

水素エネルギー社会の実現と 再生可能エネルギー由来水素の展望

第19回 福岡県地域エネルギー政策研究会

2016年11月14日

日本エネルギー経済研究所

柴田 善朗

- 最近の動向
- 水素利活用の意義と課題
- 電力系統安定化対策としての水素利活用
- 電解水素製造の経済性
- まとめ

最近の動向

水素をめぐる最近の政策動向

経産省

- 【産業技術・環境】
- ・長期的な視点

エネ庁

- 【水素・FCロードマップ】
- ・2014年作成
- ・2016年改訂

NEDO

- 【技術実証】
- ・水素供給チェーン
- ・エネルギーキャリア
- ・Power to Gas

内閣府SIP

- エネルギーキャリア
- (アンモニア、液水、有機ハイドライド)

JST

国交省

- ・液水国際海上輸送(IMO標準策定)
- ・下水からの水素製造

環境省

- ・地域再エネ由来水素

地方自治体

- 【ロードマップ】
- ・地域特性
- ・地域資源

燃料電池関連市場動向の国際比較

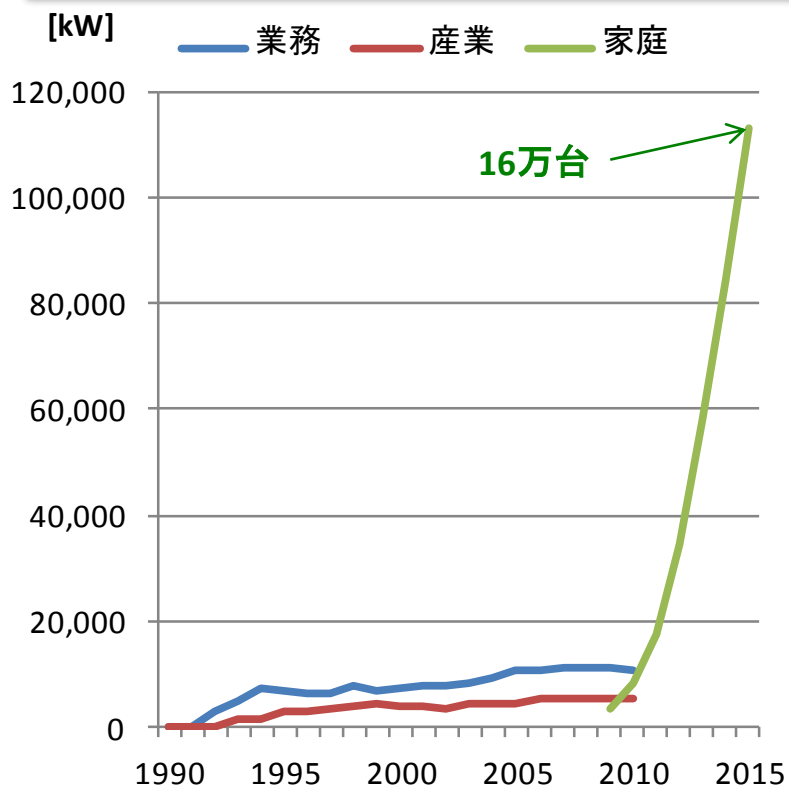
		日本	米国	欧州	韓国
定置用	家庭用	16万台	—	実証レベル560台	実証レベル1,700台
	業務・産業用	1.6万kW (2010年時点)	40万kW (Fuel Cell EnergyのMCFC, BloomenergyのSOFC)	—	50万kW (2014年時点) (POSCOのMCFC等)
燃料電池自動車		2014～2016年商業生産開始済み(主要自動車メーカー)			
水素ステーション		約90ヶ所 (計画中を含む) (2016年6月時点)	加州で5ヶ所 45ヶ所が開所決定済み 当面68ヶ所を目標 2020年100か所	ドイツで19ヶ所 2016年50ヶ所 2018年100ヶ所 2023年までに400ヶ所	12ヶ所 2015年43ヶ所 2020年168ヶ所 2030年500ヶ所
水素発電		—	—	イタリアENEL:12MW	—
その他のFC		・バス等で実証	・フォークリフト 約4,000台 ・バス等で実証	・フォークリフト 2015年までに10,000台 ・バス等で実証	・バス等で実証
水素源		・当面は副生水素 ・将来は輸入水素	・主に天然ガス ・33%を再生可能エネルギー(加州)	・主に天然ガス ・再生可能エネルギー余剰対策	・当面は副生水素 ・再生可能エネルギーが望ましい
支援策		補助金等	・ステーション運営にも補助 ・High Occupancy Vehicle Lane	コジェネ逆潮	FC発電買取
総論		・エネルギーセキュリティー改善	・強い自家発ニーズ ・ZEVとしての取組み	・分散型電源・コジェネ ・燃費・CO ₂ 排出規制対応	・需要サイド対策、分散型に注力 ・民間の海外展開

水素利活用の意義と課題

定置用燃料電池の市場動向

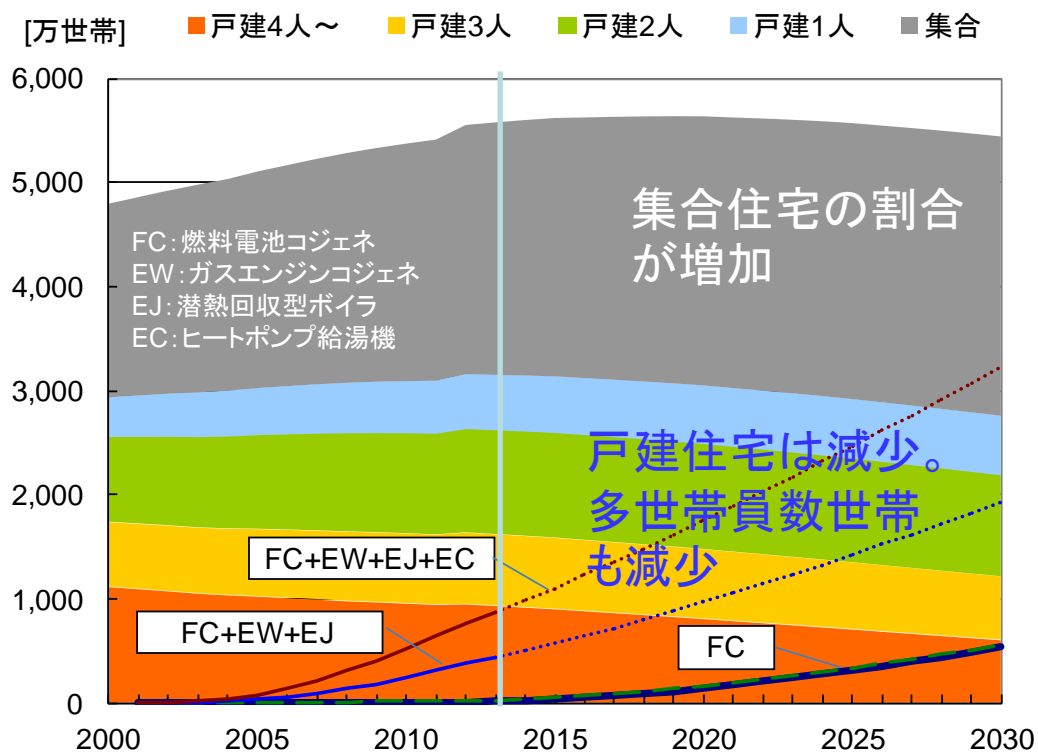
- 家庭用は堅調だが、目標(2030年530万台)達成には30万台/年以上の導入が必要(2015年度は4万台)。ただし、高効率給湯器市場規模減少&競合機器が多種。
- 発電効率の上昇に伴い、貯湯タンクを小型化し、既存ボイラの活用によって導入可能対象市場を拡大するという方策も。

我が国の累積導入量



出所: コージェネレーション・エネルギー高度利用センター資料等から推計

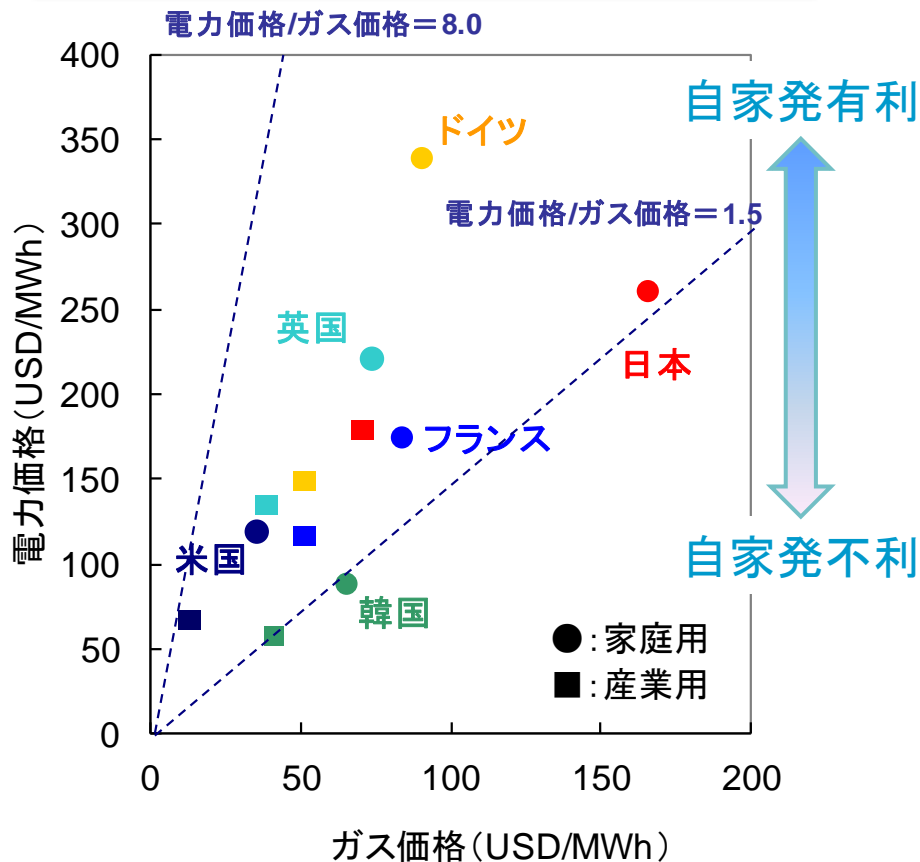
家庭用高効率給湯器の普及と世帯数



技術開発・普及戦略(FC-CHP)

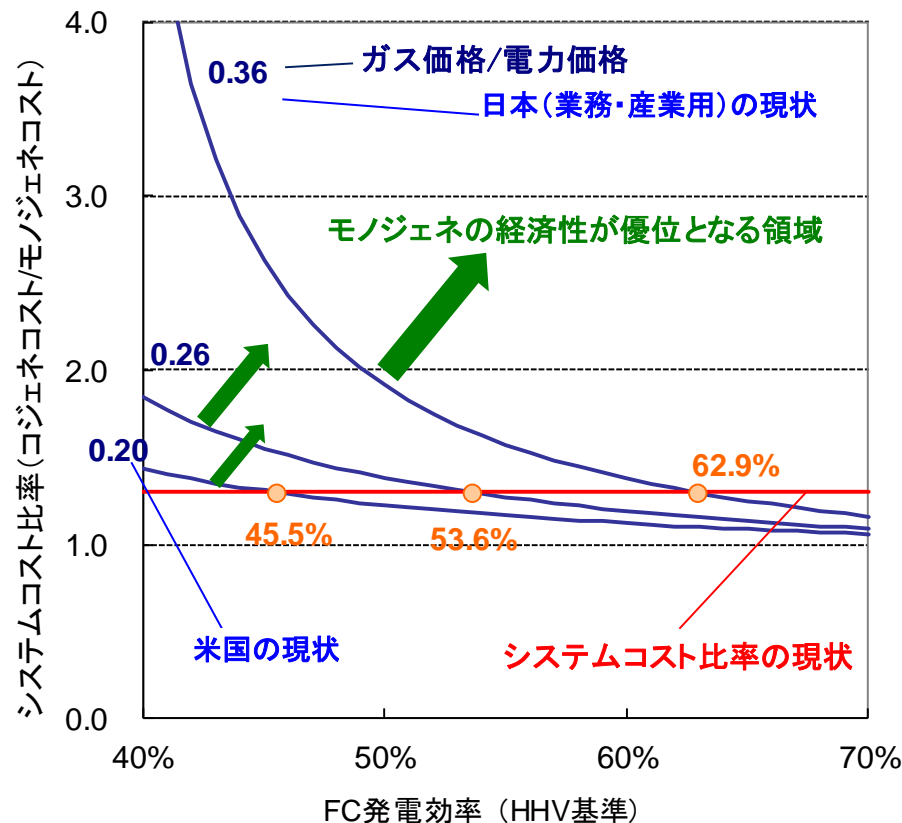
■ 電力価格/ガス価格によって、技術開発の方向性は異なる。

電力価格と都市ガス価格の比較 "Spark Spread"



出所: 価格はIEA "Energy Prices and Taxes"から。

コジェネかモノジェネか

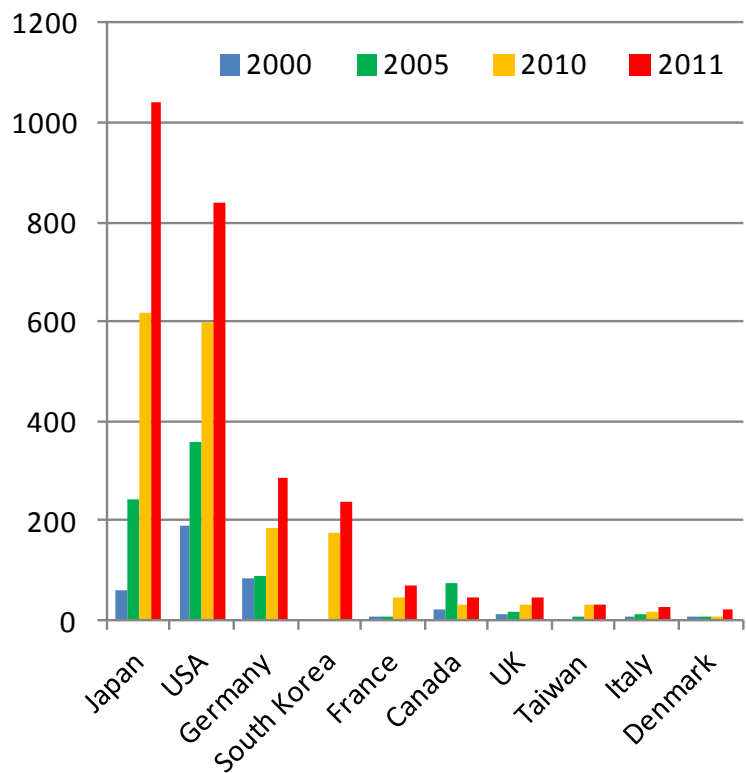


注: システムコスト比率の現状はNEDOロードマップよりPEFCの費用構造から推計。
注: 日本のエネルギー価格は"エネルギー・経済統計要覧"、
米国は"Energy Prices and Taxes, IEA"から。

産業振興: 高い技術力が市場を獲得できるか

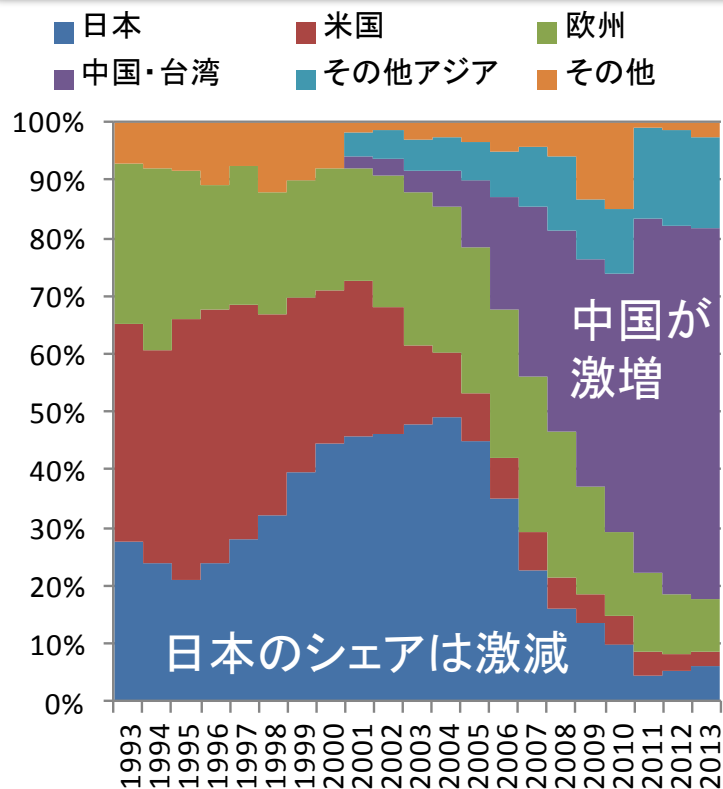
- 燃料電池関連特許数: 2010年に日本が米国を抜いて世界1位に
- 現在の日本の技術優位性確保のためには、技術開発のみならず、国/地域に応じた製品設計・営業戦略が重要。

燃料電池関連特許数の国際比較



出所: "The 2011 Fuel Cell Patent Review", "The 2012 Fuel Cell Patent Review", FuelCellToday

PVモジュール生産量の国別シェア

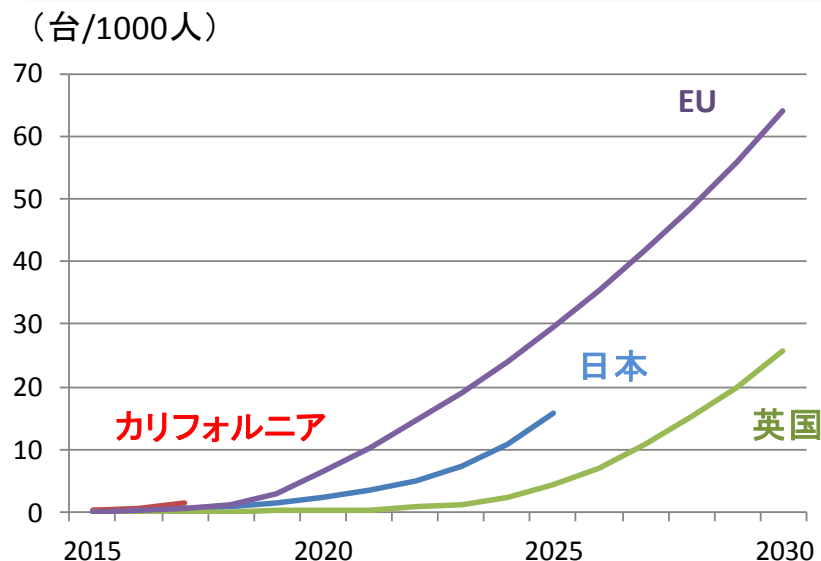


出所: PV-Newsから推計

水素ステーション整備の方向性

- 欧州では従来車よりFCVの方が1台あたりのステーションの数が
多い想定
- 初期は小型ステーション展開、その後は中型・大型にシフトという
策も

FCV導入見通しの比較



出所: 日本は燃料電池実用化推進協議会、カリフォルニアはCaFCP、英国はUK H2 Mobility Phase 1 result、EUはHyWaysから推計。
注: 人口は2011年値。EUはフィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、イタリア、オランダ、ノルウェー、ポーランド、スペイン、英国の10ヶ国

自動車とステーションの数

		日本	英国	ドイツ	フランス	EU	米国
従来車	給油所数	37,743	8,480	14,373	12,000	—	156,065
	自動車台数 (1000台)	75,455	35,632	52,458	38,066	—	244,778
	1か所あたり 台数 (台/箇所)	1,999	4,202	3,650	3,172	—	1,568
FCV	1か所あたり 台数	2,000 (2025年)	1,391 (2030年)			1,250 (2030年)	

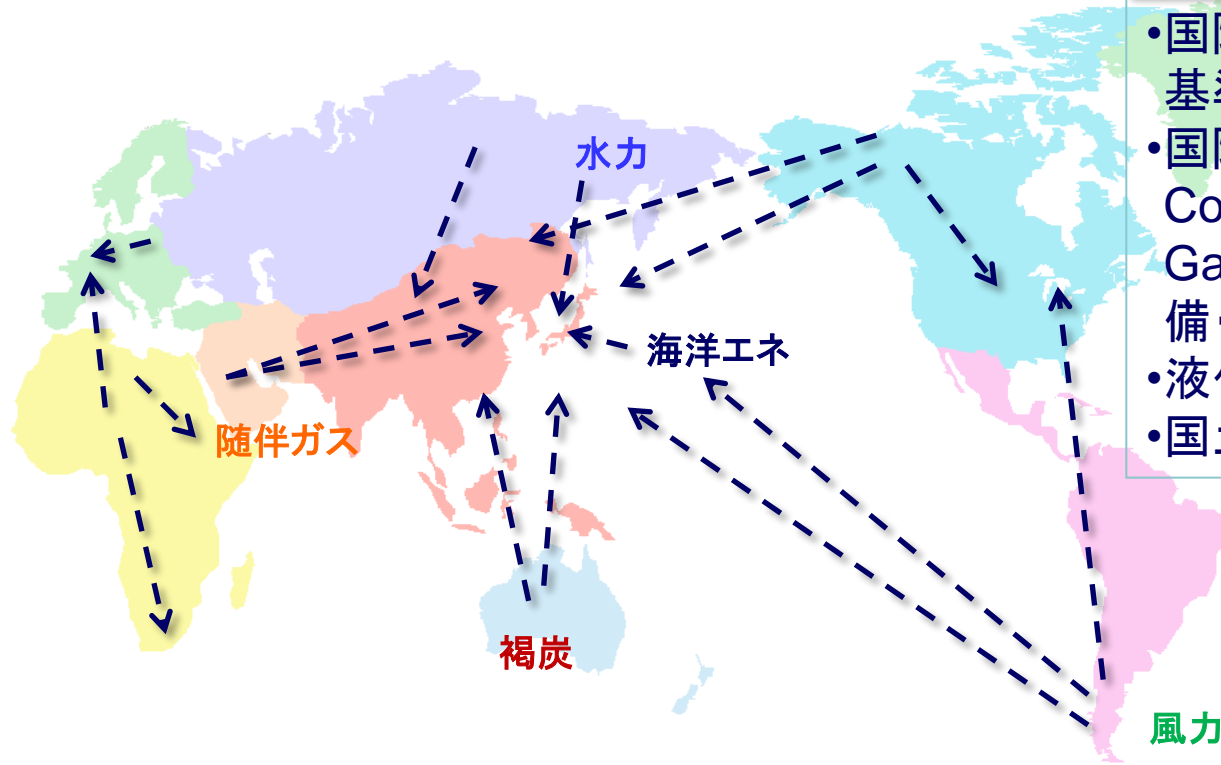
出所: 給油所数(2011年)はJX日鉱日石 石油便覧、自動車台数(2011年)は世界自動車統計年報から

どのような水素ネットワークか

- 液化水素、メチルシクロヘキサン、アンモニア
- 距離(近海・遠海)や用途によって、棲み分けか競合か
- 世界的なネットワークは可能か
- 仕組み作りが必要

液化水素関連基準策定への動き

- 国際海事機関(IMO)での国際統一基準
- 国際液化ガス運搬船規則 IGC Code (IGC Code: International Gas Carrier Code)。安全基準の整備・国際基準化
- 液化水素は未制定
- 国土交通省海事局で取組中



国際連系線や海底送電

- 国際連系線構想や余剰水力発電からの水素製造の構想
- 洋上風力の送電が課題。水素活用の可能性。
- 競合技術は直流高圧送電(HVDC)や超電導送電
- 国際連系にはカントリーリスクも。

DESERTECH



出所: DESERTECH

極東の水力発電⇒日本(送電線)



(構想段階)

出所: 平成25年度電力系統関連設備形成等調査事業
(国際連系に関する調査・研究), 日本エネルギー経済研究所

極東の水力発電⇒水素⇒日本



出所: http://advis.ru/php/view_news.php?id=1395653F-F4E5-D745-8E10-F670D9A0A04D
“ЭНЕРГОКОБЕТ”, No.5 (18), 2011

洋上風力・海洋エネルギー



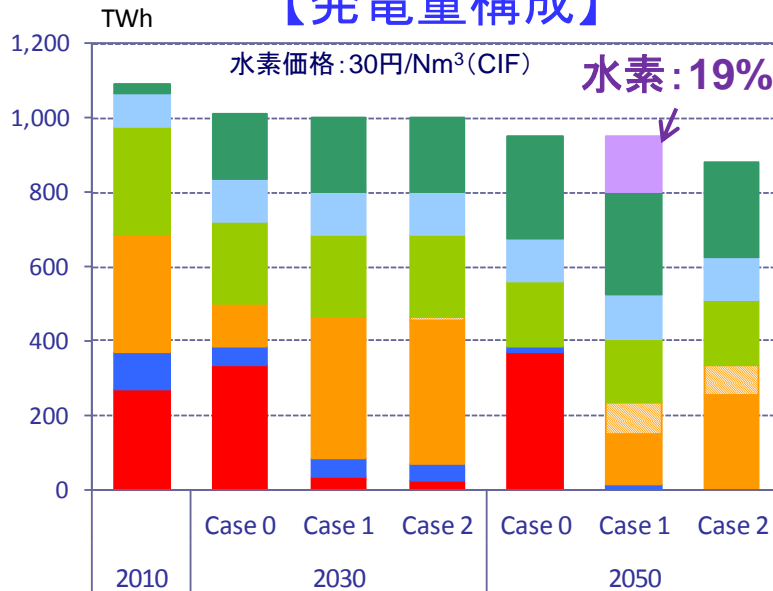
海底送電が必要

我が国における水素導入の可能性

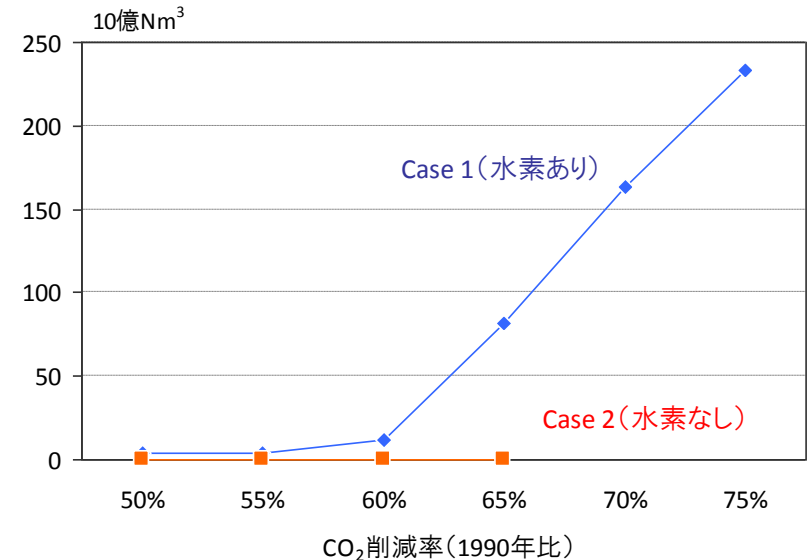
- 強力なCO₂制約&総エネルギーシステムコスト最小化の下で水素(輸入CO₂フリー)は発電用に導入。1次エネルギー供給の8%相当(820億Nm³)。
- CO₂制約の強度によって導入量は変動

MARKALによる水素導入可能性の評価

【発電量構成】



【CO₂制約と水素導入量】



- 石炭火力 ■ 石炭_CCS ■ 石油火力 ■ ガス火力 ■ ガス_CCS
- 原子力 ■ 水力 ■ 他再生可能 ■ 水素

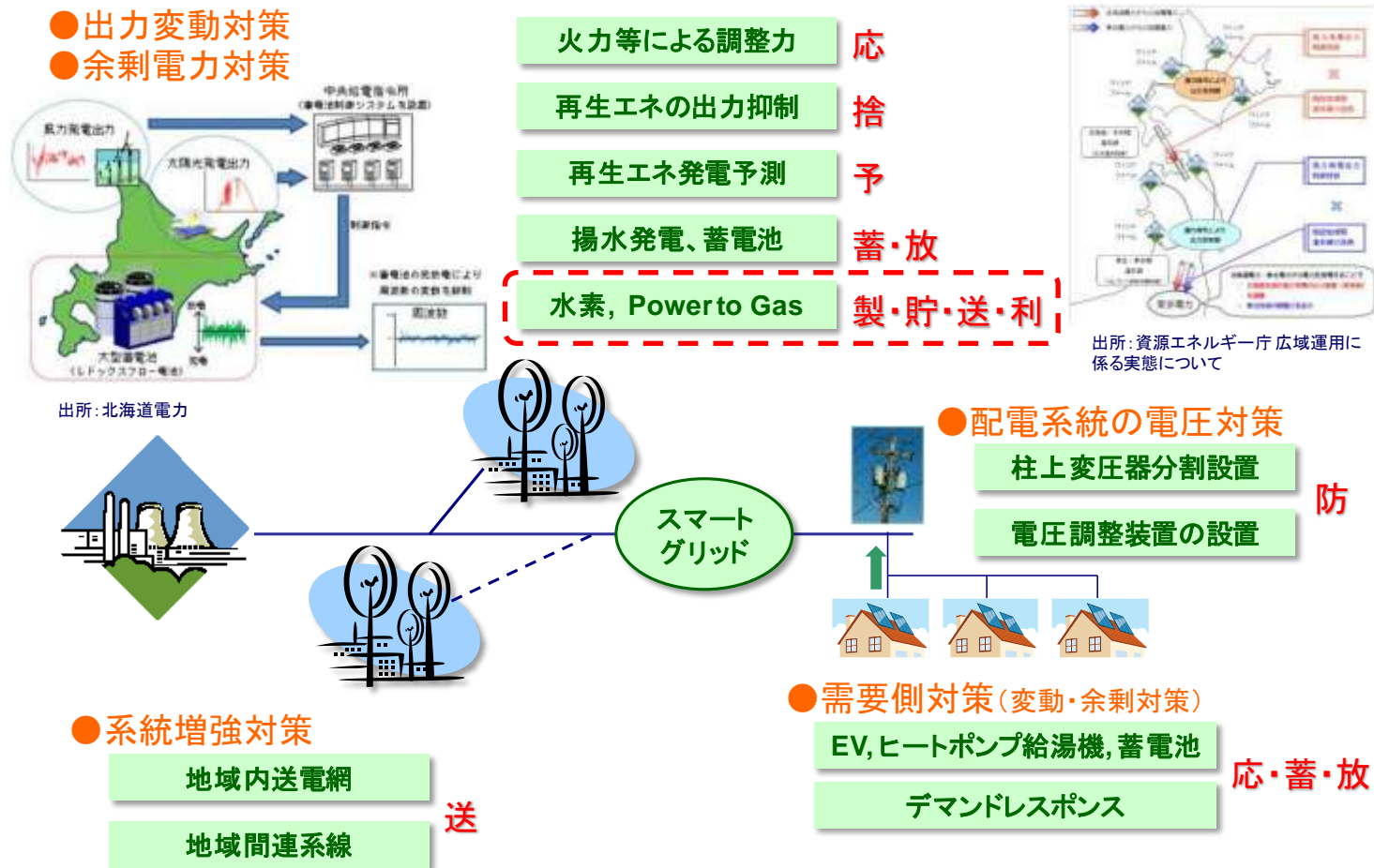
- Case0: CO₂制約を設定しないケース
- Case1: CO₂制約(▲65%)を設定するケース(水素の導入あり)
- Case2: CO₂制約(▲65%)を設定するケース(水素の導入なし)

出所: 松尾,川上, 他, “2050年の低炭素社会に向けた水素エネルギーの位置づけと導入見通し”2013年4月, IEEJ

電力系統安定化対策としての水素利活用

主な系統対策の特徴

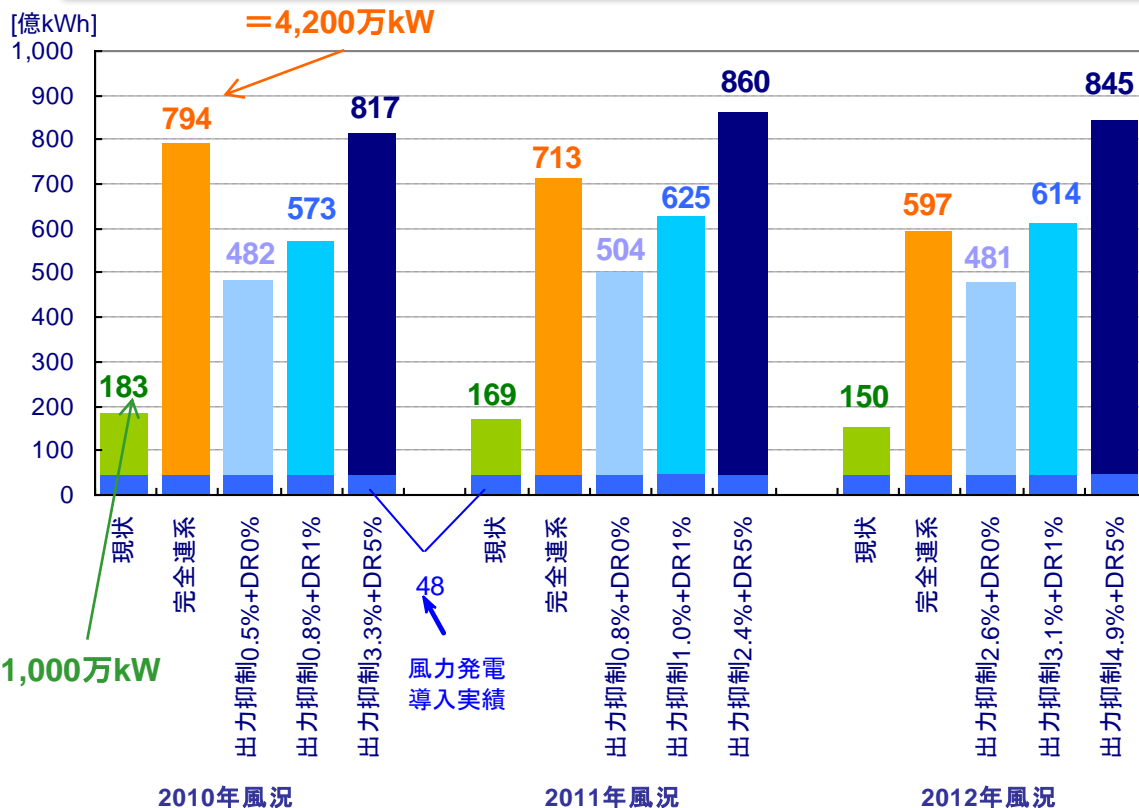
- 多様な系統対策。費用と時間軸を踏まえて最適な組合せを選択すべき
- 連系線は長いリードタイム、出力抑制は小規模の場合のみ有効、需要側対策への経済的インセンティブ、等



需要の能動化による風力導入ポテンシャル

- 僅かな出力抑制とデマンドレスポンスで、地域間連系線増強に匹敵する風力発電導入ポテンシャルが得られる。
- デマンドレスポンスに対する経済的インセンティブの付与は必要。
- 欧米では実証が進む(フランスのEnR-Poolなど)。

我が国における系統対策別風力発電導入可能量の分析例



必要デマンドレスポンス規模

DRの回数

DR率

平均
2~3回/年

平均
0.8%~2.5%

出力抑制率

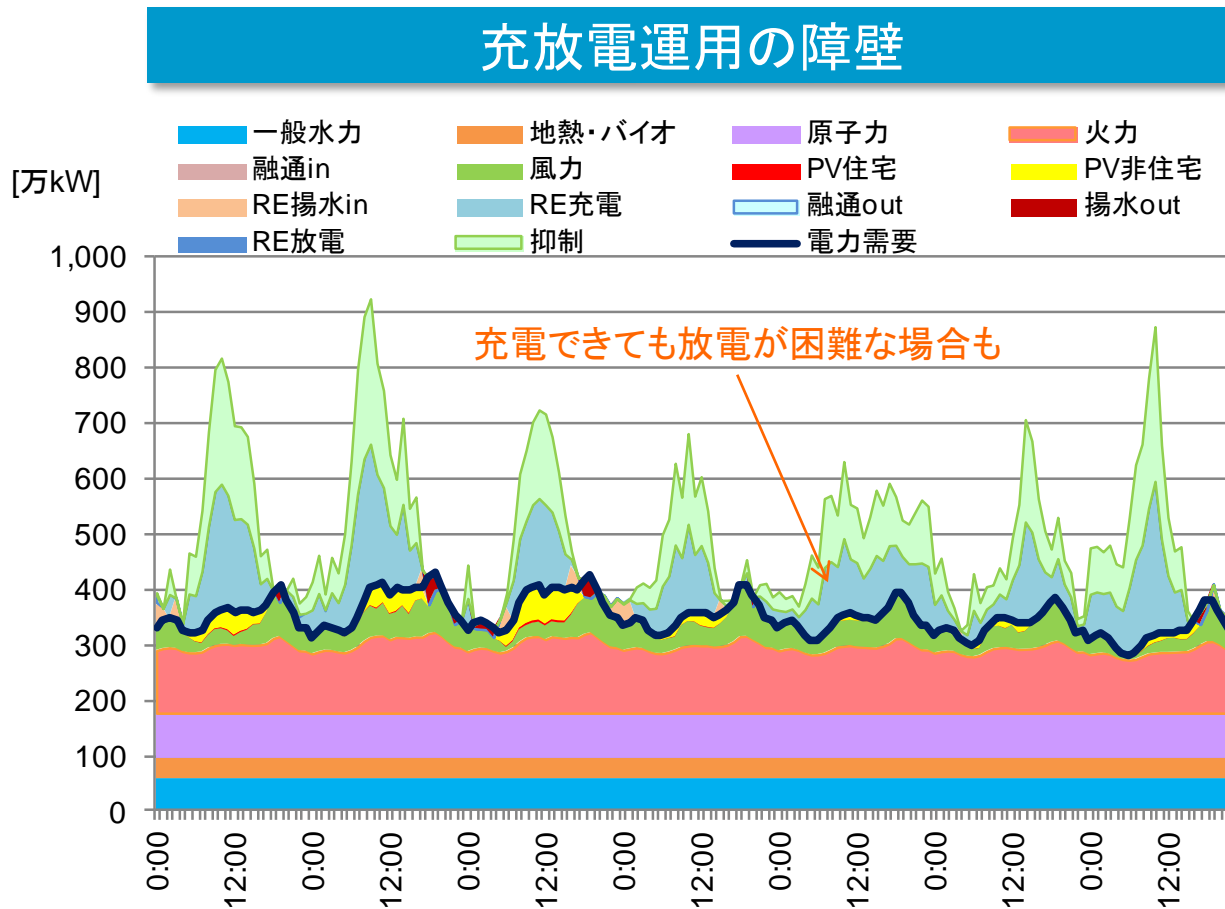
1%~5%(年間kWhベース)

出所: "風力発電導入拡大に向けたデマンドレスポンス及び出力抑制の可能性—デマンドレスポンス設計への示唆—", エネルギー経済, 2014年3月

エネルギー貯蔵技術の制御

- “電力⇔電力”の場合は制御・運営が複雑。
- “電力⇒熱や水素”の場合は電力以外の用途にも活用できる。

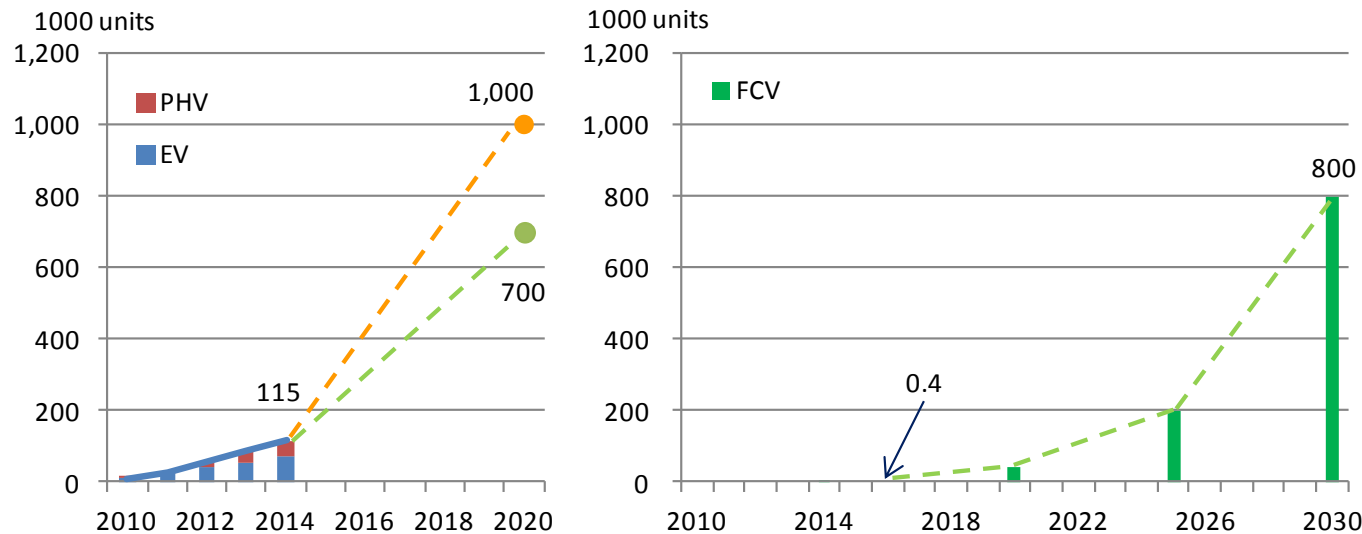
PtG



EV, PHV, FCVのエネルギー貯蔵容量

- EV・PHV ロードマップ検討会（2016年3月）によると、2020年までに100万台のEV・PHV
→ **2,000万kWh** の蓄電容量
- 水素・燃料電池戦略ロードマップによると、2030年までに80万台のFCV
→ **1億3000万kWh** の蓄エネ容量
- ただし、系統対策利用にはインセンティブの付与やアグリゲートが必要。

我が国のEV, PHV, FCV の導入目標

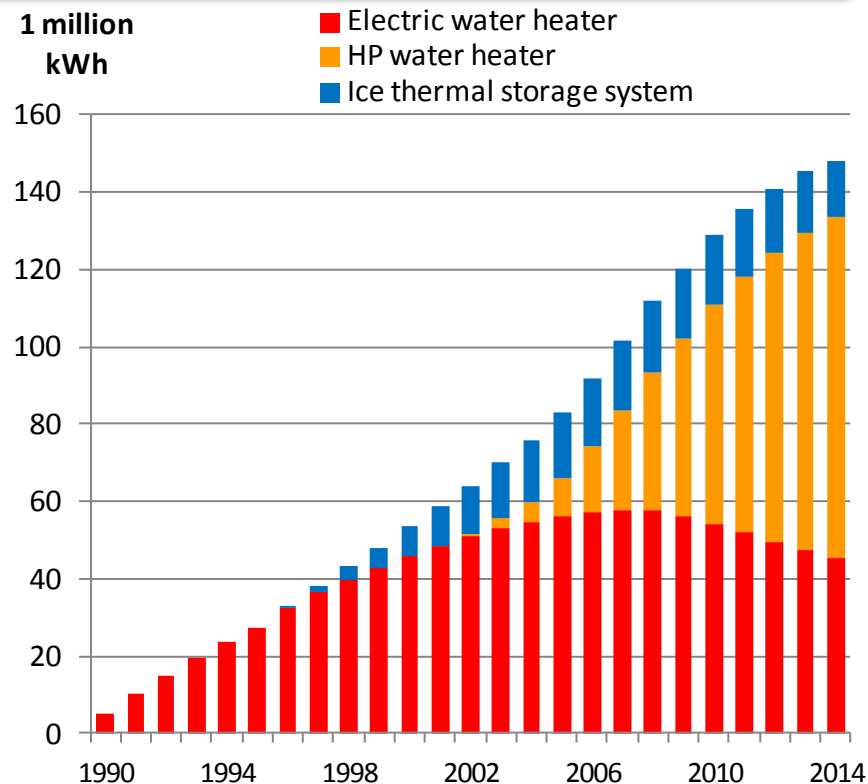
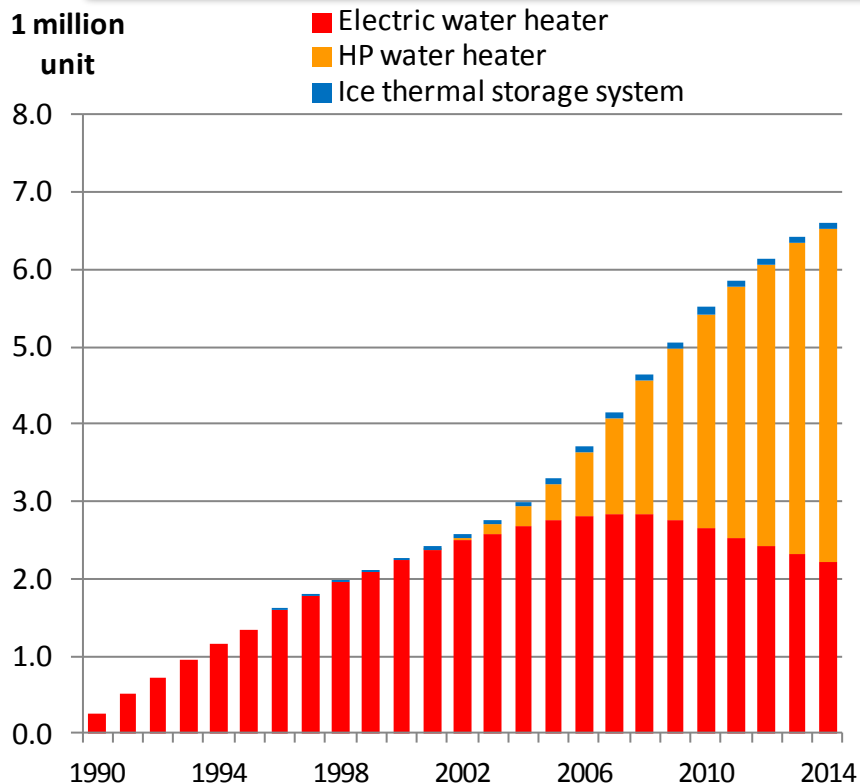


出所：ロードマップ検討会報告書、水素・燃料電池戦略ロードマップから作成

既に導入されている蓄熱機器の容量

- 蓄熱技術は成熟技術。日本では普及が進む。
- 2014年の総蓄熱容量は**1億5000万kWh**。主にヒートポンプ給湯機。

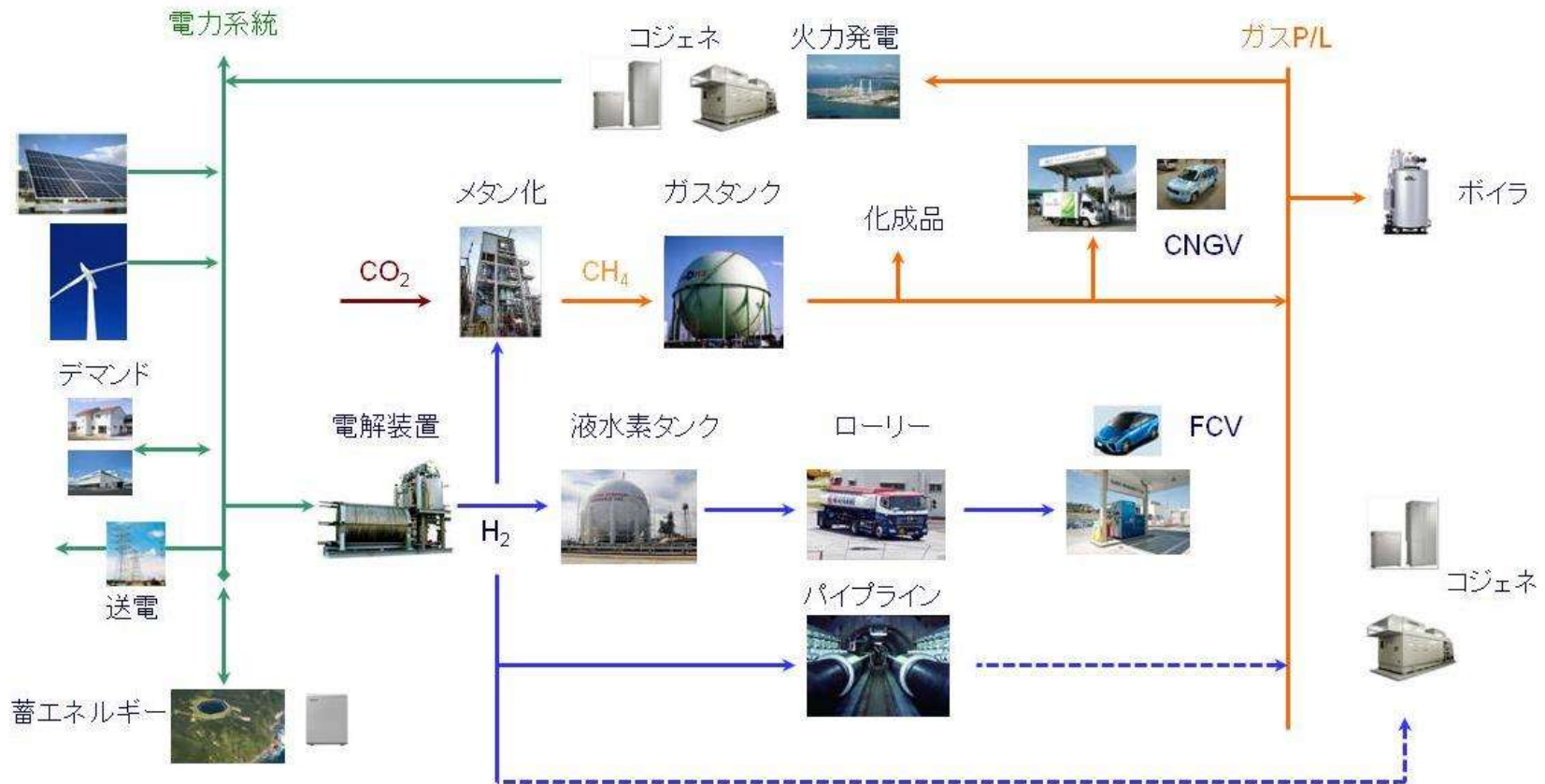
我が国における蓄熱容量の規模



注：日本冷凍空調工業会およびヒートポンプ・蓄熱センターの統計データに基づき推計（出荷台数から普及台数を推計）。

Power to Gas

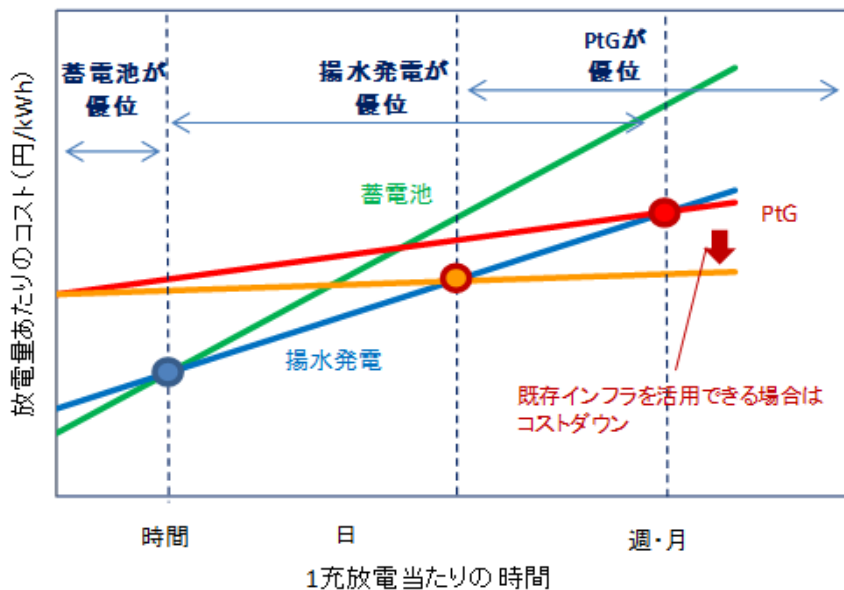
- 電力系統と天然ガスネットワークの連携も視野
- 熱需要や運輸部門での低炭素化が可能
- 総合効率 (Round-trip efficiency) は低いが、エネルギーの長期貯蔵も可能
- 既存インフラが活用できる場合は低コストの可能性も



出所: 柴田, “我が国におけるPower to Gasの可能性”, エネルギー経済, 2016年3月

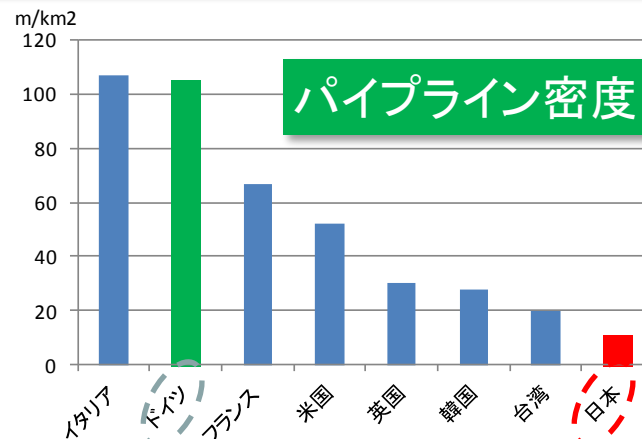
エネルギー貯蔵技術の競合・棲み分け

エネルギー貯蔵技術の棲み分け



出所: 柴田, “我が国におけるPower to Gasの可能性”, エネルギー経済(2016)

PtGの実現可能性は既存インフラの活用可能性に影響を受ける



出所: 我が国の天然ガス及びその供給基盤の現状と課題、平成24年1月17日、資源エネルギー庁 等から作成

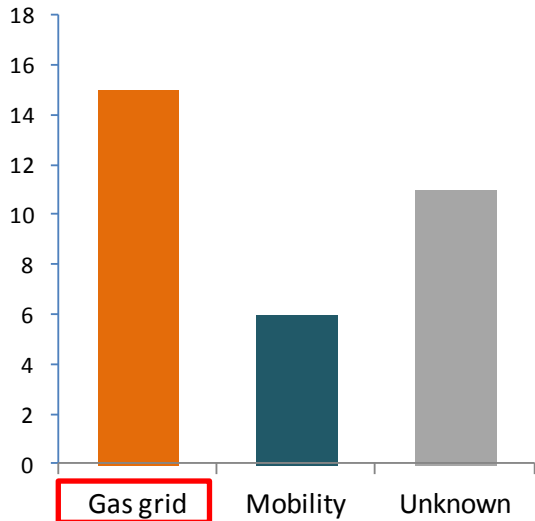
天然ガス地下貯蔵量

	天然ガス需要 (億m ³ /年)	地下貯蔵数	地下貯蔵量 (ワーキングガス) (億m ³)
ドイツ	884	51箇所	228
イタリア	860	10箇所	127
イギリス	916	49箇所	35
日本	771	5箇所	12

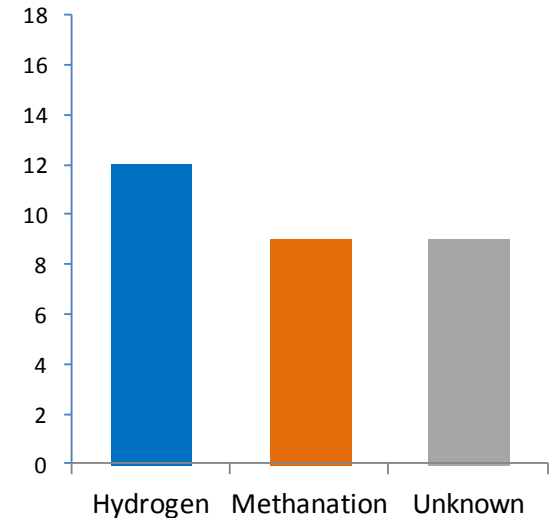
欧州30箇所のPtGプロジェクトの類型

- 欧州30箇所(2013年)。うちドイツが20箇所
- ガスP/Lへの注入が多い。電解入力電力は変動電源が多い。

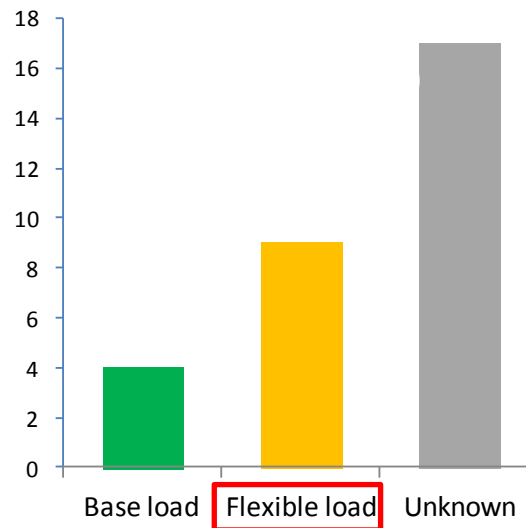
用途(運輸, ガスP/L)



水素かメタンか



利用電力の種類



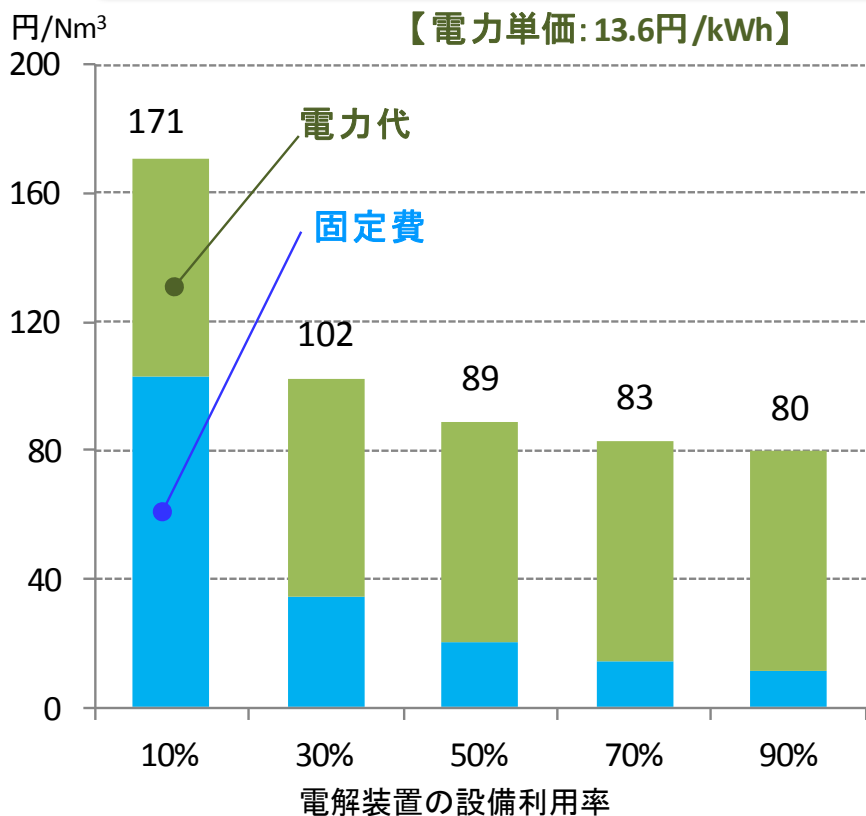
出所: 柴田, “我が国におけるPower to Gasの可能性”, エネルギー経済, 2016年3月

電解水素製造の経済性

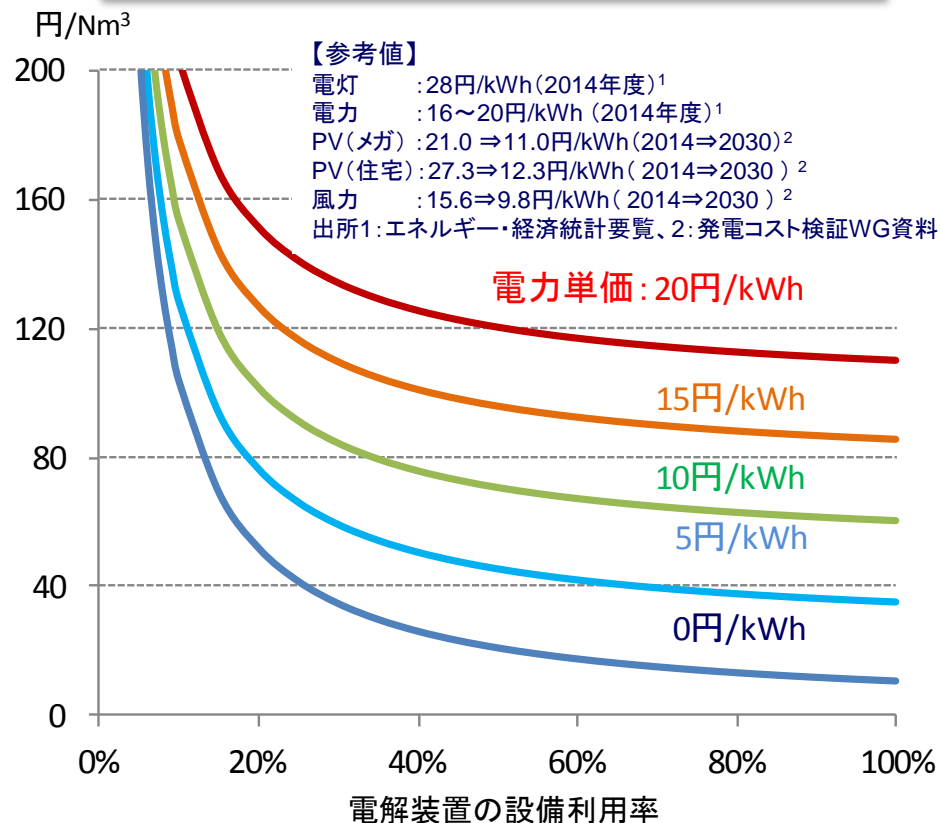
電解水素製造コスト

- 現在1Nm³の水素製造に最低でも5kWhの電力投入が必要であることから、電力代だけで100円/Nm³を超える可能性も
- 投入電力単価の低減、電解水素製造原単位の低減、電解設備費の削減の全てが必要。また、電解装置の設備利用率向上も課題

電解設備利用率の感度



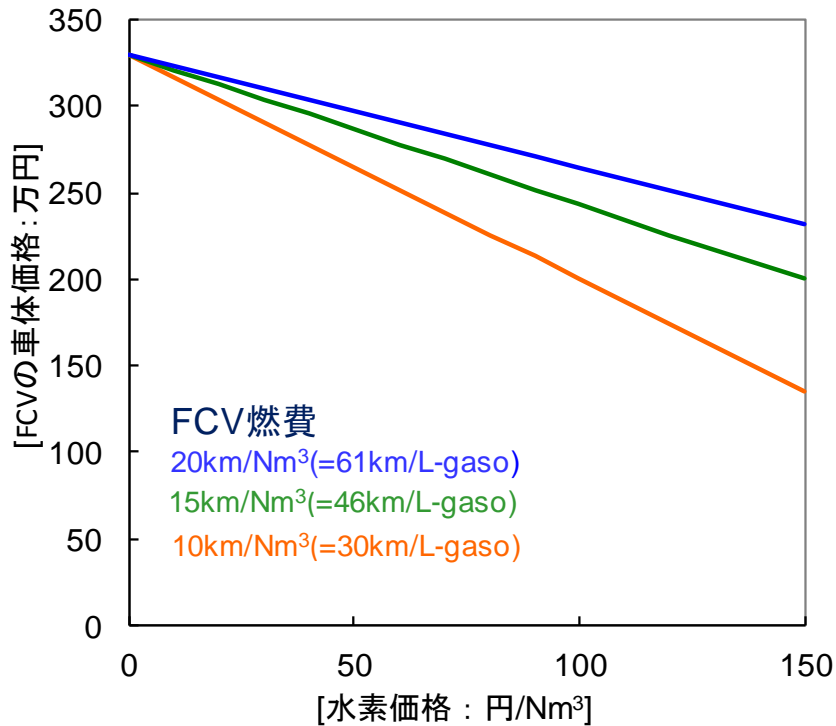
電力単価の感度



求められる水素の価格水準

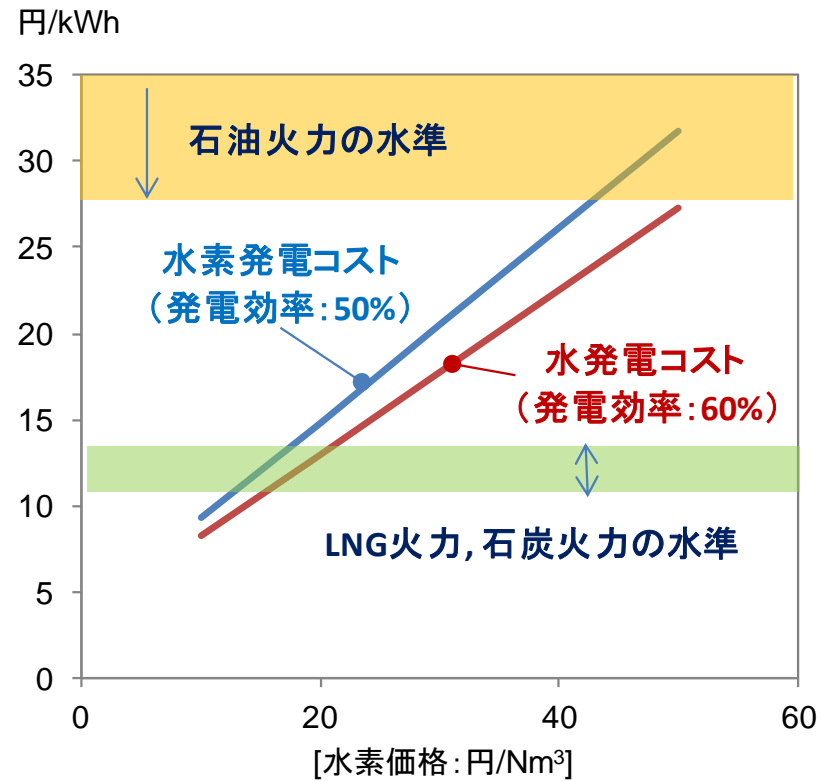
- 求められる水素の価格は、用途や競合技術によって大きく異なる。

ライフサイクルコストにおけるFCVの対ガソリン車ブレークイーブン条件



注: 被代替車はガソリン車で価格200万円, 燃費15km/L, ガソリン価格150円/L、年間走行距離10,000km、13年間利用を想定。

水素発電(専焼)コスト



注: 発電設備は設備利用率=50%。水素発電の建設コストはLNG火力と同レベルを想定。

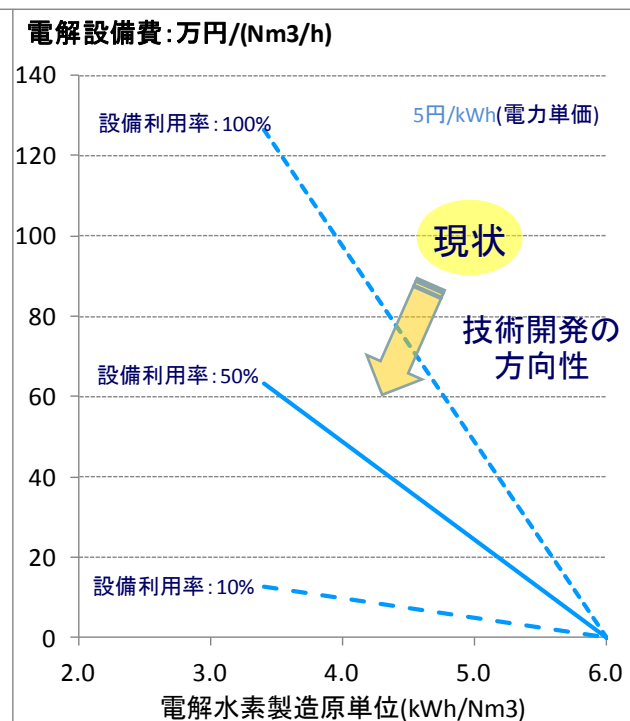
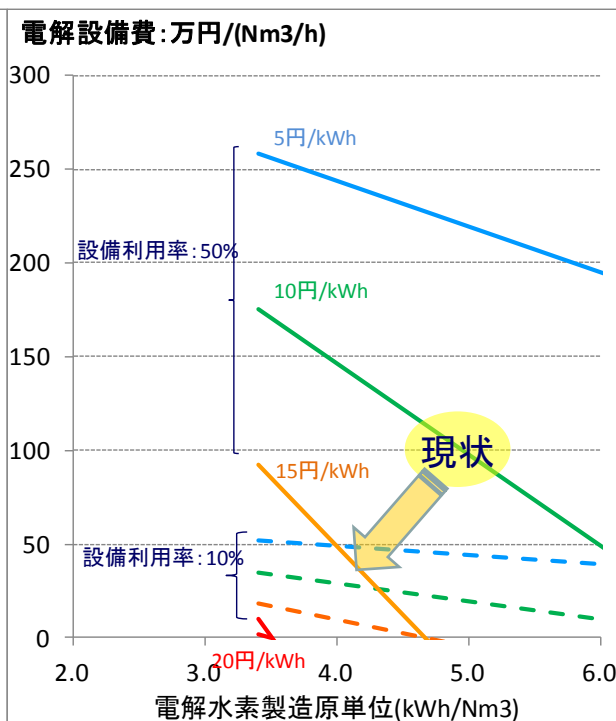
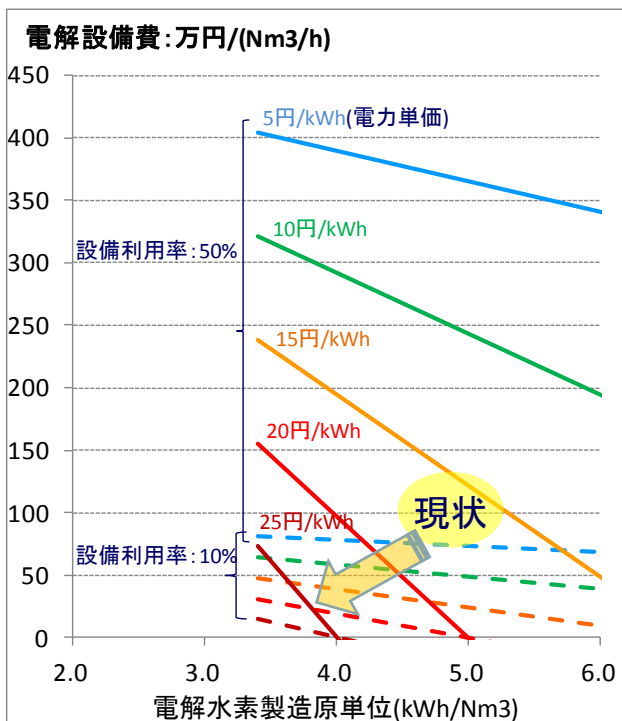
電解水素製造コスト目標別の達成条件

- 100円/Nm³が目標の場合は、投入電力単価が15円/kWh程度であれば、現状の技術水準でも可能。ただし、50%近くの設定利用率が要求される。
- 出力変動型再エネ利用の場合は設備利用率が低くなるため、設備費と製造原単位の大幅な低減が必要。
- 30円/Nm³が目標の場合は、更に、投入電力単価は5円/kWh以下が求められる。

水素製造コスト目標
=100円/Nm³
(≒FCVへの販売価格)

水素製造コスト目標
=70円/Nm³

水素製造コスト目標
=30円/Nm³
(≒輸入水素CIF価格)

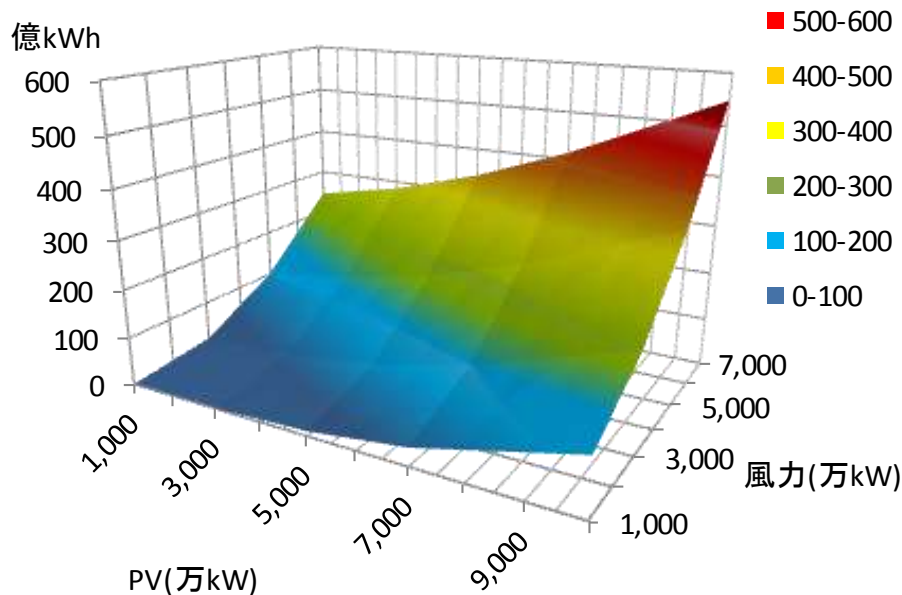


我が国の余剰電力規模

- 系統対策の動向によって余剰電力量は大きく異なる。
- 我が国において太陽光6,400万kW+風力1,000万kW(※)導入の場合で、余剰電力は40億kWh(≒5%)~220億kWh(≒25%)→8~44億Nm³の水素
- ただし、余剰電力の負荷率は、最も大きい地域でも3%~10%

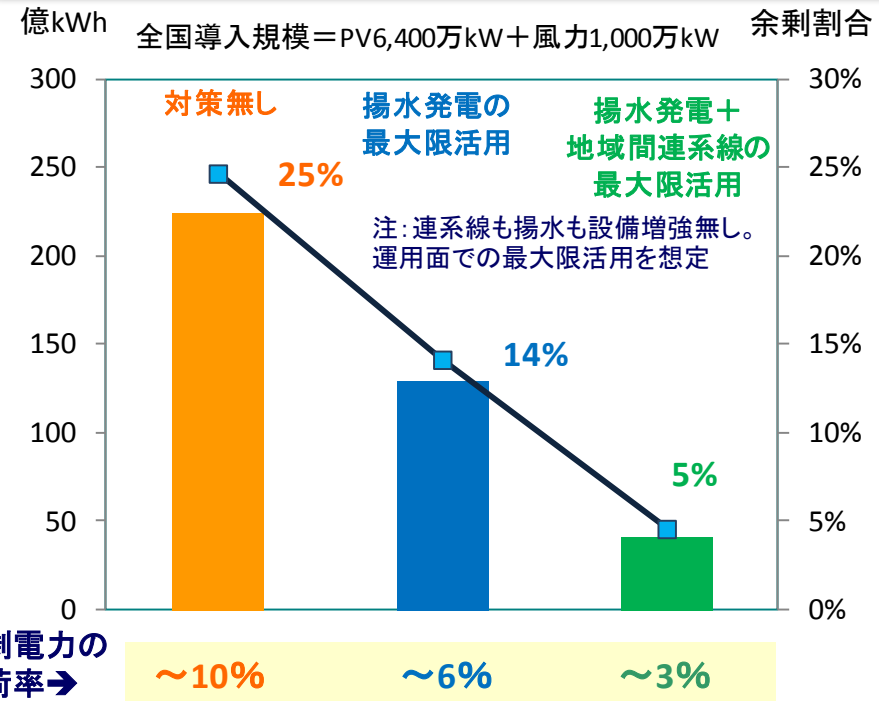
※「長期エネルギー需給見通し(骨子)案」の電源構成に基づく。なお、2016年1月末時点の累積導入量は、PV約3,000万kW、風力約300万kW。

再生可能エネルギーからの余剰電力量

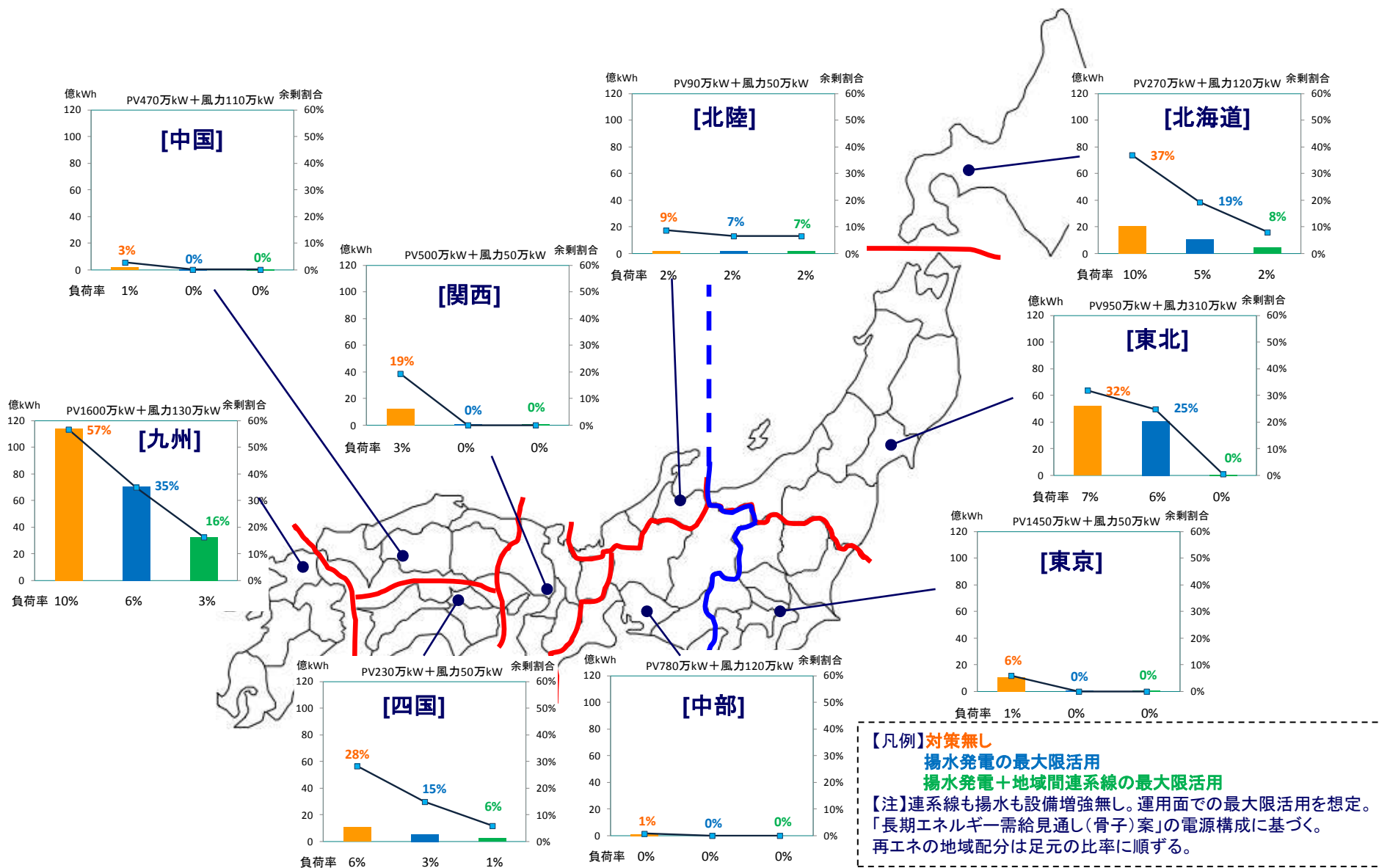


注: 地域間連系線、揚水発電を最大限活用できる場合。
ただし、設備増強は無し。

系統対策別の余剰電力規模



我が国の余剰電力規模(地域別)

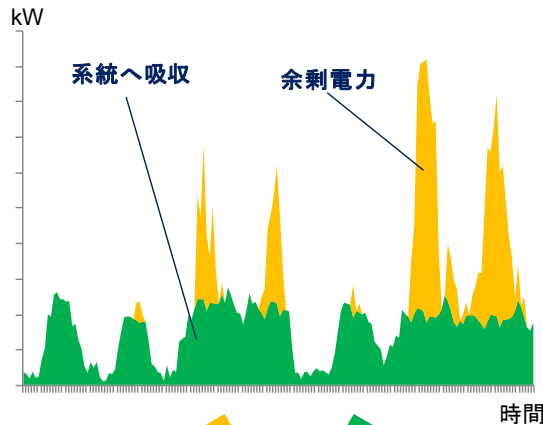


余剰電力だけが選択肢ではない

- 余剰電力ではなく、安定部分の電力(再エネの)を利用

安定部分電力利用の概念

【自然変動型再生可能エネルギー】



【余剰電力型】

余剰電力(全量または一部)を利用して水素製造

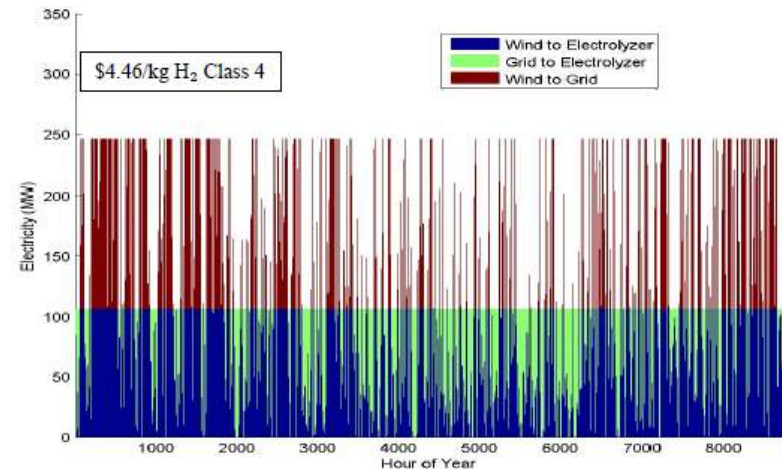
黄色面積 = 濃緑色面積

【安定部分電力型】

安定部分電力を利用して水素製造

風力+系統電力の利用の例

“風力”+”系統電力とのやり取り”で水素製造。ただしCO₂フリーではない。



出所: "US Geographic Analysis of the Cost of Hydrogen from Electrolysis", NREL, 2011

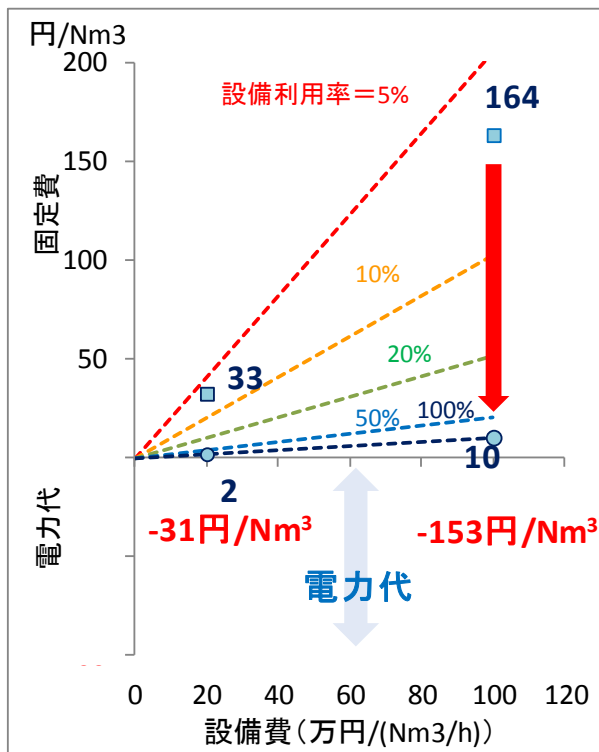
出所: 柴田, “再生可能エネルギーからの水素製造の経済性に関する分析”, エネルギー経済(2015)

安定部分電力利用による水素製造コスト削減

- 安定部分の電力を用いることで、水素製造コストの大幅な削減が可能
- 安定部分を利用する場合でも、ある程度余剰電力は削減できるが、当然、別途系統対策が必要になる

安定部分電力型による水素製造コストの削減効果

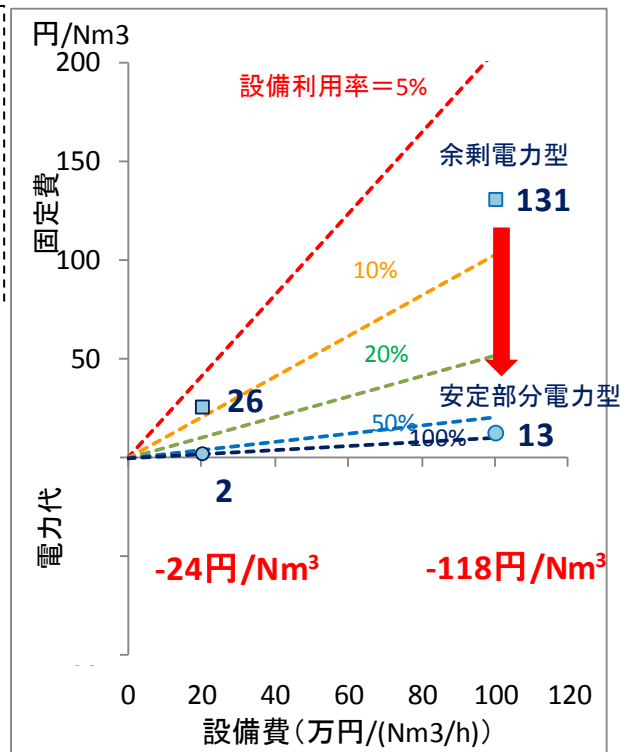
【北海道】



【想定】

- 全国でPV6,400万kW+風力1,000万kW導入
- 北海道:4億kWhの余剰電力のうち3億kWhを電解に投入と想定
- 九州:33億kWhの余剰電力のうち20億kWhを電解に投入と想定

【九州】



注:設備利用率による固定費の変化を見るために電力代は表記していない。電力代は余剰電力型と安定部分電力型で共通である。

出所:柴田,“再生可能エネルギーからの水素製造の経済性に関する分析”,エネルギー経済(2015)をベースに推計

余剰電力が無償の場合

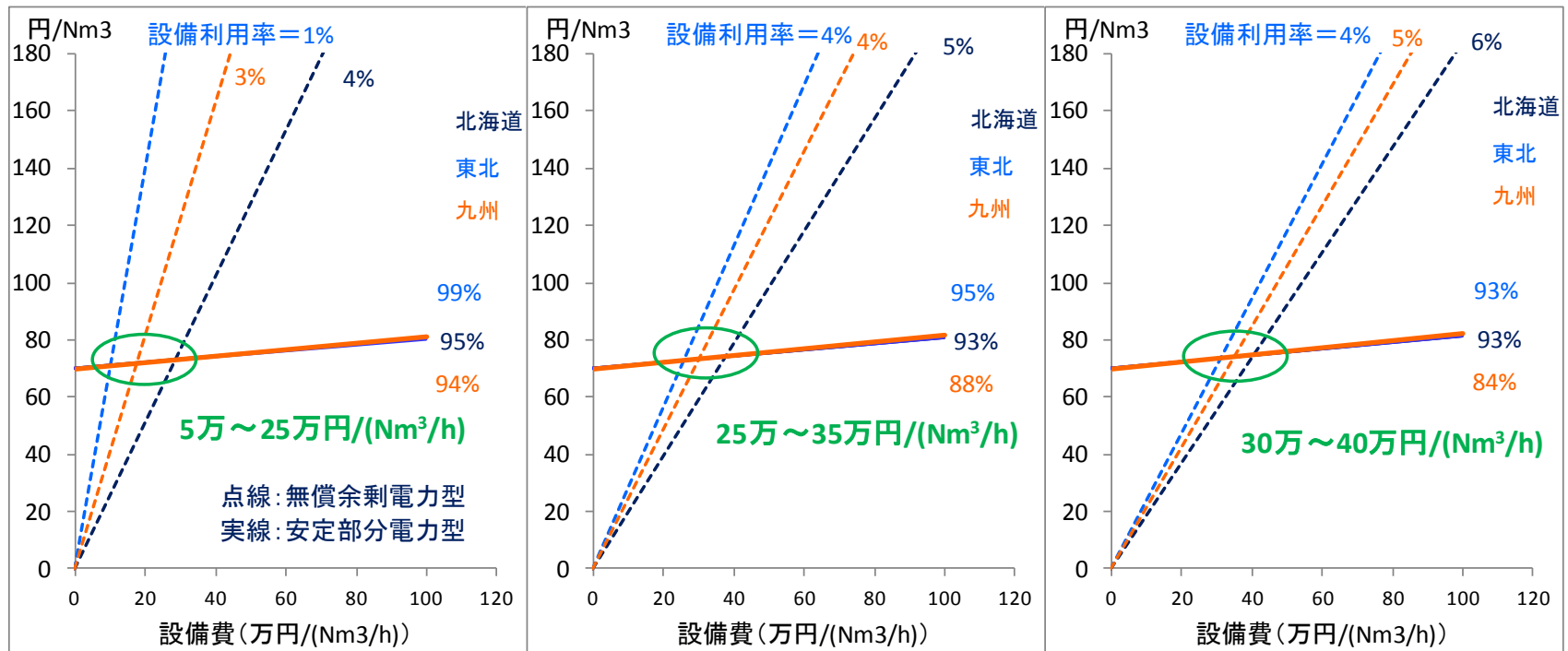
- 余剰電力を無償調達できる場合でも、余剰電力型の経済性が優位になるためには、電解装置の大幅なコストダウンが必要（現状の1/3～1/4）。

無償余剰電力利用と安定部分電力利用の水素製造コスト比較

PV5,000万kW+風力3,000万kW

PV7,000万kW+風力5,000万kW

PV1億kW+風力7,000万kW



出所: 柴田, “再生可能エネルギーからの水素製造の経済性に関する分析”, エネルギー経済, 2015年6月

余剰電力型と安定部分電力型の比較

	余剰電力型	安定部分電力型
調達電力価格	安価な可能性も	再エネの発電コストと同等の調達価格になる
調達可能電力量	他の系統対策に影響	再エネ導入量から見通しが可能
電解設備利用率	かなり低い	高い
系統対策	余剰電力の大半を利用することで、系統への影響を大きく回避できる	電力需要の創出につながることから、ある程度の余剰電力の削減効果はあるが、別途系統対策が必要

注: メリット、デメリット

まとめ

再エネ由来水素の課題

■ 再エネ余剰電力の見通しに関する不確実性

- 量 : 系統対策のあり方に影響(系統対策のベストミックス)
- 価格: 出力抑制電力は安価に買い取れるか否か

■ 再エネ由来水素製造の位置付け

- 系統対策として位置付ける場合
 - ⇒蓄電池と競合か棲み分けかの分析・判断が必要
 - ⇒製造・貯蔵した水素を何に利用するのが最適か(変換ロスによる再エネの目減りを踏まえつつ、PtoGtoP, PtoGtoMなどを選択)
- 系統対策から独立して位置付ける場合
 - ⇒再エネの安定部分電力を利用することで、電解の設備利用率は大幅に向上し、水素製造コストを大幅に削減可能
 - ⇒ただし、残りの再エネ電力の処理のためには、系統連系が必要

■ P to Fuel(運輸用燃料や化成品原料)

- 電力系統とガスインフラの連携が困難な場合は、PtoFuelの可能性

■ 定置用FC-CHP

2030年以降地域限定的に純水素か(水素タウン?)。純水素インフラの場合、末端機器開発(燃焼系)も課題

■ 燃料電池自動車・水素ステーション

ガソリン流通を担う石油会社を中心として自動車会社とも連携しつつインフラ拡大

■ 水素発電

安定供給(大量・安価)可能性に依存

■ 水素源

輸入水素が先か、再エネ由来水素が先か?

地域資源の活用(廃棄物等)

■ CO₂制約 & 競合技術

■ エネルギーシステムの変革

水素社会の構築はエネルギーシステムの変革。将来の社会像(少子高齢化、モーダルシフト、街づくり、スマートシティなど)を踏まえ、どのようなエネルギーシステムを作るかの議論も必要

ありがとうございました。

yoshiaki.shibata@edmc.ieej.or.jp