

エネルギーシステム・要素論

第四回 電池

太陽電池, 燃料電池

2022年6月23日

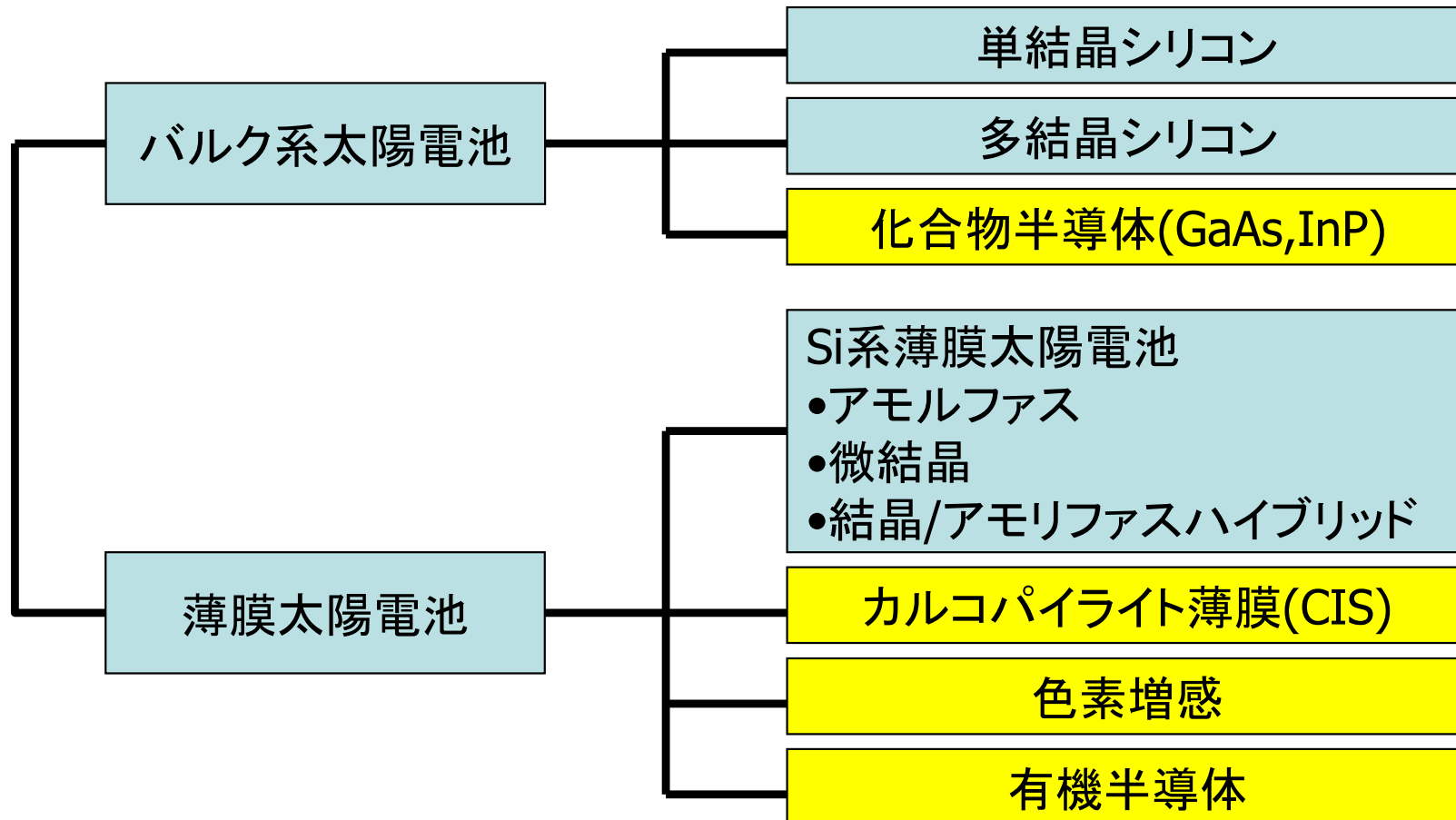
# 電池の種類

- 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

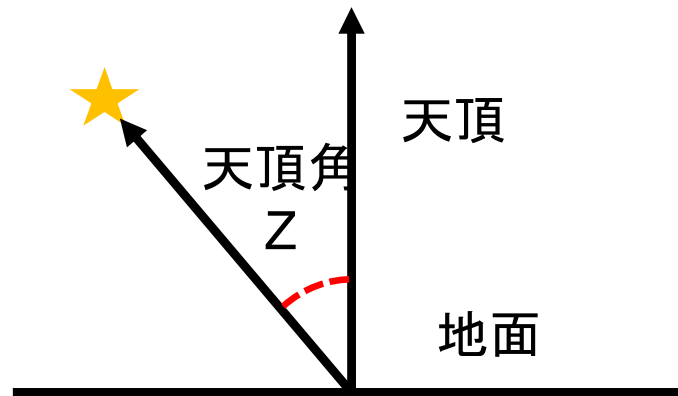
- シリコン膜構造
  - 単結晶シリコン形
    - シリコン使用量大
    - エネルギー, コスト大
  - 多結晶シリコン形
    - 純度, 効率低い
    - エネルギー, コスト良
  - 微結晶シリコン形
    - 薄膜をCVDで作る
      - マイグレーション
  - アモルファス形
    - CVDで製膜
    - エネルギーギャップ大
    - 低照度でも動作
- 温度特性
  - 温度上昇で出力低下
  - アモルファスシリコンでは電圧低下の影響が少ない
- 劣化
  - アモルファスシリコンは強い光の照射によって導電率が劣化
  - 薄膜系太陽電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



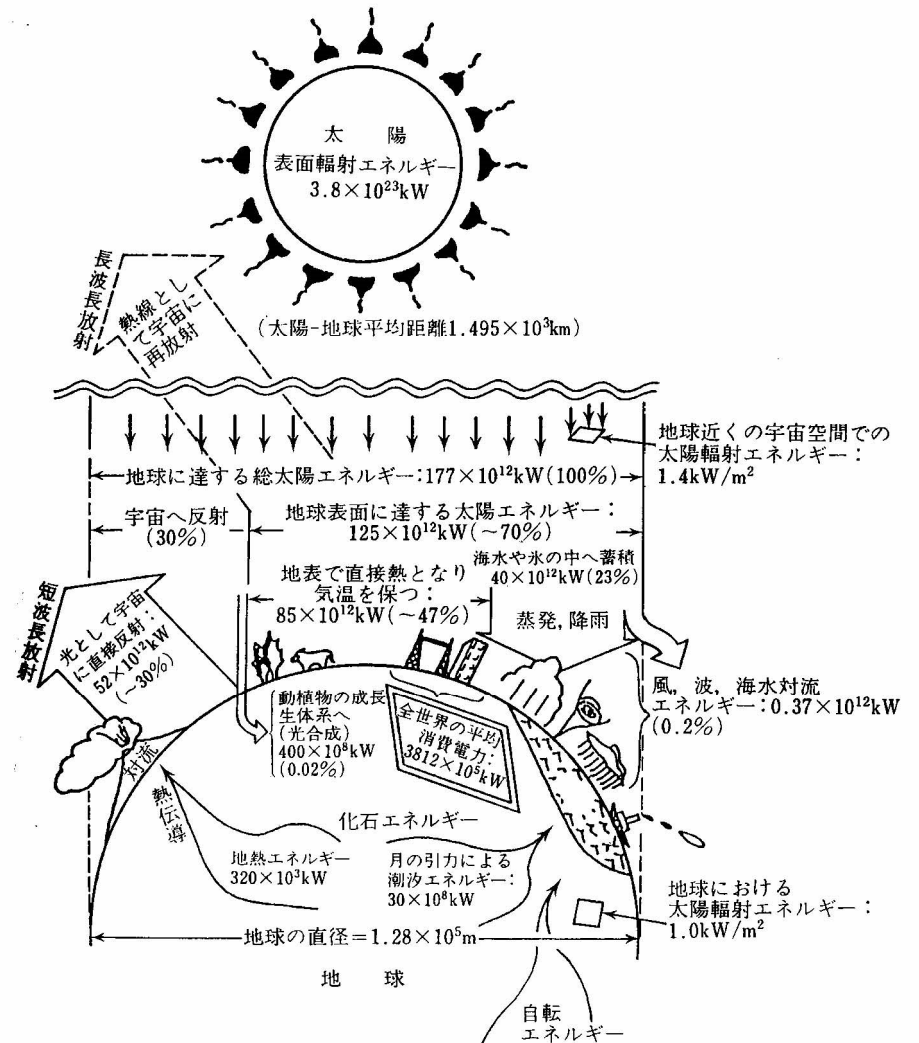
# エアマス (AM)

- 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

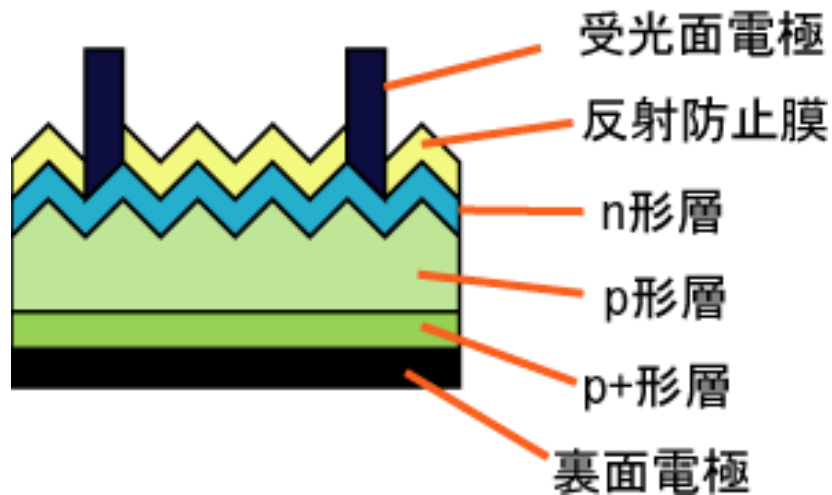
## 太陽光エネルギー

- 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





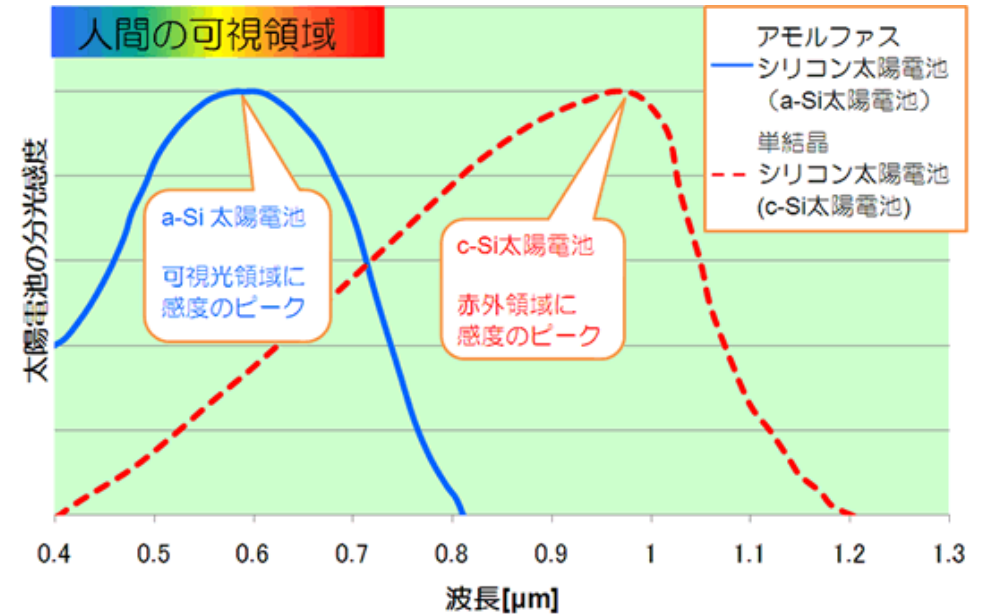
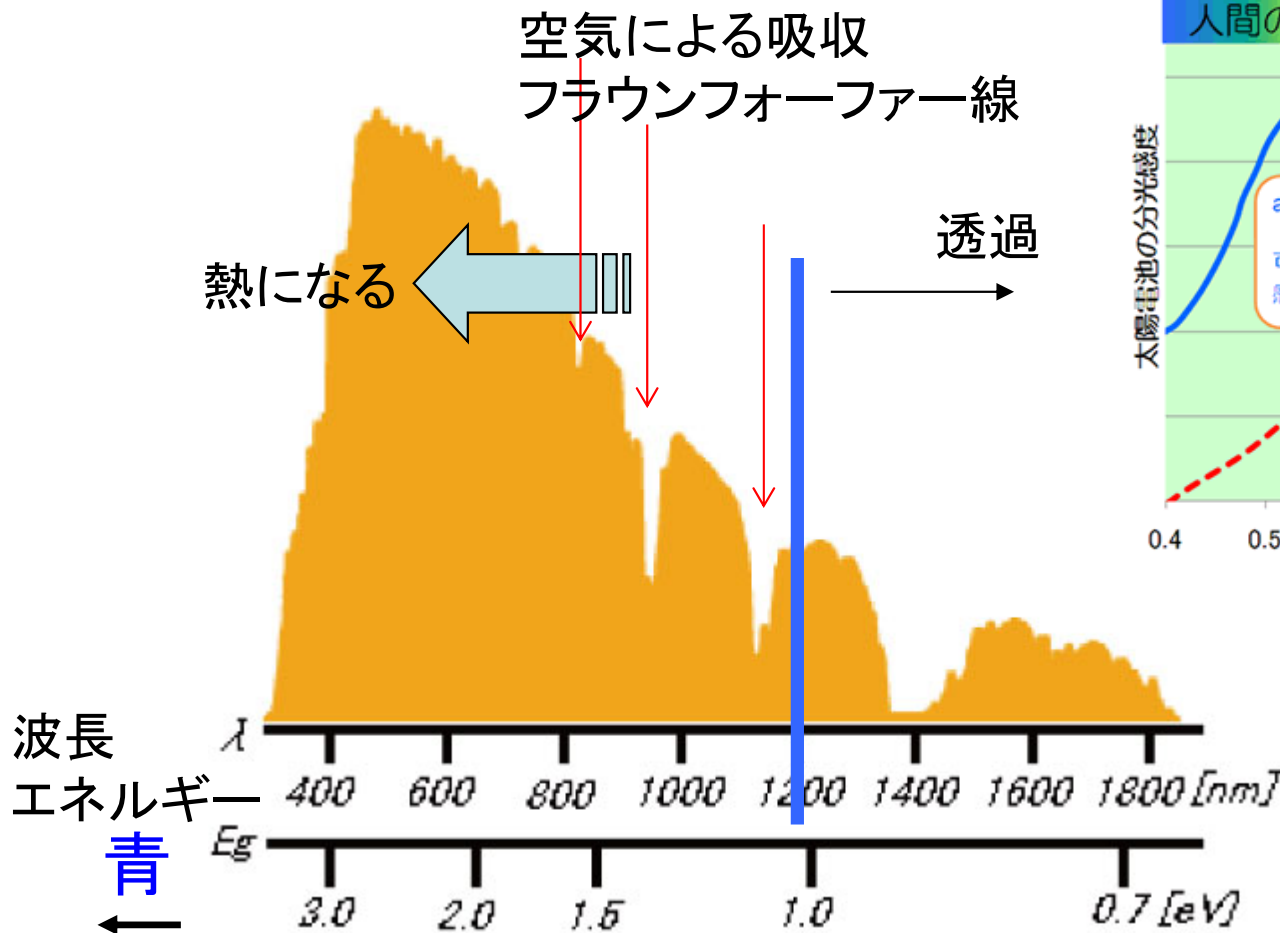
# 太陽電池の構造と動作原理



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

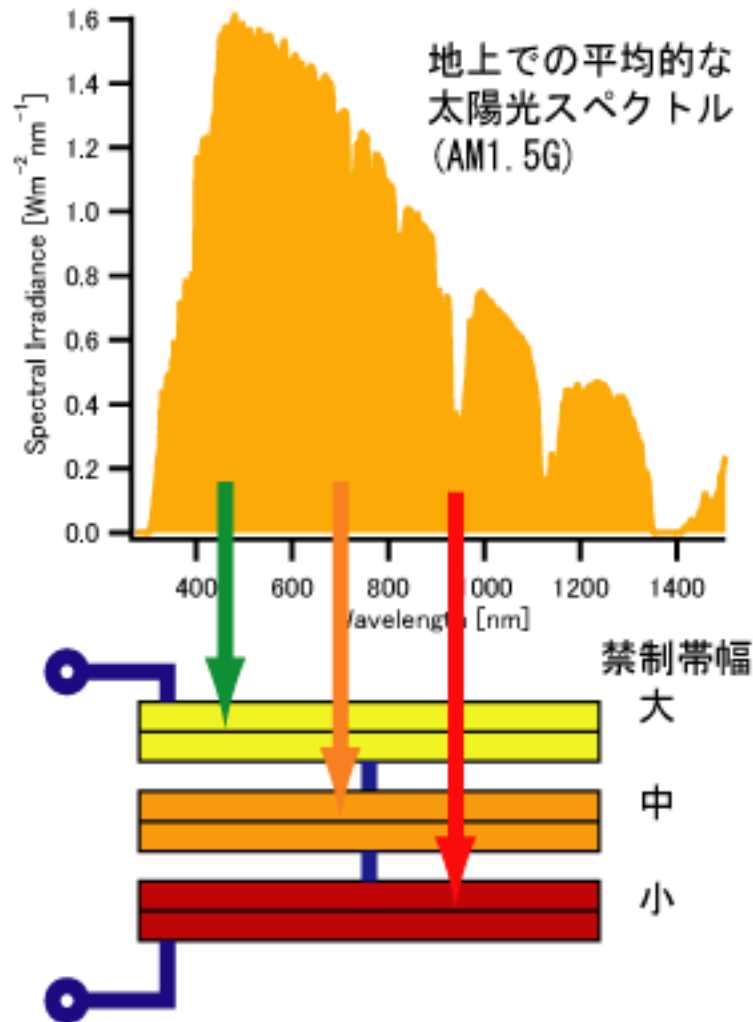
# 太陽電池の効率(最大30%)



太陽電池の感度

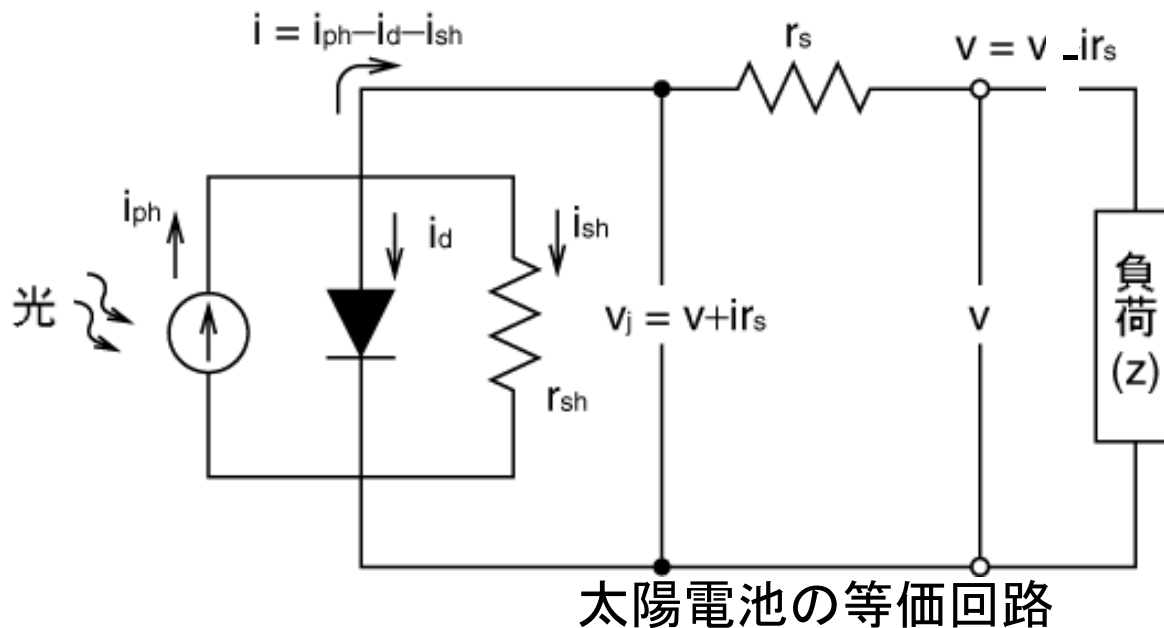
太陽光のスペクトル分布

# 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  $i_d$

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

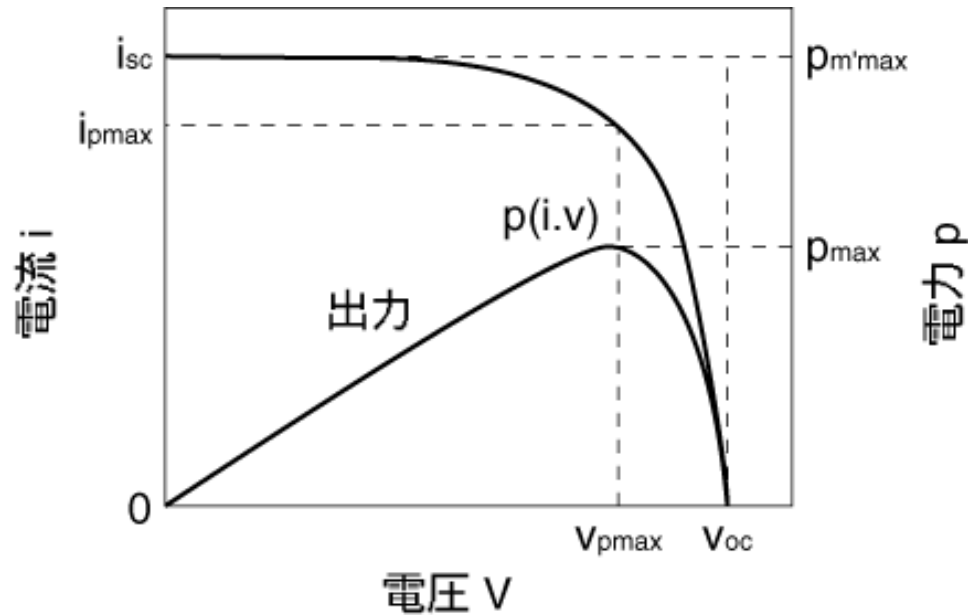
漏れ電流  $i_{sh}$

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

出力電流

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

# 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 
$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad I_{sc} = I_{ph} - I_o \left\{ \exp\left(\frac{q r_s I_{sc}}{n_d k T_b}\right) - 1 \right\} - \frac{r_s}{r_{sh}} I_{sc}$$

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

$$0 = I_{ph} - I_d - I_{sh} \\ = I_{ph} - I_o \left\{ \exp\left(\frac{q V_{joc}}{n_d k T_b}\right) - 1 \right\} - \frac{V_{joc}}{r_{sh}}$$

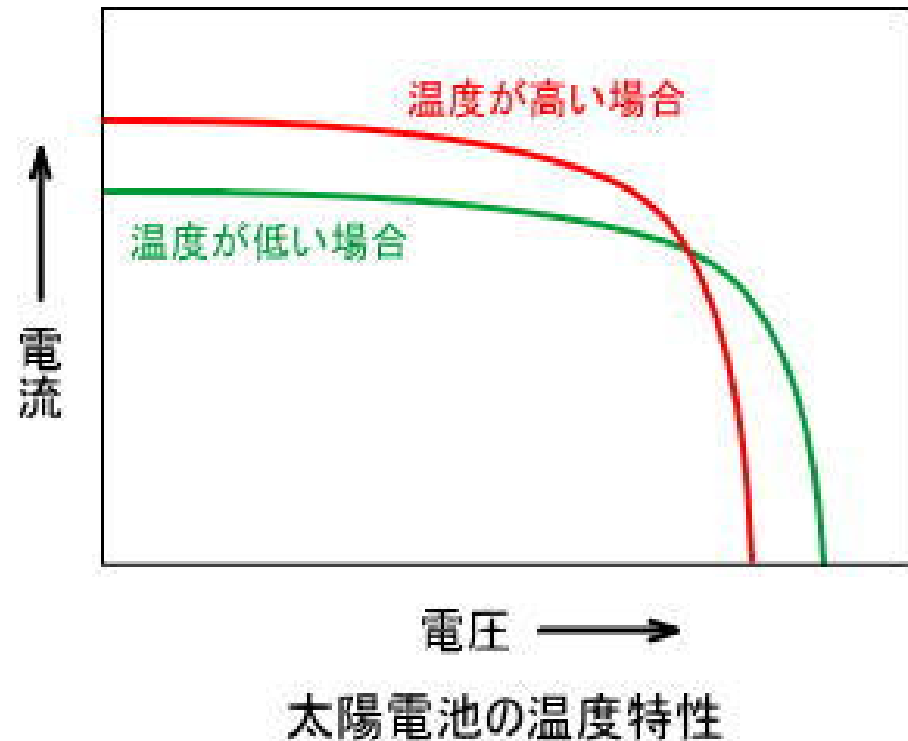
短絡電流  $I_{sc} \Rightarrow v = v_{jsc} - I_{sc} r_s = 0$

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

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

# 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



# 燃料電池

- 特長
  - 燃料と酸化剤を供給し電力を取り出す化学電池
  - 化学エネルギーから電気エネルギーへの直接変換
    - 発電効率が高い
  - 騒音や振動少ない
- 種類
  - 固体高分子形燃料電池 (PEFC)
  - アルカリ電解質形燃料電池(AFC)
  - リン酸形燃料電池 (PAFC)
  - 熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)
  - 固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

# 固体高分子形燃料電池 (PEFC)

- 燃料極(負極)、固体高分子膜(電解質)、空気極(正極)を一体化した膜／電極接合体を、反応ガスの供給流路を形成するバイポーラプレートで挟んだ単セルを積層し、直列接続したセルスタックで発電
- 燃料極反応  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (プロトンと電子に分解)
- 空気極反応  $4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ (水を生成)
- 固体高分子膜 燃料極で生成したプロトンを空気極へ移動
- 水を使用するため0°C以下、または100°C以上での使用が困難
- 電極触媒(白金)使用 CO被毒
  - 改質器
    - 都市ガス
      - 発電効率30数%
      - 発電と熱供給を併せた総合熱効率80%程度
    - ガソリン
    - メタノール
      - 直接メタノール方式(DMFC)
      - メタノール改質方式



# アルカリ電解質形燃料電池(AFC)

- アルカリ電解液を電極間のセパレータにしみこませてセルを構成
- 構造が簡単
- 安価な電極触媒(ニッケル酸化物等)
- 燃料に炭化水素が混入していると劣化
- 酸化剤に高純度の酸素を必要
- アポロ計画で使用

# リン酸形燃料電池 (PAFC)

- 電解質 リン酸( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )水溶液
- 動作温度 200°C程度
- 発電効率は 約40%LHV
- 白金触媒利用(CO被毒)
- 工場、ビル用(100/200kW級)

# 熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)

- 火力発電所の代替用途
- 白金触媒を用いない内部改質方式
  - 水素イオン(H<sup>+</sup>)の代わりに炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)を用いる
- 電解質 熔融炭酸塩(炭酸リチウム、炭酸カリウム)
- 燃料 水素, 天然ガス, 石炭ガス
- 動作温度 600°C~700°C程度
- 発電効率 約45%LHV
- 燃料極側排ガスの二酸化炭素濃度は80%程度
  - CO<sub>2</sub>回収

# 固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

- 動作温度は700～1000°C程度
  - 排熱の利用に有利
  - 高耐熱の材料が必要
  - 起動停止時間長い
- 電解質 イオン伝導性セラミックス(安定化ジルコニア,ランタン・ガリウムのペロブスカイト酸化物)
- 空気極で生成した酸化物イオン( $O_2^-$ )が電解質を透過し、燃料極で水素と反応
- 水素, 天然ガス, 石炭ガスを燃料として用いることが可能。
- 1～10kW級
- 発電効率 56.1%LHV
- 改質器は不要

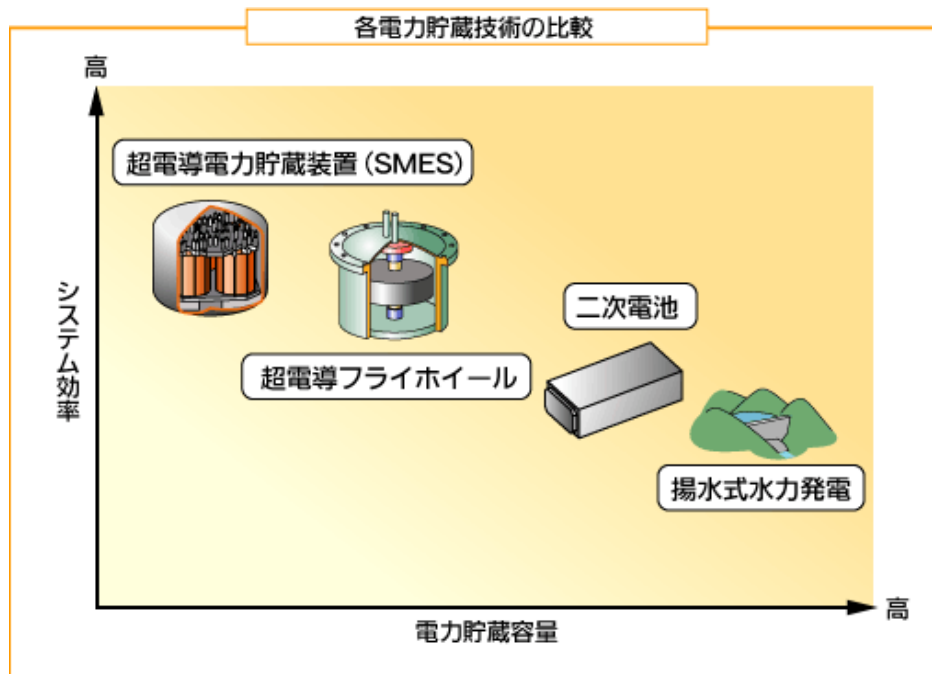
# 再生可能エネルギー利用の課題

- 需給調整
  - 従来型電源 需要に応じた発電
  - 再エネ電源 太陽光発電・風力発電
    - 気象で変化する出力
      - 電力貯蔵による補償
    - 地域遍在性
      - 長距離送電 → 直流送電
  - 電力貯蔵
    - 揚水発電, CASE

# 主な電力用エネルギーシステム

## 電気エネルギー⇔

電力貯蔵とは電力・エネルギー変換技術



<http://app2.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/egy/ey10/index.html>

- 位置エネルギー (水力発電)
- 熱力学エネルギー (火力発電, CAES)
- 運動エネルギー (フライホイール, 風力発電)
- 電磁エネルギー (SMES, EDLC)
- 化学エネルギー (電池)

→ 可逆動作で電力貯蔵装置として利用可能

# 揚水発電

- 位置エネルギーの変換
- 電力貯蔵としての効率約70%
  - 水の位置エネルギー ⇔ 水の運動エネルギー ⇔ 水車の回転(運動)エネルギー ⇔ 発電機の電気エネルギー
- 揚水発電所の構成
  - 別置式                    水車とポンプを別個に配置
  - タンデム式                電動発電機と同軸に水車・ポンプを接続
  - 可逆式                      ポンプ水車を利用

# 揚水発電の発展

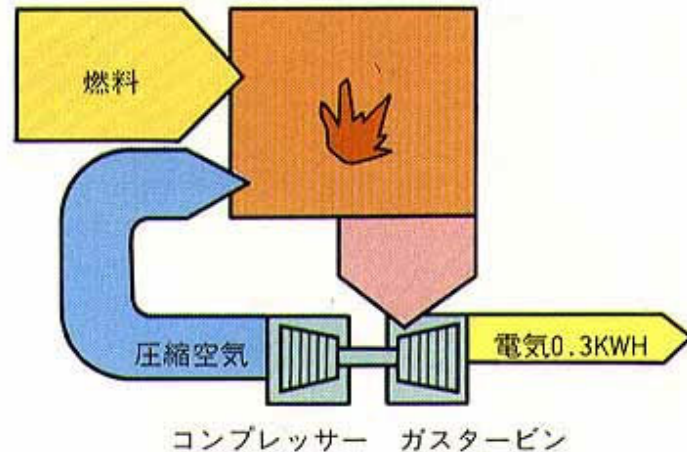
- 従来型揚水発電
  - 発電 ガバナーで出力調整可
  - 揚水 同期速度で電動機を回転。揚水電力一定
- 可変速揚水発電
  - 揚水 電動機を可変速駆動する事により、揚水電力を可変可能
    - 深夜の可変負荷として重要
  - 水車運転時とポンプ運転時の最高効率となる回転数が異なるため、夫々に合わせて運転する事で損失を低減可能
  - サイクロコンバータによる回転子励磁。回転子速度可変、固定子出力周波数一定
  - 1992年 関西電力大河内発電所



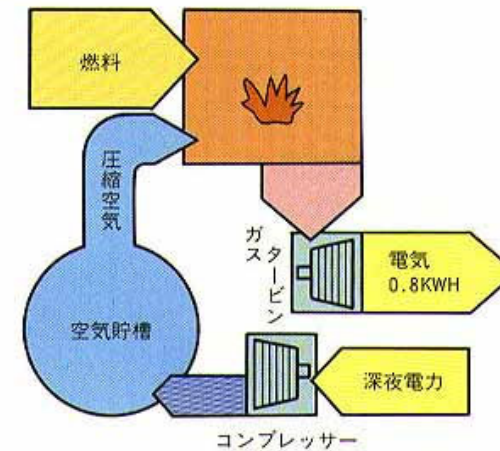
# 圧縮空気貯蔵

## CAES-G/T(Compressed Air Energy Storage Gas Turbine)発電 熱力学エネルギーの変換

(a)ガスタービン発電



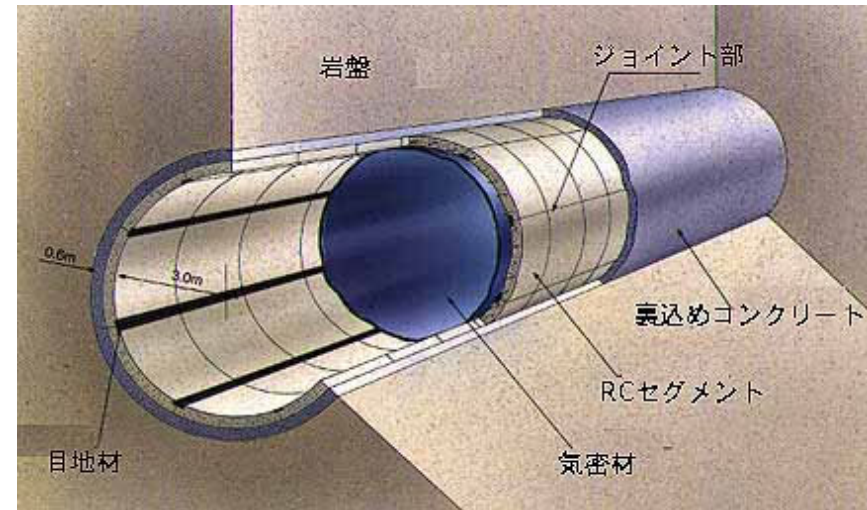
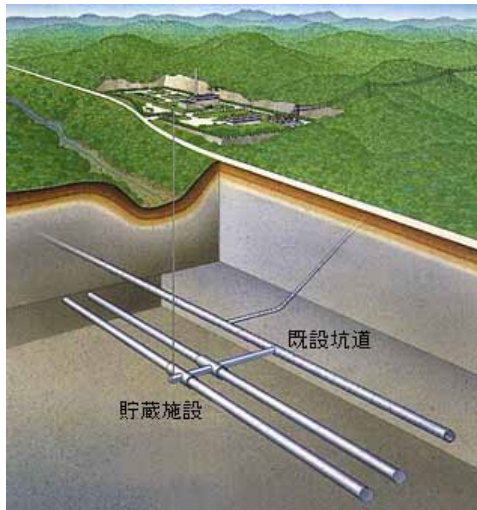
(b)CAES-G/T



- ガスタービン発電の特長と課題
  - 電力負荷への追従性に優れている
    - ピーク負荷対応
  - 立地条件の制約が少ない
  - 建設費が安い
  - 空気圧縮機を駆動して高圧空気を作りながら発電を行う
  - 燃料の約2/3が空気の圧縮に消費される→効率悪い

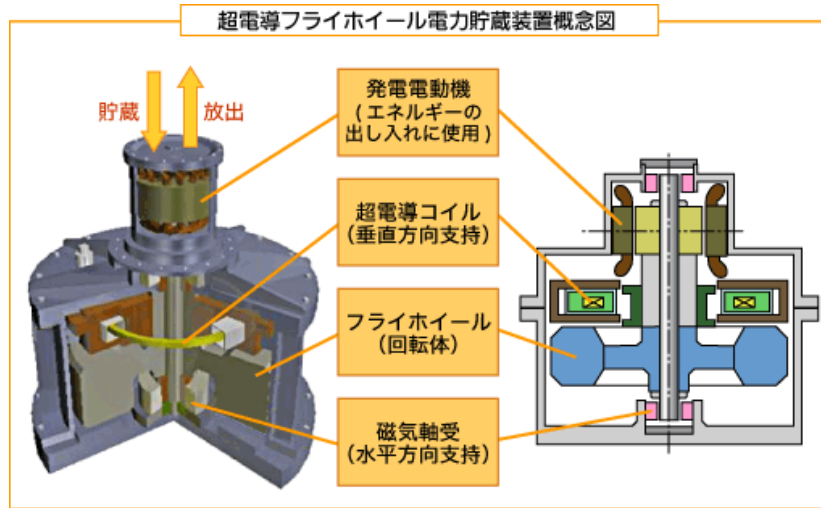
- CAES-G/T発電の特長
  - ガスタービン発電の空気圧縮を余剰電力で行う
  - 同じ発電出力を得るために必要な化石燃料が約1/3になる。→高効率

# 新エネルギー財団/圧縮空気貯蔵ガスタービン (CAES-G/T)パイロットプラント



- 海外の事例
  - 1978年に旧西独フントルフ(29万kW)
  - 1991年には米国マッキントッシュ
- 圧縮空気の貯蔵に岩塩層空洞を利用
  - 高い気密性が確保できる
  - 空洞建設が経済的に行える
- 圧縮空気貯蔵ガスタービン(CAES-G/T)パイロットプラント
  - 平成2年度～
  - 所在地:北海道空知郡砂川町
  - 高压空気貯蔵空洞をいかに経済的に建設するかが課題

# フライホイール



- 運動エネルギーとして貯蔵
  - 大きなエネルギーの貯蔵
    - 回転体の運動エネルギー
 
$$\frac{1}{2}I\omega^2$$
    - 大きな質量のフライホイール
    - 速い速度でフライホイールを回転させる
- 回転損低減
  - 風損低減(真空化)
  - 磁気軸受け
- 可変速駆動



波照間島の電力安定化システムの構成。出典：沖縄電力

<http://app2.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/egy/ey10/index.html>