

平成18年度 冬期総合科目  
「エネルギー問題・地球環境問題を考える」

10回目「水素エネルギー最前線」

12月22日(金)5限

鈴木晶大  
工学部システム創成学科E&Eコース  
工学系研究科原子力国際専攻  
工学系研究科原子力専攻

鈴木 晶大 助教授  
[原子力専攻](寺井・鈴木研究室)  
[http:// www.nuclear.jp/~yunen](http://www.nuclear.jp/~yunen)  
suzuki@nuclear.jp



1995.3 東京大学工学部システム量子工学科卒業  
1997.3 東京大学大学院工学系研究科修士課程(システム量子工学専攻)修了  
2000.3 東京大学大学院工学系研究科博士課程(システム量子工学専攻)修了  
2000.4 核融合科学研究所助手(炉工学研究センター)に採用  
2004.3 東京大学工学部助教授(原子力専攻)に昇任  
連絡先: 〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根2-22  
東京大学大学院工学系研究科付属原子力工学研究施設  
電話番号: 029-287-8455 FAX: 029-287-8458

研究内容 (各種高機能性材料)

- (1) 核融合炉ブランケットに関する研究  
液体金属冷却システムにおけるMHDコーティングに関する研究、熔融塩冷却システムにおける不純物移行制御、耐照射材料表面の不純物移行に関する研究、など。
- (2) 水素エネルギーシステムに関する研究  
水素吸蔵材の安定性に関する研究、電解質膜の機能向上研究、各種被覆材及び界面における水素移行現象、など。
- (3) 高機能コーティング作成手法の創成  
高エネルギー粒子による作成法研究、液体金属を媒介した化学蒸着法研究、など。

～ 革新的技術は特殊素材から。特殊素材の発見は想像力から。最先端の材料を最先端の設備で。～

「水素エネルギー」と聞いて何をイメージしますか？

化石燃料の枯渇 → 水素を使う。  
地球温暖化ガス → 放出ガスは水のみ  
水素エネルギー社会  
→ 持続可能な発展を可能にする。

水素エネルギーの技術開発項目のイメージは？

再生可能エネルギー  
燃料電池  
メタンハイドレード  
水素供給ステーション

何を可能とするために、どんな技術を開発すべきなのか。  
その技術を開発するために何がネックとなっているのか。

水素燃料の担う役割

1次エネルギーと2次エネルギー

1次エネルギー(エネルギーの元々の形態)

(原油、天然ガス、LPガス、石炭)、水力、原子力、風力等

☆水素ガスは天然資源として存在しない。

2次エネルギー(1次エネルギーを転換したエネルギー)

(ガソリン、灯油、重油、都市ガス)、電力、熱等

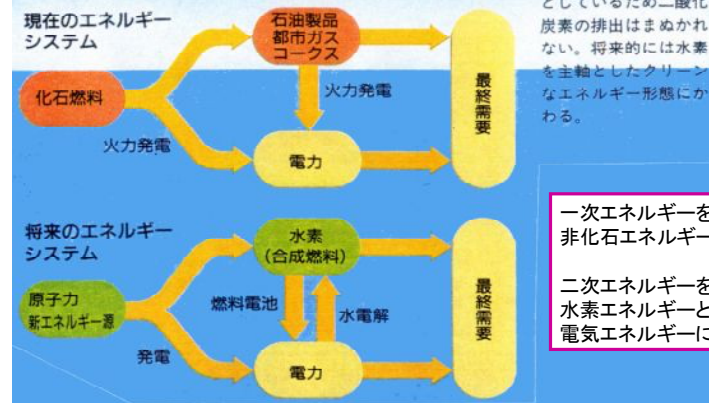
☆化石燃料に換えて、2次エネルギーで水素ガスが主力となる。

→ 容易かつ安全に輸送、貯蔵する必要。

### 水素製造について

水素は2次エネルギーであり、1次エネルギーによって作らなければならない。  
 (現在)化石燃料からの取り出し  
 (将来)各種1次エネルギーからの生産  
 (未来)再生可能エネルギーによる生産

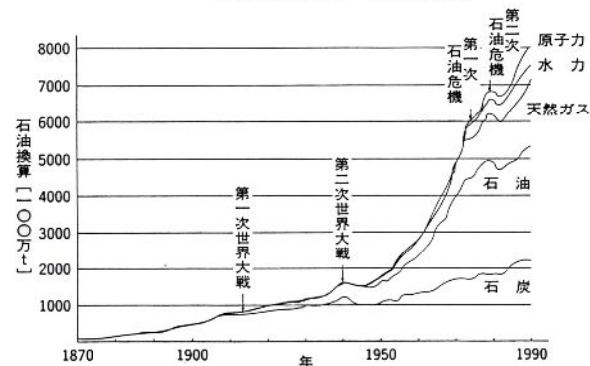
### 現在および将来のエネルギーシステム



### 水素エネルギーシステム

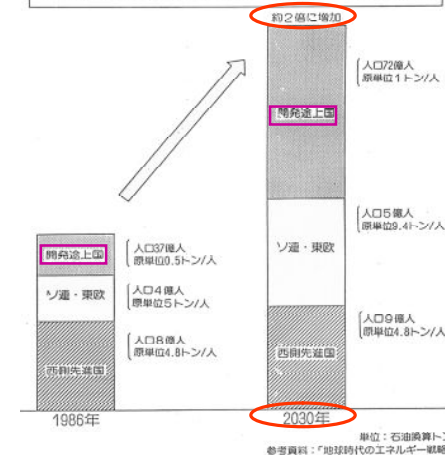
### 化石燃料の使用による問題点(1)資源の枯渇

世界のエネルギー消費の推移



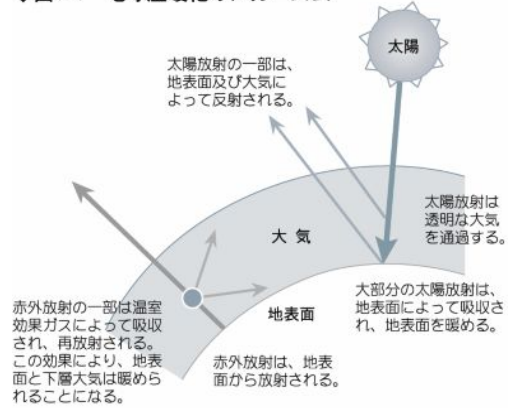
(出典) 国連エネルギー統計、BP統計等による

### 増大する世界のエネルギー消費量



## 化石燃料の使用による問題点(2)地球温暖化

◆図1-1 地球温暖化のメカニズム



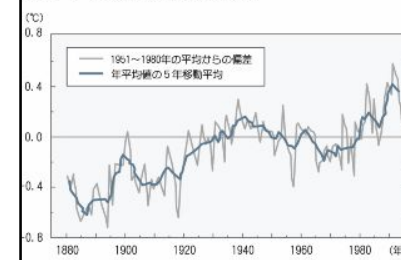
## 地球の温暖化の影響



## 温室効果ガス＝地球から放出される赤外線をよく吸収するガス ☆ 最強の温室効果ガスは水蒸気

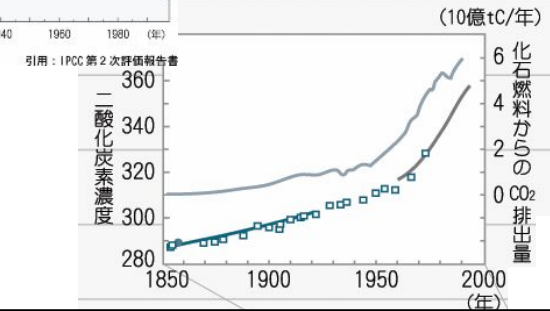
温室効果ガス	地球温暖化指数	性質	用途・排出源	
二酸化炭素 (CO2)	1	代表的な温室効果ガス	化石燃料の燃焼など	
メタン (CH4)	21	天然ガスの主成分で、常温で気体。よく燃える	燃料の漏洩、農業など	
一酸化二窒素 (N2O)	310	数ある窒素酸化物の中で最も安定した物質。他の窒素酸化物(例えば二酸化窒素)などのような害はない	燃料の燃焼など(特に自動車)	
オゾン層を破壊するフロン類	CFC、HCFC等 数千から1万程度	塩素などを含むオゾン層破壊物質で、同時に強力な温室効果ガス。モントリオール議定書で生産や消費を規制。	化石燃料の燃焼など	
オゾン層を破壊しないフロン類	HFC(ハイドロフルオロカーボン類)	数百から1万程度	塩素がなく、オゾン層を破壊しないフロン。強力な温室効果ガス	スプレー、エアコン、冷蔵庫などの冷媒、半導体洗浄など
	PFC(パーフルオロカーボン類)	数千から1万程度	水素もなく、炭素とフッ素だけからなるフロン。強力な温室効果ガス	半導体洗浄など
SF6(六フッ化硫黄)	23900	硫黄とフッ素だけからなるフロンのなかま。強力な温室効果ガス	半導体洗浄など	

◆図1-4 地球の平均気温の推移

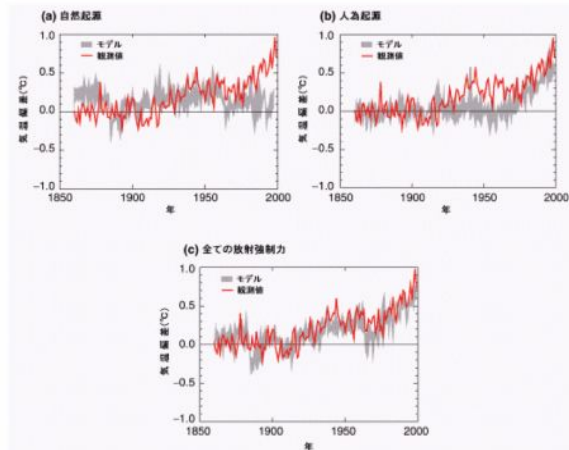


近年の急激な二酸化炭素の増加が地球の平均気温に影響しているか？  
人為的に増大しているのか？

太陽活動  
火山  
水蒸気量  
等の影響



## 過去の変動が再現できるか？



## 化石燃料の使用による問題点(3) 大気汚染

Air pollution in London kills ~4000 in a few days.



写真2-2 ロンドンのスモッグ公害事件(1952)

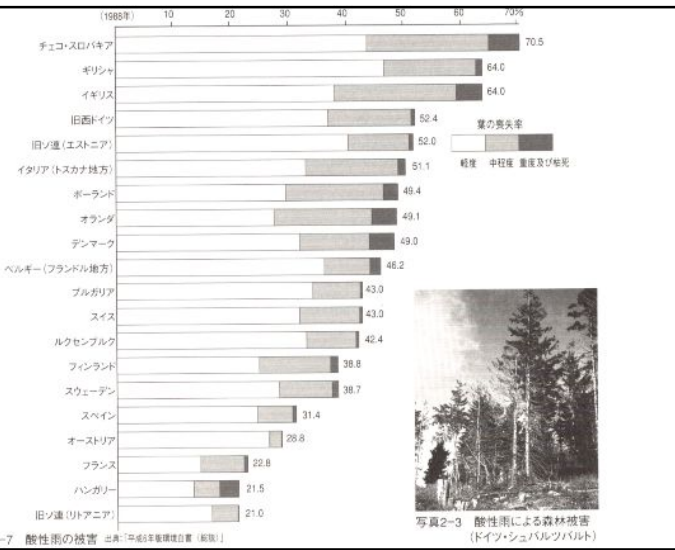


写真2-3 酸性雨による森林被害 (ドイツ・シュバルツバルト)

## 粒子状物質

一般的にはミクロン単位の固体や液体の粒のことをいう。社会的に問題視されるものはディーゼルエンジンの排気ガス起源の粒子状物質である。これらの粒径は、 $10\mu\text{m}$ 以下の細かい粒子が多く、大気中に長く浮遊することから、浮遊粒子状物質(SPM)と呼ばれ大気汚染の主要因とされる。浮遊粒子状物質は、人の気道や肺に沈着して健康を損ねる。このため、交通が集中する主要国道の周辺住民が相次いで国(道路管理者)に対して訴訟を起こしている。

**水素燃料の導入により何か改善されるのか。**

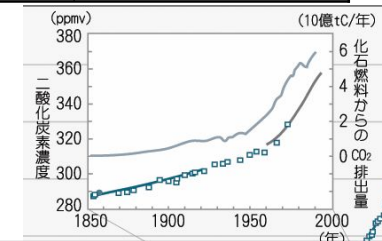
1次エネルギーとしての化石燃料の問題点  
 資源の枯渇(価格の高騰)  
 (→原子力/再生可能エネルギーへの転換)

2次エネルギーとしての化石燃料の問題点  
 大気汚染(NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、粒子上物質等)  
 →水素を最終エネルギーとして使用する事  
 により解決する。  
 CO<sub>2</sub>排出による地球温暖化  
 →H<sub>2</sub>O放出の地球環境影響は小さい

**H<sub>2</sub>O放出の地球環境へのインパクト**

	水素で代替する最終エネルギー	自然蒸発量に対する増加割合
日本	自動車用燃料	0.1%
	全エネルギー	0.6%
東京都区部	自動車用燃料	3.4%
	全エネルギー	11.8%

自然蒸発量に比べ、極めて小さい。ただし、大気圏水循環を精度良く把握する必要がある。



**なぜ水素なのか？**

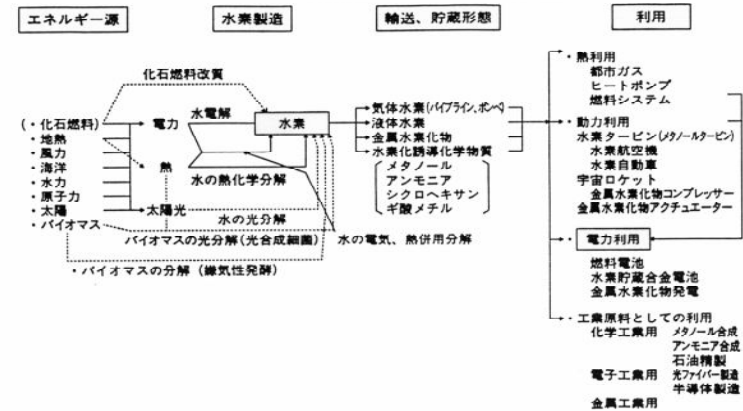
使用時に水しか発生しない。

水から生産でき、生成プロセスが単純、かつ不純物

混入が少ないと期待される。

現在高圧ボンベが必要→メタノール等もCO<sub>2</sub>発生が少ない燃料として考えられている。メタノール用燃料電池など

**水素エネルギーシステム**





### 水素エネルギー社会を実現するための開発項目

エネルギー源開発及び水素の効率的な製造  
メタン資源の開発、高速炉開発、新エネルギー源開発

水素の輸送、貯蔵  
高压容器開発、溶媒や水素吸蔵合金の開発など

水素の効率的な利用  
水素ガスタービン、燃料電池開発

### 水素エネルギー導入戦略

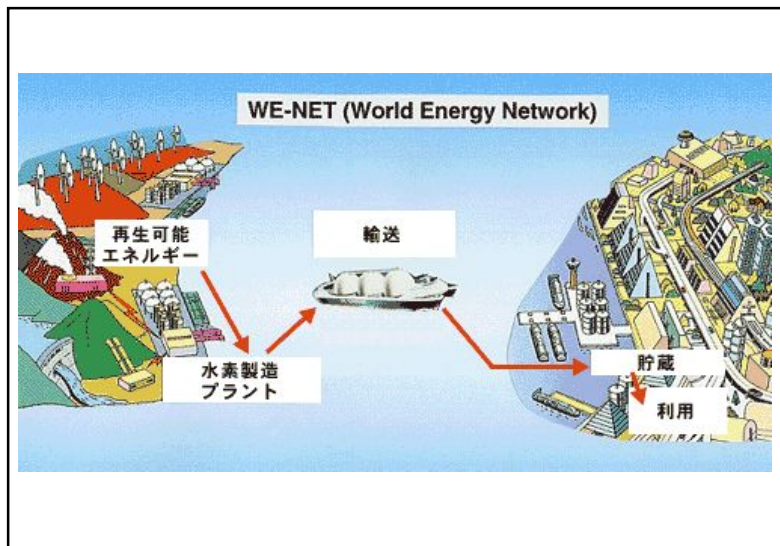
魅力的

理想的な水素エネルギー社会を実現するためには、  
再生可能エネルギーによる生産  
長距離輸送、効率的貯蔵  
高効率燃料電池

消費地における公害の低減(先進国側)  
(3)原油及びメタンの産出国での水素製造、  
(1)長距離輸送、効率的貯蔵、補給技術  
(2)水素ガスタービン、燃料電池の開発

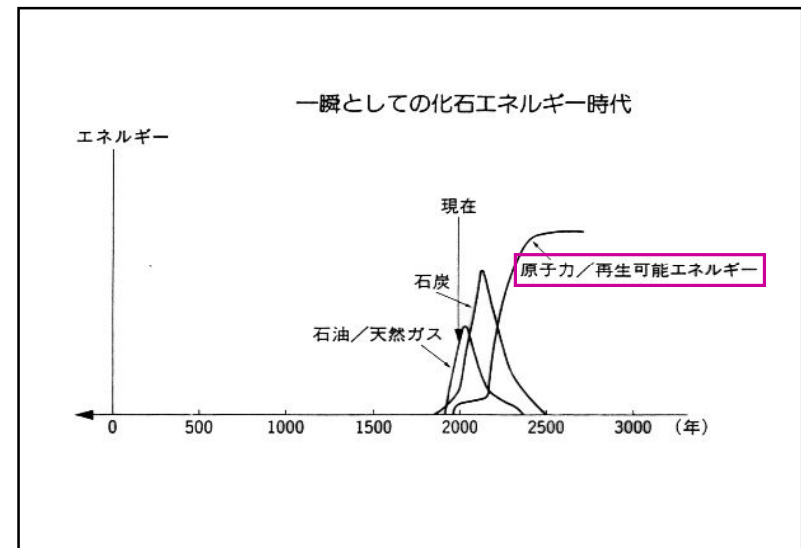
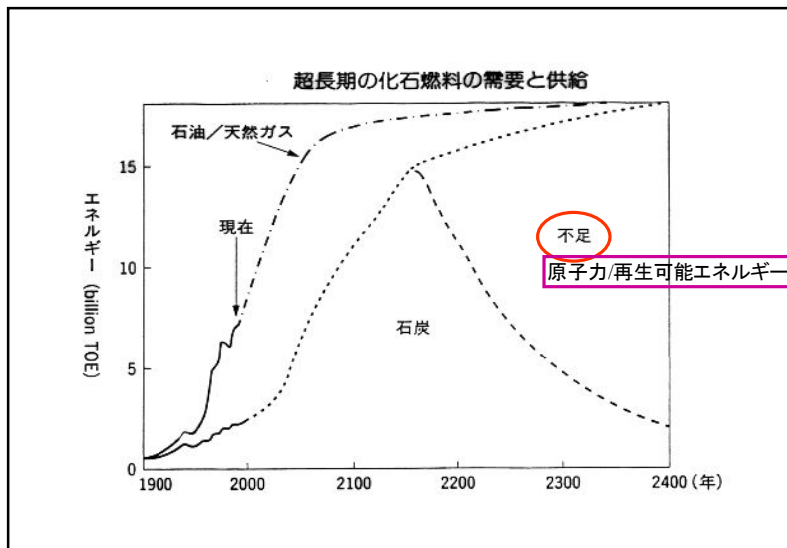
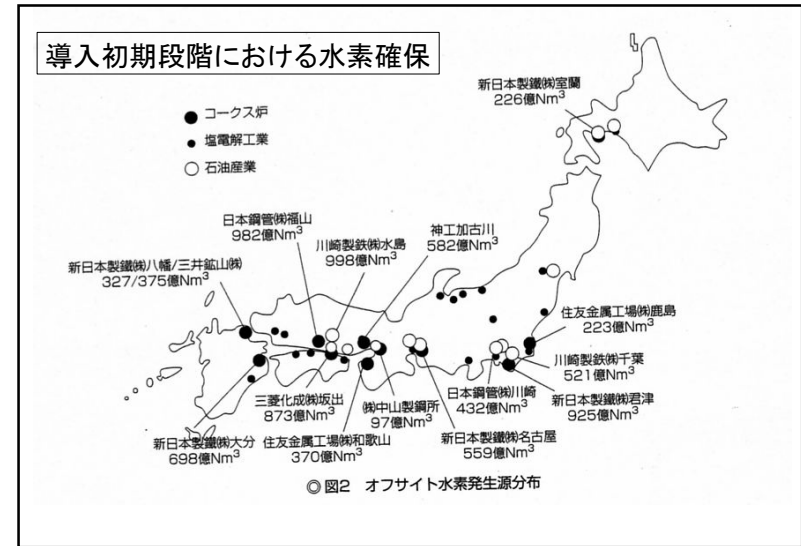
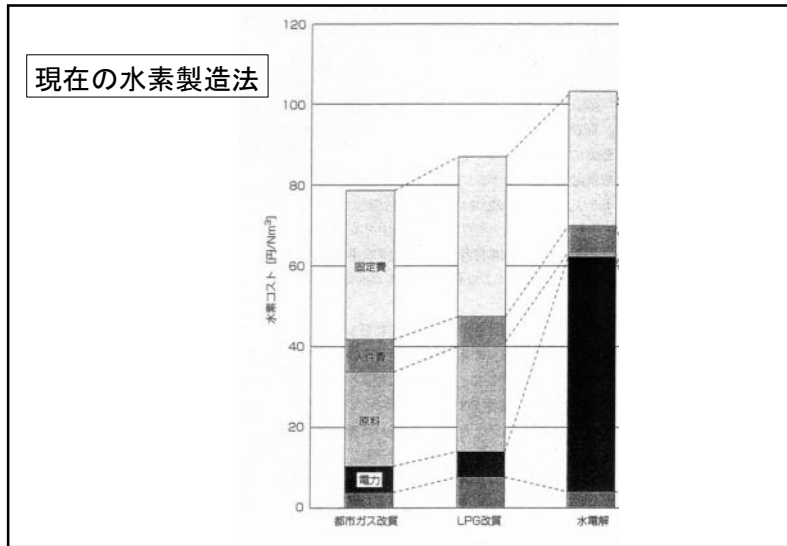
実現が容易

エネルギー源の確保と効率的な利用  
(1)メタンハイドレード開発、高温ガス炉開発  
(2)燃料電池開発  
(3)長距離輸送、効率的貯蔵技術



### 1次エネルギーからの水素製造法

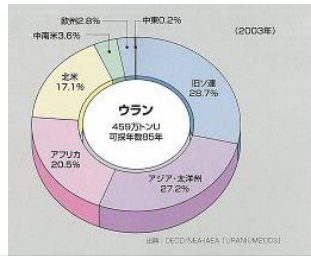
- (1)メタン、メタノール、LPGの改質  
$$\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$$
- (2)発生させた電力による水の電気分解  
→ 電力の貯蔵
- (3)高温熱源を利用した水の分解  
水の分解温度:約3600K  
さまざまな化学反応及び触媒を用いて  
低温でも分解を進行させる。



## エネルギー源開発

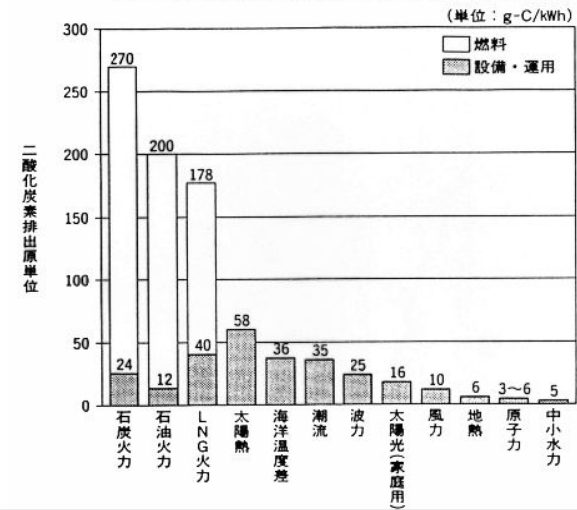
### 原子力発電:

二酸化炭素を発生せず、廃棄物量も極めて少量  
電気への変換効率が低いことから、  
高温熱源による直接水素製造が比較検討されている。



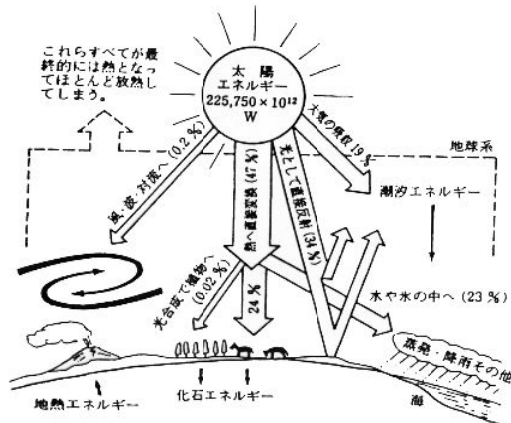
現在はウラン中に0.7%しか  
含まれていないウラン235の  
みを燃料としている。  
高速増殖炉の導入により、残  
りの99%以上のウラン238を  
プルトニウムに核変換して使  
用する事ができる。

## 日本の電源別二酸化炭素排出原単位の比較



## 再生可能エネルギー:太陽熱の入出力を使う。

地球規模で考えた太陽エネルギーの流れ



## さまざまな太陽エネルギーの利用

- 太陽電池
- 太陽熱発電
- △水力発電: 土地の水没、設置場所が限られる
- △風力発電: 設置場所が限られる
- ×バイオマス: 光合成(効率1%)により得られた炭水化物からアルコール合成(変換にエネルギーを要する)

太陽エネルギーの大規模利用システム実現の課題は技術の問題(エネルギーベイバックタイムの減少)と土地の問題である。

太陽エネルギーの資源量は見積りの仕方に強く依存する  
人類の全エネルギー使用量は10、単位すべて  $10^{12}$  ワット

	利用可能量	最大資源量	備 考
地球への到達		173,000	
大気圏入射量		120,000	
水	2	600*	* 空全面にビニールをかけたとき
風	1~3	230*	* 空気の全対流
太陽電池	420*		* 砂漠の半分利用
太陽熱発電	60*		* 極砂漠の半分利用
バイオマス	0.6*	30**	* 農地の10%の収穫を発電に ** 陸地の10%で直接燃焼

(出典) 環境資料より作成(たとえば、佐野ら『エネルギー・資源』1992年498ページ、など)。

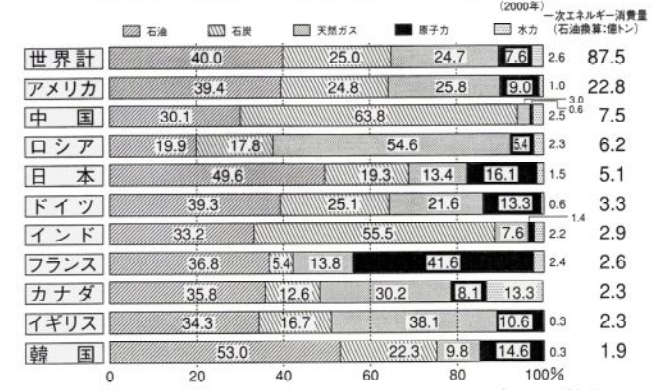


### 水力発電



安定供給、供給速度調整が可能。容量に限られる。  
高効率で電気に変換可能。

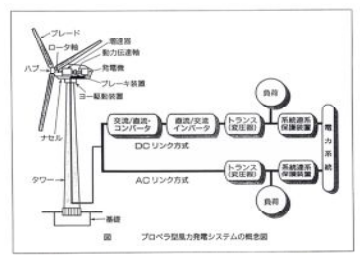
### 主要国の一次エネルギー構成



我が国には今後開発できる場所がほとんどない

### 風力発電

エネルギー密度が低く、間欠的ではあるものの、枯渇の恐れがなく、クリーンなエネルギーです。  
しかし、風力発電で、原子力発電所1基相当分(約100万kW)の電力を得るためには、竜飛ウィンドパークの風車が約3,700基、これを仮に海岸沿に直線に風車を並べると、長さは200km以上になります。わが国では、人口密度が高く、土地利用も高度に行われていることから、わずかも分散しながら設置して火力発電所などの燃料費を節約したり、離島などのエネルギーコストの高い地域における電源として期待されています。  
**安定供給ができず、水素による貯蔵が望まれる。電気を高効率に変換可能。**



風車の種類	特徴
水平軸型	構造が比較的簡単、効率が高く、大型化が容易、運送の工夫が容易、高負荷に強い
垂直軸型	構造が複雑、効率が高くない、風速が低い場所でも発電可能、水平軸型に比べて騒音が少ない、送電線も太くない、送電距離に強い

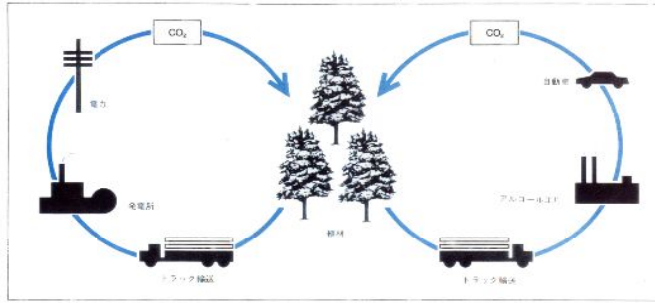


ウィンドファーム このカリフォルニア州の風車群は、1万3000基以上の風車が建設された。それらは、1985年の夏までに、石油と天然ガスの供給を補った。1982年以降、カリフォルニア州では、100万バレルに相当するエネルギーを生産した。

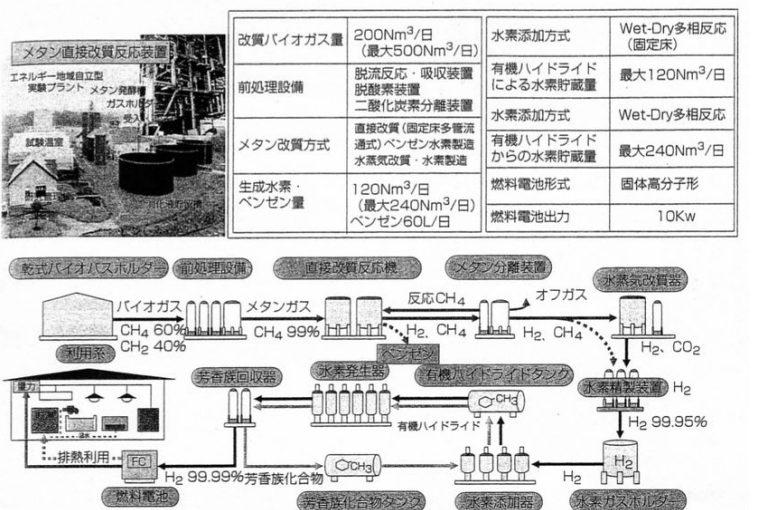
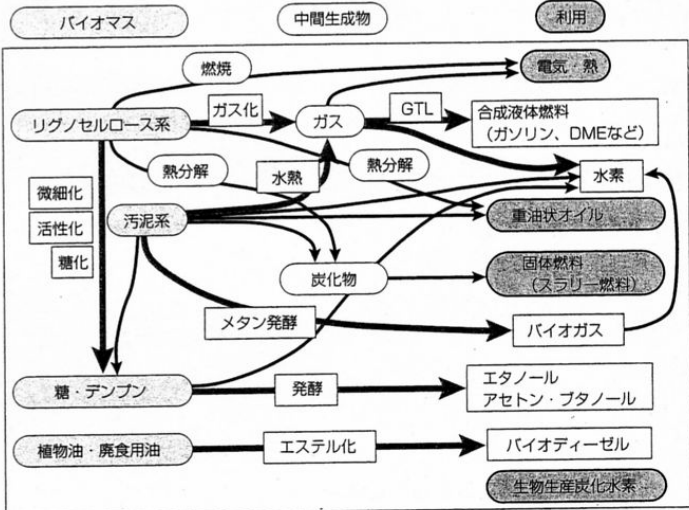
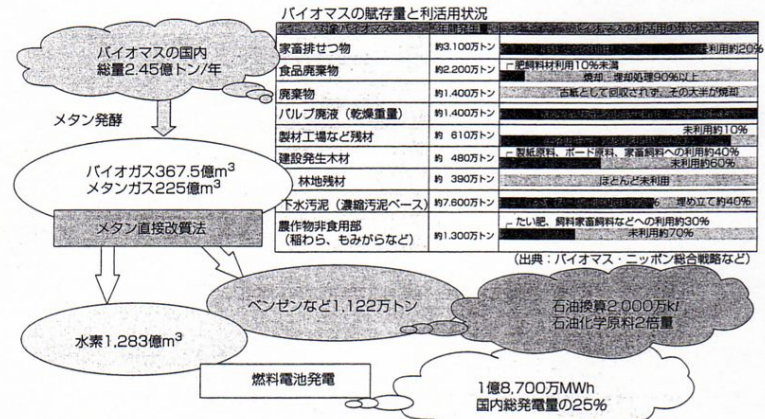




# バイオマス

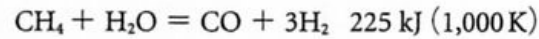
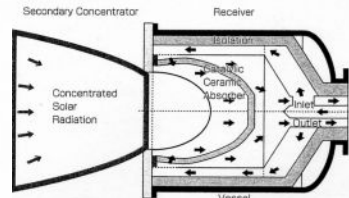
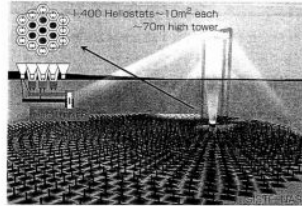


バイオマス 木材その他の植物性資源からアルコールと電力を生成することができる。燃やして二酸化炭素が出るが、バイオマスが継続的に育てられ全体量が減らなければ、排出される二酸化炭素量は完全に取り込まれると均衡する。つまり、上手に管理すれば地球温暖化を改善することはない。

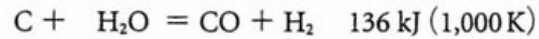


### 太陽光集光による高温を用いた水素製造

The Next Step... 10Mwe, 10 MW Solar, High Concentration Solar Power Station

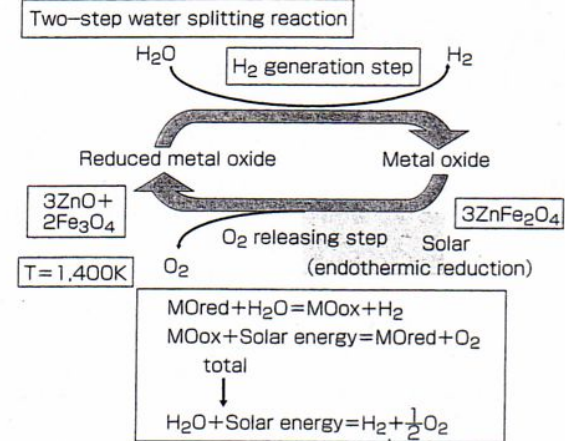


solar energy process (天然ガス)

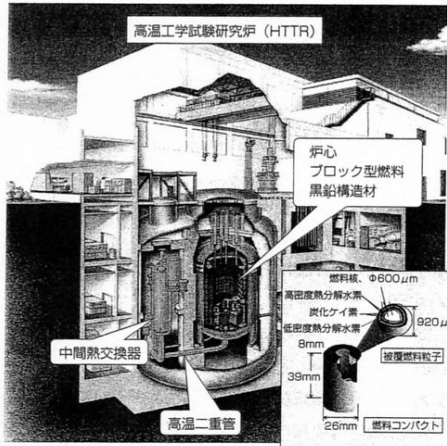


solar energy process (石炭)

### さらに高温では、触媒を用いて水を分解



### より温度の低い熱源: 高温ガス炉での直接製造

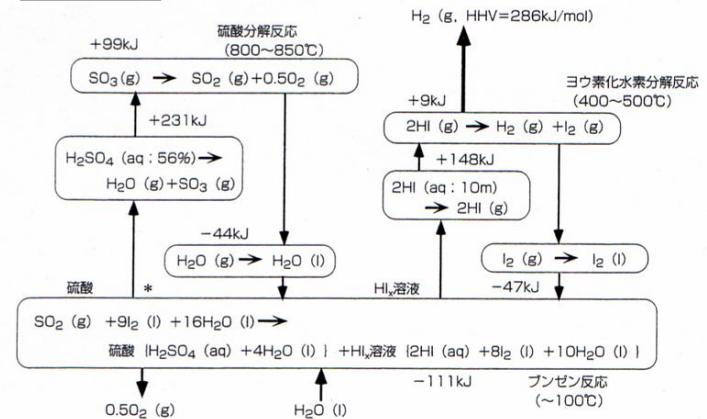


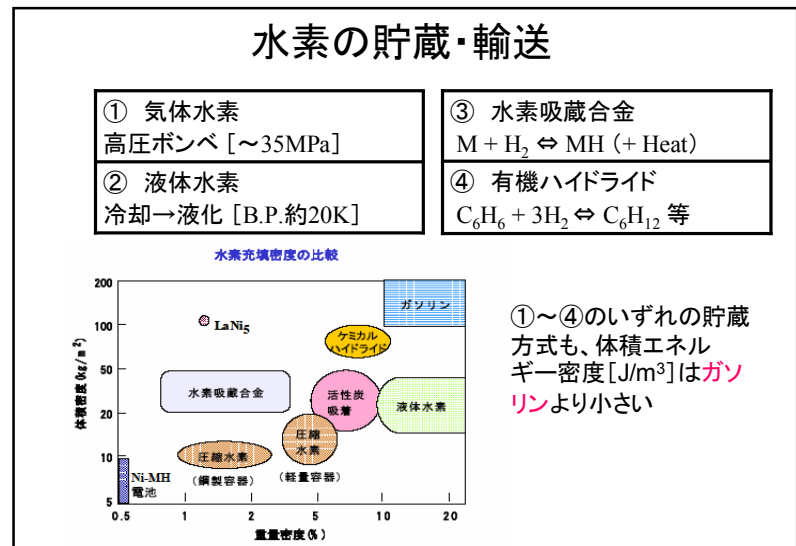
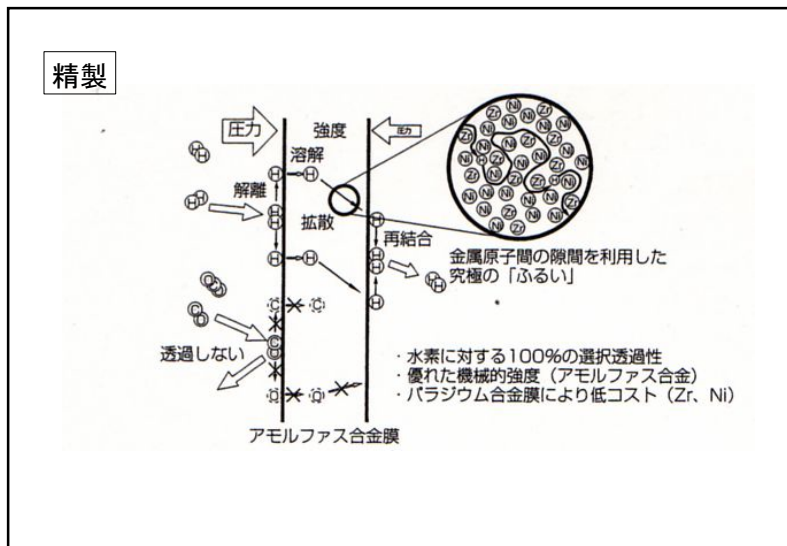
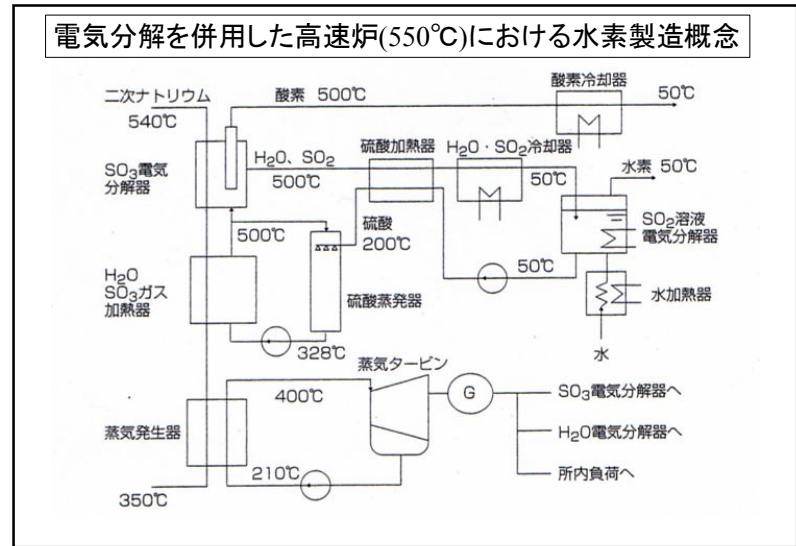
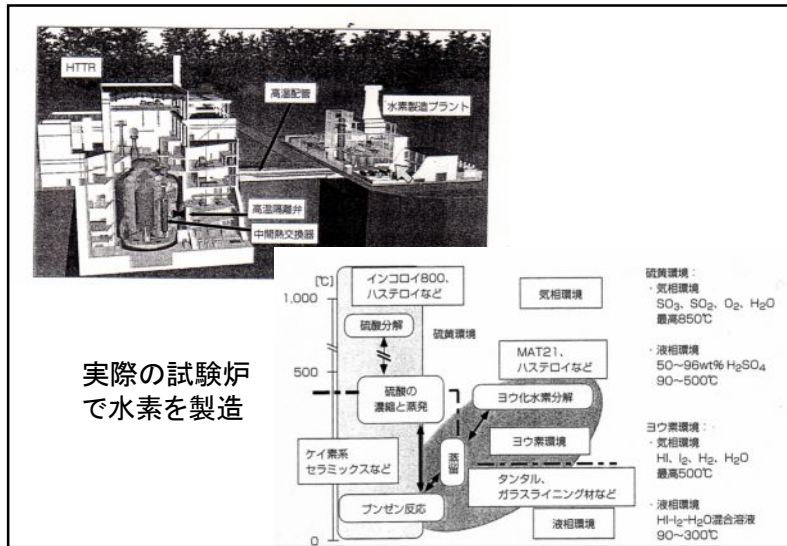
出力 30MW  
 燃料 被覆粒子  
 炉心構造材 ブロック型  
 冷却材 ヘリウムガス  
 入口温度 395℃  
 最高出口温度 950℃  
 圧力 40気圧

1998年 初臨界達成  
 2001年 30MW、950℃達成  
 2003年 安全性実証試験開始  
 2004年 950℃達成

軽水炉300℃  
 高速炉550℃

### ISプロセス







高圧タンクは現在350気圧程度が限界  
 → 750気圧程度で扱うための材料開発

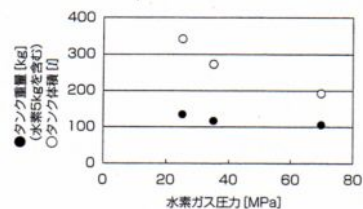


表1 高圧水素タンクの種類

型	構成する材料	単位内容積あたりの容器重量
Type1	鋼鉄	1.2~1.5kg/l
Type2	鋼鉄ライナの鋼部をガラス繊維で強化	0.7~1.4kg/l
Type3	金属製ライナの全体を炭素繊維で強化	0.3~0.4kg/l
Type4	プラスチック製ライナの全体をガラス/炭素繊維で強化	0.35~0.5kg/l

## 水素吸蔵合金

### [水素吸蔵合金の特徴]

高い体積密度での貯蔵  
 常温・大気圧付近の水素と反応し、貯蔵  
 $M + H_2 \rightarrow MH_x$



水素を吸蔵した合金

### [合金の種類を選ぶ際に重要なパラメータ]

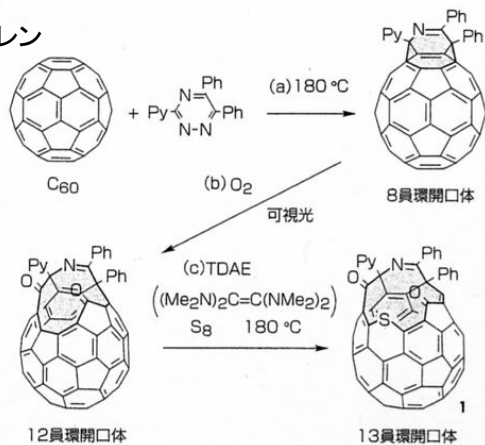
水素吸蔵量 [wt%]  
 吸蔵・放出速度  
 コスト、耐久性 etc.

### [主な水素吸蔵合金]

- Mg系 → 軽量で吸蔵量が大きく、安価
- 希土類系(LaNi<sub>2</sub>など) → 初期活性化が容易、吸蔵・放出速度が速い etc.

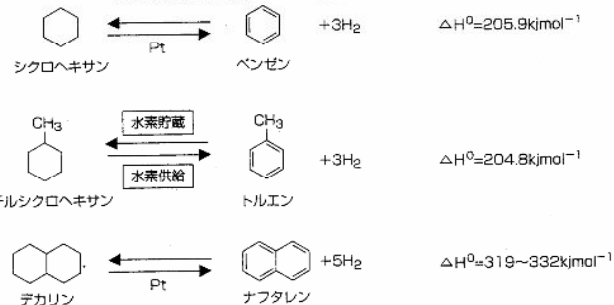
## カーボン材料(カーボンナノチューブ、フラーレン)

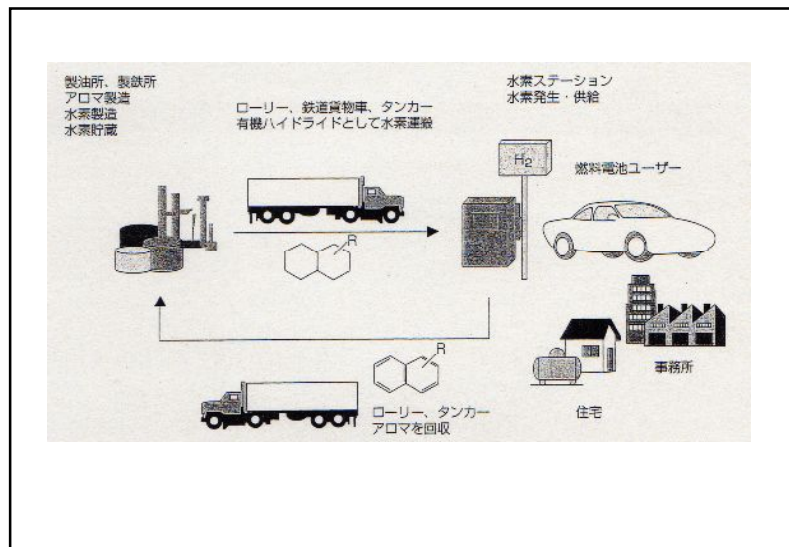
### 開口フラーレン



## ケミカルハイドライド

- 水素化、脱水素化反応が容易に進行する。(温和な反応)
- 反応複製物がない。(リサイクル可能)
- 水素含有量が多い。エネルギー消費が少ない。(高エネルギー密度)
- 既存の貯蔵、運搬インフラを利用できる。(普及性、少ない施設投資)





## 現在の水素ステーション

今現在、導入が進められている容易な方法

### 燃料電池自動車の構造

(JHFCプロジェクトホームページより)

### ・水素ステーションの種類

水素源	シェア	選択利用
アルカリ水電解式	42% (米国、カナダ、EUに多い)	<ul style="list-style-type: none"> <li>商用電力と太陽/風力との連携利用。</li> <li>電料料金が安い。</li> <li>実績豊富、運転が容易、設備が安価。</li> <li>配電網が広く整備され設置が容易。</li> </ul>
液体水素輸送	30% (米国に多い)	<ul style="list-style-type: none"> <li>近くに液体水素工場がある。</li> <li>液体と圧縮水素車の両方に充満可能。</li> </ul>
圧縮水電解式	15%	<ul style="list-style-type: none"> <li>近くに製水工場または石油精製工場がある。</li> </ul>
天然ガス改質	11%	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料電池と連携運転をする。</li> <li>都市ガスインフラを利用する。</li> </ul>

## 水素の利用

- 燃料電池

種類	略称	電解質	作動温度
固体高分子型	PEFC	高分子イオン交換膜	室温～150℃
リン酸型	PAFC	リン酸H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	150～220℃
熔融炭酸塩型	MCFC	熔融炭酸リチウム・カリウム	600～700℃
固体酸化物型	SOFC	安定化ジルコニアZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	900～1000℃

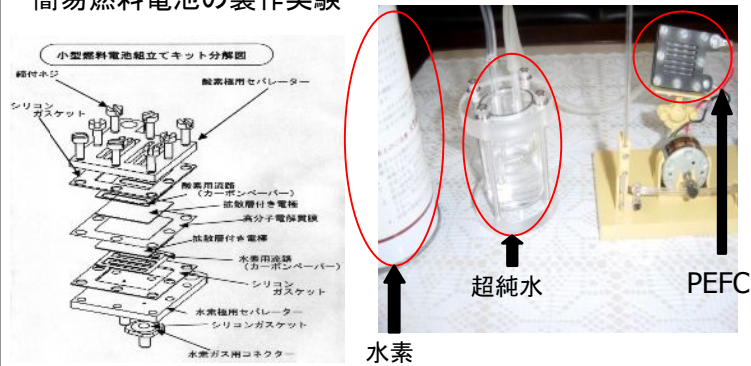
- 水素エンジン(水素の燃焼→動力)
- 水素を用いた二次電池(ニッケル水素電池)
- MHヒートポンプ(MHに圧力差→熱交換)
- MHアクチュエータ(MHに熱→動力)

## 固体高分子型燃料電池の原理

$$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \xrightarrow{\text{燃料電池による発電}} \text{H}_2\text{O}$$

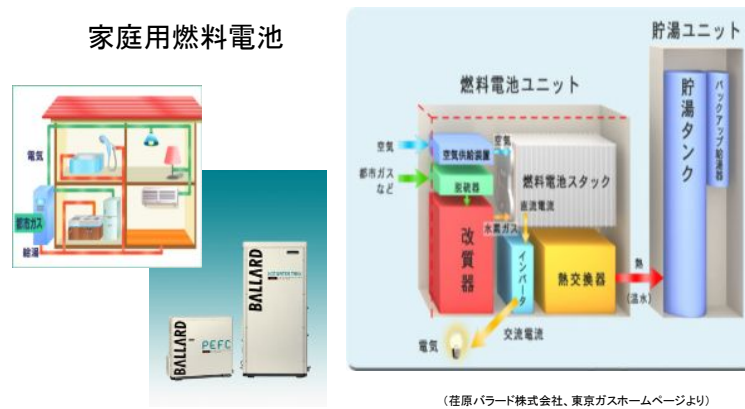
## 固体高分子型燃料電池(1)

### 簡易燃料電池の製作実験

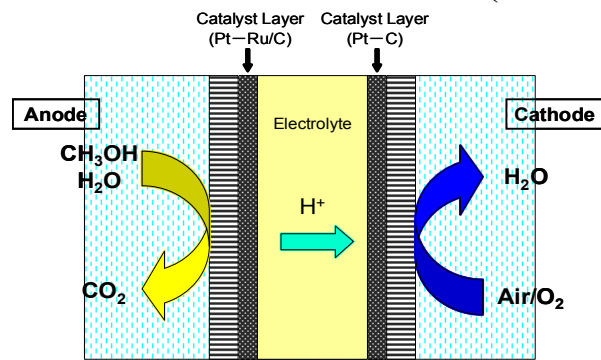


## 固体高分子型燃料電池(2)

### 家庭用燃料電池

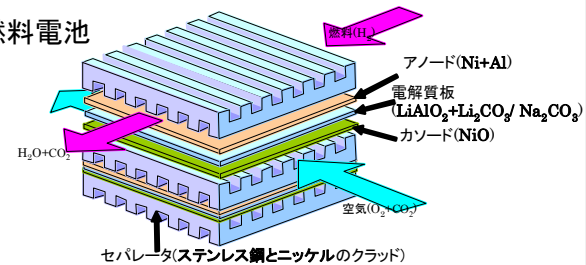


## 直接メタノール型燃料電池(DMFC)



PC、携帯電話などモバイル用途

## 熔融炭酸塩形燃料電池



部品 (コンポーネント)	材料	備考
アノード	ニッケルアルミ合金	アルミは酸化物となってアノードの多孔質構造を支えている。
電解質板	リチウムアルミネート (LiAlO <sub>2</sub> ) に炭酸リチウムと炭酸ナトリウムの混合物を含ませたもの。	電解質には、(Li <sub>0.52</sub> Na <sub>0.48</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> で表される組成の炭酸塩を用いている。
カソード	酸化ニッケル (NiO)	Liイオンが侵入することで導電性が高まる。
セパレータ	カソード側：ステンレス鋼 (SUS316S, SUS316L等) アノード側：ニッケル	2種の金属板を貼り合わせて用いている。

## エネルギー効率

### 高級エネルギー

(原理的に損失無しで他のエネルギーへ変換可能)

力学的エネルギー  
化学エネルギー  
電気エネルギー  
など

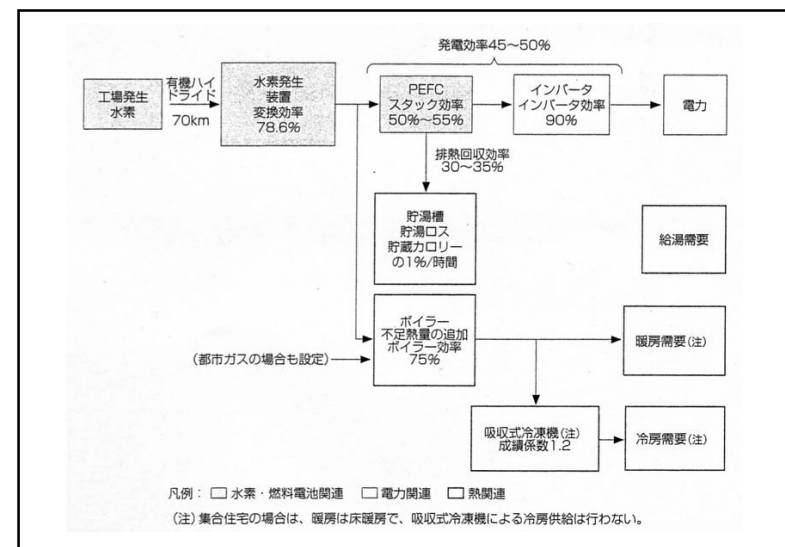
### 低級エネルギー

(原理的に損失無しで他のエネルギーへは変換不可能)

熱

熱効率: 熱エネルギーの何%を他のエネルギーへ変換可能か

実際にはさまざまな要因により損失が発生する。



水素エネルギーの「製造」、「貯蔵・輸送」、「利用」のそれぞれの候補技術の中から1つずつ選び、それらを開発する意義及び開発上の課題について説明せよ。また、それらを組み合わせた水素エネルギーシステムの特徴を述べよ。