

環境調和材料工学概論

第3回 水素エネルギーと サプライチェーン技術

Hydrogen Energy and Technology of Hydrogen Supply Chain

希土類材料研究センター

亀川 厚則

Atsunori Kamegawa



環境調和材料工学概論

講義計画（亀川担当分）

1. エネルギー概論
 - ・一次エネルギー、二次エネルギー
 - ・国内外で顕在化するエネルギー問題
 - ・カーボンニュートラル
2. 再生可能エネルギー、機能性材料、
環境調和材料工学に対する社会的要求、水素エネルギー
3. 水素エネルギーとサプライチェーン技術
4. 環境調和材料①：水素吸蔵合金
5. 環境調和材料②：磁石材料
環境調和材料③：誘電体材料
6. 環境調和材料④：未利用熱エネルギー活用材料
エネルギーハーベスティング

環境調和材料工学概論

講義の内容に関する質問

亀川 (kamegawa@mmm.muroran-it.ac.jp)

講義の実施やmoodleなどについての質問

馬渡 (mawatari@mmm.muroran-it.ac.jp)

亀川担当分の成績評価について

第5回講義内 (7/16) で、
レポート課題、提出方法など
を告知します。

水素エネルギー社会



Youtube ID: k9Wbg7YT1nQ

一次エネルギー、二次エネルギー

一次エネルギー (primary energy)

石炭や石油、天然ガス、水力など、自然にあるままの形状で得られるエネルギー

枯渇性エネルギー (non-renewable energy)

- ・化石燃料 (fossil fuels) : 石炭、石油、天然ガス
- ・原子力 : ウラン

再生可能エネルギー (renewable energy)

- ・太陽エネルギー、太陽熱
- ・水力
- ・バイオマス
- ・潮汐力
- ・地熱 など

二次エネルギー (secondary energy)

電気や都市ガスなどのように使いやすく加工されたエネルギー

ex) 電気、都市ガス、熱供給、石油製品、水素

水素エネルギー

再生可能エネルギー

→ 1次エネルギー

「枯渇しない」

「どこにでも存在する」

「CO₂を排出しない(増加させない)」



太陽光

風力

水力

バイオマス

地熱

水素エネルギー

電力と互換性を持ち、再生可能エネルギーを有効活用

水素エネルギー技術の普及・展開への期待

再生可能エネルギーの輸送・貯蔵問題

再生可能エネルギー発電地と大消費地は離れている。

輸送問題 → 送電ロスや送電システムの制約があり、電力の大量・長距離輸送は難しい。

再生可能エネルギーは、ほぼ定常的に発電する。

貯蔵問題 → 電力は消費の平滑化するのは難しく、貯蔵するのは難しい。

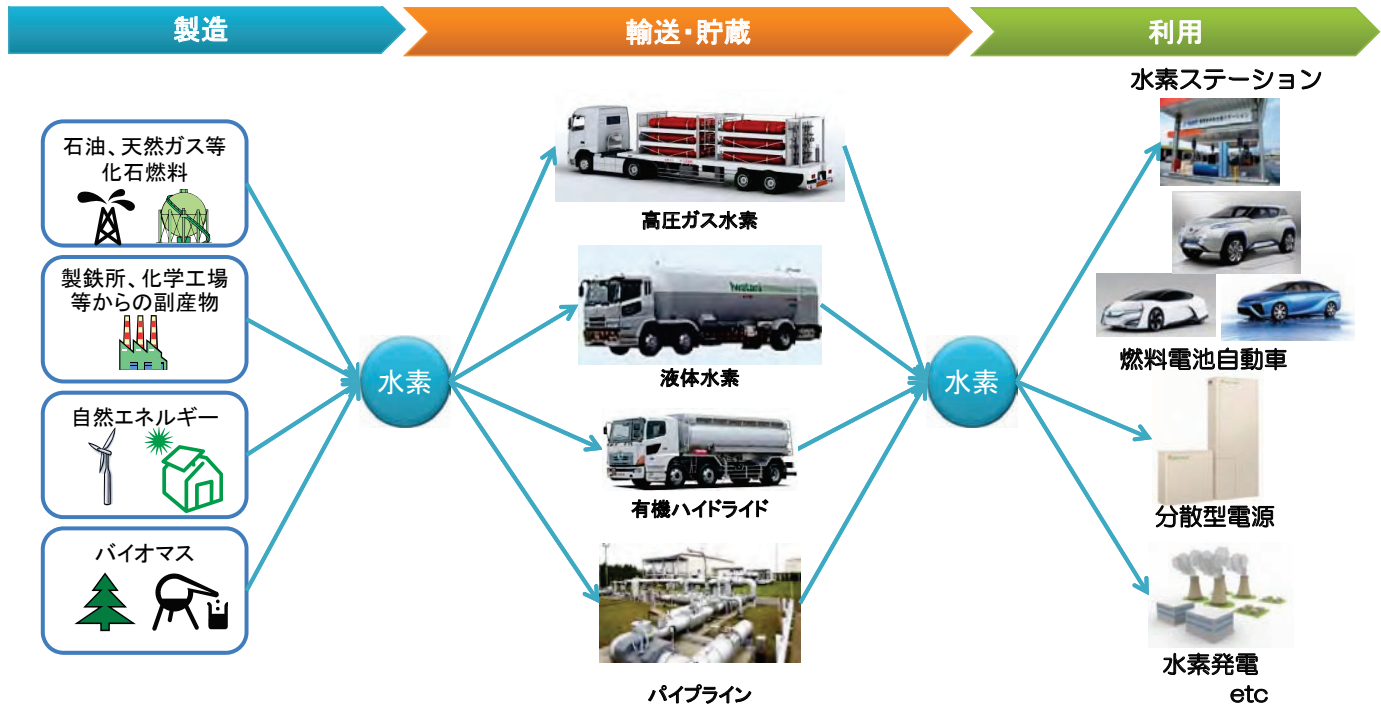
再生可能エネルギーで得た電力を

- ◆ 大量に持ち運びでき、
- ◆ 長期間保存しても目減りしない状態に保存できないか？



再生可能エネルギーを水素で、輸送・貯蔵

水素の製造、輸送・貯蔵、利用



水素サプライチェーン

水素社会導入のために

水素を安全に、

つくる、

ためる、

つかう

技術^を確立・普及することが重要

水素社会導入のために

水素を安全に、

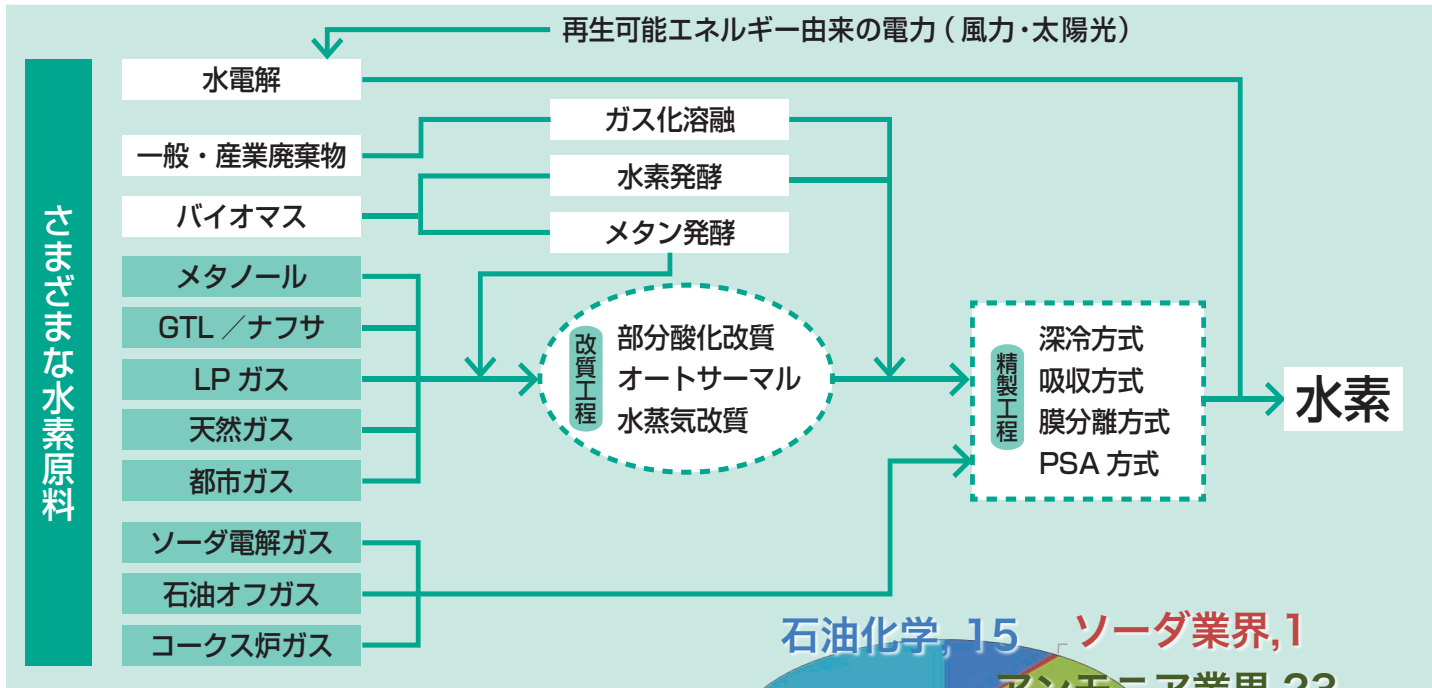
つくる、

ためる、

つかう

技術を確立・普及することが重要

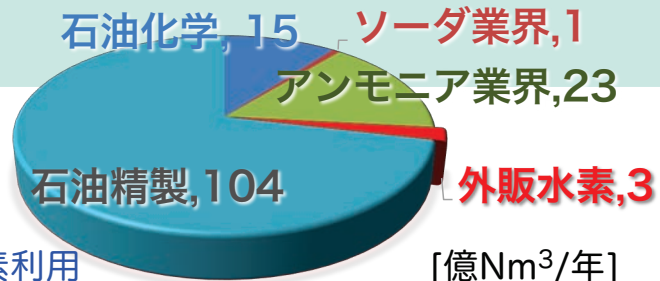
水素の製造方法



日本の生産量：約170億Nm³

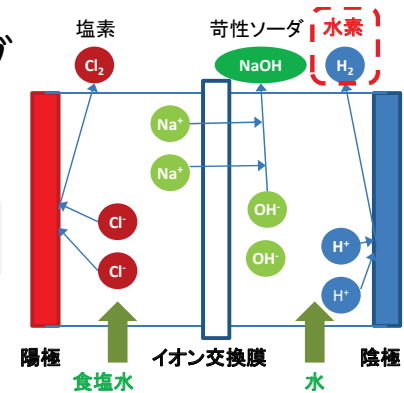
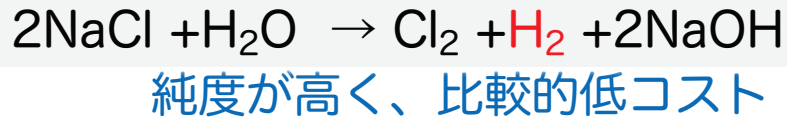
→ 99%が自家消費、1%が外販水素

国内における工業用水素利用



水素の製造方法：副生水素

苛性ソーダ：食塩電解により苛性ソーダを1ton製造する際に、副生物として水素280Nm³発生。



石油精製・石油化学：石油精製の過程では、副生水素が発生するものの、全て脱硫等に用い、水素が不足するため追加投入される。外部に供給する水素を水素製造装置で製造する過程でCO₂が余分に発生。石油化学では、副生水素は燃料としても使用されている

鉄鋼プロセス：鉄鋼の製造プロセスのうち、コークス精製炉において水素を50%以上のガスが発生。

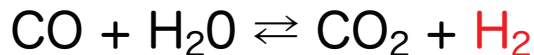
純度が引く、外販する余力は減少傾向

水素の製造方法：化石燃料改質 (水蒸気改質)

水蒸気改質反応



シフト反応



- ✓ 工業的規模のものから、小型製造装置の販売もされている。
(実用化・普及段階)
- ✓ 発生する水素は95～97%程度のため、燃料電池や工業用には精製（高純度化）が必要。
- ✓ 水素製造に伴いCO₂が発生する。



HYSERVE-300

都市ガスを燃料にオンサイトで水素を製造・生成（大阪ガス）

水素の製造方法：水電解

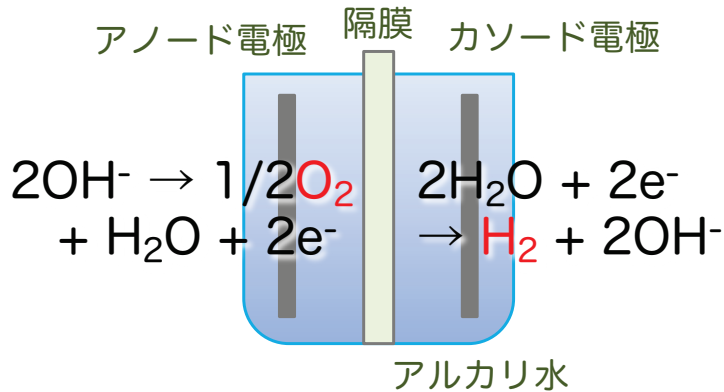
- ◆ 水の電気分解による水素製造は技術的には確立しており、工業用向けに中小規模の水素製造装置が普及している。
- ◆ 今後、再生可能エネルギーからの水素製造を行っていくためには、大規模かつ低コストで再生可能エネルギーの負荷変動に対応可能な水素製造装置の開発が必要となる。

見かけの水の電気分解の反応

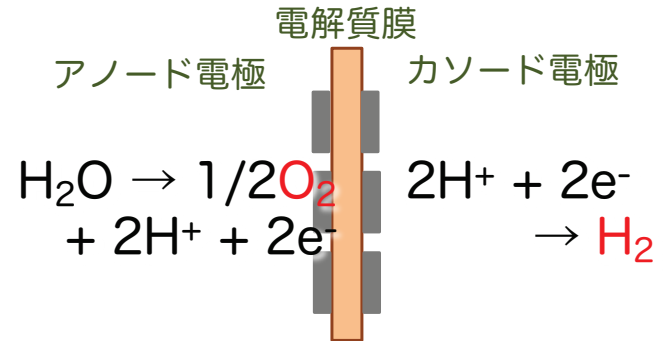


- ✓ 工業用向けに中・小型製造装置は販売。
(大規模は研究開発段階)
- ✓ 再生可能エネルギーからの水電解はCO₂フリーとなる。
- ✓ 製造コストが電力コストに大きく異存。
商用、研究開発段階の水電解技術として電解質によって
アルカリ水電解、固体高分子型水電解、高温水電解

水素の製造方法：水電解



アルカリ水電解



固体高分子(PEM)型

市販電解槽の規模と効率

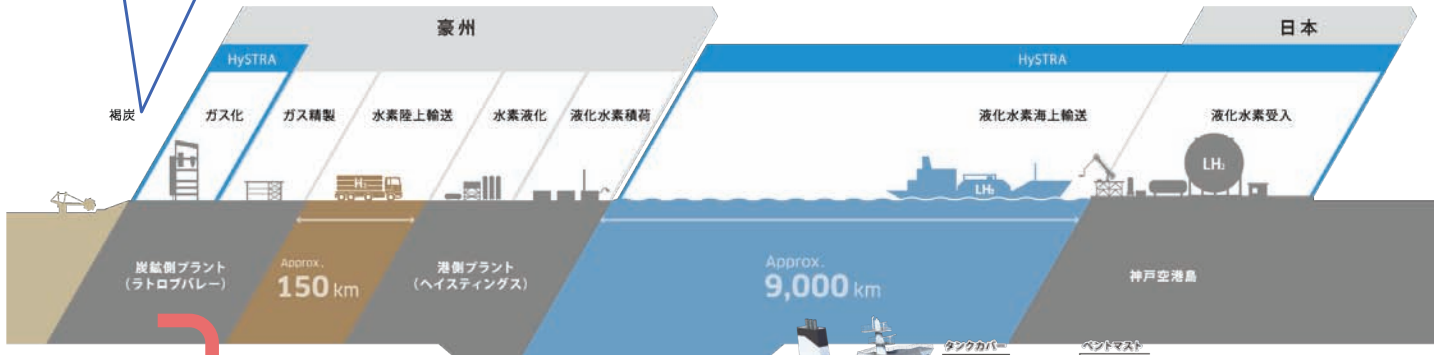
| | 製造能力 Nm ³ /h | ガス純度 (H ₂)% | E変換効率 (HHV)% |
|------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| アルカリ | 3~1000 | 99.5~99.9 | 80~90 |
| PEM型 | 1~80 | 4N~6N5 | 60~70 |

HySTRA

技術研究組合CO2フリー水素サプライチェーン推進機構

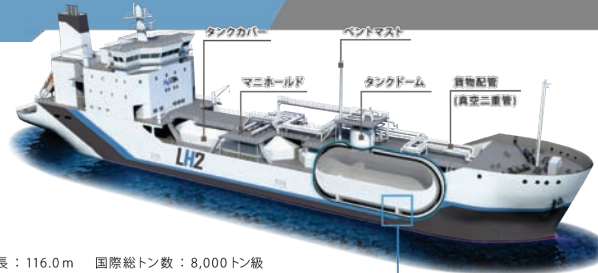
褐炭: 低品位な石炭
(未利用資源)

- 褐炭ガス化技術
- 液化水素の長距離大量輸送技術
- 液化水素荷役技術



CCS (二酸化炭素貯留技術)

HySTRA



全長：116.0m 国際総トン数：8,000トン級
全幅：19.0m 航速：13 knots

液化水素運搬船

各種製造コストの経済性

| | 水素製造コスト (円/Nm ³) |
|--------|------------------------------|
| 苛性ソーダ | 20 |
| 鉄鋼 | 24~32 |
| 石油化学 | 20 |
| 石油精製 | 23~37 |
| 化石燃料改質 | 31~58 |
| 水電解 | 87 (系統電力) 76~136 (風力、太陽光) |

現状、
副生水素は
それほど
余って
いない

2012年試算 (電力料金、化石燃料価格等の変化に伴い、コストも変化)

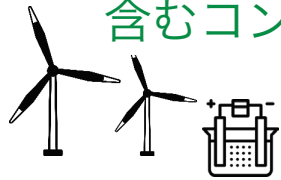
✓ 低廉な電力を手に入れるか、海外からの輸入

そもそも、日本に低廉な電力などなく、再生可能エネルギーによる余剰電力 (未活用電力) に頼ることになる。

輸入水素

輸入水素等の大規模な水素供給を発電や産業部門を
含むコンビナートで集中的に利活用

外部需要



洋上風力
+ 水電解装置



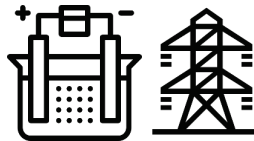
水素等運搬船
(液水、MCH等)

輸入

コンビナート内 (原則水素パイプライン供給)



貯蔵タンク等*



水電解装置 + 系統電力
(余剰再エネ等)



火力発電所
(混焼・専焼)



製油所、化学プラント

(副生水素発生、CO2フリーアンモニア、メタン製造等**)

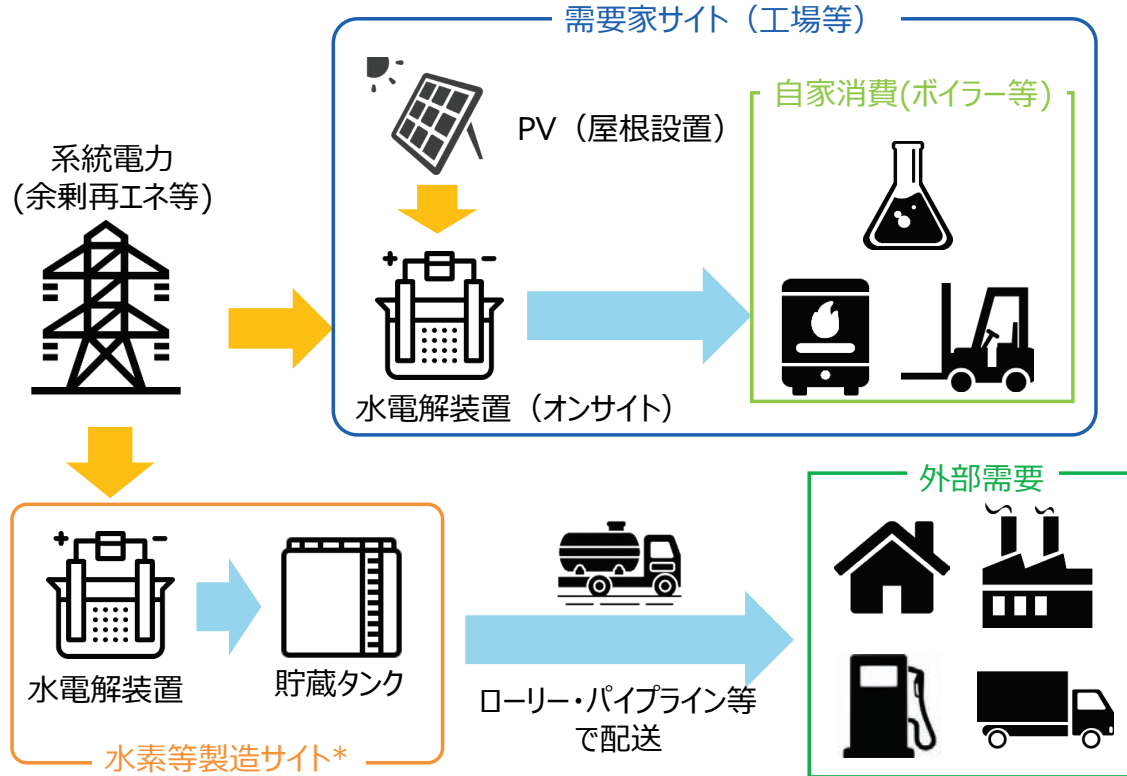


製鉄プラント
(水素還元)

*脱水素設備等を含む

国内の未利用再エネ由来の水素

余剰再エネなどを用い、水電解装置で製造した水素等を、
工場の熱需要等用に自家消費もしくは近隣で利活用



日本における水素の基本戦略シナリオ

| | 現在 | 2030年 | 2050年 | (参考) |
|-----------|-----------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| 水素調達量 | 0.02万トン | 30万トン | 1000万トン+α | 天然ガス輸入量 年8500万トン |
| 水素コスト | ~100円/Nm ³ | 30円/Nm ³ | 20円/Nm ³ | 同輸入価格16円 /Nm ³ |
| 発電単価 | 技術開発段階 | 17円/kWh | 12円/kWh | LNG火力発電 12円/kWh |
| 水素ステーション | 100カ所 | 900カ所相当 | ガソリンスタンド代替 | ガソリンスタンド 3万1500カ所 |
| FCV | 2000台 | 80万台 | ガソリン車を 代替 | 乗用車台数6200 万台 |
| FCバス | 2台 | 1200台 | | |
| FCフォークリフト | 40台 | 1万台 | | |
| エネファーム | 22万台 | 530万台 | 家庭従来エネ システム代替 | 世帯数5300万台 |

政府公表「水素基本戦略」より

水素社会導入のために

水素を安全に、

つくる、

ためる、

つかう

技術を確立・普及することが重要

水素輸送・貯蔵技術：圧縮水素

長所 高い質量水素密度、低エネルギー消費、常温貯蔵、普及技術

短所 低い体積水素密度、実在気体としての非理想性の影響

5 kg, 25°Cの水素の体積 (括弧内は理想気体の場合)

0.1 MPa 61900L (61100L)

15MPa 450L (407L)

35MPa 215L (174L)

70MPa 128L (87L)



鋼製容器



炭素繊維強化アルミニウム製軽量容器
(CFRP-Al軽量容器)

25MPa→35MPa→70MPa化 (10000psi)

水素輸送・貯蔵技術：圧縮水素

水素の供給地と需要地に一定の距離がある場合には、圧縮に一定のエネルギーを要するものの、水素を高圧ガスの形で運搬する方法が広く活用されている。

水素を高圧に圧縮し、ボンベ等で輸送・貯蔵

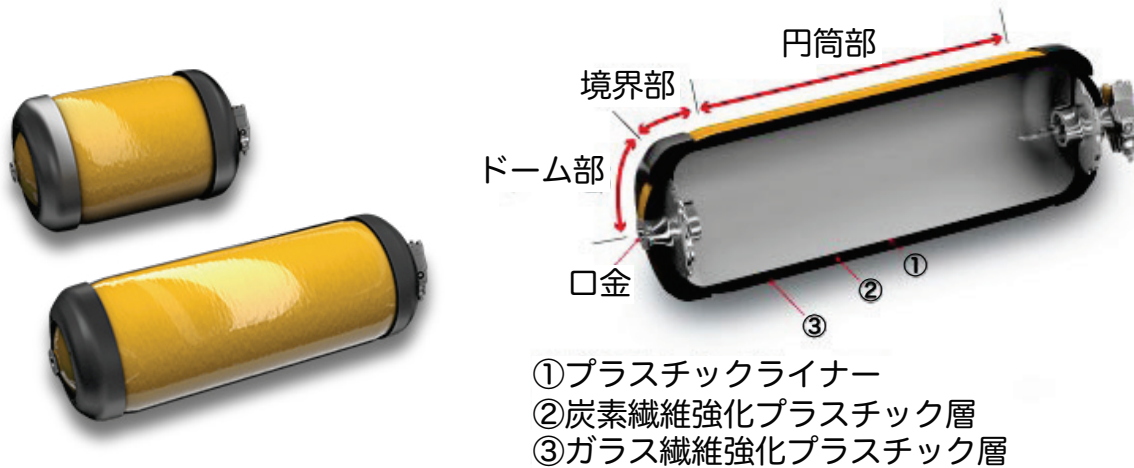


- ✓ 圧縮に一定のエネルギーを要する
- ✓ 圧縮機や高圧で貯蔵するタンクなどについては、低コスト化に向けて更なる技術開発が必要
- ✓ 高圧にすることにより、取扱いには注意が必要であり、高圧ガス保安法等の法規への対応が必要



水素45MPaトレーラー

高压水素タンク



TOYOTA MIRAIに使われる高压水素タンク

| | |
|---------|---------------------------|
| 公称使用圧力 | 70MPa (約700気圧) |
| タンク貯蔵性能 | 5.7wt% |
| タンク内容積 | 122.4 L (前60.0L + 後62.4L) |
| 水素貯蔵量 | 約5.0kg |

水素輸送・貯蔵技術：液化水素

長所 高い質量水素密度と体積水素密度、高純度水素源

短所 液化動力大、蒸発（ボイルオフ、フラッシュ）

宇宙開発から導入、欧米での研究開発が活発



米国ケネディー宇宙センターの
液体水素貯槽（後方はスペースシャトル）



輸送方法としては確立

水素 $16,000\text{Nm}^3$ を輸送
（ 20MPa ローリー8台分）

液化に一定のエネルギーを要する

水素輸送・貯蔵技術：有機ハイドライド

水素をトルエン等の有機物に化合させて有機ハイドライドの形で輸送・貯蔵を行い、脱水素して水素を用いる形態についても実用化段階にあり、検討が進められている。

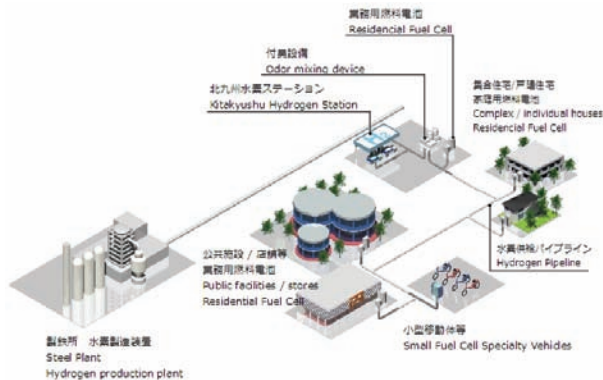
有機ハイドライドは、体積も通常のガスに比べて約600分の1程度になることに加えて、既存の化学物質を輸送・貯蔵するインフラを活用することが可能。



水素をトルエンに化合させてメチルシクロヘキサンの形にして輸送・貯蔵。需要地で脱水素して水素を活用

水素輸送技術：パイプライン

水素の輸送手段としては、都市ガスと同様にパイプラインで輸送するケースも考えられる。国内においても、工業用の水素をコンビナートや近傍の化学工場等の間でパイプラインを通じて融通している例がある。



北九州水素タウン実証における水素パイプライン

- ✓ コンビナート等における工業用水素の輸送手段としては用いられており、海外でも大規模・長距離の工業用水素輸送が行われている
- ✓ 大量の水素を安定的に輸送可能
- ✓ 大規模なインフラ投資が必要となり、初期コストが大きい
- ✓ 水素パイプラインの設計、施工、維持管理に係る安全性確保について検討が必要

水素の貯蔵方法

| | | 体積 (5kg水素) | 輸送 | 貯蔵 | | 課題 |
|---------------------------|--------|---------------|------------------|---------------|-----|---------------|
| | | | | 定置 | 自動車 | |
| 水素ガス | 0.1MPa | 55,000 L | - | - | - | 法整備 圧縮機 |
| | 35MPa | 215L | ○ | 小～中規模 | ○ | |
| | 70MPa | 128L | △ | 小～中規模 | ○ | |
| 液体水素 (-253℃) | | 70L | ○ | 小～大規模 | △ | 液化施設 ボイルオフ |
| 水素吸蔵合金 | | 35～70L | ×～△ (パッケージ輸送) | 小規模 | ○ | |
| 有機ハイドライド (シクロヘキサン etc) | | 120～ 150L | ○ (別途改質機要) | ○ (別途改質機要) | × | 液化設備 脱水素設備 |
| アンモニア | | 30～50L | ○ (別途改質機要) | ○ (別途改質機要) | × | 毒性 途上技術・設備 |

水素貯蔵技術に求められること

コンパクト

軽い・・・余計な質量が少ない

取り扱いやすい・・・充填・放出・保存

安全

安価

水素貯蔵材料を使用しない方法：

圧縮水素（常温、高圧）

液体水素（極低温、常圧）

水素によるエネルギー貯蔵

水素エネルギーの利用

従来：燃料電池自動車の燃料、
(コージェネレーションFC発電)

3.11以降：

エネルギー貯蔵媒体としての観点が浮上・再認識
出力変動の著しい再生可能エネルギーを導入する
場合にエネルギー貯蔵は必須

水素は二次エネルギー

水素は電力と既存技術によって相互に変換できる唯一の燃料

再生可能エネルギーの貯蔵

再生可能エネルギーの種類

太陽エネルギー、風力、地熱、水力、バイオマス、海洋エネルギー、温度差エネルギー、大気熱など

再生可能エネルギーは一般に電力として得られる。

電力貯蔵の方法として

- ・揚水発電
- ・大規模電力貯蔵用電池（NaS電池など）

などあるが、水素は有力なエネルギー貯蔵媒体の候補

水素は気体（ガス）であるため、**貯蔵・輸送に課題**

水素は電力と既存技術によって 相互に変換できる唯一の燃料

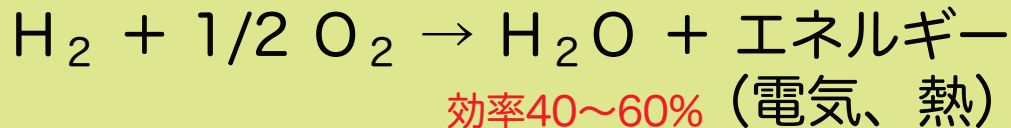
電気分解

再生可能エネルギーで発電された電力

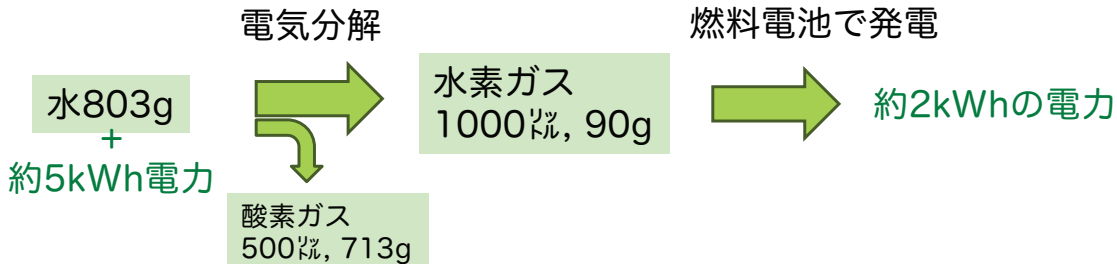


アルカリ水電解・固体高分子水電解：実質効率60～90%

燃料電池



電気 → 水素 → 電気の往復効率：< 50%



水素を

安全かつコンパクトに貯蔵し、

(安心できるような圧縮圧で)

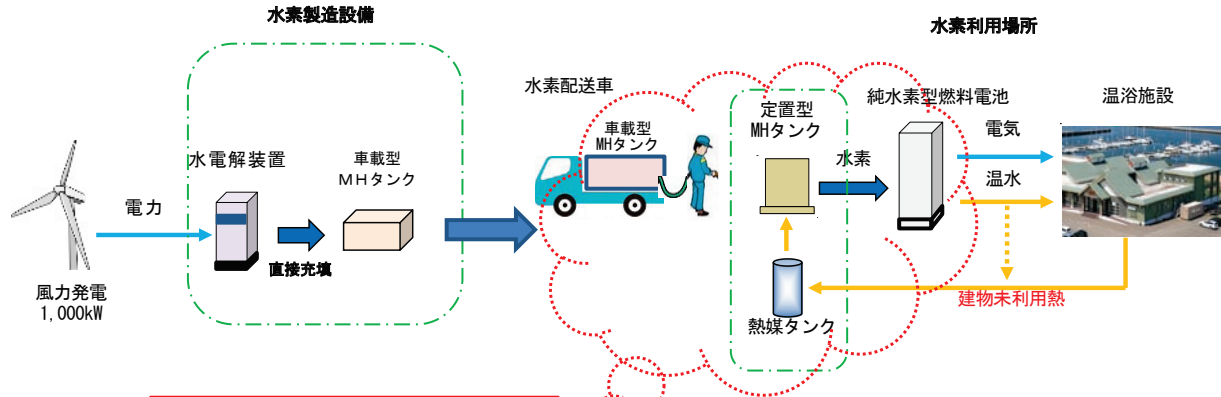
ガスボンベのように

簡便に取り出せる方法は？

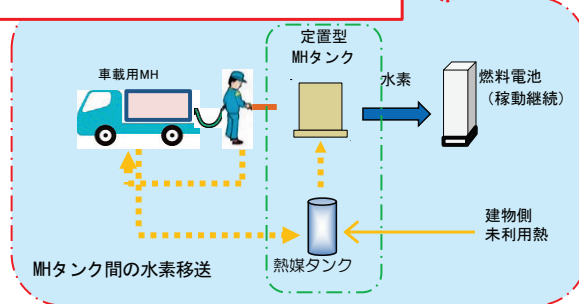
➡ 水素吸蔵合金について
次回の講義で紹介

水素吸蔵合金による水素輸送

北海道室蘭市で水素サプライチェーンを構築する実証事業



水素移送：熱のカスケード利用



※水素吸蔵時の熱を、水素放出時の熱としてカスケード利用

2018年6月21日 プレスリリース

室蘭工大ほか、室蘭市、大成建設、JSWなどと共同実証

室蘭市での低炭素水素サプライチェーン³⁵ に関する環境省実証事業（室蘭工大参画）

環境省 地域連携・低炭素水素技術実証事業
建物及び街区における水素利用普及を目指した
低圧水素配送システム実証事業

大成建設(株)・室蘭市・九州大学・室蘭工業大学・(株)日本製鋼所・(株)巴商会・(株)北弘電社



水素社会導入のために

水素を安全に、

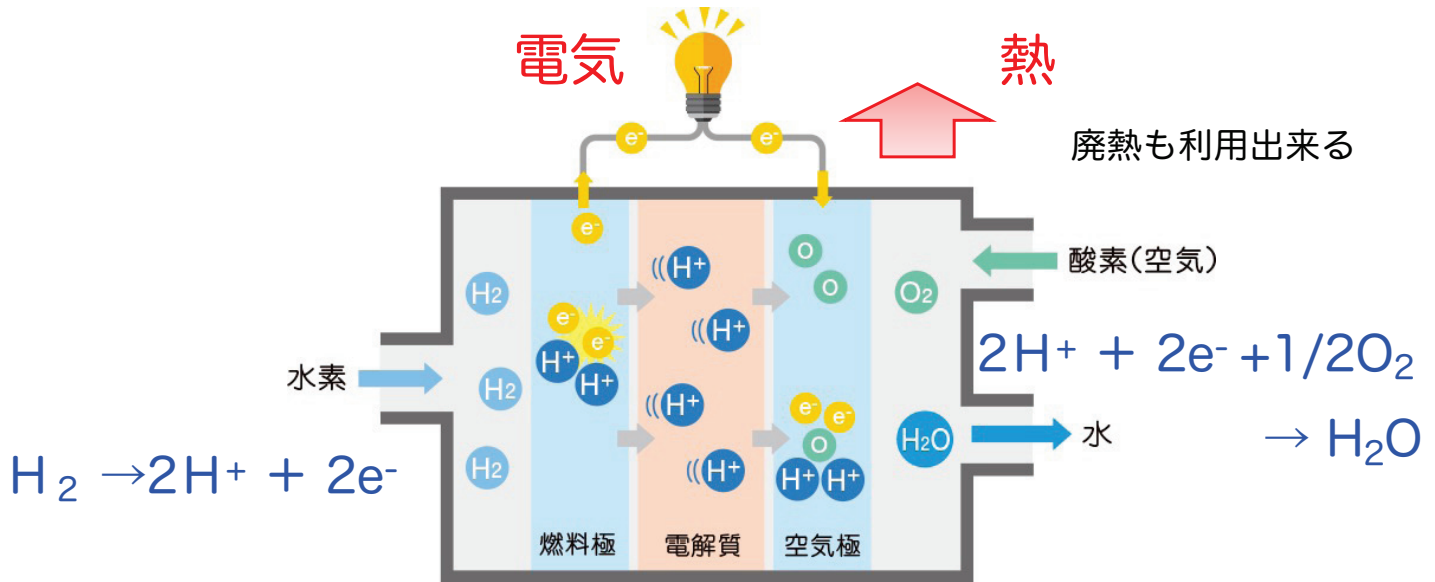
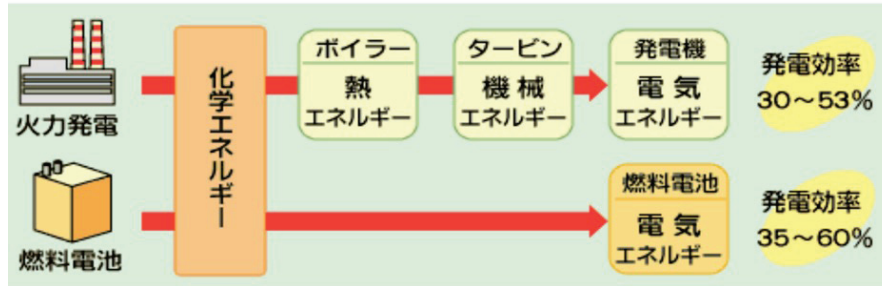
つくる、

ためる、

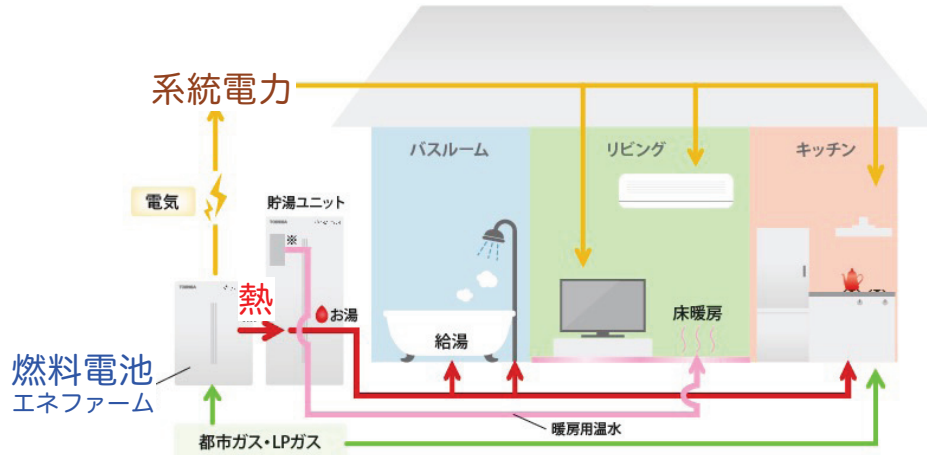
つかう

技術を確立・普及することが重要

燃料電池の原理（構造と反応）

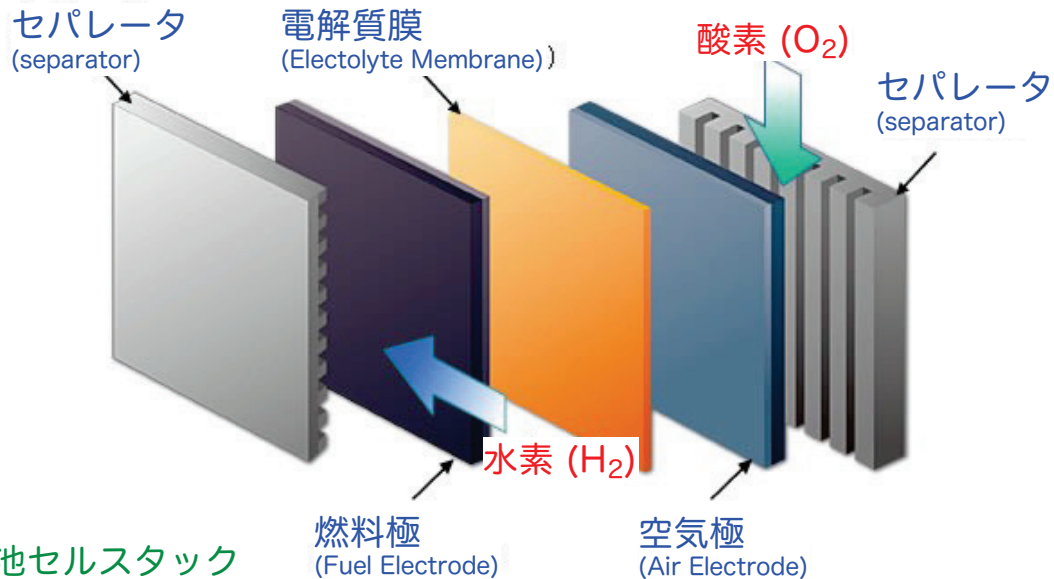


燃料電池の総合効率率は80%以上

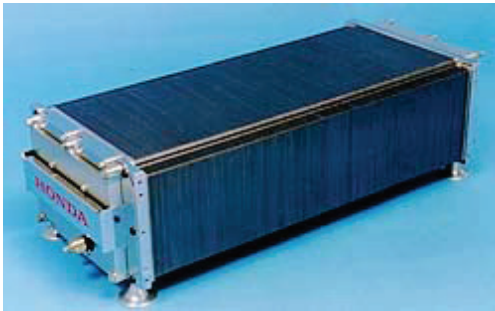


既存のインフラを利用するため、家庭用は水素でなく都市ガスなどの直接変換が普及

燃料電池(Fuel Cell)のセル構造



燃料電池セルスタック

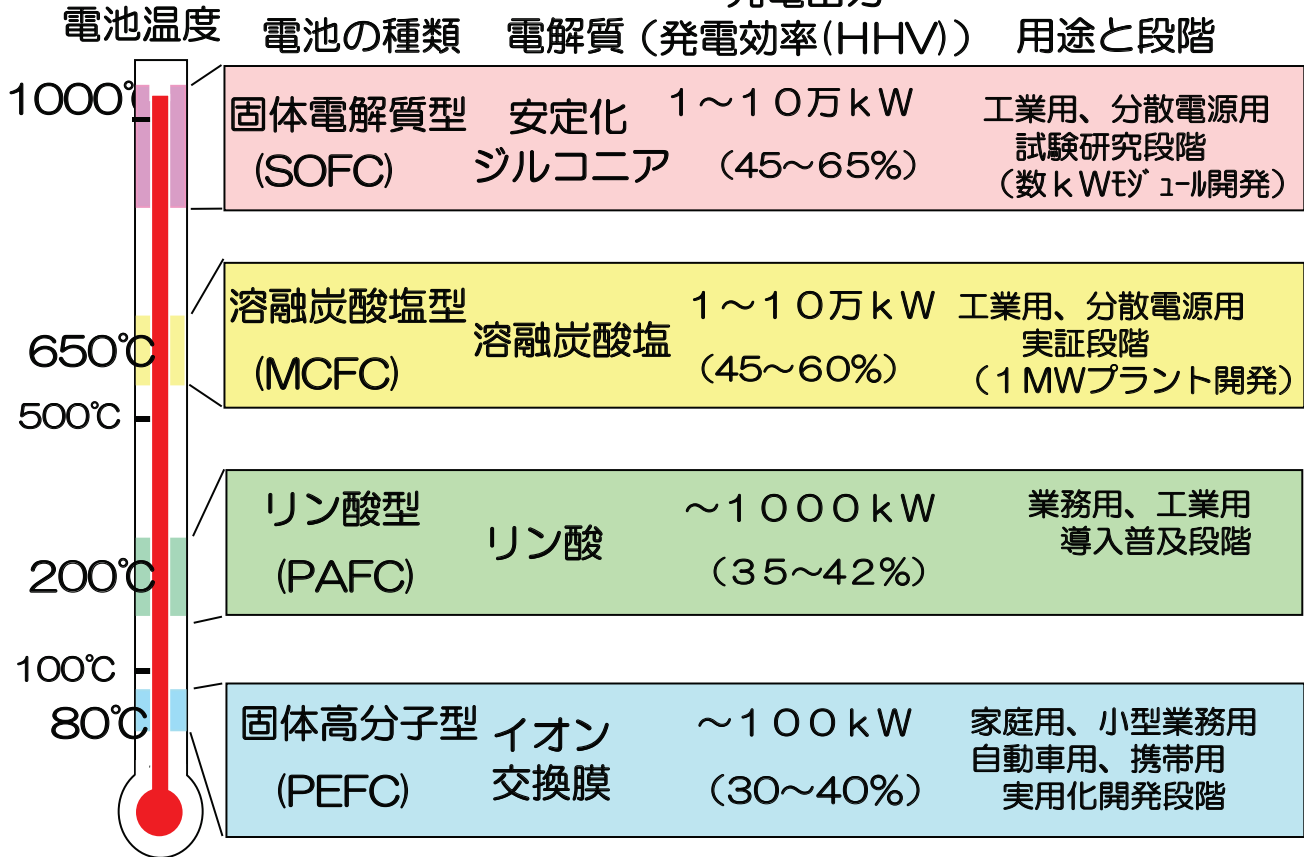


代表的な燃料電池の種類

| 種類 | 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 | 固体高分子膜 | りん酸 | 溶融炭酸塩 | 酸化物イオン伝導体 |
| キャリア | H ⁺ (含水) | H ⁺ | CO ₃ ²⁻ | O ²⁻ |
| 作動温度 | 常温~90℃ | 約200℃ | 約650℃ | 700~1000℃ |
| 発電効率 | 30~45% | 35~45% | 45~60% | 45~60% |
| 特徴 | <ul style="list-style-type: none"> ・低温で起動・動作 ・瞬時応答(H₂) ・電流密度が高い | <ul style="list-style-type: none"> ・排熱を給湯, 冷暖房に利用できる | <ul style="list-style-type: none"> ・排熱を複合発電システムに利用できる ・燃料の内部改質が可能 | <ul style="list-style-type: none"> ・高効率発電 ・燃料改質器が簡素、省スペース → 業務用・産業用として期待 |
| 現状 | <ul style="list-style-type: none"> ・エネファーム・FCV用に活用 ・低白金化等の技術開発を実施 | <ul style="list-style-type: none"> ・工場やビル屋上などに設置 (工業用、業務用) | <ul style="list-style-type: none"> ・工業用、分散電源用 | <ul style="list-style-type: none"> ・一部エネファーム用の商品が市場投入 ・業務用・産業用発電用途 |

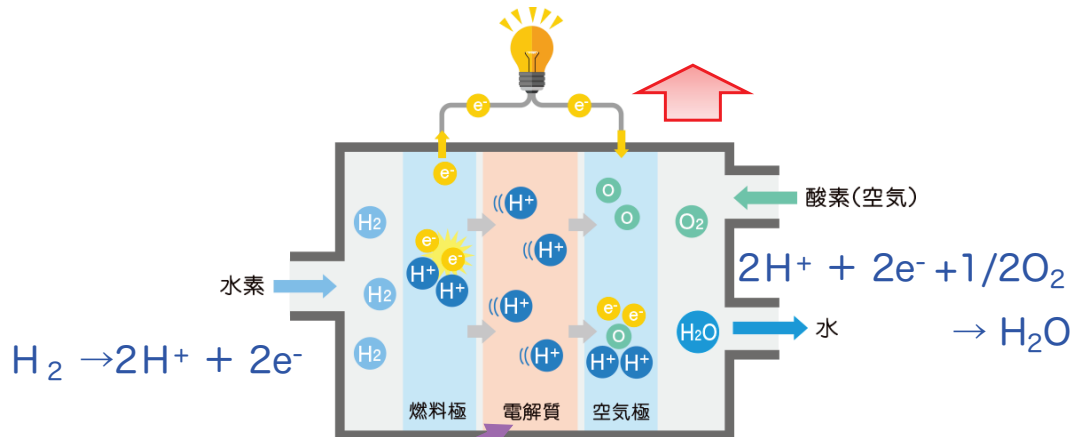
燃料電池の種類

発電出力

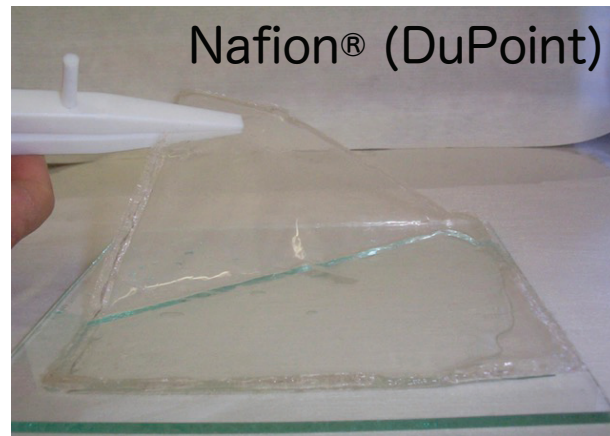


固体高分子形燃料電池 (PEFC)

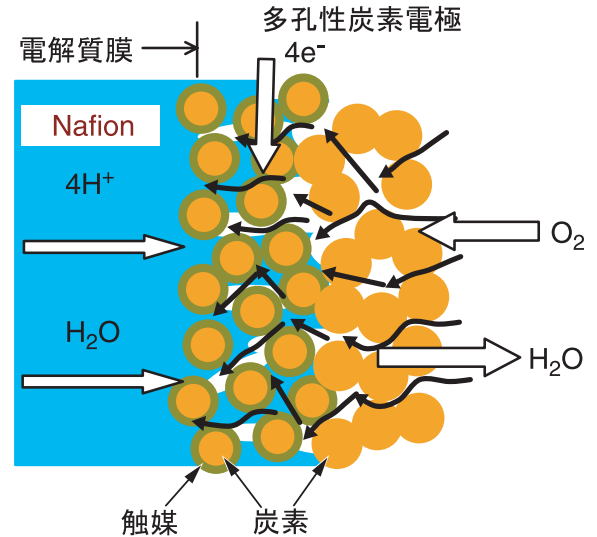
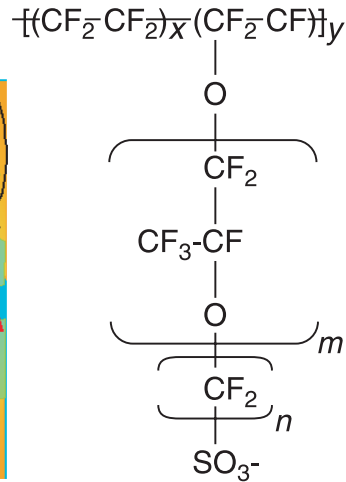
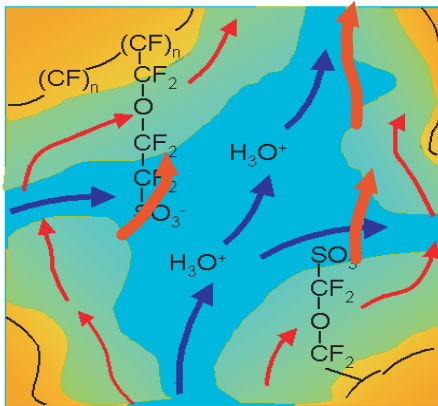
Polymer Electrode Fuel Cell



プロトン電解質膜(PEM)



電解質の構造と反応



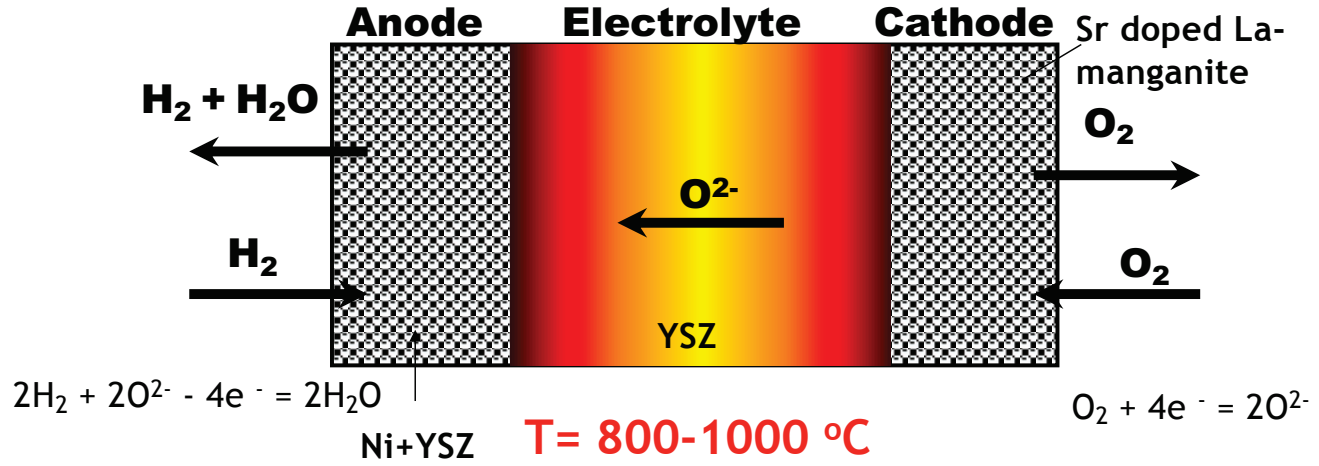
Nafion の構造と物質輸送経路

空気極の反応

課題： 電解質の高寿命化、低価格化
電極触媒に用いるPtの低減 など

固体酸化物燃料電池(SOFC)

Solid Oxide Fuel Cell



構成部

要求される特性

電解質

高イオン伝導性、長期高温性能安定性、緻密性、長期信頼性(高強度、高耐久性)

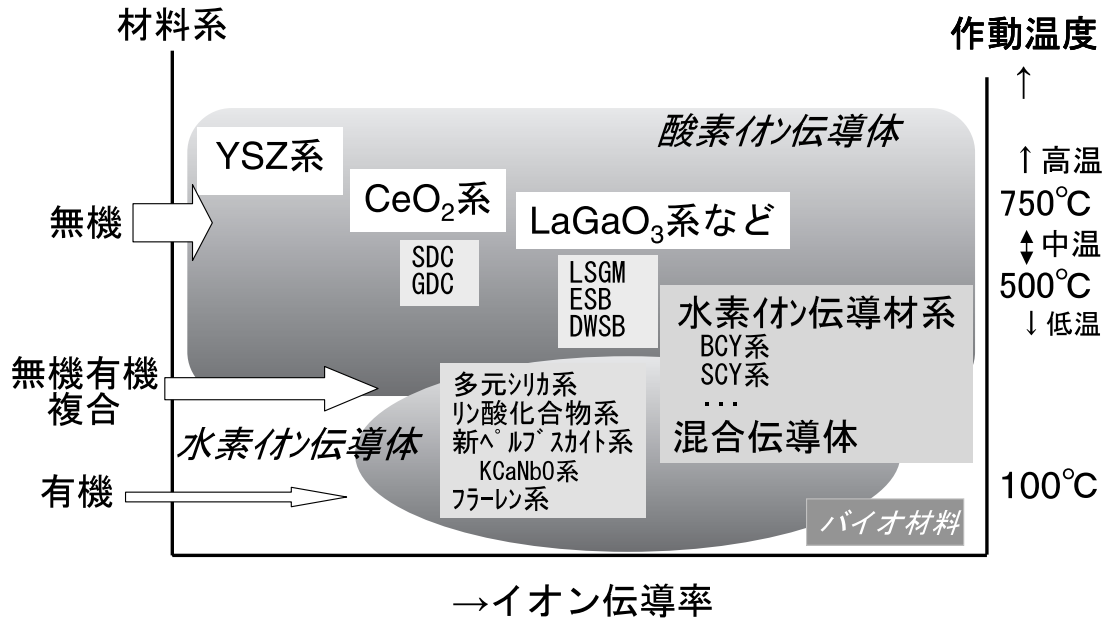
燃料電極

広い反応の場(水生成)、電子およびイオンの豊富なパス、適度な多孔性(水素、生成水のスムーズな移動)、高温安定性

空気電極

広い反応の場(酸素吸着とイオン化)、電子およびイオンの豊富なパス、適度な多孔性(酸素移動)、高温安定性

イオン伝導率および作動温度の関係



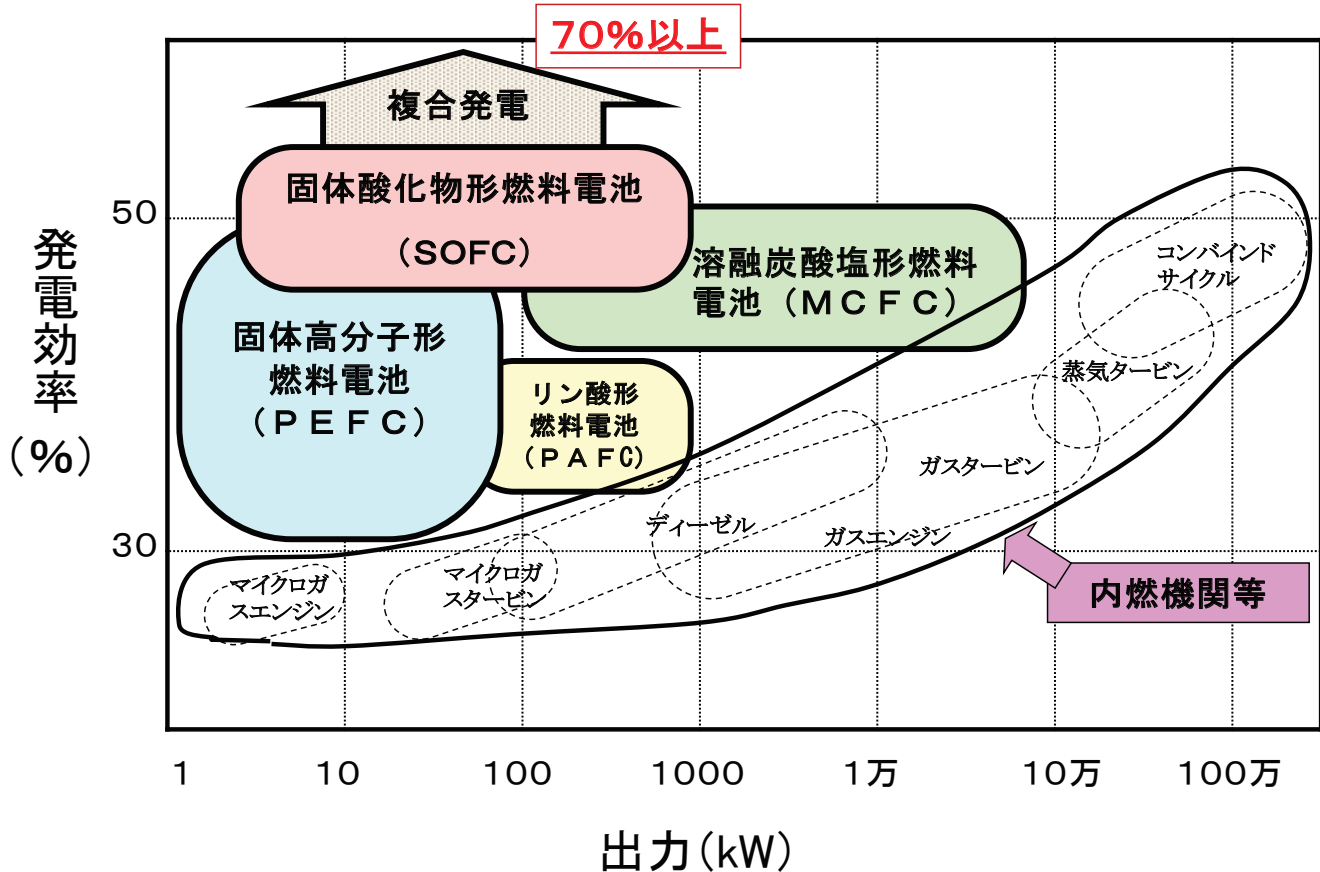
燃料電池のセオリーとして

より低い温度で、理論効率（化学エネルギーから電気エネルギー）は増大。

実際は

電解質の抵抗や界面での反応抵抗の増大によって、発電効率は低下する。

各種発電方式別の効率比較



水素エネルギーの意義

環境

エネルギー供給源の多様化

- ◆ 水素は、自然には単独では存在しないが、水素源の一つである水は地球上に無尽蔵に存在。
- ◆ 化石燃料だけでなく、太陽光、バイオマス等の再生可能エネルギーからの製造も可能。

環境負荷の低減

- ◆ 利用段階でCO₂を排出しない。燃料電池の場合はエネルギー効率が高く、省エネ・省CO₂に寄与。
- ◆ 再生可能エネルギーから製造された水素であれば、製造から利用までの全過程でCO₂フリー。

資源

エネルギーの有効活用

- ◆ 地域的な偏りや時間による変動等の問題を抱える再生可能エネルギーを含む、様々なエネルギーを大量に貯蔵・輸送することが可能。
- ◆ 送電線のような大規模なインフラによらず、トレーラーや船舶での輸送が可能。

エネルギー効率の向上

- ◆ 定置用燃料電池の発電効率は35-60%。電気と熱を併せた総合エネルギー効率は80%超。
- ◆ 燃料電池自動車のエネルギー効率は、35%程度。

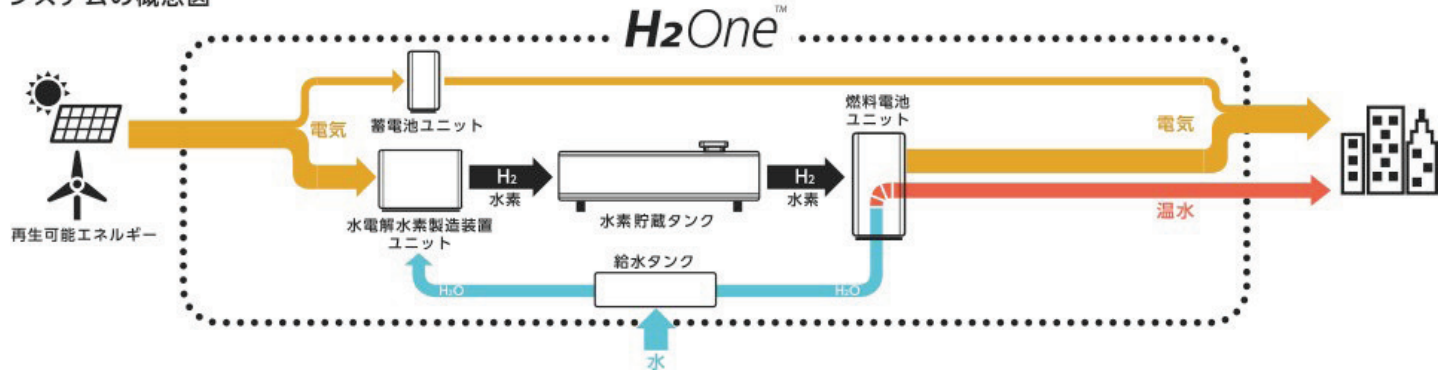
セキュリティ

非常時対応

- ◆ 分散型エネルギーである定置用燃料電池や、非常時の電力供給も可能な燃料電池自動車は利活用の柔軟性の観点から重要。

自立型水素エネルギー供給システム

システムの概念図



東芝 H₂One

平常時

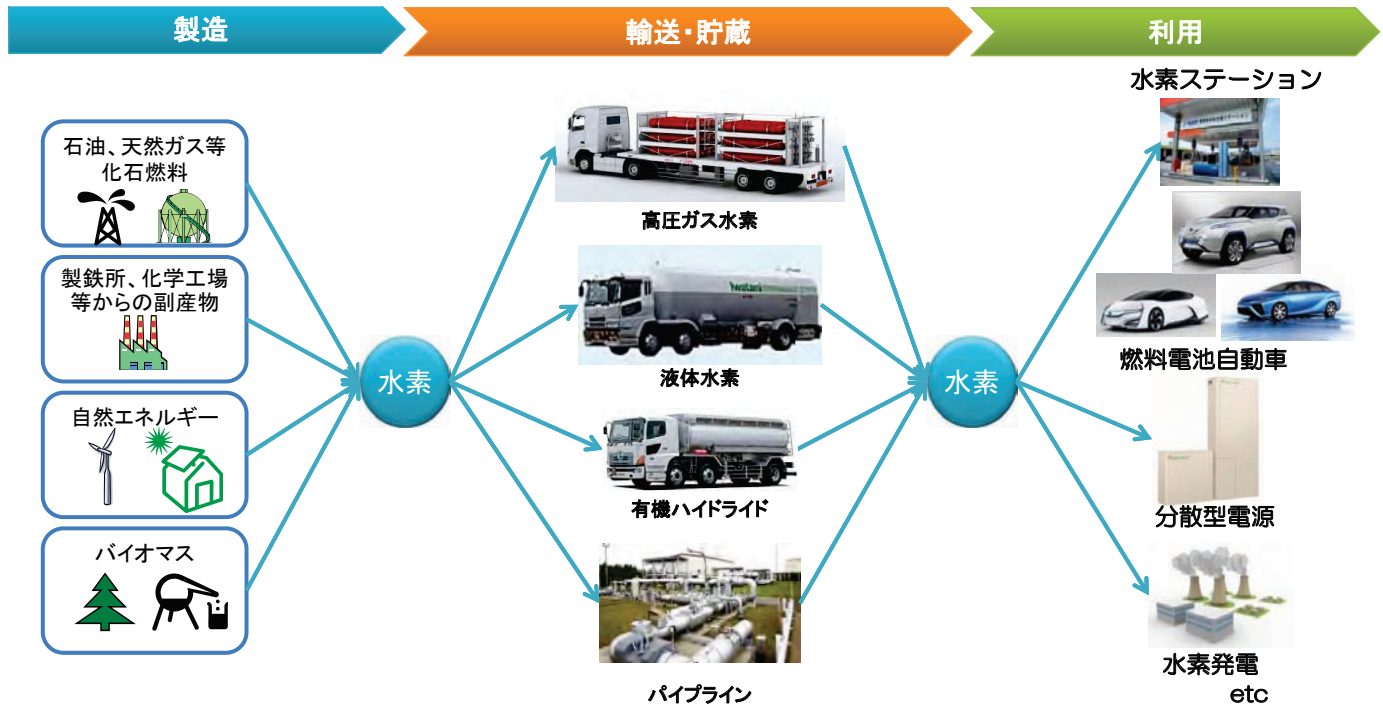
施設の電気、温水、水素の使用量
と貯蓄量を監視し電力安定可

緊急時（災害時）

自立して電力、熱（温水）を供給



水素の製造、輸送・貯蔵、利用



水素サプライチェーン

水素社会導入のために

水素を安全に、

つくる、

ためる、

つかう

技術^を確立・普及することが重要