設定の恣意性/産業政策、などであった。

2005年以降、価格は上昇を続けたため、EU ETSでは市場介入の仕組みの検討も行われ、ニューヨーク州などのRGGIでは、高騰時は域外からのオフセットクレジットの流入を認める機能も組み込まれた。しかし、金融危機をきっかけとした景気低迷で、価格は長く低迷が続いている。現在は、むしろ価格を引き上げることが重視され、市場介入基金がEU ETSで設けられることになった。また、CMDなど国際的なクレジットについては、日本が2013年以降京都議定書のもとでの削減目標をもたなくなったこと、EUがEU ETS市場の価格低迷対策として、国際オフセットクレジットの利用制限を開始したことなどにより需要が急減、価格が殆どつかない状況になっている。当たり前の話であるが、需要がなければ、価格はつかない。価格の乱高下というよりは、長期的な低迷が、削減投資のインセンティブとしての課題と言われている。

EU ETSは、2005－2007年は、試験的な導入（パイロットフェーズ）であったが、削減効果について批判的な意見が多かった。3年間の試験導入では、削減のための本格的な投資は、限定的あるいは様子見と考えるのが自然ではないかと考えられるが、二手に分かれ

て真剣な議論がなされた。EU ETS対象施設の排出量の推移をみると、パイロットフェーズでは、排出量に大きな影響を与えていないが、その後、2008年、2009年にかけて低下している。これは、金融危機の影響が大きいと思われるが、その後も低下は続いている。ETSだけの効果ではないであろうが、排出量削減に一定程度は貢献したと考えてよさそうである。

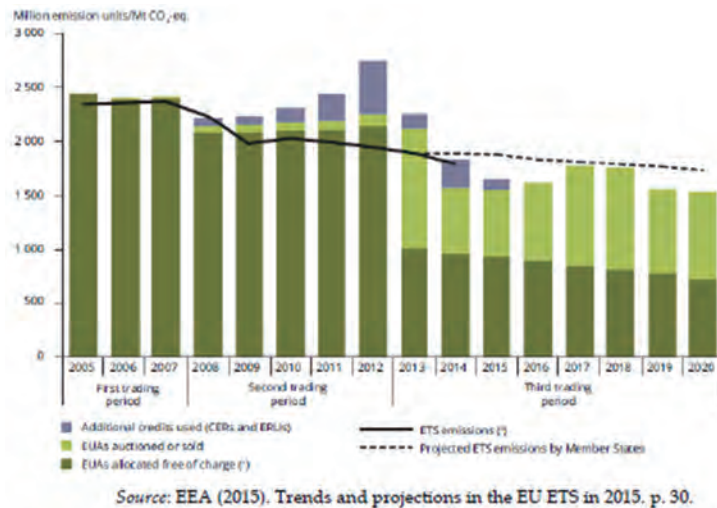


図6-2 EU ETS 対象設備からの排出量推移
出典：CEPS, 2016 State of the EU ETS Market

排出量取引や排出削減目標での大きな課題は、経済的負担を伴うだけに、割当量や目標の設定が争点となることである。EU ETSでは、同業他社に比べ不利ではないか、と企業による訴訟も起きたほどである。また、ブラッセルに本拠地を置くシンクタンク、CEPSの分析では、2008-2012年の第二フェーズにおいて、電炉業界は12%もコストが上昇したが、他方高炉業界では、マイナス9%の負担、つまりむしろ補助金があったことになる。こうしたこともあり、EU ETSでは、過去の排出量から各社への排出枠を決める方式（排出上限量と同量の排出枠を無償で配布）から、無償配布を減らし、不足分を入札で購入する方式に変えている。

このように、改良を加えながら排出量取引は進化し、また、各国に広がりつつある。その中で注目すべき動きは、炭素税との組み合わせである。メキシコが導入を決め、また南アフリカでも案が作られた。これは、炭素税をまず導入し、課税対象となる排出量の一部をオフセットクレジットで減らすことができるとする仕組みである。炭素税のコスト負担のわかりやすさを確保しつつ、コスト削減のための工夫を奨励する仕組みである。排出量取引の歴史はたかだか10数年であり、今後も、エネルギー構造や経済の実情に応じて変化していくものと考えられる。

4. 金融メカニズムによるCO₂削減について

CDMやJCMは途上国での削減を定量化、クレジット化を図るものであり、日本国内で

の削減を対象としたものではない。現在、国内では、Jクレジット制度が運用されている。運営主体は、経済産業省、環境省、農林水産省であり、いわばCDMにおける国連変動枠組条約事務局の役割を日本政府が担っている。これまで、144件、70万トンの削減が認証を受けている。

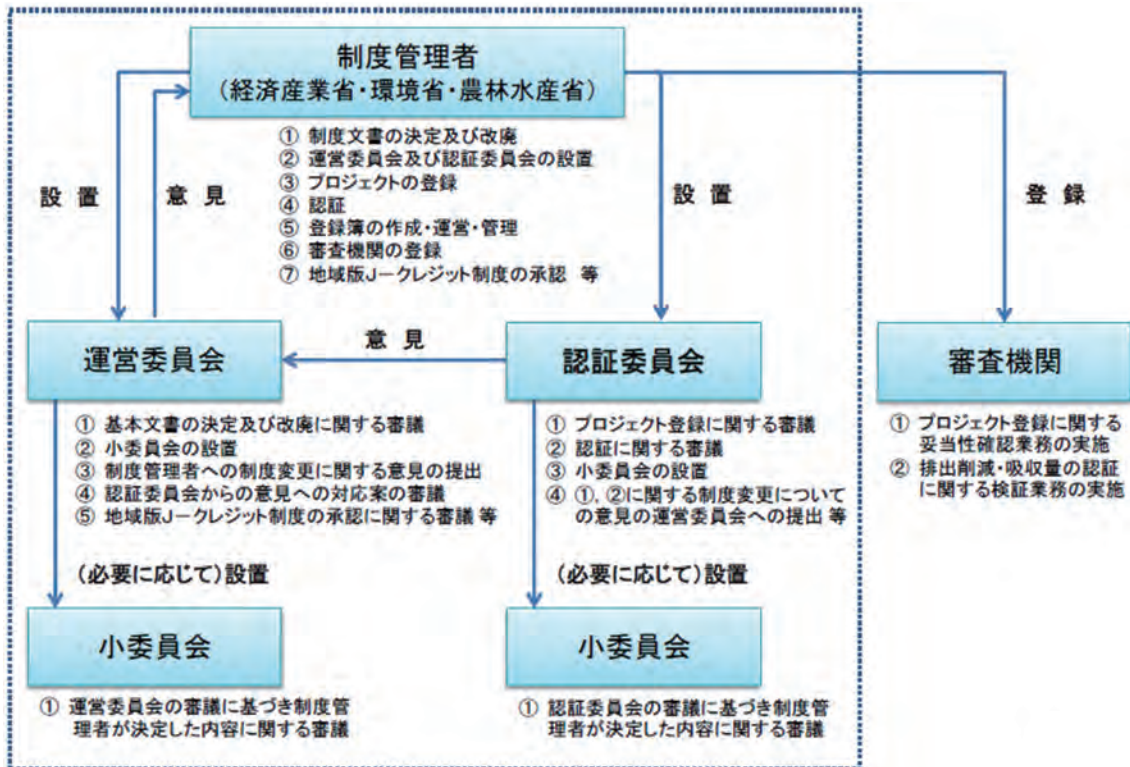


図6-3 運営管理の仕組み
出典：Jクレジット事務局

この制度は、削減量を定量化、クレジット化することが目的であり、需要をこの制度自体で創出しているわけではない。「地球温暖化対策の推進に関する法律（温対法）」の下で、調整後温室効果ガス排出量を報告する際に、JCMなどとともにJクレジットを使うことが認められており、これが、主な需要として想定されている。COP21の決定を受けて、日本の国内対策の整備が進められることになるが、カギとなるのは、電力部門の低炭素化であり、電力の平均排出係数0.37トン/Mwhが、COP21に向けて日本が提出した26%削減目標の前提になっている。排出係数0.37トン/Mwhは、多くの努力が求められる目標であり、補完的な手段としてJクレジットが使われる可能性は高い。日本は、京都議定書における2013年以降の削減目標を提出しておらず、CDMのクレジットに対するアクセスに制限があるために、いわゆる新電力が、CDMのクレジットに変わる仕組みとしてJクレジットの購入に動いていると言われている。

水素活用によるCO₂削減効果が、Jクレジット制度において認められれば、オフセットクレジット需要は少なくないものと思われ、Jクレジットは水素利用の普及に対して、大きなインセンティブになる可能性がある。その際の留意点は以下の通りである。

(1) 二重の削減（ダブルカウント）

温対法などCO₂削減対策の対象事業者/対象設備である場合、水素利用を、CO₂フリーないしCO₂排出の少ないエネルギーとして申請、認められた場合に、その削減効果をJクレジットとして取得すると、削減効果が、同じ制度のもとで二重に使われたことになり、また、日本全体の排出量削減においても重複して計上されることになる。排出量取引のインセンティブとしての利用を考える場合には、水素利用を、温対法の対象施設以外にもとめることが中心になるであろう。

しかし、制度が異なれば、政策的に水素利用の意義を認めて、オフセットクレジット化が可能になることもありうる。例えばクレジットの需要者が、東京都の排出量取引制度の対象者の場合には、温対法との削減との二重計上にならないので、認められる可能性もある。

(2) 方法論 — ライフサイクル

Jクレジットに限らずゼロエミッションエネルギーは、「本当にゼロエミッションなのか」という問題を常に意識しなければならない。製造するプロセスのどこかでCO₂を排出していないか、それはどれほどの量なのか、ということの確認が必要である。特に化石燃料由来の水素の場合は、CCSを同時に行うかは大きな論点となるだろう。国境を超える燃料やCO₂削減の移動の場合には、生産国と消費国での「削減効果」の二重の利用にならないか、ということがポイントになる。例えば化石燃料から水素を製造する際に放出されたCO₂を、生産国で計上するのであれば、世界的には二重計上にはならないだろう。また、バイオマスを原料としたエタノールのような場合には、追加的エネルギー投入はなく、製造プロセスからの化石燃料由来のCO₂排出量はゼロのことが多い。しかし、製造プロセスでのエネルギー消費が多い場合、「エネルギーロスが多い」とされ、環境価値がないのではないかと、という議論も起こる。Sustainable criteriaなどを設けることで、「環境的に問題のないゼロエミッションエネルギー」か否かを判断するアプローチがとられることが多い。

(3) 競合商品

大気汚染対策など、水素には環境改善効果もあるが、排出量取引における商業価値は、CO₂削減効果が基本となる。CO₂排出規制の対象事業者には、①設備投資などによるエネルギー効率改善/排出量の削減、②水素を含むゼロエミッションあるいは低炭素型燃料活用、③オフセットクレジットの活用など複数のオプションがある。水素利用によるCO₂削減が、実際にオフセットクレジットとして利用されるためには、他のオプションとの価格競争があるということにも留意しなければならない。

今後、CO₂削減への取り組みは強化され、企業にとっての「炭素価格」は上昇するものと考えられている。国際エネルギー機関（IEA）が毎年発行するWorld Energy Outlookでは、2030年の日本の炭素価格を、現在検討中の政策が実現される場合（新政策シナリオ）には289円/トン（温暖化対策税）、また、世界が2℃シナリオに向かって

強化される場合には、100ドル/トンと想定している。パリ合意では、5年毎の削減目標見直しが盛り込まれているが、2℃シナリオにシフトするのは難しいと思われ、炭素価格においても、289円/トンと100ドル/トンの間と考えられる。炭素価格が最も高い地域とされるEUの新政策シナリオでは、2020年22ドル/トン、2030年37ドル/トンであり、日本の約束草案が強化されるにしても、EUの価格が一つの目安になると考えられる。

(4) 政策意義 — 持続可能性

水素利用によるCO₂の削減効果を、客観的に評価することは可能であり、何らかの形でその商業価値が評価される。排出量取引に限らず、設備補助金や水素を対象としたFITなどの政策手段があり、また、手厚く支援することが政策的に認められれば、複数の支援手段の併用も可能である。一旦、普及が進めば、コストは急速に低下することが見込まれるので、特に導入の初期段階で政府などによる支援が期待される。

他方で、財政制約は厳しい状況にあり、財政支援には限度がある。長期にわたる支援を期待する際には、長期の炭素価格を想定し、支援が持続的な内容なのかを評価することも必要であろう。

5. 課題解決のための方策と今後の展望

長期的に、ネットゼロエミッション社会実現をめざし、また炭素税や排出量取引などの排出規制は強化されるので、炭素価格は上昇するであろう。いつ頃どのくらいの炭素価格を想定すればよいのかは、投資判断においても長期戦略作りにおいても重要な情報となる。しかしながら、排出量取引が導入されていても、エネルギー構造や経済成長の長期見通しだけでなく、気候変動・エネルギー政策の動向の想定は必要であるし、炭素税は政策そのものである。将来の政策は不確実性の塊であるし、炭素価格を見通すのは難しい。

そこで、一つの参考になるのが、国際エネルギー機関（IEA）の長期見通しである「世界エネルギー報告」（World Energy Outlook）である。World Energy Outlookでは、

表6-2 炭素価格のシナリオ（2030年）

p/	新政策シナリオ	450シナリオ	備考
EU	37	100	オフセットクレジットを使わない前提。
米国	—	100	カルフォルニア州などは排出量取引を導入しており、価格は10ドル/トンを超えている。2030年の価格はEU程度となる可能性もある
日本	—	100	地球温暖化対策税は289円/トン。Jクレジット価格は350-550円/トン。JCMクレジットの価格は不透明。
韓国	37	100	EUとの協調を前提。他方で国際オフセットクレジット制度も検討。新政策シナリオではEUよりは低いとも考えられる。
中国	23	75	2017年より全国規模で排出量取引導入。現在は2.6ドル/トンと自治体毎に価格は異なるが翌は縮小の見込み

出典：国際エネルギー機関World Energy Outlookをもとに作成

気候変動政策に関し、3つのシナリオを用意している。現在取られている政策が継続する現行シナリオ（Current Policyシナリオ）、検討中の政策が導入される場合の新政策シナリオ（New Policyシナリオ）、それから、産業革命前と比較して温度上昇を2℃に抑える450シナリオの3つである。2015年版の新政策シナリオは、COP21に際して各国が提出した約束草案（INDC）に盛り込まれた政策とほぼ同等の政策を導入することを前提にしている。

現在検討されている政策が実施される場合には、地域毎に大きな差があり、最も高いEUで37ドル/トンとなっているが、2℃以内に留めるために、削減政策が強化された場合には、先進国では100ドル/トンになるとのシナリオを国際エネルギー機関は想定している。COP21で明らかになったように、約束草案に盛り込まれた政策だけでは、2℃目標を実現する排出量シナリオから大きくかい離しており、今後、削減政策は強化されるであろう。炭素価格は、新政策シナリオと450シナリオの間のどこか、新政策シナリオに近い価格を、シナリオとして想定するのが適当であろう。

日本でのCap & Trade型の排出量取引の可能性は、現時点では高くはないが、今後何らかの政策手法で排出量規制が強化される可能性は高く、潜在コストとしての炭素価格は上昇するとみるのが妥当であろう。新技術の活用や技術開発投資を検討する際、炭素価格は、経済性評価をする有効な手法の一つとなると考えられる。

参考資料

再生可能エネルギー設備の都道府県別導入容量（移行認定分、平成27年11月末時点の状況（平成28年3月9日更新）

(単位: kW)

	太陽光発電設備					風力発電設備			水力発電設備				地熱発電設備		バイオマス発電設備(バイオマス比率考慮なし)					バイオマス発電設備(バイオマス比率考慮あり)					合計 <small>(バイオマス発電設備については、バイオマス比率を考慮したものを合計)</small>						
	10kW未満	10kW以上				20kW未満	20kW以上	200kW未満	200kW以上 1,000kW未満		1,000kW以上 30,000kW未満	15,000kW 未満	15,000kW 以上	メタン発酵 ガス	未利用木質		一般木質・ 農作物残さ	建設廃材	一般廃棄物・ 木質以外	メタン発酵 ガス	未利用木質		一般木質・ 農作物残さ	建設廃材		一般廃棄物・ 木質以外					
		うち50kW 未満	うち50kW 以上 500kW未満	うち500kW 以上 1,000kW未満	うち1,000kW以上 2,000kW未満				うち2,000kW以上	うち洋上風力					うち特定水力	うち特定水力					うち特定水力	2,000kW未満					2,000kW以上	2,000kW未満	2,000kW以上		
北海道	66,624	9,331	3,560	761	0	0	5,010	1	286,685	0	0	0	400	0	2,300	0	0	0	1,427	0	0	4,700	0	95,770	1,314	0	0	4,700	0	32,302	403,657
青森県	17,410	122	122	0	0	0	0	0	307,180	0	99	0	0	0	1,500	0	0	0	0	0	0	0	0	3,600	0	0	0	0	2,340	328,651	
岩手県	48,507	1,297	997	300	0	0	0	0	67,080	0	60	0	1,540	0	0	0	0	0	280	25	149,000	0	0	4,020	280	25	596	0	2,242	121,627	
宮城県	77,464	2,211	1,270	941	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000	0	0	0	744	0	0	0	48,000	20,200	744	0	0	240	12,388	94,047	
秋田県	12,772	238	188	50	0	0	0	0	131,120	0	6	0	470	0	4,100	0	0	0	0	0	0	990	18,000	8,500	0	0	990	3,750	3,825	157,270	
山形県	23,344	863	403	460	0	0	0	0	44,040	0	196	0	1,960	0	28,900	0	0	0	0	1,567	0	0	0	3,980	0	1,567	0	0	2,189	103,059	
福島県	74,582	4,902	2,060	1,328	0	1,515	0	0	143,760	0	0	0	0	0	9,660	0	0	0	0	0	1,200,000	27,500	261,550	0	0	0	10,800	25,420	9,918	279,042	
茨城県	122,016	10,790	2,117	3,873	0	1,050	3,750	0	81,690	0	235	0	850	0	5,500	0	0	0	0	0	0	21,000	0	536,720	0	0	0	21,000	0	9,421	251,502
栃木県	115,863	6,113	3,032	3,081	0	0	0	0	0	0	475	0	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,000	13,980	0	0	0	18,250	7,501	148,562	
群馬県	111,048	5,631	2,818	2,173	640	0	0	0	340	0	558	0	1,030	0	6,100	0	0	0	0	0	0	0	13,600	12,480	0	0	0	13,600	6,082	144,388	
埼玉県	227,258	8,161	5,320	2,841	0	0	0	0	0	0	75	0	270	0	8,400	0	0	0	0	146	0	0	49,500	25,654	0	146	0	18,810	15,383	278,503	
千葉県	173,904	8,642	3,934	4,709	0	0	0	0	66,960	0	0	0	650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53,650	13,820	0	0	0	47,557	7,162	304,874	
東京都	184,187	7,298	4,687	2,611	0	0	0	0	3,650	0	0	0	300	0	0	0	0	0	0	1,120	0	0	0	234,930	1,120	0	0	0	126,782	323,337	
神奈川県	180,504	5,841	3,654	2,187	0	0	0	0	6,270	0	603	0	570	0	0	0	0	0	0	5,600	0	0	0	4,800	69,323	5,600	0	2,064	39,965	241,417	
新潟県	29,984	3,849	1,140	700	0	2,009	0	0	6,260	0	200	0	1,710	0	31,400	0	0	0	0	0	0	0	10,650	0	0	0	0	0	6,737	80,139	
富山県	29,013	943	882	61	0	0	0	0	3,300	0	88	0	4,260	0	15,600	0	0	0	0	0	0	990	20,000	0	0	0	990	10,800	64,993		
石川県	22,196	793	423	370	0	0	0	0	117,020	0	2	0	1,270	0	0	0	0	0	300	0	0	0	16,900	300	0	0	0	0	9,925	151,506	
福井県	23,728	1,133	553	580	0	0	0	0	20,000	0	0	0	490	0	5,200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,551	
山梨県	57,445	7,976	3,212	2,304	591	1,869	0	0	0	0	620	0	990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,960	0	0	0	0	848	67,879	
長野県	165,015	14,706	8,981	5,725	0	0	0	0	0	0	298	0	1,550	0	12,200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,300	0	0	0	0	195,068	
岐阜県	116,085	8,245	6,452	1,793	0	0	0	0	9,200	0	243	0	0	0	8,900	0	0	0	0	0	4,300	600	11,400	0	0	0	4,300	600	6,068	153,641	
静岡県	225,741	9,892	7,619	2,274	0	0	0	0	117,998	0	220	0	1,370	0	3,300	0	0	0	0	0	0	0	226,100	30,290	0	0	0	93,594	16,944	469,058	
愛知県	346,536	19,334	13,569	4,193	1,573	0	0	0	53,960	0	46	0	0	0	1,000	0	0	0	0	0	0	0	109,250	0	0	0	0	0	71,759	492,635	
三重県	105,006	7,776	5,765	2,011	0	0	0	0	72,000	0	0	0	430	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,040	0	0	0	0	10,903	196,115	
滋賀県	81,326	4,451	2,121	2,330	0	0	0	0	1,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,800	0	0	0	0	0	1,176	88,453	
京都府	66,369	3,761	1,997	1,764	0	0	0	2	4,500	0	137	0	850	0	0	0	0	0	695	0	0	0	0	28,400	695	0	0	0	16,446	92,760	
大阪府	168,153	8,447	4,789	3,658	0	0	0	0	0	0	223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,450	109,910	0	0	0	8,450	65,174	250,447		
兵庫県	191,694	13,592	6,357	7,235	0	0	0	0	43,100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	121,400	73,085	0	0	0	18,554	39,443	306,383		
奈良県	57,789	3,390	1,209	1,661	520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,000	0	0	0	0	0	2,500	63,679	
和歌山県	47,197	2,347	1,482	865	0	0	0	0	74,660	0	0	0	282	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,500	0	0	0	0	0	1,715	126,201	
鳥取県	23,647	1,054	556	498	0	0	0	0	59,100	0	0	0	260	0	2,200	0	0	0	0	0	0	0	4,000	0	0	0	0	0	2,360	88,622	
島根県	37,282	1,560	1,510	50	0	0	0	4	128,250	0	0	0	1,260	0	1,700	0	0	0	0	0	0	0	10,290	0	0	0	0	0	5,400	175,456	
岡山県	132,406	10,712	4,571	3,341	2,800	0	0	0	0	0	37	0	820	0	12,400	0	0	0	0	0	0	1,950	0	14,060	0	0	0	1,950	7,576	165,902	
広島県	154,946	5,186	2,999	2,188	0	0	0	0	0	0	150	0	1,490	0	0	0	0	0	0	0	49,800	5,000	0	293,920	0	219	5,000	0	27,438	194,429	
山口県	83,800	1,960	1,860	100	0	0	0	0	113,450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88,500	308,150	9,080	0	0	0	23,760	47,083	4,483	274,536
徳島県	43,108	1,951	1,591	360	0	0	0	0	19,500	0	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64,658	
香川県	61,254	3,323	1,220	1,103	0	1,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,800	0	0	0	0	1,484	66,061		
愛媛県	75,467	4,744	3,089	1,105	550	0	0	0	67,700	0	115	0	0	0	6,500	0	0	0	0	0	0	0	35,400	0	0	0	0	0	8,496	163,022	
高知県	38,485	3,658	2,410	1,248	0	0	0	0	36,150	0	53	0	300	0	0	0	0	0	0	0	0	122,500	10,890	0	0	0	0	20,205	4,574	103,425	
福岡県	224,186	7,684	5,964	1,720	0	0	0	0	20,851	0	35	0	1,300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110,190	0	0	0	0	0	62,569	316,625	
佐賀県	76,457	2,367	1,709	658	0	0	0	0	42,650	0	106	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,500	0	0	0	0	0	2,340	123,920	
長崎県	85,018	2,339	1,889	450	0	0	0	0	106,070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,000,000	0	0	3,982	0	0	5,200	2,629	201,255	
熊本県	139,414	14,893	5,748	3,703	0	5,442	0	0	30,200	0	190	0	1,757	0	2,000	0	0	0	0	808	0	0	75,000	0	808	0	0	750	0	190,012	
大分県	84,929	4,437	3,089	1,348	0	0	0	0	11,490	0	91	0	520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,000	11,100	0	0	0	12,000	5,216	120,013	
宮崎県	97,837	5,073	1,624	2,449	0	1,000	0	0	0	0	35	0	1,770	0	0	0	0	0	0	0	0	1,300	0	61,350	0	0	0	1,300	0	11,550	117,565
鹿児島県	113,912	4,922	3,615	1,307	0	0	0	0	215,460	0	170	0	1,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,770	0	0	0	0	0	10,115	345,839	
沖縄県	58,811	3,145	2,082	1,063	0	0	0	0	16,235	0	0	0	370	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,300	0	0	0	0	0	7,728	86,289	
合計	4,699,719	261,079	146,233	85,528	6,674	13,884	8,760	7	2,529,379	0	5,463	0	32,709	0	169,860	0	990	0	11,314	3,038	2,198,800	1,327,740	1,115,240	2,347,344	11,201	3,038	6,015	73,800	331,		

再生可能エネルギー設備の都道府県別導入容量（新規認定分、平成27年11月末時点の状況（平成28年3月9日更新））

（単位：kW）

都道府県	太陽光発電設備								風力発電設備			水力発電設備			地熱発電設備		バイオマス発電設備（バイオマス比率考慮なし）						バイオマス発電設備（バイオマス比率考慮あり）						合計 (バイオマス 発電設備に ついては、バ イオマス比 率を考慮した ものを合計)				
	10kW未満		10kW以上						20kW未満	20kW以上		200kW未満	200kW以上 1,000kW未満	1,000kW以上 30,000kW未満	15,000kW 未満	15,000kW 以上	メタン発酵 ガス	未利用木質		一般木質・ 農作物残さ	建設廃材	一般廃棄 物・ 木質以外	メタン発酵 ガス	未利用木質		一般木質・ 農作物残さ	建設廃材	一般廃棄 物・ 木質以外					
	うち自家発 電設備併 設	うち50kW 未満	うち50kW 以上	うち500kW 以上	うち1,000kW未 未満	うち 1,000kW以 上2,000kW未 未満	うち 2,000kW以 上	うち洋上風 力	うち特定水 力	うち特定水 力	うち特定水 力	15,000kW 未満	15,000kW 以上	2,000kW 未満	2,000kW 以上	2,000kW 未満		2,000kW 以上															
			うち500kW 以上 1,000kW未 未満	うち 1,000kW以 上2,000kW未 未満	うち 2,000kW以 上	2,000kW 未満	2,000kW 以上																										
北海道	64,818	658	619,865	85,103	61,531			89,785	199,446	184,000	171	32,800	0	0	0	730	0	43,701	0	0	0	6,069	0	0	0	0	2,970	6,039	0	0	0	0	0
青森県	19,028	384	264,355	39,485	8,834	15,240	71,796	129,000	13	58,980	0	218	0	0	0	0	0	0	0	210	0	0	0	0	7,650	210	0	0	0	0	0	4,284	347,088
岩手県	41,859	727	191,398	50,419	13,075	29,537	70,367	28,000	0	41,9	0	14	0	0	0	15,800	0	0	0	0	0	0	5,800	0	4,100	0	0	0	5,800	0	2,542	257,412	
宮城県	93,283	2,623	340,849	109,694	31,385	37,577	110,763	51,430	6	0	0	234	0	250	0	0	0	0	0	800	0	0	0	0	0	800	0	0	0	0	0	0	435,423
秋田県	11,155	403	74,276	9,732	7,564	8,452	48,527	0	64	91,610	0	0	0	450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	177,554	
山形県	21,767	433	93,527	24,091	8,325	9,242	33,711	18,158	3	1,990	0	435	0	0	0	0	0	0	0	300	0	0	0	0	0	300	0	0	0	0	0	118,021	
福島県	88,842	4,367	499,486	153,599	45,656	54,857	151,304	94,070	0	16,000	0	334	0	1,460	0	13,040	0	0	25	45	5,700	0	0	0	25	45	5,700	0	0	0	0	624,932	
茨城県	135,459	4,921	1,196,191	417,074	121,758	175,859	376,800	104,700	3	21,310	0	0	0	765	0	3,740	0	0	175	0	5,750	23,814	0	3,000	175	0	5,750	23,814	0	1,740	1,388,947		
栃木県	105,623	4,489	911,607	338,565	104,341	107,118	285,505	76,079	0	0	0	385	0	500	0	5,920	0	0	0	1,235	500	0	2,500	265	0	1,970	1,235	0	2,500	265	0	985	1,029,020
群馬県	98,513	3,275	730,173	357,409	117,162	98,531	149,571	7,500	0	0	0	73	0	0	0	0	0	0	0	600	0	0	0	0	0	600	0	0	0	0	0	829,359	
埼玉県	205,800	11,169	530,409	265,632	86,278	58,737	110,462	9,300	0	0	0	326	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,017	0	0	0	0	0	5,919	742,454		
千葉県	155,625	8,603	1,013,933	392,090	79,380	135,184	341,280	66,000	3	0	0	330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,000	0	0	0	0	1,770	1,171,661		
東京都	137,610	17,584	85,274	64,953	9,449	6,260	4,612	0	0	0	7	0	340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34,410	0	0	0	0	0	17,058	240,289		
神奈川県	164,225	15,271	193,620	82,554	24,445	22,165	40,916	23,540	0	0	0	227	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49,000	0	5,900	0	0	0	49,000	0	3,717	410,789		
新潟県	25,103	1,496	150,954	39,162	12,718	25,067	53,007	21,000	68	22,015	0	39	0	350	0	0	0	0	0	660	0	0	0	0	1,370	660	0	0	0	0	822	200,011	
富山県	18,065	497	130,730	39,301	28,800	17,046	39,584	6,000	0	0	0	444	0	1,550	0	1,268	0	0	0	0	0	5,750	0	0	4,600	0	0	5,750	0	2,530	160,337		
石川県	18,403	412	158,223	51,175	26,543	38,069	42,435	0	0	7,480	0	198	0	0	0	0	0	0	125	0	0	0	0	0	125	0	0	0	0	0	184,429		
福井県	14,497	279	90,094	31,177	19,163	12,132	27,623	0	0	0	0	308	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104,898		
山梨県	46,022	1,357	295,447	165,462	27,978	33,796	64,461	3,750	0	0	0	133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	341,602		
長野県	107,468	1,521	513,351	287,051	97,195	50,829	72,776	5,500	0	0	0	668	0	922	0	10,700	0	20	0	680	1,500	0	0	0	0	680	1,500	0	0	0	0	635,308	
岐阜県	82,123	3,597	504,034	280,328	87,907	68,919	66,880	0	0	0	0	443	0	1,060	0	4,400	0	0	0	0	0	6,250	0	0	0	0	0	6,250	0	0	0	598,309	
静岡県	169,726	6,444	757,323	348,362	97,554	80,465	153,469	77,474	0	16,700	0	161	0	893	0	10,953	0	0	0	95	0	0	0	0	82,500	95	0	0	0	21,925	977,776		
愛知県	271,348	19,243	929,284	432,734	151,281	97,367	97,792	150,110	0	12,000	0	7	0	240	0	0	0	0	0	0	0	149,000	0	4,270	0	0	0	7,450	0	2,647	1,222,977		
三重県	76,039	4,533	667,228	234,811	78,930	91,689	182,118	79,680	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	5,800	0	0	4,710	30	0	5,800	0	2,478	751,575			
滋賀県	67,746	6,957	326,280	125,153	70,249	56,267	63,611	11,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,550	0	0	0	0	0	3,550	0	397,601			
京都府	62,563	11,087	192,624	78,034	25,141	23,703	47,645	18,100	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	255,189		
大阪府	155,920	31,330	374,612	144,094	57,100	37,827	91,101	44,490	0	0	0	110	0	0	0	0	0	0	0	250	0	0	0	5,750	29,400	250	0	0	5,750	14,010	550,652		
兵庫県	144,732	21,820	1,009,613	323,189	120,776	134,173	245,404	186,071	0	12,000	0	6	0	0	0	0	0	0	0	857	0	16,530	0	0	508,070	857	0	16,530	0	6,600	1,190,337		
奈良県	50,307	7,847	190,256	87,922	34,013	20,969	35,102	12,250	0	0	0	265	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	240,828		
和歌山県	38,691	3,054	216,038	99,861	29,735	23,982	26,261	36,200	0	20,000	0	162	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	274,891		
鳥取県	18,926	321	119,008	31,434	13,124	21,326	22,124	31,000	0	0	0	487	0	260	0	0	0	0	0	1,110	0	0	5,700	0	1,110	0	0	5,700	0	0	145,511		
島根県	18,787	178	132,356	36,251	12,547	12,809	46,338	24,410	0	0	0	396	0	0	0	0	0	0	0	0	6,250	12,700	0	0	0	6,250	12,700	0	0	0	170,488		
岡山県	83,551	3,108	511,550	276,489	47,742	61,481	109,838	16,000	0	0	0	127	0	290	0	0	0	0	0	0	0	10,000	0	0	0	0	10,000	0	0	0	605,518		
広島県	93,812	2,549	524,510	253,400	62,321	66,075	96,663	46,050	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,800	0	360,760	0	0	5,800	0	7,562	631,683			
山口県	53,756	3,457	354,274	125,785	24,655	39,863	105,571	58,400	0	0	0	86	0	520	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	3,600	25	0	0	1,800	410,461			
徳島県	20,696	902	317,376	137,502	49,377	28,930	72,316	29,250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,420	0	0	0	0	710	338,939			
香川県	37,689	1,941	344,595	136,158	55,160	59,328	75,709	18,240	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	382,374			
愛媛県	52,703	1,955	377,493	131,853	56,155	41,398	76,588	71,500	0	21,600	0	0	0	513	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,600	660	0	0	0	4,488	457,457			
高知県	27,797	782	184,719	57,030	20,250	32,567	74,871	0	0	0	0	150	0	0	0	0	0	0	0	0	12,750	29,500	0	0	0	12,750	8,850	0	0	234,265			
福岡県	172,731	8,120	1,088,533	345,963	89,754	120,750	352,588	179,478	10	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	190	0	0	0	0	190	0	0	0	0	1,261,493			
佐賀県	44,411	793	295,169	142,963	30,243	40,072	70,781	11,110	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	339,647		
長崎県	53,853	1,889	429,933	182,460	29,138	47,637	115,218	55,480	0	1,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	250	0	0	0	2,750	250	0	0	0	1,128	486,809			
熊本県	85,474	1,995	619,070	274,790	38,540	71,119	187,122	47,500	10	0	0	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,280	0	0	0	6,280	0	0	0	0	712,957		
大分県	52,138	1,000	583,232	231,252	25,659	65,993	118,998	141,330	6	0																							

再生可能エネルギー設備の都道府県別導入件数（移行認定分、平成27年11月末時点の状況（平成28年3月9日更新））

（単位：件）

	太陽光発電設備						風力発電設備		水力発電設備				地熱発電設備		バイオマス発電設備						合計				
	10kW未満	10kW以上					20kW未満	20kW以上	200kW未満	200kW以上 1,000kW未満	1,000kW以上 30,000kW未満	15,000kW未 満	15,000kW以 上	メタン発酵ガ ス	未利用木質		一般木質・ 農作物残さ	建設廃材	一般廃棄物・ 木質以外						
		うち50kW未 満	うち50kW以 上500kW未 満	うち500kW以 上1,000kW未 満	うち1,000kW 以上2,000kW 未満	うち2,000kW 以上									うち洋上風力	うち特定水力				うち特定水力		うち特定水力	2,000kW未満	2,000kW以上	
北海道	14,984	269	263	5	0	0	1	1	49	0	0	0	0	1	0	0	0	18	0	0	1	0	8	15,332	
青森県	4,352	9	9	0	0	0	0	0	22	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4,387	
岩手県	12,047	59	56	3	0	0	0	0	4	0	2	0	3	0	0	0	2	1	1	0	0	0	2	12,121	
宮城県	19,541	85	77	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	19,631	
秋田県	3,246	13	12	1	0	0	0	0	20	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3,286		
山形県	6,042	27	24	3	0	0	0	0	11	0	1	0	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	6,093	
福島県	18,658	124	109	14	0	1	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	18,802		
茨城県	32,282	150	119	29	0	1	1	0	14	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	5	32,456		
栃木県	29,172	189	168	21	0	0	0	0	0	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	4	29,372		
群馬県	28,235	169	157	11	1	0	0	0	2	0	9	0	2	0	0	4	0	0	0	0	1	2	28,424		
埼玉県	63,950	332	300	32	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	1	0	0	1	5	64,293	
千葉県	48,011	246	217	29	0	0	0	0	17	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	7	48,286		
東京都	53,014	313	283	30	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	18	53,349	
神奈川県	52,965	242	226	16	0	0	0	0	4	0	7	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	6	53,229	
新潟県	7,829	74	66	6	0	2	0	0	8	0	2	0	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	7,921	
富山県	6,985	56	55	1	0	0	0	0	2	0	1	0	6	0	3	0	0	0	0	0	0	1	1	7,055	
石川県	5,640	27	24	3	0	0	0	0	10	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	5,684	
福井県	5,828	37	32	5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5,868	
山梨県	14,159	189	166	21	1	1	0	0	0	0	6	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	14,360	
長野県	40,095	649	585	64	0	0	0	0	0	0	4	0	4	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	40,756	
岐阜県	28,504	471	455	16	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	3	28,985	
静岡県	56,155	568	541	27	0	0	0	0	17	0	2	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	4	5	56,755	
愛知県	87,390	1,060	1,015	43	2	0	0	0	13	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	11	88,476	
三重県	26,122	417	402	15	0	0	0	0	4	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	26,548	
滋賀県	21,378	139	124	15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	21,519	
京都府	18,256	134	120	14	0	0	0	2	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	3	18,401	
大阪府	49,476	326	291	35	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	7	49,813	
兵庫県	52,422	389	330	59	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	52,828	
奈良県	15,408	76	60	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	15,485	
和歌山県	12,174	86	79	7	0	0	0	0	8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12,270	
鳥取県	5,646	37	30	7	0	0	0	0	8	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	5,695	
島根県	8,490	76	75	1	0	0	0	1	8	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	8,582	
岡山県	32,125	300	262	34	4	0	0	0	0	0	1	0	2	0	5	0	0	0	0	0	1	0	2	32,436	
広島県	38,724	182	166	16	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	5	38,916		
山口県	20,887	101	100	1	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	3	21,004		
徳島県	9,701	94	89	5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,797	
香川県	14,303	73	63	9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	14,377		
愛媛県	18,460	193	179	13	1	0	0	0	6	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	18,664	
高知県	9,022	142	131	11	0	0	0	0	6	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	9,176		
福岡県	55,319	411	391	20	0	0	0	0	3	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	55,743	
佐賀県	17,661	109	104	5	0	0	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	17,778		
長崎県	20,089	112	107	5	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	20,223		
熊本県	32,060	328	290	35	0	3	0	0	6	0	1	0	3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	32,401		
大分県	19,854	153	139	14	0	0	0	0	2	0	1	0	2	0	0	0	1	0	0	0	1	1	2	20,017	
宮崎県	22,867	125	98	26	0	1	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	2	22,999		
鹿児島県	26,988	204	187	17	0	0	0	0	20	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	27,219		
沖縄県	12,714	129	116	13	0	0	0	0	10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	12,857		
合計	1,199,230	9,694	8,892	780	10	10	2	4	326	0	67	0	66	0	47	0	1	0	29	4	3	10	29	159	1,209,669

出典：固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト（環境省）
http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html

再生可能エネルギー設備の都道府県別導入件数（新規認定分、平成27年11月末時点の状況（平成28年3月9日更新））

（単位：件）

	太陽光発電設備							風力発電設備			水力発電設備				地熱発電設備		バイオマス発電設備						合計					
	10kW未満		10kW以上					20kW未満	20kW以上		200kW未満		200kW以上 1,000kW未満		1,000kW以上 30,000kW未満		15,000kW未満	15,000kW以上	メタン発酵ガス	未利用木質		一般木質・ 農作物残さ		建設廃材	一般廃棄物・ 木質以外			
	うち自家発電 設備併設	うち50kW未 満	うち50kW以 上500kW未 満	うち500kW以 上1,000kW未 満	うち1,000kW 以上2,000kW 未満	うち2,000kW 以上	うち洋上風力		うち特定水力	うち特定水力	うち特定水力	15,000kW未 満	15,000kW以 上	2,000kW未満	2,000kW以上													
北海道	13,141	144	3,789	3,300	206	118	149	16	16	2	0	0	0	2	0	3	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	2	16,981
青森県	4,202	111	1,571	1,468	32	21	47	3	1	7	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	5,787
岩手県	9,225	192	2,357	2,213	57	38	47	2	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	11,587
宮城県	21,679	664	5,122	4,852	137	54	75	4	1	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	26,808
秋田県	2,444	111	500	429	29	11	31	0	4	15	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,964
山形県	4,665	113	1,098	1,027	32	14	24	1	1	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5,770
福島県	19,765	1,121	6,699	6,319	195	84	93	8	0	1	0	3	0	2	0	2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	26,475
茨城県	30,602	1,318	15,111	14,139	474	247	242	9	1	2	0	0	0	1	0	2	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	45,723
栃木県	23,468	1,158	13,045	12,256	439	156	187	7	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	0	6	0	1	1	0	0	1	36,526	
群馬県	22,179	852	13,758	13,009	506	147	95	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	35,941
埼玉県	50,128	3,099	13,471	12,929	378	88	74	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	63,606
千葉県	37,634	2,365	14,776	14,029	327	193	222	5	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	52,414
東京都	35,195	5,135	4,230	4,173	45	9	3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	39,431
神奈川県	41,943	4,425	5,160	4,976	123	30	28	3	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	47,109
新潟県	5,532	415	1,842	1,710	59	35	36	2	4	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	7,387
富山県	4,134	133	1,983	1,793	133	28	28	1	0	0	0	6	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	6,129
石川県	4,153	106	2,183	1,989	111	56	27	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6,339
福井県	3,116	78	1,422	1,300	84	19	19	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,541
山梨県	9,709	335	6,522	6,302	130	47	42	1	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,237
長野県	23,194	382	13,491	12,909	457	73	51	1	0	0	0	10	0	2	0	1	0	1	0	3	1	0	0	0	0	0	0	36,703
岐阜県	17,688	893	13,153	12,597	410	98	48	0	0	0	0	8	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	30,853
静岡県	37,843	1,668	17,623	16,922	473	116	104	8	0	1	0	3	0	1	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	55,477
愛知県	61,216	5,046	23,555	22,654	680	144	69	8	0	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	84,778
三重県	16,788	1,189	10,698	10,117	319	134	119	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	27,490	
滋賀県	15,390	1,838	6,148	5,704	314	84	44	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	21,541
京都府	15,500	3,198	3,813	3,624	114	37	34	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19,315
大阪府	38,787	8,668	8,240	7,840	285	53	57	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3	47,033	
兵庫県	34,342	5,982	15,038	14,150	495	200	174	19	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	3	49,389	
奈良県	11,741	2,102	4,144	3,921	166	32	23	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,888
和歌山県	8,569	799	4,608	4,408	141	38	19	2	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,181
鳥取県	4,028	86	1,541	1,444	49	30	16	2	0	0	0	4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5,577
島根県	3,859	42	1,873	1,770	52	17	31	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	5,736
岡山県	17,715	828	13,406	13,048	192	89	75	2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	31,125
広島県	20,644	693	11,273	10,826	278	98	67	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	31,920	
山口県	11,857	966	5,812	5,568	106	58	72	8	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	17,674
徳島県	4,223	236	5,123	4,822	203	45	50	3	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9,351
香川県	7,934	502	6,135	5,767	233	86	47	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	14,071
愛媛県	11,351	526	6,152	5,787	244	63	54	4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	17,507
高知県	5,747	198	2,799	2,623	82	47	47	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	8,550
福岡県	37,299	2,128	15,282	14,495	384	167	221	15	2	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	52,588
佐賀県	8,784	206	5,786	5,535	142	57	51	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,572
長崎県	10,657	457	6,939	6,663	126	69	74	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	17,600
熊本県	17,010	491	11,303	10,916	162	97	124	4	1	0	0	4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	28,321
大分県	10,703	256	7,873	7,587	108	92	80	6	1	0	0	4	0	0	0	0	0	12	0	1	0	2	0	0	0	1	18,597	
宮崎県	11,788	66	8,316	7,868	202	155	90	1	0	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	2	0	3	2	0	0	1	20,117	
鹿児島県	14,123	172	10,439	9,870	192	197	174	6	3	4	0	2	0	3	0	1	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	24,578
沖縄県	4,643	2	8,331	8,255	60	3	11	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,975
合計	826,337	61,495	363,533	345,903	10,166	3,774	3,495	195	39	44	0	115	0	27	0	17	0	18	0	60	3	19	11	2	37	1,190,262		

出典：固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト（環境省）

http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html

再生可能エネルギー設備の都道府県別認定容量（新規認定分、平成27年11月末時点の状況（平成28年3月9日更新））

(単位:kW)

	太陽光発電設備								風力発電設備				水力発電設備					地熱発電設備		バイオマス発電設備(バイオマス比率考慮なし)								バイオマス発電設備(バイオマス比率考慮あり)						合計 <small>(バイオマス発電設備については、バイオマス比率を考慮したものを合計)</small>						
	10kW未満		10kW以上						20kW未満		20kW以上		200kW未満		200kW以上 1,000kW未満		1,000kW以上 30,000kW未満	15,000kW 未満	15,000kW 以上	メタン発酵 ガス		未利用木質		一般木質・ 農作物残さ		建設廃材		一般廃棄物・ 木質以外		メタン発酵 ガス		未利用木質			一般木質・ 農作物残さ		建設廃材		一般廃棄物・ 木質以外	
	うち自家発 電設備併 設		うち50kW未 満	うち50kW 以上 500kW未 満	うち500kW 以上 1,000kW未 満	うち 1,000kW以 上 2,000kW 未満	うち 2,000kW以 上		うち洋上風 力		うち特定水 力		うち特定水 力		うち特定水 力						2,000kW 未満	2,000kW 以上							2,000kW 未満	2,000kW 以上										
北海道	84,481	887	2,652,443	579,765	144,011	158,537	523,906	1,246,225	408	205,600	0	207	0	1,979	0	66,665	0	100	0	10,310	1,200	170,950	49,900	88,000	3,255	10,280	1,200	79,070	24,950	1,760	1,966	3,131,109								
青森県	22,094	430	1,669,378	182,497	18,212	29,196	202,153	1,237,320	203	628,353	7,470	218	0	640	640	0	0	0	0	1,180	0	6,250	62,000	0	95,950	1,180	0	6,250	38,547	0	92,584	2,459,447								
岩手県	48,714	804	2,422,213	262,048	26,492	57,551	265,636	1,810,486	3	34,283	0	338	0	285	0	17,700	0	7,499	0	0	0	12,500	19,800	0	10,560	0	0	12,500	19,800	0	9,002	2,572,337								
宮城県	109,047	3,260	3,441,460	465,509	56,537	88,724	502,124	2,328,566	13	9,470	0	595	0	250	0	0	0	49	1,780	0	49	1,780	0	149,000	0	5,190	49	1,780	0	25,372	0	2,595	3,590,630							
秋田県	12,607	447	322,860	44,228	12,800	21,494	126,035	118,303	312	486,767	0	54	0	2,897	740	29,277	0	250	42,000	740	0	0	70,500	0	1,670	740	0	0	63,000	0	935	961,699								
山形県	25,367	526	682,481	58,261	12,283	13,952	67,313	530,673	31	48,400	0	963	0	1,218	0	16,000	0	0	0	2,298	1,000	2,500	106,250	0	0	2,298	1,000	2,500	102,750	0	0	883,008								
福島県	105,920	5,138	4,465,200	705,296	86,757	115,024	532,376	3,025,748	42	25,400	0	742	0	1,460	0	31,140	0	400	0	25	45	8,700	112,000	0	0	25	45	8,700	35,840	0	0	4,674,914								
茨城県	158,150	5,753	4,405,207	1,663,013	256,600	348,184	949,376	1,188,034	146	21,310	0	180	0	2,579	1,161	3,740	0	0	0	375	0	5,750	2,298,318	0	5,000	375	0	5,750	271,278	0	3,740	4,872,455								
栃木県	119,686	5,176	3,612,587	1,152,700	186,524	225,290	736,878	1,311,195	0	0	0	601	0	2,006	746	18,633	0	0	0	2,325	480	2,500	24,865	0	3,270	2,325	480	2,500	24,865	0	1,713	3,785,395								
群馬県	112,788	3,746	2,508,314	1,245,766	245,951	186,335	432,387	397,875	10	0	0	438	0	236	0	20,047	3,000	0	0	2,345	0	3,334	0	0	625	2,345	0	3,334	0	0	620	2,648,132								
埼玉県	234,179	12,843	553,690	134,924	553,690	134,924	96,483	227,421	110,000	0	200	0	398	0	0	7,900	0	0	0	0	0	0	0	24,647	0	0	0	0	0	0	12,746	1,377,940								
千葉県	183,851	10,059	3,275,780	1,319,569	182,387	248,854	744,896	780,075	237	7,960	0	330	0	0	0	0	0	0	300	0	0	49,900	0	11,800	300	0	0	49,900	0	6,170	3,524,528									
東京都	157,908	19,945	182,184	117,400	12,554	8,890	17,340	26,000	0	0	0	7	0	340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77,310	0	0	0	0	0	39,256	379,695								
神奈川県	187,814	17,484	435,550	200,734	33,433	29,530	62,163	109,690	50	0	0	425	0	926	0	4,460	4,460	0	0	0	0	0	164,700	0	5,900	0	0	0	144,023	0	3,717	776,966								
新潟県	29,402	1,679	495,562	87,561	24,773	30,345	84,128	268,755	274	32,095	0	546	0	3,327	990	40,950	21,400	0	0	760	0	19,000	1,600	0	1,370	760	0	19,000	1,600	0	822	624,337								
富山県	20,703	547	228,257	73,222	36,457	26,637	66,698	25,243	0	1,990	0	1,063	0	4,901	0	1,268	0	0	0	0	0	5,750	0	0	4,600	0	0	5,750	0	2,530	266,462									
石川県	21,975	469	570,084	96,743	33,047	51,616	131,608	257,070	0	54,365	0	487	0	580	0	0	0	0	125	0	3,298	0	0	0	125	0	3,298	0	0	0	0	650,914								
福井県	17,173	323	254,217	152,828	24,293	17,851	59,245	0	0	22,380	0	706	0	900	0	0	0	0	0	0	0	7,270	37,000	0	0	0	0	7,270	29,600	0	0	332,245								
山梨県	54,605	1,505	1,291,460	938,505	44,556	52,524	123,254	132,620	0	0	0	574	0	0	0	62,297	11,995	0	0	0	0	10,000	14,500	0	9,400	0	0	10,000	14,500	0	5,550	1,438,986								
長野県	125,905	1,817	1,656,013	732,466	155,369	95,825	197,196	475,157	60	0	0	1,732	0	2,472	0	99,054	0	20	0	770	3,760	14,500	0	0	2,050	770	3,760	14,500	0	1,025	1,905,311									
岐阜県	97,961	4,240	1,442,921	681,680	160,201	110,921	208,890	281,230	0	0	0	1,379	0	6,710	886	53,069	0	1,998	0	685	0	6,250	0	0	685	0	6,250	0	0	0	0	1,610,972								
静岡県	196,637	7,475	2,273,291	931,478	167,892	130,243	326,293	717,386	319	48,870	0	888	0	3,903	0	22,994	3,541	0	0	1,158	0	12,000	45,200	0	82,500	1,158	0	12,000	45,200	0	21,925	2,627,183								
愛知県	319,400	22,105	1,687,248	804,294	230,345	139,603	187,786	325,220	12	20,500	0	7	0	1,120	0	0	0	0	1,194	180	0	499,800	0	4,270	1,194	180	0	245,650	2,647	2,277,958										
三重県	91,720	5,259	2,366,233	639,553	149,345	173,554	402,883	1,000,898	20	130,000	0	183	0	338	0	0	0	0	180	0	5,800	26,800	0	13,710	180	0	5,800	26,800	0	7,158	2,628,431									
滋賀県	79,414	8,096	743,742	312,764	103,539	82,503	148,068	96,870	20	0	0	245	0	900	0	0	0	0	0	0	0	0	3,550	990	0	0	0	0	3,550	495	828,366									
京都府	74,581	12,722	546,824	200,904	37,436	41,523	103,261	163,700	1	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	621,417								
大阪府	180,546	35,590	651,610	266,028	71,013	48,632	143,047	122,890	37	0	0	110	0	0	0	0	0	0	4,740	0	0	19,900	5,750	48,100	4,740	0	0	19,900	5,750	23,360	886,053									
兵庫県	170,762	25,351	2,508,704	841,721	195,389	215,312	444,216	812,067	0	12,000	0	221	0	276	0	0	0	0	857	0	22,130	22,100	0	526,120	857	0	22,130	22,100	0	15,625	2,752,675									
奈良県	58,265	8,883	546,170	193,157	46,168	39,627	82,858	184,360	38	0	0	347	0	2,637	0	0	0	0	0	0	6,500	0	0	0	0	0	6,500	0	0	0	0	613,957								
和歌山県	45,001	3,522	990,083	306,567	46,672	35,725	61,005	540,114	10	56,000	0	356	0	0	0	0	0	0	0	0	0	209,520	0	1,950	0	0	0	209,520	0	975	1,301,945									
鳥取県	21,570	392	349,401	84,978	19,239	31,634	56,800	156,750	59	0	0	1,699	0	260	0	0	0	20	0	1,110	0	0	74,780	0	1,110	0	0	74,613	0	0	448,732									
島根県	21,973	221	315,501	69,536	22,564	25,528	91,198	106,675	307	48,430	0	1,038	0	250	0	8,371	0	0	0	0	0	6,250	12,700	0	0	0	6,250	12,700	0	0	0	414,820								
岡山県	97,906	3,644	2,436,052	832,310	76,785	111,179	226,016	1,189,762	19	51,300	0	134	0	1,730	540	0	0	0	0	0	0	10,000	0	0	2,360	0	0	10,000	0	1,180	2,598,322									
広島県	107,453	3,068	1,306,791	584,640	99,800	106,338	182,051	333,962	0	0	0	2,170	0	830	0	1,998	0	0	0	0	0	9,850	11,200	0	360,760	0	0	9,850	11,200	0	7,562	1,447,854								
山口県	61,981	3,959	1,325,152	373,717	47,216	66,344	226,304	611,570	20	0	0	216	0	830	0	0	0	0	0	74	0	0	50,000	0	7,200	74	0	40,000	0	3,600	1,431,872									
徳島県																																								

再生可能エネルギー設備の都道府県別導入件数（新規認定分、平成27年11月末時点の状況（平成28年3月9日更新））

(単位：件)

	太陽光発電設備							風力発電設備			水力発電設備					地熱発電設備		バイオマス発電設備					合計				
	10kW未満		10kW以上					20kW未満	20kW以上		200kW未満		200kW以上 1,000kW未満		1,000kW以上 30,000kW未満	15,000kW未 満	15,000kW以 上	メタン発酵ガ ス	未利用木質		一般木質・ 農作物残さ	建設廃材		一般廃棄物・ 木質以外			
		うち自家発電 設備併設	うち50kW未 満	うち50kW以 上500kW未 満	うち500kW以 上1,000kW未 満	うち1,000kW 以上2,000kW 未満	うち2,000kW 以上		うち洋上風力		うち特定水力		うち特定水力		うち特定水力				2,000kW未満	2,000kW以上							
北海道	16,190	189	15,983	14,914	426	210	349	84	30	9	0	2	0	5	0	9	0	1	0	50	1	7	1	1	3	32,292	
青森県	4,786	123	5,136	4,863	63	41	124	45	14	49	1	4	0	1	1	0	0	0	0	3	0	1	2	0	2	9,998	
岩手県	10,599	211	7,576	7,175	98	81	166	56	1	4	0	5	0	1	0	3	0	1	0	0	0	2	2	0	2	18,196	
宮城県	25,078	803	13,733	12,978	222	133	312	88	3	2	0	25	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	2	38,848	
秋田県	2,704	123	1,497	1,326	50	30	82	9	20	69	0	2	0	4	1	5	0	1	1	1	0	0	2	0	1	4,307	
山形県	5,340	133	2,008	1,883	45	22	47	11	3	9	0	9	0	2	0	2	0	0	0	2	1	1	3	0	0	7,380	
福島県	23,088	1,292	22,247	21,258	339	179	327	144	4	2	0	6	0	2	0	4	0	1	0	1	1	2	1	0	0	45,359	
茨城県	35,241	1,529	47,186	45,019	973	511	618	65	9	2	0	2	0	4	2	2	0	0	2	0	2	1	10	0	2	82,461	
栃木県	26,409	1,322	33,803	32,178	748	333	468	76	0	0	0	6	0	4	1	4	0	0	0	8	1	1	3	0	2	60,241	
群馬県	25,188	971	36,466	34,882	1,005	282	278	19	1	0	0	7	0	1	0	4	1	0	0	4	0	1	0	0	2	61,674	
埼玉県	56,731	3,548	23,170	22,285	586	143	149	7	0	1	0	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	79,914
千葉県	43,980	2,743	39,854	38,254	718	358	476	48	18	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	83,862	
東京都	39,999	5,820	6,935	6,849	60	13	11	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	46,942
神奈川県	47,461	5,016	9,685	9,428	165	41	42	9	3	0	0	6	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	3	0	1	57,162	
新潟県	6,392	465	3,280	3,047	122	44	56	11	19	7	0	5	0	4	1	7	2	0	0	4	0	7	3	1	0	1	9,723
富山県	4,681	145	3,077	2,821	162	43	46	5	0	1	0	10	0	10	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	7,782	
石川県	4,930	120	3,542	3,233	137	77	84	11	0	8	0	3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	8,486	
福井県	3,631	91	4,173	3,999	106	29	39	0	0	3	0	5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	7,816	
山梨県	11,383	367	24,637	24,262	208	77	79	11	0	0	0	10	0	0	0	4	1	0	0	0	0	1	1	0	2	36,038	
長野県	26,925	446	26,228	25,218	710	142	135	23	4	0	0	18	0	4	0	8	0	1	0	4	3	1	0	0	1	53,197	
岐阜県	20,944	1,039	25,186	24,166	697	166	141	16	0	0	0	19	0	10	1	6	0	1	0	2	0	6	1	0	0	0	46,169
静岡県	43,481	1,923	34,390	33,189	753	195	214	39	19	3	0	10	0	5	0	7	1	0	0	5	0	2	2	0	2	77,926	
愛知県	71,301	5,724	38,185	36,826	997	209	132	21	1	4	0	2	0	2	0	0	0	0	0	3	1	0	6	0	1	109,506	
三重県	20,060	1,384	22,634	21,480	572	262	264	56	1	4	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	2	0	3	42,709	
滋賀県	17,950	2,123	11,687	10,999	454	125	99	10	1	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	29,645	
京都府	18,312	3,646	7,446	7,140	156	61	75	14	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,761	
大阪府	44,607	9,828	13,270	12,748	352	70	90	10	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	6	0	0	1	1	1	5	57,893	
兵庫県	40,316	6,937	30,371	28,891	774	323	307	76	0	1	0	3	0	1	0	0	0	0	0	3	0	2	1	0	5	70,703	
奈良県	13,517	2,370	7,409	7,063	221	60	55	10	2	0	0	4	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	20,936	
和歌山県	9,904	922	10,231	9,891	208	57	44	31	1	4	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	20,146	
鳥取県	4,556	105	2,966	2,796	76	44	40	10	3	0	0	12	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	4	0	0	7,544	
島根県	4,459	53	3,054	2,864	86	36	59	9	21	1	0	6	0	1	0	4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	7,548	
岡山県	20,585	957	29,582	28,920	302	161	150	49	1	1	0	3	0	4	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	50,178	
広島県	23,547	823	20,857	20,094	457	157	127	22	0	0	0	14	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	2	44,426	
山口県	13,527	1,098	13,468	12,993	188	96	154	37	1	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	2	27,006	
徳島県	5,252	277	10,597	10,083	347	87	77	3	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	15,856	
香川県	9,430	577	11,259	10,647	373	123	109	7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	20,692	
愛媛県	13,354	627	11,000	10,447	340	98	106	9	0	4	0	2	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	1	24,366	
高知県	6,606	235	5,773	5,487	123	61	91	11	0	2	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	12,389	
福岡県	44,313	2,447	30,167	28,952	546	240	393	36	16	3	0	6	0	2	1	0	0	0	4	0	0	4	0	4	0	2	74,517
佐賀県	10,769	247	11,735	11,347	212	83	87	6	3	2	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	22,517	
長崎県	12,950	572	15,886	15,418	187	108	159	14	0	5	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	28,845	
熊本県	20,749	586	28,167	27,338	280	173	325	51	1	2	1	6	0	1	1	15	0	4	0	0	0	1	1	0	1	48,948	
大分県	13,235	307	26,167	25,464	186	180	286	51	39	2	0	6	0	1	1	1	0	31	0	1	0	3	2	0	1	39,489	
宮崎県	14,400	74	37,537	36,559	359	292	284	43	19	3	0	5	0	4	0	2	0	0	2	1	3	2	0	1	1	51,979	
鹿児島県	17,481	226	40,862	39,483	368	371	581	59	39	5	0	3	0	7	0	2	0	7	0	2	0	2	1	0	1	58,412	
沖縄県	5,760	6	16,193	15,986	159	16	28	4	11	1	0	2	0	1	0	1	1	0	0	3	0	0	0	0	0	21,972	
合計	962,101	70,570	846,295	813,143	16,716	6,643	8,365	1,428	312	217	3	263	0	101	11	94	7	50	1	122	11	47	69	3	70	1,809,756	

出典：固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト（環境省）

http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html

おわりに

人為的要因により排出されるCO₂が、地球温暖化を引き起こしていることが知られるようになってから40年ほどが経過した。この間、地球の平均気温は上昇を続け、CO₂排出量の削減は正に、人類共通の喫緊の課題となっている。本調査研究をおこなった2015年は、大気中の平均CO₂濃度が400ppmを超えた年となり、パリで開催されたCOP21では、CO₂排出量の削減に向けた国際的な枠組みが整うなど歴史的転換の年となった。

本報告書では、従来我が国ではあまり注目されていなかったが、将来有効であると考えられる水素燃料の利用と金融メカニズムによるCO₂排出量の削減方法について、調査研究をおこなった結果をとりまとめた。現在我が国では、供給から利用にいたるまで、純水素燃料による水素社会の構築が掲げられているが、安全性とコストに関する課題が山積しており、社会実装への道のりは険しい。特に、純水素供給のためのインフラ整備と化石燃料を利用する既存の機器のスイッチングを実践することは容易でない。水素社会は、発想の異なるアプローチを含む多様な形態により、はじめて実現可能であると考えられる。その1つの候補に、水素混合燃料の利用がある。欧州と米国では、国中に張り巡らされた天然ガスパイプラインネットワークを利用して、余剰再生可能エネルギーによる電力で製造した水素を、天然ガスに混合して供給する、先導的なアプローチが実証段階にあり、再生可能エネルギーの利用推進手段として期待されている。我が国は、長期エネルギー需給見通しにおいて、2030年の電源に占める再生可能エネルギーの導入目標を22-24%としている。この値は、現在のドイツや米国カリフォルニア州の導入割合と同程度であり、10~20年後に、現在のドイツや米国カリフォルニア州が直面している問題と同じ問題を抱えている可能性がある。PtGにより製造した水素混合燃料を供給・利用する欧米のアプローチは、国情は異なるが、解決策として大いに参考になると考える。そこで、中部圏9県を対象として、太陽光発電による余剰電力を想定し、水素混合燃料を製造・利用した場合のCO₂排出量の削減効果を推算し、ボトルネックとなる基幹技術の性能向上やコスト削減などの技術的課題を明確化した。水素混合燃料の概念は、既存の供給インフラをほとんど変えることなく、その機能を高度化するものであるため、社会受容性は高いと考えられるが、社会実装にあたっては、欧米での先行事例でみられるように、ステークスホルダーとの調和のもと、徐々に進めていく必要があると考える。

金融メカニズムによるCO₂排出量削減へのアプローチは、グローバルな経済活動の中で、CO₂を排出している生産活動の現場と、CO₂の排出に間接的に加担している製品の利用者側をつなぎ、CO₂排出量の削減に向けた新しい駆動力を生む機能を持つ。言い換えると、国境を越えて、それぞれの強みを持ち寄り、人類共通の問題であるCO₂排出量の削減に取り組むアプローチとも言える。金融メカニズムを実効のあるCO₂排出量削減の手段とするためには、現場での技術革新が不可欠であるが、本報告書で述べた水素混合燃料の利用は、その1つでもある。

本報告書で取り上げたCO₂削減に向けた2つのアプローチが、今後、より現実的な方法として認識され、我が国のCO₂排出量の削減と再生可能エネルギーの利用を促進すると同時に、中部圏ひいては、我が国の産業の活性化に資する展開をみせることを期待してやまない。

2016年4月

公益財団法人 中部圏社会経済研究所

参考文献

第1章 CO₂削減のための再生可能エネルギーと水素利用の現状と課題

- 表1-1: 環境省HP (http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg3_overview_presentation.pdf)。
- STOP THE 温暖化2015 緩和と適応へのアプローチ (2015), 環境省。
- 図1-1: 経済産業省資源エネルギー庁HP (http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf)。
- 図1-2: 環境省HP (http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2014_kakuho.pdf)。
- 図1-3: 燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ) HP (http://fccj.jp/pdf/22_csj.pdf)。
- 一般財団法人自動車検査登録情報協会HP (<http://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html>)。
- 図1-4: 経済産業省HP (<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf>)。
- 表1-2: 一般社団法人エンジニアリング振興協会HP (<https://www.ena.or.jp/WE-NE/T/phs/butsu.html>)。
- エネルギー白書2015 (2015), 経済産業省編。
- 水素エネルギー白書 (2015), 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構編, 日刊工業新聞社。

第2章 パイプラインで水素を供給・利用するエネルギーモデルについて

1. パイプラインによる水素供給に関する歴史と動向

- 図1-1: 都市ガス工業概要 (消費機器編), 一般社団法人日本ガス協会, 29頁。
- 経済産業省HP (http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004482/h2203_05_t01.pdf)。
- 水素供給・利用技術研究組合HP (<http://hysut.or.jp/business/2011/02/>)。
- 図2-2: 経済産業省HP (http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/005_02_00.pdf)。
- 表2-1: 山地憲治 (2008) 「水素エネルギー社会」 エネルギー・資源学会, 152頁。
- 図2-3: 山地憲治 (2008) 「水素エネルギー社会」 エネルギー・資源学会, 155頁。
- 図2-4: 山地憲治 (2008) 「水素エネルギー社会」 エネルギー・資源学会, 158頁。
- 世界水素インフラプロジェクト総覧 (2013), 日経BPクリーンテック研究所。
- 大橋一彦 (2004) 第2回 欧米最新水素エネルギー研究開発調査報告 (その3 - オランダGasunieのNatural-Hyプロジェクト) クリーンエネルギー3, 日本工業出版株式会社, 55-61頁。
- 大橋一彦 (2007) 連載: 天然ガス・パイプライン利用によるCO₂, H₂, バイオガスの

輸送 第1回NaturalHyプロジェクトの概要, 配管技術, 日本工業出版株式会社, 10, 659, Vol.49, No.12, 72-78頁。

- Marc Melaina, Michael Penev, Darlene Steward, Olga Antonia, Brian Bush, Brent Daniel, Donna Heimiller, and Jenny Melius (2012) Hydrogen Infrastructure Cost Estimates & Blending Hydrogen into Natural Gas Pipelines, DOE Hydrogen and Fuel Cell Technological Advisory Committee.
- VERDEXCHANGE HP (<https://www.verdexchange.org/news/minter-socialgas-champions-innovative-p2g-technologies>).

2. オランダとドイツにおけるPtGへの取り組みについて

- 図2-5: Theodora HP (http://www.theodora.com/pipelines/europe_oil_gas_and_products_pipelines.html).
- 図2-6: College of Europe HP (https://www.coleurope.eu/content/studyprogrammes/eco/conferences/Files/Papers/Florisson_The_NATURALHY_Project.pdf).
- Rolinda Huizing et al. The NATURALHY-project: Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst (https://www.coleurope.eu/content/studyprogrammes/eco/conferences/Files/Papers/Florisson_The_NATURALHY_Project.pdf).
- Onno Florisson (2015) GET HYREADY! - Get prepared for hydrogen added to natural gas, OIL & GAS, DNV-GL.
- 写真2-1: Onno Florisson (2015) Naturalhy Project, OIL & GAS, DNV-GL (プレゼンテーション資料).
- 図2-7: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) (2014) Power-to-Gas (PtG) in transport Status quo and perspectives for development, P.5.
- 図2-8: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) (2014) Power-to-Gas (PtG) in transport Status quo and perspectives for development, P.8.
- Henning H. M. and Palzer A. (2015) THE ROLL OF POWER-TO-GAS IN ACHIEVING GERMANY'S CLIMATE POLICY TARGETS WITH A SPECIAL FOCUS ON CONCEPTS FOR ROAD BASED MOBILITY, Fraunhofer Institute for Solar Systems ISE.
- 図2-9: Erneuerbare Energien HP. (<http://www.erneuerbareenergien.de/experten-kritisieren-laenderoeffnungsklausel-neue-mindestabstaende-einheitslig-abgelehnt/150/434/79014/>).
- 田口理恵 (2015) なぜドイツではエネルギーシフトが進むのか, 株式会社学術出版社。

- 図 2-10: NATURAL GAS INFORMATION (2012), VI.29, IEA.
- 図 2-11: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) (2014) Power-to-Gas(PtG) in transport Status quo and perspectives for development, P.28.
- 図 2-12: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) (2014) Power-to-Gas(PtG) in transport Status quo and perspectives for development, P.81.
- Hydrogenics POWER-TO-GAS SOLUTION (<http://www.hydrogenics.com/docs/default-source/pdf/2-2-1-power-to-gas-4pg-brochure-2012.pdf?sfvrsn=2>).
- Hydrogenics Hydrogenics Selected References (<http://www.hydrogenics.com/docs/default-source/pdf/renewable-projects-references---grid-balancing-and-ptg.pdf?sfvrsn=0>).
- ETOGAS (2015) Company presentation (http://etogas.com/fileadmin/documents/2015Q2r1_ETOGAS_company_presentation.pdf).

3. 米国におけるPtGへの取り組みについて

- 図 2-13: Melaina, M. W., Antonia, O. and Penev, M. (2013) Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, NREL/TP-5600-51995, March, P.4.
- 図 2-14: Melaina, M. W., Antonia, O. and Penev, M. (2013) Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, NREL/TP-5600-51995, March, P.9.
- 図 2-15: Melaina, M. W., Antonia, O. and Penev, M. (2013) Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, NREL/TP-5600-51995, March, P.10.
- 図 2-16: Melaina, M. W., Antonia, O. and Penev, M. (2013) Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, NREL/TP-5600-51995, March, P.22.
- 図 2-17: Melaina, M. W., Antonia, O. and Penev, M. (2013) Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, NREL/TP-5600-51995, March, P.17.
- 図 2-18: Melaina, M. W., Antonia, O. and Penev, M. (2013) Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, NREL/TP-5600-51995, March, P.17.
- Brouwer, J. (2015) Overview and Research Snippets, Advanced Power & Energy Program and National Fuel Cell Research Center, University of California

Irvine (プレゼンテーション資料).

第3章 水素混合燃料技術による水素の供給・利用について

2. 太陽光発電の余剰電力のガス化による利用促進について

- FIT・再生可能エネルギー発電関連システム・サービス市場参入企業実態調査2015 (2015), 株式会社富士経済研究所東京マーケティング本第三部。
- 平成25年度再生可能エネルギー導入拡大に向けた系統整備等調査事業委託業務報告書 (平成25年度環境省委託業務) (2015), 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社。
- 中部電力HP 系統容量マッピング (<https://www.chuden.co.jp/business/etc/free/rule/map/index.html>)。

4. 水素混合燃料技術の実装に向けた課題

- 表3-1: Technology Roadmap (2015), Hydrogen and Fuel Cells, IEA, P.28.
- 図3-10: Technology Roadmap (2015), Hydrogen and Fuel Cells, IEA, P.21.

第4章 水素混合燃料の燃焼に関する特徴と適用上の制約について

1. 検討の対象とする天然ガスと水素について

- 表4-1: 都市ガス工業概要 (製造編), 一般社団法人日本ガス協会, 7頁。
- 表4-3: 都市ガス工業概要 (消費機器編), 一般社団法人日本ガス協会, 9頁。

2. Explicit水素と13Aガスを混合した燃料の燃焼特性について

- 図4-2: 名古屋大学工学研究科航空宇宙工学専攻 勝間田剛 平成23年度修士論文 (指導教官吉川典彦教授)。
- 表4-4: 都市ガス工業概要 (消費機器編), 一般社団法人日本ガス協会, 27頁。
- 宮崎信 (2005) “熱” 能く、LNG市場を制す, 石油・天然ガスレビュー, Vol.39, No.5。
- 東京瓦斯株式会社 (2002) 都市ガス供給方法及び装置 (公開特許)。
- 日本海ガス株式会社 (2008) 水素混合都市ガスとその製造方法並びに都市ガス供給 (公開特許)。

第5章 中部圏における水素混合燃料技術の適用性について

1. 中部圏9県の再生可能エネルギーの導入ポテンシャルと分布について

- 表5-1: NEDO再生可能エネルギー技術白書 (第2版) (2014) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 森北出版株式会社。
- 表5-2: 平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーンニング基礎情報整備報告書 (環境省) (<http://www.env.go.jp/earth/report/h25-03/full.pdf>)。

- 図5-1：平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書（環境省）（<http://www.env.go.jp/earth/report/h25-03/full.pdf>）。
- 図5-2：平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書（環境省）（<http://www.env.go.jp/earth/report/h25-03/full.pdf>）。
- 図5-3：平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書（環境省）（<http://www.env.go.jp/earth/report/h25-03/full.pdf>）。
- 表5-4：平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書（環境省）（<http://www.env.go.jp/earth/report/h25-03/full.pdf>）。
- 表5-4：平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書（環境省）（<http://www.env.go.jp/earth/report/h25-03/full.pdf>）。
- 天然ガスパイプラインのすすめ（2011），一般社団法人日本エネルギー学会天然ガス部会輸送・貯蔵分科会編，株式会社日刊工業出版。

2. 太陽光発電電力の水素混合燃料としての利用について

- 図5-4：環境省HP（https://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep/index4_1.html）。
- 図5-5：環境省HP（https://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep/index4_1.html）。
- 図5-6：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/gas/pdf/2014kanto.pdf）。
- 図5-6：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/gas/pdf/2014chubu_hokuriku.pdf）。
- 図5-6：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/gas/pdf/2014kinki.pdf）。
- 表5-5：経済産業省HP（http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/pdf/003_04_00.pdf）。
- 表5-5：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html）。
- 表5-6：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/results.html#headline1）。
- 図5-8：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/results.html#headline1）。
- 図5-9：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/results.html#headline1）。
- 図5-10：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/results.html#headline1）。
- 図5-11：経済産業省資源エネルギー庁HP（http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/results.html#headline1）。

- 表 5 - 7 : 経済産業省HP (http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/022_04_00.pdf#search='%E5%B9%B3%E6%88%90%EF%BC%92%EF%BC%98%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E8%AA%BF%E9%81%94%E4%BE%A1%E6%A0%BC+%E5%A7%94%E5%93%A1%E9%95%B7')。
- 表 5 - 8 : 水素エネルギーシステム (2008) 一般社団法人水素エネルギー協会 Vol. 33, No.1.
- 表 5 - 8 : Technology Roadmap (2015), Hydrogen and Fuel Cells, IEA, P.21.
- 図 5 - 12 : 経済産業省資源エネルギー庁HP (http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/results.html#headline1)。
- ガス事業便覧平成26年度版 (2015) 一般社団法人日本ガス協会。

「CO₂排出量削減への新しいアプローチについて」
～水素混合燃料技術の展開と金融メカニズムの活用～
(ハイブリッド水素供給に関する調査研究報告書)

2016年4月

制作発行 公益財団法人 中部圏社会経済研究所
(担当：企画調査部 梅田 良人)

〒460-0008 名古屋市中区栄 2-1-1 日土地名古屋ビル 15 階
TEL：(052) 221-6421 FAX：(052) 231-2370
URL：<http://www.criser.jp/>

本調査研究報告書の著作権は、当財団に帰属します。
無断で複写・転載することとはご遠慮ください。