エネルギーシステム・要素論
第5回　電池
太陽電池,燃料電池,電力貯蔵

2026年7月24日

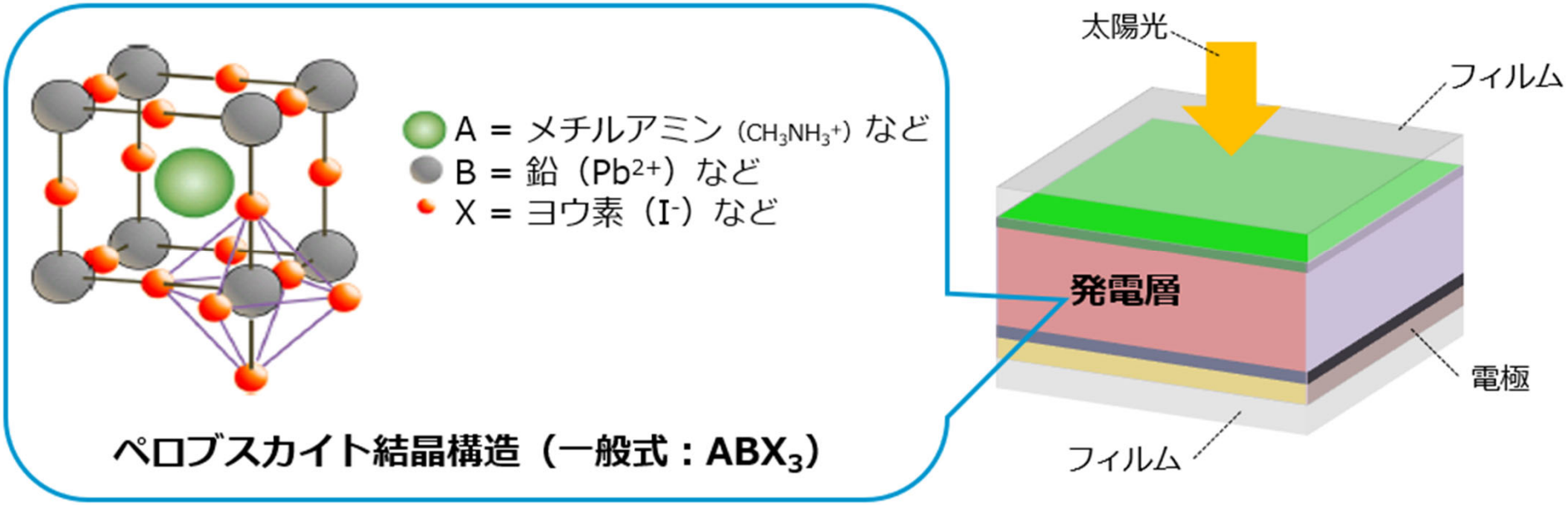
Si系太陽電池

- 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

薄くて、軽く、柔軟なペロブスカイト太陽電池



①低コスト
材料をフィルムなどに塗布・印刷して作ることができる。製造工程が少なく、大量生産ができる。
②軽くて柔軟
小さな結晶の集合体が膜になっているため、折り曲げやゆがみに強く、軽量化が可能。
③主要材料は日本が世界シェア第2位
主原料であるヨウ素は、日本の生産量が世界シェアの約3割を占めており、世界第2位。（第1位はチリ約6割）経済安全保障の面のメリット

ペロブスカイト太陽電池の適用分野

屋内・小型

IoTデバイス等、特定用途の比較的小型な機器類に貼る太陽電池

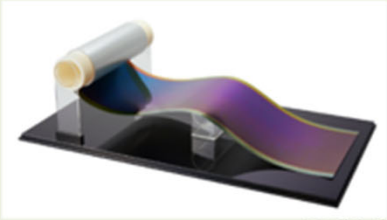


（出典）エネコートテクノロジーズ

- 短寿命の機器への用途であれば、**耐久性の課題は発電用途に比べてハードルが低く、**大面積生産技術が確立されることで、**小型・高付加価値といった展開が期待される。**
- **ユーザー等との連携**による、**独自性・高付加価値を追求することが市場獲得に不可欠。**

軽量・フレキシブル型

既存の太陽電池では設置が困難な場所（壁面、耐荷重が小さい屋根等）に設置

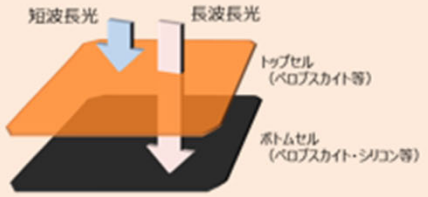


（出典）積水化学工業

- 高い耐久性と高い歩留まりが求められることから、**量産化へのハードルは高いものの、既存の太陽電池ではアプローチできなかった場所**に設置でき、太陽光の導入量の増加に寄与。
- **量産可能な製造技術**が鍵。日本は**耐久性に関する特許でリード**しており、特許化に適さない**製造ノウハウの蓄積が不可欠。**

超高効率型

高いエネルギー密度が求められる分野



タンデム型太陽電池のイメージ

- 設置面積の制限などから、高いエネルギーが求められる分野（交通・航空等）では、従来よりも**超高効率なタンデム型の開発**が必須。
- **超高効率のメリットに合う価格を実現可能な**低コスト化が鍵。高い耐久性と高い歩留まりが求められることから、**量産化へのハードルは高い。**

次世代太陽電池の早期社会実装に向けた今後の政策の方向性

量産技術の確立

【GI基金によるR&D・社会実装加速】

- 「次世代型太陽電池の開発プロジェクト」（498億円）を通じて、**2030年の社会実装**を目指す。
- 本年8月、ＷＧを開催し、**支援の拡充（498億円→648億円）について合意**。
- 技術開発に加えて、**導入が期待される様々なシチュエーションにおけるフィールド実証を行う**べく、**今年度中に、③次世代型太陽電池実証事業を公募**開始予定。

生産体制整備

【サプライチェーン構築】

- **2030年までの早期にGW級の量産体制構築**に取り組む。
- 令和6年度予算案として、**GXサプライチェーン構築支援事業（R6年度548億円（国庫債務負担行為含め総額4,212億円））を計上**。
- **Tier1に限らず、Tier2以下も含めたサプライチェーン全体に対する生産体制整備支援を実施**することで、高い産業競争力を有する形での国内製造サプライチェーンの確立を目指す。

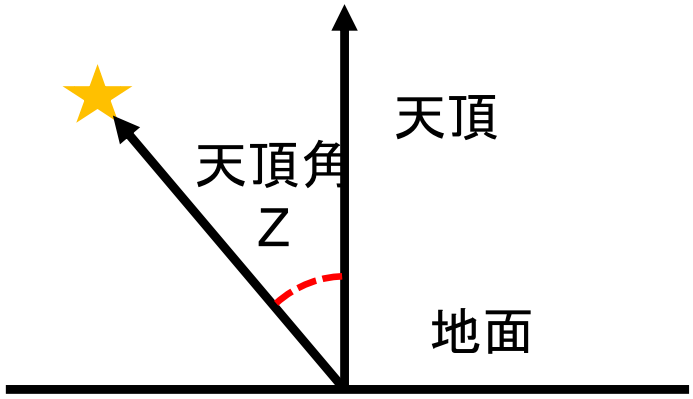
需要の創出

【需要創出に向けて想定される取組】

- **導入目標の策定**（特に公共施設は先行検討）
- **FIT・FIP制度における導入促進策**や**大量生産等による価格低減目標を前提とした需要支援策**などの検討
- 太陽電池の**製造からリサイクル・廃棄**までを見据えた**ビジネスモデルの普及・制度設計やルール作り**
- 諸外国とも連携した耐久性などの**評価手法等の国際標準化**
- アジア、欧米など、**有志国と連携した海外市場獲得**

太陽エネルギー

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

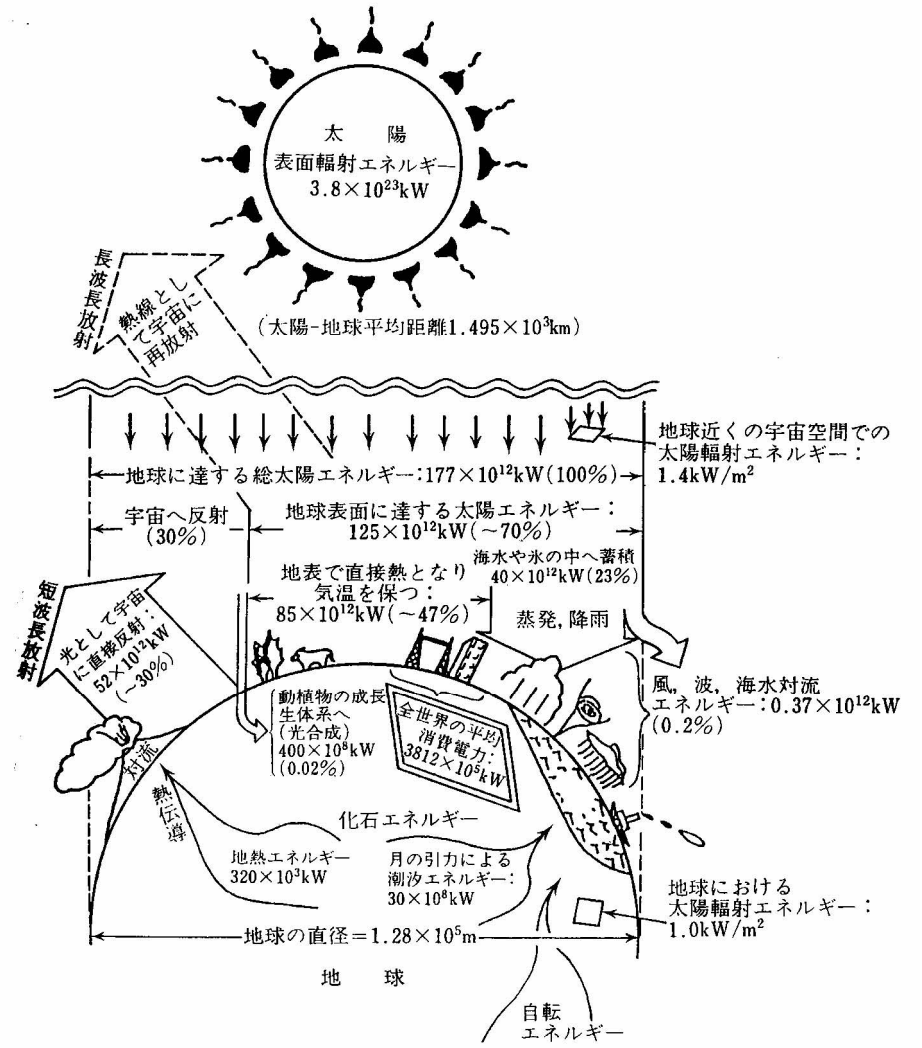


エアマス（AM）

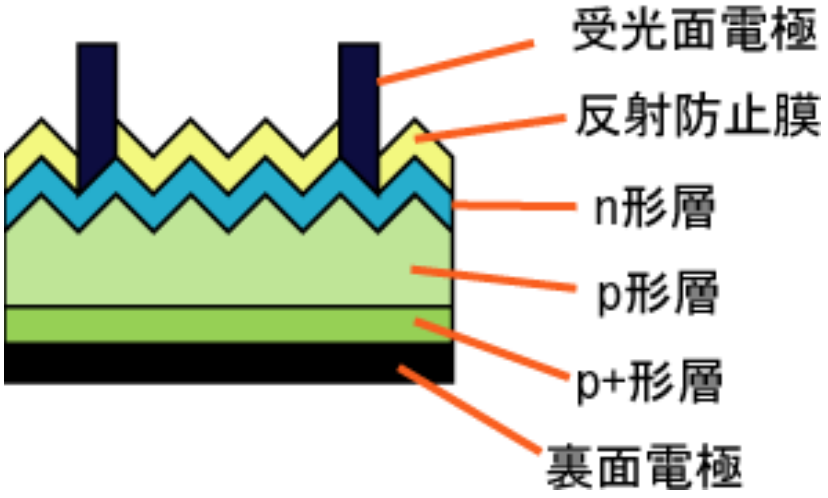
- 地球大気に入射した太陽光直達光が通過した路程の長さ。
  標準状態の大気圧（標準気圧：1013hPa）に垂直に入射した太陽直達光が地表に至るまでに通過した路程の長さをAM1.0として、それに対する倍率で表す。
- エアマスが4以下の場合、次の式で表す。
  - AM＝（b／b0）×sec(Z) ＝ b ／（b0 × cos(Z) ）
    ただし，b0 ：標準気圧 (hPa)
    b ：測定時の気圧 (hPa)
    Z : 太陽の天頂角（度）

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 kW/m^2(140mW/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 kW/m^2(100 mW/cm^2)
    - 大気圏中のオゾン(O_3)が紫外線・可視光線を吸収
    - 酸素(O_2)と水(H_2O)が赤外線を吸収
    - 約0.4 μm から約1.3 μm の可視光線と赤外線のエネルギーが大きい



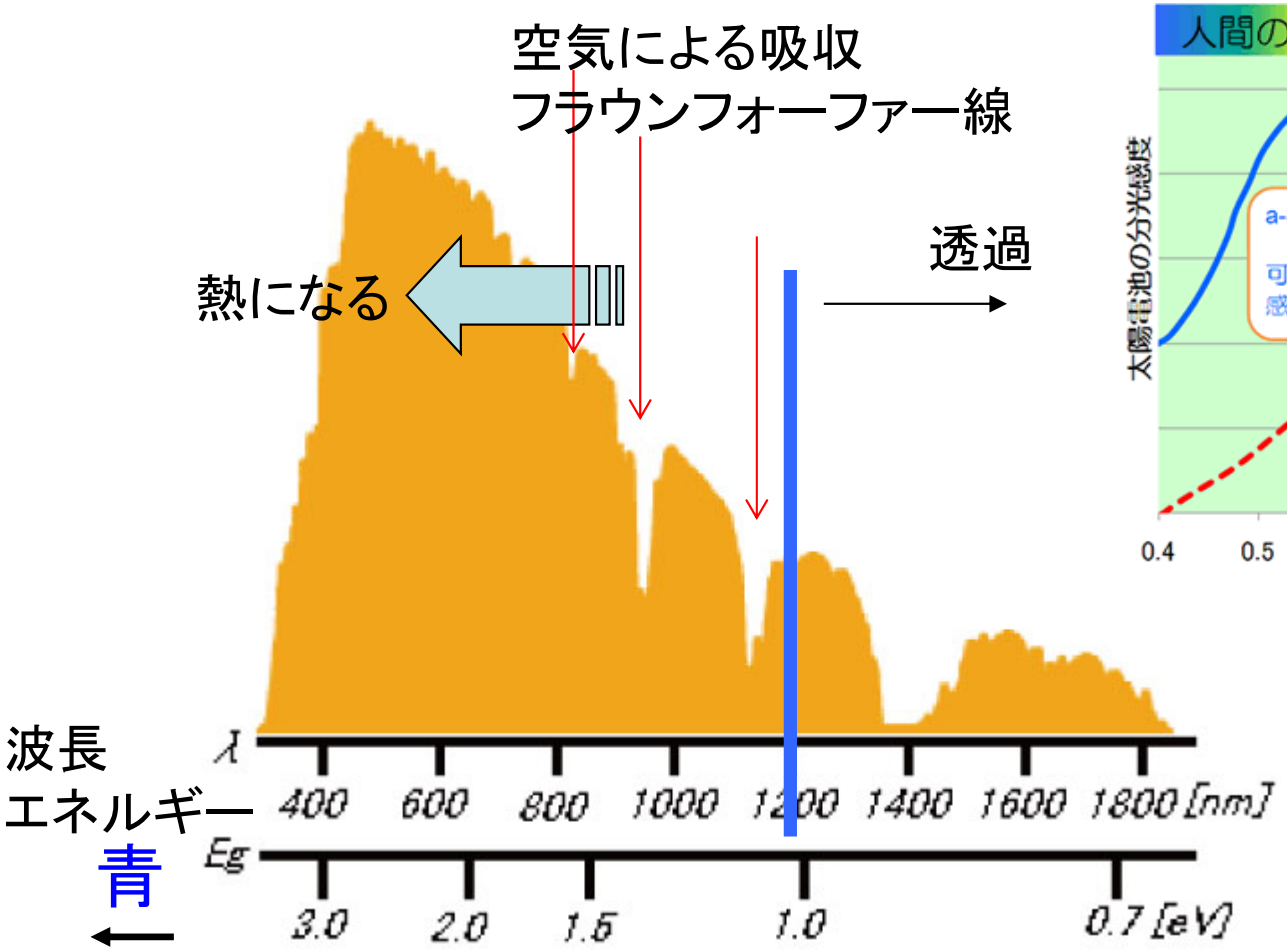
太陽電池の構造と動作原理



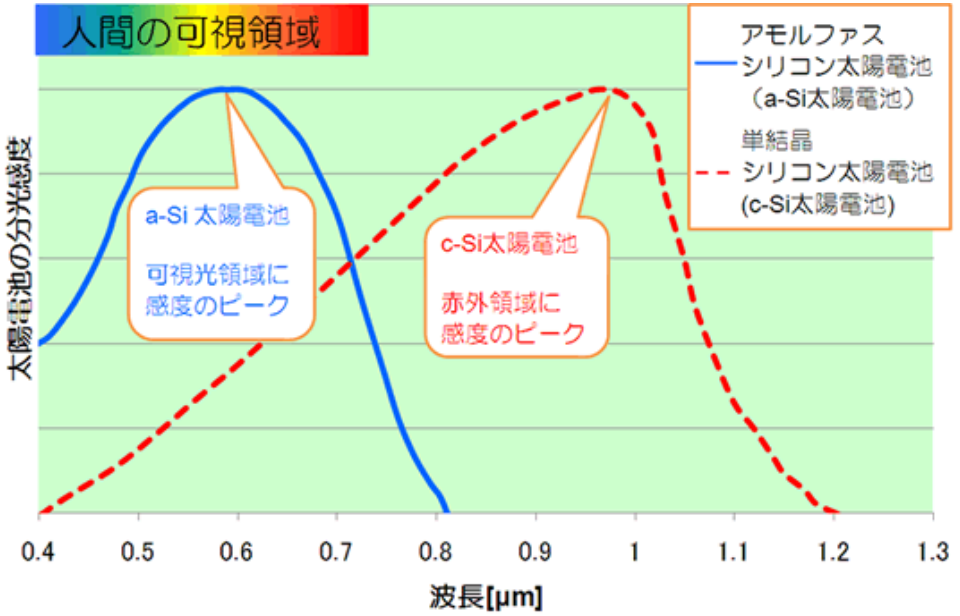
1. 光が半導体にあたる
2. 「+」と「-」の電荷が発生
3. P型半導体に「+」電荷が集まる
4. N型半導体に「-」電荷が集まる
5. 「+」電極となった「P型半導体」、「-」電極となった「N型半導体」に電線と負荷をつなぐと電流が流れる

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%)



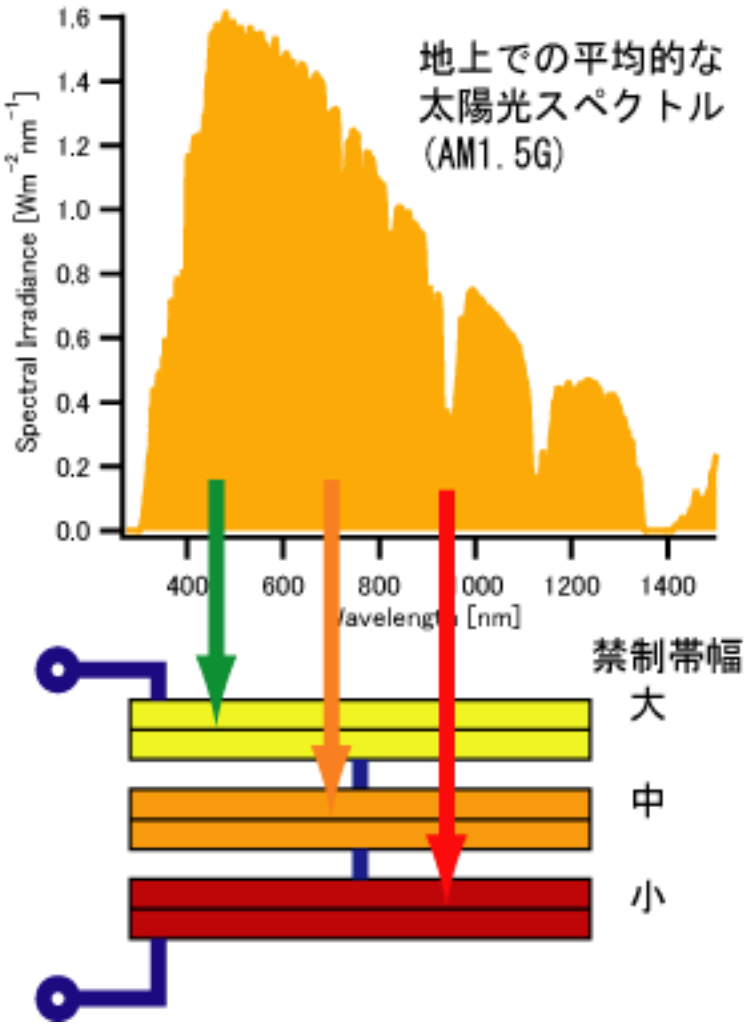
太陽光のスペクトル分布



太陽電池の感度

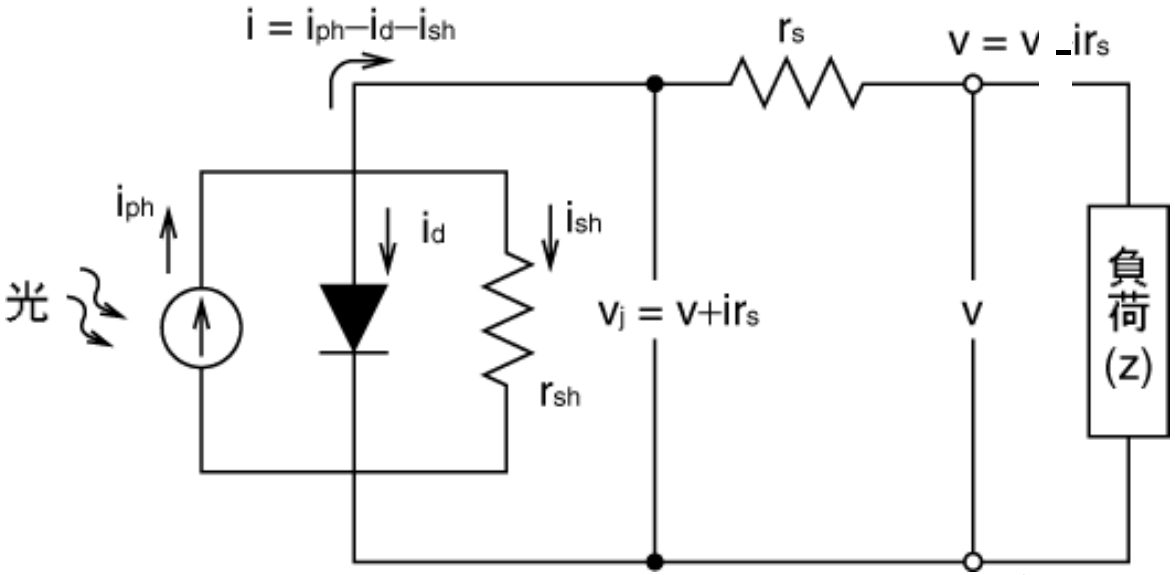
赤

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



太陽電池の等価回路

Iph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

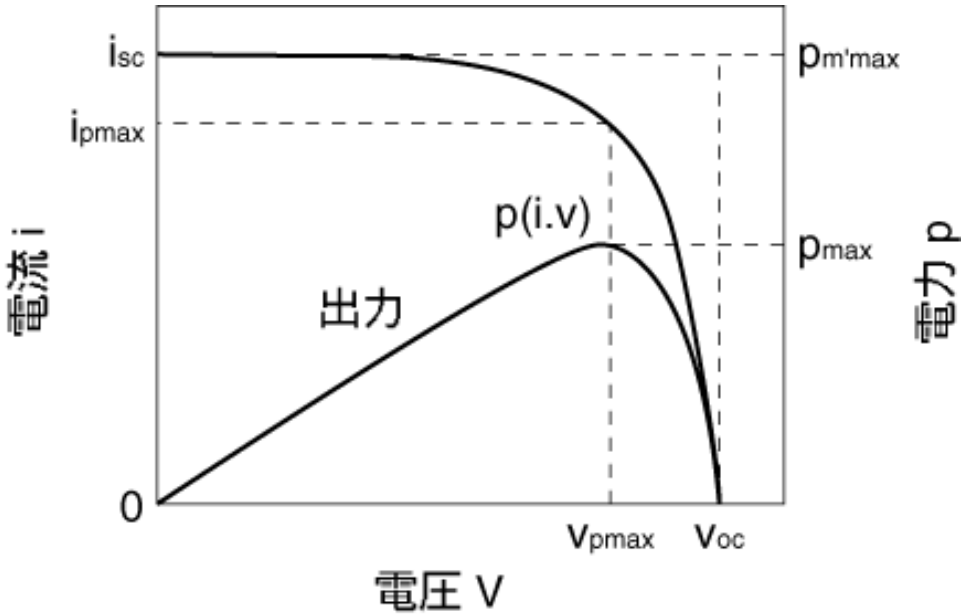
飽和電流io
ダイオード因子nd
ボルツマン定数k
接合部温度Tb
単位電荷q
接合部電圧vj
漏れ抵抗rsh

ダイオード電流id　$$i_d = i_o\left\{\exp\left(\frac{qv_j}{n_d k T_b}\right)-1\right\}$$

漏れ電流ish　$$i_{sh} = \frac{v_j}{r_{sh}}$$

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

Vmax≠Voc, Imax ≠ Isc

最大出力電力　$p_{\max} = v_{oc} i_{sc} FF$

曲線因子　$FF = \dfrac{p_{\max}}{v_{oc} i_{sc}}$

開放電圧Voc⇒i=0 ⇒ Voc=Vjoc

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

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

短絡電流Isc ⇒ v=vjsc-isc rs=0

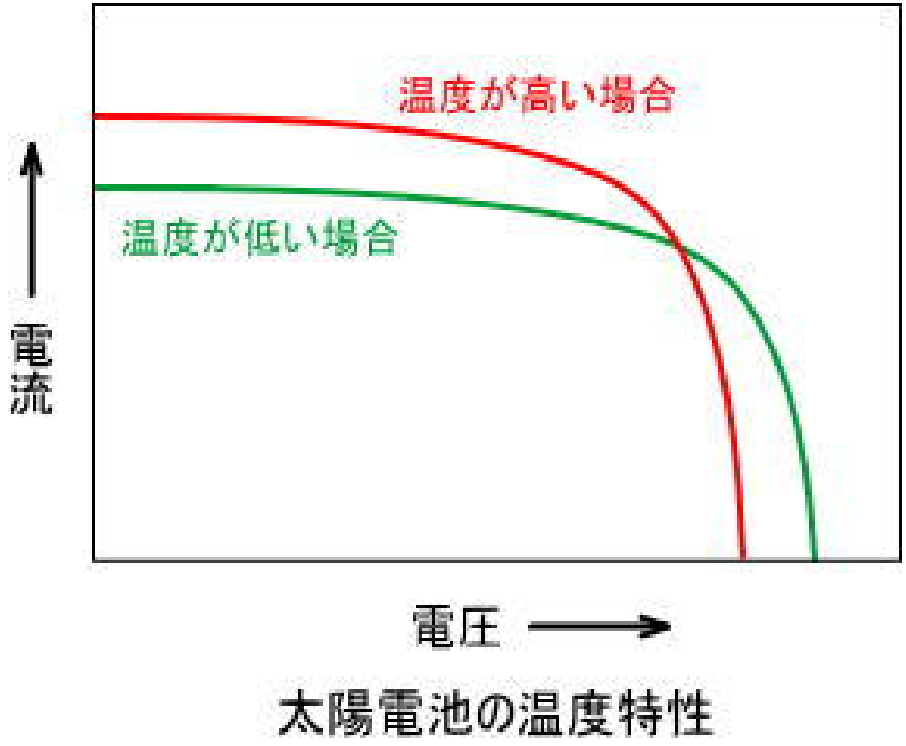
$$V_{jsc} = i_{shsc} r_{sh} \qquad i_{shsc} = \frac{r_s}{r_{sh}} i_{sc}$$

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

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

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℃温度が上昇すると約0.4%低下
  - 70℃において基準温度（25℃）に対して約2割の出力低下



太陽電池の温度特性

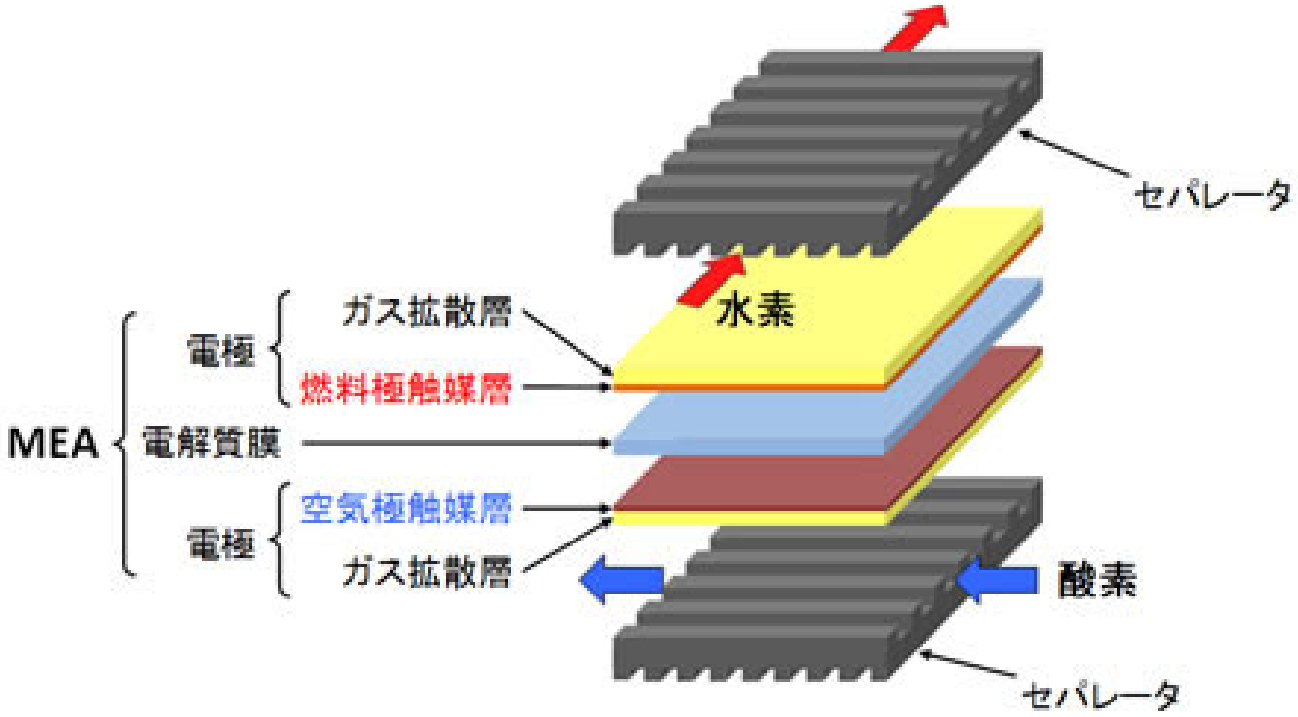
燃料電池

- 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)
  - 溶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)

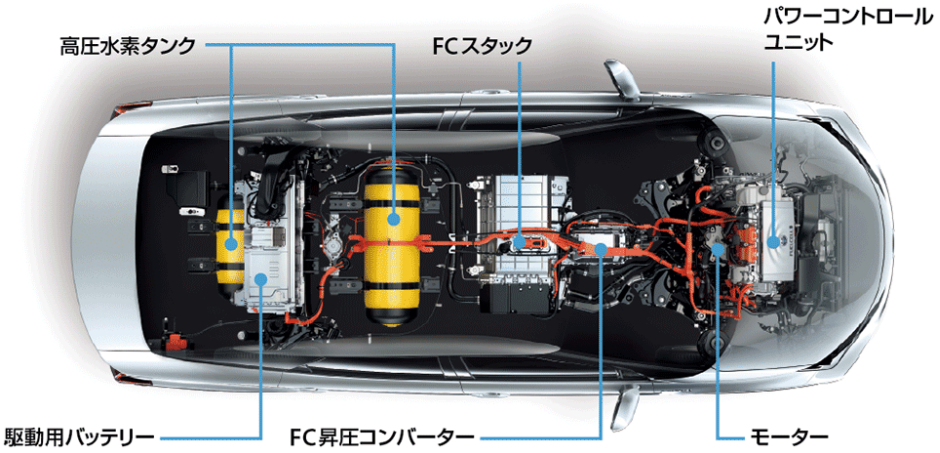
- 燃料極（負極）、固体高分子膜（電解質）、空気極（正極）を一体化した膜／電極接合体を、反応ガスの供給流路を形成するバイポーラプレートで挟んだ単セルを積層し，直列接続したセルスタックで発電
- 燃料極反応　$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$(プロトンと電子に分解)
- 空気極反応　$4H^+ + O_2 + 4e^- \rightarrow 2H_2O$(水を生成)
- 固体高分子膜　燃料極で生成したプロトンを空気極へ移動
- 水を使用するため0℃以下、または100℃以上での使用が困難
- 電極触媒(白金)使用 CO被毒
  - 改質器
    - 都市ガス
      - 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

固体高分子形燃料電池 (PEFC)



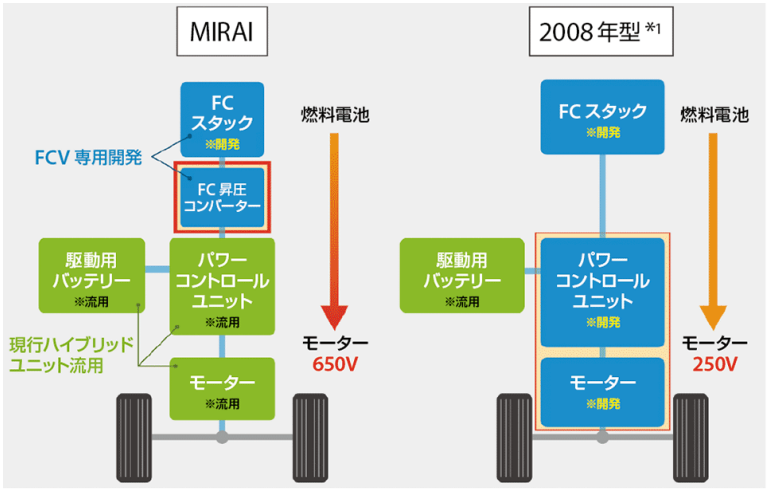
高分子電解質膜を燃料極および空気極（触媒層）で挟む
触媒層の外側には集電材として多孔質のガス拡散層
ガス拡散層の外側にはセパレータが配置
ガス拡散層は触媒層への水素や酸素の供給、空気極側で生成される水をセパレータへ排出、集電
セパレータの細かいミゾを水素や酸素が通り、電極に供給

固体高分子形燃料電池 (PEFC)

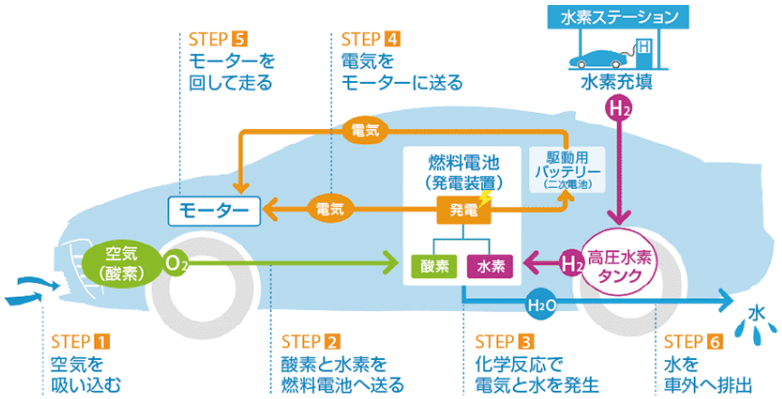


項目	内容
走行距離	650㎞（1充填で）
最高速度	175㎞/h
FCスタック（発電部）出力	・最高出力：114kW（155ps）※ ・体積出力密度：3.1kW/L＝114kW÷37L
昇圧コンバーター（水冷）	従来のFCスタックの電圧「DC250V」（2008年型）をDC/DCコンバーター（直流／直流変換器）で「DC650V」に昇圧
高圧タンク	・2本〔公称使用圧力：70MPa（約700気圧）〕 ・タンク内容積：122.4L（①前方：60.0L、②後方：62.4L）
水素貯蔵量	・約5kg（気体。水素充填時間：約3分）。 ・充填規格：日米欧共通規格（ISO/SAE）に対応
モーター	最高出力：113kW（154ps）
全長	4.89m（幅：1.815m、高：1.535m）
車両重量	1.85トン
乗車定員	4名
氷点下動力性能	−30℃

※：1kW＝1.36ps。ps:pferdestrake、仏馬力
ISO：International Organization for Standardization、国際標準化機構。電気技術分野の標準を除く、産業に関する国際標準の規格を策定している。本部はスイス・ジュネーブ。
SAE：Society of Automotive Engineers International、米国自動車技術者協会。米国における自動車関連や航空宇宙関連の標準規格の開発を行う非営利組織。



*1：2008年型：トヨタFCHV-adv



水素充填：水素ステーションから水素（H_2）をFCVの高圧水素タンク（約700気圧）に充填（約3分。重量：約5kg）
駆動用バッテリー：ニッケル水素（NiH_2）バッテリーを搭載。減速時に回収（発電）した電気を貯蔵しておき、加速時などに使用して、FCスタックをアシストする。蓄電容量は6.5Ah
パワーコントロールユニット：FCスタックの出力と駆動用バッテリーの放充電等の制御装置

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

アルカリ電解質形燃料電池(AFC)

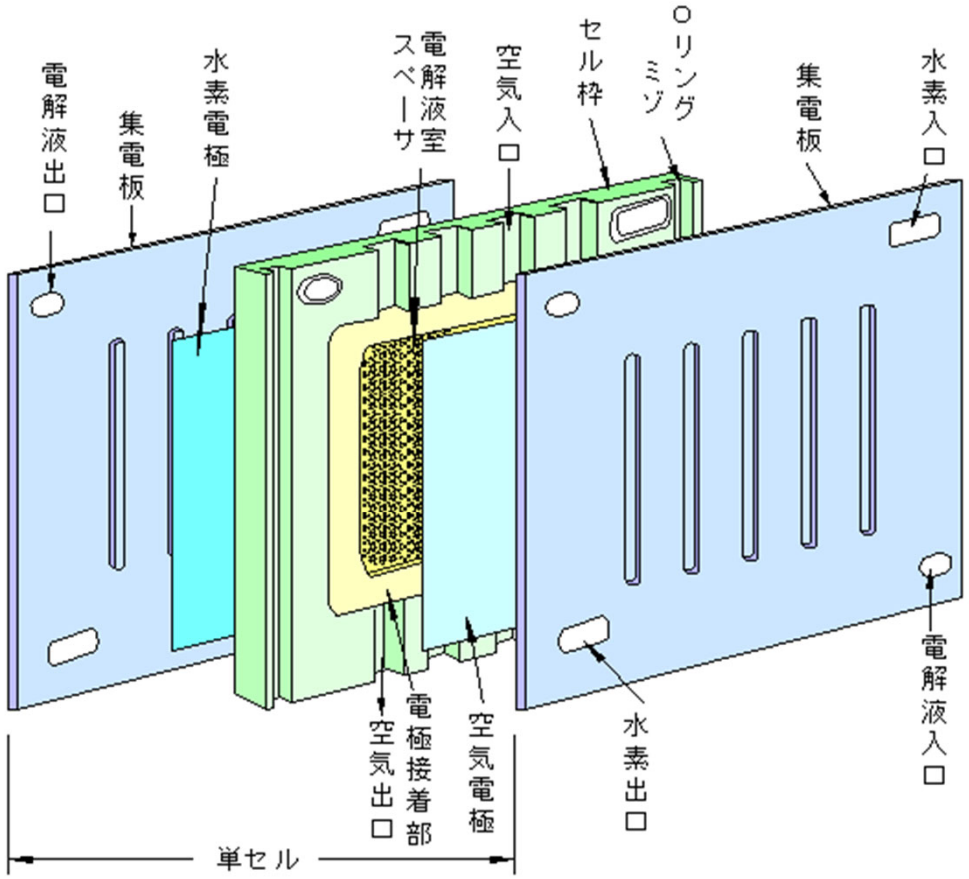


図3　アルカリ型燃料電池の電池セル構造

[出典]資源エネルギー庁(監):1999/2000年版 資源エネルギー年鑑、通算資料調査会(1999年1月)、p.681

AFCは水酸化カリウム(KOH)などのアルカリ電解質を使用
作動温度常温～150℃
発電効率40～50%
発電出力数kW～数百kW

アルカリ電解質形燃料電池(AFC)



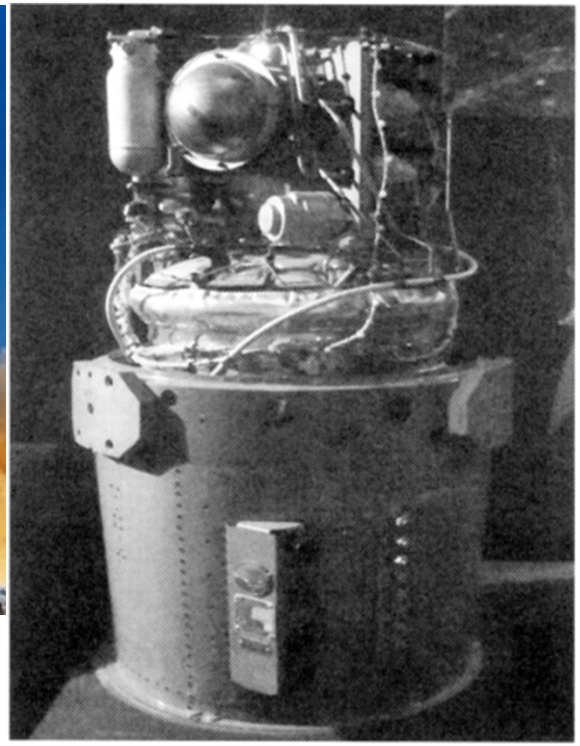


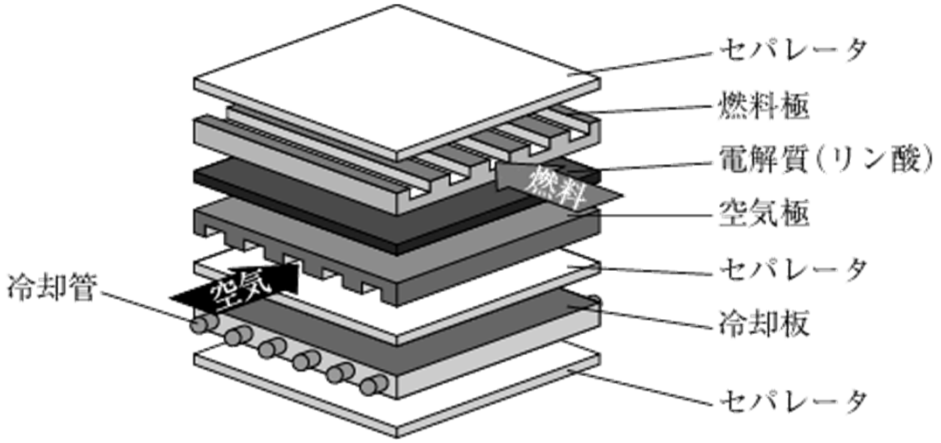
写真5.　アポロ用燃料電池(アルカリ形)

- アポロ宇宙船で使われた水素酸素燃料電池
  - 31セルスタックのユニットを3基搭載
  - 運転温度206℃
  - 出力27-31V,通常563-1420W,最大2300W
  - 直径 21.6cmの多孔質メタル電極間に高粘度の KOH水溶液を充填
  - 電極:アノード金属ニッケル,カソード酸化ニッケルに被覆された金属ニッケル
  - 直径 55.88cm,長さ 111.76cm円筒形、重量111.1kg
  - United Aircraft Corp. Pratt & Whitney Aircraft Division製

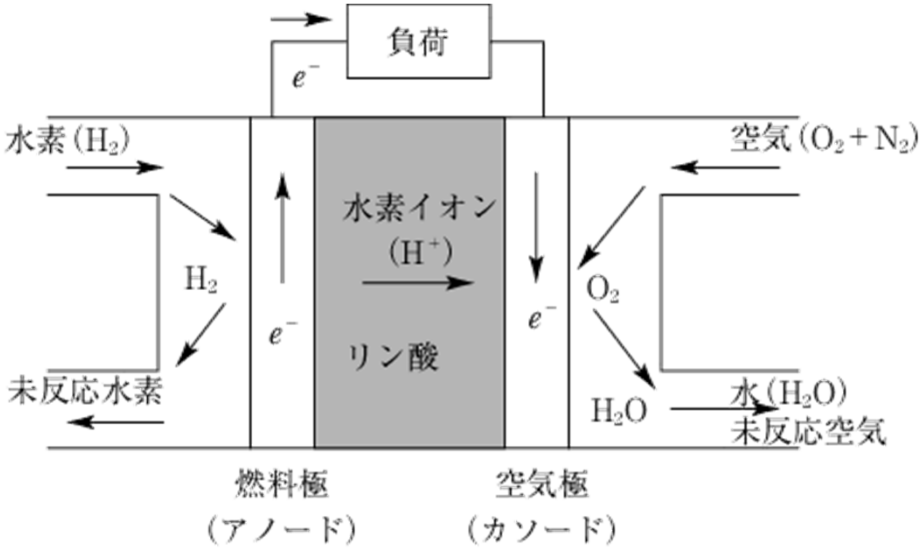
リン酸形燃料電池 (PAFC)

- 電解質　リン酸(H_3PO_4)水溶液
- 動作温度　200℃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）
- 寿命7.5年間（6万時間）
- 部分負荷でも定格負荷のときと同じ発電効率を保てる

リン酸形燃料電池 (PAFC)



第4図　リン酸形燃料電池の構造



第5図　リン酸形燃料電池の動作原理

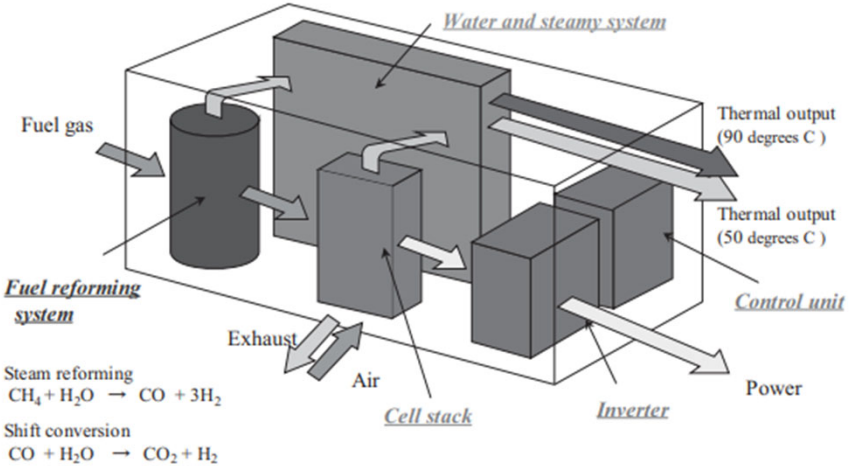


Fig.1 System configuration of PAFC

都市ガスや LP ガスを水素に改質する燃料改質器が必要

溶融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)

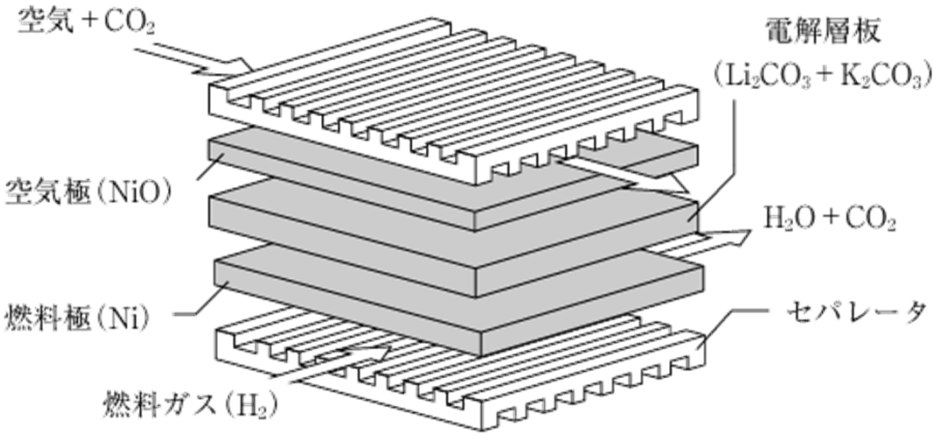
- 火力発電所の代替用途
- 白金触媒を用いない内部改質方式
  - 水素イオン(H+)の代わりに炭酸イオン(CO_3^{2-})を用いる
- 電解質　溶融炭酸塩（炭酸リチウム、炭酸カリウム）
- 燃料　水素，天然ガス，石炭ガス
- 動作温度　600℃～700℃程度
- 発電効率　約45%LHV
- 燃料極側排ガスの二酸化炭素濃度は80%程度
  - CO_2回収

溶融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)

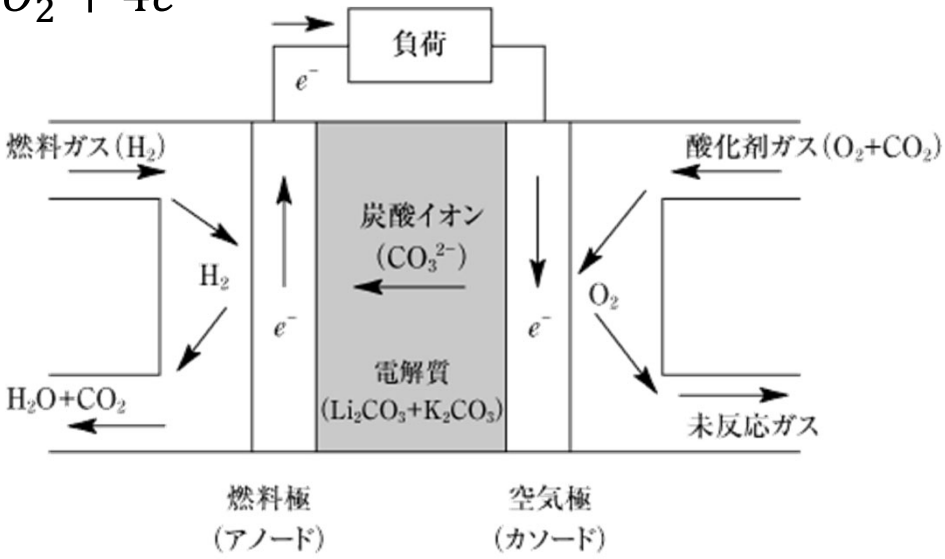
空気極　$2CO_2 + O_2 + 4e^- \rightarrow 2{CO_3}^{2-}$

燃料極　$2H_2 + 2{CO_3}^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^-$

全体　$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$



第7図　溶融炭酸塩形燃料電池の構成



第8図　溶融炭酸塩形燃料電池の動作原理

- 外部改質方式:燃料の改質反応を改質器で行ってから水素を電池に供給
- 内部改質方式:燃料の改質反応を電池の内部で行う
  - 改質反応に必要な熱を電池の発電に伴う発熱を直接に利用できる。
  - システムがコンパクトになる。
  - 改質によって熱が吸収されるので、電池冷却に必要な動力を低減できる。
  - 内部改質で副反応的に発生する一酸化炭素が白金を被毒するので、適用は高温形燃料電池に限定される改質触媒の位置によって直接方式と間接方式がある

溶融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)



高温ガス化システム

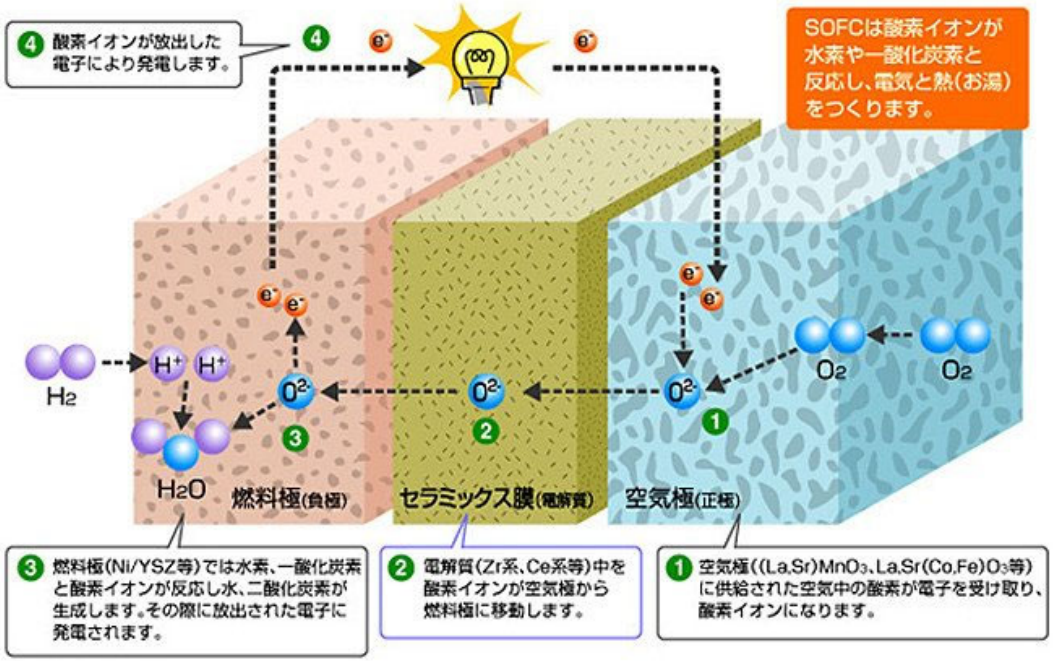


愛・地球薄　高温ガス化システム＋高温ガス化ガス利用燃料電池(MCFC)
高温ガス化炉
木質チップ＆廃プラスチック処理能力　　20kg/hr
生成ガス量　　70立方メートル/hr
溶融炭酸塩型燃料電池(MCFC)
発電出力 370kw
発電効率 55%
排熱回収率　　15%

固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

- 素子中に液体が存在せず全て固体で構成
- 動作温度は700～1000℃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(最も発電効率が良い)
- 改質器は不要

固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

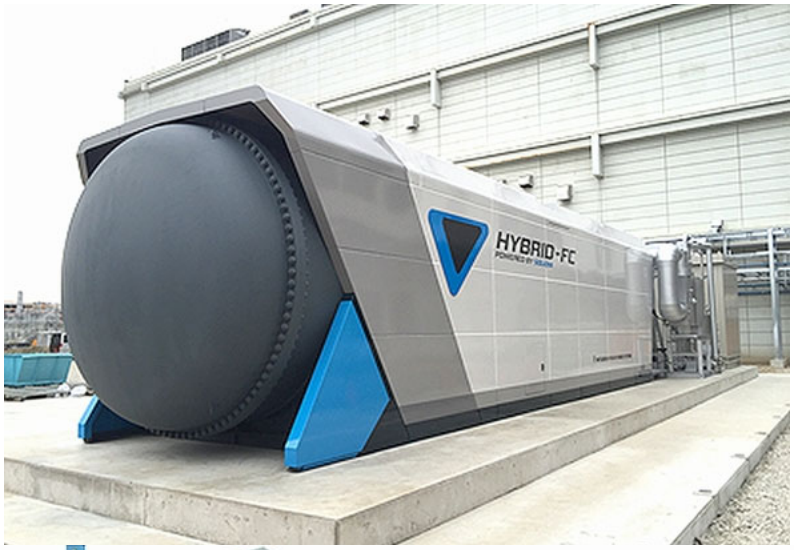


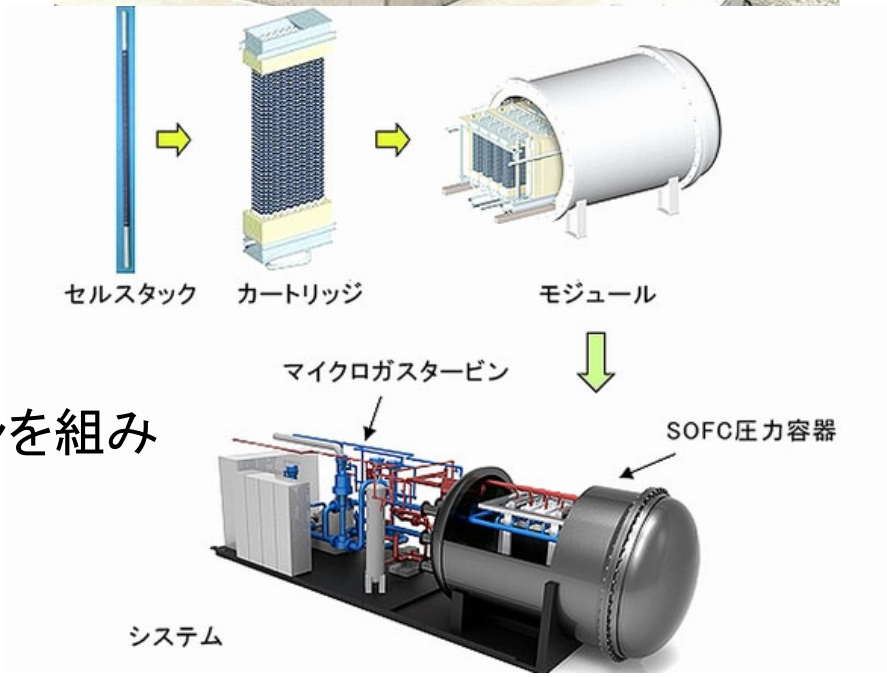
化学反応が高温で行われるため、白金などの高価な触媒が不要
一酸化炭素も燃料にできる
脱硫処理は必要(一酸化炭素の除去が不要で、燃料中に若干の未改質ガスを含む簡単な水蒸気改質処理)だが，都市ガスや天然ガスなどを装置内で改質しながら発電
排熱の温度が高いため、排気ガスから直接タービンなどで二次的に発電したり、コジェネーションシステムとして更に熱効率を上げることができる。

固体酸化物形燃料電池 (SOFC)



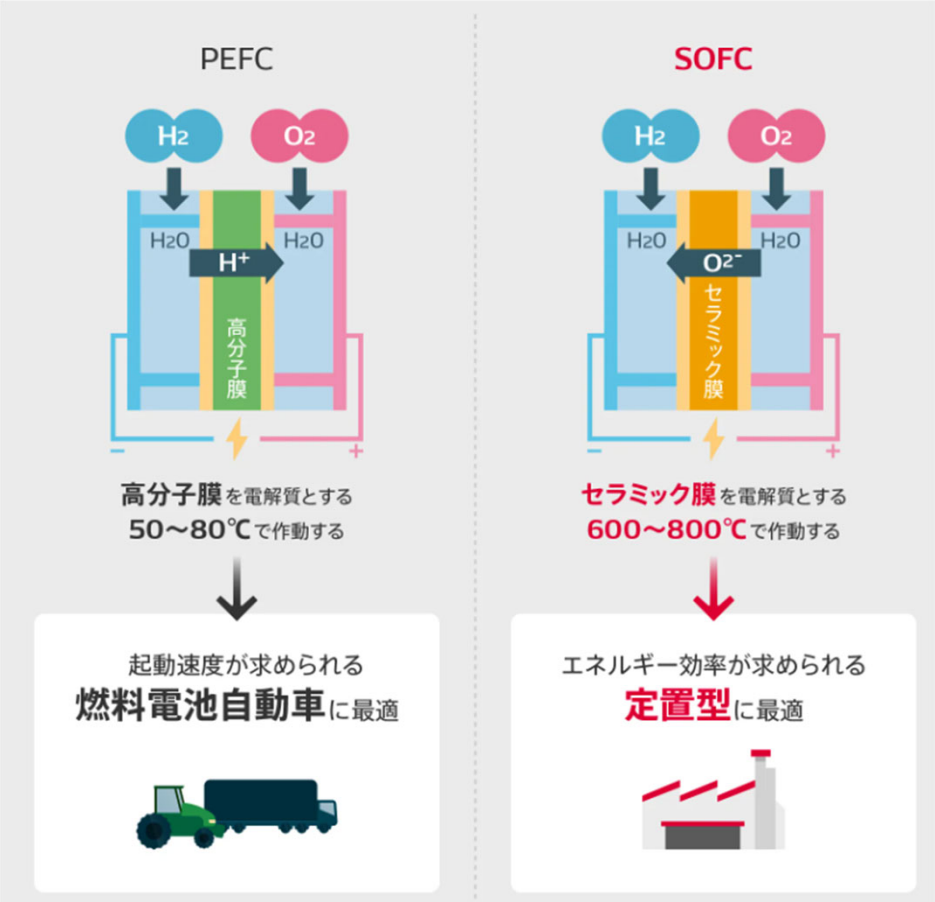
家庭用燃料電池システム

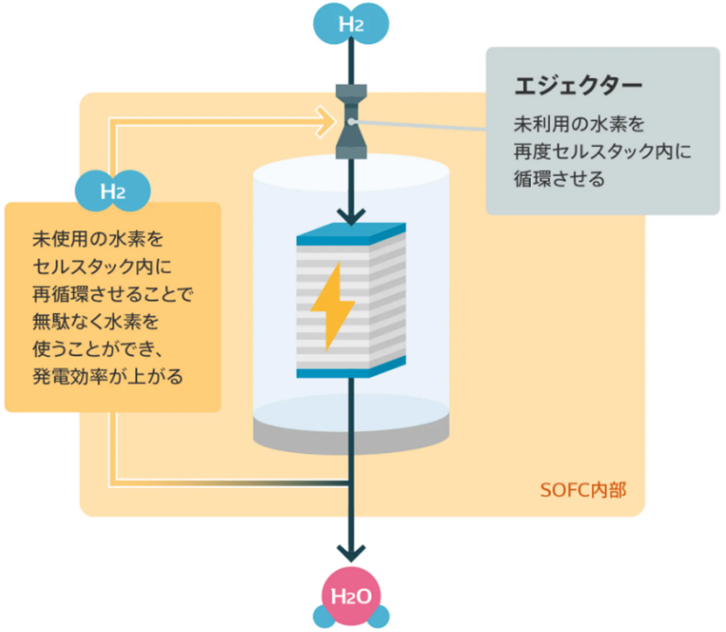


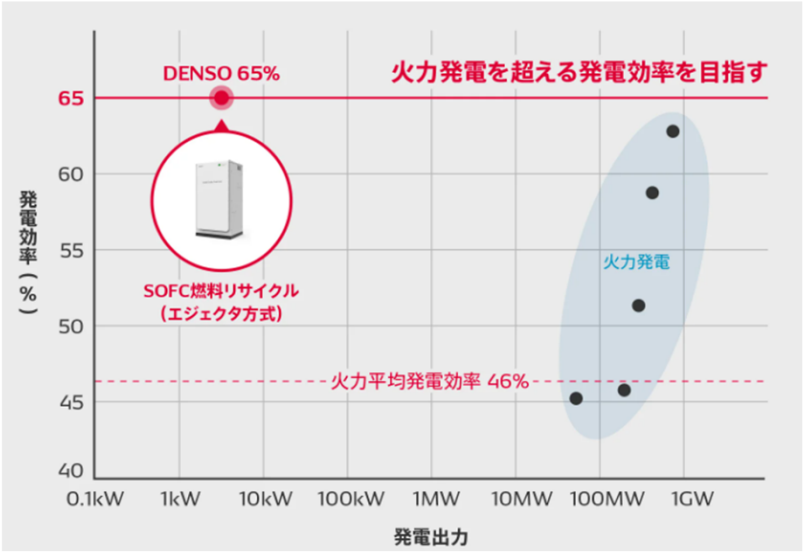


固体酸化物形燃料電池とガスタービンを組み合わせた複合発電システム

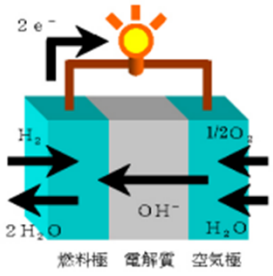
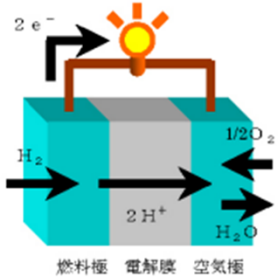
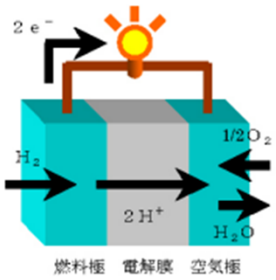
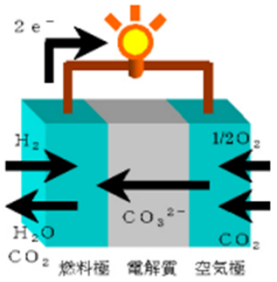
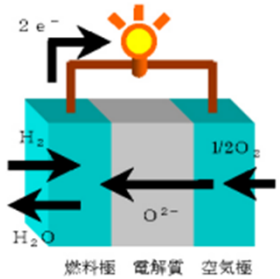
固体酸化物形燃料電池 (SOFC)







各種燃料電池の原理と特徴

種類		アルカリ形 (AFC)	固体高分子形 (PEFC)	りん酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
電解質		水酸化カリウム水溶液	陽イオン交換膜 (フッ素樹脂系)	リン酸	リチウム・カリウム炭酸塩 リチウム・ナトリウム炭酸塩	セラミック
媒体イオン		OH^-	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
作動温度		50～150℃	80～120℃	190～200℃	600～700℃	600～1000℃
使用可能燃料		純水素	都市ガス、LPガス、石油、メタノール、石炭ガス、純水素、等			
動作原理						
反応式	燃料極	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$CO_3^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$O_2^- + H_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$
	空気極	$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O_2^-$
	全体	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$
主な用途		・宇宙開発等特殊用途	・家庭用(小規模発電) ・携帯・可搬用 ・車載用	・産業・業務用 ・事業用(大規模発電) ・非常電源用	・産業・業務用 ・事業用(大規模発電) ・非常電源用	・家庭用(小規模発電) ・産業・業務用 ・可搬用 ・事業用(大規模発電)
発電効率	HHV	60%(純水素の場合)	30～40%	35～42%	40～60%	40～65%
	LHV	70%(純水素の場合)	33～44%	39～46%	44～66%	44～72%