

2022年7月25日（月）/第5回 再エネ講座公開研究会（第2回【部門A】）

『米国型送電システムおよび我が国の実潮流による2050年送電シミュレーションと課題』

# 実潮流に基づく電力系統運用を行った 場合の2050年電力需給分析

EV乗用車蓄電池とグリーン水素の地下貯留を活用した水素専焼火力  
の調整力を中心とした再エネ100%シナリオの提示

内藤克彦（京都大学）

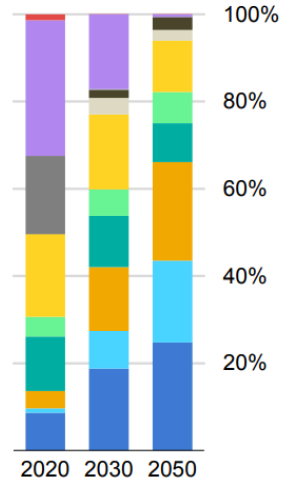
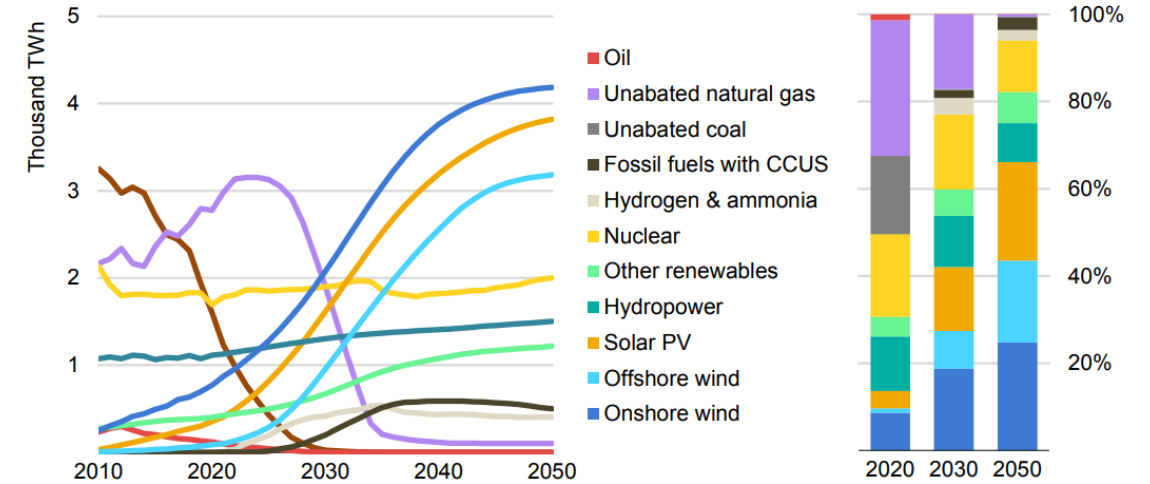
栗山昭久、劉憲兵、津久井あきび、田中勇伍（公益財団法人 地球環境戦略研究機関,IGES）

# 目次

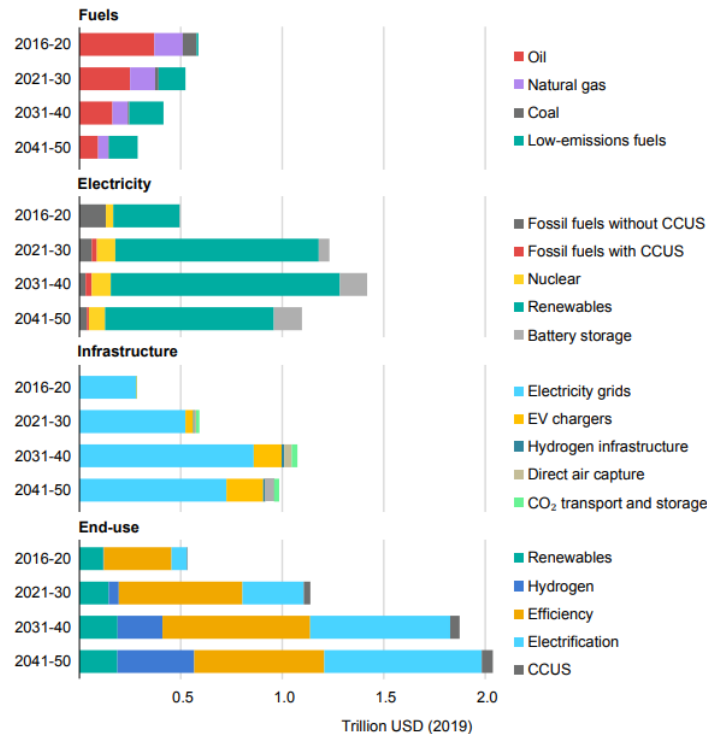
1. 分析の背景と目的
2. 分析の手順
3. シナリオ設定（分析の前提条件や考え方の特徴）
4. PROMODによるシミュレーション分析結果
5. 分析から得られた示唆（Key Findings）
6. 今後の課題

# 1.1 分析の背景

- 2050年カーボンニュートラルを達成するに向けて、G7全体では電力の**8割以上が再エネ**によって供給されることが期待され、**再エネ、電化、送配電設備への多額の投資**を必要としている。
- 日本においても、RE100や再エネ100宣言 RE Actionのように**再エネ比率100%**を求める声がある。また、**エネルギー安全保障**の観点からも高い国内再エネ比率が望まれる。
- しかし、再エネを導入検討するにあたり系統増強ありきでは、**送電線増強の手続きや費用負担の調整に時間を要する場合に、再エネの導入が進まない/遅れる懸念**がある。
- 陸上・洋上風力発電、太陽光発電の出力変動に対応する**調整力**として、**EVや水素利用が検討**されているが、その導入量や運用方法に対する**具体案の提示**することが求められている。



Energy sector investment in the Net Zero Emissions by 2050 Scenario



(出典) IEA (2021)  
Achieving Net Zero  
Electricity Sectors in  
G7 Members

## 1.2 分析の目的

以下の想定の下で、**再エネ100%（グリーン水素専焼火力含む）**を達成しうる電源と調整力の配置を、上位2系統を対象として、電力系統の運転費用を最小化する**PROMODによるシミュレーション**を通じて提示する。

- 電力需要は、2050年の**経済活動や経済構造が2015年度と同等で、人口減、電化、省エネ**が進む社会像を想定の下、推計する。
- 各電力地域の**地内送電線**については、現時点の増強計画以外の**再エネ導入を目的とした新規増強は想定しない**。

※ただし、新規電化による**電力需要増に対応するための送電線の増強（主に都市部）**は取り入れる。

- **地域間連系線**については、各電力地域の地内送電線の運用容量の範囲内で**広域融通**できる程度に増強する。
- 電力は、**太陽光発電、陸上風力発電、洋上風力発電によって最大限供給**される。
- 電力需給の調整力として、**EVの蓄電池**が最大限活用される。また、既存のガス火力発電所が**水素専焼火力発電**に改修される。
- 余剰再エネによって製造された**グリーン水素**が**国内ガス田**などに貯蔵され、**高圧幹線導管ネットワーク**を通じて各水素専焼火力に輸送される。

# PROMODとは

## PROMODの利用実績など

- **日立エナジー社（旧ABB社送電部門）**が提供するシミュレーションソフト。
- 2017年時点では、**北米で272件、欧州で27件、豪州太平洋地域で11件**等の利用があり、欧米の電力ビジネスの現場で広く実用に供されているものである。
- 日本では、**電力広域的運営推進機関(OCCTO)**が**PROMODの永続ライセンス契約**を締結している。

<https://new.abb.com/news/ja/detail/57015/japans-grid-operator-occto-signs-perpetual-license-agreements-for-abbs-cross-regional-power-supply-and-demand-simulation-software-promod>

## PROMODのシミュレーション概要

- **入力データ**：系統の運用容量やトポロジー制約、発電ユニットの各種制約、燃料費などの経済性パラメータ、ノード毎・時間毎の需要や調整力など
- **出力データ**：時間毎の電源の発電電力量、系統の潮流、LMP価格など
- **シミュレーションの対象**：ノード毎のメリットオーダー方式による電源の運転費用に基づく経済的電源選択を原則としつつ、火力発電等の最低負荷条件や出力変化速度（ランプレート）、送電制約などを考慮したセキュリティ制約ユニットコミットメント（SCUC: Security constrained unit commitment）により電源選択を行い、セキュリティ制約経済負荷配分（SCED: Security constrained economic dispatch）により発電出力指令をシミュレートしている。

# 分析の対象（シミュレーションで扱う電力系統）

沖縄を除く各送配電会社の  
電力供給区域における**上位2系統**

	ノード（変電所・開閉所）数	ブランチ（送電線）数
<b>全国</b>	<b>451</b>	<b>578</b>
北海道	43	49
東北	35	43
関東	84	125
中部	68	83
北陸	8	9
関西	60	76
中国	36	40
四国	28	36
九州	89	97
地域間連系線	—	20



出典:各送配電会社の系統図を基にIGES作成

## 2. 分析の手順

本シナリオに基づく系統電力需要と貨物FCV用水素製造のための電力需要量の算定

2022年時点の送電線の運用容量をベースとするが、以下の条件に該当する送電線は、必要となる運用容量の増強分を算定

- 電力需要の増加に対応して、増強が必要となる送電線
- 現在公表されている流通設備計画において新規増強が決定している送電線
- 広域融通を想定した地域間連系線

電力需給バランスの調整力に利用できるEVの蓄電池量（ノード別）の最大値を算定。水素製造拠点とおよその水素製造能力を算定

水力発電、地熱発電、バイオマス発電の導入量（ノード別）算定

送電線制約を考慮した陸上・洋上風力発電、太陽光発電、EV導入量、水素製造能力（ノード別）の算定/調整

PROMODによる需給バランスの確認

・ 2030⇒2050の再エネ増加分については、再エネポテンシャルの範囲内で、送電線キャパシティを考慮した立地点の選定を行う。

⇒再エネの適正配置

送電線の制約の中で、需給バランスがとれるまで各再エネの導入量及び配置を調整

## 3. シナリオの設定

3.1 2050年の電力需要量の想定

3.2 送電線の増強の想定

3.3 調整力の想定

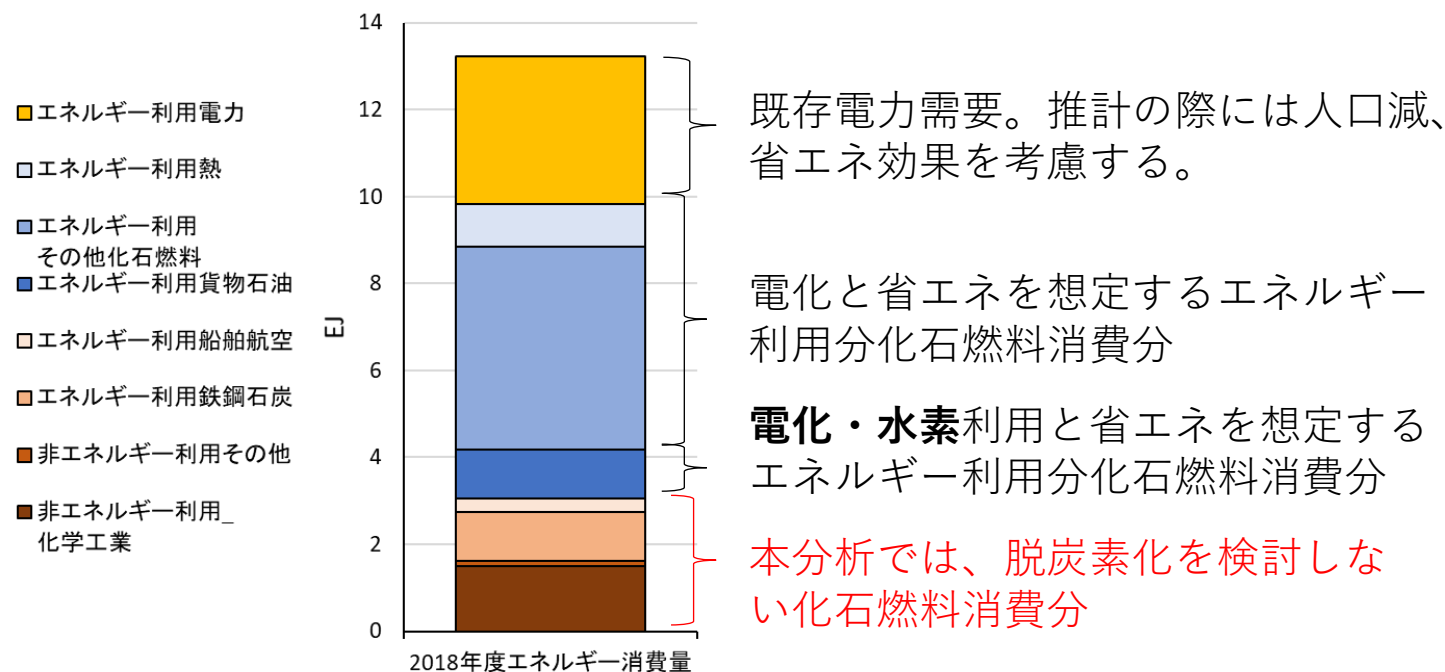
3.4 再エネ設備容量想定



# 3.1 2050年の電力需要量の推計

## 2050年電力需要量の考え方

- 鉄鋼部門における鉄鉱石還元用石炭消費量等、船舶・航空部門における全エネルギー消費量を除いた**化石資源消費量のエネルギー利用分が最大限電化または水素化**。新規電化分の増加電力は電力系統から供給。
  - 鉄鋼部門における鉄鉱石還元用の石炭消費分及び石油化学部門における原料としての石油消費分は、各分野で水素調達、または、リサイクル等による多様な原料調達を行うものとして、また船舶航空部門の燃料消費分についてもバイオ燃料等多様な手法が考えられるので本分析の対象の範囲外としている。
- 貨物自動車用の燃料は大型貨物等はFCV化し、小型車はEV化すると想定の下に、半分は水素燃料としている。
- 使用するデータの制約から既存電力需要の詳細データは2018年度、非電力エネルギー詳細データは2015年度の各種統計を利用している。



**本分析でエネルギー需要・水素需要として扱うエネルギー利用分**

## (参考)米国海軍の気候変動対応・・・ハーバードビジネスレビュー－2017.11

- 気候変動により海軍の軍務・人道活動需要が高まる。
  - 水利権争いの渇水地域、大規模移民の沿岸地域、新たな航路ができ争いが増える北極圏、などの地域の拡大、海軍への需要の構成や頻度の変化
- 気候変動による海軍任務遂行能力低下の恐れ。
  - 海面上昇・気候悪化による国内外基地港湾へのダメージ。**インフラや燃料サプライチェーンのレジリエンス向上。**
  - 気候変動は継続的・加速的なプロセスであり、動的プロセスに備えた計画が必要。
- **2009年に海軍長官は、海軍のエネルギー使用の50%を代替エネルギーで賄う決定。**
  - 空母打撃群が、2016年に航行した時には、**全ての艦船・航空機が50%バイオ混合燃料を使用。**  
**沿岸基地の電力源は、分散電源**とし、サイバー攻撃へのレジリエンス強化。

# 各部門の新規電力需要推計の考え方

## 概要

- 既存の電力需要（変電所別、1時間単位）は2018年度比0.6と設定（省エネ効果&人口減の効果）
- 新規電力需要（非電力の最終エネルギー消費量の電化分）は、下記の表を想定し、変電所別、1時間単位のデータを生成。

部門	主な想定
家庭部門	<ul style="list-style-type: none"><li>• エネルギーの必要量は人口減と電化に伴うエネルギー効率改善を考慮</li><li>• 空調・給湯・調理の電化率100%</li></ul>
業務部門	<ul style="list-style-type: none"><li>• エネルギーの必要量は、電化に伴うエネルギー効率改善を考慮。活動量レベルは2018年度の同程度と想定。</li><li>• 空調・給湯・調理の電化率100%</li><li>• 空調・給湯・調理のエネルギー使用割合や1時間の電力パターンは業種別に設定</li></ul>
交通部門	<ul style="list-style-type: none"><li>• エネルギーの必要量は人口減と電化に伴うエネルギー効率改善を考慮</li><li>• 乗用車のEV100%</li><li>• 再エネが利用可能な時間帯に充電</li></ul>
産業部門	<ul style="list-style-type: none"><li>• エネルギーの必要量は、電化に伴うエネルギー効率改善を考慮。活動量レベルは2018年度の同程度と想定</li><li>• 石油化学、鉄鋼、窯業土石の燃焼加熱以外のエネルギー用途の電化率は100%</li></ul>

### 3.1.1 家庭部門新規電力需要(暖房)の算定方法

#### ①暖房による新規電力需要

$$\begin{aligned}
 &= 2015\text{年石油消費量} \times \frac{\text{暖房の石油消費量}}{\text{暖房・給湯・調理の石油消費量}} \times \frac{2050\text{年人口}}{2015\text{年人口}} \times \text{電化率} \times \frac{1}{\text{暖房機器のCOP値}} \\
 &+ 2015\text{年ガス消費量} \times \frac{\text{暖房のガス消費量}}{\text{暖房・給湯・調理のガス消費量}} \times \frac{2050\text{年人口}}{2015\text{年人口}} \times \text{電化率} \times \frac{1}{\text{暖房機器のCOP値}}
 \end{aligned}$$

↑  
下図参照

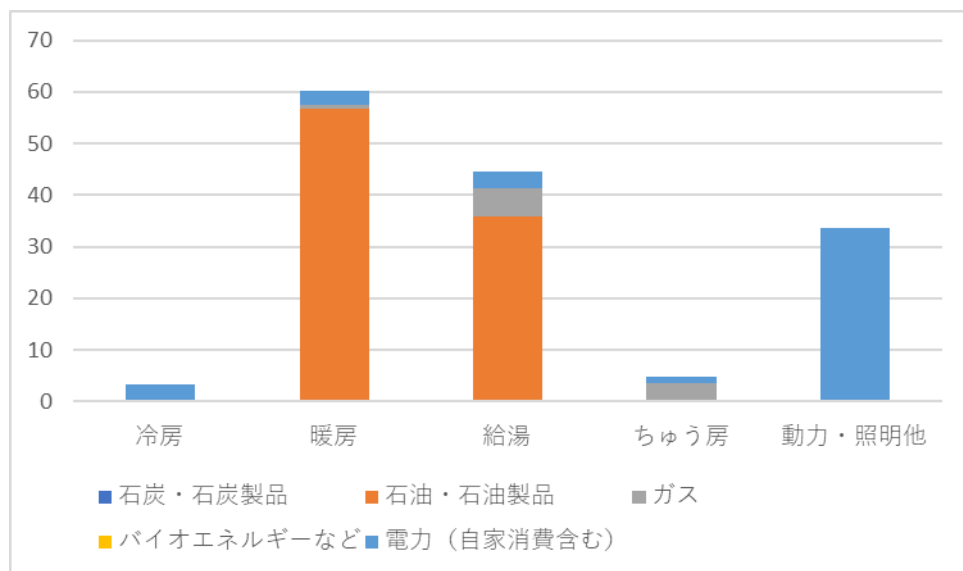
↑  
70%~80%

↑  
100%

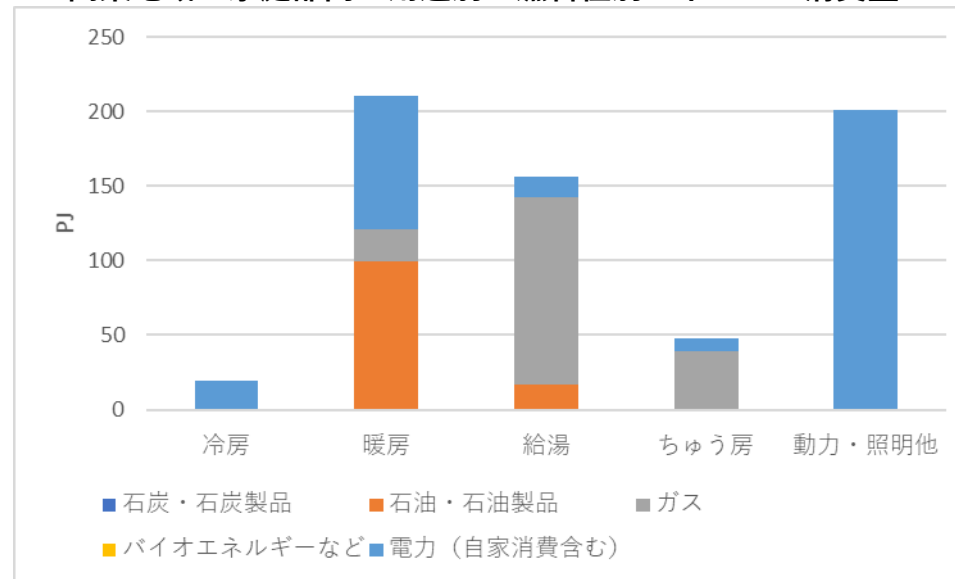
↑  
1/3

↑ 国立社会保障・人口問題研究所の推計値（市町村別）利用

北海道地域の家庭部門の用途別・燃料種別エネルギー消費量



関東地域の家庭部門の用途別・燃料種別エネルギー消費量



## ②家庭部門新規電力需要(暖房)の各変電所への按分方法

国立社会保障・人口問題研究所の推計値の2045年時点市町村別人口をもとに按分

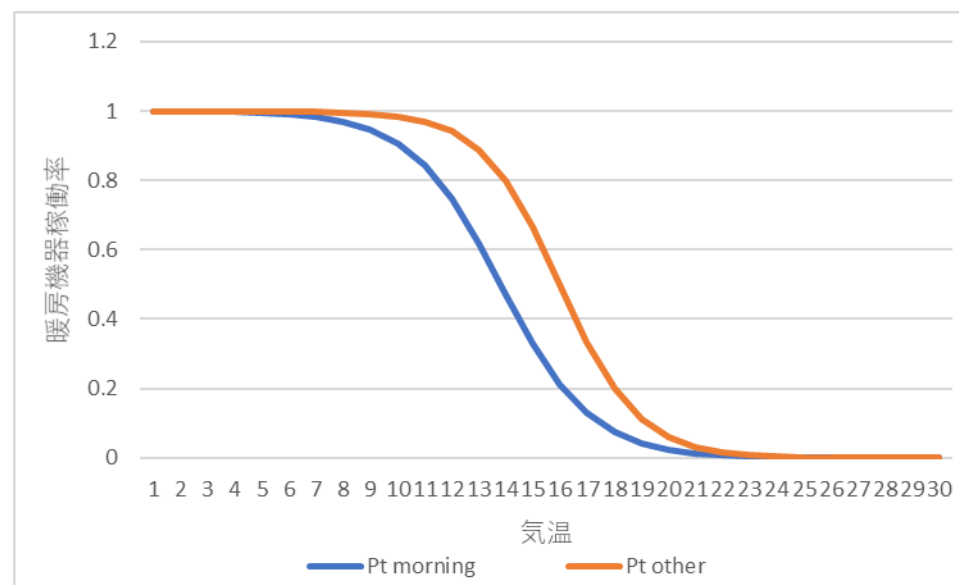
## ③家庭部門エアコンの新規電力需要量の1時間データの作成方法

各変電所の毎時気温ごとにエアコンの稼働率を以下の推計式をもとに計算し、各変電所の新規電力需要量を按分  
気温は気象庁提供の2018年度データを利用

$$P(t) = \frac{1}{1 + a^{-(t-\theta)}}$$

**Table 2** Parameters and coefficients of determination of sigmoidal response function

		a	$\theta$	Coefficient of determination
Cooling season	Morning/Before night time (6 am - 11 pm/9 am - 23 pm)	4.20	30.0	0.9993
	Daytime/Evening (11 am - 8 pm)	3.35	31.0	0.9998
	At night (22 pm - 7 am)	2.81	28.7	0.9998
Heating season	Morning (6 am - 11 pm)	0.55	13.8	0.9997
	Daytime/Evening/Before night time (11 am - 11 pm)	0.50	16.0	0.9999



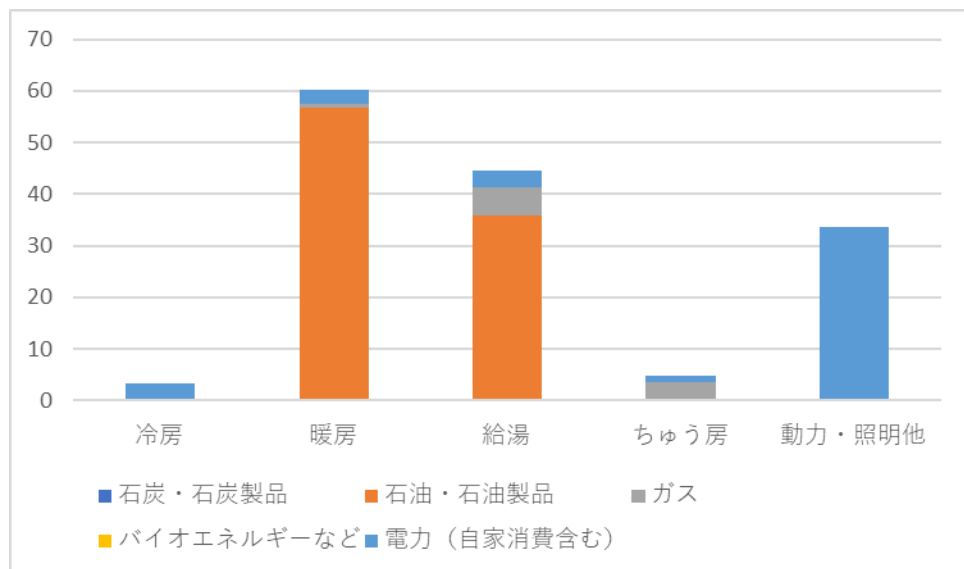
### 3.1.2 家庭部門新規電力需要(給湯)の算定方法

①給湯による新規電力需要

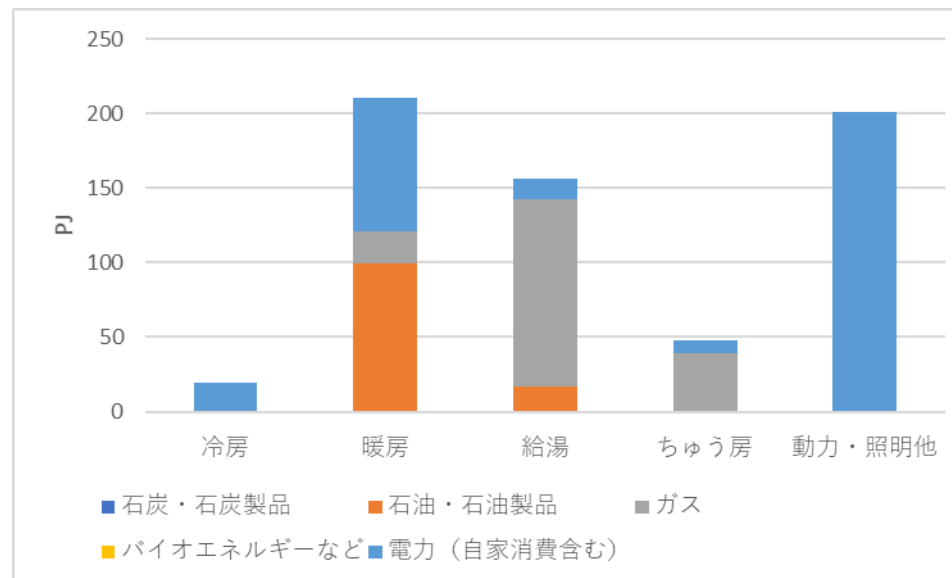
$$\begin{aligned}
 &= 2015\text{年石油消費量} \times \frac{\text{給湯の石油消費量}}{\text{暖房・給湯・調理の石油消費量}} \times \frac{2050\text{年人口}}{2015\text{年人口}} \times \text{電化率} \times \frac{1}{\text{給湯機器のCOP値}} \\
 &+ 2015\text{年ガス消費量} \times \frac{\text{給湯のガス消費量}}{\text{暖房・給湯・調理のガス消費量}} \times \frac{2050\text{年人口}}{2015\text{年人口}} \times \text{電化率} \times \frac{1}{\text{給湯機器のCOP値}}
 \end{aligned}$$

↑ 下図参照                      ↑ 70%~80%                      ↑ 100%                      ↑ 1/4  
 ↑ 国立社会保障・人口問題研究所の推計値利用

北海道地域の家庭部門の用途別・燃料種別エネルギー消費量



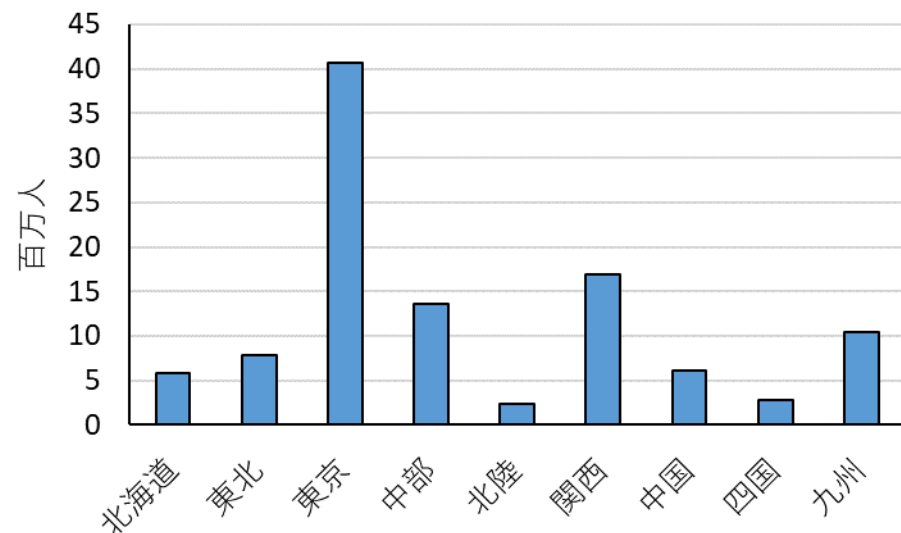
関東地域の家庭部門の用途別・燃料種別エネルギー消費量



環境省「平成31（令和元）年度 家庭部門のCO2排出実態統計調査（確報値）」及び令和元年度エネルギー白書より作成

## ②家庭部門新規電力需要(給湯)の各変電所への按分方法

国立社会保障・人口問題研究所の推計値の2045年時点市町村別人口をもとに按分



出典：国立社会保障・人口問題研究所(2018)日本の地域別将来推計人口（平成30（2018）年推計）を基に筆者作成

## ③家庭部門給湯の新規電力需要量の1時間データの作成方法

再エネが余剰となる時間（電力価格が安価となる時間）に給湯器ヒートポンプが稼働するため需要カーブは設定しない。すなわち、電力価格が安価な時間帯に温水を生成するFlexible Demandとして扱う。

### 3.1.3 家庭部門新規電力需要(調理)の算定方法

①調理による新規電力需要

$$= 2015\text{年石油消費量} \times \frac{\text{調理の石油消費量}}{\text{暖房・給湯・調理の石油消費量}} \times \frac{2050\text{年人口}}{2015\text{年人口}} \times \text{電化率} \times \frac{1}{\text{調理機器のCOP値}}$$

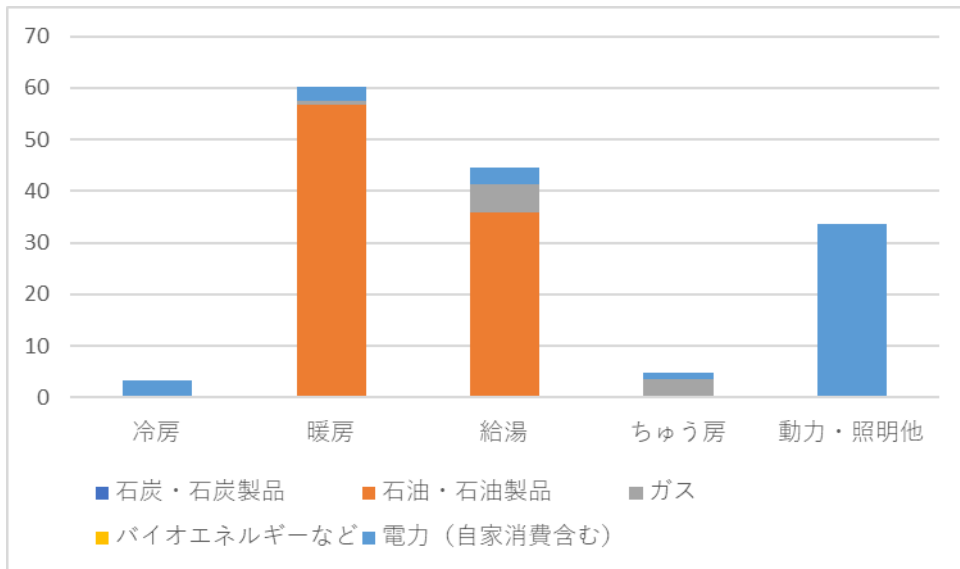
$$+ 2015\text{年ガス消費量} \times \frac{\text{調理のガス消費量}}{\text{暖房・給湯・調理のガス消費量}} \times \frac{2050\text{年人口}}{2015\text{年人口}} \times \text{電化率} \times \frac{1}{\text{調理機器のCOP値}}$$

↑
↑
↑
↑

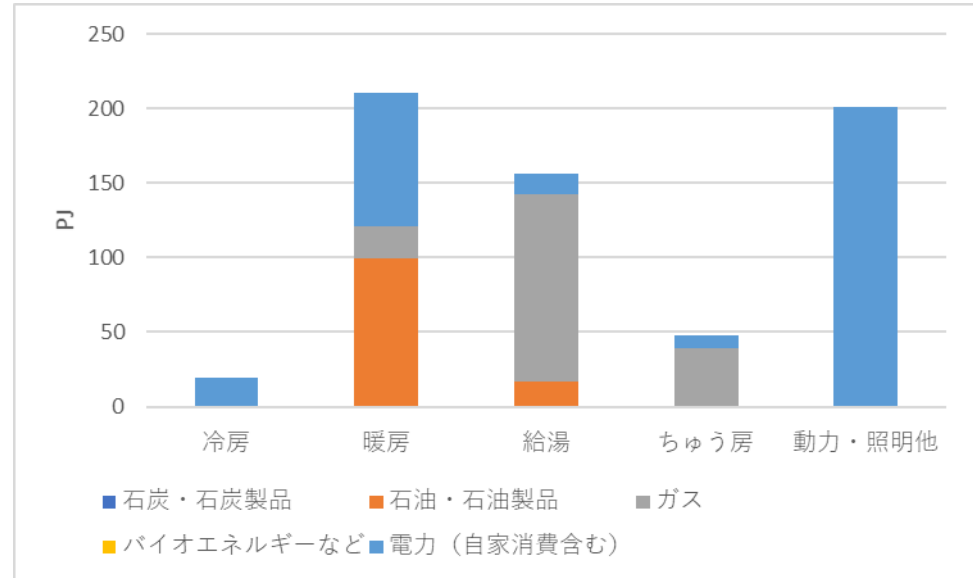
下図参照
70%~80%
100%
1/3

↑ 国立社会保障・人口問題研究所の推計値利用

北海道地域の家庭部門の用途別・燃料種別エネルギー消費量



関東地域の家庭部門の用途別・燃料種別エネルギー消費量





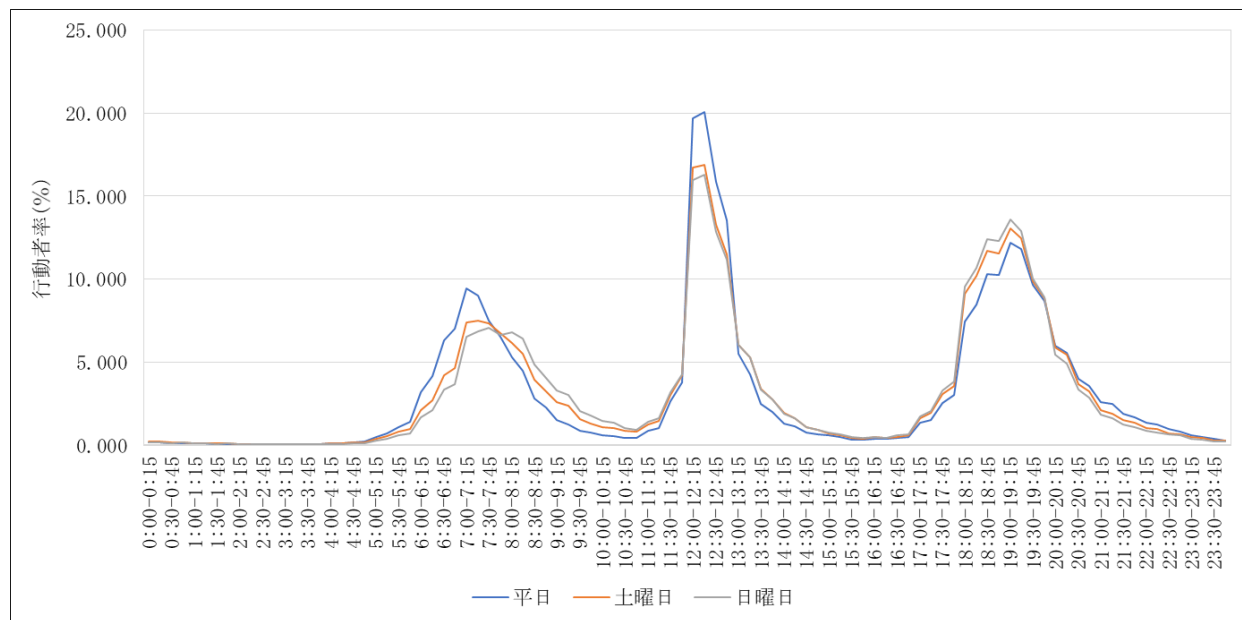
## ②家庭部門新規電力需要(調理)の各変電所への按分方法

国立社会保障・人口問題研究所の推計値の2045年時点市町村別人口をもとに按分

## ③家庭部門調理の新規電力需要量の1時間データの作成方法

食事の時間の分布図をもとに按分

食事の時間の分布図(サンプル数は平日：65,562、土曜日：86,991、日曜日：21,561)

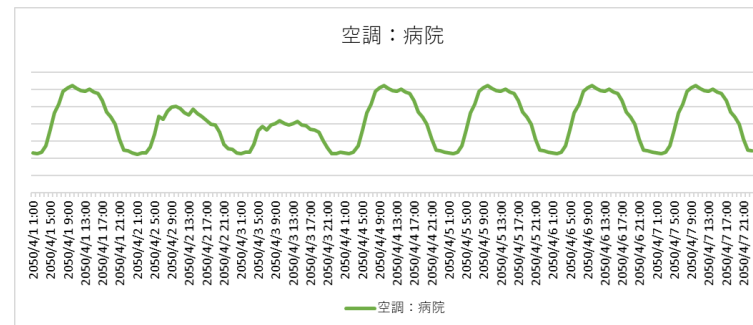
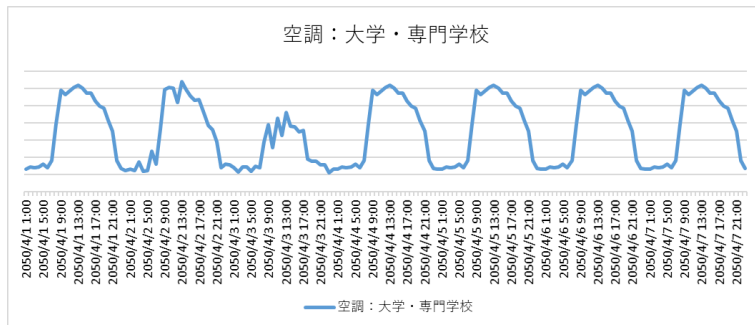
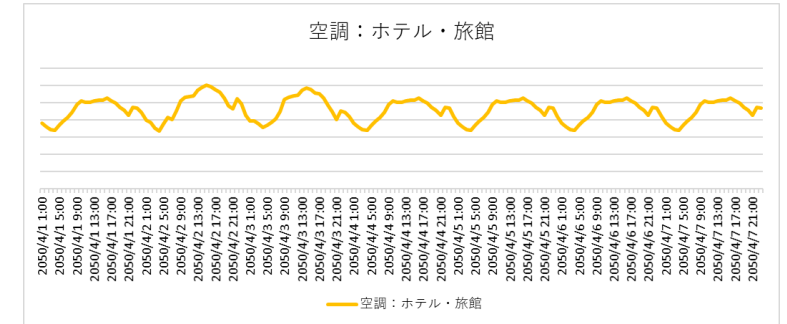
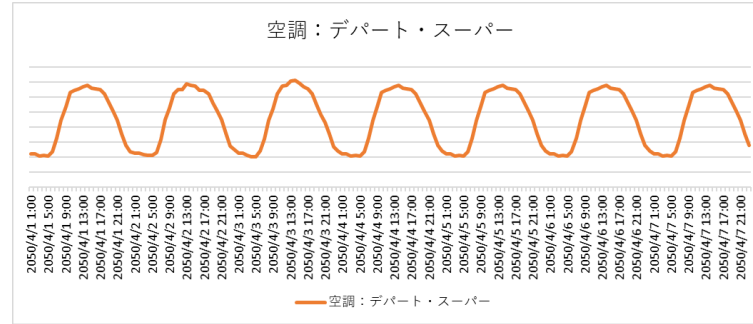
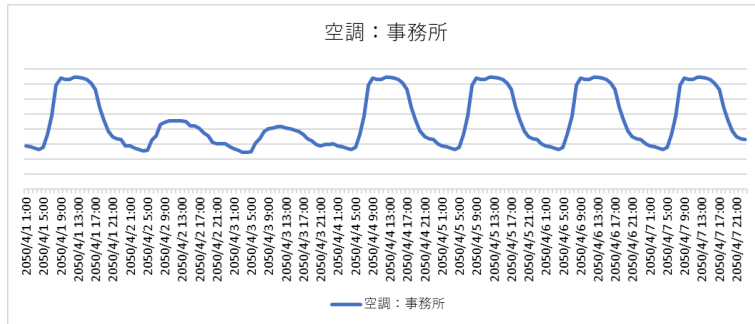


出典：総務省(2016)統計局平成28年社会生活基本調査結果



### ③業務部門空調の新規電力需要量の1時間データの作成方法

- 一般社団法人日本サステナブル建築協会(JSBC)が公開するデータベースDECC (Data-base for Energy Consumption of Commercial buildings)に収録される業種別の月別、曜日別の1時間ごとのエネルギー消費データを利用して、年間の電力需要を1時間ごとに按分
- エネルギー消費データのカテゴリが「照明・コンセント」と「その他」があり、「その他」のカテゴリを空調用のエネルギー消費データとして用いる。
- 最終的に、変電所別業種別の1時間ごとの新規電力需要データが生成される。



### 3.1.5 運輸部門（乗用車）新規電力需要の算定方法

$$\text{①乗用車の新規電力需要} = 2015\text{年石油消費量} \times \frac{2050\text{年人口}}{2015\text{年人口}} \times \text{電化率} \times \text{電化による効率化}$$

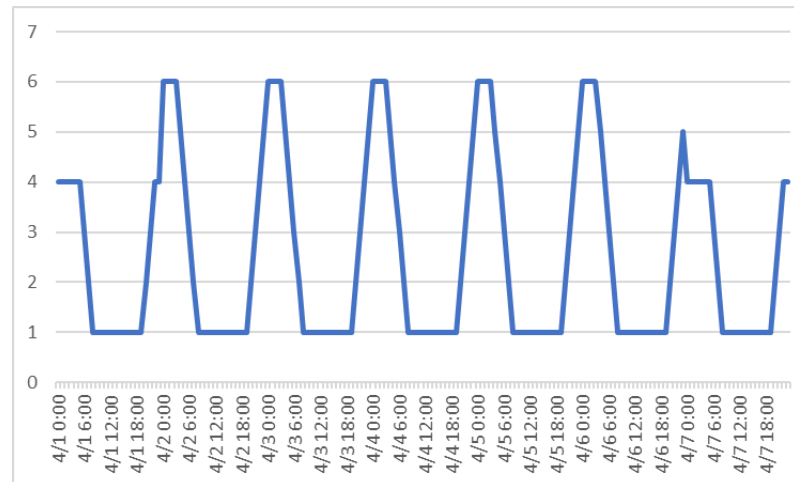
↑ 70%~80%      ↑ 100%      ↑ 0.44  
↑ 国立社会保障・人口問題研究所の推計値利用

#### ②運輸部門（乗用車）新規電力需要の各変電所への按分方法

（社）全国軽自動車協会連合会及び（社）自動車検査登録情報協会の市区町村別車両台数データをもとに按分

#### ③運輸部門（乗用車）新規電力需要の新規電力需要量の1時間データの作成方法

夜間を中心に充電するパターンを生成



### 3.1.6 運輸部門（貨物自動車）新規電力需要・水素需要の算定方法

- 貨物輸送量は2015年と同じ水準（産業部門と同じ）
- 貨物保有台数のうち、50%はEV、50%はFCVと仮定。今回はEV用の電力のみを新規電力需要として計上
- EV貨物自動車の1km当たりのエネルギー消費量は、ディーゼル車量と比較して0.44倍と想定。

①運輸部門（貨物自動車）の新規電力需要 = 2015年石油消費量 × 電化率 × 電化による効率化

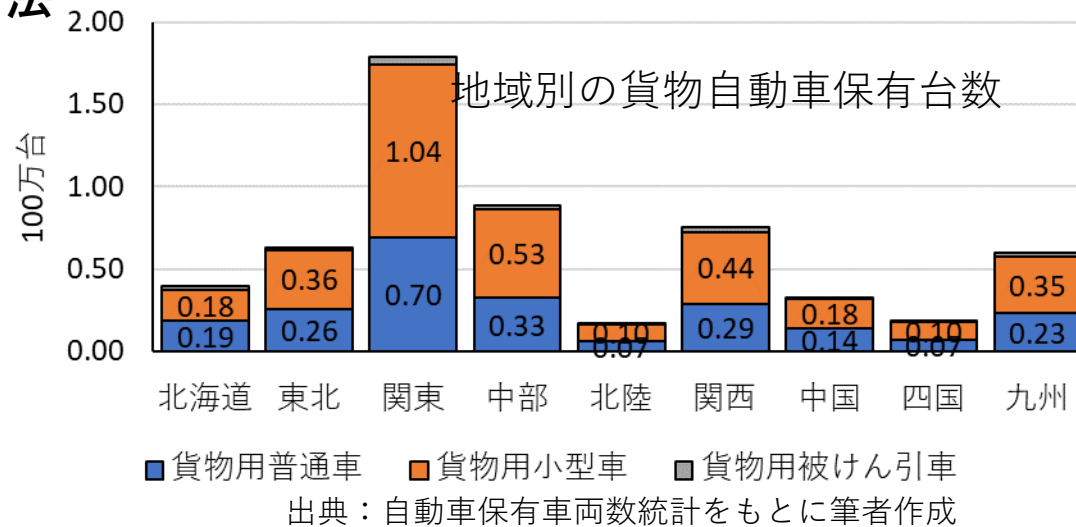
↑  
0.5                      ↑  
44%

②運輸部門（貨物自動車）新規電力需要の各変電所への按分方法

（社）自動車検査登録情報協会の市区町村別車両台数データをもとに按分

③運輸部門（貨物自動車）新規電力需要の新規電力需要量の1時間データの作成方法

年間を通じて均一に按分

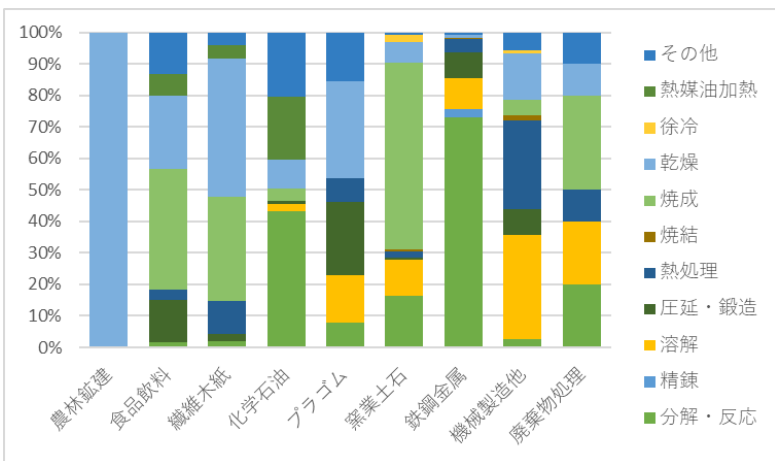


- FCV貨物自動車の水素は後述するグリーン水素製造拠点で製造されると想定。
- EV貨物自動車の1km当たりのエネルギー消費量は、ディーゼル車量と比較して0.75倍と想定。

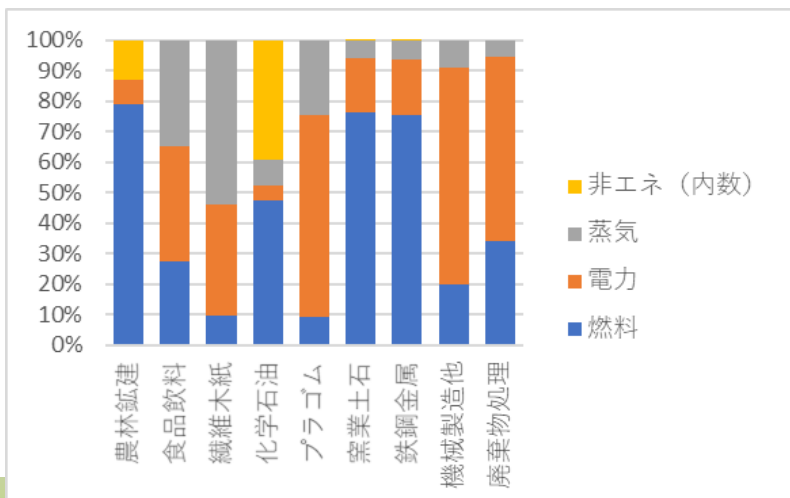
### 3.1.7 産業部門新規電力需要の算定方法

はじめに、三菱総研実施の産業部門の熱需要調査結果から、業種別・用途別に直接加熱需要（2015年度）を整理し、総合エネルギー統計と合成する。これにより、業種ごとに化石燃料及び電力の最終エネルギー消費量を使用目的（a燃焼加熱・bその他燃料・c非エネ利用・d電気加熱・eその他電力）に応じて整理する。

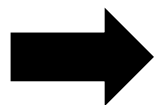
三菱総研調査による業種別のエネルギー用途



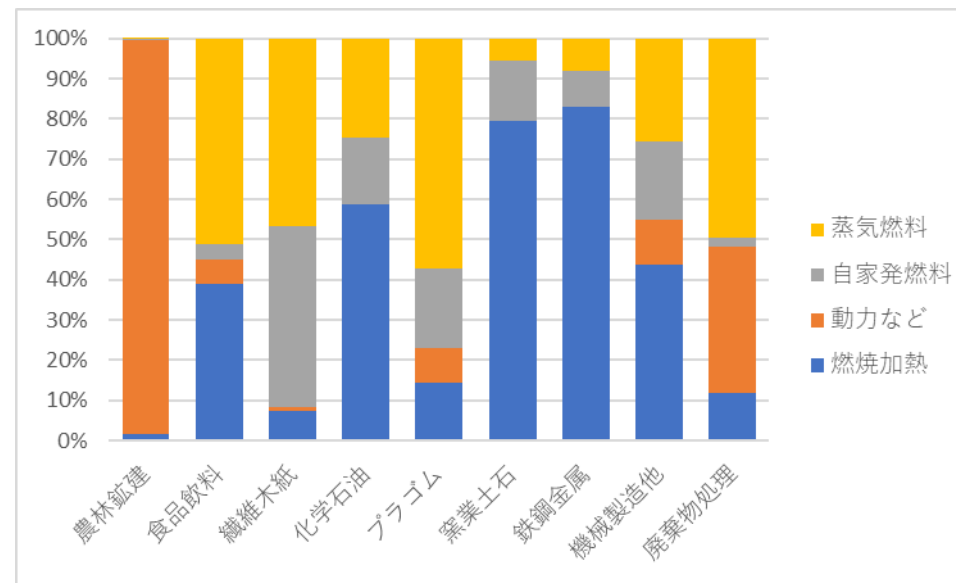
総合エネルギー統計による業種別のエネルギー消費量



分類の整理



本業務で整理した業種別のエネルギー用途



参考文献：三菱総研(2018)平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査

### ①産業部門新規電力需要の算定

前述の整理したデータを用いて、2015年度のそれぞれの業種・エネルギー用途に対し、将来の電化率と電化した場合のエネルギー消費削減率を設定する

#### 業種別の電化率

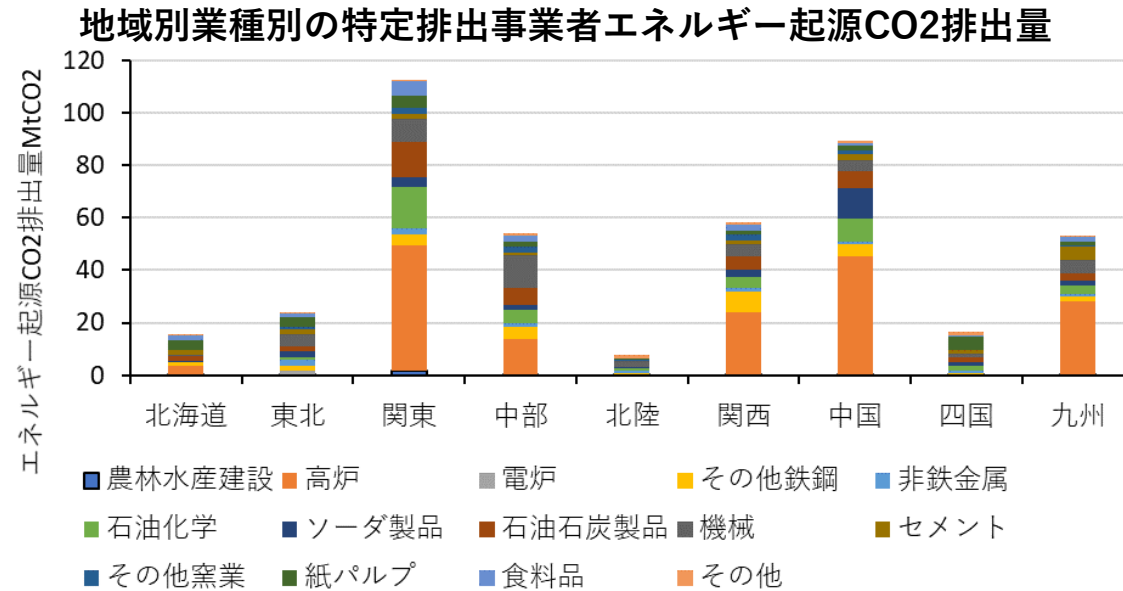
対策強度（対策が行われる割合）	農林鋳建	食品飲料	繊維木紙	化学石油	プラゴム	窯業土石	鉄鋼金属	機械製造 他	廃棄物処 理
燃焼加熱→電気加熱	100%	100%	100%	50%	100%	10%	50%	100%	100%
動力→電動化	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
蒸気→電気ボイラ	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

#### 電化した場合のエネルギー消費削減率

対策効果（現状に対する削減率）	農林鋳建	食品飲料	繊維木紙	化学石油	プラゴム	窯業土石	鉄鋼金属	機械製造 他	廃棄物処 理
燃焼加熱→電気加熱	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
動力→電動化	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
蒸気→電気ボイラ	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%

## ②産業部門新規電力需要の各変電所への按分方法

温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度で公表される企業別のCO<sub>2</sub>排出量データを基に市町村別、変電所別のCO<sub>2</sub>排出量を算定し、按分



出典：温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度H27特定事業者排出者データを基に筆者作成

## ③産業部門新規電力需要の新規電力需要量の1時間データの作成方法

- 月ごとの按分は生産量に関連した統計を利用
- 日ごとの按分は営業日や操業時間帯に関する統計を利用
- 時間ごとの按分は、米国Electric Power Research Institute のLoad Shape Library 8.0を参照



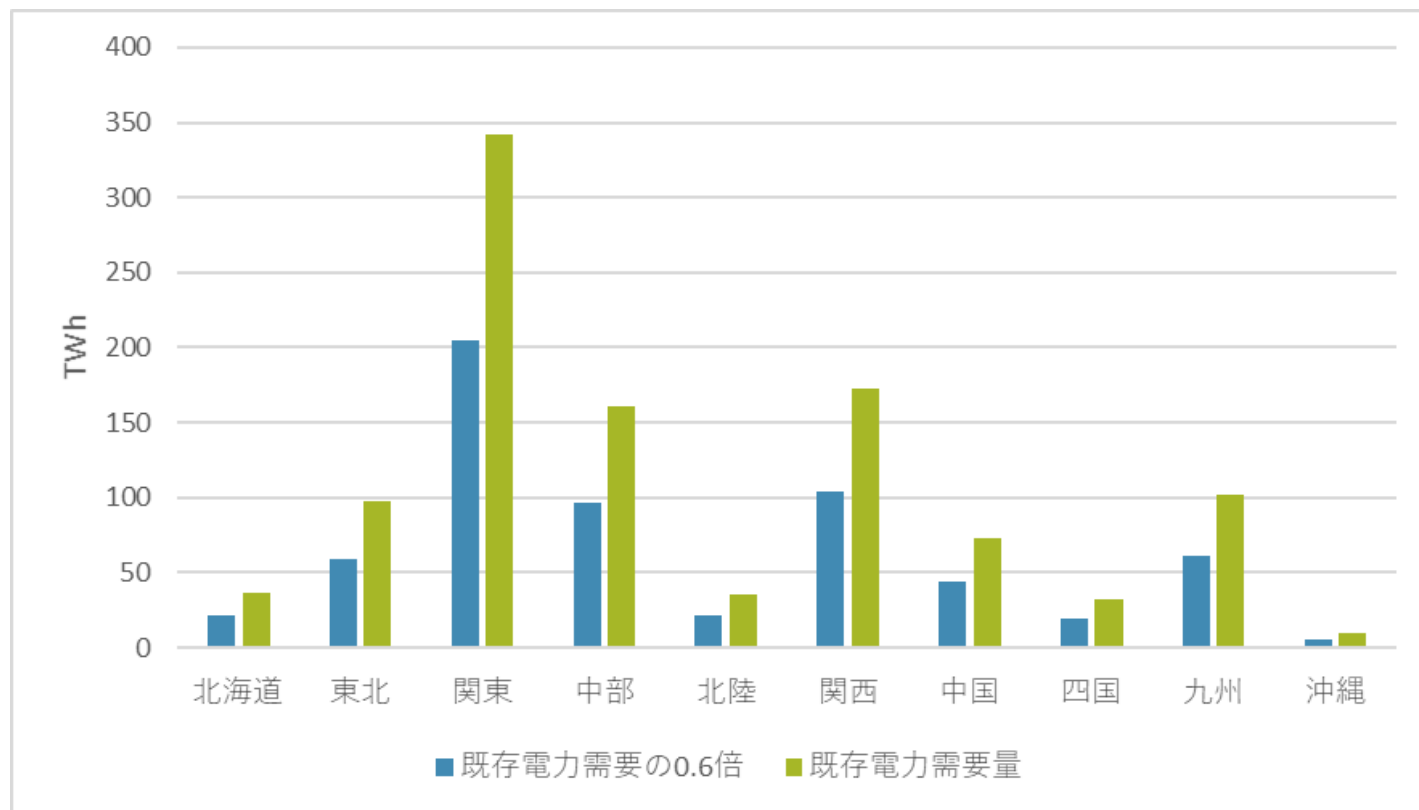
## (参考) 月ごとの電力需要量按分に使用した生産量関連の統計一覧

電力需要推計分類	パラメーター
農林水産建設	月ごとの変動を想定せず
高炉	月次生産統計（日刊工業新聞）
電炉	月次生産統計（日刊工業新聞）
その他鉄鋼	高炉＋電炉の粗鋼生産量
非鉄金属	月ごとの変動を想定せず
石油化学	石油化学工業協会主要石油化学製品生産実績エチレン月次生産量
ソーダ製品他	月ごとの変動を想定せず
石油石炭製品	石油化学工業協会主要石油化学製品生産実績エチレン月次生産量
機械	経済産業省生産動態統計月次生産量（普通乗用車）
セメント	経済産業省生産動態統計月次生産量（セメント）
その他窯業	経済産業省生産動態統計月次生産量（板ガラス）
紙パルプ	経済産業省生産動態統計月次生産量（クラフトパルプ・段ボール原紙等）
食料品	月ごとの変動を想定せず
その他	月ごとの変動を想定せず

注：月ごとの変動を想定していない業種は、適切なデータの入手が困難であること、新規の電力需要量が小さいことによる推計の簡素化したことなどの理由から月ごとの変動を想定していない。

### 3.1.7 現在の電力として供給されている電力需要の2050年値想定

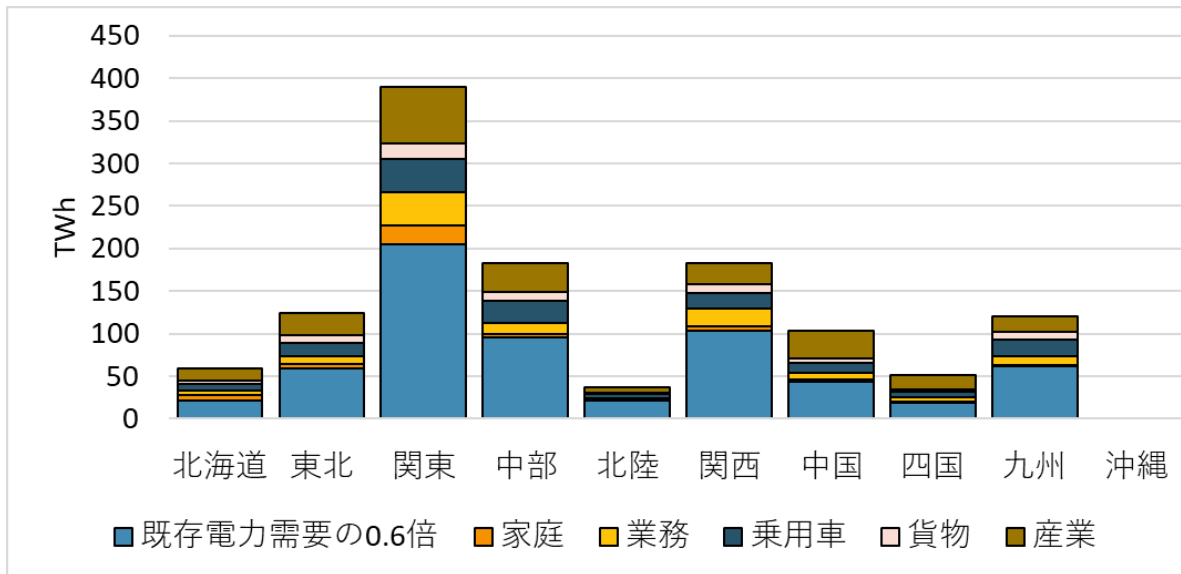
人口減（日本全体で0.82倍）と電力機器の省エネの効果을考慮して、2018年実績値（全国で1051TWh）の0.6倍とする。



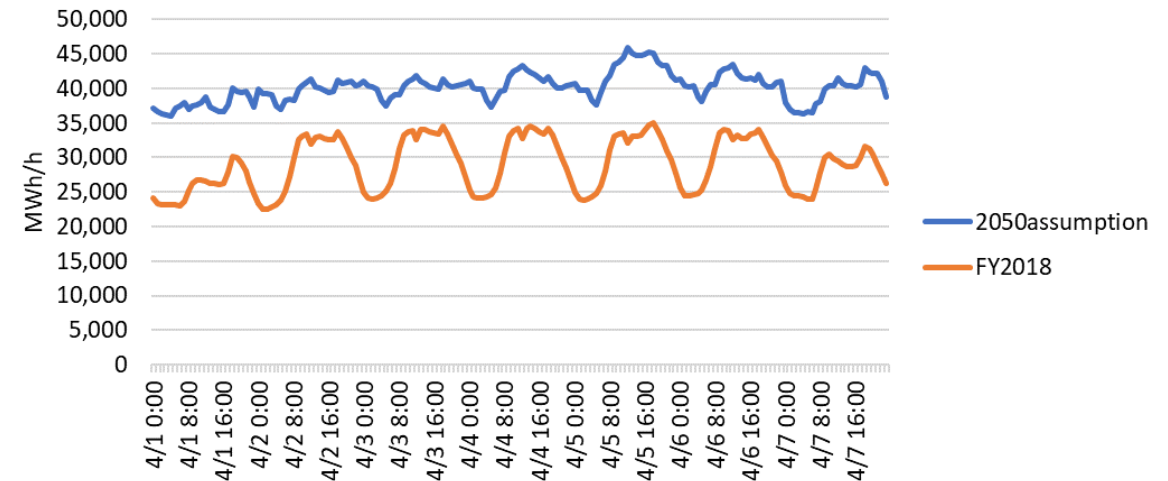
### 3.1.8 2050年の電力需要量の算定結果まとめ

- 2050年の電化後の電力需要量（水素専焼火力及びFCV貨物用グリーン水素製造のための電力需要除く）は、日本全体で**1252TWh**と算定された。
- FCV貨物用グリーン水素製造のための電力需要は、**120TWh**と算定された。

地域別業種別年間電力需要2050年算定値



例：関東地域の4/1-4/7の1時間ごとの電力需要



## 3.2 地内送電線の増強

新規電化による電力需要増及び公表されている増強計画に関連した地内送電線を増強

地域	電力需要の増加により、本分析において増強が必要となる送電線	現在公表されている流通設備計画（送電線の増強計画）や増強検討資料に関連して本分析において増強した送電線
北海道	23	2
東北	5	10
関東	13	1
中部	4	2
北陸	1	
関西	5	5
中国	1	
四国	5	
九州	10	3
<b>合計</b>	<b>67</b>	<b>23</b>

参考情報：OCCTO(2022) 2022年度年次報告書供給計画の取りまとめ  
北海道電力(2019)北海道の基幹系統増強案について

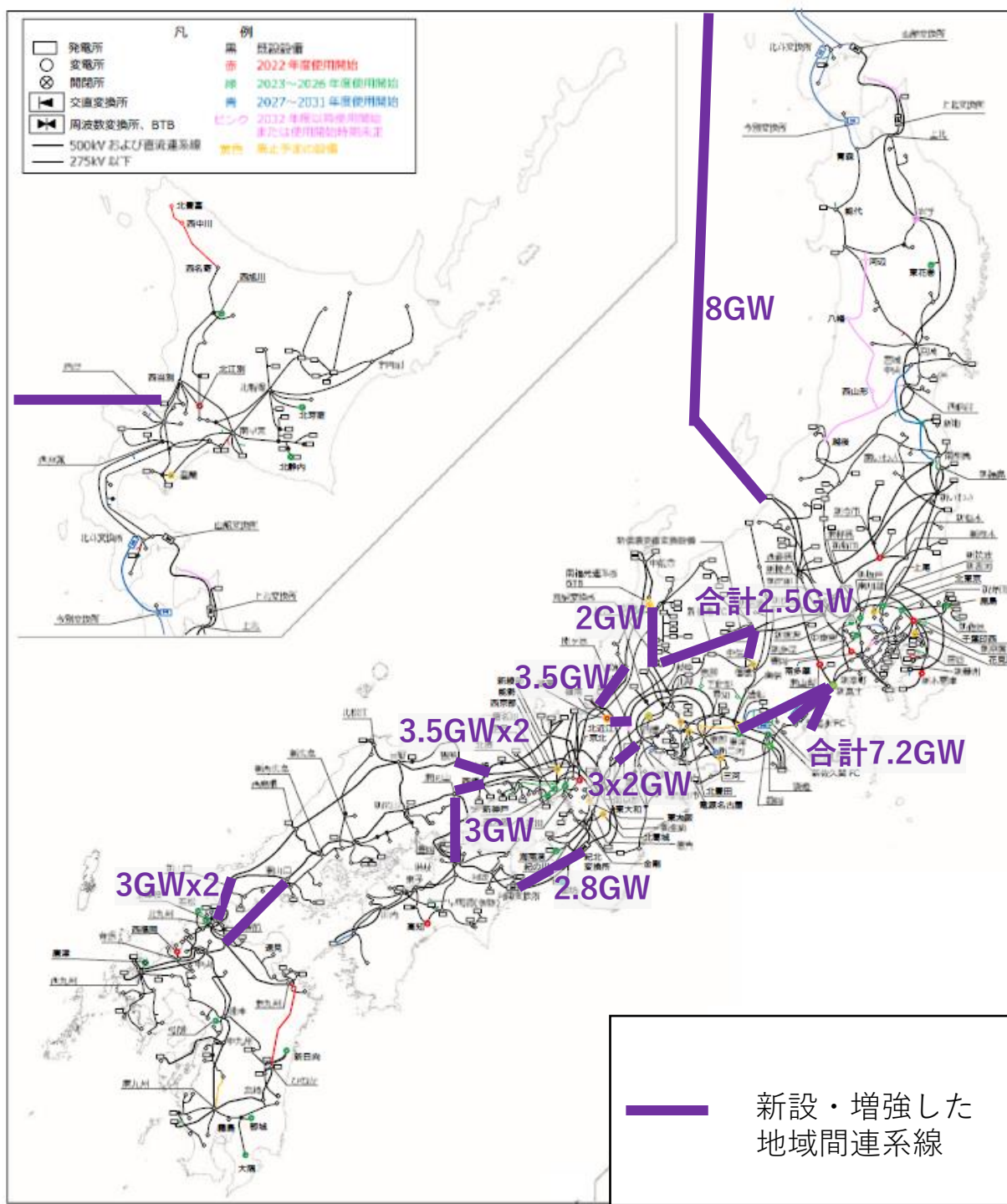
## 広域融通を想定した地域間連系線の増強

OCCTO(2021)「マスタープラン検討に係る中間整理」を参考にしつつ、各送配電会社の地内基幹系統と同程度の運用容量になるように、連系線の運用容量を設定

### 新設する送電線

- 西当別（北海道）～柏崎刈羽原発（関東）間：8GW（海底直流ケーブル）
- 東山口（中国）～豊前（九州）間：3GW

\* 2050年のシミュレーションでは、全国を一つのコントロールエリアとして電力の広域融通が円滑にできるように設定している。



## 3.3 調整力

系統に接続され、調整力として利用されるEVの想定

乗用車の系統に接続されるEVの最大値想定

	乗用車	軽自動車	合計
2030年度の自家用乗用車EV・PHEV台数(万台)	3,180	1,740	4,920
保有台数のうち8割が調整機能として使えると想定を置いた場合の台数(万台)	2,544	1,392	3,936
1台あたりの出力(kW/台)	6	6-	
日本全体で利用可能な出力(GW)	153	84	236
1台当たりの容量(kWh/台)	80	40-	
蓄電池の使用割合	0.50	0.50-	
日本全体で利用可能な蓄電容量(GWh)	1,018	278	1,296

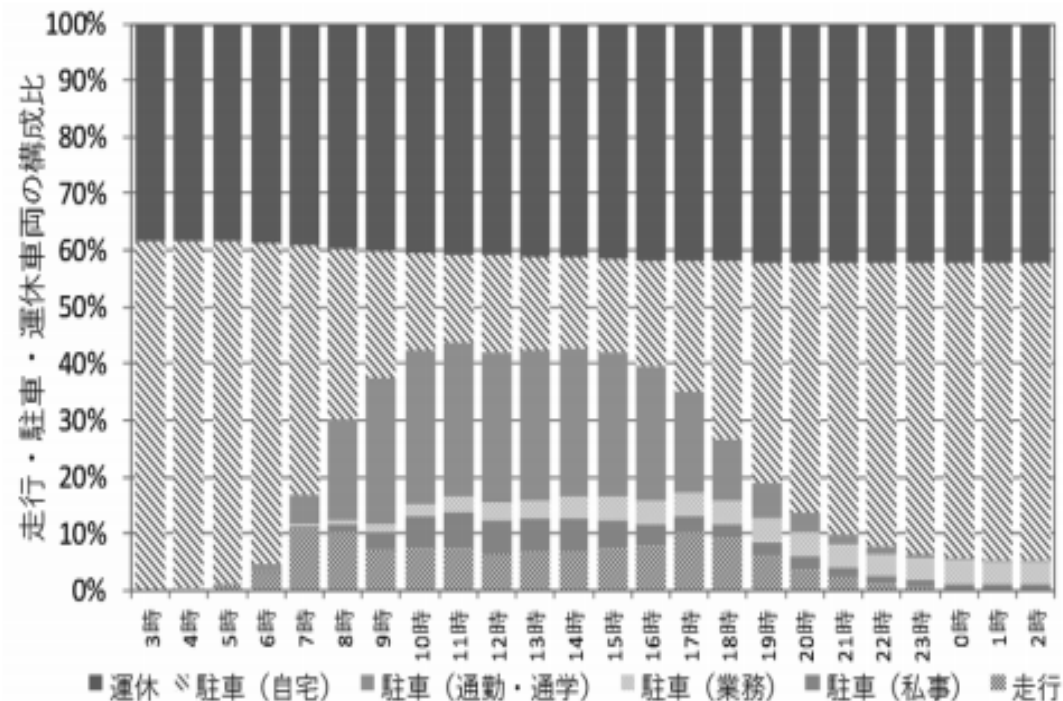
注：実際に電力需給の調整力として系統に接続されるEVは、送電線の運用容量の制約によって少なくなる。

貨物自動車の系統に接続されるEVの想定

本分析では、貨物EVの電池を利用した調整力は想定しない

参考：走行している自動車は、昼間においても全体の1割以下

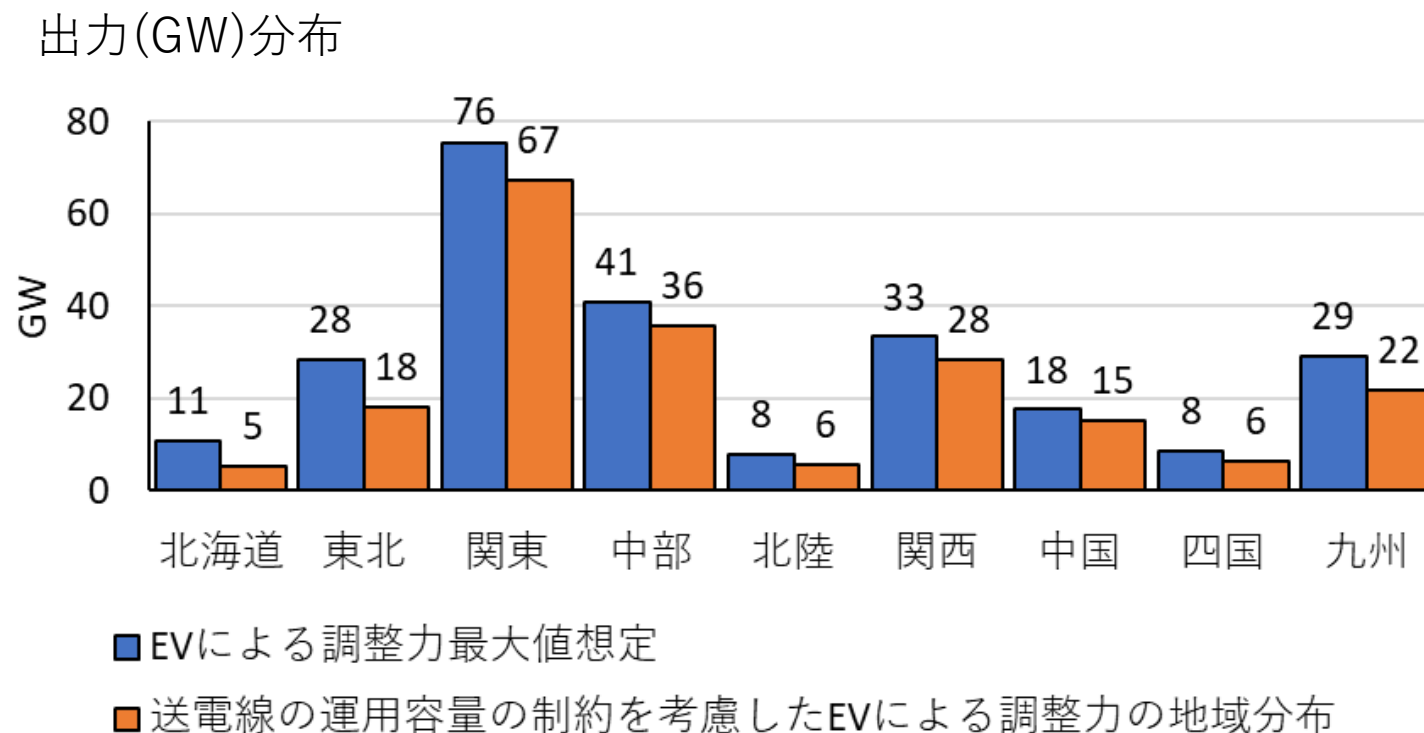
自動車の時間帯別稼働状況(2018)



出典：北村ほか「データから読み解く自動車の使われ方の変化」2018

## EVによる調整力の分布

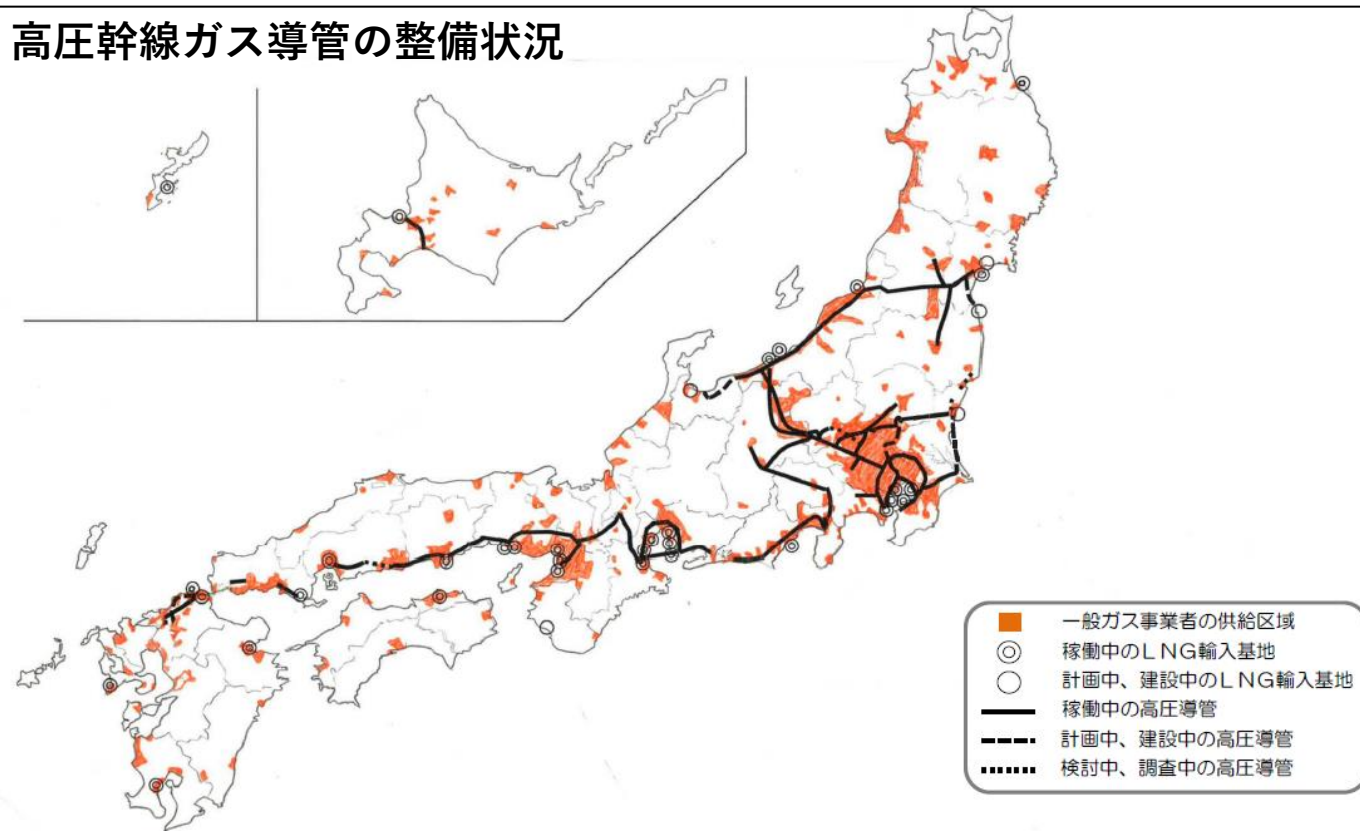
北海道など送電制約が大きい地域は、EVの調整力最大値（ポテンシャル）が十分に活用できないため、送電制約に合わせて入力値を調整している。



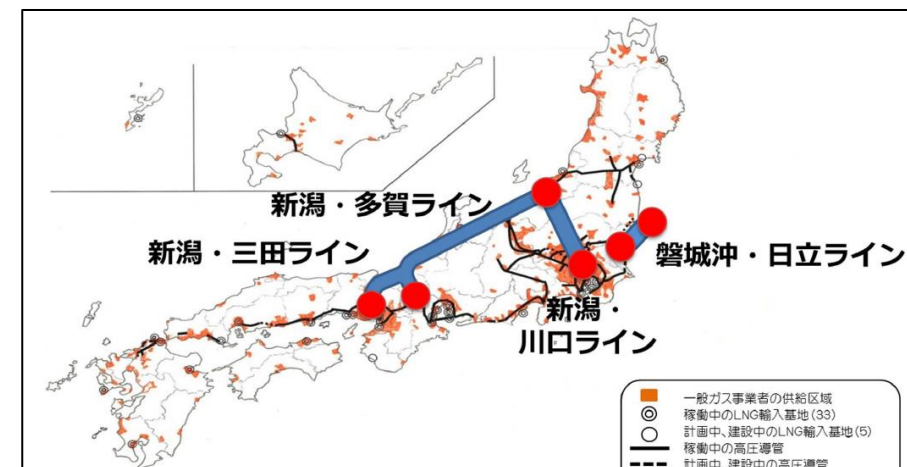
# 水素専焼火力による調整力の想定

1. 既存のすべてのガス火力発電の設備を水素専焼火力発電として利用できるように設備が改修される。
2. 高圧幹線ガス導管に国内再エネで生成したグリーン水素が注入され、各水素専焼火力間で融通される。
3. 経産省の検討した広域高圧幹線ガス導管が整備され、東京-新潟-中部-近畿がつながる。
4. 新潟(LNG基地758個分の貯蔵能力)、常磐沖(LNG基地53個分)、千歳、北九州に**休廃止ガス田等を利用した大規模地下貯蔵**が整備され、グリーン水素が貯蔵可能となる。
5. 洋上風力の電力を利用したグリーン水素製造拠点<sup>①</sup>が、高圧幹線ガス導管ネットワークや地下貯蔵地近傍に複数整備される。
6. これらの設備を利用して、洋上風力発電の発電電力量が多い時期に製造した水素を長期に保存し、変動性再エネの発電電力量が少ない時間帯に、水素専焼火力発電が国内グリーン水素で電力を供給できる。
7. 水素専焼火力のシステム効率を0.54と想定。

## 高圧幹線ガス導管の整備状況



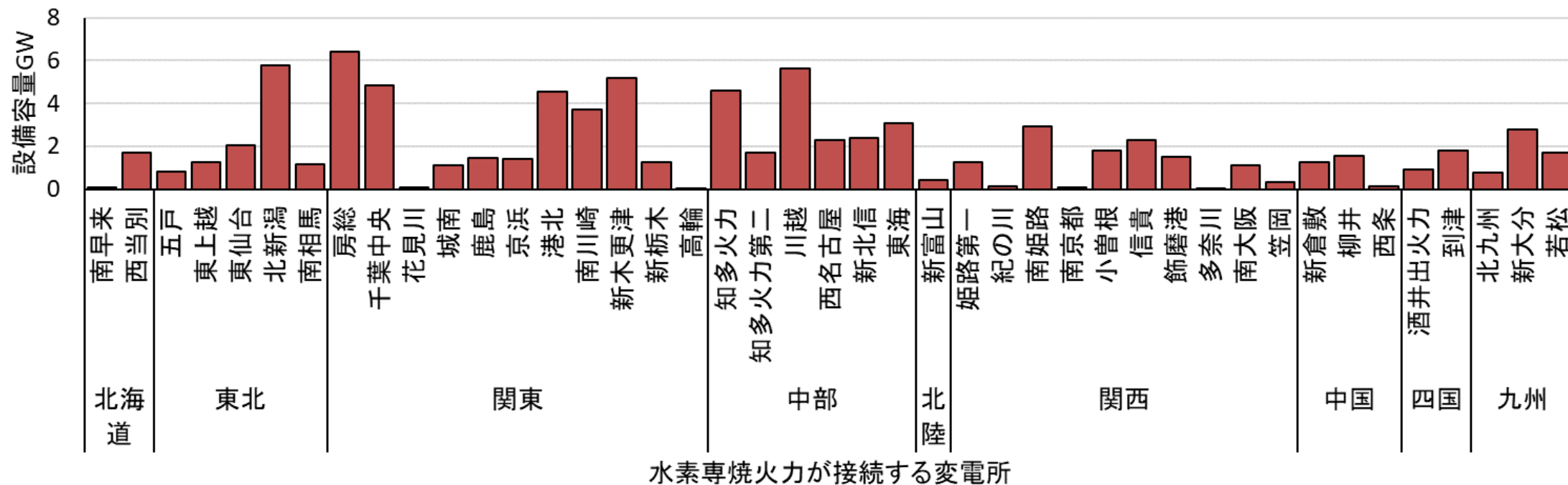
## 参考：過去検討された高圧幹線ガス導管整備案



出典：METI(2016)第31回ガスシステム改革小委員会事務局提出資料:導管整備方針について  
METI(2016)第32回ガスシステム改革小委員会事務局提出資料:小売全面自由化の詳細制度設計等について



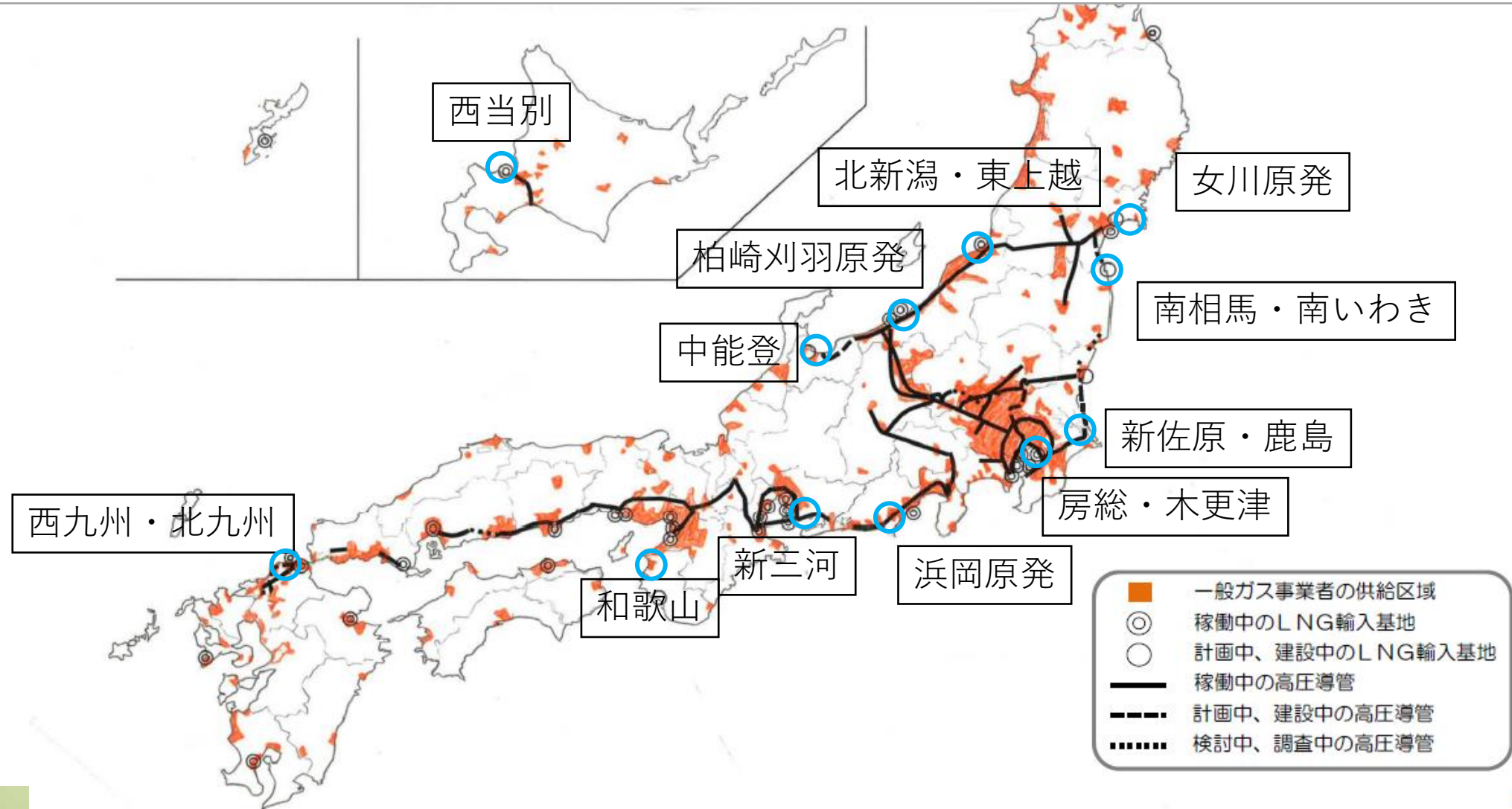
# 水素専焼火力の設備容量分布



## 水素専焼火力及びFCVで使用するグリーン水素製造拠点想定箇所

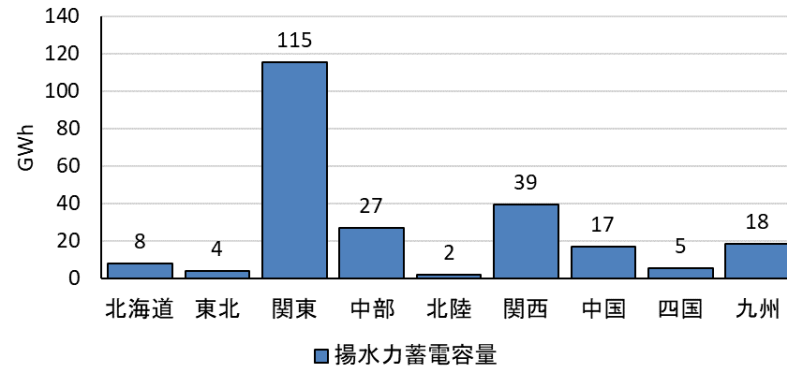
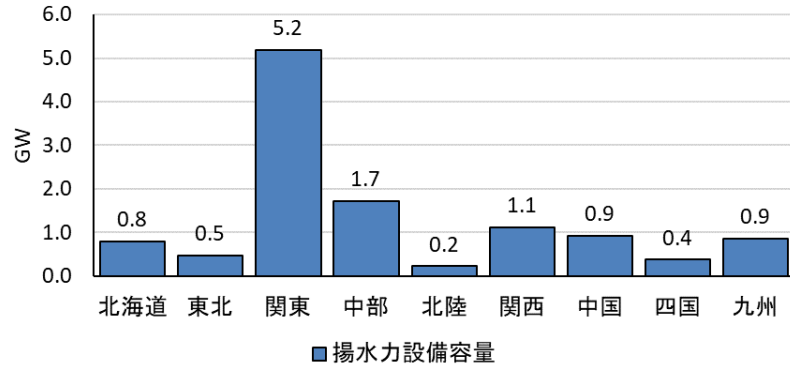
グリーン水素製造拠点は浮体風力発電のアクセスポイントでかつ高圧幹線ガス導管ネットワークに近いところを想定

グリーン水素製造能力は、シミュレーションを通じて日本全国で**197GW**と算定された。算定プロセスは後述。



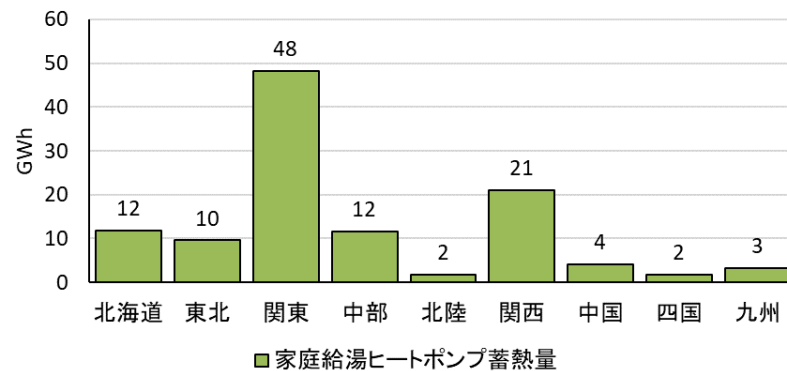
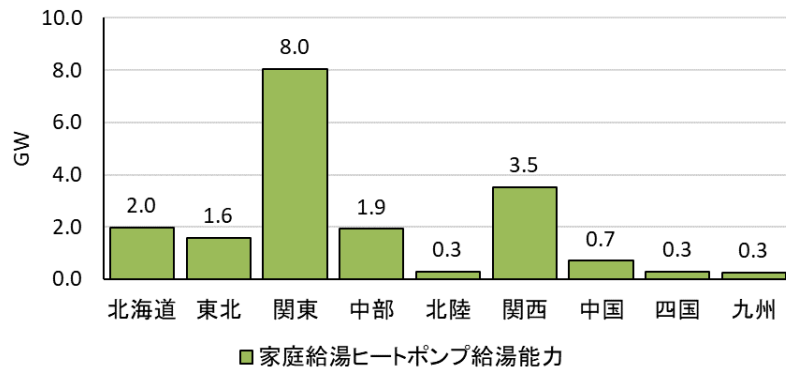
## 揚水式水力発電

揚水式水力発電の出力は日本全国で11.5GW。蓄電容量は、日本全国で235GWhと想定。



## 家庭給湯ヒートポンプ

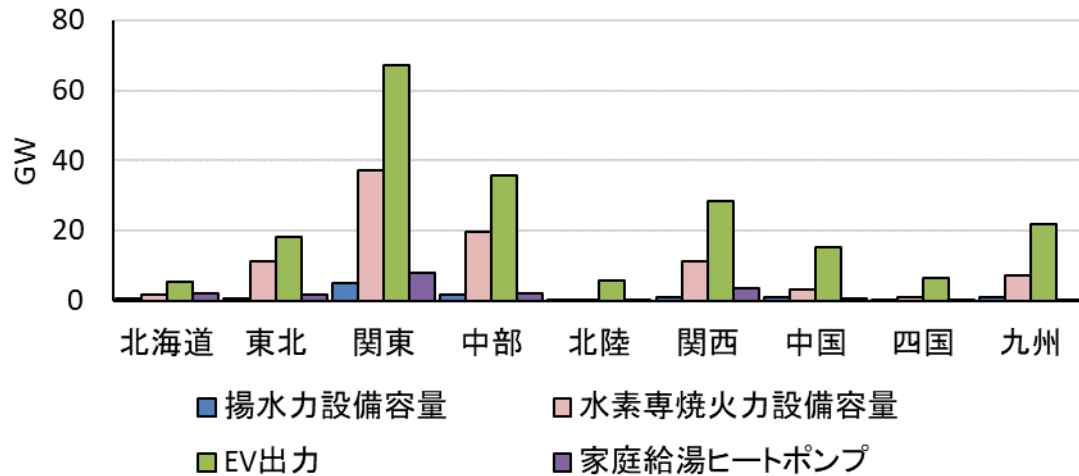
家庭給湯ヒートポンプは日本全国で19GW。蓄熱量は、日本全国で113GWhと想定。  
ただし、DRによる給湯時間のシフトは、1日以内という制限を設けている。



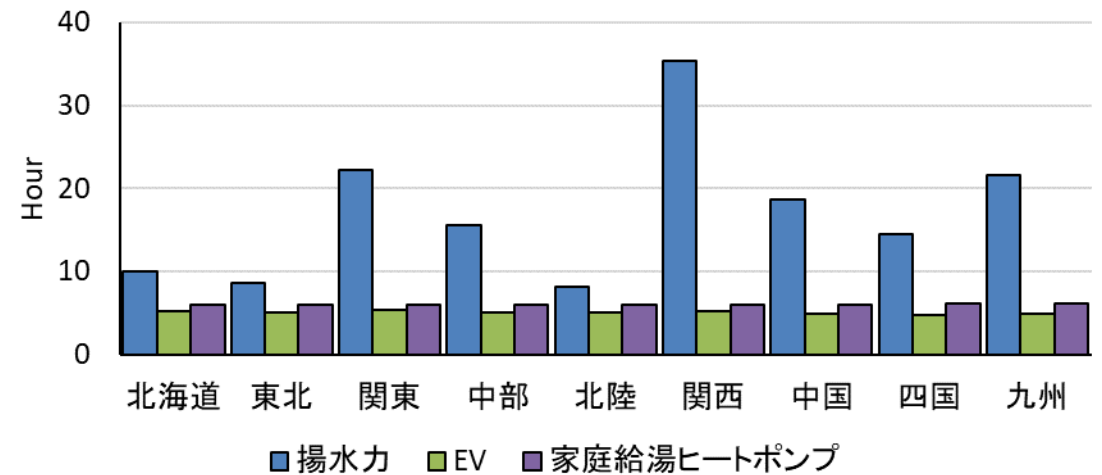
## 調整力まとめ

- 調整力の出力（ $\Delta$  kW）はEVが最大。
- 一方で、蓄電容量が他の調整力と比較して小さいため、最大出力で稼働可能な時間が小さい。  
（水素専焼火力の最大稼働可能時間は24時間以上）
- 出力と蓄電量はシミュレーションで最適化される。そのため、必ずしも最大出力で稼働するとは限らない。

### 調整力の種類別出力（ $\Delta$ kW）



### 最大出力で稼働可能な時間(hour)



## 3.4 再エネの設備容量想定

### 送電線制約を考慮した陸上・洋上風力発電、太陽光発電、EV設備容量、水素製造能力の算定方法

#### 算定の概要

立地場所/アクセスポイントの再エネポテンシャルの範囲内で設備容量を算定する。

年間の電力需要、EVの調整力、各変電所に接続する送電線の運用容量に応じて、各電源の導入容量を算定

#### 1. 洋上風力発電の設備容量算定

- 洋上風力発電のアクセスポイントを選定し、接続する送電線の運用容量に応じて設備容量を定める。

#### 2. 陸上風力発電の設備容量算定

- 各変電所内の電力需要量、送電線の運用容量をもとに導入可能量を定める。導入可能量から洋上風力発電の設備容量を差し引く。
- 陸上風力発電の設備容量合計が日本全体で40GWとなるように設備容量を按分方式で調整する。

#### 3. 太陽光発電の設備容量算定

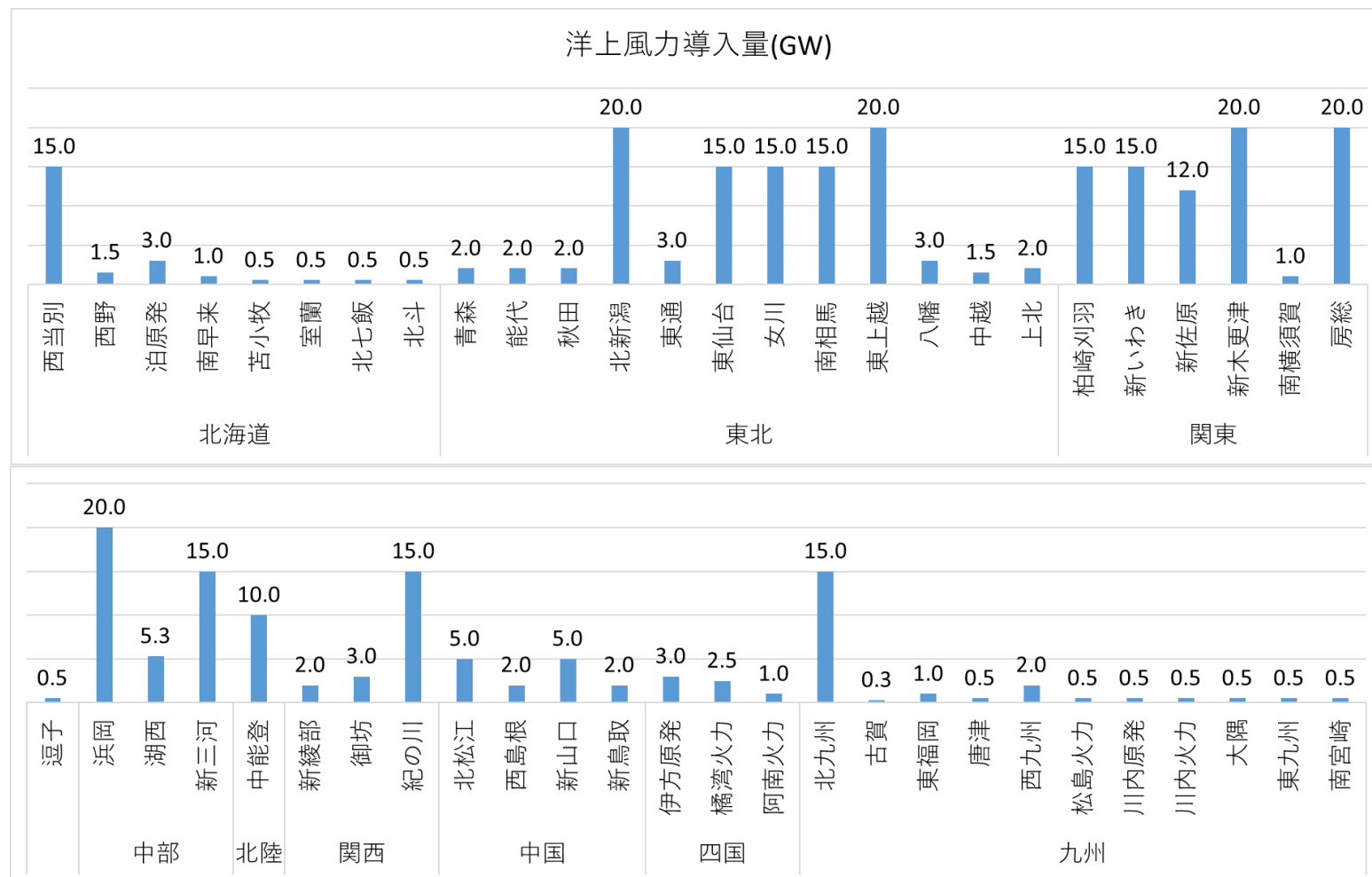
- 各変電所内の電力需要量、送電線の運用容量、EVの潜在的導入量をもとに太陽光発電の導入可能量を定める。導入可能量から洋上風力発電と陸上風力発電の設備容量を差し引く。

#### 4. 洋上風力発電の設備容量の再計算と水素製造能力の算定

- 電力需要（系統内の電力需要＋水素専焼火力用グリーン水素製造のための電力需要）と再エネ（陸上洋上風力、太陽光、水力、地熱、バイオマス）の発電電力量の合計値が等しくなるように、洋上風力発電の設備容量を再計算する。洋上風力の増加分は水素製造拠点に接続する洋上風力発電に計上する。
- 洋上風力発電の発電電力量のうち、送電線の運用容量の制約から系統内に送電できない分は、水素専焼火力・FCV貨物自動車両用グリーン水素製造のための電力需要となると想定。
- 水素製造装置の容量（GW）の導入が過剰にならないように繰り返しシミュレーションを行い最適化する。

## 洋上風力発電設備容量想定

- 東北地方北部は、ガス田は存在するが、ガス火力発電または高圧幹線ガス導管ネットワークがなく、製造した水素を需要地まで供給できないことから、グリーン水素製造拠点を想定することができない。そのため、洋上風力発電の設備容量が他地域よりも小さくなっている。

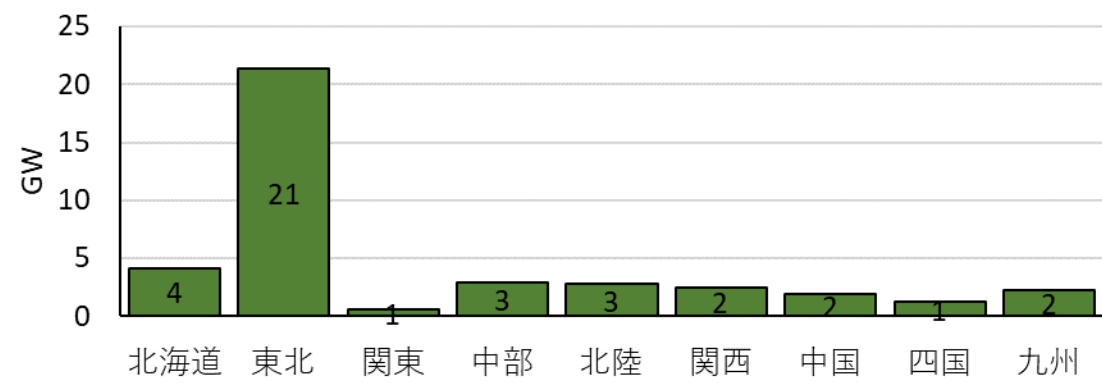


洋上風力発電の設備利用率は45%  
 (参考：IEA World Energy Outlook 2021)

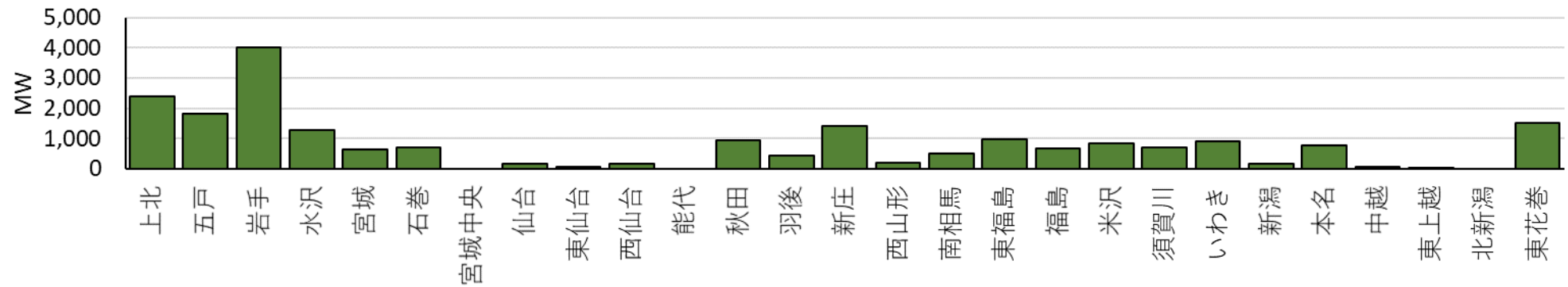
# 陸上風力発電設備容量想定

陸上風力発電の設備利用率は30%  
(参考：IEA World Energy Outlook 2021)

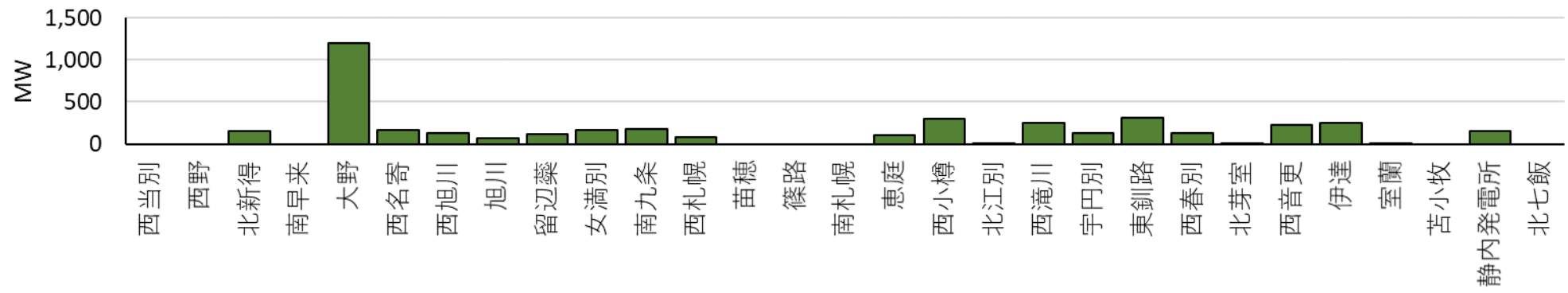
地域別設備容量



東北地域内の変電所別設備容量



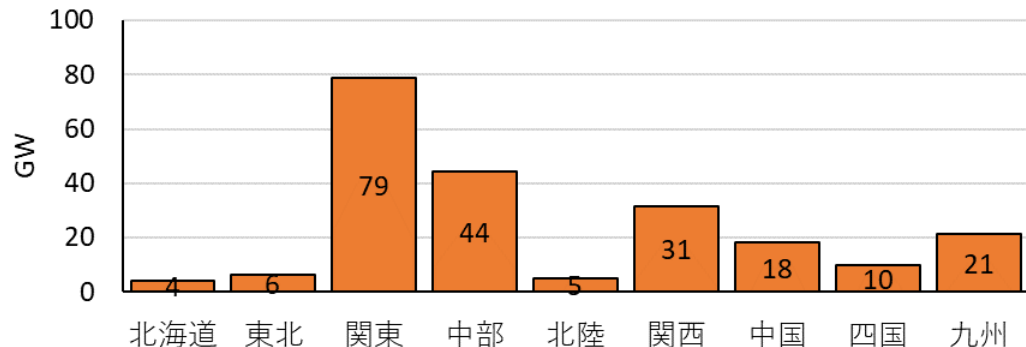
北海道地域内の変電所別設備容量



# 太陽光発電設備容量想定

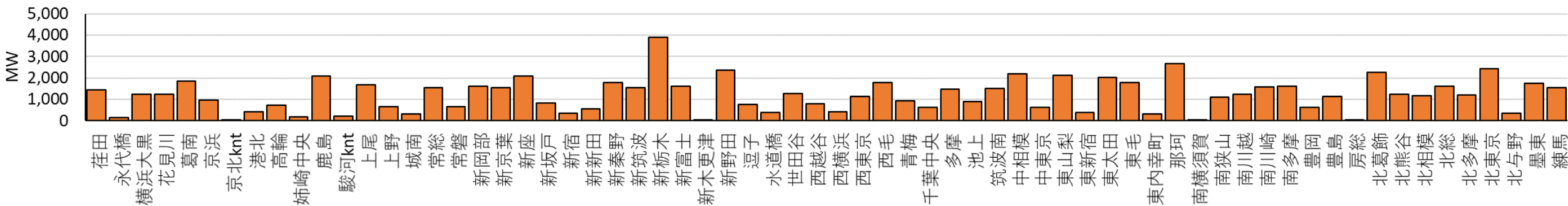
都市近郊の太陽光発電導入量は、EV蓄電池の量と均衡する量を上限としている。

## 地域別設備容量

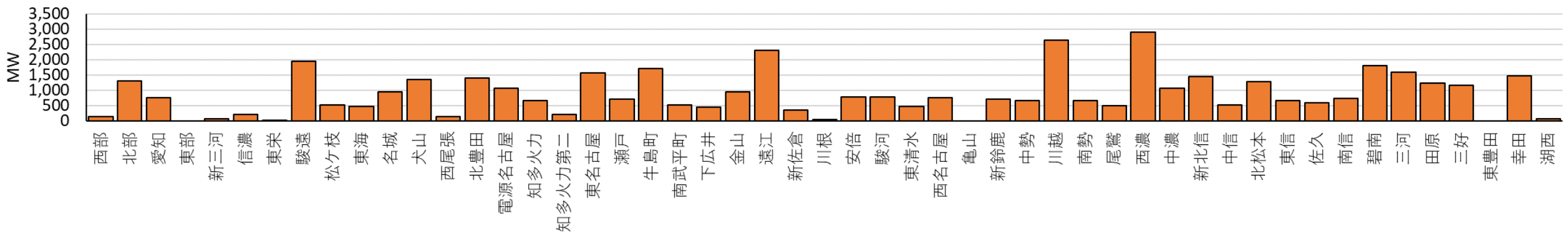


太陽光発電の設備利用率は13-16%  
 (参考: IEA World Energy Outlook 2021  
 及び環境省REPOS)

## 関東地域内の変電所別設備容量



## 中部地域内の変電所別設備容量

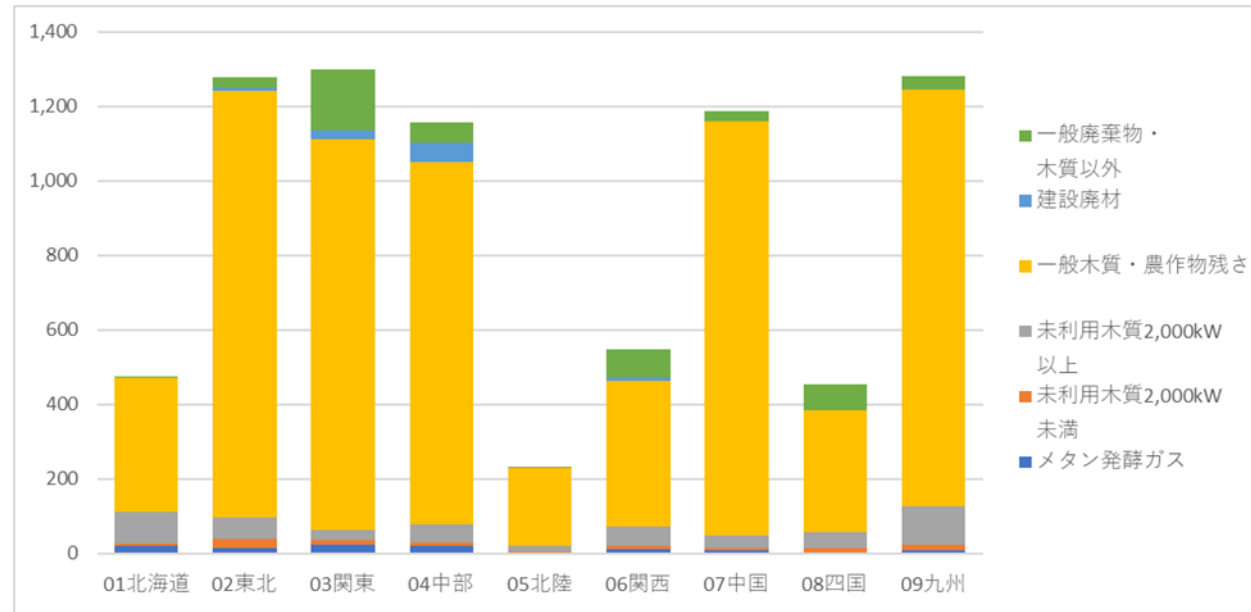




## バイオマス発電設備容量想定

第6次エネルギー基本計画で想定される2030年目標値と同量の8GWを固定価格買い取り制度で認定された設備容量（市区町村別）で按分

電力地域別バイオマス種別のFIT認定容量

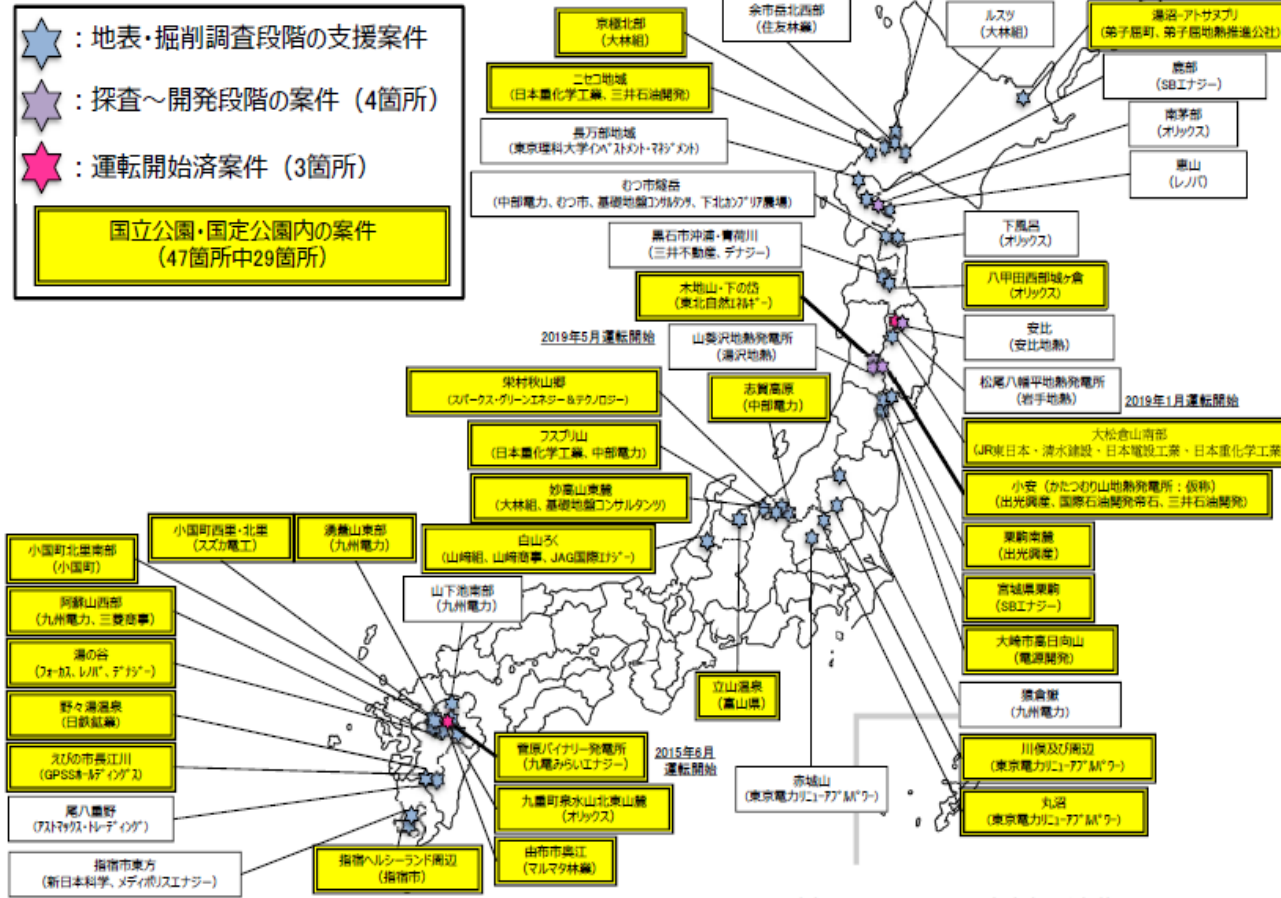


出典：資源エネルギー庁、「エリア別の認定及び導入量」を基に筆者作成  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/kaitori/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/)

# 地熱発電設備容量想定

第6次エネルギー基本計画で想定される2030年目標値と同量の1.5GWと想定。  
 新規地熱発電の設備容量1GWを開発調査が行われている立地の47か所で等分した。

## 地熱開発の進捗状況 (経産省・JOGMECによる支援案件)



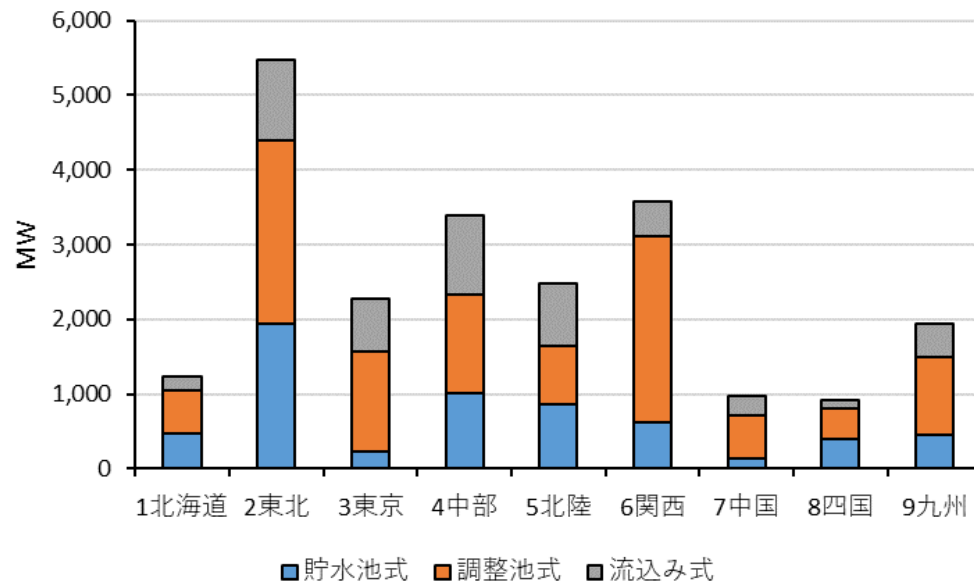
※R3時点 ※出力1,000kW以上(想定含む)を抜粋

出典：環境省「地域共生型の地熱利活用に向けた温泉法及び自然公園法の運用等について」(2021年7月19日資料)  
<https://www.env.go.jp/nature/onsen/council/kyoseichinetsurikatsuyo/01kyoseirikatsuyo/shiryo02.pdf>

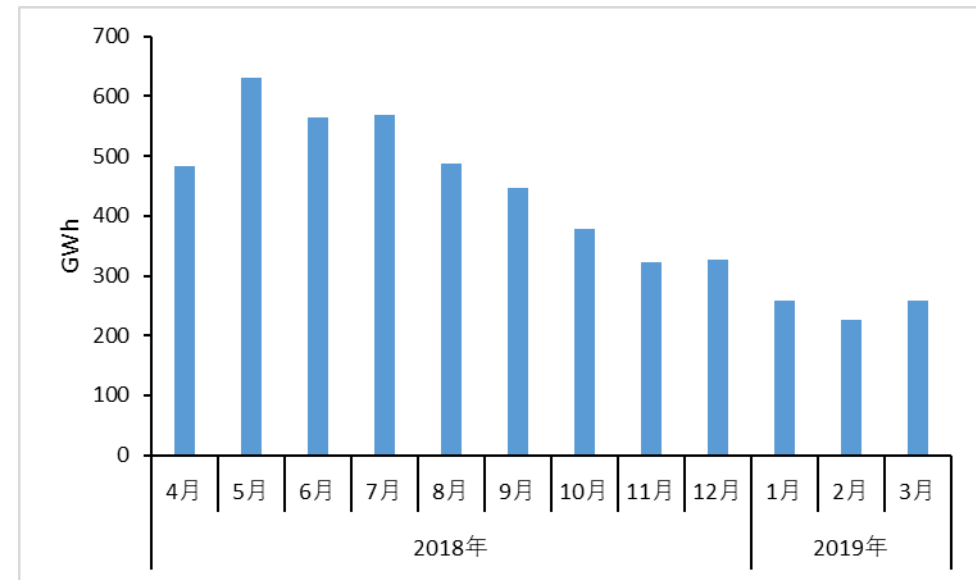
## 非揚水式水力発電設備容量想定

- STEP1:** 2018年度の各電力会社が公表する需給実績データを「電力土木技術協会水力発電所データベース」などに収録される個別の水力発電の設備容量を用いて、各ノードの発電電力量を按分  
 なお、水力発電の設備容量は、出力を調整できる貯水式または調整池式水力発電の設備容量と出力を調整できない流れ込み式水力発電の設備容量に分けて扱っている。
- STEP2:** 2050年の年間発電電力量の最大値を2030年の水力発電の発電電力量と同じ98TWhと想定し、STEP1で求めたノード別の年間発電電力量で按分
- STEP3:** 2018年度の各電力会社が公表する需給実績データを用いて、STEP2で求めた年間発電電力量を月別に按分。調整力がある水力発電は、月別の発電電力量を満たす範囲内で最適な発電を行う。

地域別発電形式別の水力発電設備容量



2018年度北海道地域内の月別水力発電電力量



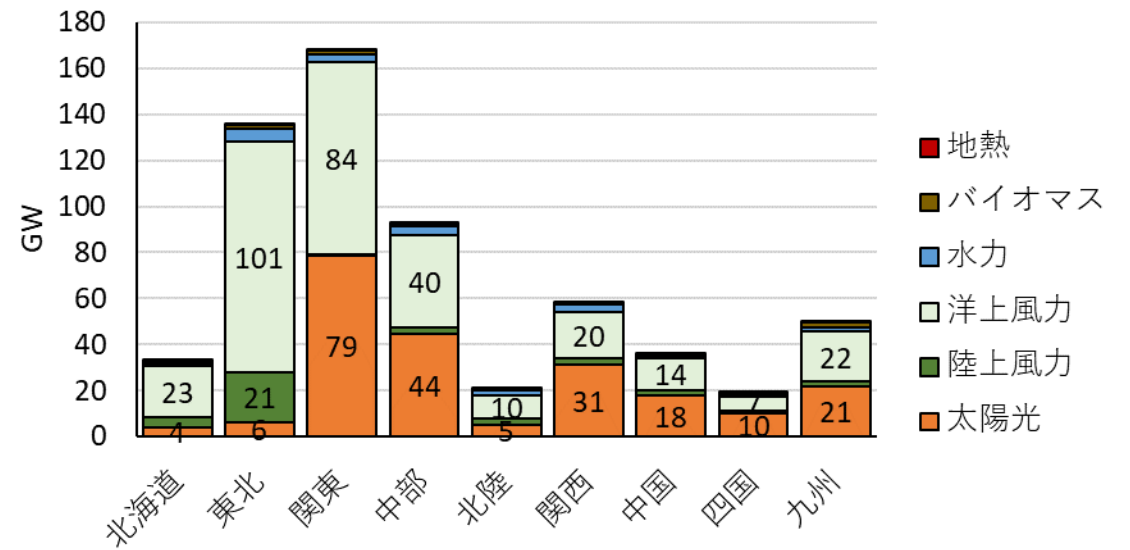
# 各再エネの設備容量想定まとめ

本分析のシナリオは洋上風力発電の飛躍的増加を想定したものとなっている。  
 グリーン水素貯蔵用の大規模なガス田がある新潟県、千葉県に多くの洋上風力が設置されると想定している。

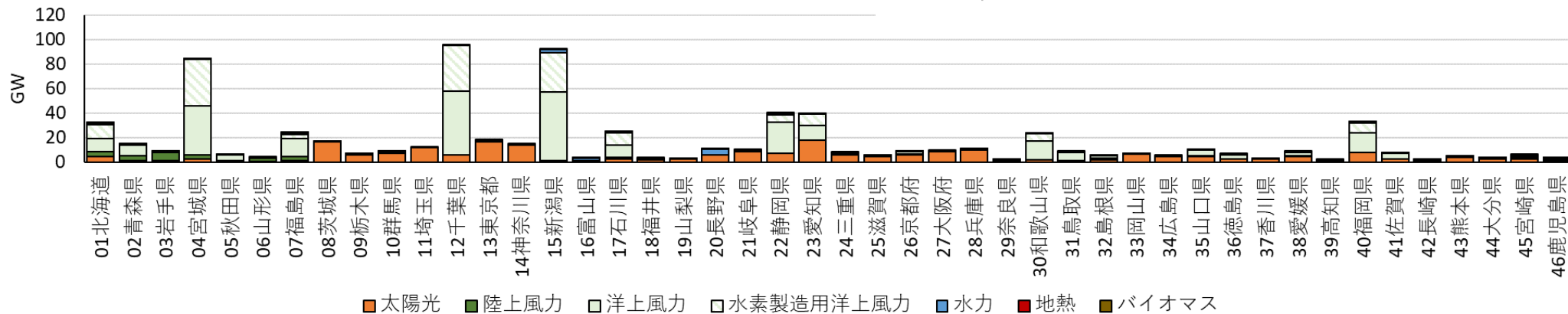
## 各再エネの設備容量合計(GW)

種別	2030エネ基	2050分析想定
太陽光	125	221
陸上風力	18	40
洋上風力	6	319
水力	24	24
バイオマス	11	11
地熱	1	1

## 各再エネの導入量地域別分布(2050年想定)



## 都道府県別再エネ導入量(GW)



## 参考：本シナリオで電化が想定されていない産業部門の最終エネルギー消費量分（化石燃料分）から排出されるCO<sub>2</sub>排出量への対策やネガティブエミッションに必要な電力需要量はどのように考えるか

1. 鉄鋼業では水素還元製鉄技術、化学業ではフィッシャー・トロプシュ法で化石燃料をグリーン水素に代替する。製鉄用に必要となるグリーン水素製造に必要な電力は大量であり、電力系統を通じて調達するのではなく、水素製造専用電源立地点（主に洋上風力が想定される）近傍で水素製造を行い専用パイプラインで水素を需要点まで送ることを想定する。化学原料については、リサイクル、リユースが前提となるが、一部は、製鉄と同様の水素調達を想定する。

### 2. 化石燃料由来のCO<sub>2</sub>排出量を分離回収する。

CO<sub>2</sub>分離回収に必要なエネルギーは、化石燃料使用時に発生する廃熱が最大限利用するため、CO<sub>2</sub>分離回収技術稼働にかかる新規電力需要は無視できると想定する。

### 3. ネガティブエミッション技術を用いてオフセットする。

DACS技術などの工学的なネガティブエミッション技術を利用する場合、大量の電力が必要になると考えられる。そのため、ネガティブエミッション技術に必要な電力は電力系統を通じて調達するのではなく、電源立地点（主に洋上風力が想定される）からの送電線が独自に整備されると想定する。



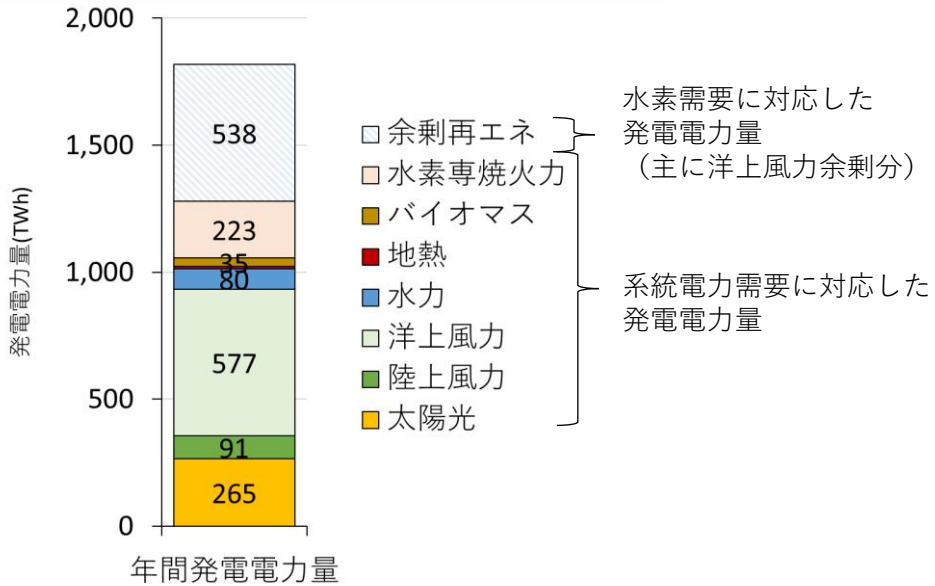
上記の場合、必ずしも電力系統分析で扱う必要はないのではないかと。  
(追加的に必要な再エネの設備容量を算定可能。)

## 4. PROMODによるシミュレーション分析結果

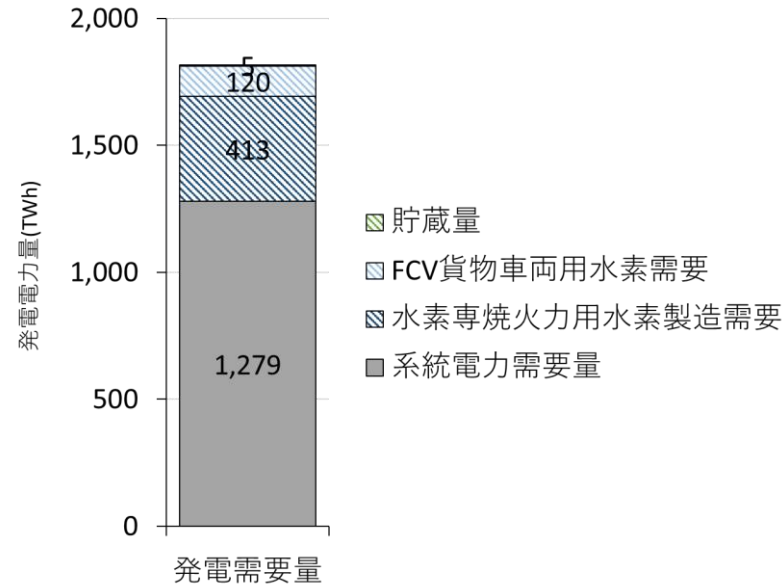
# 年間発電電力量

- 風力・太陽光発電は83%（系統電力需要に対応した電力量ベース）、88%(全電力需要に対応した電力量ベース)となった。
- 水素専焼火力の発電電力量は223TWh、水素専焼火力に必要な水素製造のための電力は413TWhとなった。

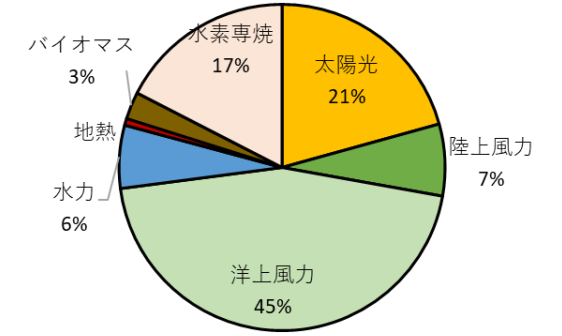
全国年間発電電力量



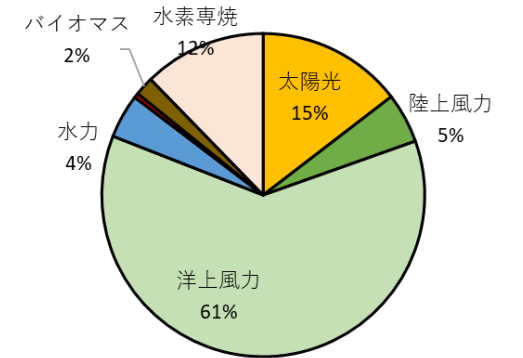
全国年間電力需要量



系統電力需要に対応した発電電力量の電源別割合



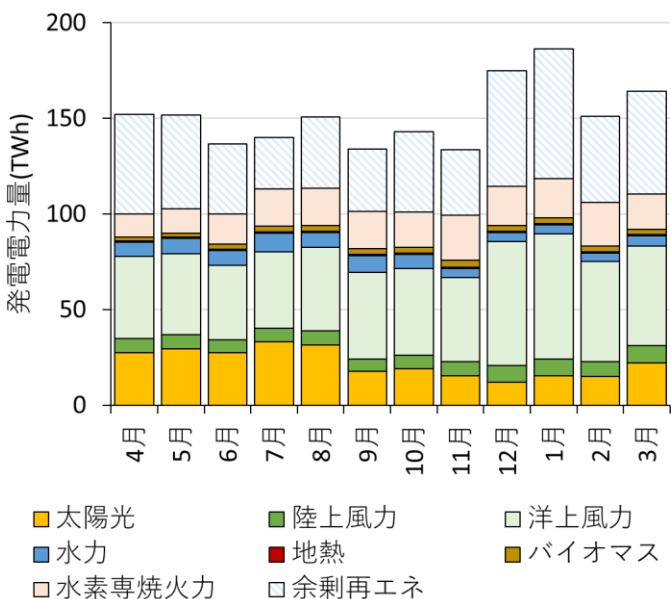
全電力需要対応した発電電力量の電源別割合



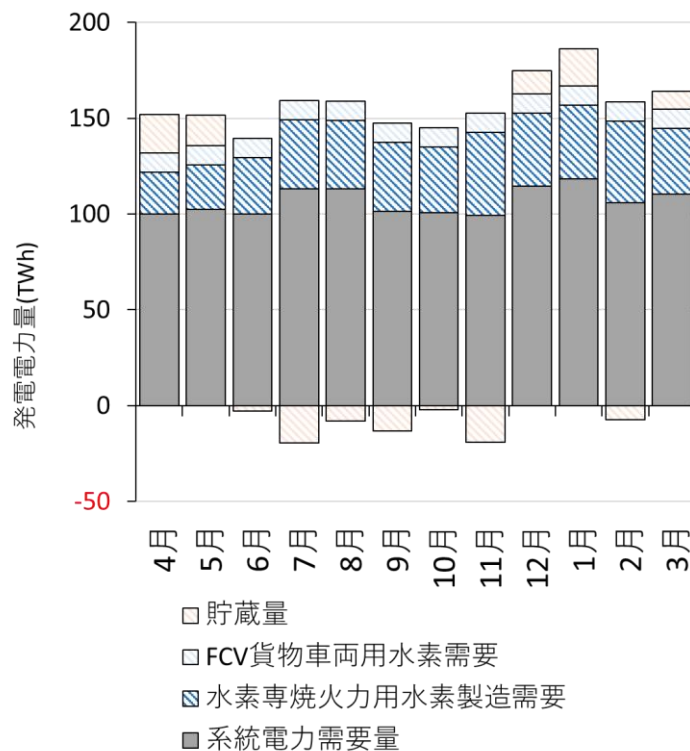
# 月別発電電力量・地域別発電電力量

- 12月、1月は電力需要量のみならず洋上風力の発電電力量が大きくなることから余剰再エネを用いた水素製造量が多い。
- 7月、8月は洋上風力発電電力量が下がり、太陽光発電の発電電力量が大きくなる。電力需要も他の月の比較して大きくなることから、ガス田に貯蓄しているグリーン水素を利用した電力供給が多くなる。

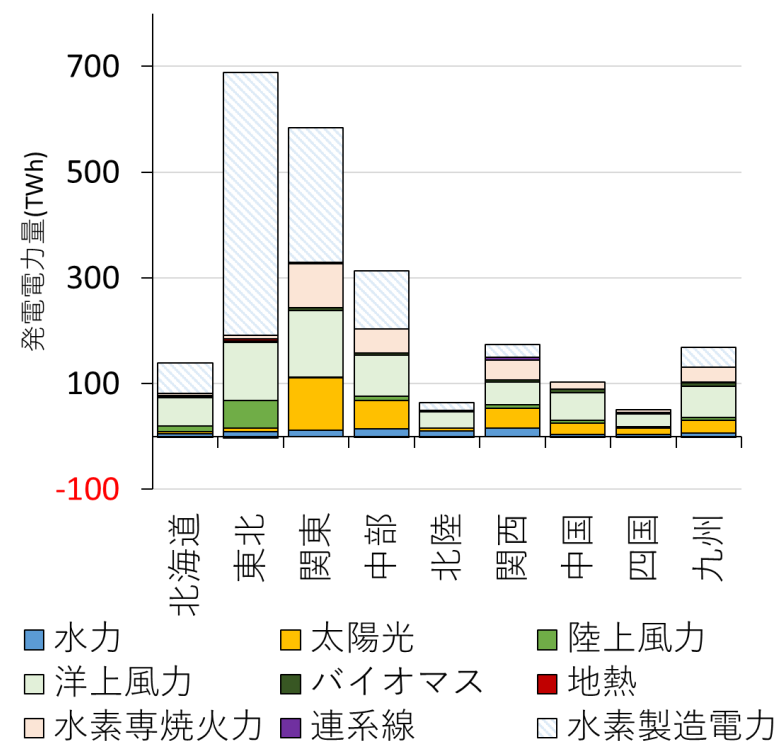
全国月別発電電力量



全国月別電力需要量



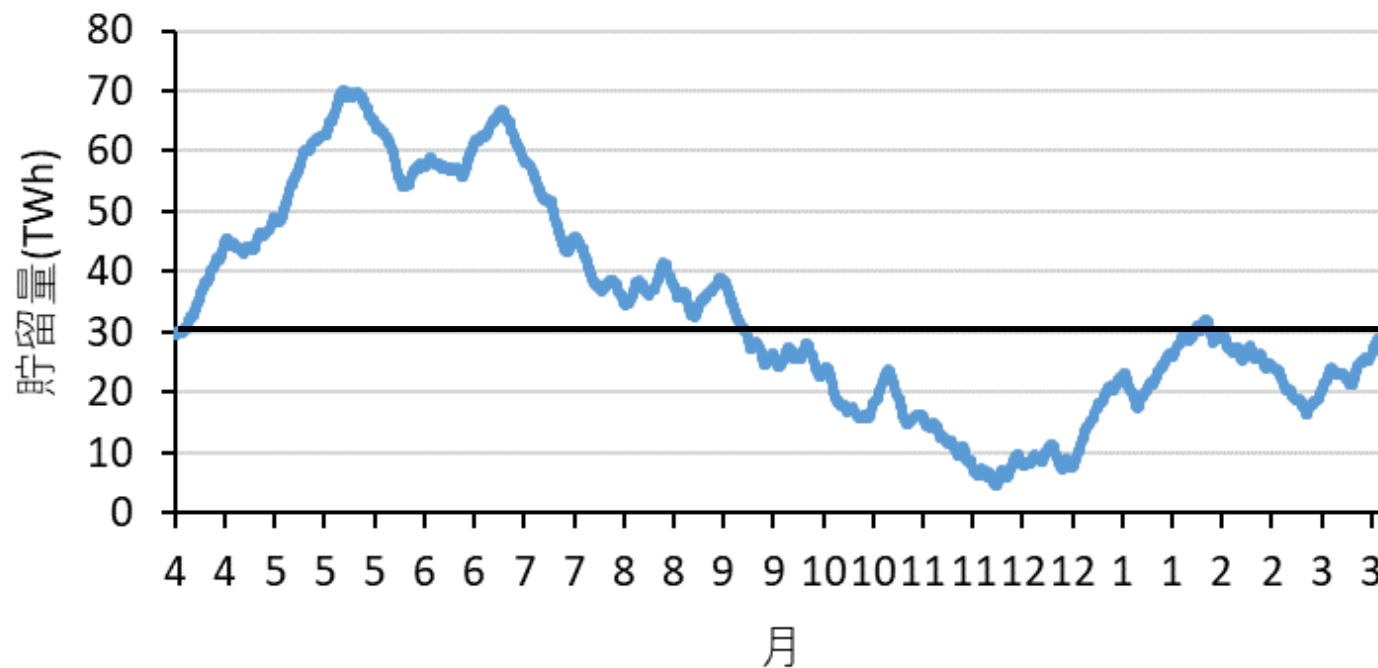
地域別年間電力需要量





## 水素の地下貯蔵量時系列推移（1時間単位）

- 貯留量の初期値を30TWhとすると、水素専焼用火力に供給する水素、貨物FCVに供給する水素が年間を通じて不足することなく地下貯留地に確保される結果となった。
- 貯留量の最大値は、70TWhとなった。
- 1月～5月にかけて水素を貯留し、6月～12月にかけて水素が消費される傾向を示している。



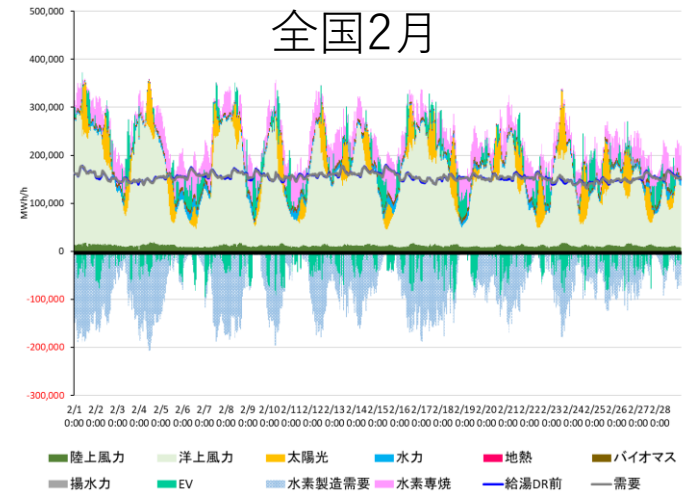
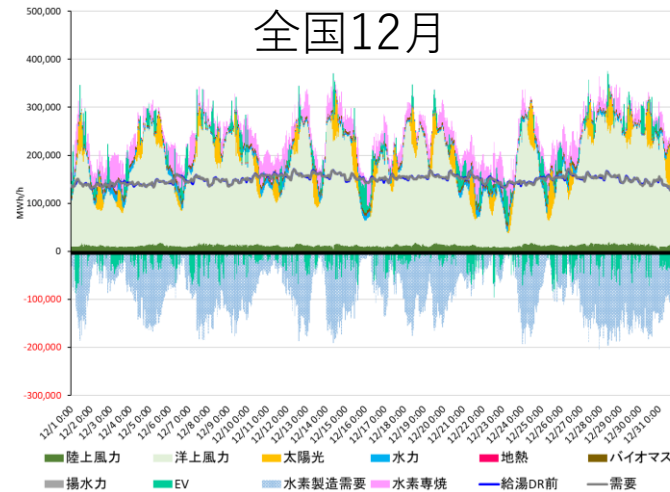
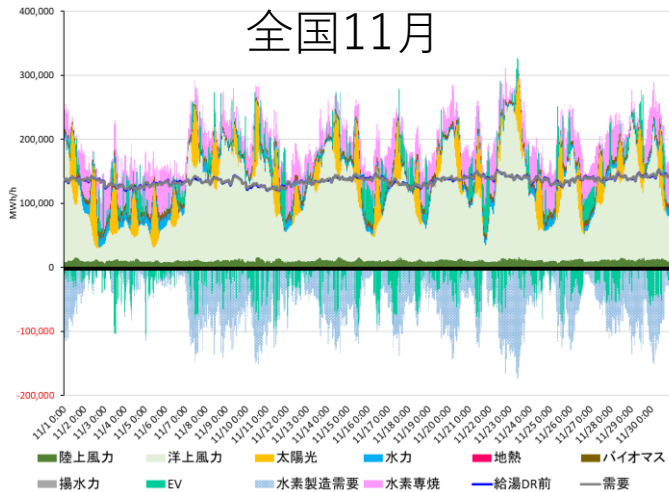
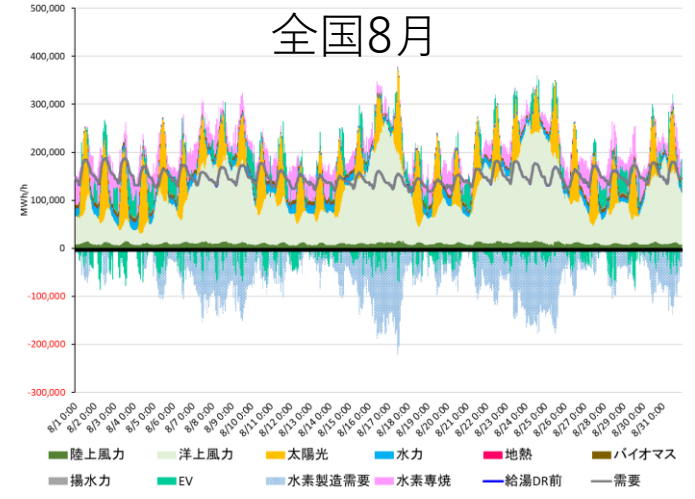
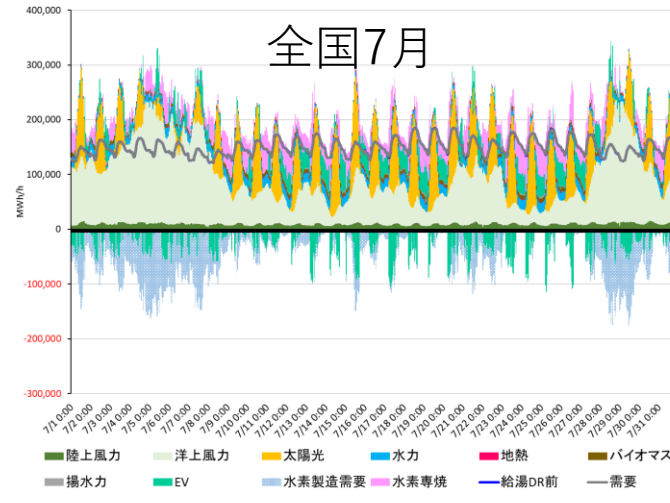
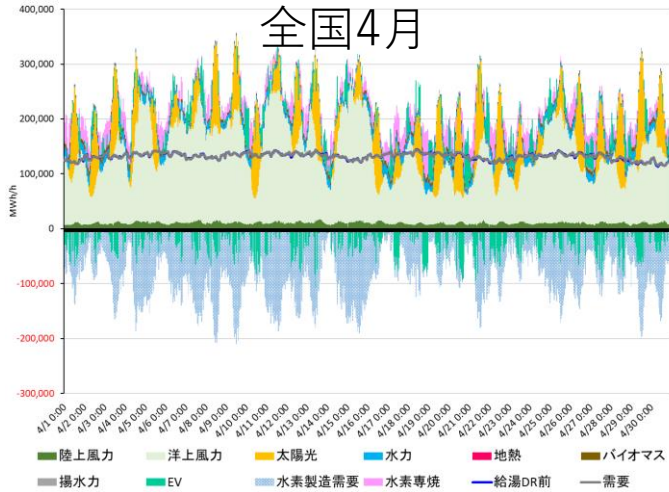
## 風力・太陽光発電の出力抑制率（年間）

- 風力発電、太陽光発電の出力抑制は局所的高い地域があるが、**日本全国では11%**に収まっている。
- 洋上風力の出力抑制は、水素製造拠点の水素製造能力の大きさに左右される**
  - 洋上風力の出力抑制による経済的ロスと水素製造装置の導入必要な設備費用のバランスで決定されるべきであるが、本分析の対象外である。
- 関東、関西地域の洋上風力の出力抑制**が大きいのは**水素製造用風力の出力抑制**が大きいいため

	北海道	東北	関東	中部	北陸	関西	中国	四国	九州	全国
太陽光	1%	2%	9%	4%	0%	1%	3%	7%	7%	6%
陸上風力	2%	7%	4%	1%	0%	3%	3%	5%	12%	6%
洋上風力	4%	4%	20%	14%	0%	28%	5%	6%	8%	11%

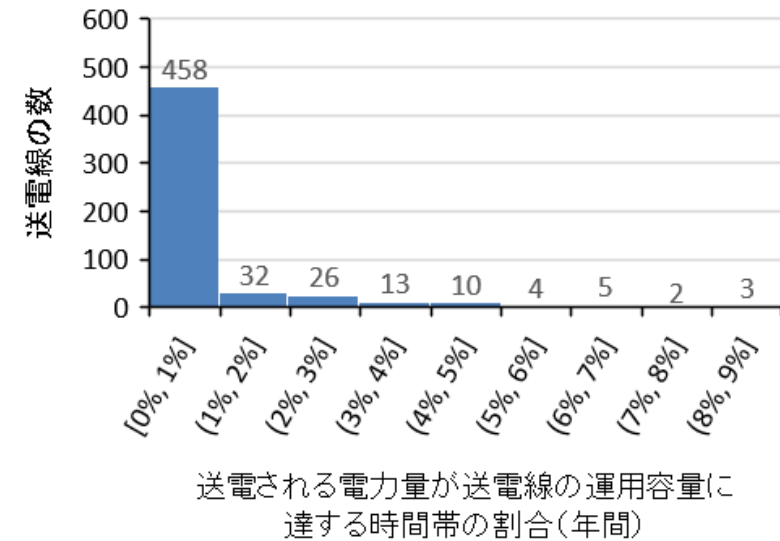
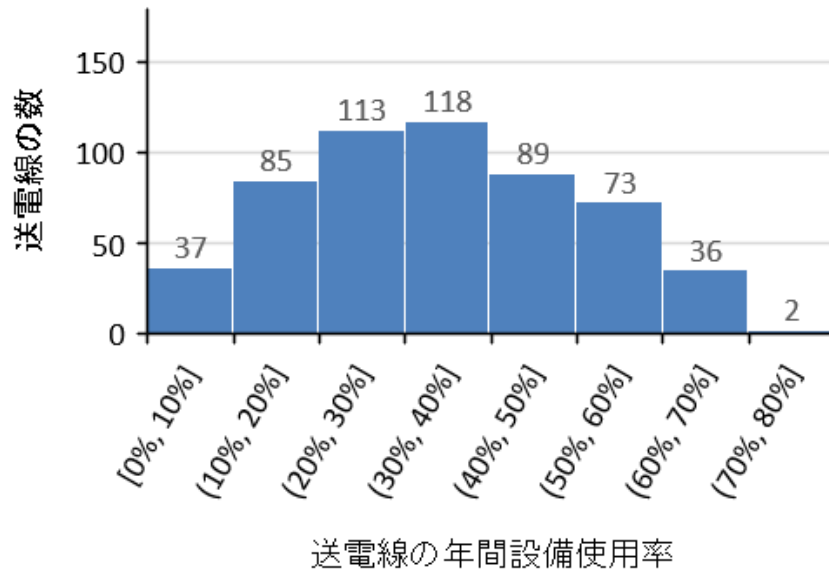
# 全国単位での月別電力需給状況

- 洋上風力の発電電力量が小さく夏場にEVと水素専焼火力の稼働が増える。
- 送電制約を考慮した電力需給シミュレーションを行っていることから、水素専焼火力の発電と余剰再エネを用いた水素製造の両者が行われる時間帯がある。



## 送電線の使用状況

- 送電線の設備利用率は30%~40%の範囲が最も多い。
- 97%の送電線で送電線に流れる電力が送電線の運用容量の範囲内に95%の時間帯収まっている。**
- 送電線の運用容量の範囲内に収まっていない送電線は、大規模電力需要地及び水素専焼火力が密集する東京中心部、名古屋中心部、大阪中心部、福岡中心部に多い。これは、公開データの制約から系統構成を完全に再現できていないことが一因と考えられる。

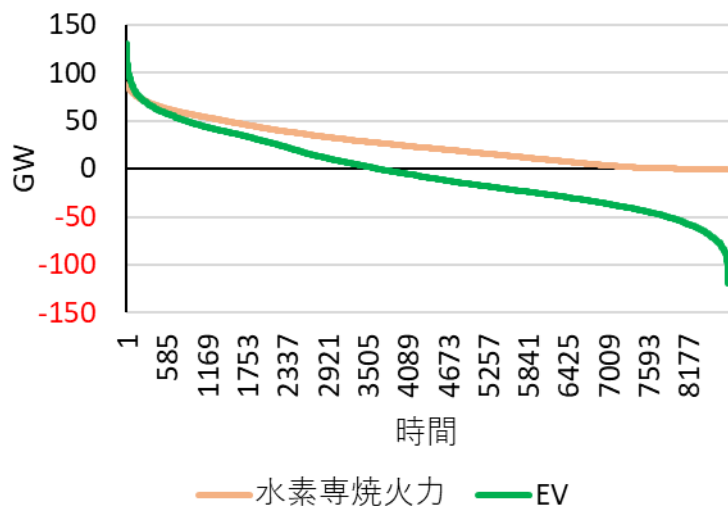


注：シミュレーション上の特異点（シミュレーション開始時や1週間単位での最適化を行う際に時間的境界線付近）の結果はグラフから除外している。

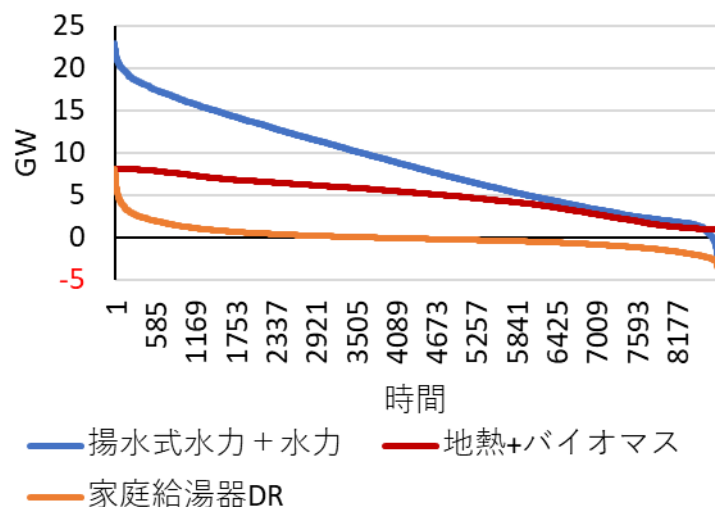
## 調整力の使用状況

- 本分析の想定では、**EVと水素専焼火力が電力需給の主な調整力を担っている。**
- 瞬間的にEVと水素専焼火力とともに**各100GW程度**の調整力が必要になっている。ただし、**DRなどで電力需要を抑えることができれば調整力に必要なEVと水素専焼火力の容量を抑えられうる**ことに留意が必要。
- **家庭用ヒートポンプ式給湯器によるDRの効果は限定的**である。電力需要全体と比較して、必要な湯量を生成するために必要な電力需要量が相対的に小さいためである。
- 水素製造能力は**197GW**あれば、本分析で想定する水素の需要量を供給できる。
- 洋上風力の出力抑制抑制量と水素製造能力のバランスは経済性を考慮して今後検討が必要である。

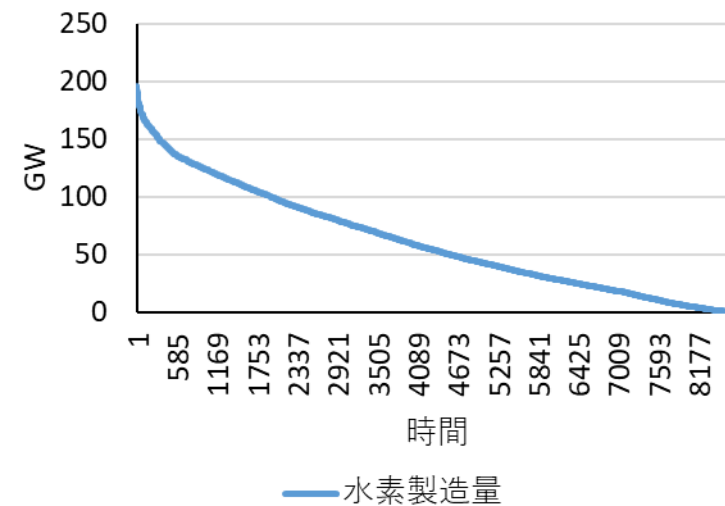
### EVと水素専焼火力の調整力



### 水力、地熱、バイオマス、家庭給湯器DRの調整力



### 余剰再エネを用いた水素製造量



## 5. 分析から得られた示唆(Key Findings)

- 各部門のエネルギーの電化が進み、**系統電力1252TWh+FCV貨物用水素製造電力120TWh**を必要とする場合に、**再エネ比率を100%（国内グリーン水素を用いた水素専焼火力含む）まで高められる組み合わせ**を下記の想定の下で示した。

### 本分析の想定

- 分析の対象を上位2系統とする。
- 送電線の制約や高圧幹線ガス導管の水素製造拠点の立地を考慮して太陽光、陸上風力、洋上風力の電源配置とEVの調整力が配置される。
  - ✓ 特に、東北、関東、中部地域に洋上風力が集中する。
- 既存ガス火力発電を水素専焼火力発電を行うために設備が改修される。
- 洋上風力発電の余剰電力を用いてグリーン水素を製造し、高圧幹線ガス導管を通じて各水素専焼火力に供給される。
- 高圧幹線ガス導管を通じて、新潟(LNG基地758個分の貯蔵能力)、常磐沖(LNG基地53個分)、千歳、北九州の休廃止ガス田等にグリーン水素が貯蔵される。
- 地内送電線は、再エネ導入のための増強は行わないが、新規電化需要に対応する増強は行う。
- 電力の広域融通を想定し、地内基幹系統と同程度の運用容量まで地域間連系線が増強される。
- 実潮流に基づく電力系統運用（リアルタイムプライシング、1時間単位での送電線運用最適化,etc）が実装される。

## 6. 本分析の主な課題

- 家庭・業務・産業部門の電力需要をシフト/抑制するようなディマンドレスポンスは**家庭部門の給湯器以外**は扱っていない。電力需給の調整力として大きな効果が期待される**産業部門のディマンドレスポンスの効果**を取り入れた分析に意義がある。
- 上位2系統の系統設備の制約を考慮した1時間単位での電力需給バランスを分析している。しかし、実際には太陽光発電、陸上風力発電、EVは下位系統に接続されることが想定される。**下位系統の送電線の制約が太陽光発電、陸上風力発電の発電電力量やEVの調整力に与える影響は考慮できていない**ことに留意が必要である。
- 大規模電力需要地及び水素専焼火力が密集する**東京中心部、名古屋中心部、大阪中心部、福岡中心部**は、送電線の運用容量の制約を局所的に超えている時間が存在する。このような複雑な系統構成における潮流管理について精査が必要である。
- 水素専焼火力の調整力を89GWと大きく想定しているが、**ガス管ネットワークの整備やガス田の利用を実現するための課題や施策について精査**する必要がある。
- 本分析では、産業構造や経済の活動レベルを便宜的に2020年の水準と同一とし、非電力エネルギーの大半が電化される想定に基づいて2050年の電力需要を算定している。**産業構造や人々の暮らしの想定に応じて、電力需要やEVによる調整力、ディマンドレスポンスの実施可能量が変わり、必要となる再エネ導入量や調整力も変わる**ため、2050年カーボンニュートラル達成の**社会像やシナリオから議論を深めていく**ことが重要である。
- 本分析では、再エネを増やす目的では地内送電線の増強を行わないという制約の元、**電力需給の物理的な収支を合わせるシミュレーション**を行っている。本分析で大規模な導入を想定している**国内グリーン水素製造設備などの新たに導入する設備の経済性**を別途評価することが必要である。
- **新規電力需要の推計は簡易的な方法**及び想定で行っている。分析目的に応じて、精緻化が必要となる。

**御静聴ありがとうございました。**



## 参考:慣性力について

- 2050年までには、インバーター系が主流となった場合の新たな周波数管理の在り方が確立しているという想定。
- 少なくとも、旧来の周波数管理であっても、インバーター系に疑似慣性力を持たせること等により、インバーター系のシェアの制限は発生しないという想定。

### 疑似慣性力に関する研究開発事例

「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発」に採択  
～再エネ時代の系統安定化を目的とした技術開発～

2022年6月20日

東京電力ホールディングス株式会社  
東京電力パワーグリッド株式会社

東京電力ホールディングス株式会社（本社：東京都千代田区、代表執行役社長：小早川 智明）および東京電力パワーグリッド株式会社（本社：東京都千代田区、代表取締役社長 社長執行役員：金子 禎則）は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」）が公募する「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発」に応募し、このうち「研究開発項目1『疑似慣性PCSの実用化開発』（以下、「本開発」）」に、このたび採択されました。