

エネルギーシステム・要素論

第三回 風力発電2

2023年5月26日

風力発電機

- 可変ピッチ機構

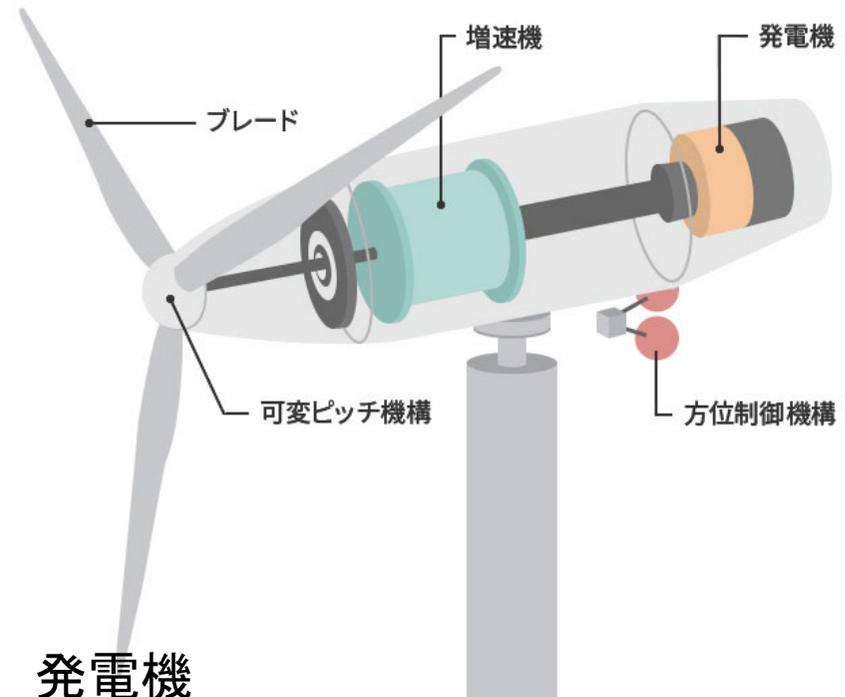
- 風の強さに応じて羽根の角度を自動的に変える。
- 起動や風が弱いときには、風に対する羽根の角度を大きくして風を多く受ける
- 風が強いときには、羽根の角度を小さくして必要なだけの風を受け、余分な風は受け流すことで、風車の損傷を防ぐ

- ブレード

- 風車の羽根の部分。ブレードの数が少ないほど回転が速くなる

- 増速機

- ギアを用いてブレードの回転を発電に必要な回転数まで増幅させる
- 発電効率の向上



- 発電機

- 2000kW以上が主流。ヨーロッパでは9500kWクラスの超大型機を開発・運用しています。

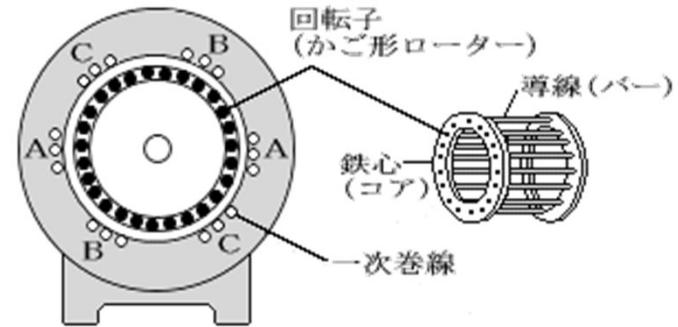
- 方位制御機構(ヨー制御)

- 風を正面で受けるため、風向きに合わせてブレードを旋回させる装置。モーターで作動

風力発電機

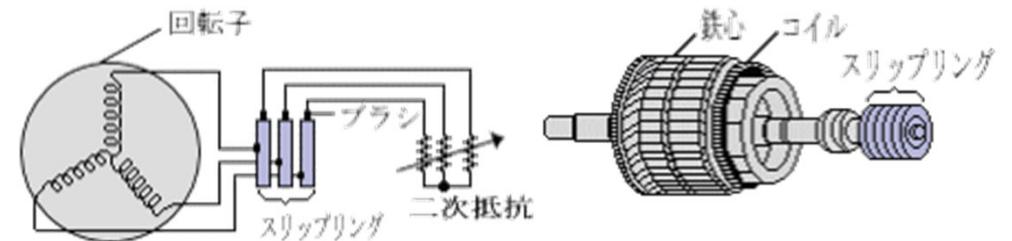
- 出力変動抑制
 - ピッチ制御
 - 可変速運転
 - 増速機+DFIG+巻線用インバータ 新設の79%
- 電圧変動対策
 - 電力変換器による無効電力制御
 - 同期発電機と定格容量の電力変換器

DFIG



- 誘導電動機の種類

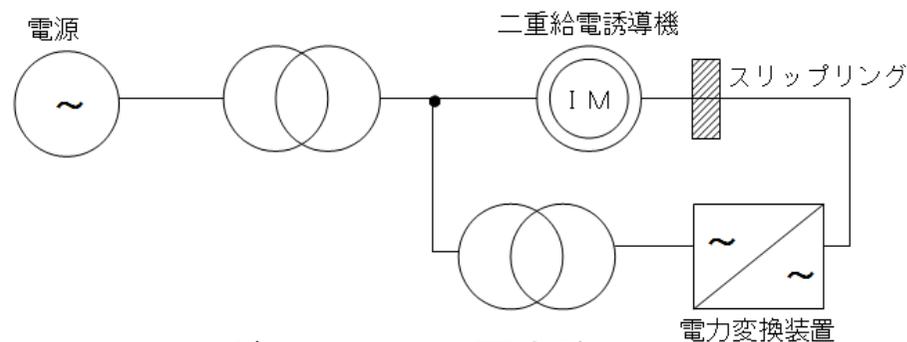
- かご型
- 巻線型



- 回轉子巻線はスリップリングを介して外部抵抗(二次抵抗)に接続される
- 二次抵抗制御は、回轉子に流れる電流の大きさを抵抗器によって制御する

DFIG

- 二重給電誘導発電機
 - 回転子の回転磁界の回転速度を制御することで、固定子の同期回転速度と異なる回転運転速度を可能とする
 - コンバータインバータ方式が発電機出力と同等の変換器容量を必要とするのに比べ、変換器容量を小さく抑えることが可能(25%程度)



ギアレス同期風車

- 構造簡単・信頼性・保守性向上
- 低速回転 → 発電機の大直径(2MWクラスで $\Phi 6\sim 8\text{m}$, 数十t), 多極化(数十極)
 - 増速機付(4極, 1500~1800rpm, $\Phi 1\text{m}$, 数t)
 - 永久磁石同期発電機
 - ナセル重量は増速機付DFIGと同程度
 - ブラシレス化による保守性の向上
 - 回転数上昇に伴う発電電圧の上昇による過電圧に注意する必要あり

ベルヌーイの定理

- 完全流体・定常流の流管(流線)の任意の場所で次式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z + p = \text{const}$$

ただし,流速 v [m/s],重力加速度 g [m/s²],高さ z [m],圧力 p [Pa],流体の密度 ρ [kg/m³]

- 完全流体
粘性のない理想化された流体。ずれによる摩擦が生じない。
- 定常流
流線, 圧力, 密度が時間によって変化しない流れ。
- 流線・流管
流体中の各位置において流れの方向を向くようにひいた曲線。流線の束を流管。

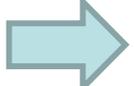
風力(パワー)

- 風が持つ単位時間当たりの運動エネルギー

$$K = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} (\rho V) V^2 = \frac{1}{2} \rho V^3 [J / m^2 s]$$

- 風速 V [m/s], 1m^2 を一秒に通過する空気の質量 m [kg], 空気の密度 ρ [kg/m³], $m = \rho V$
- プロペラ半径 R [m] の理想風車の出力 W [W]

$$W = \frac{1}{2} \rho A V^3 = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V^3 [J / s]$$

- 仮定: 風車の後ろでは風速 0m/s  ブラックホールみたいなものありえへん
- 受風面積 A [m²]

面積に比例
風速の3乗に比例

$$Mgh = Kgm s^{-2} m = Kgm^2 s^{-2}$$

$$0.5mv^2 = Kgm^2 s^{-2}$$

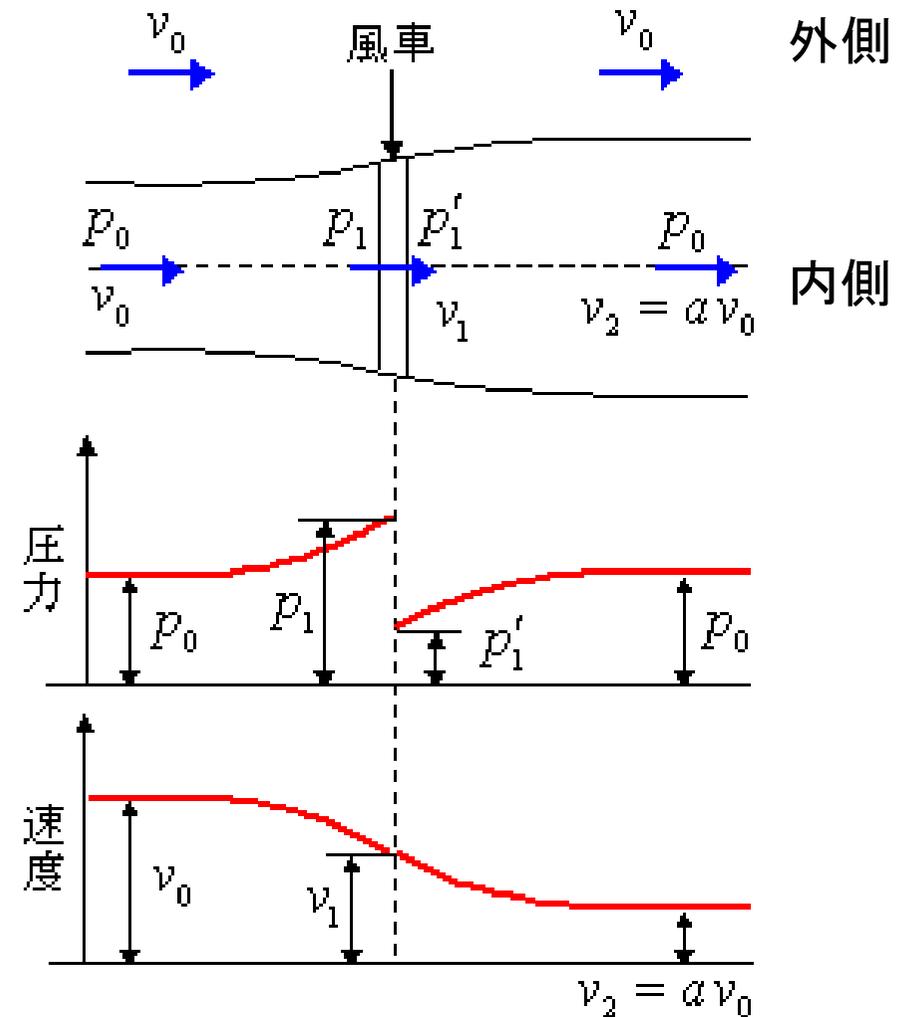
風車におけるベルヌーイの定理

- 風車の前後に対するベルヌーイの定理

$$\begin{cases} \text{前} & p_0 + \frac{\rho}{2} v_0^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 \\ \text{後} & p_0 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = p_1' + \frac{\rho}{2} v_1^2 \end{cases}$$

- 風車前後の圧力差と速度の関係

$$\text{前-後} \quad p_1 - p_1' = \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2)$$



風車に作用する力

- 圧力差により風車の受ける力 F [N]

$$F = \pi R^2 (p_1 - p_1') [N]$$

- 運動量の時間変化より風車の受ける力 F' [N]

$$F' = \pi R^2 \rho v_1 \Delta t \frac{v_0 - v_2}{\Delta t} = \pi R^2 \rho v_1 (v_0 - v_2) [N]$$

- 両者は等しい

$$F = \pi R^2 (p_1 - p_1') = \pi R^2 \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2) = F' = \pi R^2 \rho v_1 (v_0 - v_2) [N]$$

$$\frac{1}{2} (v_0 + v_2) (v_0 - v_2) = v_1 (v_0 - v_2)$$

- 風車を通過する風速は前後の風速の平均となる $v_1 = \frac{1}{2} (v_0 + v_2)$

風車の出力

- 理想風車の出力L[J/s]

$$L = Fv_1 = \pi R^2 (p_1 - p_1') v_1 = \pi R^2 \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2) \frac{1}{2} (v_0 + v_2)$$

$$= \frac{\pi R^2 \rho (v_0 - v_2)(v_0 + v_2)^2}{4} [J/s]$$

減速比 $a(0 < a < 1)$ $a = \frac{v_2}{v_0}$

$$= \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 \left(1 - \frac{v_2}{v_0}\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_0}\right)^2}{4} = \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1 - a)(1 + a)^2}{4} [J/s]$$

風車の出力は減速比 a の関数となる

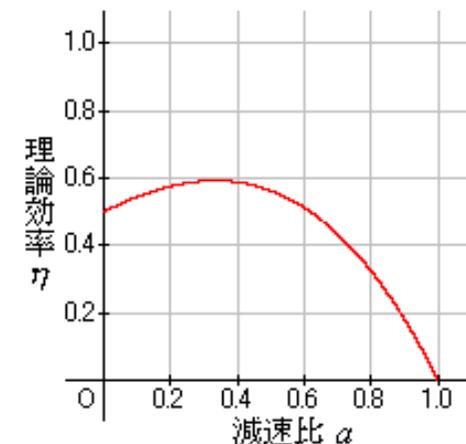
風車の効率

- 風力の出力 W $W = \frac{1}{2} \rho A v_0^3 = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v_0^3 [J / s]$

- 理想風車の出力 L $L = \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1-a)(1+a)^2}{4} [J / s]$

- 風車の効率 η

$$\eta = \frac{L}{W} = \frac{\frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1-a)(1+a)^2}{4}}{\frac{1}{2} \pi R^2 \rho v_0^3} = \frac{(1-a)(1+a)^2}{2}$$



ベッツの限界

- 風車の最大効率(出力)となる条件

$$\begin{aligned}\frac{d}{da}\eta &= \frac{d}{da} \frac{(1-a)(1+a)^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{d}{da} [(1-a)(1+a)^2] \\ &= \frac{1}{2} [-(1+a)^2 + (1-a)2(1+a)] = \frac{1}{2} (1+a) [-(1+a) + (1-a)2] \\ &= \frac{1}{2} (1+a) [1-3a] = 0 \quad \longrightarrow \quad a = \frac{1}{3}\end{aligned}$$

- 理論最大効率(ベッツの限界)

実際には40%ぐらいが限度
空気抵抗, 粘性による損失

$$\eta_{\max} = \frac{(1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{2} = \frac{\frac{2}{3}(\frac{4}{3})^2}{2} = \frac{16}{27} = 0.593$$

- 風車の最大出力 L_{\max}

増速ギヤ, 発電機損失
で30%ぐらいになる

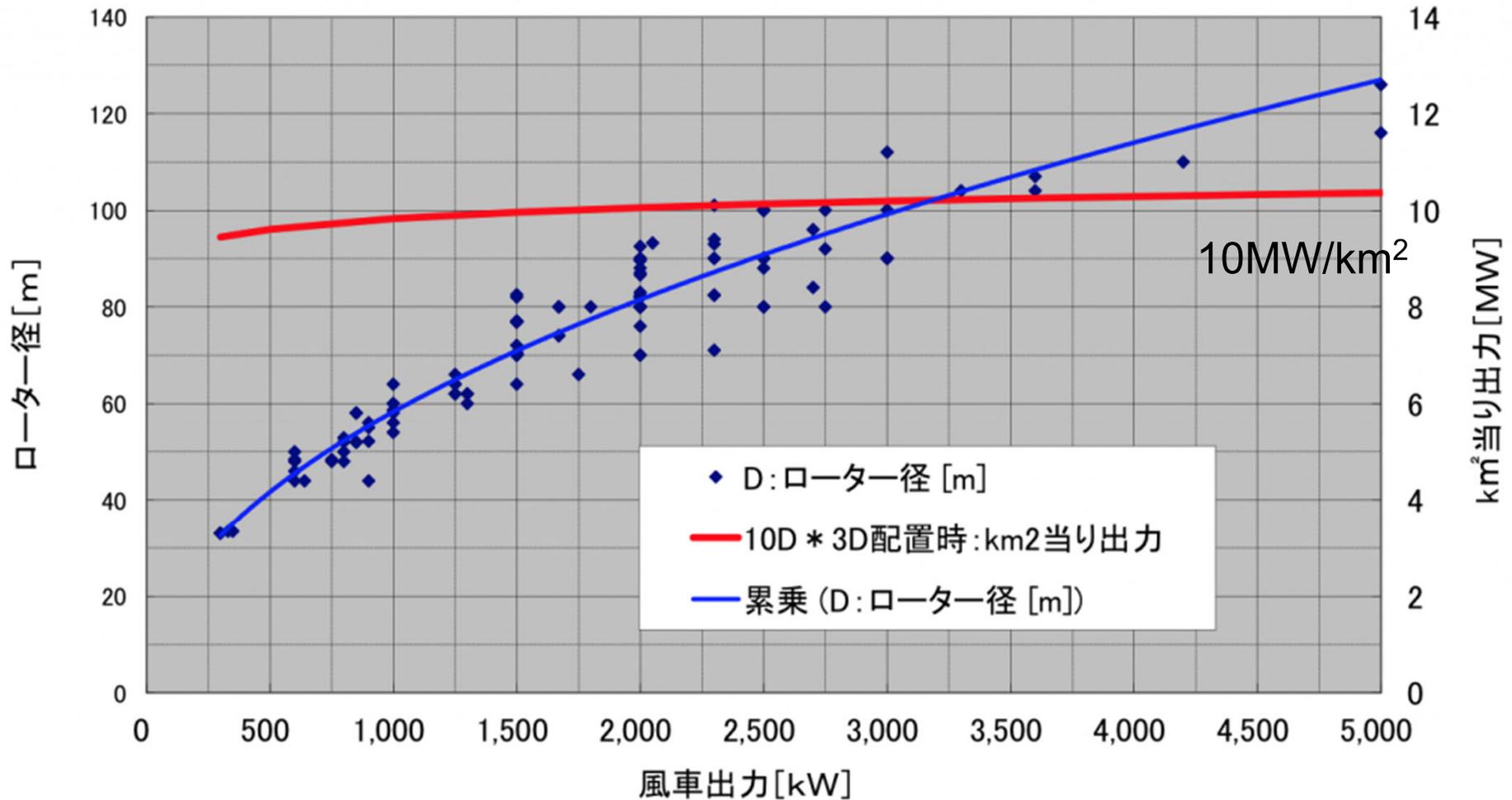
$$L_{\max} = \frac{\pi R^2 \rho V^3 (1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{4} = \frac{8}{27} \pi R^2 \rho V^3 [J/s]$$

風力発電の面積当たり出力

- 現在は、単機出力2,000kW～3,000kWが主流
- 卓越風向がある場合の複数の風車配置推奨値(10D×3D)
 - NEDO風力発電導入ガイドブック(2008年2月改訂第9版)ローター径(D)
 - 風車の単機出力による差は小さい

風車出力とローター径および 10D × 3D配置時のkm²当り出力

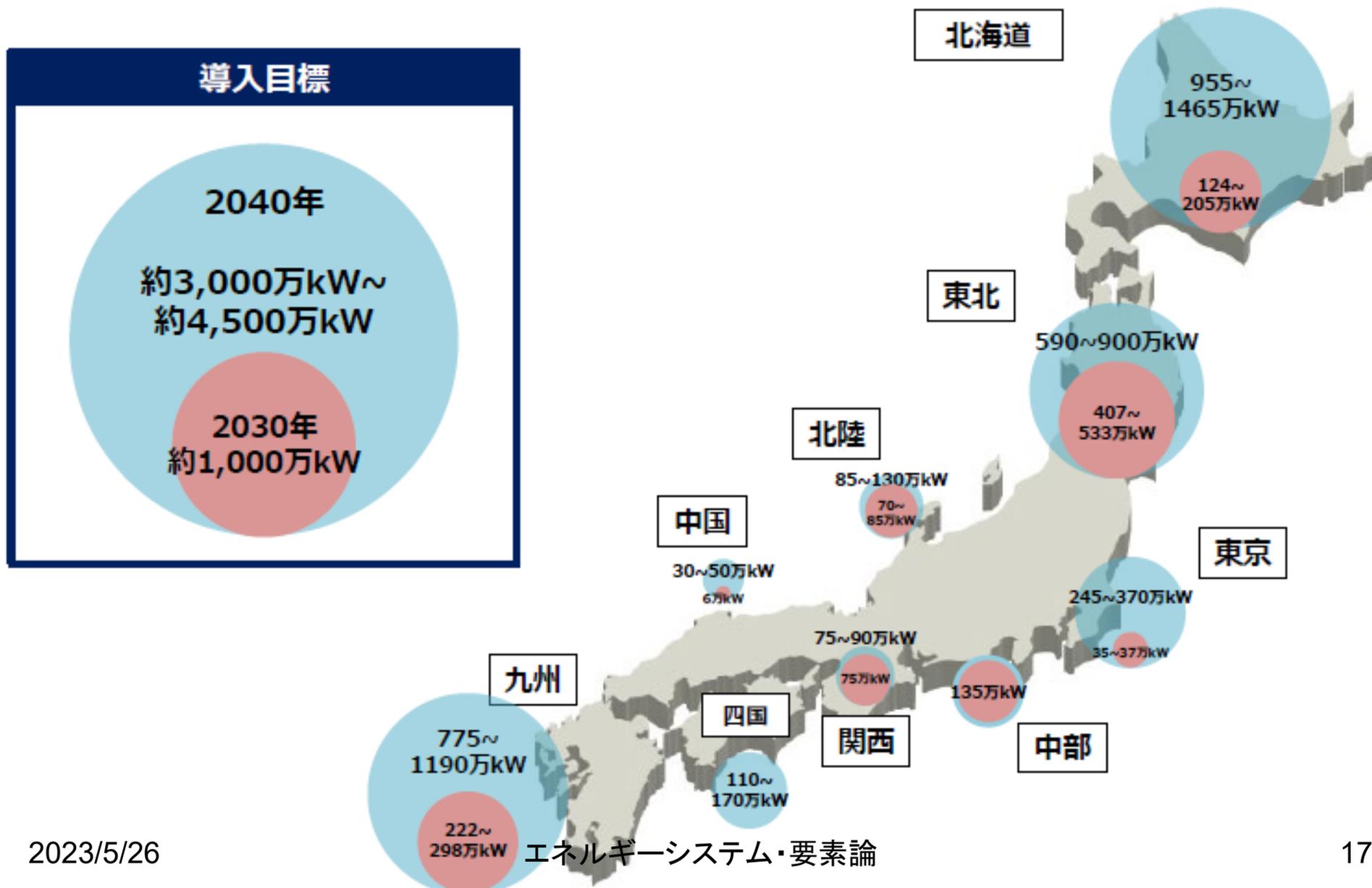
風車出力とローター径およびkm²当り出力



風車建設に必要なエリア面積

- 2,000kW級風車の据付維持に必要な専有面積は100m × 100m (1ha)程度
 - 複数台の風車を建設する場合は主風向に対する風車列数により異なる
- 2,000kW機を30基設置する場合の、風車列数とエリア面積との関係
 - 30基 × 1列: 約86ha ≒ 7万kW/ km²
 - 15基 × 2列: 約360ha ≒ 1.7万kW/ km²
 - 10基 × 3列: 約410ha ≒ 1.5万kW/ km²

洋上風力発電のエリア別導入イメージ



2023/5/26

エネルギーシステム・要素論

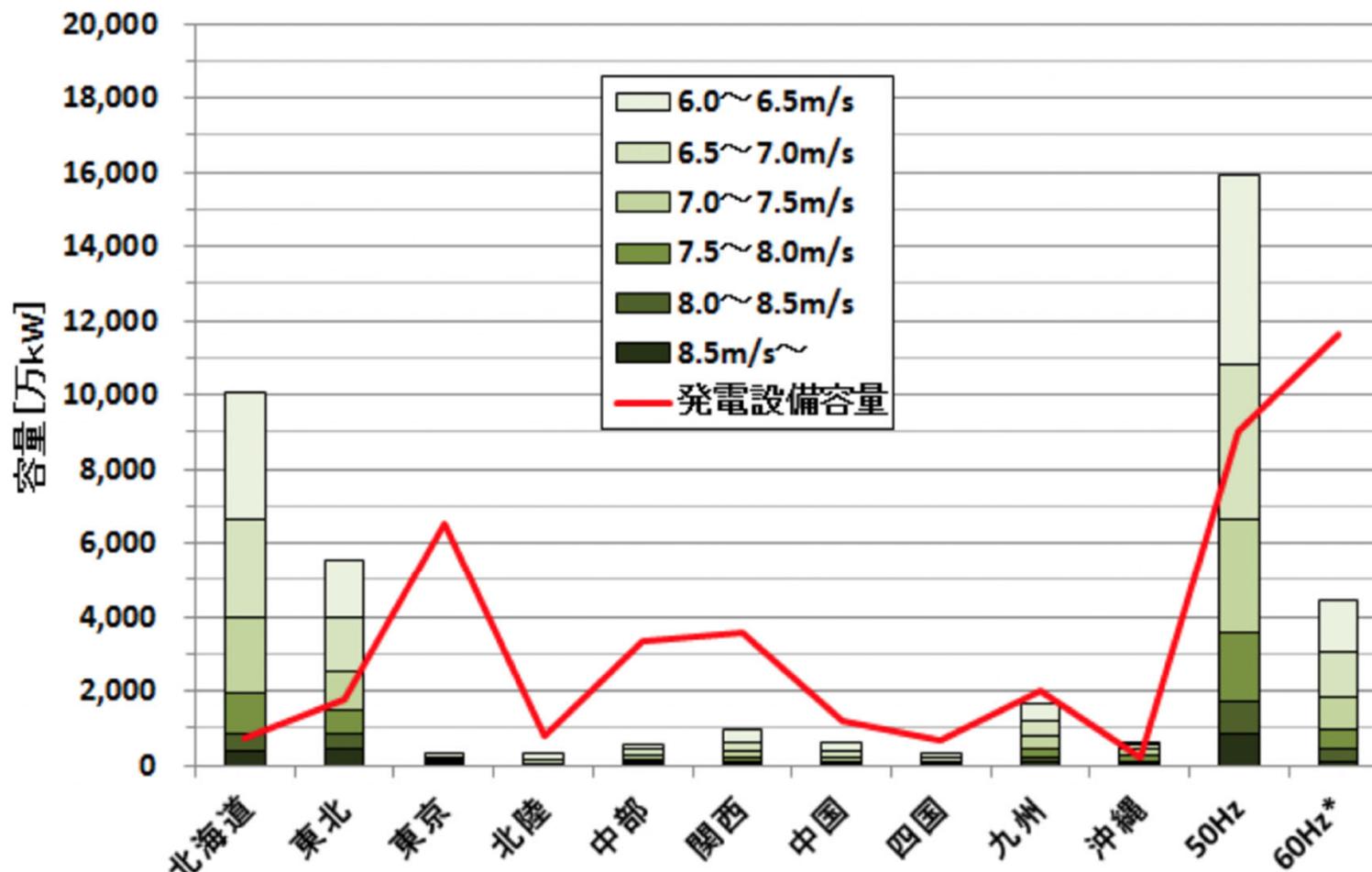
17

陸上風力のポテンシャル

- 北海道、東北、九州に集中しているため各電力会社の設備容量や事業性を考慮する必要あり
- 賦存量から社会的制約条件を考慮した「陸上風力ポテンシャル」の内、事業性の面から80m 高さで年間平均風速6.0m/s以上に限定したポテンシャル
 - 各電力会社の設備容量を考慮しない場合：2億983万kW（国内全発電設備容量の102倍）
 - 各電力会社の設備容量を上限とした場合：7,436万kW（国内全発電設備容量の36倍）

陸上風力のポテンシャル

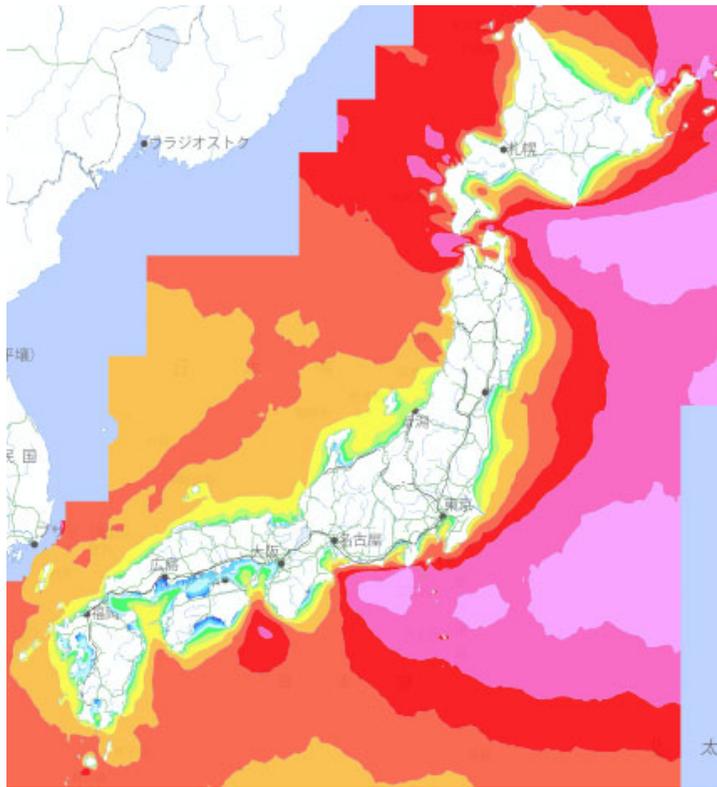
陸上風力ポテンシャルと電力会社発電設備容量(2013年)



電力会社管内別の陸上風力ポテンシャル(60Hzは沖縄を除く)

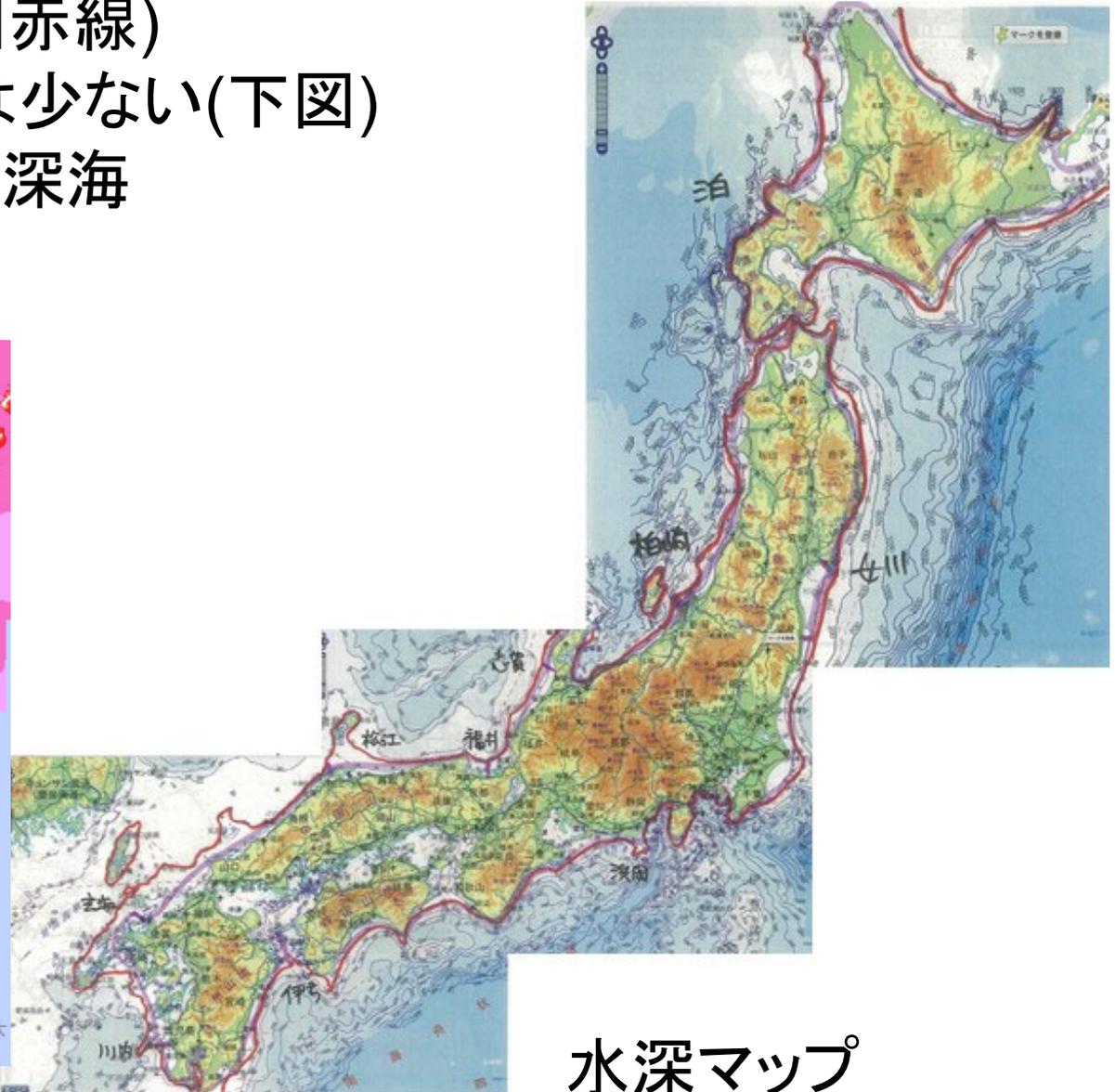
洋上風力発電の好適地

水深100mの領域(右図赤線)
着床式洋上風力適所は少ない(下図)
平均風速10m/sはほぼ深海
浮体式が中心となる



風況マップ

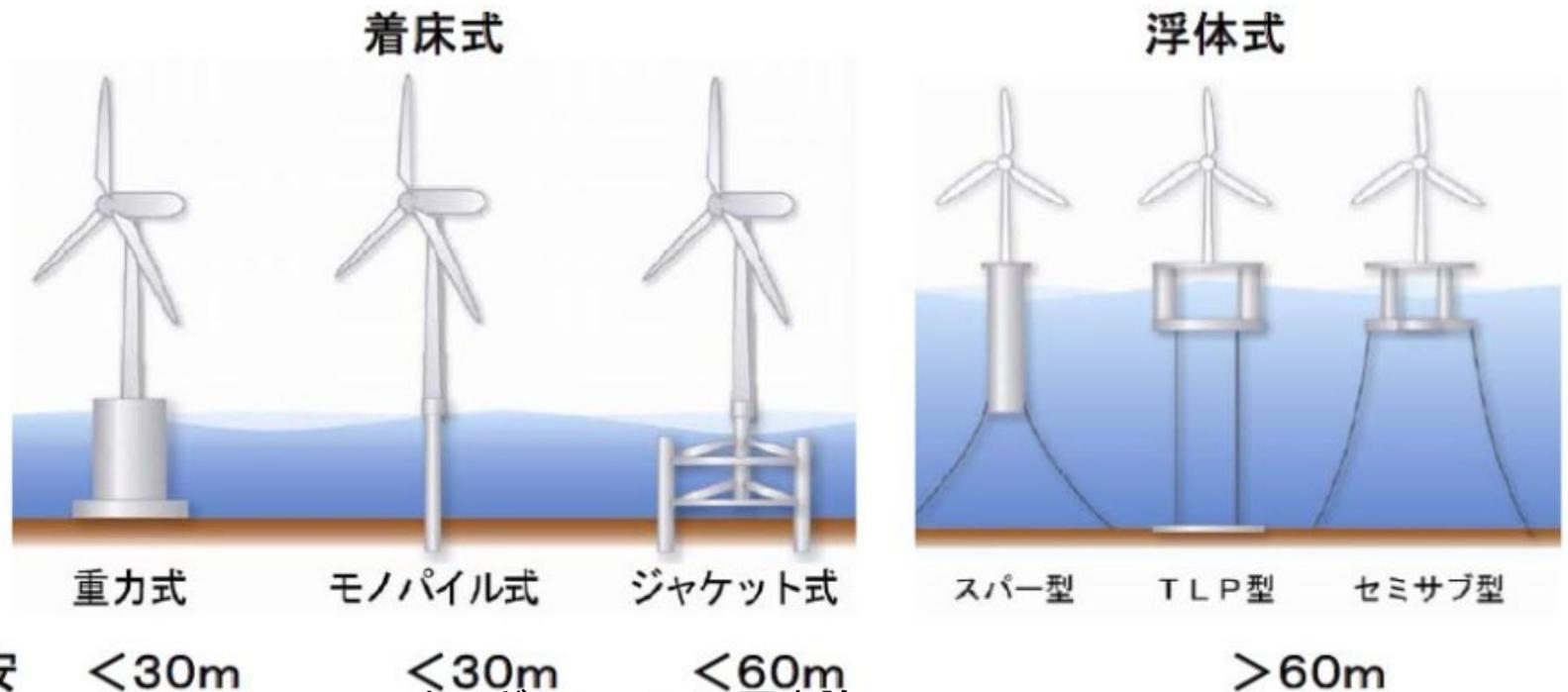
2023/5/26



水深マップ

2050年の風力発電

- 洋上風力発電の設置形式
 - 水深30m未満 円柱型基礎
 - 80m未満 重力着底型構造物
 - 大水深 浮体式

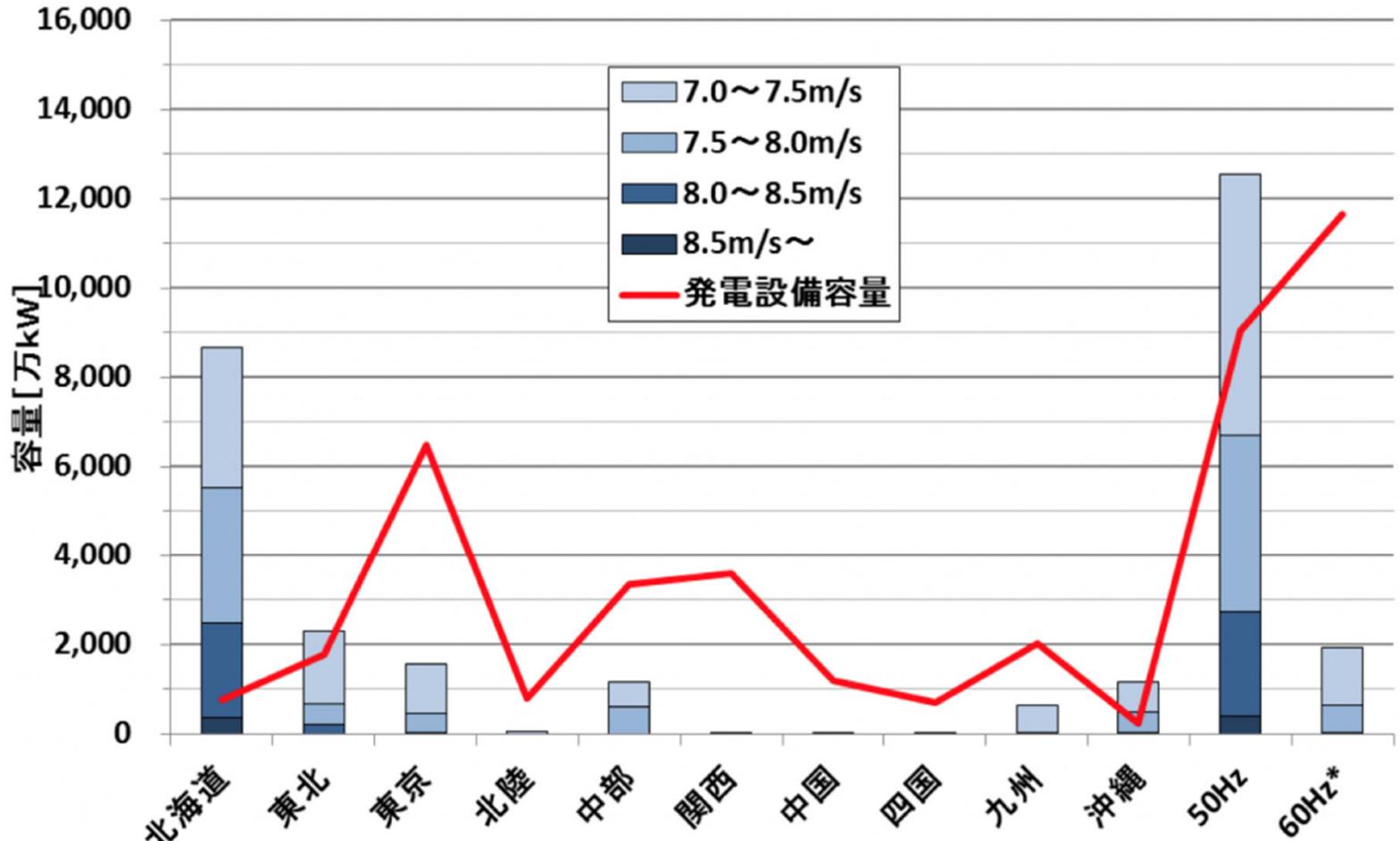


着床式洋上風力のポテンシャル

- 離岸距離30km未満,水深50m未満の内,事業性の面から80m高さで年間平均風速7.0m/s以上に限定したポテンシャル
 - 各電力会社の設備容量を考慮しない場合:1億5,646万kW(国内全発電設備容量の76倍)
 - 各電力会社の設備容量を上限とした場合:6,165万kW(国内全発電設備容量の30倍)

着床式洋上風力のポテンシャル

着床式風力ポテンシャルと電力会社発電設備容量(2013年)



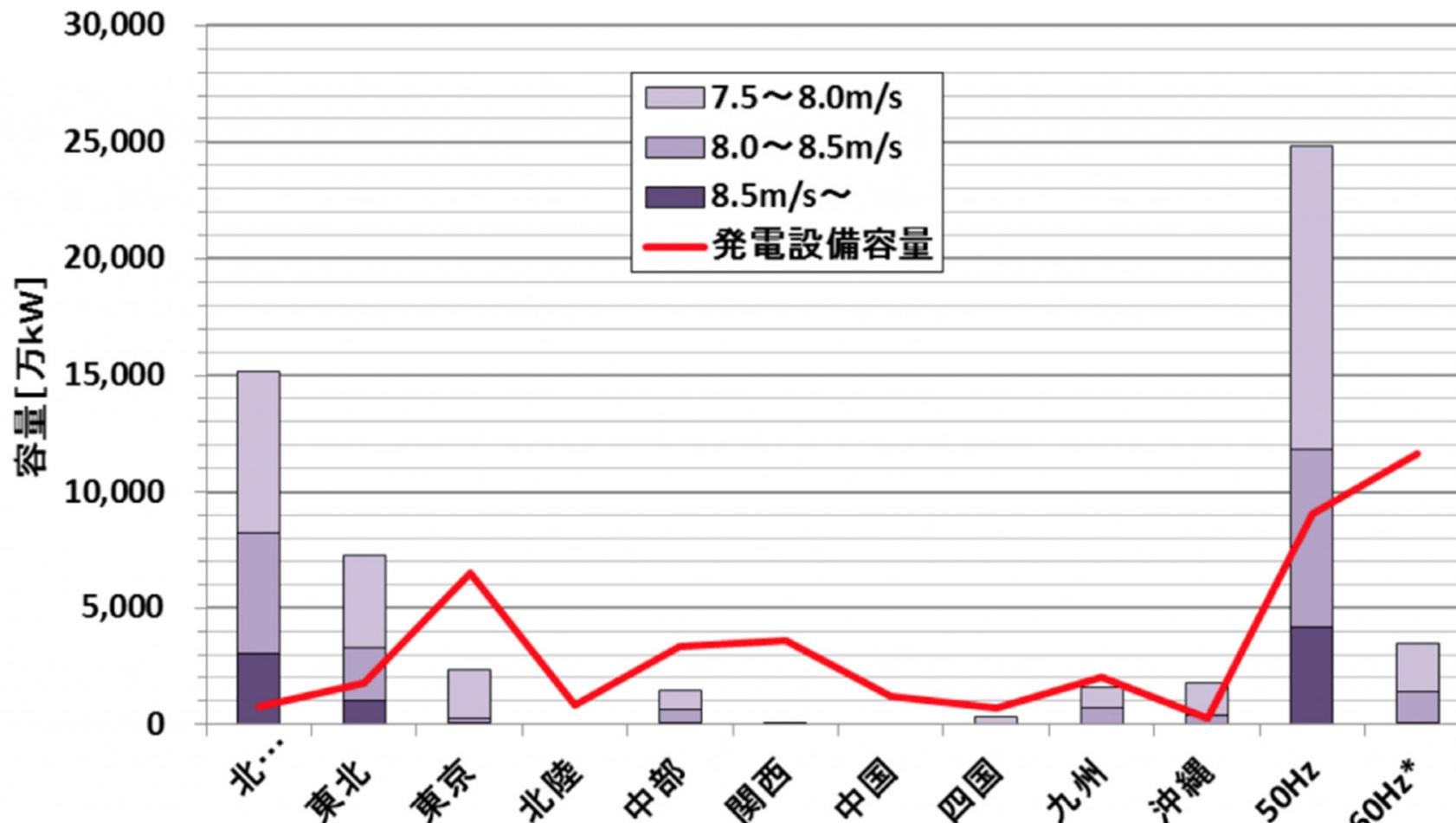
各電力会社管内別の着床式洋上風力ポテンシャル(島嶼を除く)

浮体式洋上風力発電のポテンシャル

- 離岸距離30km未満、水深50m以上200m未満の内、事業性の面から80m高さで年間平均風速7.5m/s以上に限定したポテンシャル
 - 各電力会社の設備容量を考慮しない場合：3億46万kW(国内全発電設備容量の1.45倍)
 - 各電力会社の設備容量を上限とした場合：8,480万kW(国内全発電設備容量の0.41倍)

浮体式洋上風力発電のポテンシャル

浮体式風力ポテンシャルと電力会社発電設備容量(2013年)



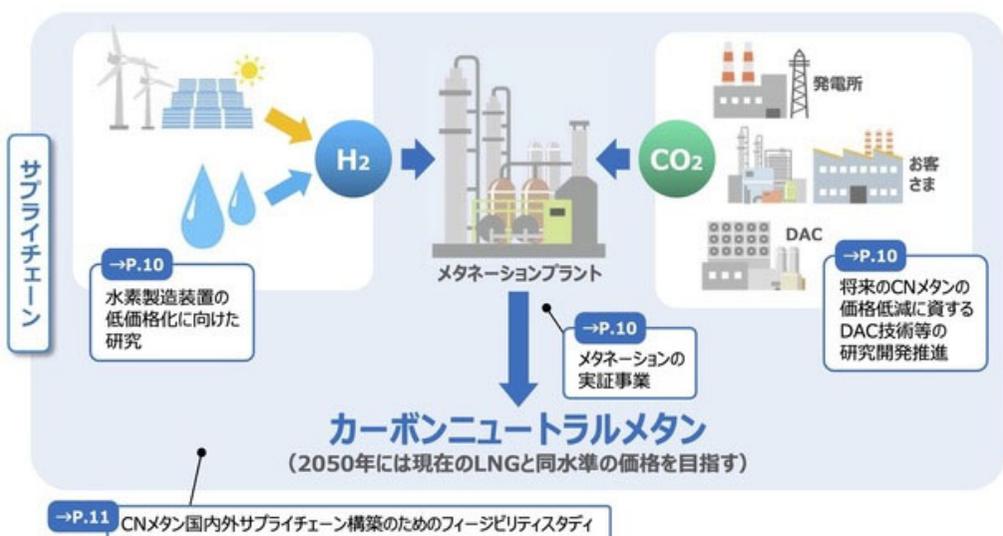
各電力会社管内別の浮体式洋上風力ポテンシャル(諸島を除く)

エネルギーシステム・要素論

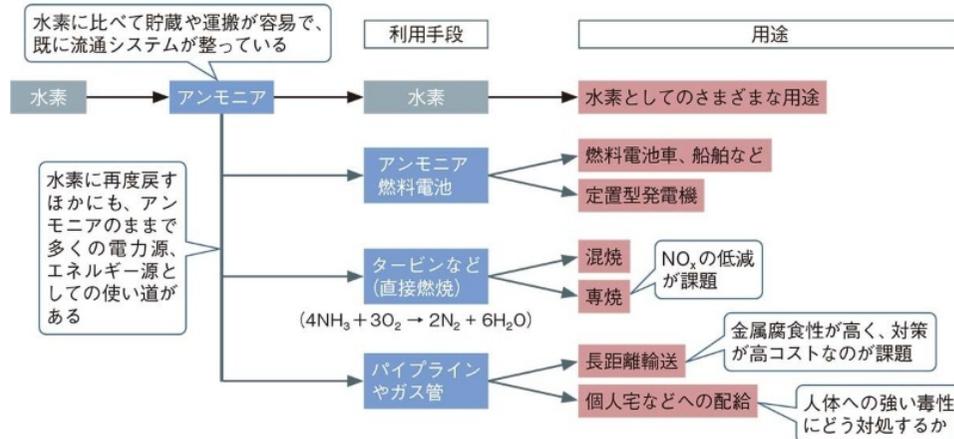
出典 経産省 SD

2050年の風力発電

- 風力発電で電気を作っても
 - 需給バランスをとる必要あり
 - 蓄電池が必要 → 大容量は難しい
 - 政府が水素社会と言っるので水素つくるか！
 - キャリアはメタン・アンモニア



(a) アンモニアのエネルギーキャリアとしての手段と用途



(b) グリーンアンモニアコンソーシアムのロードマップ

