

エネルギーシステム・要素論  
第三回 風力発電2  
太陽電池, 燃料電池  
2024年4月26日

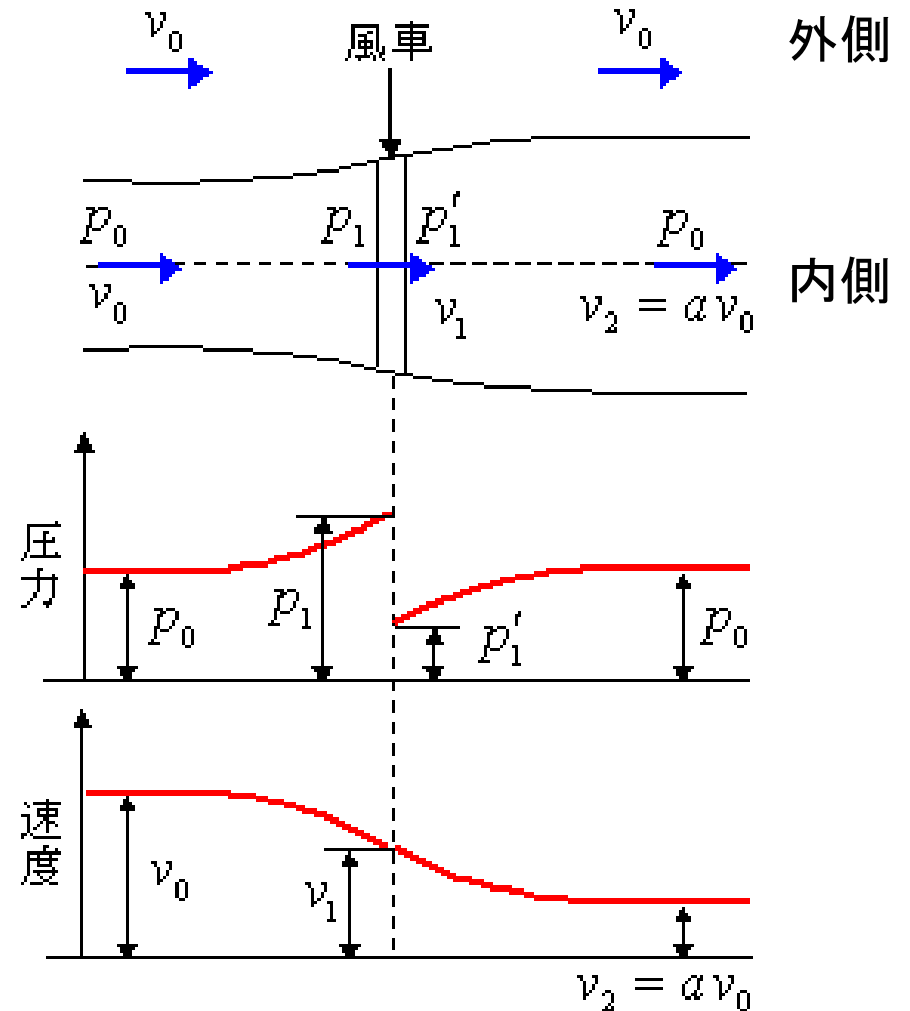
# 風車におけるベルヌーイの定理

- 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

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



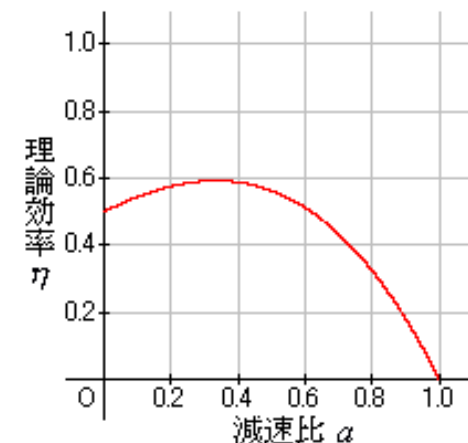
# 風車の効率

- 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 $\eta$

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



# 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

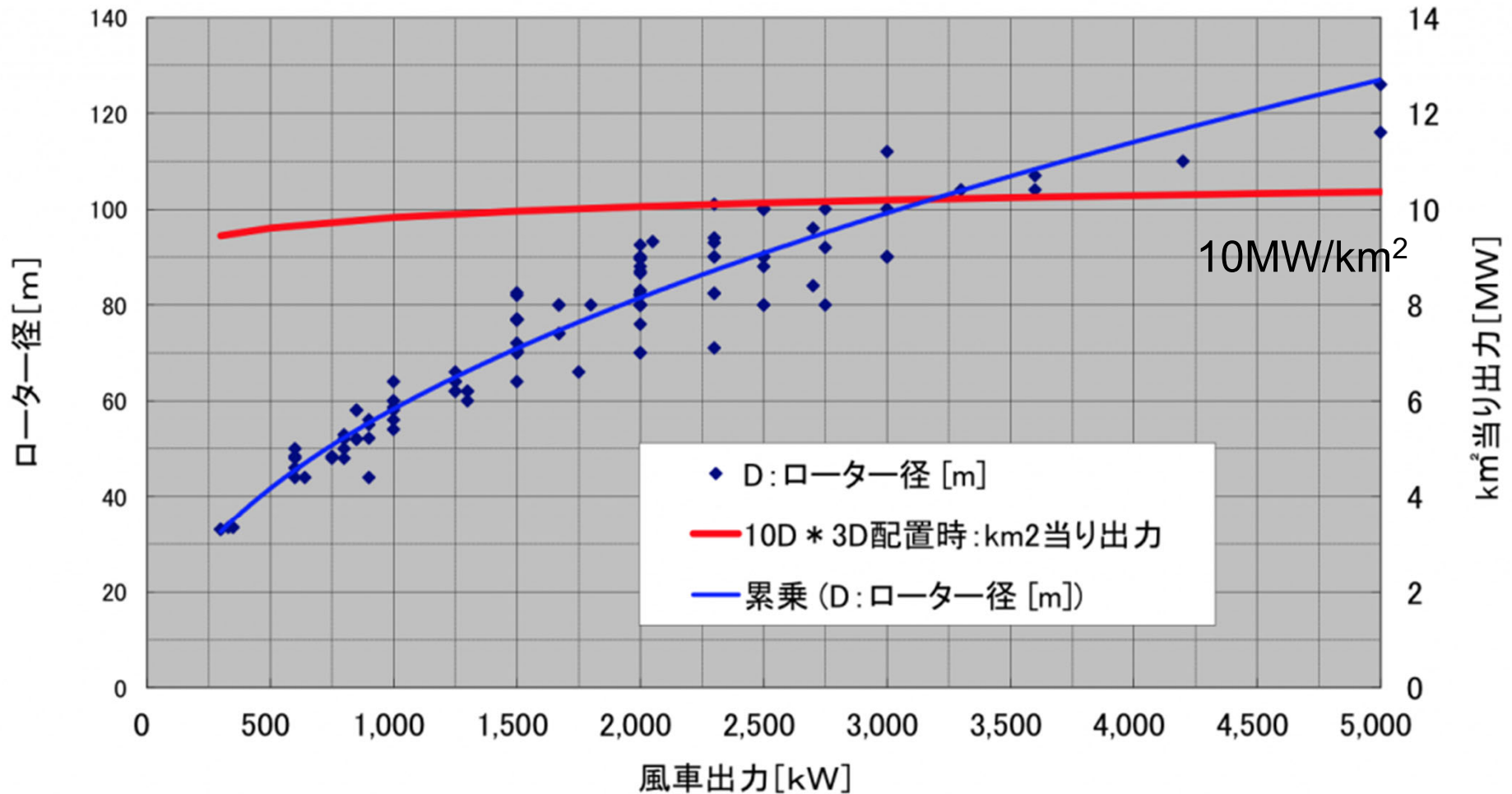
$$L_{\max} = \frac{\pi R^2 \rho V^3 (1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{4} = \frac{8}{27} \pi R^2 \rho V^3 [J/s]$$

# 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km<sup>2</sup>当り出力

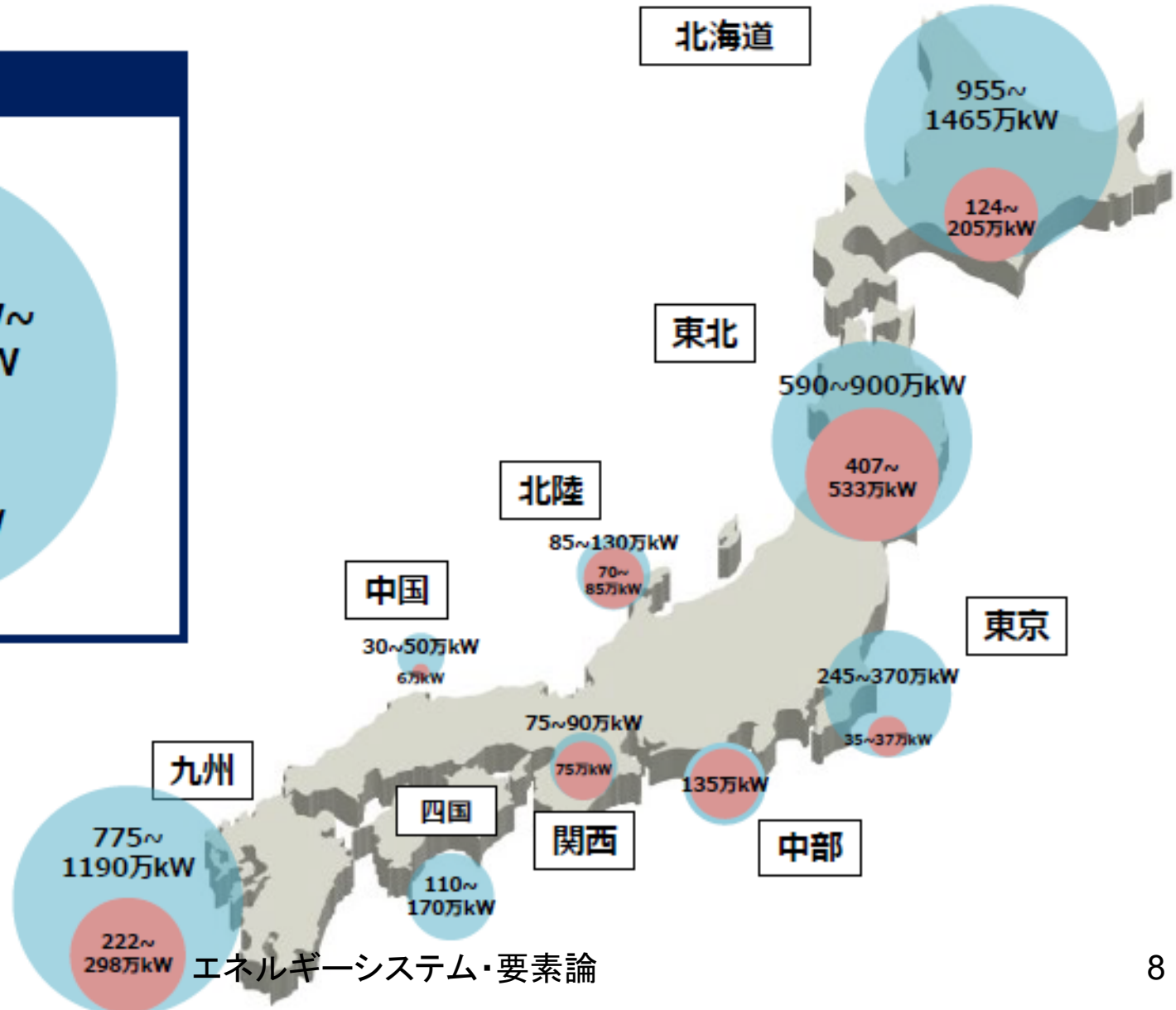
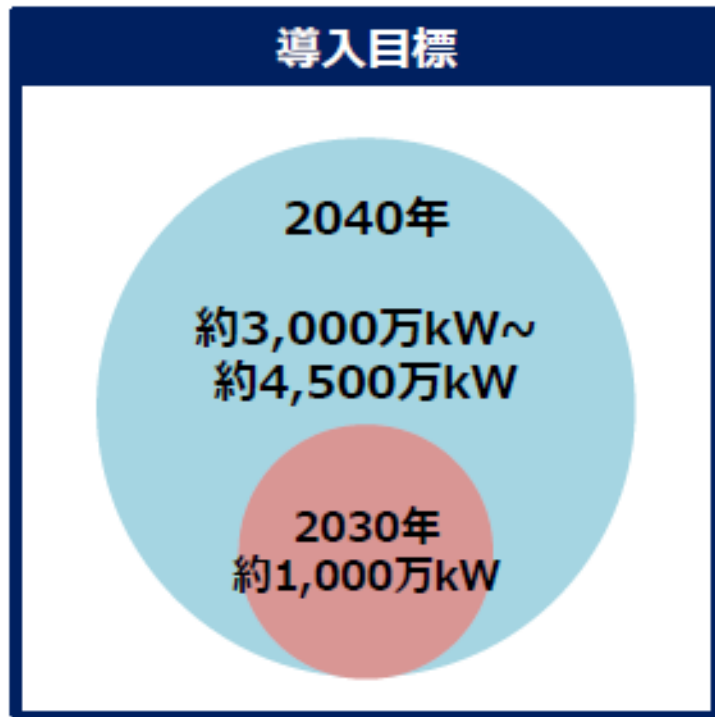
風車出力とローター径およびkm<sup>2</sup>当り出力



# 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/ km<sup>2</sup>
  - 15基 × 2列: 約360ha ≒ 1.7万kW/ km<sup>2</sup>
  - 10基 × 3列: 約410ha ≒ 1.5万kW/ km<sup>2</sup>

# 洋上風力発電のエリア別導入イメージ



2024/4/26

エネルギーシステム・要素論

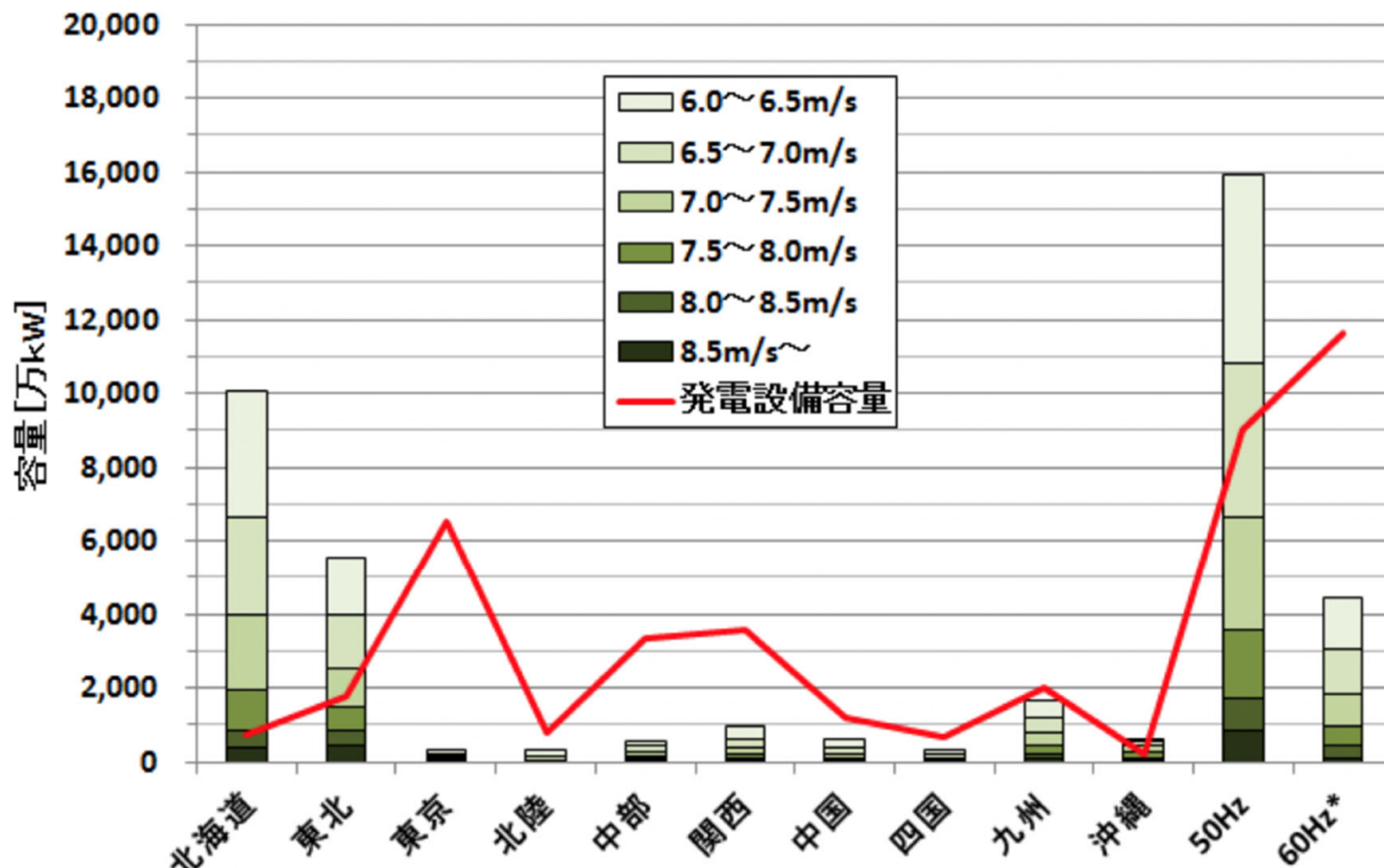


# 陸上風力のポテンシャル

- 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

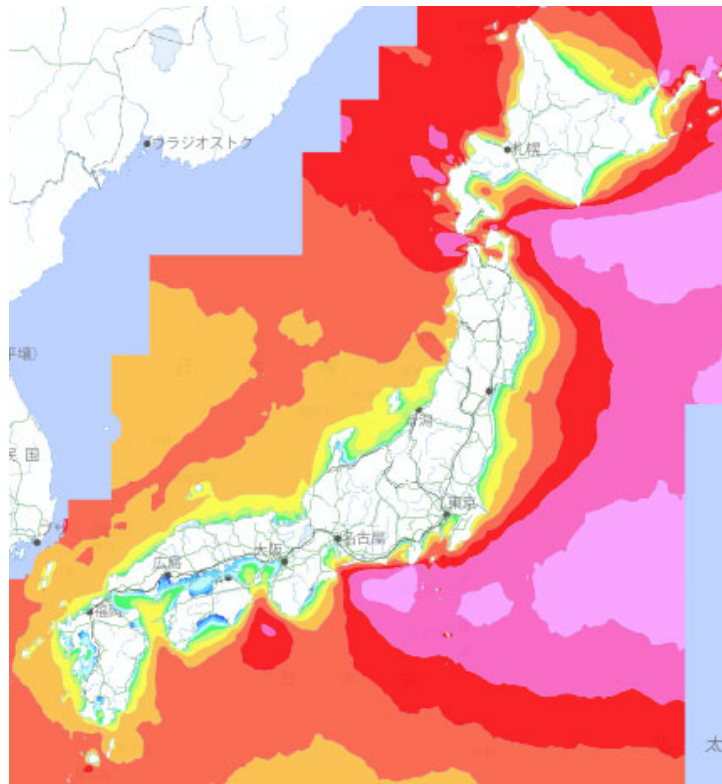
陸上風力ポテンシャルと電力会社発電設備容量(2013年)



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)

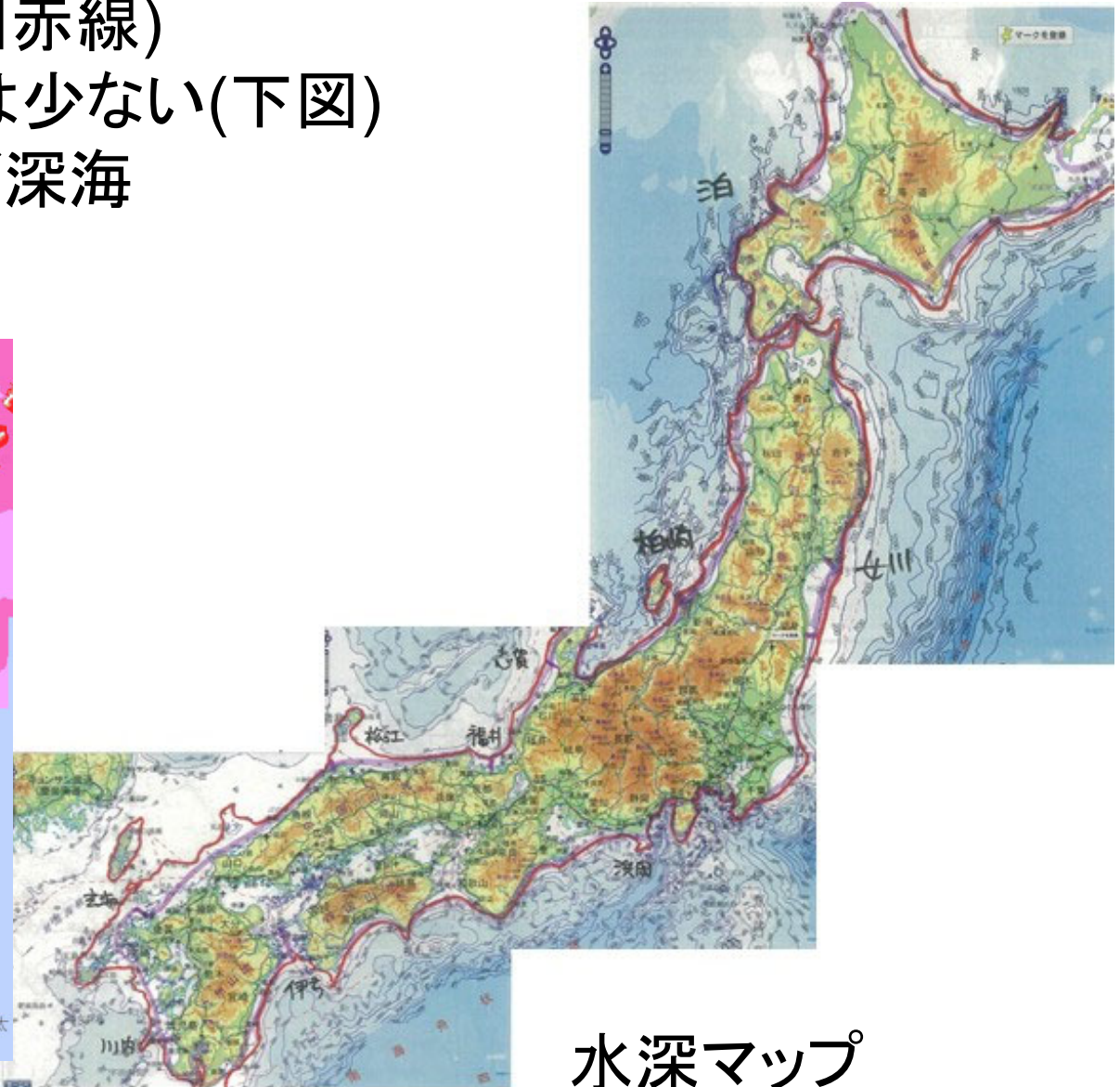
# 洋上風力発電の好適地

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

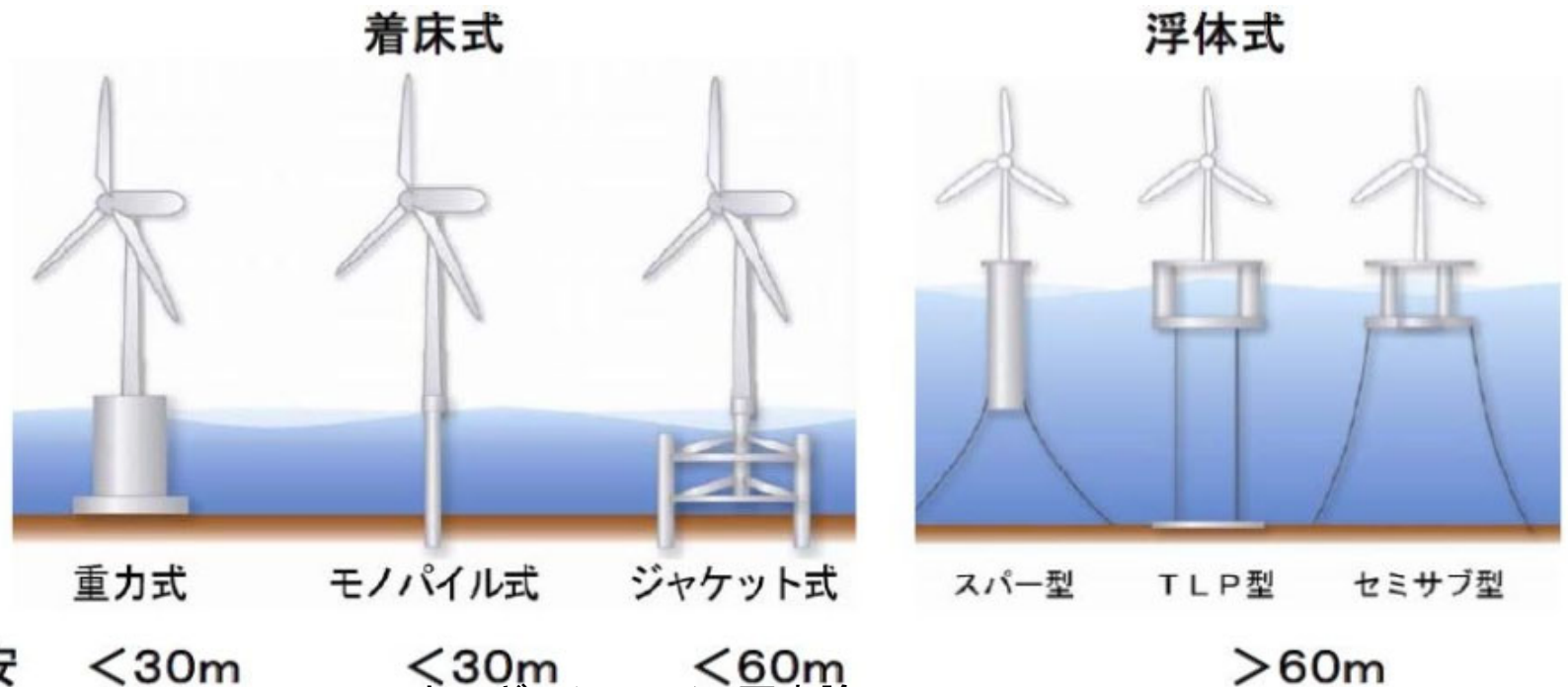
2024/4/26



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

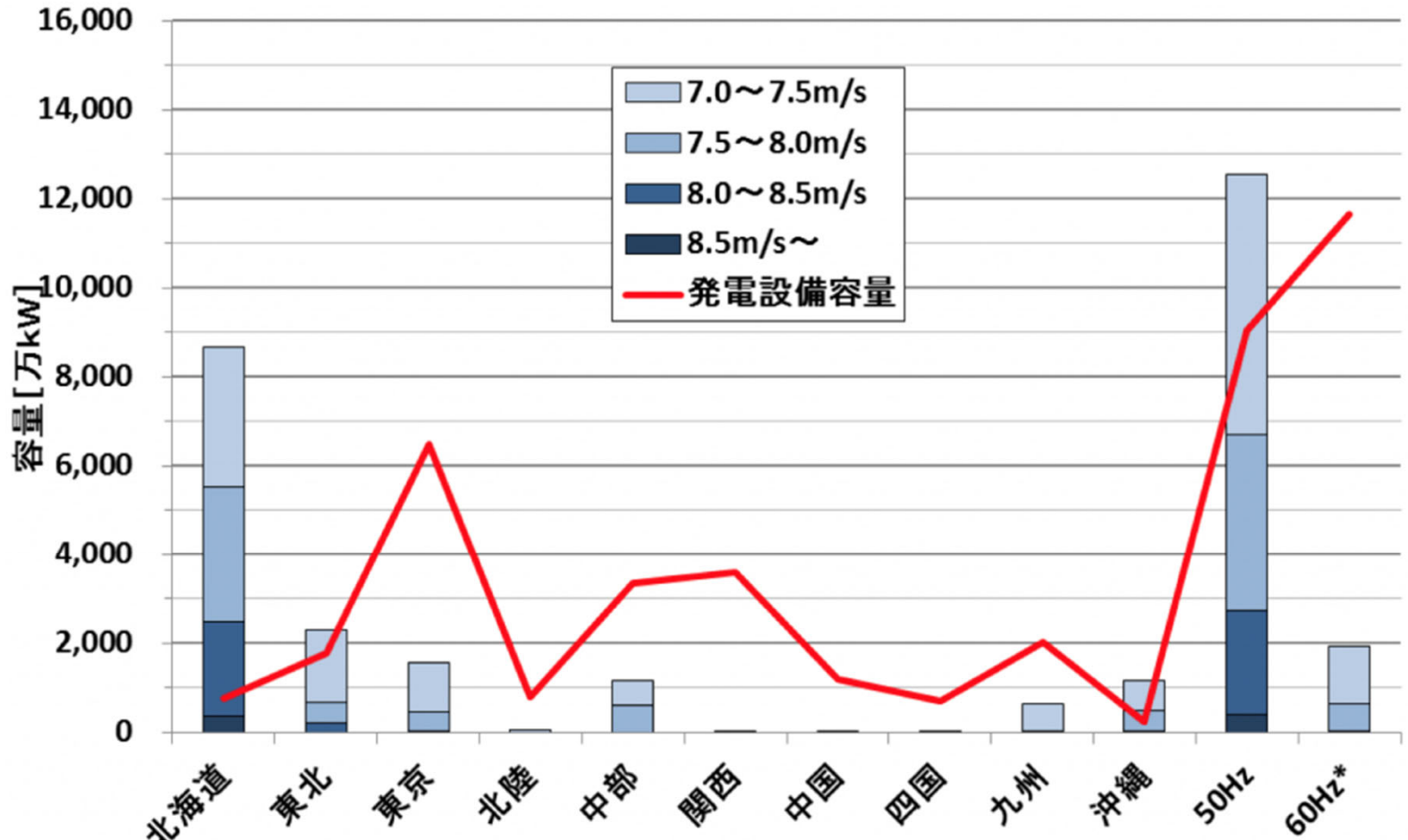


# 着床式洋上風力のポテンシャル

- 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)



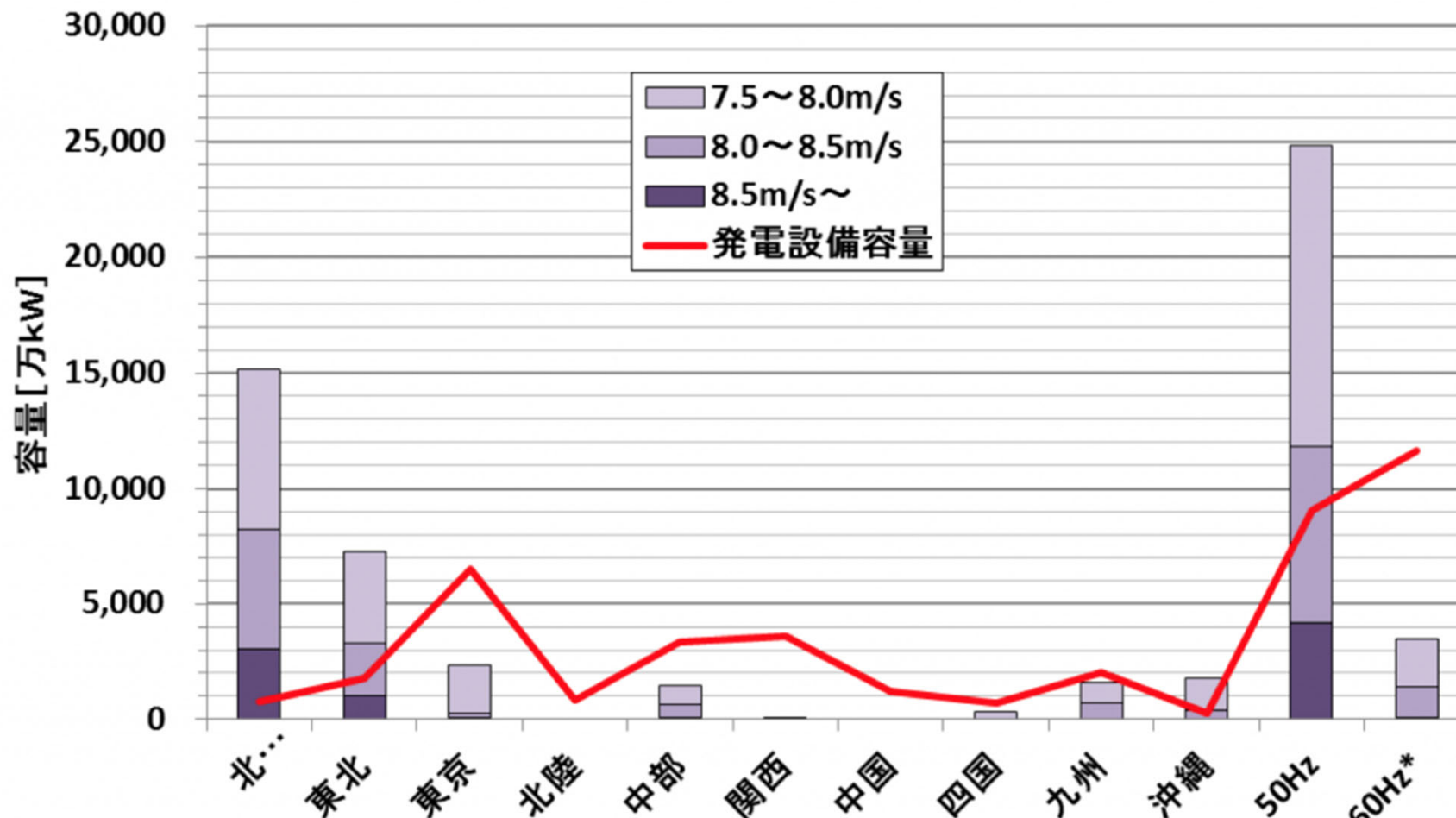
各電力会社管内別の着床式洋上風力ポテンシャル(島嶼を除く)

# 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)

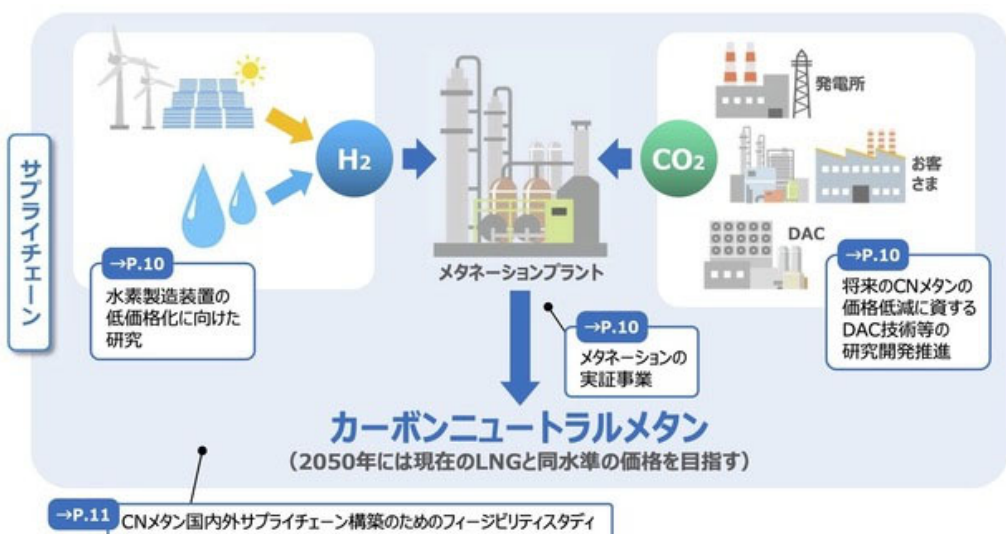
エネルギーシステム・要素論

出典: 経産省 SD

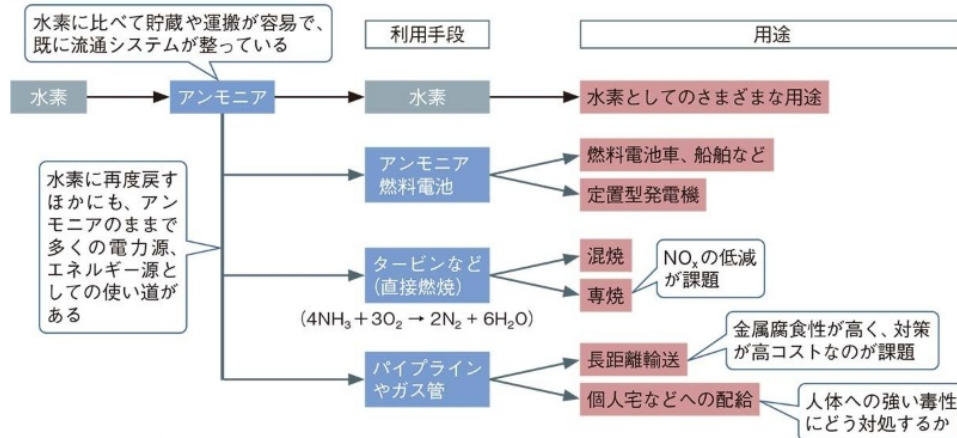


# 2050年の風力発電

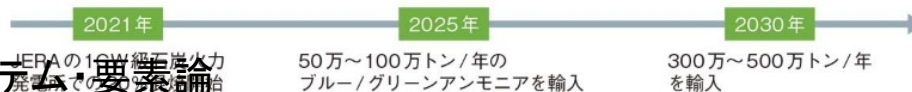
- 風力発電で電気を作っても
  - 需給バランスをとる必要あり
  - 蓄電池が必要 → 大容量は難しい
  - 政府が水素社会と言っるので水素をつくる
    - キャリアはメタン・アンモニア



(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



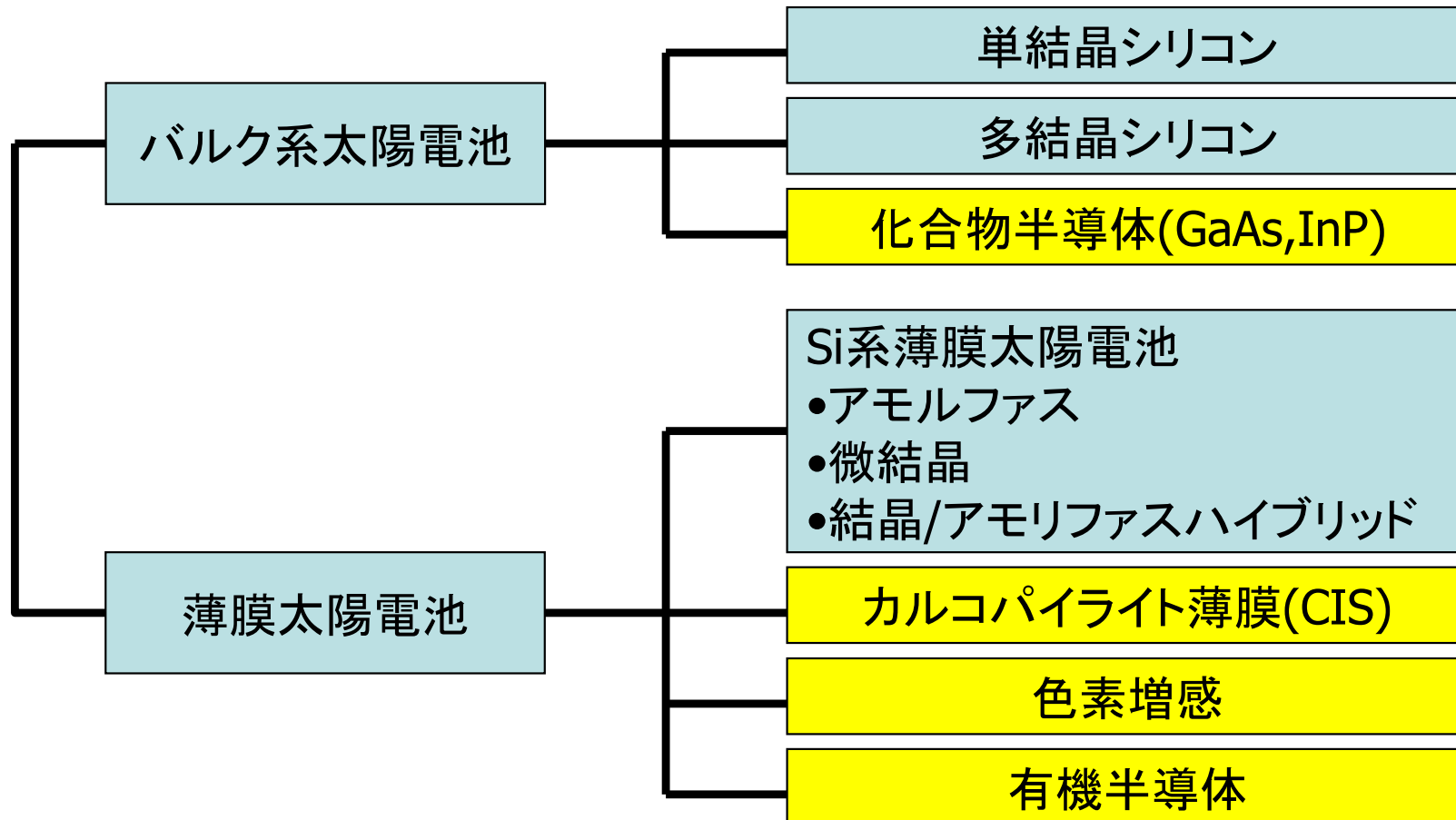
# 電池の種類

- 物理電池
  - 物理エネルギーを電気エネルギーに変換
  - 太陽電池
  - 熱電対
- 化学電池
  - 化学エネルギーを化学反応によって電力(直流)に変換
  - 一次電池 放電のみ可能
  - 二次電池 充電可能
  - 燃料電池

ネルンストの式

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \log_e \frac{Rd_1 Ox_2}{Ox_1 Rd_2}$$

# 太陽電池の種類



# Si系太陽電池

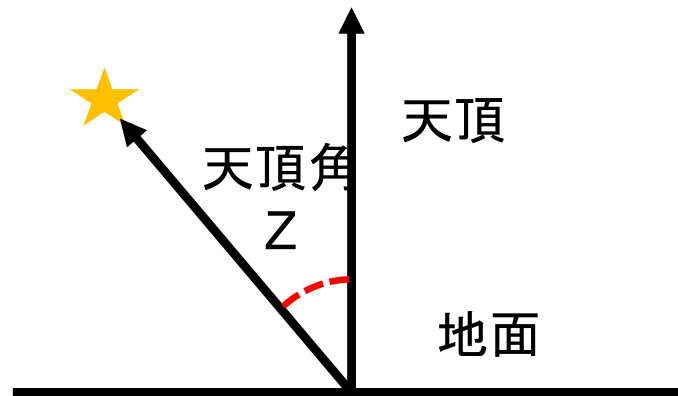
- シリコン膜構造
  - 単結晶シリコン形
    - シリコン使用量大
    - エネルギー, コスト大
  - 多結晶シリコン形
    - 純度, 効率低い
    - エネルギー, コスト良
  - 微結晶シリコン形
    - 薄膜をCVDで作る
      - マイグレーション
  - アモルファス形
    - CVDで製膜
    - エネルギーギャップ大
    - 低照度でも動作
- 温度特性
  - 温度上昇で出力低下
  - アモルファスシリコンでは電圧低下の影響が少ない
- 劣化
  - アモルファスシリコンは強い光の照射によって導電率が劣化
  - 薄膜系太陽電池
    - ガラス白濁
  - 取り出し端子電極劣化
    - 錆び・腐食

# 太陽電池

- 化合物系
  - GaAs
    - 高い変換効率
  - CIS (CIGS)
    - 薄膜多結晶
    - Cu, In, Ga, Al, Se, Sからなるカルコパイライト系I-III-VI族化合物
    - 禁制帯幅を材料で変える
  - CdTe-CdS系
    - Cd化合物薄膜をガラスで挟みこむ
- 有機系
  - 色素増感太陽電池
    - 透明電極にルテニウム錯体等の色素を吸着させたに酸化チタン層と電解質を挟み込む
    - 構造簡単
    - 低コスト
  - 有機薄膜太陽電池
    - 導電性ポリマー, フラーレンから成る有機薄膜半導体を利用
    - 変換効率向上の課題

# 太陽エネルギー

- 太陽表面の輻射: $3.8 \times 10^{23}$  [kW]
- 太陽と地球の平均距離: $1.495 \times 10^8$  [km]
- 地球に達するパワー: $177 \times 10^{12}$  [kW]



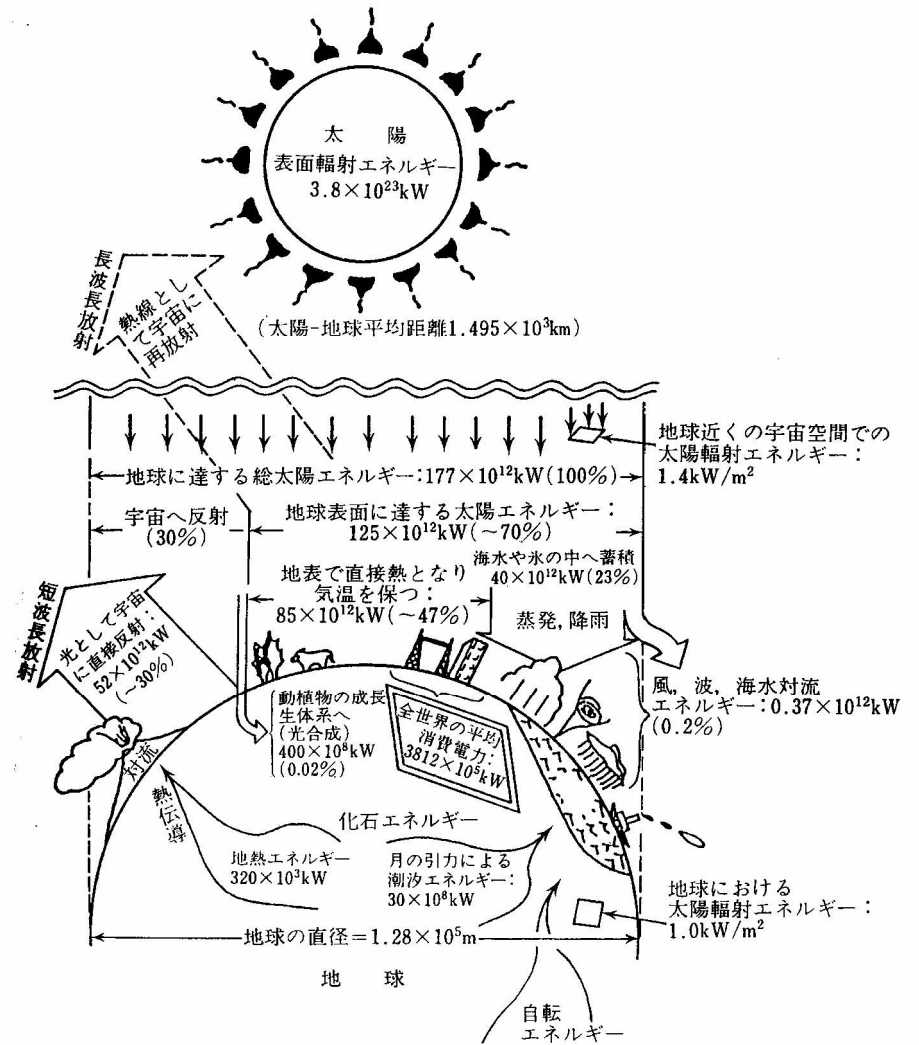
# エアマス (AM)

- 地球大気に入射した太陽光直達光が通過した路程の長さ。  
標準状態の大気圧 (標準気圧: 1013hPa) に垂直に入射した太陽直達光が地表に至るまでに通過した路程の長さをAM1.0として、それに対する倍率で表す。
- エアマスが4以下の場合、次の式で表す。
  - $AM = (b / b_0) \times \sec(Z) = b / (b_0 \times \cos(Z))$   
ただし,  $b_0$  : 標準気圧 (hPa)  
 $b$  : 測定時の気圧 (hPa)  
 $Z$  : 太陽の天頂角 (度)

# 太陽光エネルギー

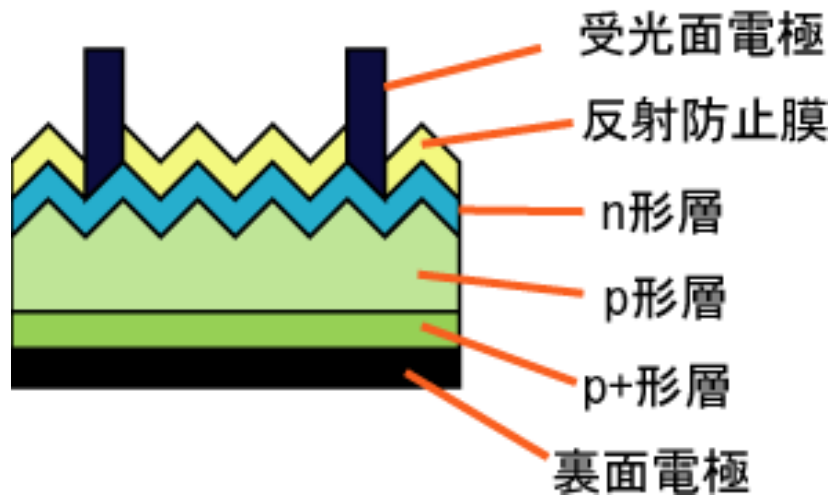
## 太陽光エネルギー

- 大気圏外 (AM-0) (人工衛星)  
約  $1.4 \text{ kW/m}^2$  ( $140 \text{ mW/cm}^2$ )  
太陽定数
- 春分・秋分赤道直下南中時の地上表面 (AM-1)  
約  $1.0 \text{ kW/m}^2$  ( $100 \text{ mW/cm}^2$ )
  - 大気圏中のオゾン ( $\text{O}_3$ ) が紫外線・可視光線を吸収
  - 酸素 ( $\text{O}_2$ ) と水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) が赤外線を吸収
  - 約  $0.4 \mu\text{m}$  から約  $1.3 \mu\text{m}$  の可視光線と赤外線のエネルギーが大きい





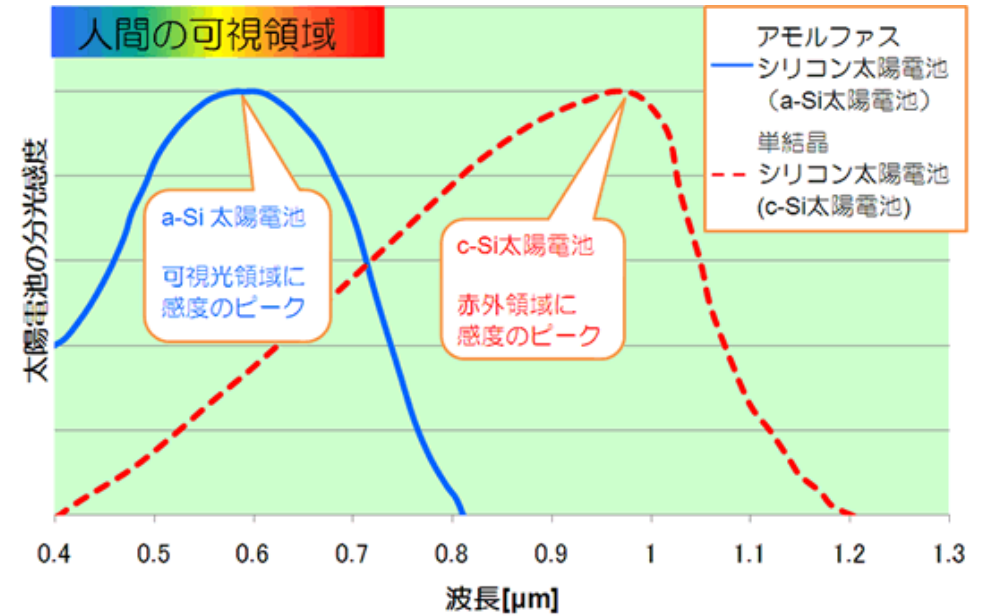
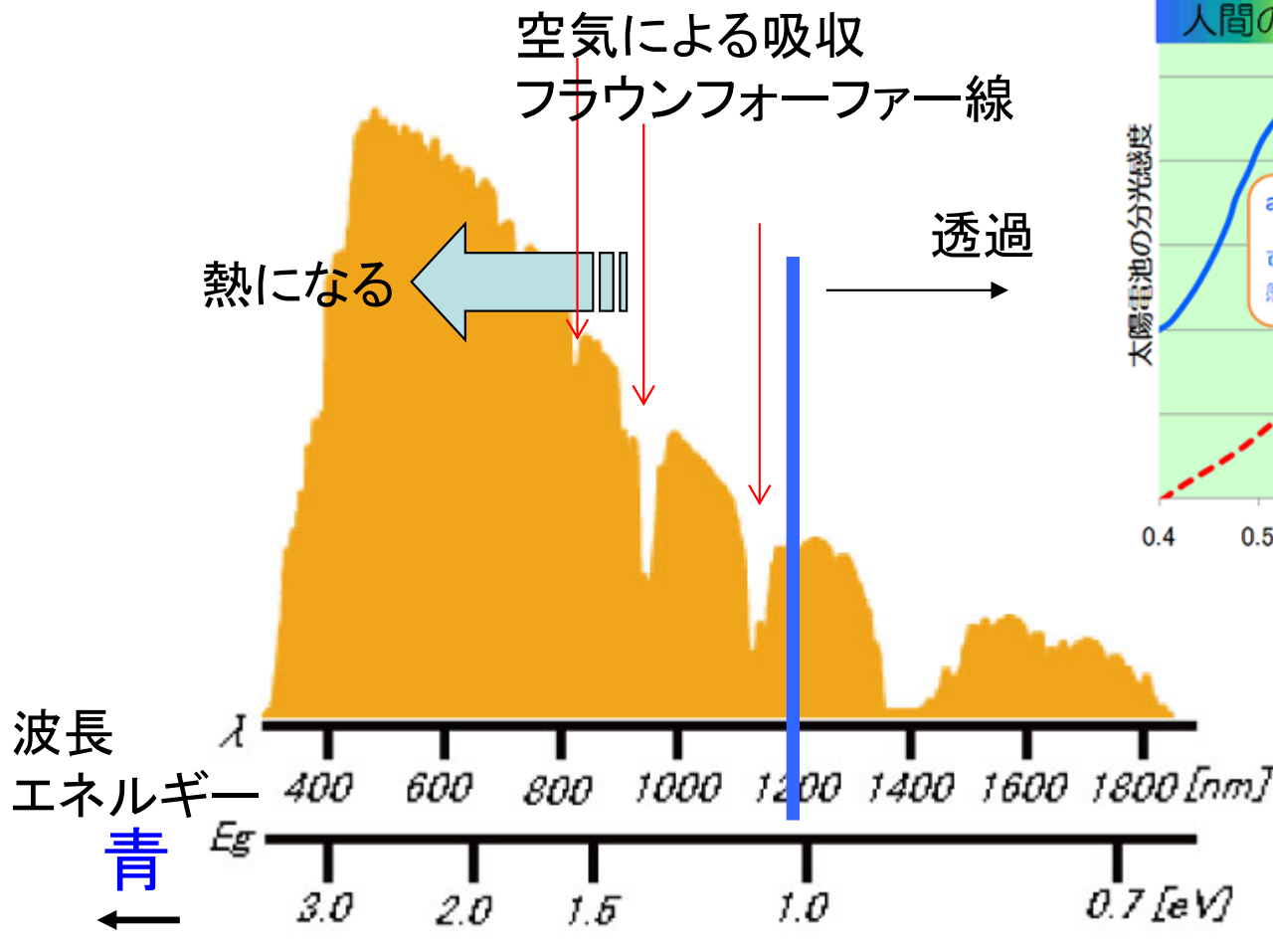
# 太陽電池の構造と動作原理



1. 光が半導体にあたる
2. 「+」と「-」の電荷が発生
3. P型半導体に「+」電荷が集まる
4. N型半導体に「-」電荷が集まる
5. 「+」電極となった「P型半導体」、  
「-」電極となった「N型半導体」  
に電線と負荷をつなぐと電流が流れる

色素増感形は、二酸化チタンに吸着した色素中の電子を励起

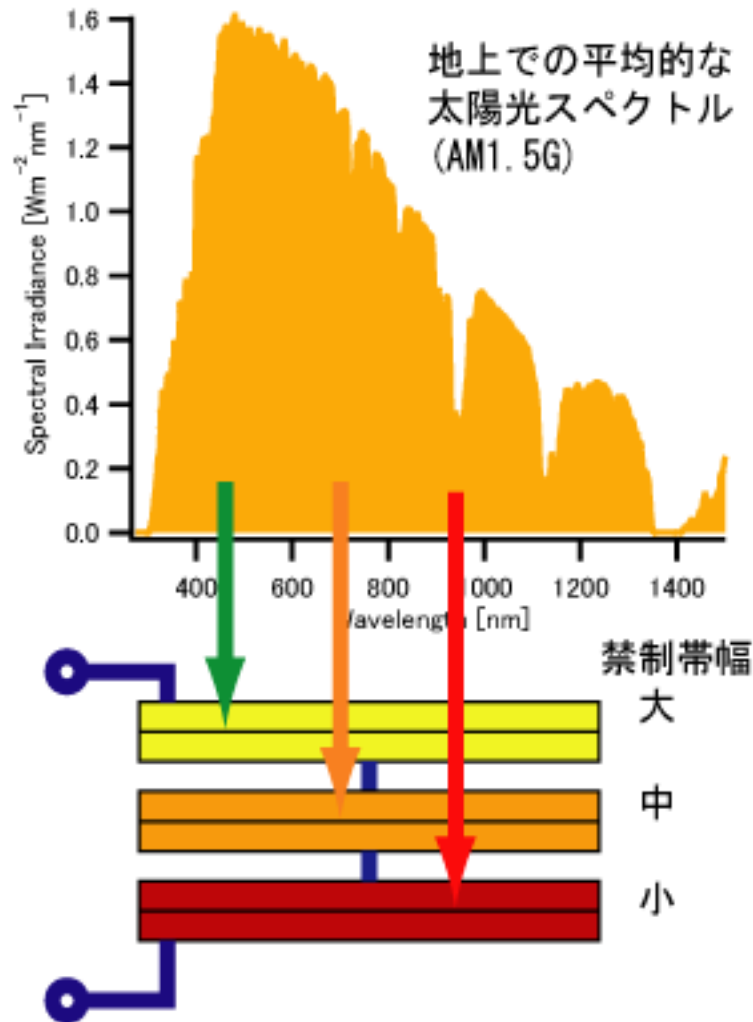
# 太陽電池の効率(最大30%)



太陽電池の感度

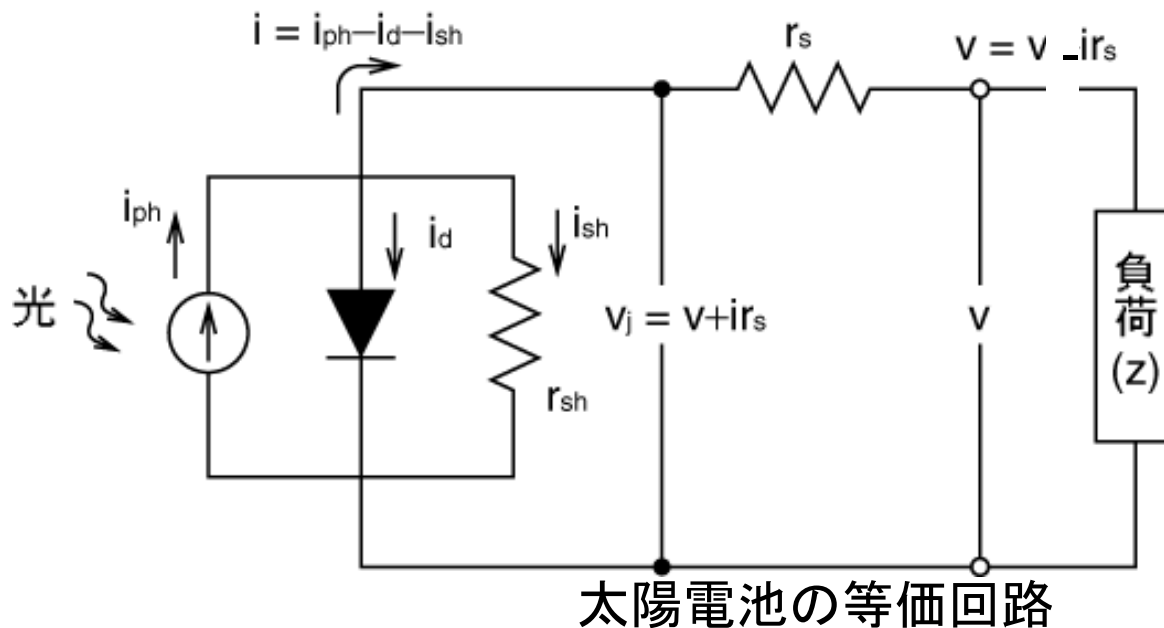
太陽光のスペクトル分布

# 多接合太陽電池(効率50%以上)



- 種類の異なる半導体を積み重ねる
  - GaInP/GaAs/Ge等
  - 順番を間違えると効果なし
  - スタック型、積層型、タンデム型とも呼ぶ
  - 理論的変換効率約86%(接合数無限大)

# 太陽電池の性能評価



$i_{ph}$ は短絡電流に相当  
 直列抵抗  
 半導体層の抵抗  
 電極の抵抗  
 並列抵抗  
 太陽電池の漏れ電流  
 電極の絶縁性

飽和電流  $i_o$   
 ダイオード因子  $n_d$   
 ボルツマン定数  $k$   
 接合部温度  $T_b$   
 単位電荷  $q$   
 接合部電圧  $v_j$   
 漏れ抵抗  $r_{sh}$

ダイオード電流  $i_d$

$$i_d = i_o \left\{ \exp\left(\frac{qv_j}{n_d k T_b}\right) - 1 \right\}$$

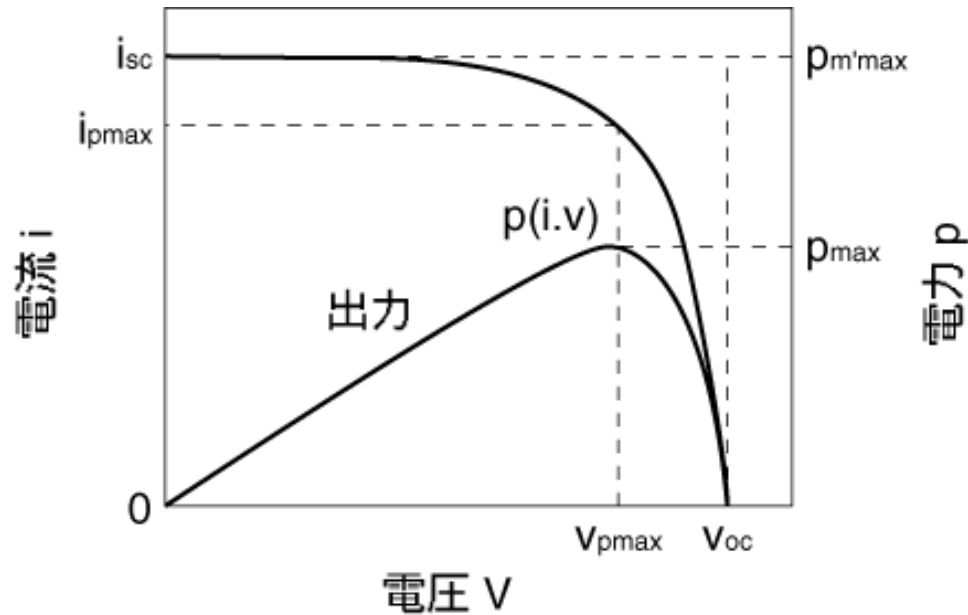
漏れ電流  $i_{sh}$

$$i_{sh} = \frac{v_j}{r_{sh}}$$

出力電流

$$i = i_{ph} - i_d - i_{sh} = i_{ph} - i_o \left\{ \exp\left(\frac{q(v - ir_s)}{n_d k T_b}\right) - 1 \right\} - \frac{v - ir_s}{r_{sh}}$$

# 太陽電池の性能評価



太陽電池の出力電圧・電流特性

$V_{max} \neq V_{oc}$ ,  $I_{max} \neq I_{sc}$

最大出力電力  $p_{max} = v_{oc} i_{sc} FF$

曲線因子  $FF = \frac{p_{max}}{v_{oc} i_{sc}}$   $i_{sc} = i_{ph} - i_o \left\{ \exp\left(\frac{q r_s i_{sc}}{n_d k T_b}\right) - 1 \right\} - \frac{r_s}{r_{sh}} i_{sc}$

開放電圧  $V_{oc} \Rightarrow i=0 \Rightarrow V_{oc} = V_{joc}$

$$0 = i_{ph} - i_d - i_{sh}$$

$$= i_{ph} - i_o \left\{ \exp\left(\frac{q v_{joc}}{n_d k T_b}\right) - 1 \right\} - \frac{v_{joc}}{r_{sh}}$$

短絡電流  $I_{sc} \Rightarrow v = v_{jsc} - i_{sc} r_s = 0$

$$V_{jsc} = i_{shsc} r_{sh} \quad i_{shsc} = \frac{r_s}{r_{sh}} i_{sc}$$

$$r_s i_{sc} = V_{jsc}$$

# 太陽電池の温度特性

- 高温において禁制帯幅（バンドギャップ：シリコンでは1.2eV）が減少する
- 結晶系では1°C温度が上昇すると約0.4%低下
  - 70°Cにおいて基準温度（25°C）に対して約2割の出力低下

