

東京大学公共政策大学院

「再生可能エネルギーと公共政策」

# カーボンニュートラルに向けた 再生可能エネルギーの導入評価

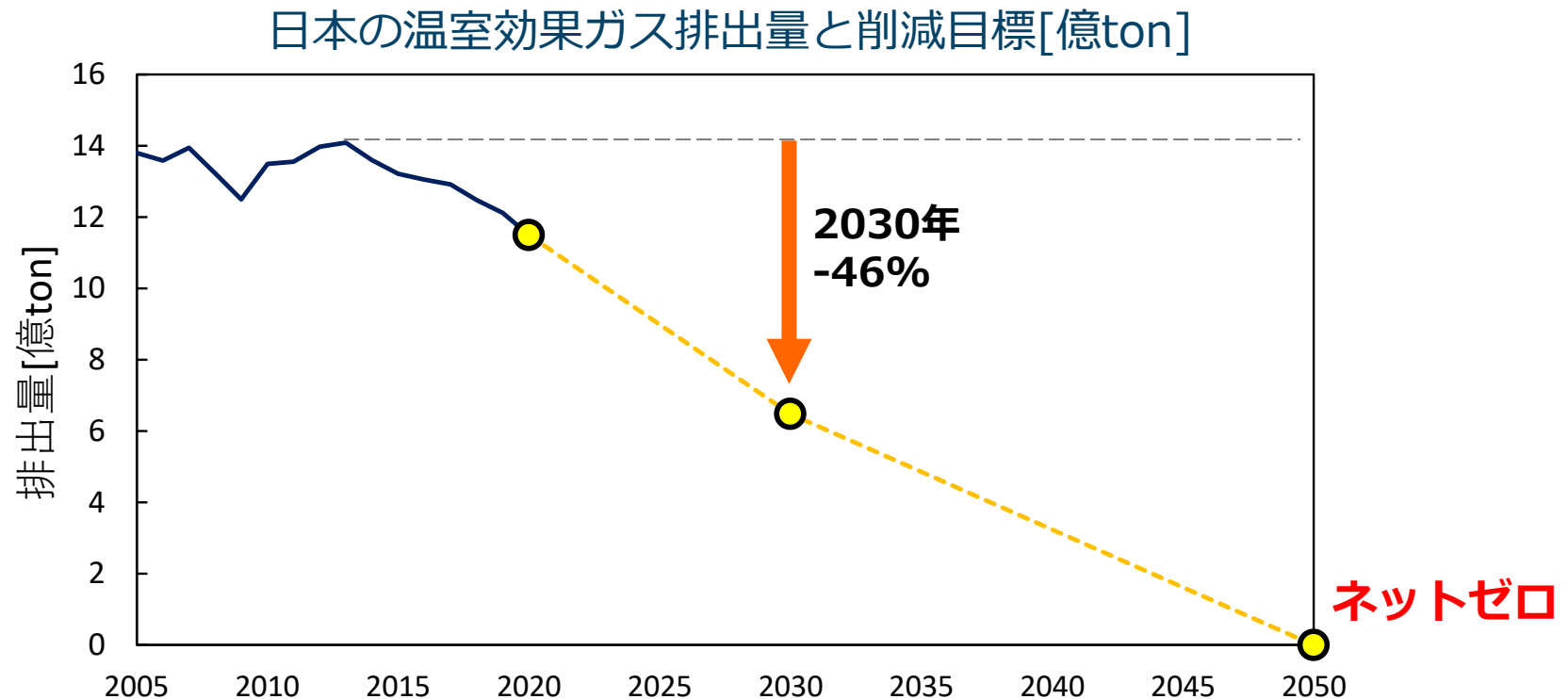
一般財団法人 日本エネルギー経済研究所

計量分析ユニット

尾羽 秀晃

# 本講義の背景① カーボンニュートラル目標

中長期的に温室効果ガスの排出を全体としてゼロ(ネットゼロ)にする目標が世界的に掲げられる動きにある中で、日本でも2020年10月に同様の目標が掲げられた。

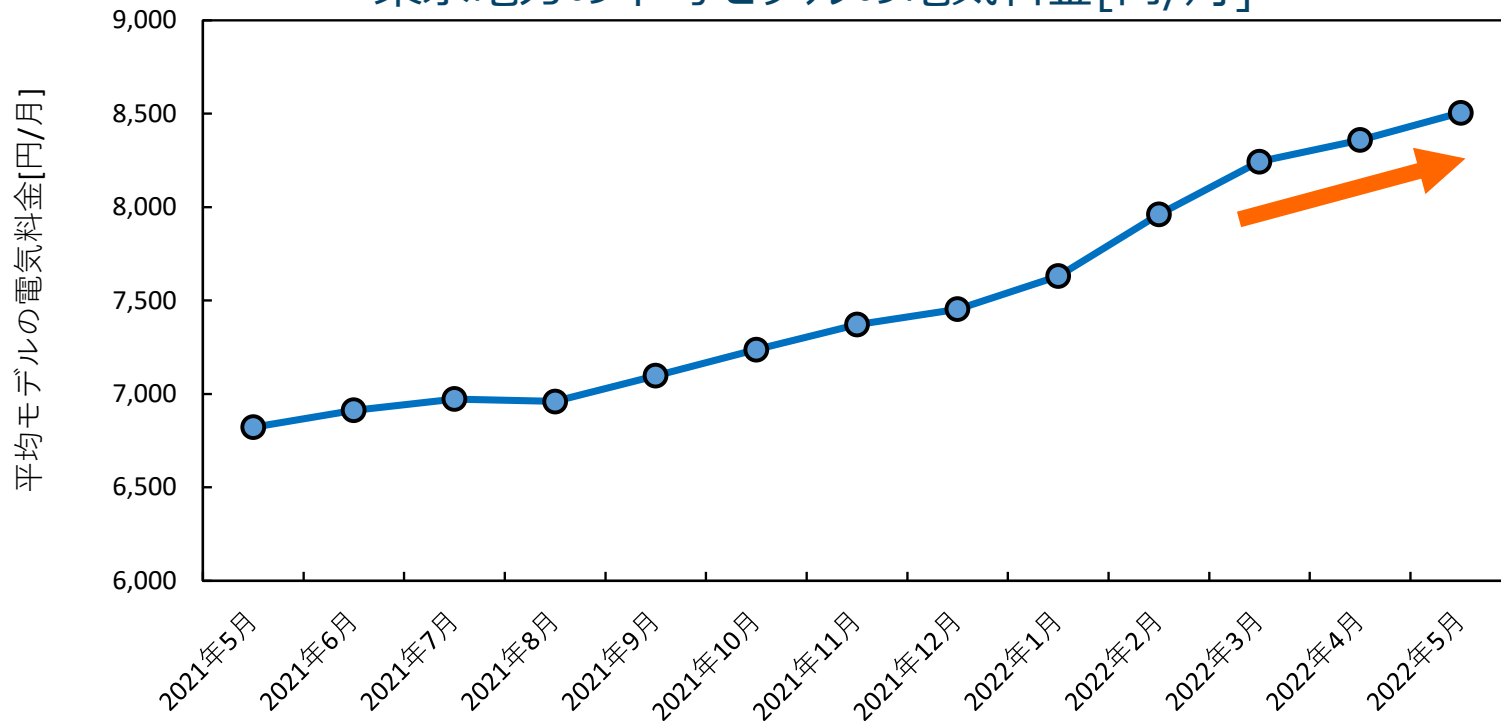


トップダウンにより野心的な目標が掲げられた一方で、中間目標やカーボンニュートラルを達成した場合に生じる影響についての定量的評価・検証が不可欠。

# 本講義の背景② 化石燃料の調達リスク

燃料費高騰による電気料金の値上がりが続いている中で、ウクライナ情勢を受けて今後さらに電力料金が上昇することが見込まれている。

東京電力の平均モデルの電気料金[円/月]



\* 出典：東京電力Webサイト(従量電灯B・30A, 使用電力量260kWh/月)の場合

カーボンニュートラルの達成に加えて、化石燃料に過度に依存してしまうことへの懸念から、再生可能エネルギーへの期待が急速に高まっている。

# 政府機関による再エネのポテンシャル調査

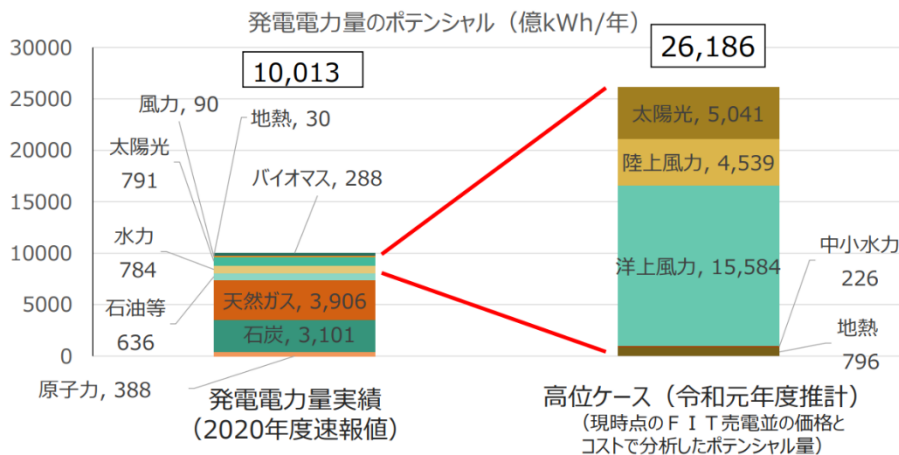
## (前)環境大臣発言要旨より

「環境省は、日本の中の再エネのポテンシャルが(電力供給量の)2倍あるというふうに言っていること、2倍あるんだったらまずそれをフル活用することが国家としての基本方針にあるべきだ」

### 再エネポテンシャルは現在の電力供給量の最大2倍



- 環境省試算では、我が国には電力供給量の**最大2倍**の再エネポテンシャルが存在
- 再エネの最大限の導入に向け、課題をクリアしながら、着実な前進が必要



\* 出展: 環境省「我が国の再生可能エネルギー導入ポテンシャル」

再生可能エネルギーの導入ポテンシャルは**政策評価における重要な基礎情報**であり、十分な検証が必要とされる。

# 再エネの大量導入により想定される影響

カーボンニュートラル目標や燃料価格の高騰などを受けて再エネへの期待が高まる一方で、再エネの大量導入によって様々な影響が生じることが予想される。

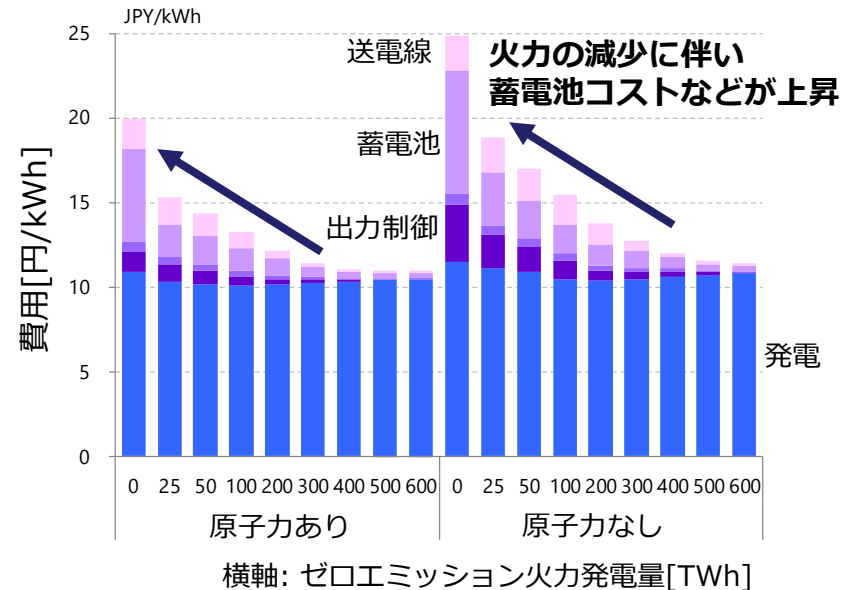
## 再生可能エネルギーの大量導入時に想定される影響

### (A) 再エネ設置に伴う立地影響



図の出典: Google map

### (B) 火力発電の減少に伴う費用影響



図の出展: Y.Matsuo et al[1]

## 本講義のテーマ

- Q: カーボンニュートラルに向けた再生可能エネルギーの導入可能性は？
- Q: カーボンニュートラルの達成に伴いどのような影響が生じるか？

# 本講義の内容

本講義では、カーボンニュートラルの達成に向けて、再生可能エネルギーに対する社会的要求が高まっている中で、重要性の高い課題とされる以下を取り上げる。

## 1. 再生可能エネルギーの導入可能性

- 再生可能エネルギーの導入可能性をどのように考えるか？
- 太陽光・風力発電はどの程度導入できるか？

## 2. カーボンニュートラル達成時の影響評価

- カーボンニュートラル達成時の影響をどのように評価するか？
- カーボンニュートラルによってどのような影響が生じるか？

## 3. 中長期的なエネルギー政策に向けた示唆

- カーボンニュートラルを達成するために必要な方策の在り方は？

# 1. 再生可能エネルギーの導入可能性

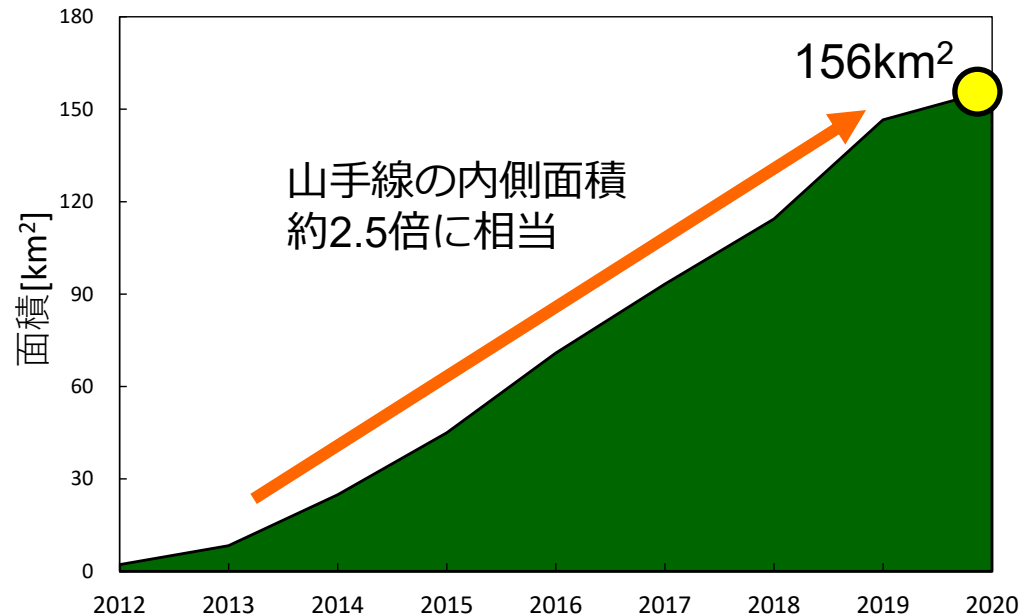
太陽光発電・陸上風力の導入可能性をどのように考えるか？

本内容（スライド8-21）は（一財）電力中央研究所在職時に取りまとめた学術論文[2]・報告書[3]に基づくものです。ただし、2021年4月時点のGISデータを基に更新しているため、各種文献と数値が一致しない箇所があります。

# 森林における太陽光発電の開発

統計情報より太陽光発電設置に伴う森林改変面積を推計した結果を以下に示す。

林地開発許可(1ha以上)における  
太陽光発電設置に伴う森林改変面積[km<sup>2</sup>]



データの出典: 林野庁「林地開発許可処分の推移表」

\* 林地開発許可には1ha未満の案件は含まないが、実際には1ha未満の案件も存在する。

図の出展: Google mapを加工

2020年度末までに設置された非住宅用の太陽光発電(61GW)のうち**少なくとも約2割(約10GW\*)**が森林に設置されていると推定される。

→ なぜ自然環境に影響を与える場所にまで太陽光発電が設置されたのか？

\* 環境省導入ポテンシャル調査[4]と同様に0.067GW/km<sup>2</sup>で換算した場合の推定値。



# 法律(FIT法)における規定

## FIT法第九条第3項

経済産業大臣は、・・・、その申請に係る再生可能エネルギー発電事業計画が次の各号のいずれにも適合するものであると認めるときは、その認定をするものとする。

第一号 再生可能エネルギー発電事業の内容が・・・経済産業省令で定める基準に適合するものであること。

## FIT法規則第五条第14項

法第九条第三項第一号の経済産業省令で定める基準は、次のとおりとする。

・・・

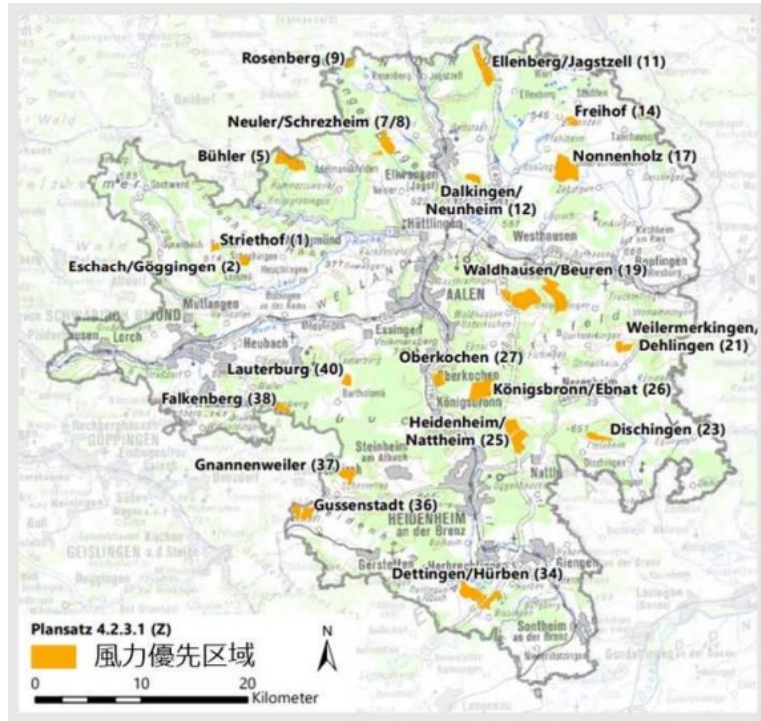
当該認定の申請に係る再生可能エネルギー発電事業を営むに当たって、**関係法令（条例を含む。**次項第一号及び次条第三号に該当するものを除く。）の規定を遵守するものであること。

再生可能エネルギーの補助に関わるFIT法の認定要件では**条例や関係法令での遵守を原則**としており、FIT法そのものは土地利用の規制を行っていない。

# 国内外における土地利用計画

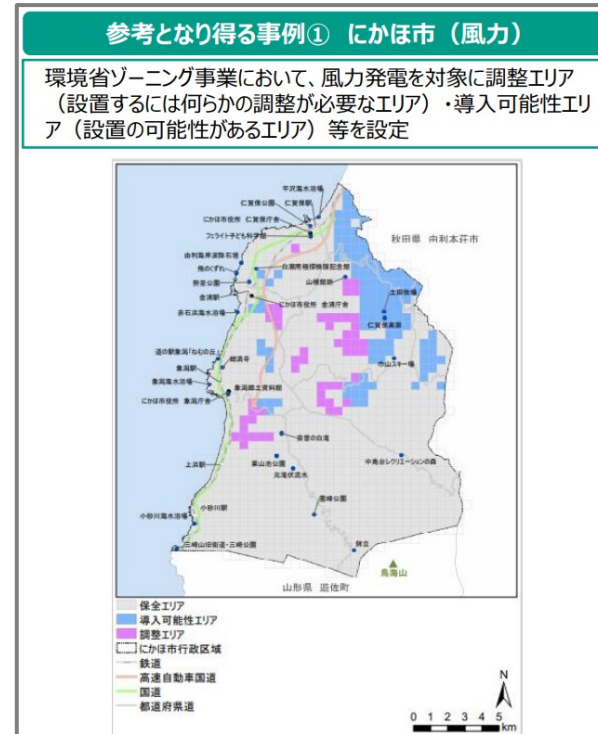
乱開発防止のため、ドイツなどでは2000年代初期から土地利用計画を実施。日本においても**ポジティブゾーニング**や自治体条例の策定の動きにある。

## ドイツBW州の風力優先区域の例



出典: Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2019  
三菱総合研究所「諸外国の地域の排出削減・再エネ関連制度について」

## 日本の促進区域のイメージ(環境省)



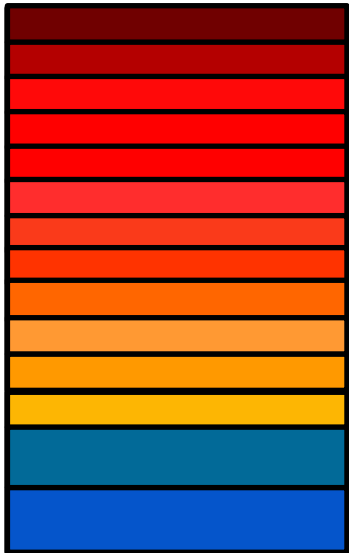
出典: 環境省「地域脱炭素に向けた改正地球温暖化対策推進法の施行に関する検討会とりまとめ」

立地誘導に向けた動きが進みつつある中で、再エネの導入可能性を検討する上では**自然環境などへの影響の考慮が不可欠**。

# 設置可能場所の考え方

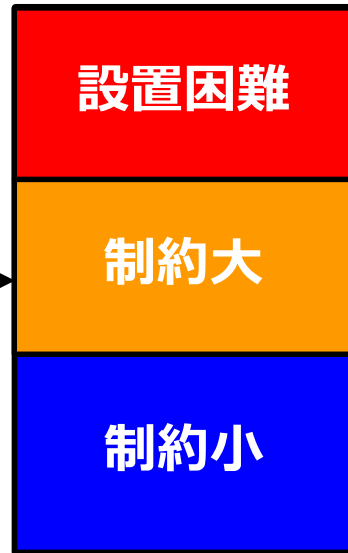
今後の太陽光・陸上風力の設置可能場所を考える上では、自然環境などの影響を十分に考慮する必要があるため、以下の4手順によって設置可能場所を評価した。

## (1) 土地利用の細分

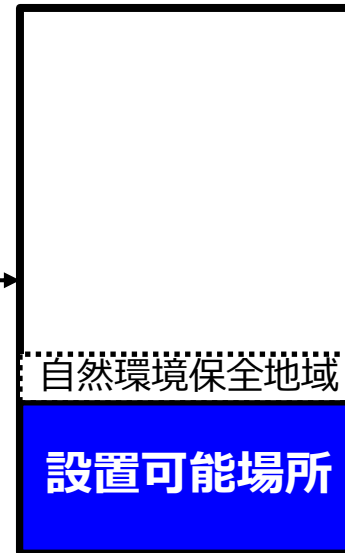


Ex) 森林, 河川など..

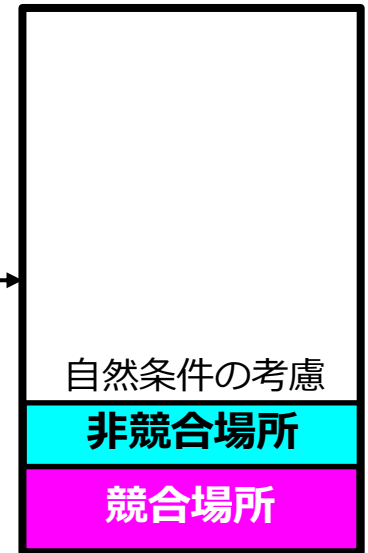
## (2) 各土地利用に対する規制の評価



## (3) 自然環境保全地域の除外



## (4) 太陽光・風力の競合場所の特定



**設置困難:** 法的、物理的に発電設備の設置が困難な土地区分。

**制約大:** 法律、地方自治体条例、環境影響評価などによる規制を受けやすい土地区分。

**制約小:** 土地利用に関わる法規制が存在しないなど、法律などによる規制を受けにくい土地区分。

# 土地利用の分類と制約の評価

日本の法制度を基に土地利用の制約の評価を行った結果を以下に示す。

区分	土地区分	備考
設置困難	耕地	農振法によって農地転用が厳しく制限されている。
	荒廃農地(再生可能)	
	建物用地	メガソーラーは対象外とし、建物設置型の設置対象とする。
	保安林	森林法により工作物の設置は原則不可。
	がけ	がけ条例の規制を受ける上、物理的に発電設備の設置が困難。
	河川	再エネ設備の設置が河川法の許可方針に非適合。
	交通用地	物理的に発電設備の設置困難。
制約大	国有林	構造改革特別区域に指定されていることなどが要件。
	民有林	地方自治体条例にて、抑制区域に設定される動き。
	湿地	環境影響評価上の制約を受けやすい。
	海岸	海岸法により、海岸の防護などに支障がないことが要件。
制約小	雑草地	土地区分に対応した法規制が存在しない。
	裸地	土地区分に対応した法規制が存在しない。
	篠地	土地区分に対応した法規制が存在しない。
	荒廃農地(再生困難)	農水省方針などにより、再エネに活用する方針が示されている。

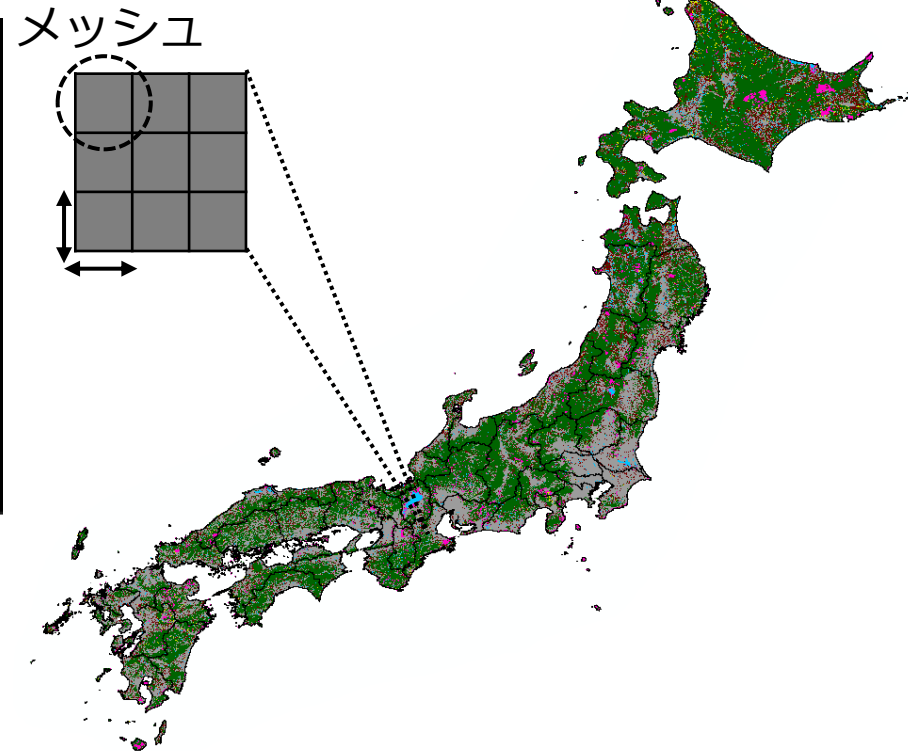
# 評価の手法 -GISを用いた空間分析-

土地情報に関わる様々なレイヤーを用いて、空間情報の統計や可視化に適している地理情報システム(GIS)を分析に用いた。

## GISを用いた評価の概念図

要素	定義
土地利用	森林・河川・雑草地..など
人口	メッシュ内人口
法区域	自然公園の有無など
地形条件	傾斜角・水深・離岸距離など
自然条件	風速・日射量など

- 地理情報データは国土交通省「国土数値情報」よりダウンロード可能

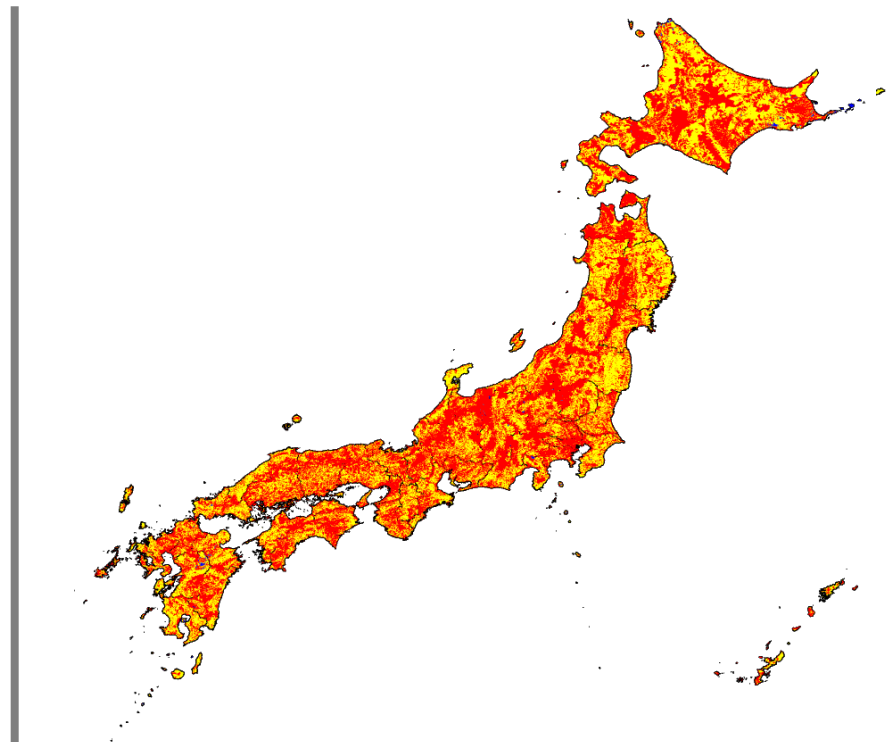
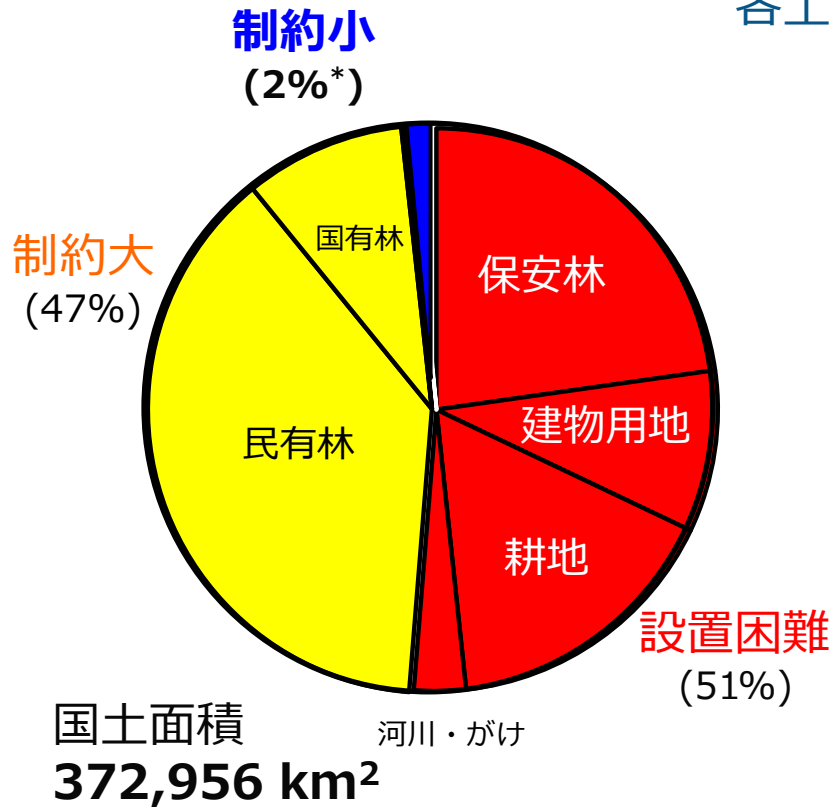


日本の全国土を100mメッシュに分割し、それぞれのメッシュに各種地理情報を整備することにより各種分析を行った。

# 各土地区分の面積

地理情報システム(GIS)を用いることによって、各土地区分の面積を推計した。

各土地区分の面積

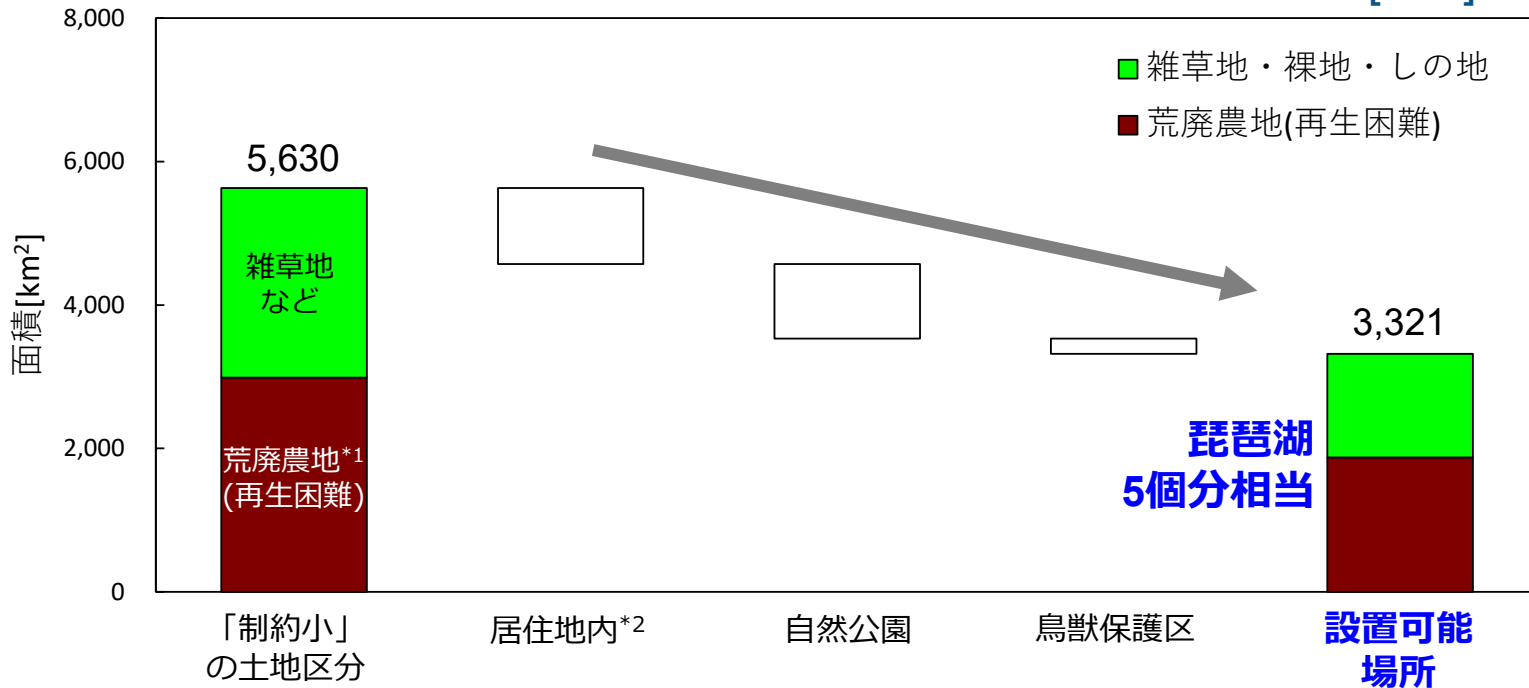


「制約小」に相当する雑草地などの土地区分の面積は5,630km<sup>2</sup>(全国土の2%)と推計された。

# 自然環境保全区域などの除外

雑草地などの「制約小」の土地区分(5,630km<sup>2</sup>)のうち、自然環境保全区域などを除いた面積を推計した。

自然環境保全区域を除外した設置可能場所の面積[km<sup>2</sup>]



\*1 GISで推計した荒廃農地(再生困難)の面積(2,987km<sup>2</sup>)は、2017年の統計上の値(1,905km<sup>2</sup>)と比較し過大側となっている。

\*2 居住地内は500mメッシュ内の人口が1人以上の場所と定義

設置可能場所の面積は**3,321 km<sup>2</sup>** と推計された(全国土の**0.9%**)。

→ このうち太陽光発電と風力発電の**土地利用競合**を考慮する必要がある。

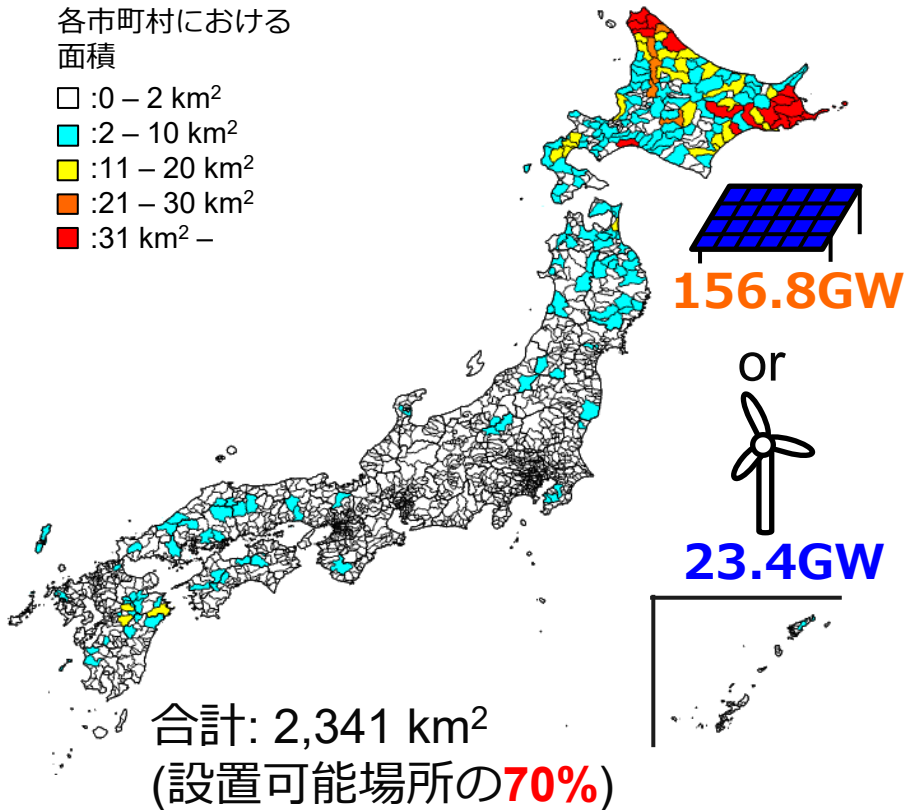
# 各電源の競合エリアの特定

風況データを用いることにより、太陽光発電・風力発電が競合する場所を特定した。

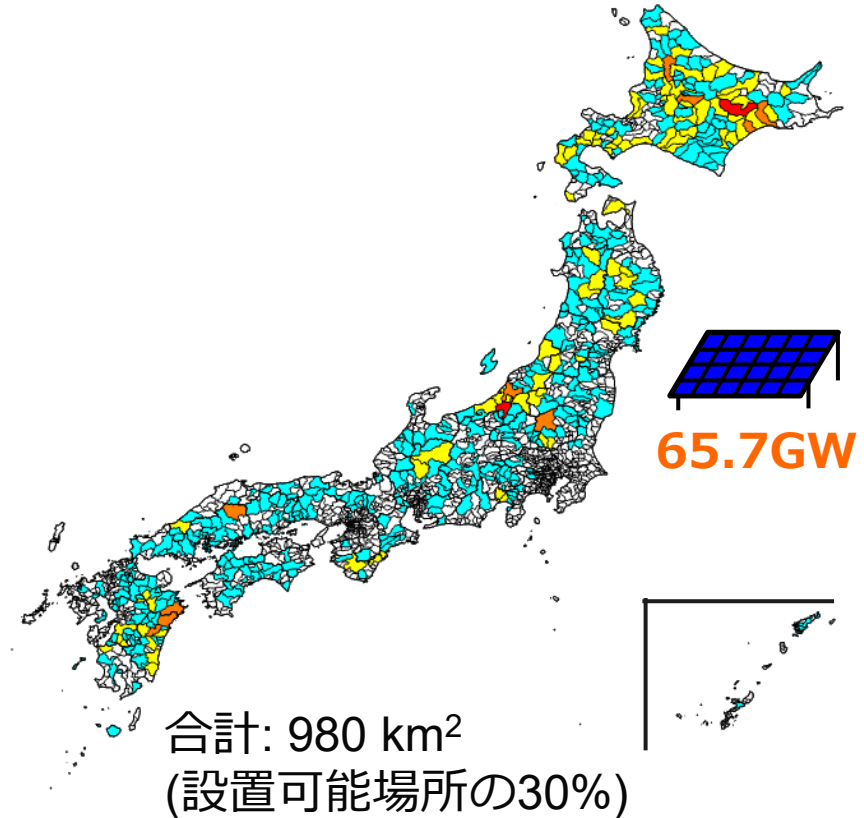
## 競合場所(年間平均風速5.0m/s以上)

各市町村における  
面積

- : 0 - 2 km<sup>2</sup>
- : 2 - 10 km<sup>2</sup>
- : 11 - 20 km<sup>2</sup>
- : 21 - 30 km<sup>2</sup>
- : 31 km<sup>2</sup> -



## 非競合場所(年間平均風速5.0m/s未満)

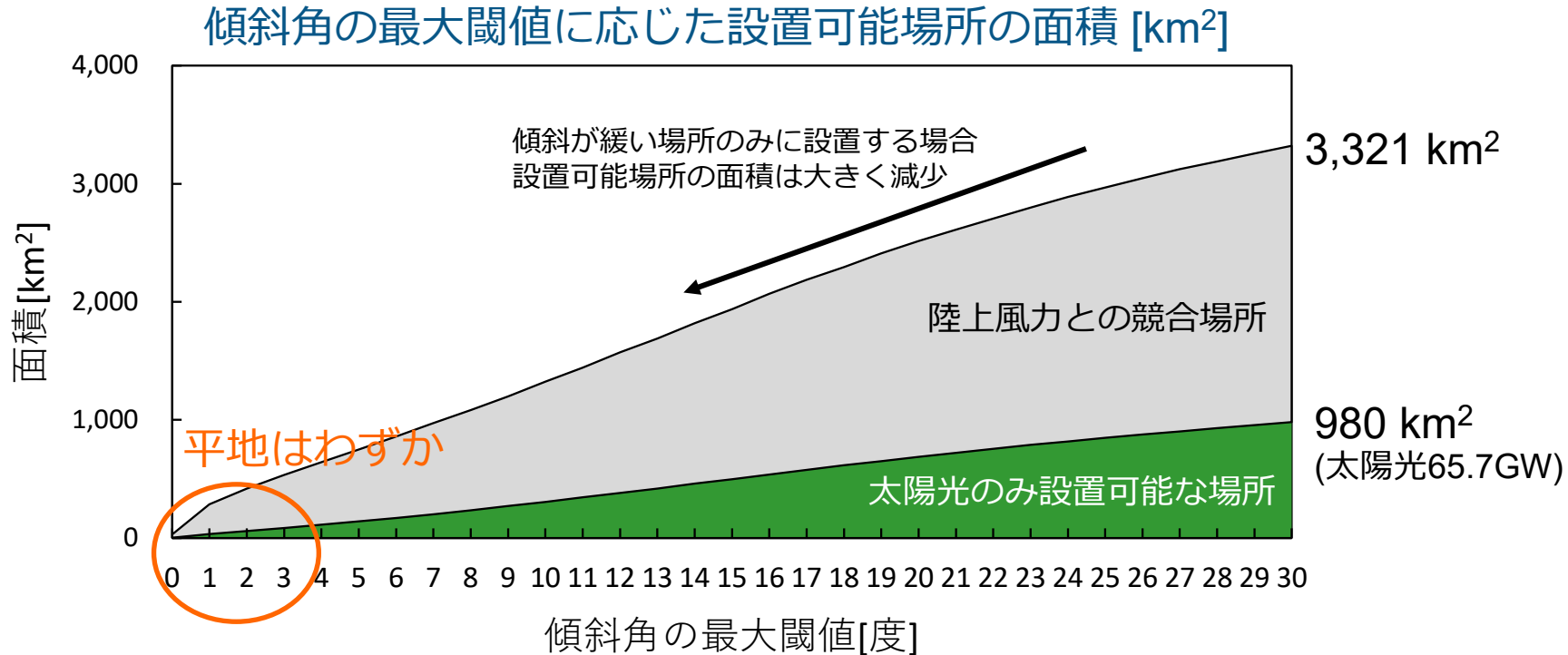


設置可能場所の**約7割**の場所において、太陽光・風力発電の**土地利用競合が発生**。  
→ 競合場所における電源の種類をどのように考えるか。



# 傾斜角に応じた設置可能場所

傾斜角の最大閾値に応じた設置可能面積を推計した。



設置可能場所のうち、**平地はわずかに限られる。**

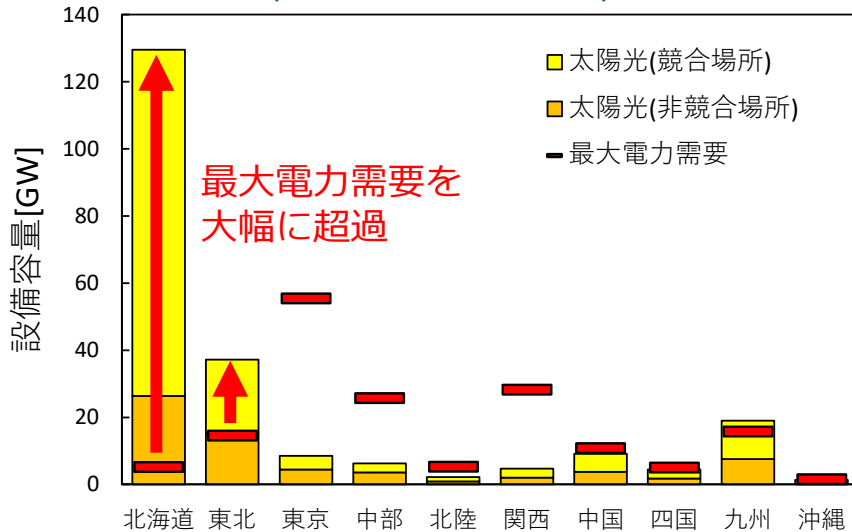
→ 土砂災害防止の観点から傾斜面における設置の規制が強化された場合、設置可能な設備容量は大きく減少する。

# 電力エリア別の最大電力需要との比較

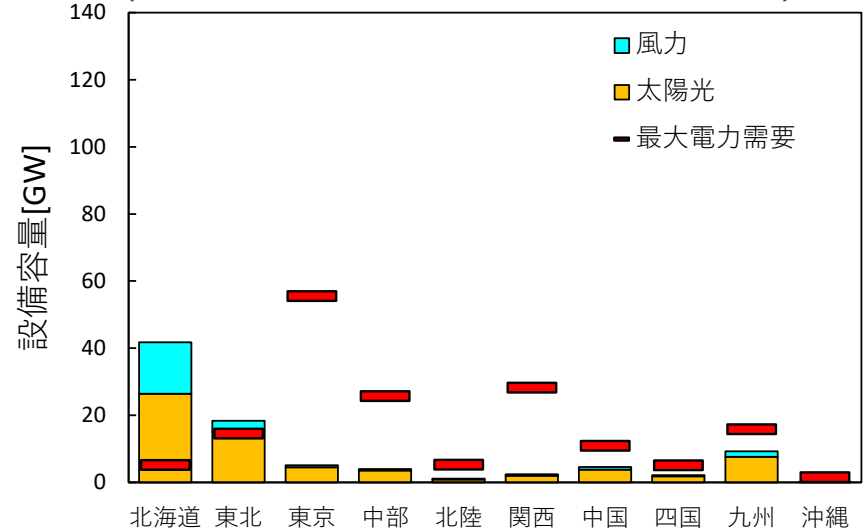
電力エリア別の最大電力需要と設置可能場所における設備容量の比較を行った。

## 電力エリア別の導入ポテンシャルと最大電力需要[GW]

競合場所に太陽光を導入した場合  
(太陽光:222.5GW)



競合場所に風力発電を導入した場合  
(太陽光:65.7GW, 風力発電23.4GW)



陸上風力との競合場所に太陽光発電のみを設置した場合、一部のエリアでは太陽光発電の設備容量が各エリアの最大電力需要を大幅に超過する。

→ 需給バランスの観点から競合場所には陸上風力の導入を図ることも重要。

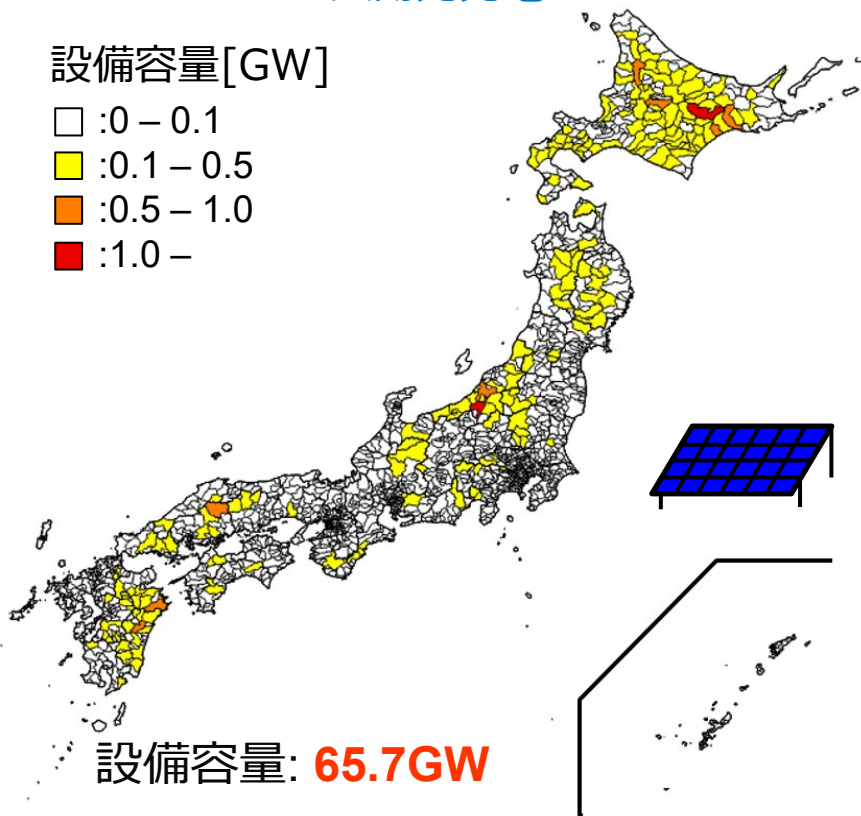
# 土地利用競合を考慮した設置可能場所(全国)

競合場所に風力発電を設置した場合における、両電源の設置可能場所を評価した。

## 太陽光発電

設備容量[GW]

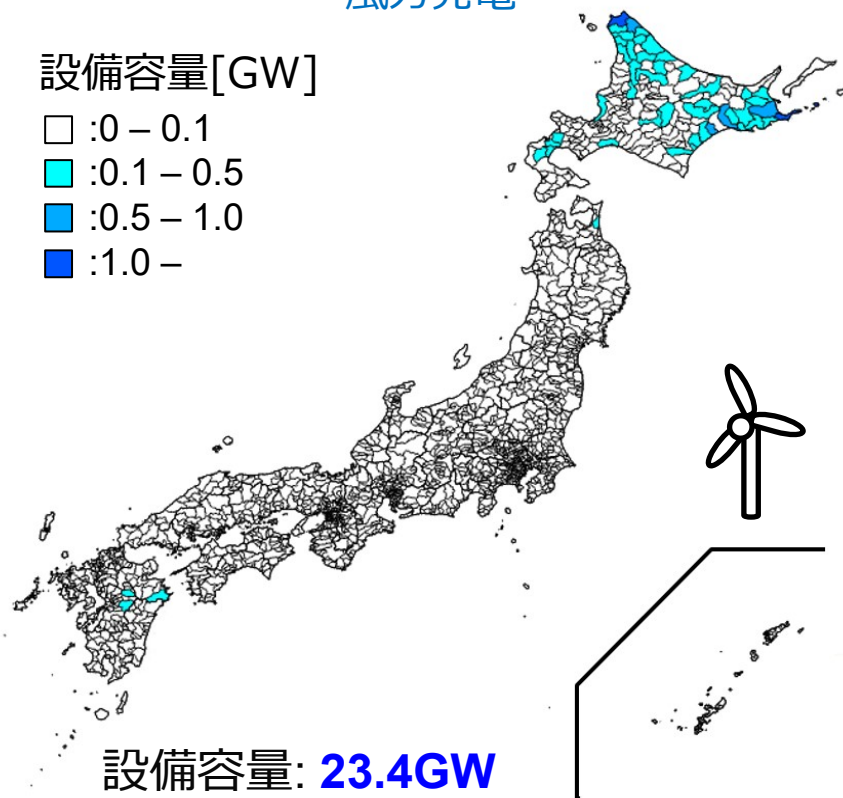
- :0 - 0.1
- :0.1 - 0.5
- :0.5 - 1.0
- :1.0 -



## 風力発電

設備容量[GW]

- :0 - 0.1
- :0.1 - 0.5
- :0.5 - 1.0
- :1.0 -

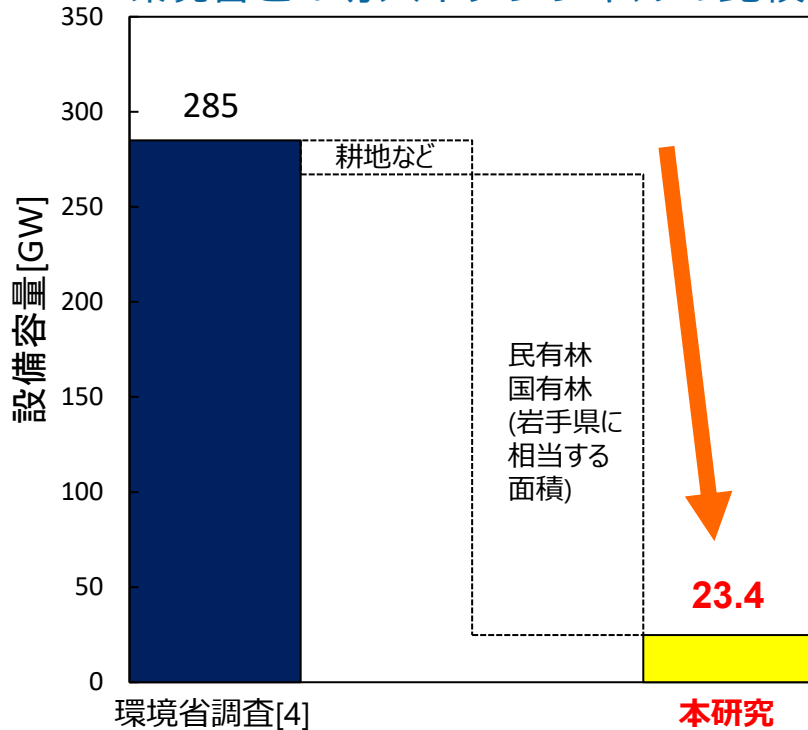


土地利用競合を考慮した導入ポテンシャルは太陽光:**65.7GW**, 風力:**23.4 GW**  
年間発電量に換算すると122TWhとなり2020年の年間電力需要の**約1割**程度。  
(経済性・系統制約は未考慮)。

# 環境省とのポテンシャルの差異(陸上風力)

環境省調査による陸上風力のポテンシャルと比較した結果を以下に示す。

環境省との導入ポテンシャルの比較



環境省の導入ポテンシャル(北海道稚内周辺)



環境省調査の導入ポテンシャルのうち約7割は民有林・国有林への設置を前提としていることに留意が必要。

# 1. 再生可能エネルギーの導入可能性

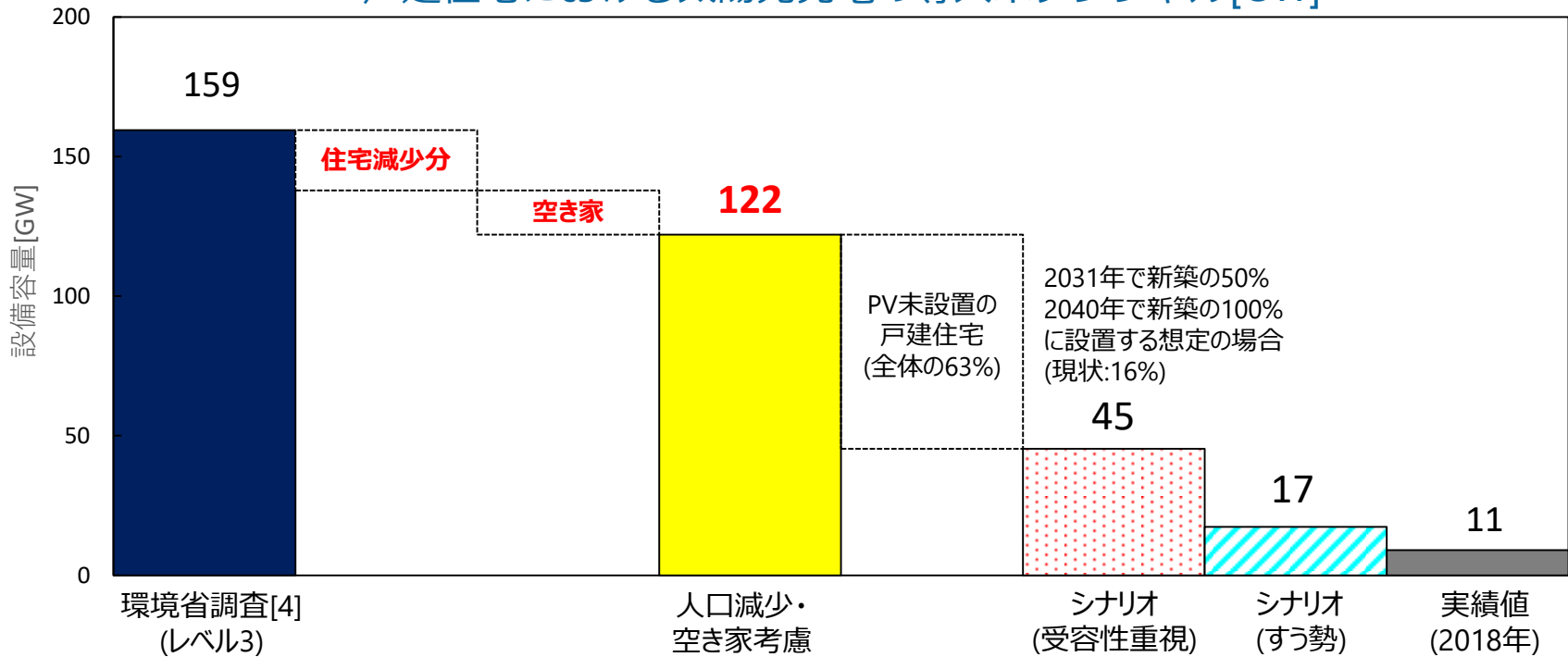
## 建物設置型太陽光発電はどの程度設置可能か？

本内容（スライド23-25）は（一財）電力中央研究所在職時に取りまとめた基本政策分科会資料(朝野ら[5])に基づくものです。

# 戸建住宅における太陽光発電の導入ポテンシャル

戸建住宅の導入ポテンシャルを考える上では、人口減少に伴う住宅数の減少や空き家などを考慮する必要がある。

戸建住宅における太陽光発電の導入ポテンシャル[GW]



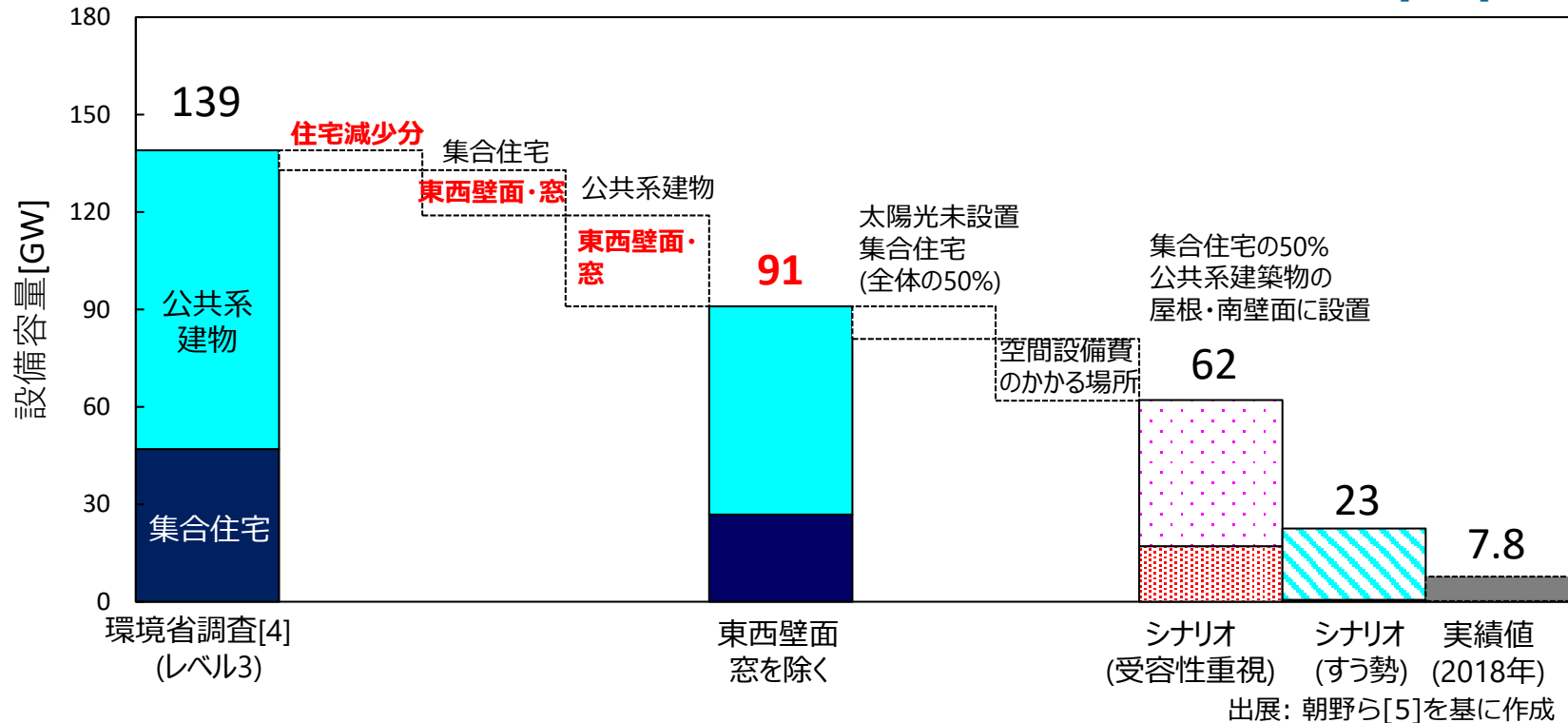
出展: 朝野ら[5]を基に作成

環境省ポテンシャル評価では最大で159GWと評価されており、年間発電量に換算すると年間電力需要の約2割に相当。  
 ただし**空き家などにも設置される想定**であることに留意が必要。

# 集合住宅・公共系建築物における導入ポテンシャル

集合住宅・公共系建築物における太陽光発電の導入ポテンシャルを以下に示す。

集合住宅・公共系建築物における太陽光発電の導入ポテンシャル[GW]



環境省ポテンシャル評価では139GWと評価されており、年間発電量に換算すると年間電力需要の約2割に相当。

日射条件が悪い壁面などにまで設置して達成できる導入量であることに留意。

# 太陽光・陸上風力の導入可能性

## 日本における設置可能場所の面積

法規制の影響を受けにくい設置可能場所の面積は全国土の**0.9%**(3,321km<sup>2</sup>)程度。ただし、その多くは傾斜面であることに留意が必要。さらに、設置可能場所の約7割(2,341km<sup>2</sup>)**太陽光・陸上風力の土地利用競合**が発生する。

## 地上設置型太陽光・陸上風力の導入ポテンシャル

年間平均日射量・風速を用いて簡易的に発電量を推計すると、両電源による年間発電量(122TWh)は2018年の年間電力需要(897TWh)の**約1割**程度。

## 建物設置型太陽光の導入ポテンシャル

現時点で残存する戸建住宅や建物の全て(空き家や壁面なども含む)に太陽光を設置したとしても、建物の年間発電量の合計は、年間発電量360TWhであり、地上に設置される太陽光や陸上風力と合計しても、**最大でも5割程度**。

自然環境との調和や電源間の競合など考慮すると**地上に設置できる太陽光・風力発電の設備容量は限られる**（本評価では系統制約・経済性は未考慮）。

→ 洋上ではどの程度設置可能か？



# 1. 再生可能エネルギーの導入可能性

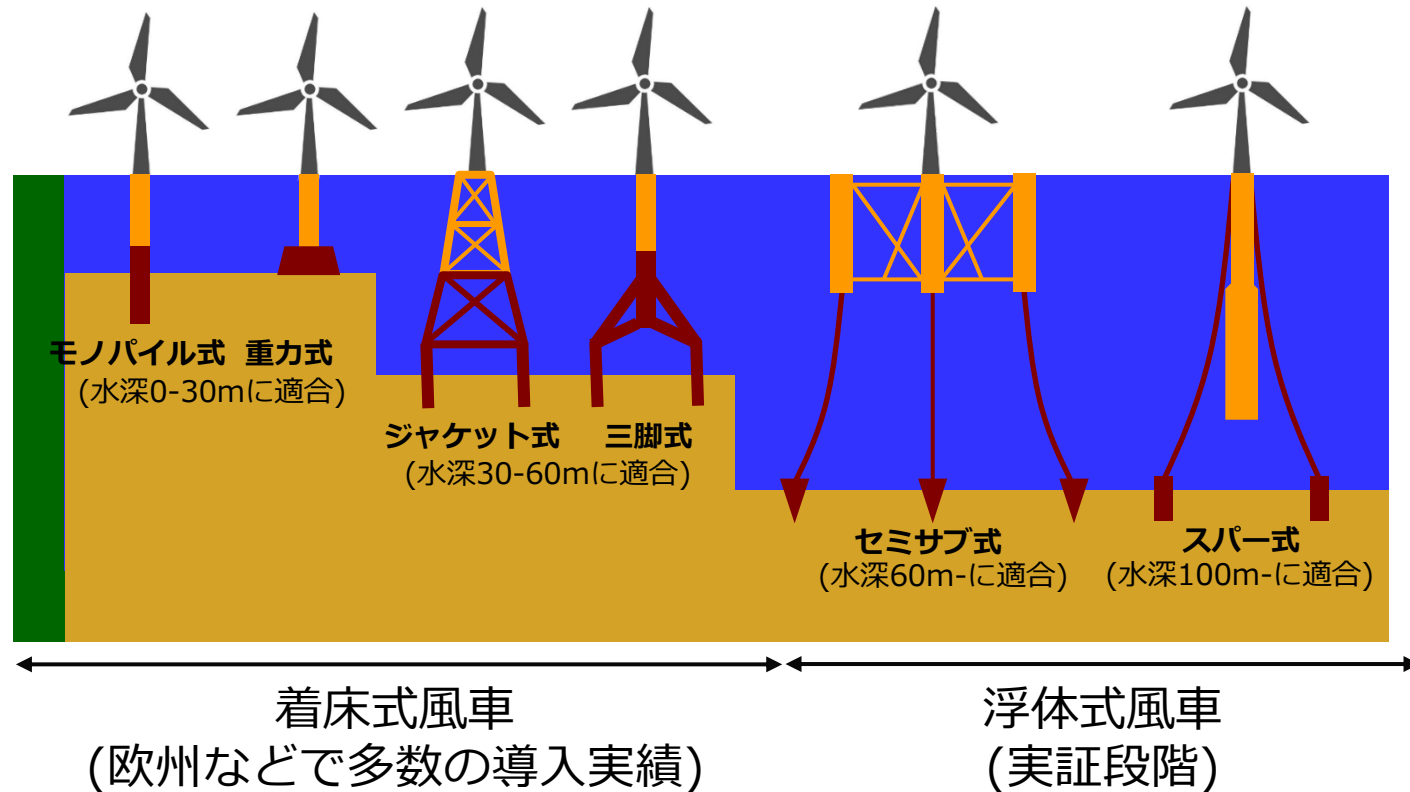
## 洋上風力の導入可能性をどのように考えるか？

本内容は（一財）電力中央研究所在職時に取りまとめた学術論文[6]・研究資料[7][8]に基づくものです。  
ただし、2021年4月時点のGISデータを基に更新しているため、各種文献と数値が一致しない箇所があります。

# 洋上風力の基本

洋上風力には、支持構造物を海底に設置する**着床式風車**(水深0-60mに設置可)と、水面に浮体させる**浮体式風車**(水深60m以深でも設置可)が存在する。  
 ただし、そのうち浮体式風車は現在実証段階である(長崎県五島市などで実証)。

## 洋上風力の設置形態



# 日本における再エネ海域利用法

2019年4月に「再エネ海域利用法」が施行され、日本の領海のうち一定の基準に適合する区域を「促進区域」として指定し、洋上風力の長期占有が可能となった。

## 再エネ海域利用法第8条第1項における促進区域の指定要件

号	要件
一	気象、海象その他の自然的条件が適当であること。
二	航路及び港湾の利用、保全及び管理に支障を及ぼすことがないこと。
三	人員及び物資の輸送に関し港湾とを一体的に利用することが可能であると認められること。
四	運用する電線路との電氣的な接続が適切に確保されることが見込まれること。
五	漁業に支障を及ぼさないことが見込まれること。
六	漁港の区域、港湾区域、海岸保全区域、低潮線保全区域と重複しないこと。

\*1 海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（平成30年法律第89号）

\*2 2019年12月27日に指定。

今後洋上風力は、自然条件や船舶などの影響を踏まえ、再エネ海域利用法に基づく「促進区域」の指定要件を満たす海域に導入が進むことが予想される。

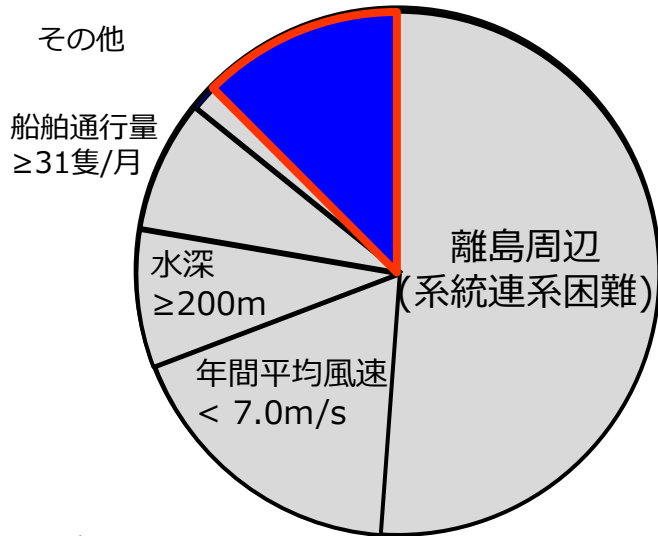
# 「促進区域」の対象となる海域の評価

地理情報システム(GIS)を用いることにより、法律上「促進区域」の指定要件を満たす海域の推計を行った。

日本の領海



対象海域  
(16%)



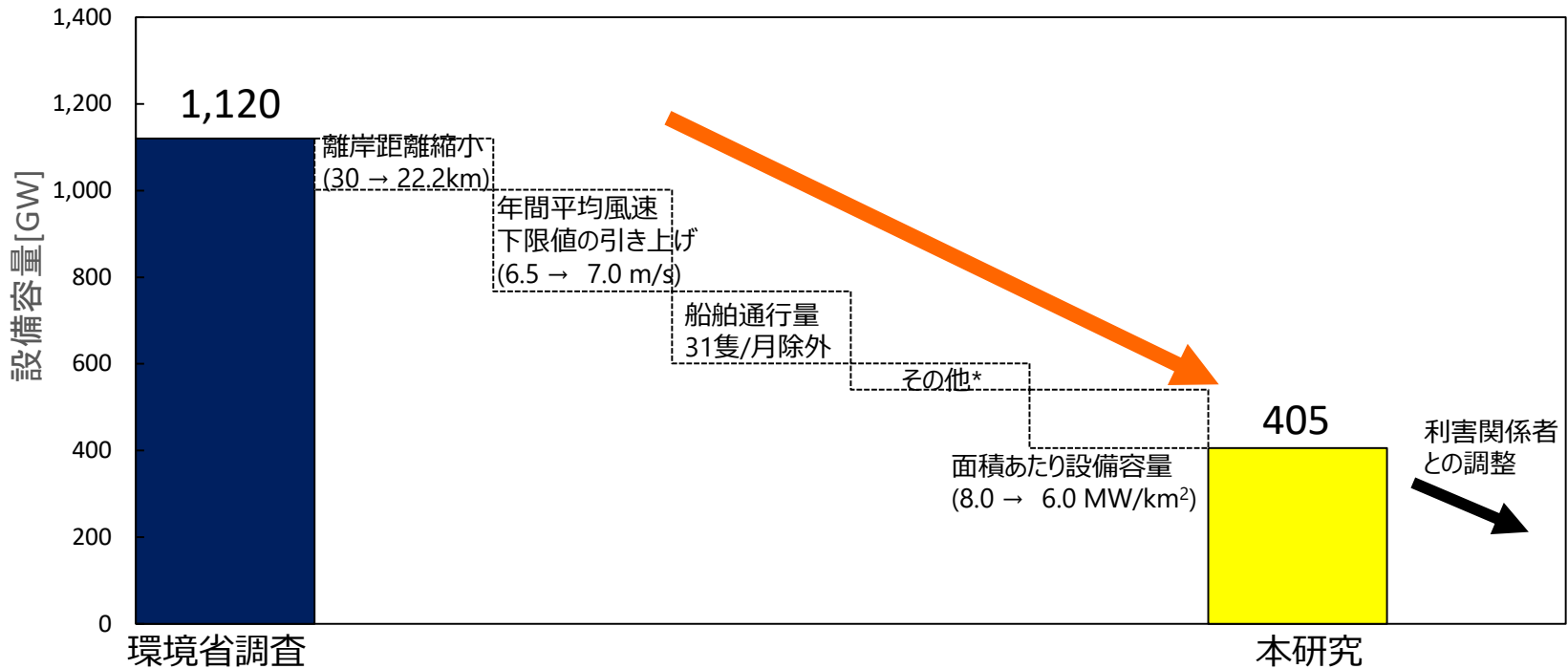
領海面積  
約430,000 km<sup>2</sup>

領海のうち「促進区域」の対象を受ける海域面積は領海の16%に相当(67,581km<sup>2</sup>)。

# 環境省調査との比較

「促進区域」の対象となる海域面積と、環境省調査で開発可能とされた海域を比較した。

環境省との導入ポテンシャルとの比較[GW]



\*1 内訳は図中の左から右方向へ順に制約を加えた場合の数値を示し、制約順により変動する場合がある。

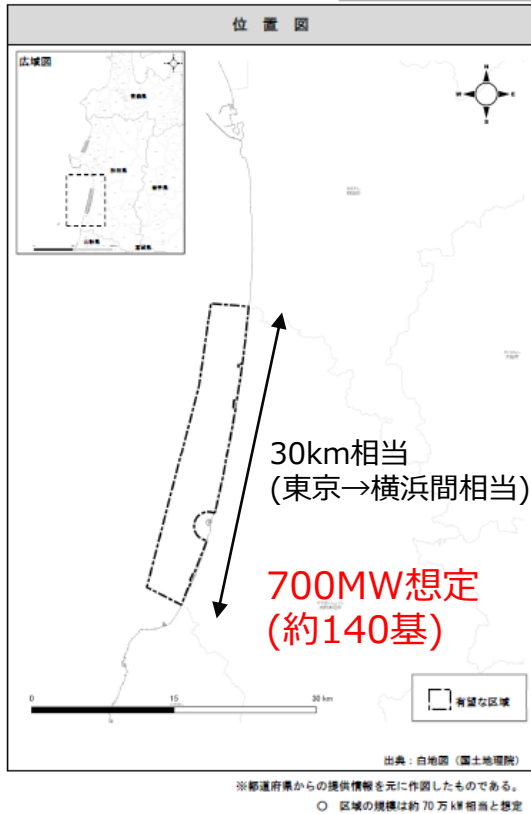
\*2 海岸保全区域と在日アメリカ合衆国軍の海上訓練区域の除外を指す。

「促進区域」の対象となる海域における導入ポテンシャルは環境省調査の1/3程度  
 → 洋上風力の設置のためにはさらに利害関係者との調整が必要となる

# 「促進区域」に指定されている海域の例

2022年5月現在、5区域が「促進区域」に指定されている。

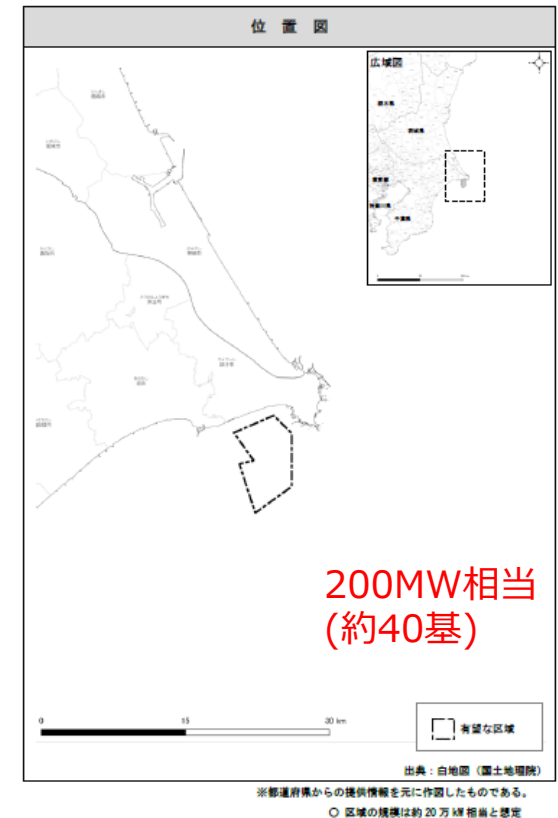
秋田県由利本荘沖



秋田県能代市・三種町・男鹿市沖



銚子市沖



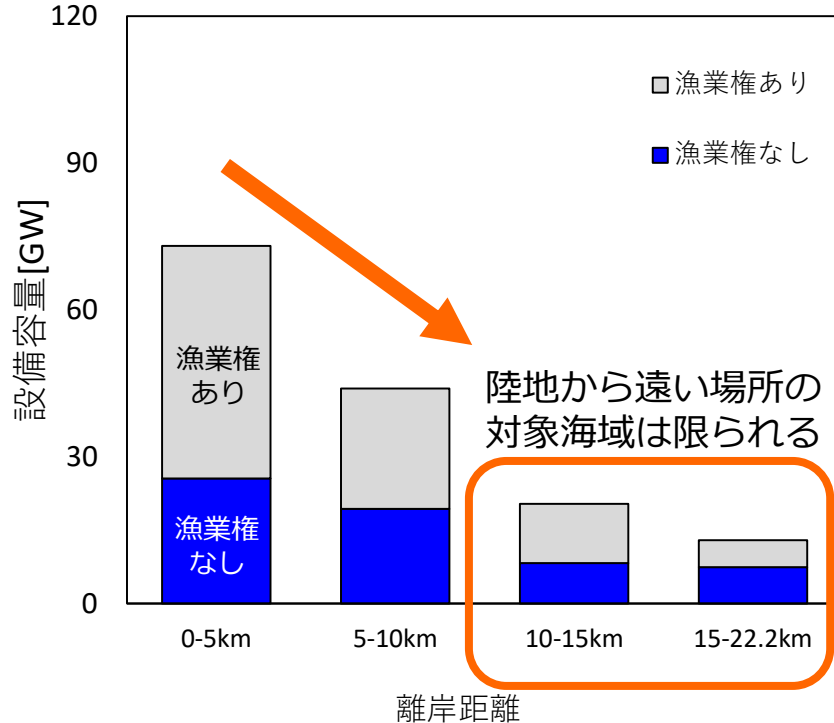
「促進区域」の検討が行われている海域においては、いずれも陸地に近い場所(0 - 2km)に、大規模な風車の設置が想定されている。

# 日本の離岸距離別の設備容量

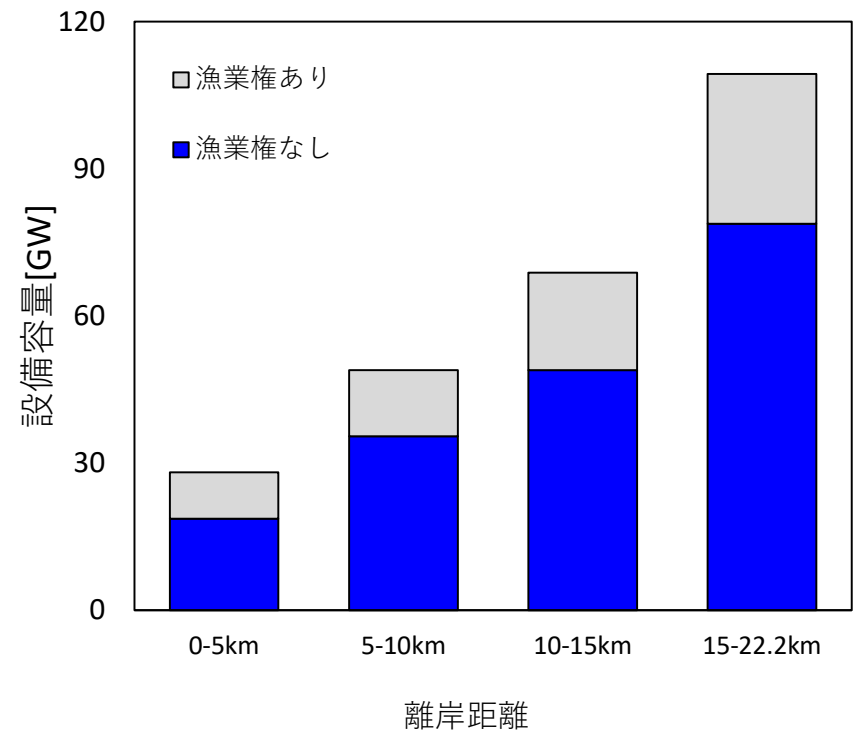
景観などへの配慮の観点から、海外と同様に陸地から離れた場所のみに風車を設置する想定の下、離岸距離の設備容量を推計した。

離岸距離の下限閾値別の設備容量[GW]

(A) 着床式風車の対象海域(水深60m未満)



(B) 浮体式風車の対象海域(水深60-200m)





陸地から離れた場所に着床式風車を設置するとした場合、日本では急激に水深が深くなるため、**陸地から遠い場所の対象海域は限られる。**

→ 日本においては**浮体式風車**の技術開発を目指すことも重要となる。

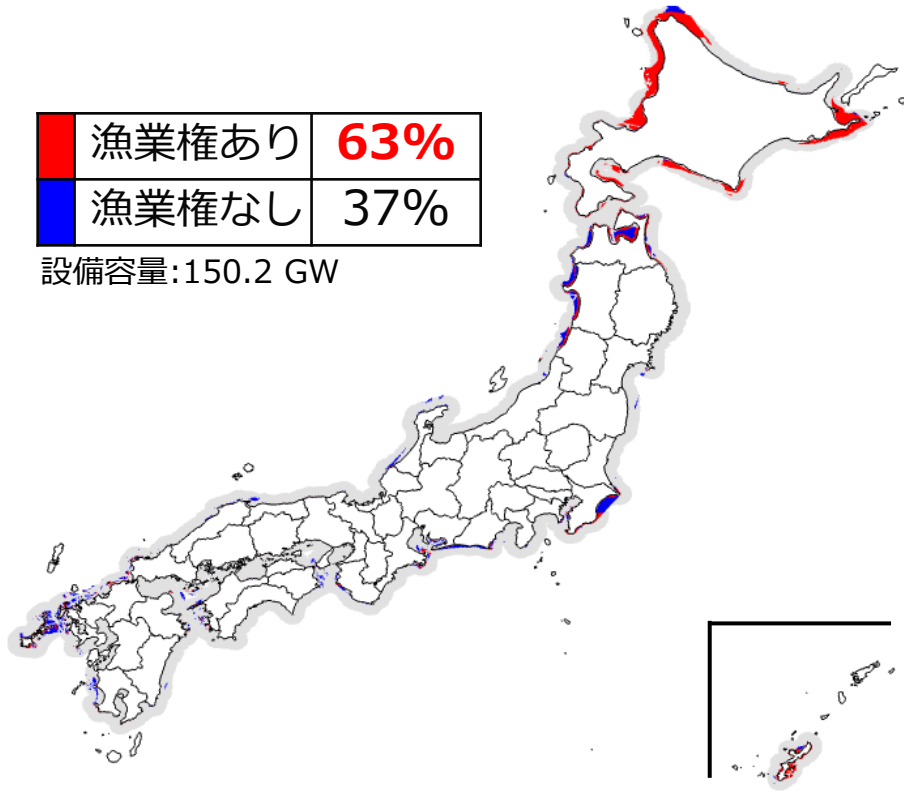
# 漁業権が設定されている海域

「促進区域」の対象海域のうち、漁業権が設定されている海域の特定を行った。



着床式風車の対象海域

	漁業権あり	<b>63%</b>
	漁業権なし	37%

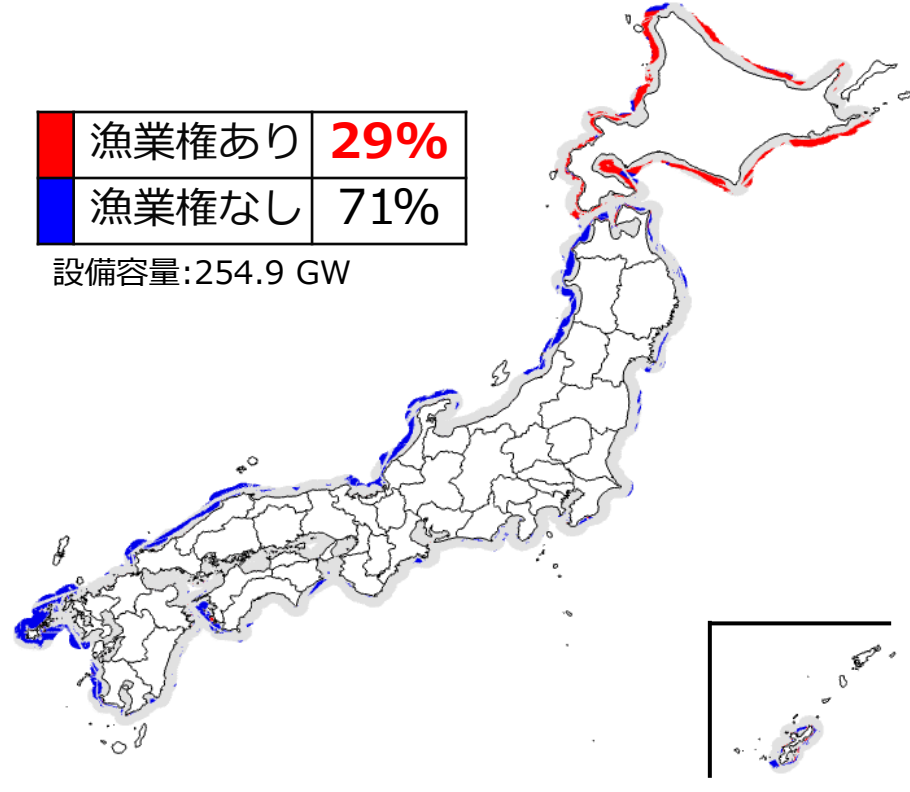
設備容量:150.2 GW



浮体式風車の対象海域

	漁業権あり	<b>29%</b>
	漁業権なし	71%

設備容量:254.9 GW



「促進区域」の対象海域のうち**大部分では漁業権**が設定されている。  
また北海道では、着床式・浮体式問わず漁業関係者との調整が重要となる。



# コンフリクトが生じにくい海域

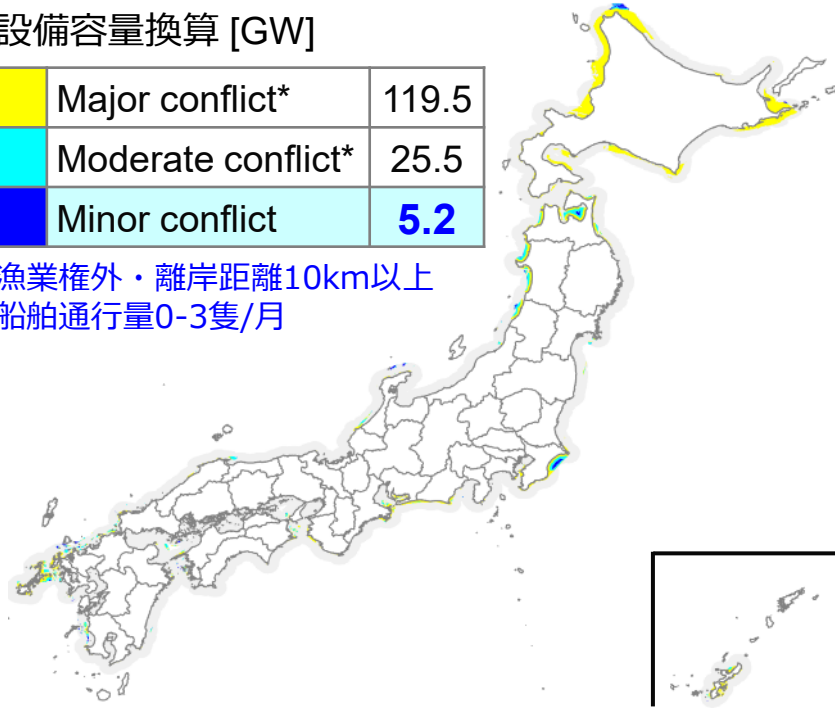
「促進区域」の対象となる海域のうち、利害関係者とのコンフリクトが生じにくい海域を評価した。

(A) 着床式風車の対象海域

設備容量換算 [GW]

Major conflict*	119.5
Moderate conflict*	25.5
Minor conflict	<b>5.2</b>

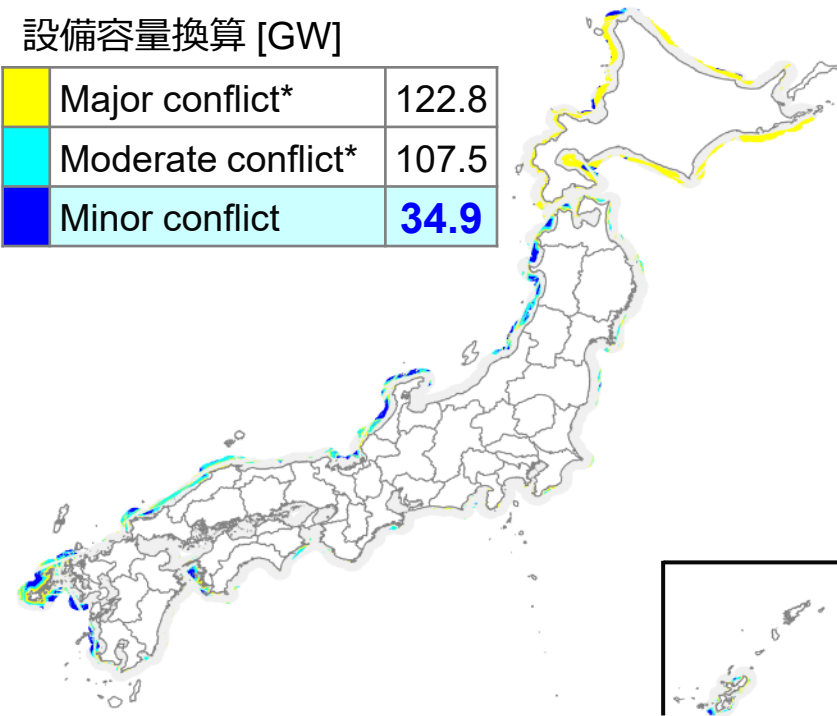
漁業権外・離岸距離10km以上  
船舶通行量0-3隻/月



(B) 浮体式風車の対象海域

設備容量換算 [GW]

Major conflict*	122.8
Moderate conflict*	107.5
Minor conflict	<b>34.9</b>



\* Major: 漁業権内・離岸距離0-5km・船舶通行量21-31隻/月, Moderate: 離岸距離6-10km, 船舶通行量4-21隻/月と定義。

利害関係者とのコンフリクトが生じにくい海域の全てに風車を設置した場合の年間発電量は108.6 TWh (2020年度の年間電力需要の約1割)

→ さらに風車を設置する場合、**コンフリクトが生じやすい海域に設置せざる得ない。**

# 洋上風力の導入ポテンシャル評価の課題

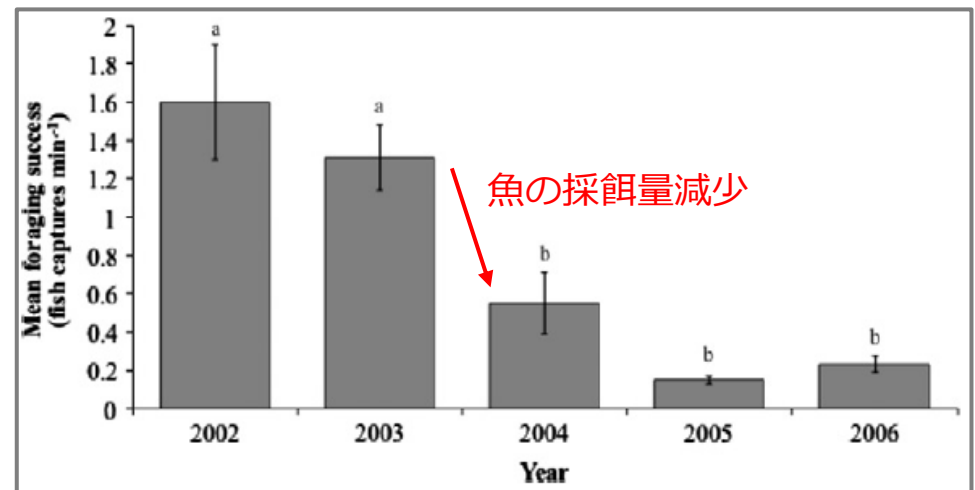
2004年に英国で建設されたScroby sands wind farmでは、風車設置後に海鳥であるコアジサシの採餌量の減少や、繁殖場所の変化が見られたことが報告されている。

Scroby Sands周辺の海砂



\* 図中のcは、2004年に生じた海砂。  
(出典: Skate(2012))

コアジサシの採餌量(ニシン類)の推移



\* 2003/11-2004/2に風車設置。(出典:Perrow 2011)  
\* ニシンの産卵期である冬季において、着床式風車のモノパイル設置作業の騒音が発生したため、採餌量が減少したためと推察されている。

洋上風力の導入が進む欧州では、風車の設置前後におけるモニタリングによって生態系影響が指摘されている事例が存在する。

→ 生態系との調和に向けて、影響が懸念される海域を事前に把握することも重要。

# 海鳥へ与える影響が懸念される海域の評価例

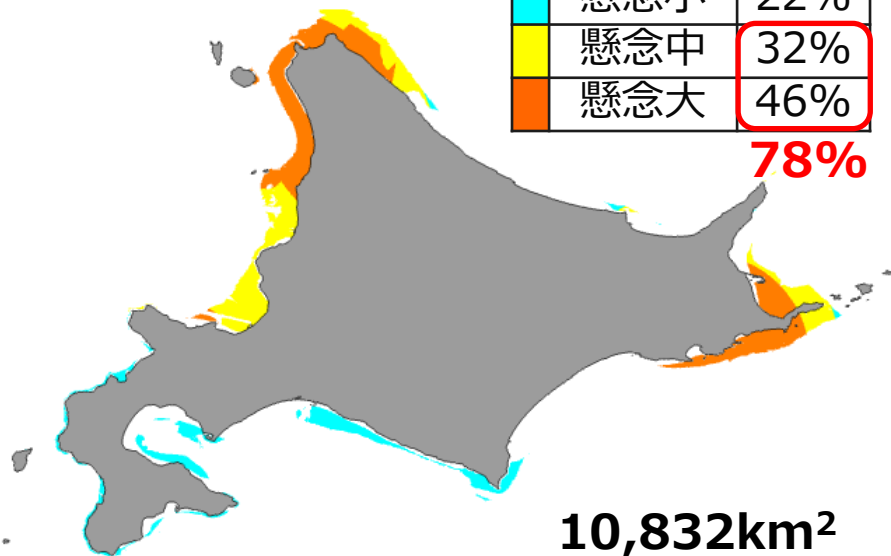
欧州で用いられている手法\*に倣い、海鳥の営巣地情報を参考に洋上風力が海鳥へ与える影響が懸念される海域を特定した。

洋上風力設置に伴う海鳥へ与える懸念レベルの分類(尾羽2000)

(A) 着床式風車の対象海域

懸念小	22%
懸念中	32%
懸念大	46%

78%

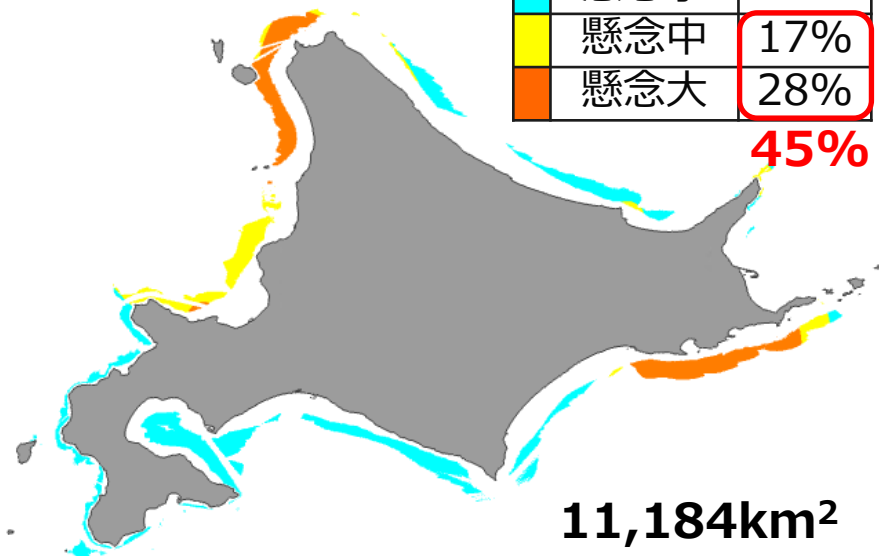


10,832km<sup>2</sup>

(B) 浮体式風車の対象海域

懸念小	56%
懸念中	17%
懸念大	28%

45%



11,184km<sup>2</sup>

データの出典:尾羽他[7]

\* 営巣地情報 (コロニーデータ) における営巣数・海鳥の種類・海鳥の種類別リスクにより推計。

「促進区域」の対象となる海域と海鳥への影響が懸念される海域の大部分が重複。  
→ 洋上風力が大量に導入された場合、生態系への配慮もより重要となる。

# 洋上風力の導入可能性

## 「促進区域」の対象となる海域の面積

我が国の領海・内水(約430,000km<sup>2</sup>)のうち、「促進区域」の対象となる海域面積は領海の**16%**(67,581km<sup>2</sup>)となる。

## 利害関係者との調整の難易度が低い海域

「促進区域」の対象となる海域のうち、**コンフリクトが生じにくい海域は限られる。**  
風車を大量に導入する場合、**利害関係者との調整の在り方を確立**することが重要。

## 今後の導入ポテンシャル評価の課題

風車を大量に導入する場合、**生態系への配慮もより重要**となる。  
生態系影響を考慮した洋上風力の設置場所の評価は今後の課題。

地上と比較すると洋上風力の設置対象海域は多く存在するものの、大量に導入する場合には、**社会的受容性**や**生態系影響**についても十分考慮される必要がある。

## 2. カーボンニュートラル達成時の影響評価

カーボンニュートラル達成時の影響をどのように評価するか？

本内容（スライド40-55）は（一財）日本エネルギー経済研究所で取りまとめた基本政策分科会資料[9]、研究所論文[10]、学術論文[11]を要約したものです。

# カーボンニュートラル達成に向けた制約

カーボンニュートラルの達成において、様々な制約を考慮する必要がある。

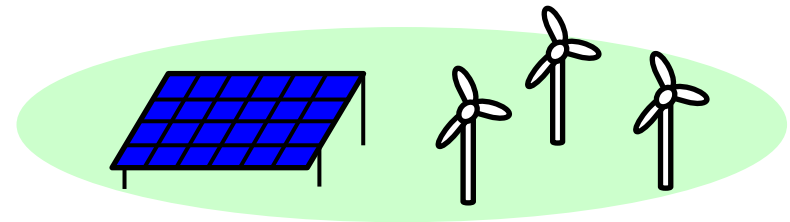
## カーボンニュートラルの達成に向けた制約の一例

### GHG排出量制約



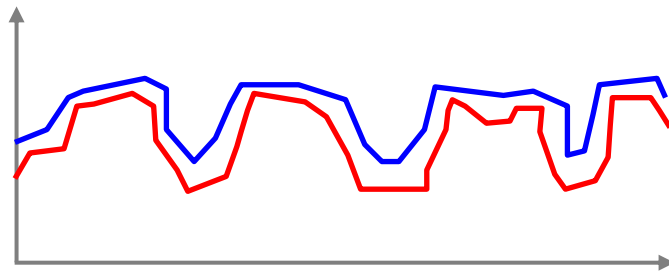
\* 2050年のGHG排出量が0以下

### 再生可能エネルギーの土地利用制約



\* 設置可能な範囲を超えて再エネを設置しない

### 電力需給



\* 全ての時間で電力需給を満たす

### サービス需要



\* 運輸や産業(鉄鋼など)の需要を満たす

これらの制約を満たすことを前提に、技術の組み合わせを検討する。

# (参考) 数理計画法の一例：ナップザック問題

## Object



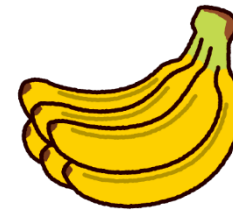
300円, 400g



160円, 200g



最大重量  $W$ g



180円, 250g



100円, 100g

重量の合計が  $W$  以内で価値  $V$  が最大となるアイテムの組み合わせは？

目的関数:  $\max V = 300\text{円} \times w\text{個} + 180\text{円} \times x\text{個} + 160\text{円} \times y\text{個} + 100\text{円} \times z\text{個}$

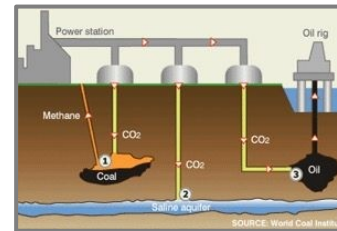
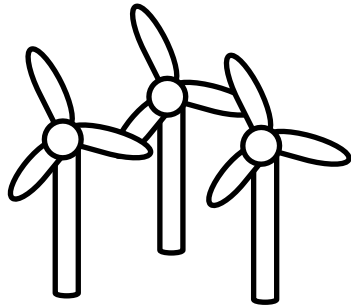
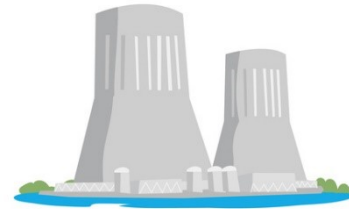
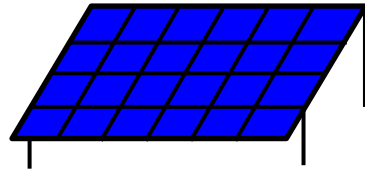
制約式:  $W > 400\text{g} \times w\text{個} + 250\text{g} \times x\text{個} + 200\text{g} \times y\text{個} + 100\text{g} \times z\text{個}$

## Output

- ・ 価値  $V$  が最大となる各アイテムの個数(リンゴ  $w$  個, バナナ  $x$  個..)
- ・ 各アイテムを最適解で入れた際の価値  $V$

\* ナップザック問題は解が整数となる整数計画問題であり、厳密には後述する線形計画問題とは異なる。

## Object



CO<sub>2</sub>排出量の合計が0以下でコストCが最小となる技術の組み合わせは？

目的関数:  $\min C = \text{太陽光発電のコスト} \times w[\text{GW}] + \text{原子力のコスト} \times x[\text{GW}] \dots$

制約式:  $0 \geq \text{太陽光発電のCO}_2\text{排出量} \times w[\text{t}] + \text{原子力のCO}_2\text{排出量} \times x[\text{t}] \dots$   
(その他需給バランスや土地利用制約など)

## Output

- コストCが最小となる各技術の導入量 → 重要技術の特定・立地影響
- 各技術を最適解で導入した際のコストC → コスト影響



# 政策評価におけるモデル分析の留意点

## 予測(Forecast)ではなく Backcast

モデルの答えとして出てくるのは予測ではなく、**カーボンニュートラルを前提**とした際にコスト(資本費+燃料費+O&M費)が最小限となる**必要な技術の組み合わせ**。

→ 重要技術の特定や、技術を導入する上での課題解決の検討に活用。

## 前提条件の不確実性

2050年までを対象とした場合、各技術の資本費や燃料費などは**見通しの不確実性があることに留意**が必要であり、不確実性がある場合には感度分析などが有効。また、土地利用など比較的将来に渡って変動しにくいものに注目することも有効。

## 複数のシナリオの考慮

単一のシナリオではなく複数のシナリオについて計算を行い、各シナリオの結果の**相対的な関係性に注目**することも重要。

→ 特定のシナリオのみの方向性を目指すのではなく、様々な不確実性に備えた方策や、費用対効果の高いあり方の検討に活用。

## 2. カーボンニュートラル達成時の影響評価

カーボンニュートラル達成に向けたシナリオ評価（ケーススタディ）

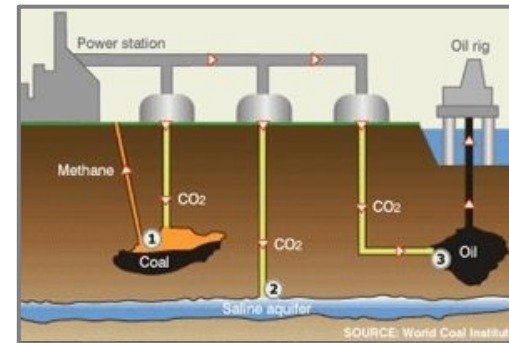
# 技術の組み合わせ方についてのシナリオ

本分析にあたり、技術の組み合わせ方について複数のシナリオの検討を行った。

## ① ベースケース

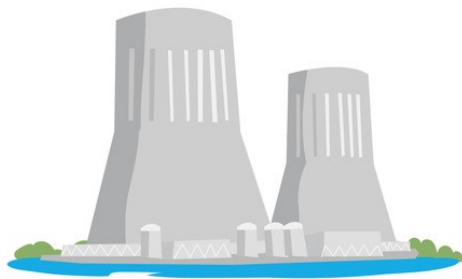
原子力発電	建設中3基のみ新設
火力発電	利用可
CCS (CO <sub>2</sub> 貯留)	国内:1億t/CO <sub>2</sub> /yr 海外:1.5億t/CO <sub>2</sub> /yr
再エネ	利用可

## ② CO<sub>2</sub>回収・貯留拡大ケース (国内:2億t/CO<sub>2</sub>/yr, 海外:3億t/CO<sub>2</sub>/yr)

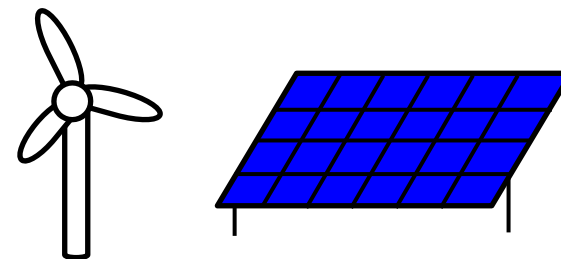


## ③ 原子力拡大ケース

(2050年の導入量をベースケースの2倍)

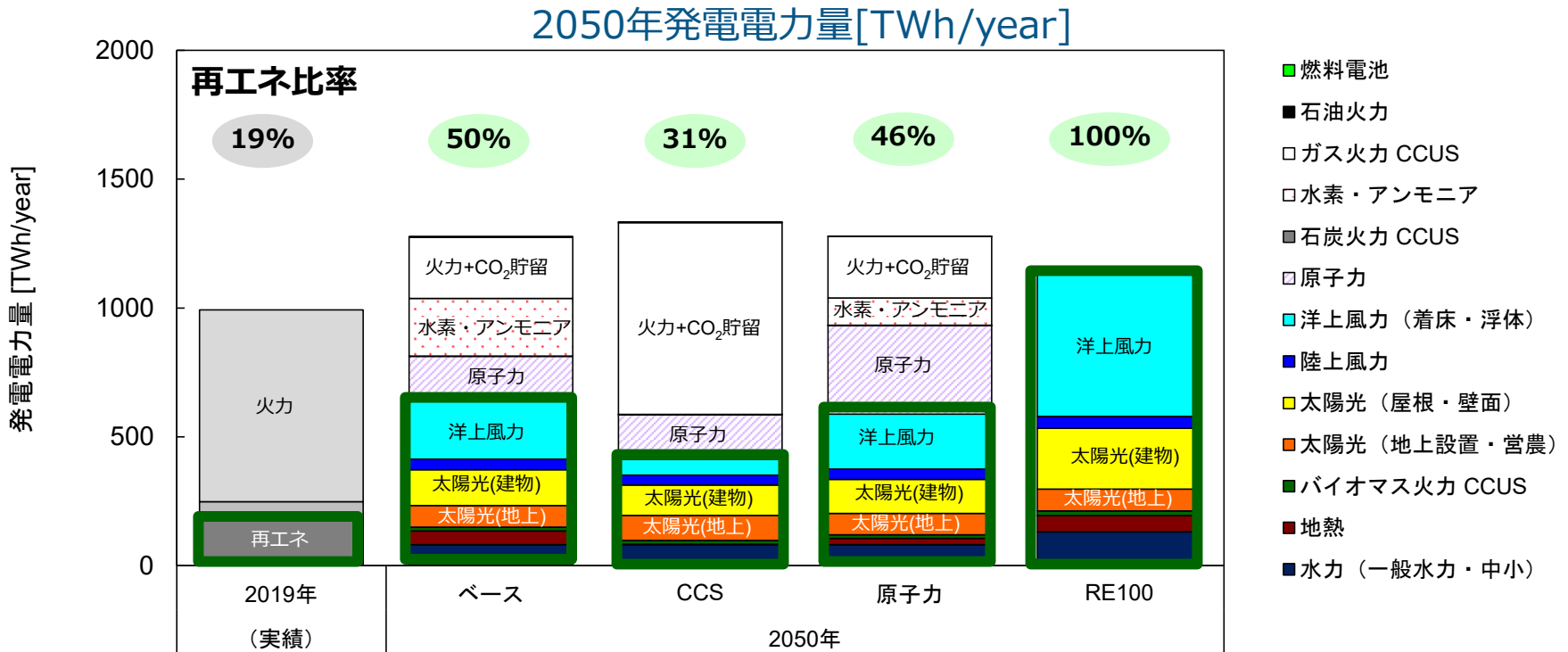


## ④ 再エネ100%ケース (再エネのみで電力供給)



# 2050年の電源構成の計算例

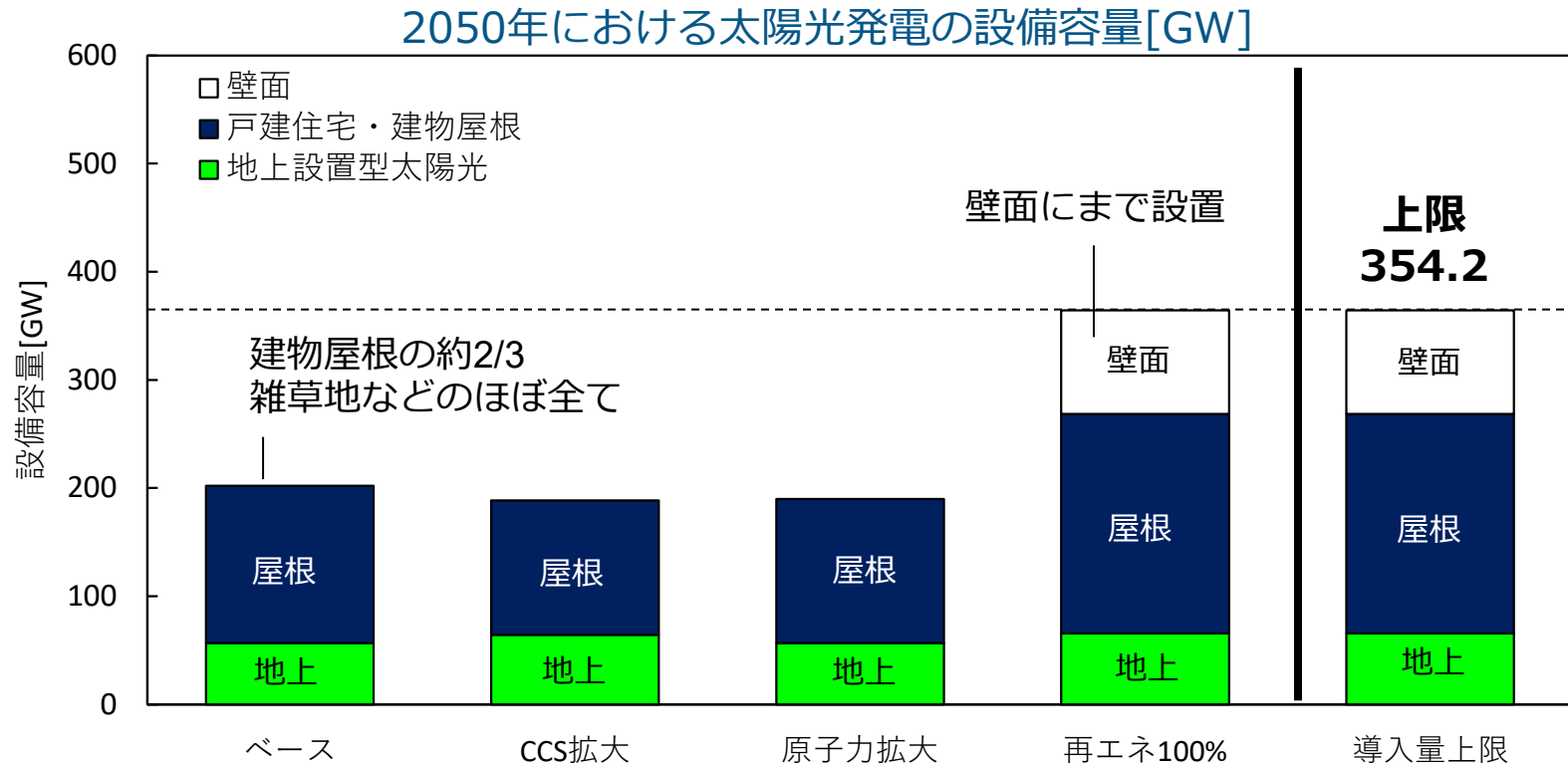
エネルギーシステム全体へ生じる費用が最小となる場合における発電電力量を示す。



原子力や火力発電(CO<sub>2</sub>回収付)などを活用するベースケースにおいても、**再生可能エネルギーの比率は50%**となる結果が示された。  
 → 再生可能エネルギーの比率が50%程度となった際の立地影響はどの程度か？

# CNにおける太陽光発電の導入量

2050年における太陽光発電の設備容量の計算結果の一例を以下に示す。

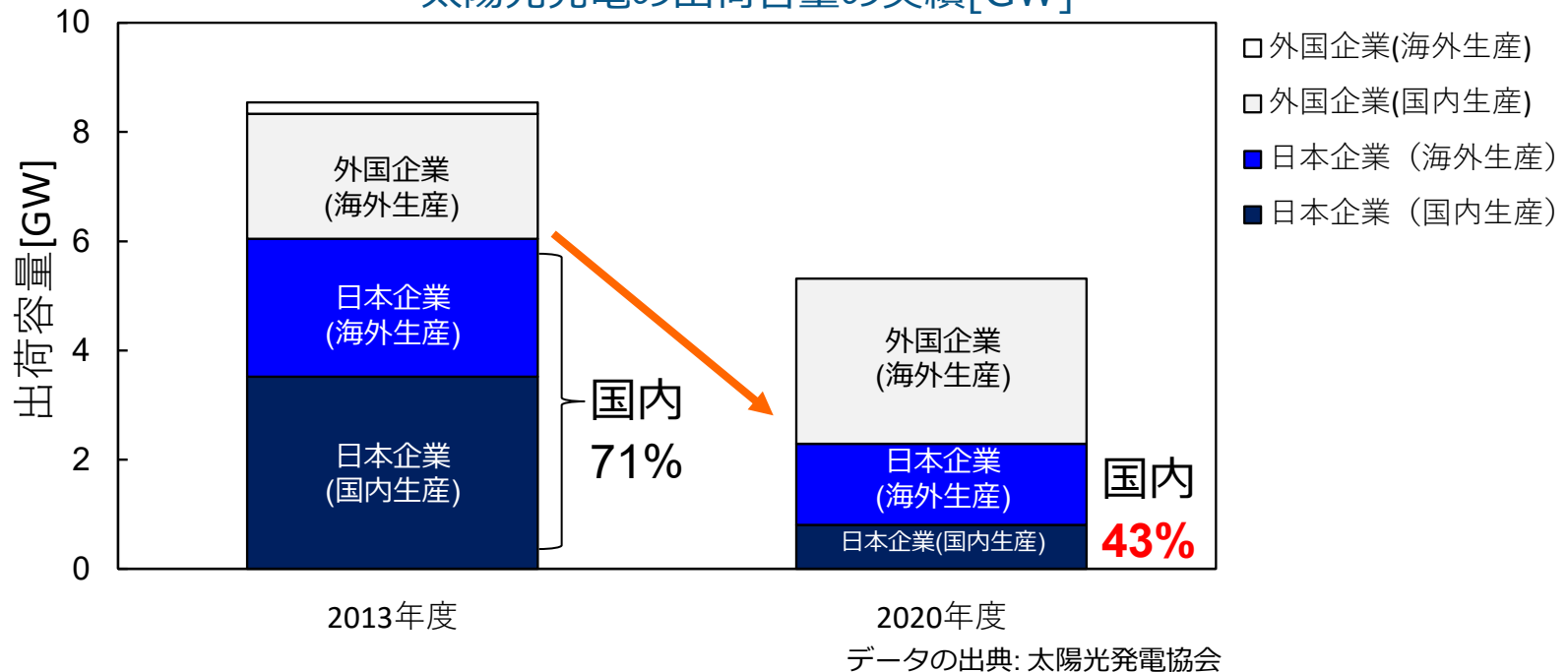


原子力や火力発電などを活用しても、**雑草地の全て**に太陽光発電が設置され、さらに再エネ100%とすると**建物の壁面**にまで設置されることに相当する。  
 → 斜面地や日射条件が悪い場所にまで太陽光発電を設置せざるえなくなる。

# (参考) 太陽光発電の国内出荷量の内訳

- FITの導入当初(2013年度)において国内出荷量のうち日本企業が占める割合は約7割を占めていたが、2020年度では約4割に低下。
- 国内メーカー品であっても、原材料のシリコンなどは中国などからの輸入に依拠。

太陽光発電の出荷容量の実績[GW]

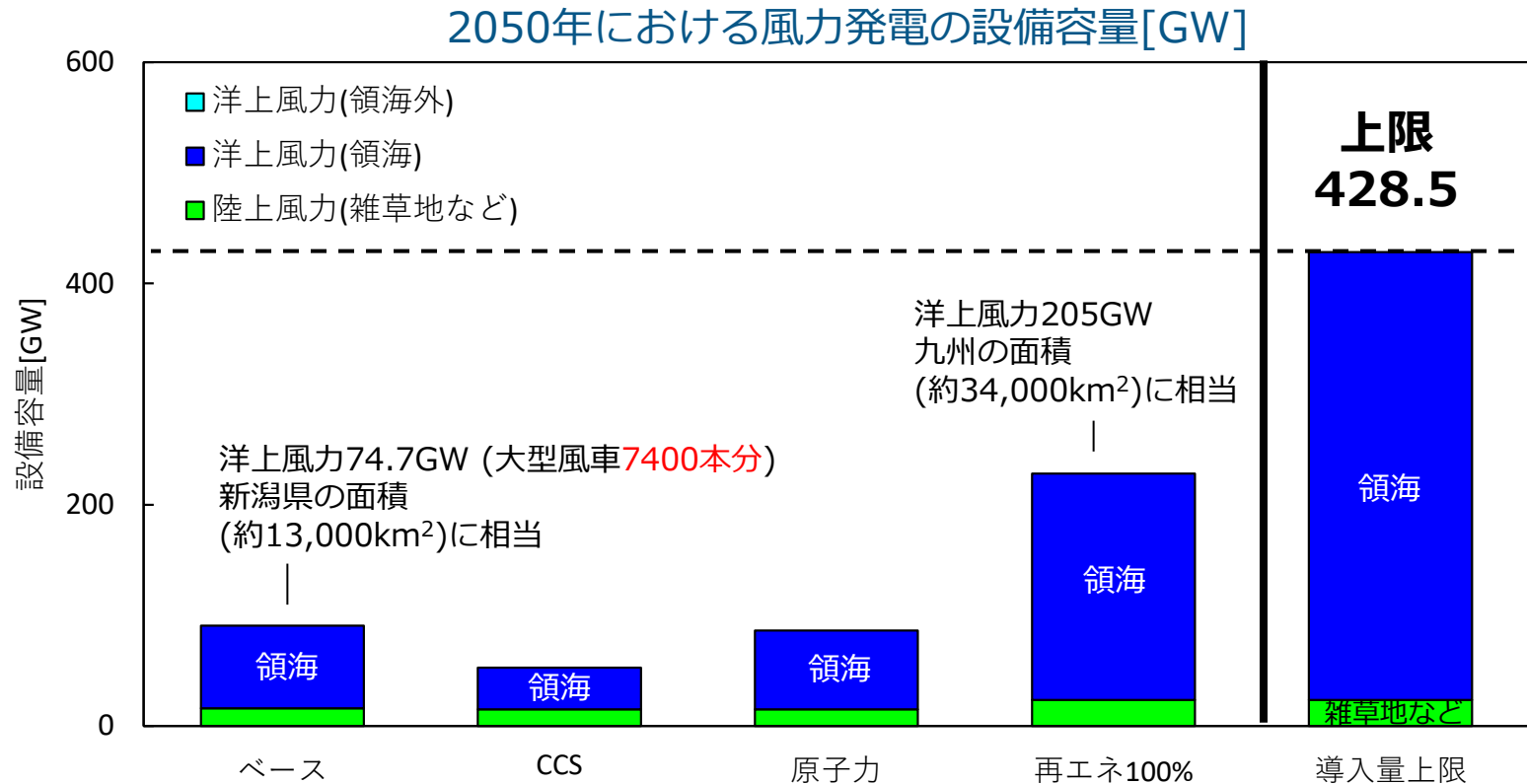


火力発電を太陽光発電などで代替した場合においても、原材料や太陽光パネルなどは輸入に依拠していることに留意が必要。

→ 国内産業の活性化や新材料(有機物など)を用いた技術開発なども重要となる。

# CNにおける風力発電の導入量

2050年における風力発電の設備容量を以下に示す。



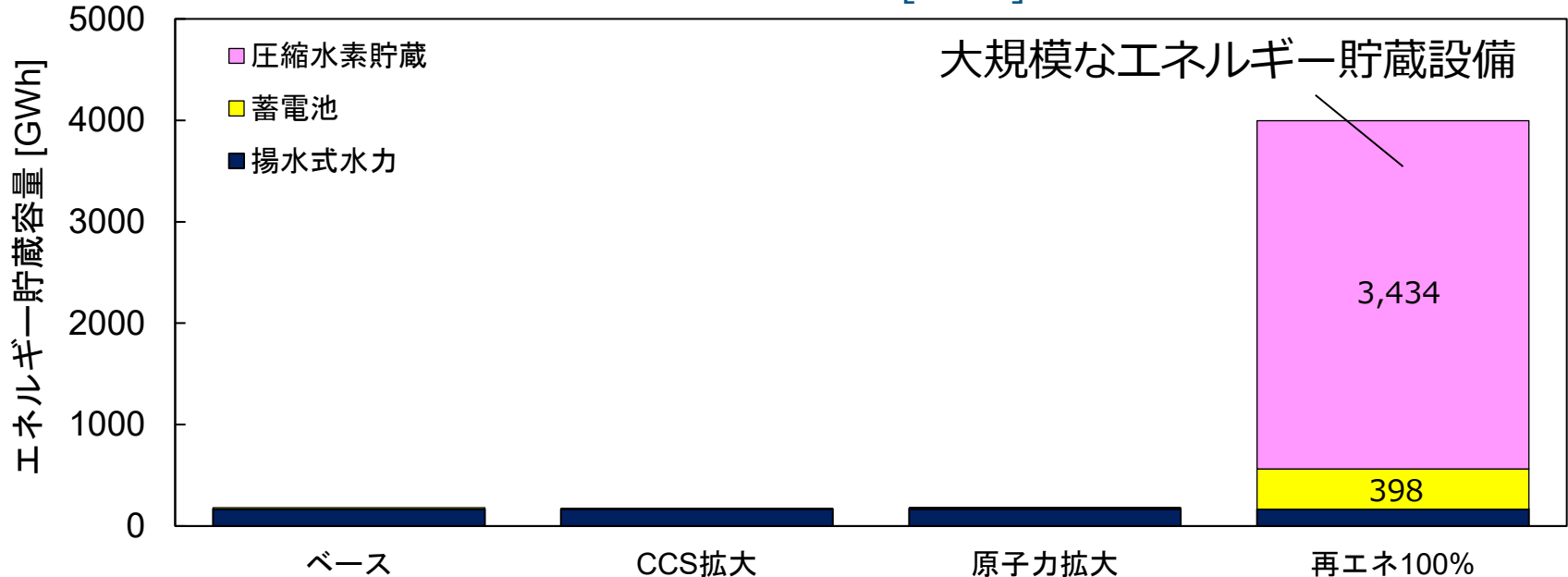
火力発電等を使用するベースケースでは新潟県の面積、再エネ100%ケースでは九州の面積に相当する海域に風車が大量導入されることに相当。

→ 利害関係者との調整や生態系への配慮はより重要となる。

# CNにおけるエネルギー貯蔵容量

電力需給を維持するのに必要なエネルギー貯蔵容量を示す\*。

エネルギー貯蔵容量[GWh]



\* 電気自動車所有者の50%が電力需給に活用すると想定した場合。

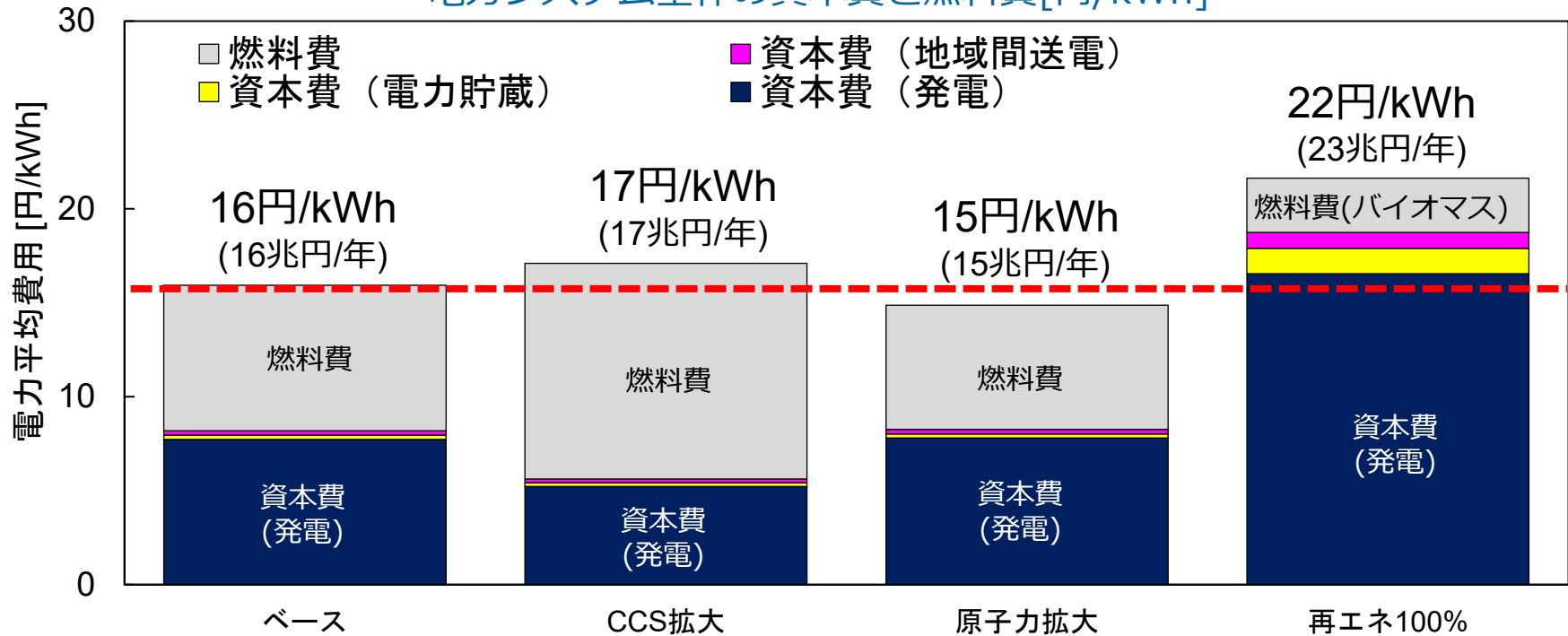
再生可能エネルギーの比率が極端に多い場合、**大規模なエネルギー貯蔵設備**が必要となることが示唆された\*(必要な蓄電池の貯蔵容量:398GWh)。  
現在の戸建住宅(2650万世帯)の全てに10kWhの蓄電池を設置した場合265GWh)



# 電力システム全体の資本費と燃料費

電力システム全体に生じる資本費と燃料費の合計を年間電力需要で除したものを各シナリオ間で比較した。

電力システム全体の資本費と燃料費[円/kWh]



再生可能エネルギーのみで電力供給を行うとする場合、燃料費は減少する一方で、**発電・電力貯蔵に関わる資本費が上回る。**

→ 費用対効果も考慮し様々な技術をバランスよく活用していくことが重要

# カーボンニュートラル達成時の影響評価

## カーボンニュートラルにおける立地影響

- CNを達成する場合、原子力・火力発電などを活用する場合においても太陽光・風力発電が大量に導入されることになり、**立地への影響は小さい**。
- さらに発電電力量の全てを再エネで供給する場合、傾斜面や壁面などの**条件の悪い場所における太陽光発電の設置**や、**利害関係者との調整が必要な海域における風車の設置**の必要性がより高まることとなる。

## カーボンニュートラルにおける各種費用

- 再エネ比率が極端に増大した場合、原子力・火力発電などを活用する場合と比較し、**電力システム全体に生じる費用**は増大する。そのため、再エネ比率を増大させる場合には、各技術の資本費低下の重要性がより増すこととなる。
- さらに発電電力量の全てを再エネで供給する場合、**必要なエネルギー貯蔵容量は大きく増大**する傾向が示された。そのため、貯蔵技術の確保が課題となりうる。  
(全戸建住宅に10kWhの蓄電池を設置したとしても、必要容量には満たない程度)

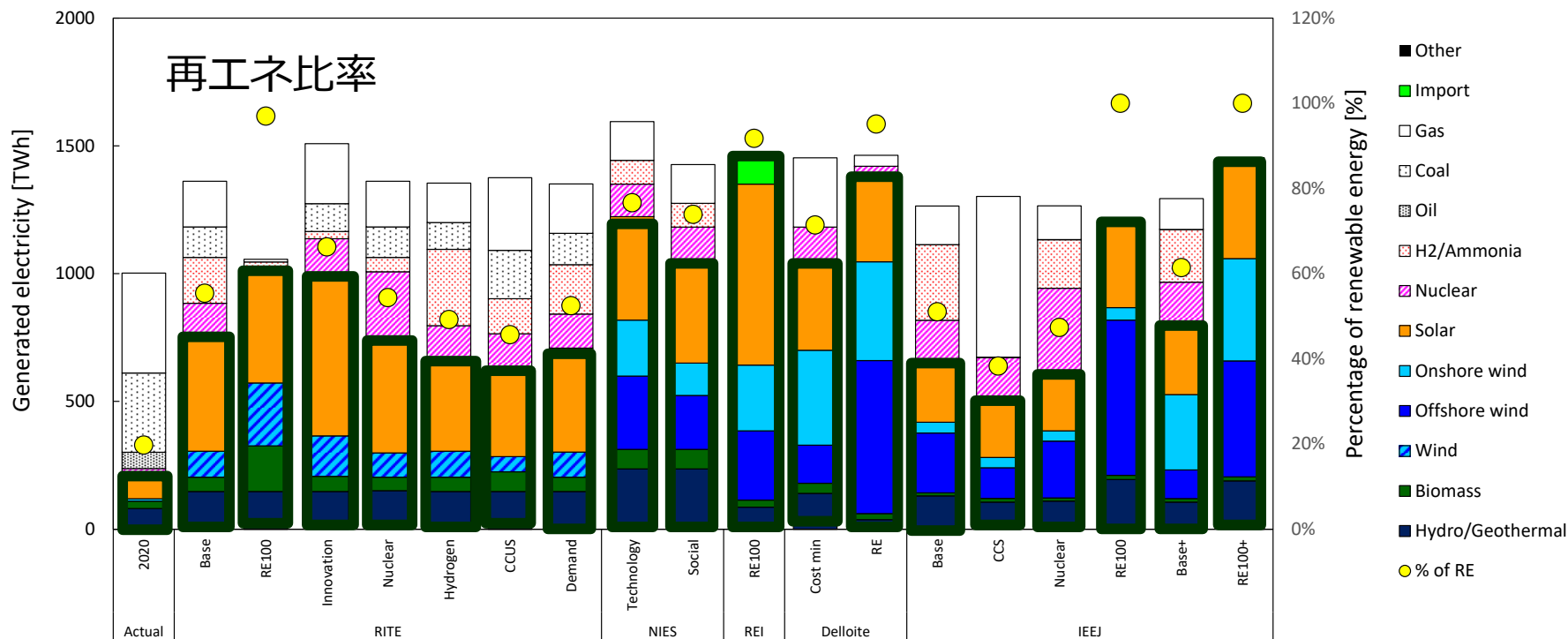
## 2. カーボンニュートラル達成時の影響評価

各機関によるモデル分析

# 各機関による分析の一例 - 2050年発電電力量

各機関による分析の一例として、2050年における発電電力量の比較を示す。

各機関による発電電力量(2050年)の比較[TWh]



再エネ比率は概ね**40%-100%程度**であり、多くのシナリオ分析が再エネの重要性を示唆。他方で、必ずしも再エネだけでなく、原子力の再稼働やガス火力+CO<sub>2</sub>回収/貯留、アンモニアや水素発電などの**他技術も活用される傾向**にある。

# 3. カーボンニュートラルに向けた方策の示唆

カーボンニュートラルに向けた方策の示唆

- カーボンニュートラル目標を達成する場合、立地への影響は小さくないことに加え、生じるコスト(資本費+燃料費)を考えると**カーボンニュートラルのハードルは高い**。
- カーボンニュートラルの達成に向けて、再生可能エネルギーは重要な技術の一つとなるが、再生可能エネルギーの大量導入には**社会的受容性**や**生態系影響の配慮**、**廃棄物対策**、**中国などの海外依存**など様々な課題を解決していくことが重要。
- 再生可能エネルギーは重要技術である一方で、立地制約や社会的制約などを考慮すると、再生可能エネルギー比率を極端に高めることが必ずしも最適ではなく、CO<sub>2</sub>の貯留・回収技術やアンモニア発電などの**新技術を発展させることも重要**。

カーボンニュートラル達成のハードルは非常に高く不確実性も高い中で、特定の技術に過度に依拠するのではなく、現段階においては**様々な技術のオプション**を追求することが重要。

## 参考資料

# 参考文献

- [1] Y. Matsuo, S. Endo, Y. Nagatomi, Y. Shibata, R. Komiyama and Y. Fujii, (2020). Investigating the economics of the power sector under high penetration of variable renewable energies. *Applied Energy*, 267, 113956
- [2] H.Obane, Y.Nagai, K.Asano, Assessing land use and potential conflict in solar and onshore wind energy in Japan, *Renewable Energy*, Vol160, pp842-851,2020.
- [3] 尾羽秀晃, 永井雄宇, 朝野賢司, 「土地利用を考慮した太陽光発電および陸上風力の導入ポテンシャル評価」, 電力中央研究所報告, Y18003, 2019
- [4] 環境省, 「令和2年度再エネ導入ポテンシャル情報を活用した再エネ導入促進委託業務報告書」
- [5] 朝野賢司, 永井雄宇, 尾羽秀晃, ネットゼロ実現に向けた風力発電・太陽光発電を対象とした大量導入シナリオの検討, 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 第34回.  
[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/034/034\\_007.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/034/034_007.pdf)
- [6] H.Obane, Y.Nagai, K.Asano, Assessing the potential areas for developing offshore wind energy in Japanese territorial waters considering national zoning and possible social conflicts, *Marine Policy*, Vol 129, 2021.
- [7] 尾羽秀晃, 永井雄宇, 豊永晋輔, 朝野賢司, 「再エネ海域利用法を考慮した洋上風力発電の利用対象海域に関する考察」, 社会経済研究所研究資料 Y19502, 2019
- [8] 尾羽秀晃, 風間健太郎, 橋本啓史, 永井雄宇, 朝野賢司, 洋上風力発電の促進区域選定における海鳥への影響評価に関する考察, 電力中央研究所研究資料(Y19506).  
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/source/Y19506.html>
- [9] 松尾雄司, 大槻貴司, 尾羽秀晃, 川上恭章, 下郡けい, 水野有智, 森本壮一, 「2050年カーボンニュートラルのモデル試算」, 2021年6月30日, 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会
- [10] 尾羽秀晃, 大槻貴司, 川上恭章, 下郡けい, 松尾雄司, 水野有智, 森本壮一, 「2050年ネットゼロ排出に向けた最適技術選択評価」, 日本エネルギー経済研究所  
<https://eneken.ieej.or.jp/data/9828.pdf>
- [11] 大槻貴司, 尾羽秀晃, 川上恭章, 下郡けい, 水野有智, 森本壮一, 松尾雄司, 「2050年CO2正味ゼロ排出に向けた日本のエネルギー構成：自然変動電源の立地制約を考慮した分析」電気学会論文誌B（電力・エネルギー部門誌）（採択）