



三重県

第1回 水素エネルギー社会研究会

水素エネルギーの現状と今後

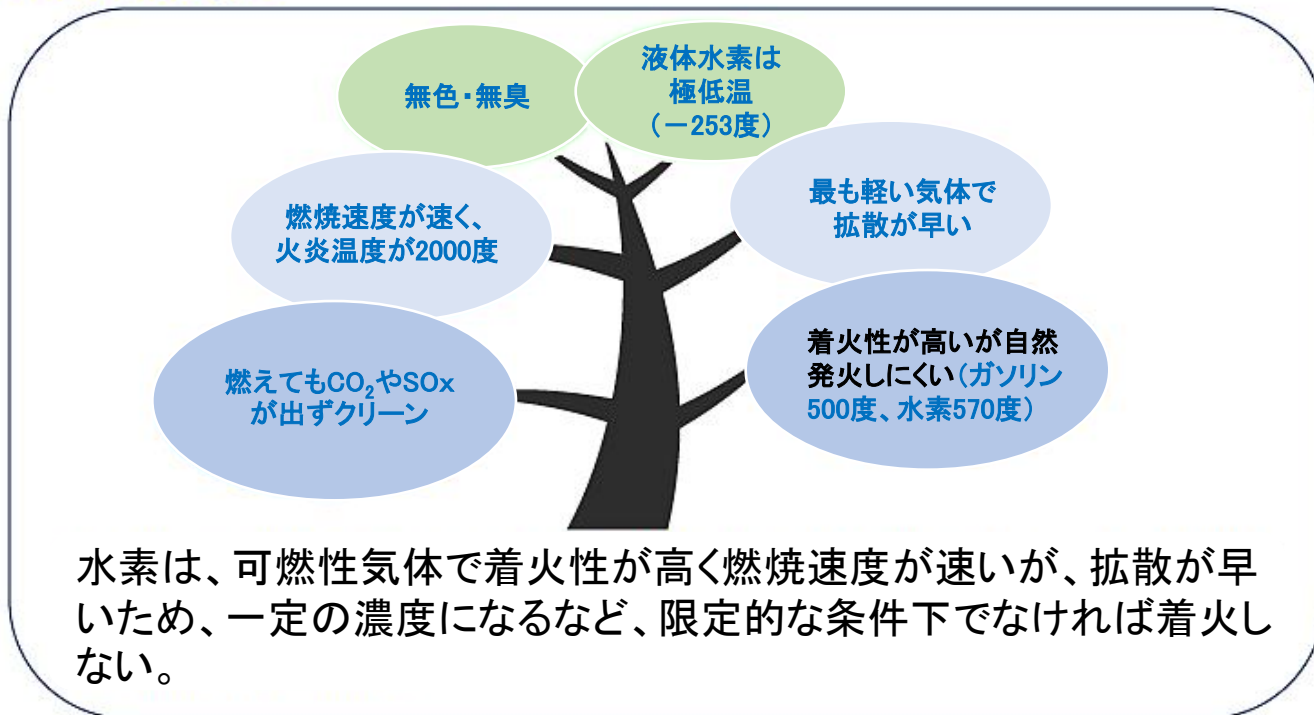
平成27年3月24日

三重大学 地域イノベーション学研究科

坂 内 正 明



○ 水素の特性



特性を正しく理解し、安全対策を行えば化石燃料同様に安全な利用が可能

○ 必要な安全対策

- ① 水素を漏らさない
- ② 漏れた場合は早期に検知し、拡大を防ぐ
- ③ 漏れた場合に溜めない
- ④ 漏れた水素に火がつくこと防ぐ
- ⑤ 火災が生じた場合、火の拡大を最小限に留める



水素[Hydrogen]

- 原子番号: 1
- 分布: 宇宙では最も豊富な元素(宇宙の質量の3/4)
地球上では、水や、アミノ酸・炭化水素などの化合物として存在
- 分子式: H_2
常温・常圧では無色、無味、無臭の気体
- 比重: 空気を1としたら、0.0695
- 融点: $-259.14^{\circ}C$
- 沸点: $-252.87^{\circ}C$
- 総発熱量: $3,050kcal/m^3$
 $12,750kJ/Nm^3$
- 真発熱量: $2,570kcal/m^3$
 $10,740kJ/Nm^3$
- 発火点(空気中): $527^{\circ}C$ (炎色は無色)
- 爆発範囲(空気中): 4.0~75.0vol%
- 燃焼すると酸素と反応して水になる

水素 早わかり便利帳

■ 体積

- ◇ $0^{\circ}C$ 、1気圧の水素ガスを液化すると
体積は約800分の1になる

- ◇ 水素ガス1kgの体積
水素ガス $1kg = 1,000g = 500mol = 11,200l$
 $= 11.2m^3 (\doteq 11m^3)$

液化水素 $1kg = 11,200l \div 800 = 14l$

■ 重さ

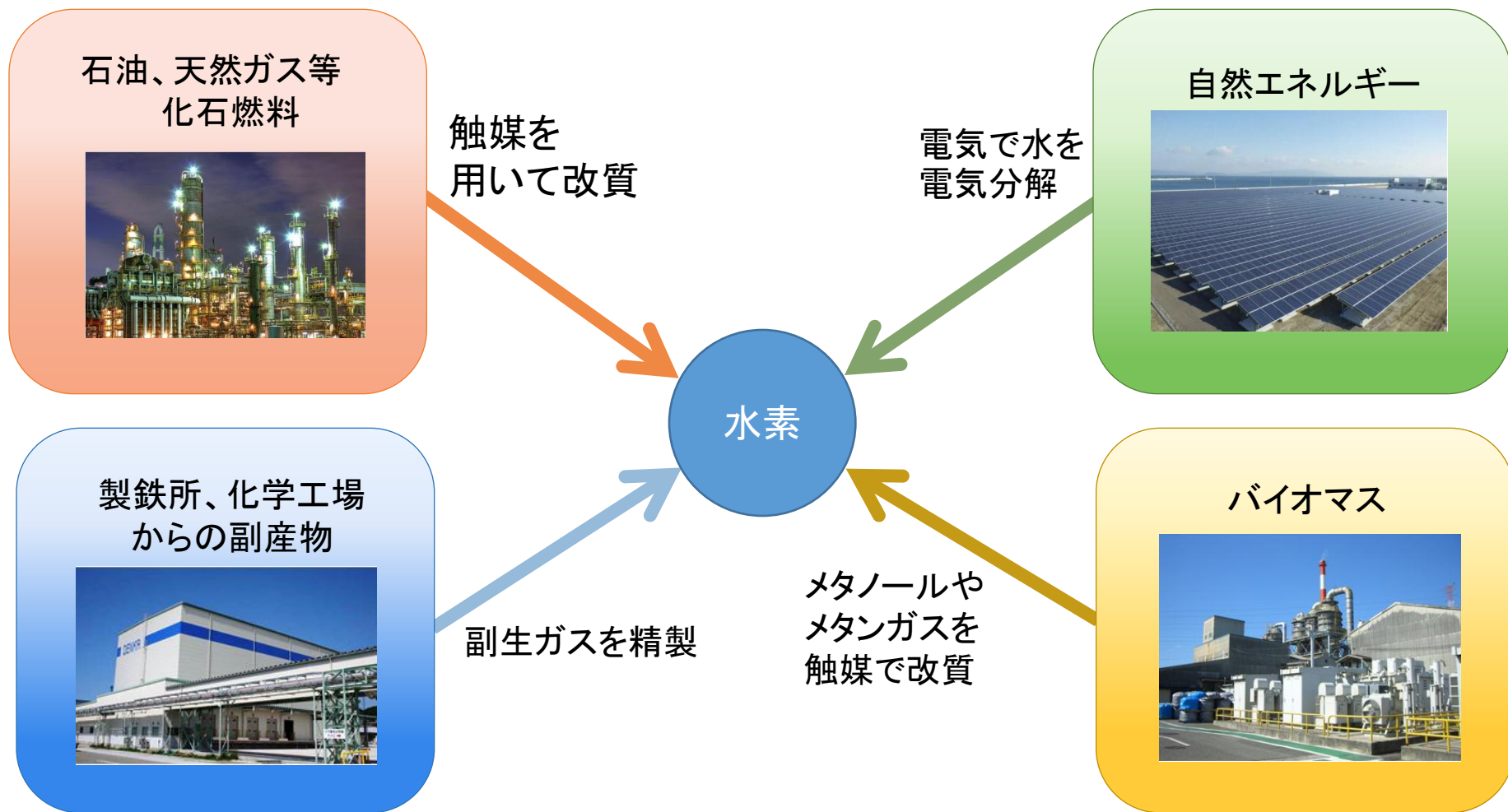
- ◇ $0^{\circ}C$ 、1気圧の水素ガス $1m^3$ の重さ
 $1m^3 = 1,000l = 44.6mol = 89.3g$
- ◇ 液化水素1lの重さ = 水素ガス800l = $35.7mol = 71.4g$

■ FCV燃料としての水素

- ◇ 水素ガス1kg($\doteq 11m^3$)でFCVはおよそ100km走行可能
- ◇ FCV1台が1年間に必要とする水素ガスは
 $100kg (= 1,100m^3)$
FCV1台が1年間に1万km走ると想定すると
必要な水素ガスは
 $1万km \div 100km = 100kg (= 1,100m^3)$
FCV : 燃料電池自動車



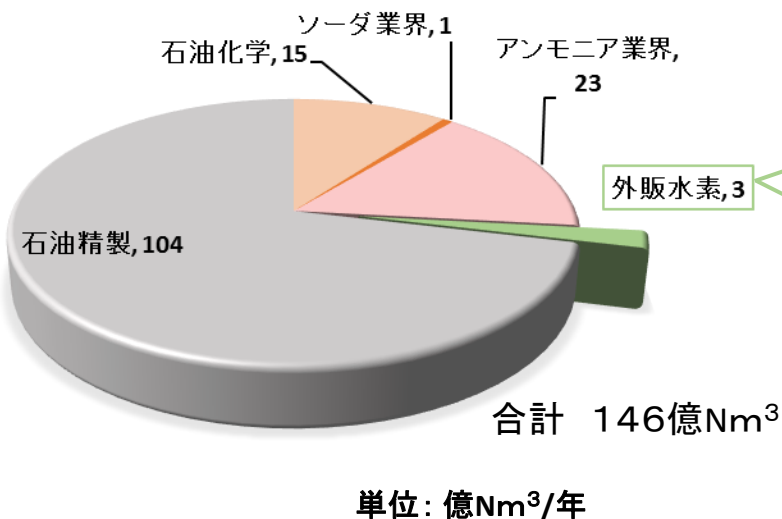
■ 水素は様々なエネルギー源から製造できる。



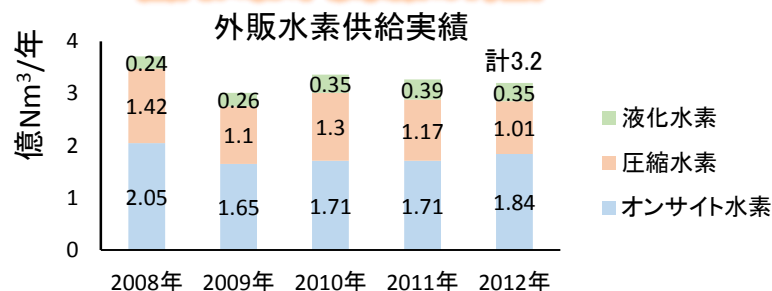


- 現時点での、国内水素利用は年150億Nm³。大半は石油精製で自家消費。
- 3億Nm³強が半導体、金属、硝子、化学工業など向けに外販。①産業ガス事業者等がユーザーの工業用プラント等に水素製造装置を配置して供給する(オンサイト供給)、②圧縮水素により運搬、③液化水素により運搬。

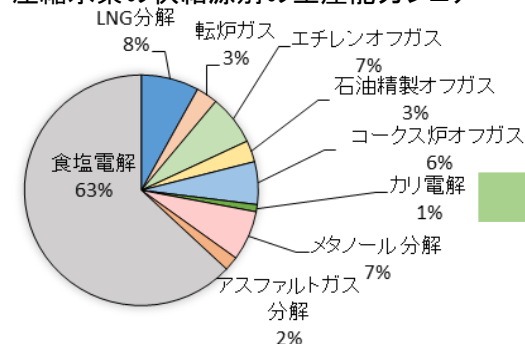
国内における工業用水素利用



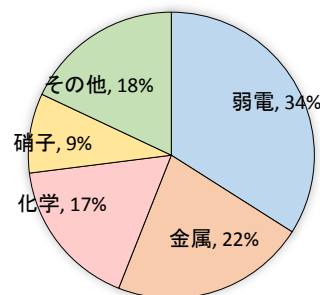
国内における水素の外販



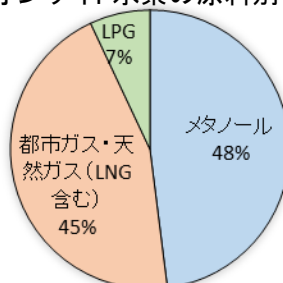
圧縮水素の供給源別の生産能力シェア



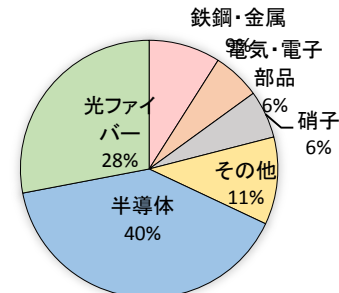
圧縮水素の用途別シェア



オンサイト水素の原料別の生産能力シェア



オンサイト水素の用途別シェア



【出典】

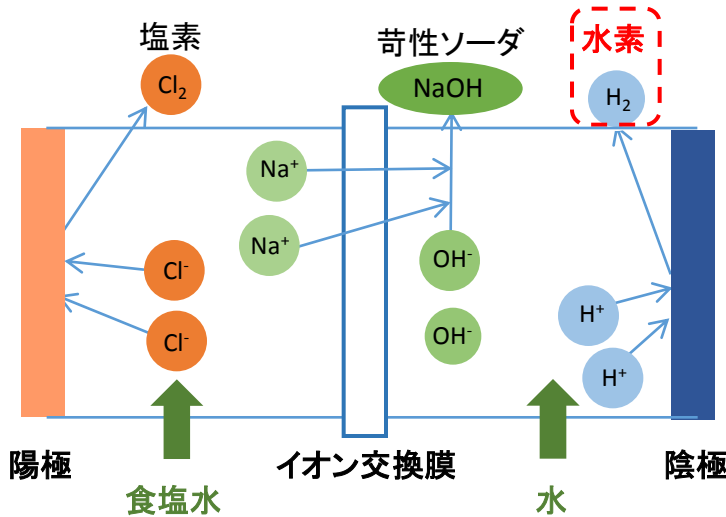
※1各種資料により日本エネルギー経済研究所推計
※2「ハイドリズム4」による日本エネルギー経済研究所作成

- 副生水素の代表: 苛性ソーダの製造プロセス。
- 食塩電解により苛性ソーダを製造する際に発生する副生水素は純度が高く、外販。

苛性ソーダ製造由来の水素

- ◆ 食塩電解により苛性ソーダを1トン製造する際に、副生物として水素が280Nm³発生。苛性ソーダの生産量(平成24年度は357万トン)から苛性ソーダ製造で発生する副生水素は10億Nm³(推定)。

苛性ソーダの製造プロセス



実用化状況

- ✓ 実用段階。
(苛性ソーダの製造プロセス)

環境性

- ✓ 食塩電解に用いられる電源構成による。
- ✓ 副生水素がボイラー燃料として用いられている場合には代替燃料の利用によりCO₂が追加発生。

安定供給

- ✓ 苛性ソーダの製造量による。

経済性

- ✓ 純度が高く、比較的低コスト。
- ✓ 副生水素がボイラー燃料として活用されている場合、代替燃料コストが追加発生。

留意点

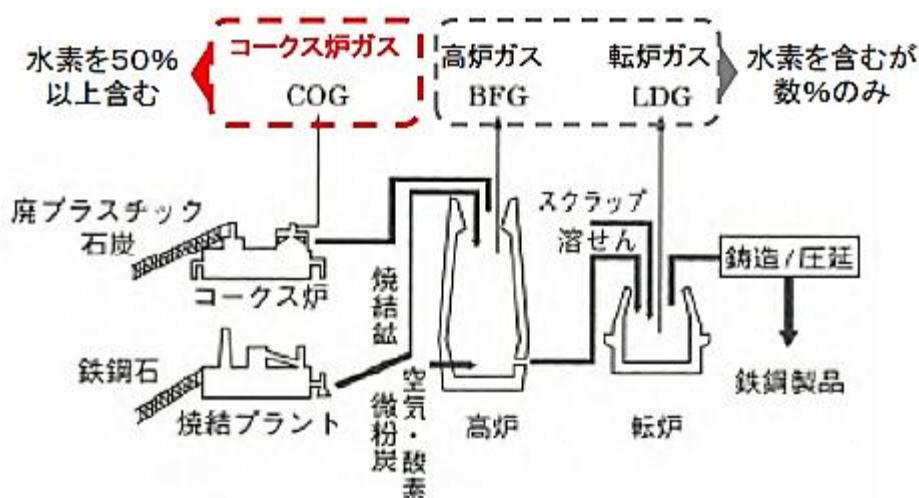
- ✓ 実用化されつつある新たな食塩電解技術(電力使用量を3割削減可)が導入されると水素は発生しない。

- 鉄鋼の製造過程では水素を含む副生ガスが発生。精製し純度を上げることで水素を用いることが可能。
- 石灰の乾留(蒸し焼き)によりコークスを製造するプロセスで発生するコークス炉ガスは、ガス組成の中の水素割合が5割以上と比較的高いため、一部が外販用。

製鉄所コークス炉由来の水素

- ◆ 製鉄の製造プロセスのうち、コークスを精製するコークス炉において水素を50%以上含むコークス炉ガスが発生。
- ◆ コークス炉ガスからの副生水素は約70億Nm³。

鉄鋼の製造プロセス



実用化状況

- ✓ 実用段階。
(コークスの製造プロセスに導入)

環境性

- ✓ COGは所内ボイラや直接加熱に利用。COGの水素を外部に供給する場合は、代替燃料によりCO₂が発生。

安定供給

- ✓ コークス製造量による。(※近年は、安定的)

経済性

- ✓ 水素濃度を高めるためのコストが追加的に発生。
- ✓ ボイラー燃料として活用されている場合、代替燃料コストが追加。

留意点

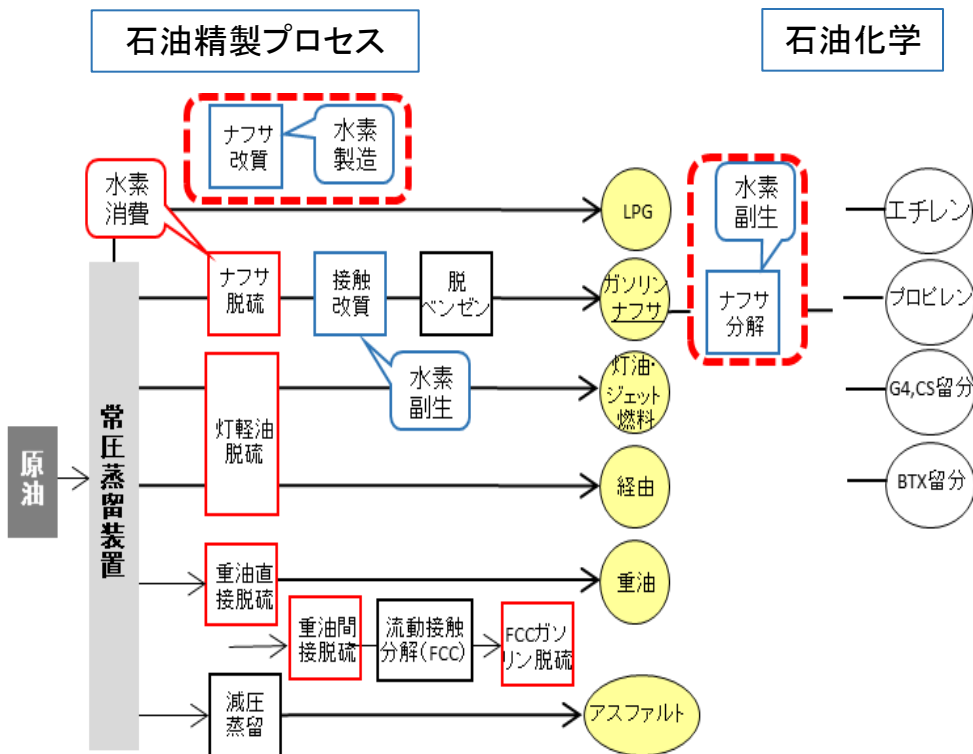
- ✓ コークス炉ガスは水素濃度が低いため、精製により純度を上げる必要。
- ✓ 将来水素還元製鉄により、外販余力が減少する可能性。



- 石油精製時に副生水素が発生。全て脱硫に用い、不足する水素はナフサから製造し追加。水素製造装置の稼働率を上げれば、外部へ供給する水素の製造は可能。(追加供給は「副生」ではない。)
- 石油化学のエチレン製造プロセスで副生水素が発生し、一部は外販。

石油精製・石油化学由来の水素

- ◆ 水素製造装置の余力を用いれば追加的な水素供給が可能。



実用化状況

- ✓ 実用段階。
(石油精製、石油化学のプロセスに導入)

環境性

- ✓ 外部に供給する水素を水素製造装置で製造過程で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。

安定供給

- ✓ 水素製造装置の製造余力次第。石油化学ではエチレン製造設備の稼働次第。

経済性

- ✓ 現状、水素製造装置に余力があるものの、外販するためには新たに出荷設備の整備が必要。
- ✓ 原料や化石燃料価格にも依存。

留意点

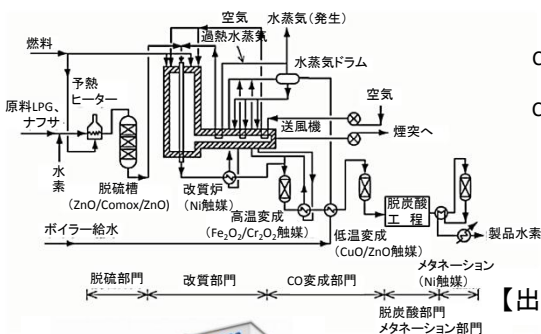
- ✓ 精油所の閉鎖、エチレン製造設備の停止により、わが国における石油精製能力、エチレン生産能力は近年減少傾向。

- 炭化水素から水蒸気を用いてガス化する水蒸気改質法。製油所やアンモニア製造所における水素製造装置に用いられる。工業用に小型水素製造装置の販売も行われ、水素ステーション向けの水素製造装置も開発。
- 原料となる炭化水素は、メタノールや下水汚泥由来のメタンなど幅広い。

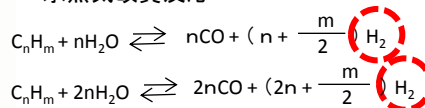
化石燃料由来の水素

- ◆ 炭化水素系の燃料を高温(800℃)で水蒸気と反応させることでCO₂と水素を製造するプロセス。

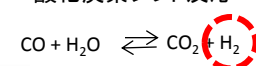
水蒸気改質による水素製造プロセス



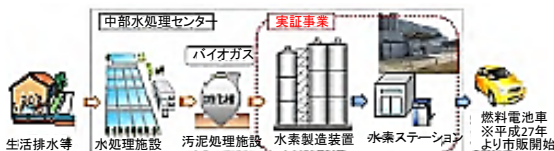
水蒸気改質反応



一酸化炭素シフト反応



【出所】JIX日鋼日石エネルギー、石油便覧



実用化状況

- ✓ 実用段階。
(国内で多数導入済み)

環境性

- ✓ 水素製造に伴いCO₂が発生する。

安定供給

- ✓ 水蒸気改質法では水素の大規模かつ安定的な供給が可能。

経済性

- ✓ 従来からの反応プロセスであり、広く実用化されており、経済性はある。

留意点

- ✓ 発生水素は95～97%の純度のため、燃料電池や工業用に用いるには、PSAによる精製が要。

➤ 水素ステーション向けのコンパクトな改質装置(300Nm³/h)も開発。

➤ 下水処理場から生ずるメタンから水素を取り出し水素ステーション等に用いる実証も。



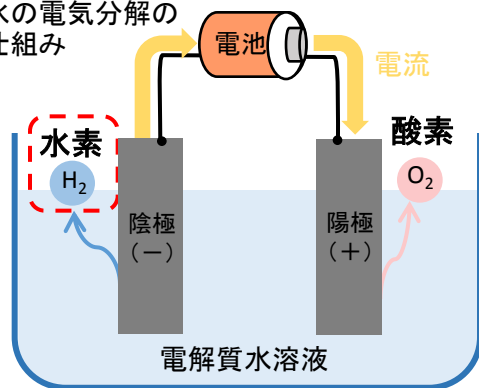
- 水の電気分解は、技術的に確立。工業用向け中小規模水素製造装置は普及。
- 再生可能エネルギーからの水素製造を行うには、大規模かつ低コストで再生可能エネルギーの負荷変動に対応できる水素製造装置の開発が必要。

水素電解由来の水素

- ◆ アルカリ性の溶液に電流を流し、水素と酸素を取り出す。

アルカリ水電解による水素製造プロセス

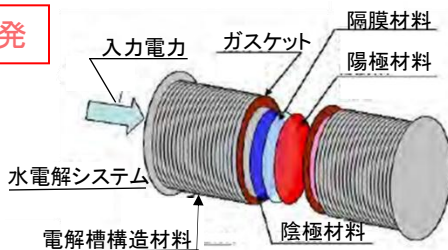
水の電気分解の仕組み



- 小型の水電解装置は、工業用に多数導入されている。

低コストアルカリ水電解システムの開発

再生可能エネルギーなどにより発電された電力を用いて水素を製造する水電解システムについて、大型化するとともに低コスト・高効率となるよう技術開発を行っている。



実用化状況

- ✓ 実用化段階(工業用向け製品販売)。
- ✓ 大規模研究開発中。

環境性

- ✓ 水電解に用いる電源の構成による。
- ✓ 再エネからの水電解はCO₂フリー。

安定供給

- ✓ 水電解に用いる電源の安定性による。再生可能エネルギー出力が不安定。

経済性

- ✓ 1m³の水素製造に3.6kWhの電力(現実には5~6kWh)が必要。電力コストに依存。

留意点

- ✓ 水素製造の効率向上、大規模化への対応、再エネの負荷変動への対応など課題。

- 水素のCO₂排出:再生可能エネルギーを用いた水電解を行った場合は少。
- 副生水素(苛性ソーダ、鉄鋼、石油化学)は、副次的に発生するので、CO₂の排出は少ない。現在、副生水素がボイラー燃料として用いられている場合には、代替燃料として化石燃料を用いることになり、その分のCO₂が追加排出。

製造方法別CO2排出量比較

		CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /Nm ³ -H ₂)	
副生水素	苛性ソーダ	0.86～1.16 (重油代替～石炭代替)	
	鉄鋼	1.00～1.28 (重油代替～石炭代替)	・COGからの水素分離のためにPSAを想定 ・系統電力のCO ₂ 排出係数は2010年の0.35kgCO ₂ /kWhを想定
	石油化学	N.A.	
目的生産 (既存設備)	石油精製	0.95, 1.08, 1.13 (都市ガス,LPG,ナフサ)	・改質効果は70%を想定 ・改質後は水素生成にPSAを想定 ・系統電力のCO ₂ 排出係数は2010年の0.35kgCO ₂ /kWhを想定
	アンモニア		
目的生産 (新規設備)	化石燃料等改質		
	水電解	0.00～1.78 (再生可能エネルギー～系統電力)	・電解効果は70% ・系統電力のCO ₂ 排出係数は2010年の0.35kgCO ₂ /kWhを想定
将来技術	光触媒	製造段階では排出なし	
	ISプロセス	熱源のCO2排出量による	

製造方法別の経済性

	方 法	製造コスト (円/Nm ³)	
副生水素	苛性ソーダ	20	
	鉄鋼	24～32	・各種資料から12～20円/Nm³ ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置付けに関する調査報告書」、(平成15年)では16.3円/Nm³である。最新のエネルギー価格28.1円/Nm³となり、上記に比べ12円の上昇。
	石油化学	20	・各種資料からの引用。
目的生産 (既存設備)	石油精製	23～37	・各種資料から10～24円/Nm³
	アンモニア	N.A.	
目的生産 (新規設備)	化石燃料等改質	31～58	・改質器の設備費は含まず、ランニングコストのみ。 ・改質率は70% ・都市ガス(工業・商業用)1.7円/MJ,重油1.4円/MJ,LPG2.9円/MJ,ナフサ1.8円/MJ。 ・PSA用電力は0.33kWh/Nm³-H₂。2012年の電力平均単価16.5円/kWh。
	水電解	84(系統電力) 76～136 (風力～太陽光)	・電解装置の設備費は含まず、ランニングコストのみ。 ・改質率は70% ・系統電力は2012年の電力平均単価16.5円/kWh。 ・調達価格算定委員会資料に基づき、風力発電は30万円/kW,太陽光は10kW以上を29万円/kW, 10kW未満を38.5万円/kWとし、コスト等検証委員会の手法により発電単価を推計すると、各々14.9円/kWh, 23.6円/kWh, 26.8円/kWh。 ・水素製造は発電サイトでの電解を想定。送電コストは含まず。

(※) 電力料金、化石燃料価格等の上昇等に伴い、現在、コスト高。

圧縮水素の輸送と貯蔵

トレーラー

1車当たり積載量1,100～3,100m³



移動式

高圧水素供給設備
40MPa×240m³



簡易型
水素充填
設備



カードル

1基当たり
貯蔵量70～300m³



シリンダー

1本当たり
貯蔵量7～10m



液化水素の輸送と貯蔵

ローリー 液化水素 約23,000ℓ



小型容器 400ℓ

小型コンテナ

液化水素
1,900ℓ、2,400ℓ



40フィートコンテナ 液化水素 約40,000ℓ以上



液化水素型
移動式水素
ステーション





水 素

- 燃焼時に出るのは水だけ。質量当たりの熱量が大。
- 石油精製における脱硫や石油製品に利用。小規模では、半導体、ステンレス鋼の光輝焼鈍や食品産業等でも利用。
- 定置用燃料電池や燃料電池自動車等の技術の進展、水素ガスタービン等の水素利用技術の進展、液化水素や有機ハイドライド等の輸送・貯蔵の進展で、水素のエネルギーとしての活躍が今後拡大予想。

工業用途

金属



半導体



ロケット燃料



光ファイバー



石油



燃料電池
技術等
の進展

エネルギー利用

自動車



バス



フォークリフト



家庭用燃料電池



水素タービン



現在

実用段階

将来

工業プロセス利用



石油精製



光ファイバー製造

宇宙



ロケット燃料

輸送



燃料電池自動車
(FCV)

民生用



家庭用燃料電池
(エネファーム)

発電



水素発電
業務用・産業燃料電池

民生用



ポータブル
燃料電池

輸送



業務用車両
(燃料電池バス、フォークリフト)



燃料電池鉄道車両

燃料電池
スクーター



特殊用途



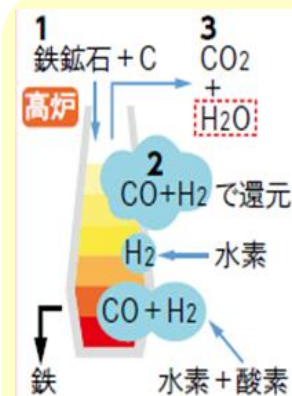
調査用潜水艇
潜水艦等

各種補助電源



冷凍トラック
特殊車両等

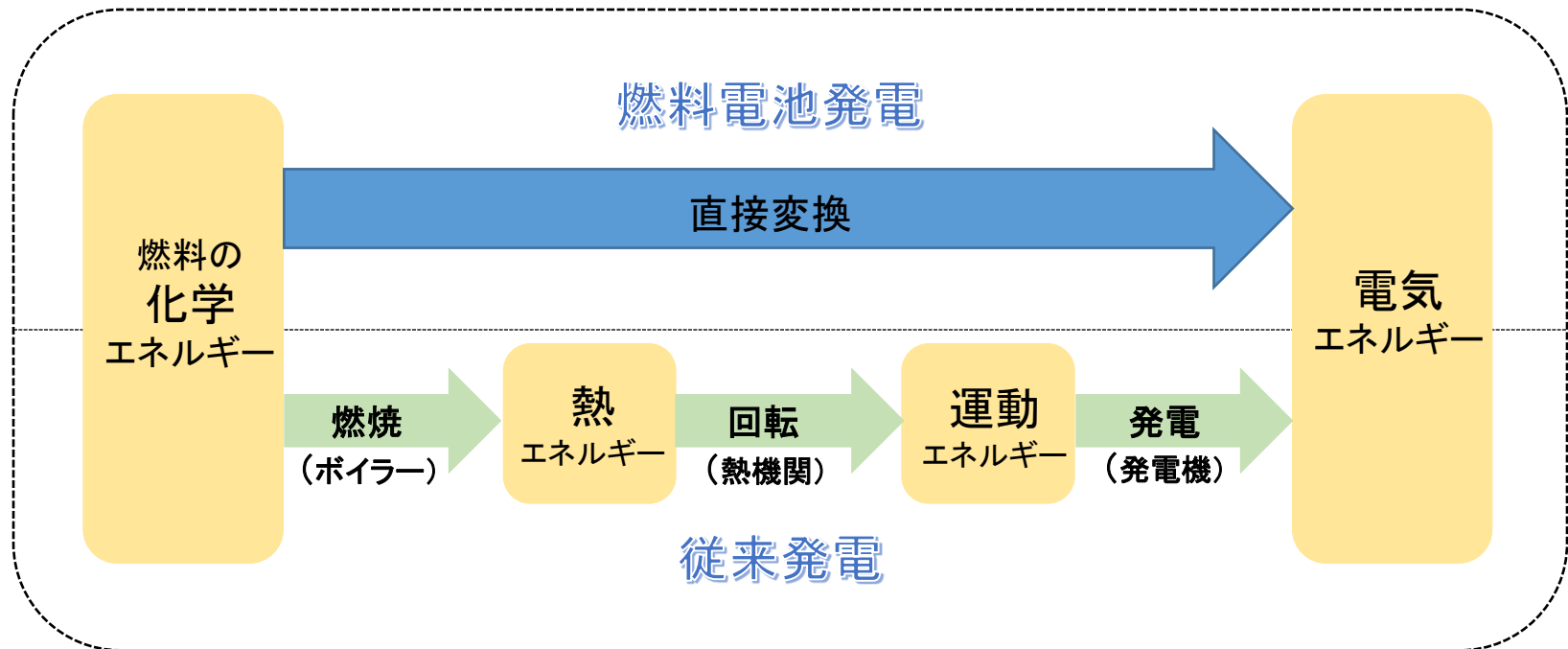
工業プロセス利用



水素還元製鉄

発電の効率が高い

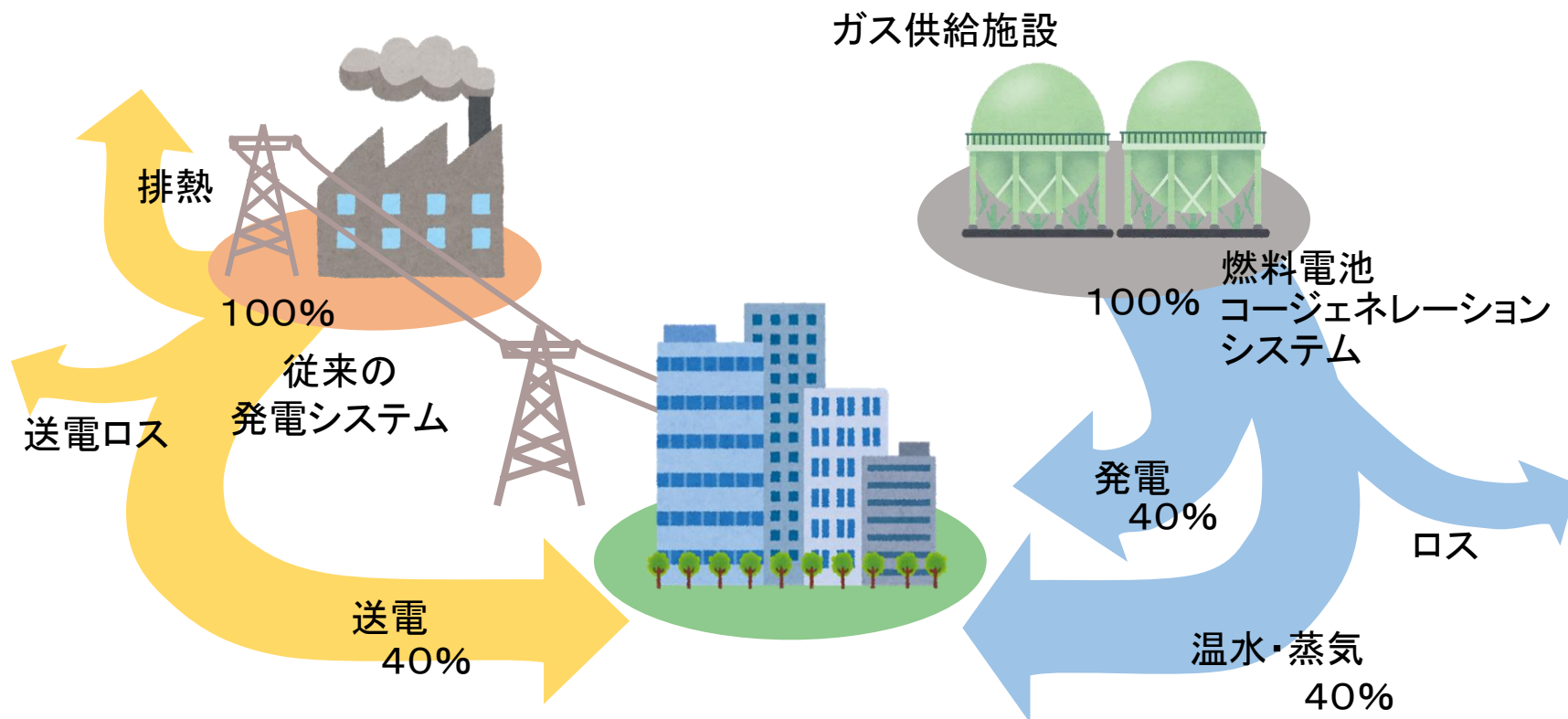
- 燃料電池は、電気化学反応の燃料の化学エネルギーを電気エネルギーに変換。今までの発電のように、「化学エネルギー（ボイラーで燃やす）→熱エネルギー（熱でタービンを回す）→運動エネルギー（電気に変える）→電気エネルギー」というふうに、エネルギーの形を何度も変える時に発生する損失が少ないので、発電効率が低い。

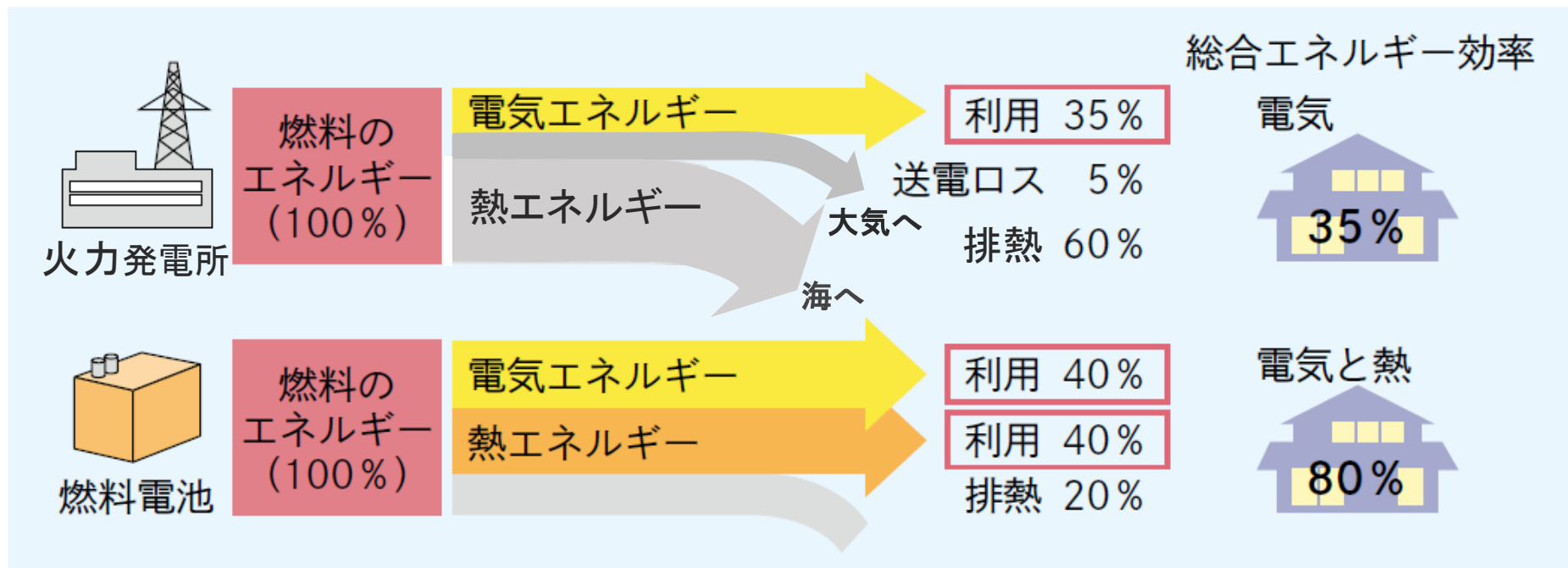




排熱が利用できる

- 燃料電池は、水素と酸素が反応する時に出る熱でお湯ができる。都市ガスのエネルギーの約40%が電気に、約40%が温水や蒸気になり、合計約80%が有効に利用できる。





エネルギーの有効利用率

火力発電所

35%(電気)

燃料電池

80%(電気(40) + 熱(40))



代表的な燃料電池

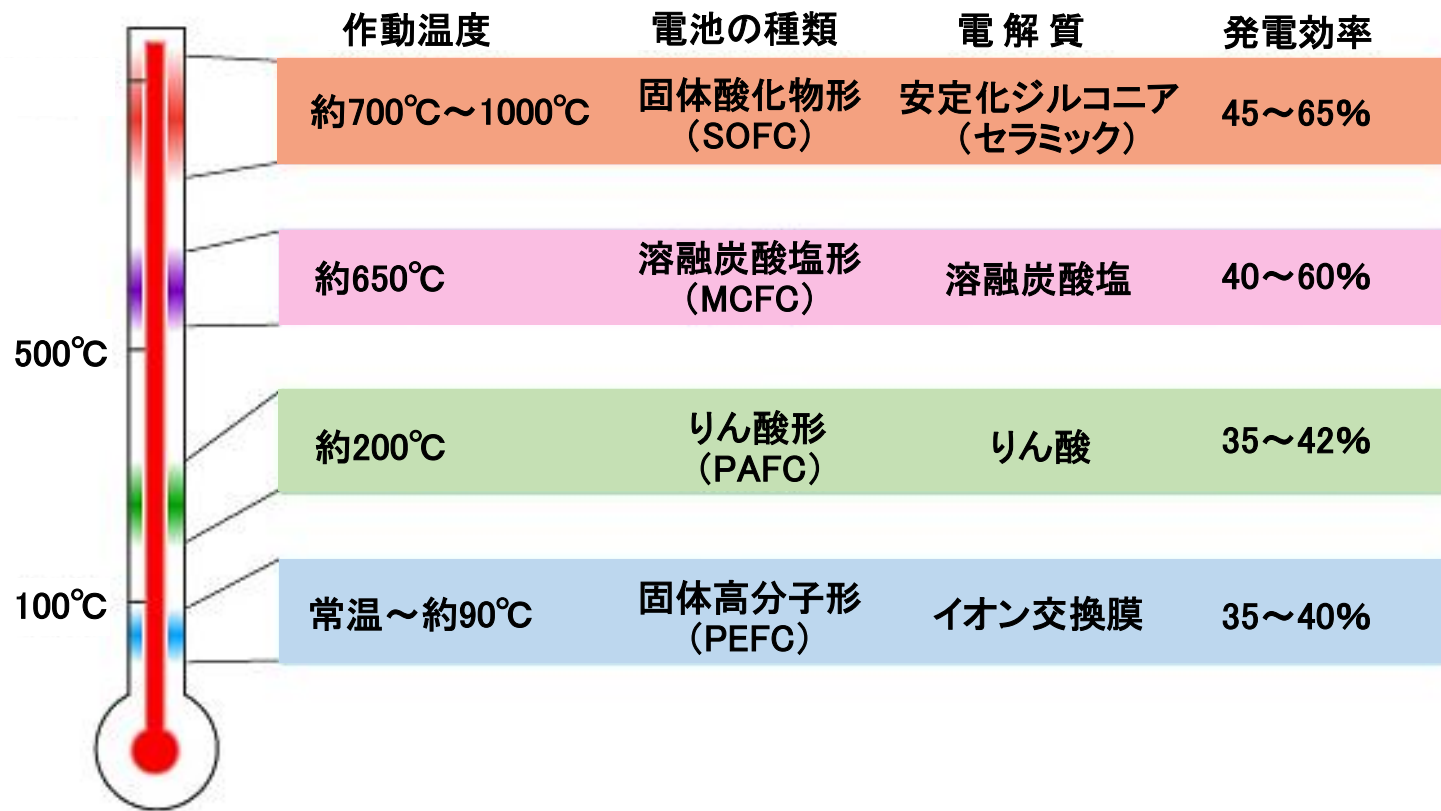
- 乾電池に、マンガン、アルカリ、リチウムなどの種類があるように、燃料電池にも電解質によっていくつかの種類がある。

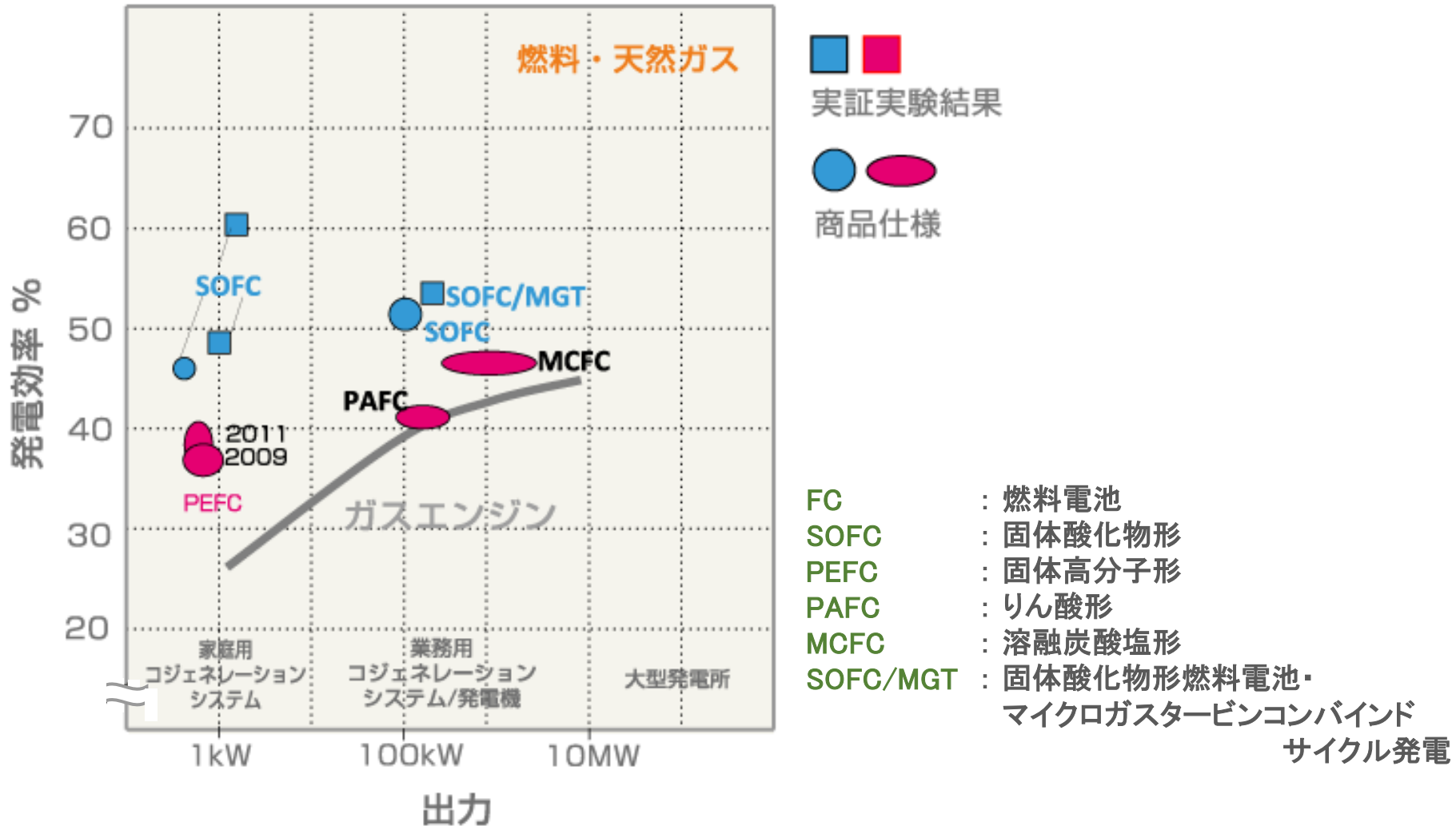
	固体高分子形 (PEFC)	リン酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体電解質形 (SOFC)
原 料	都市ガス,LPG等	都市ガス,LPG等	都市ガス,LPG,石炭等	都市ガス,LPG等
作 動 気 体	水素	水素	水素,一酸化炭素	水素,一酸化炭素
電 解 質	陽イオン交換膜	リン酸	炭酸リチウム 炭酸カリウム	安定化ジルコニア
作 動 温 度	常温～約90℃	約200℃	約650℃	約1000℃
発 電 出 力 発電効率 [LHV]	～50kW (35～40%)	～1000kW (35～42%)	1～10万kW (45～60%)	1～10万kW (45～65%)
開 発 状 況	実用化	実用化	研究段階	研究段階
用途と段階	家庭用,小型業務用, 自動車用,携帯用 導入普及段階	業務用,工業用 導入普及段階	工業用,分散電源用 実証段階 (1MWプラント開発)	工業用,分散電源用 試験研究段階 (数kWモジュール開 発)



燃料電池の種類

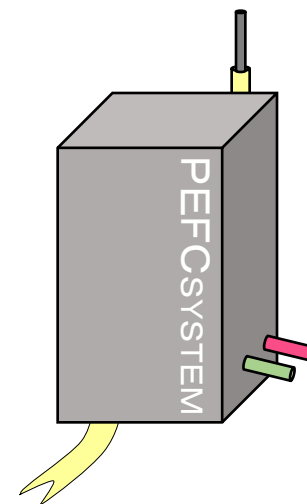
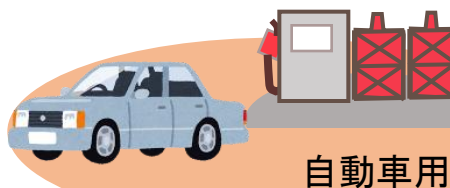
燃料電池には、電解質の違いにより4種類あり、それぞれの作動温度、発電効率が異なる。





家庭用、携帯用、自動車用として適している「PEFC(固体高分子形燃料電池)」

- 常温から発電できるので、起動が早い。
- 発電時、本体の温度が90℃以下におさえられるので、プラスチックなどの安い材料が利用でき、コストダウンが図れる。
- 電解質が薄い膜なので電気抵抗が小さく、電気の損失が少ない。他のタイプの燃料電池よりセルスタックを小さく軽くでき、保温材や補機(昇圧用コンプレッサー等)も小さく軽くできる。

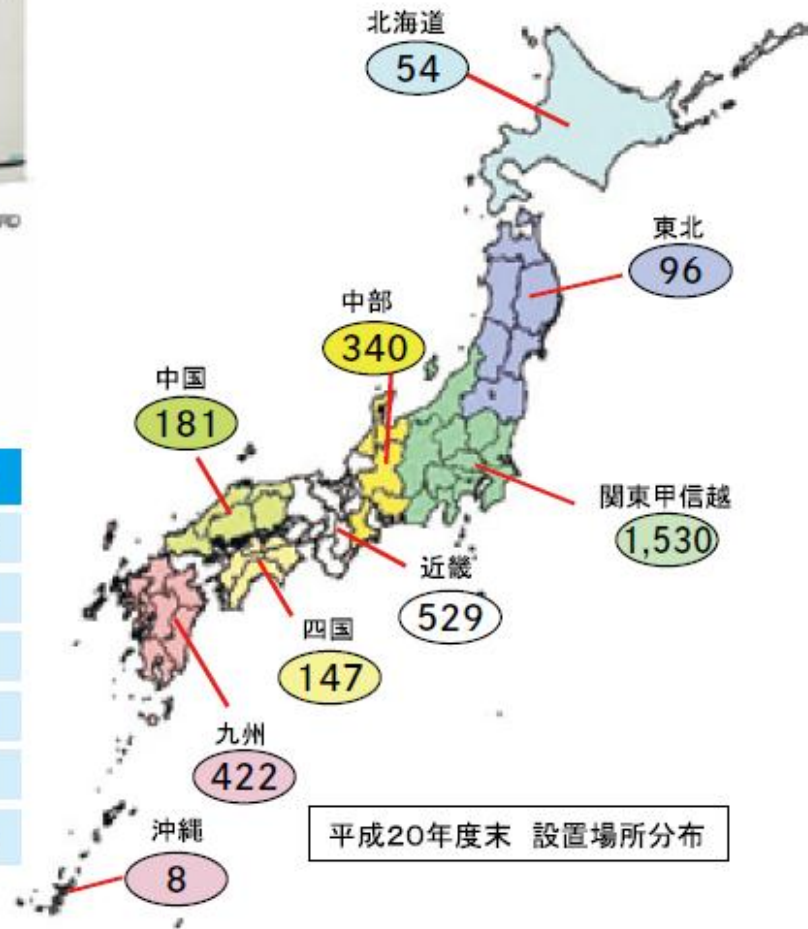




燃料電池メーカー	LPG	都市ガス	灯油	合計
ENEOS セルテック*1	1062	191	0	1253
荏原製作所	0	396	314	710
東芝燃料電池システム	553	195	0	748
パナソニック*2	0	520	0	520
トヨタ自動車	0	76	0	76
合計	1615	1378	314	3307

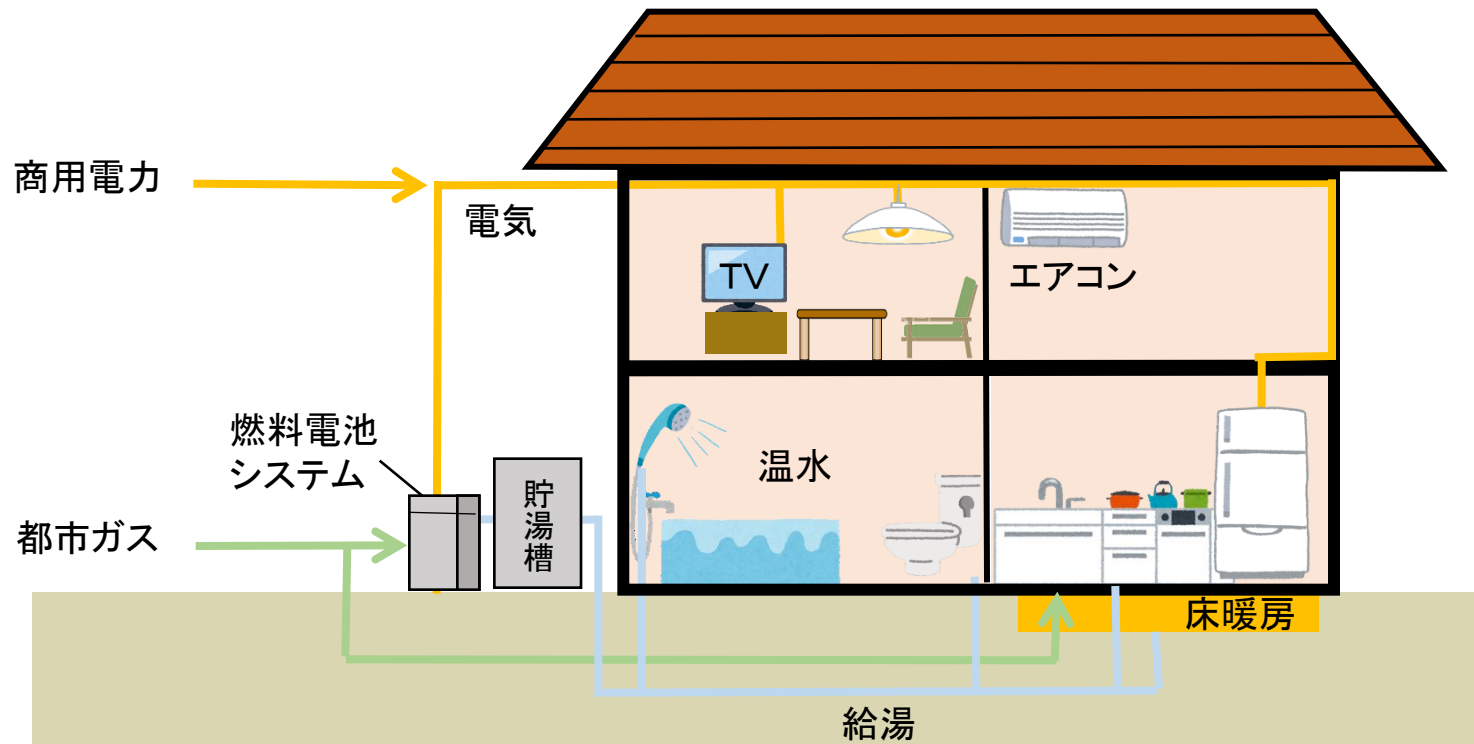
*1 新日本石油と三洋電機が設立した燃料電池専業会社 (H20/4～)

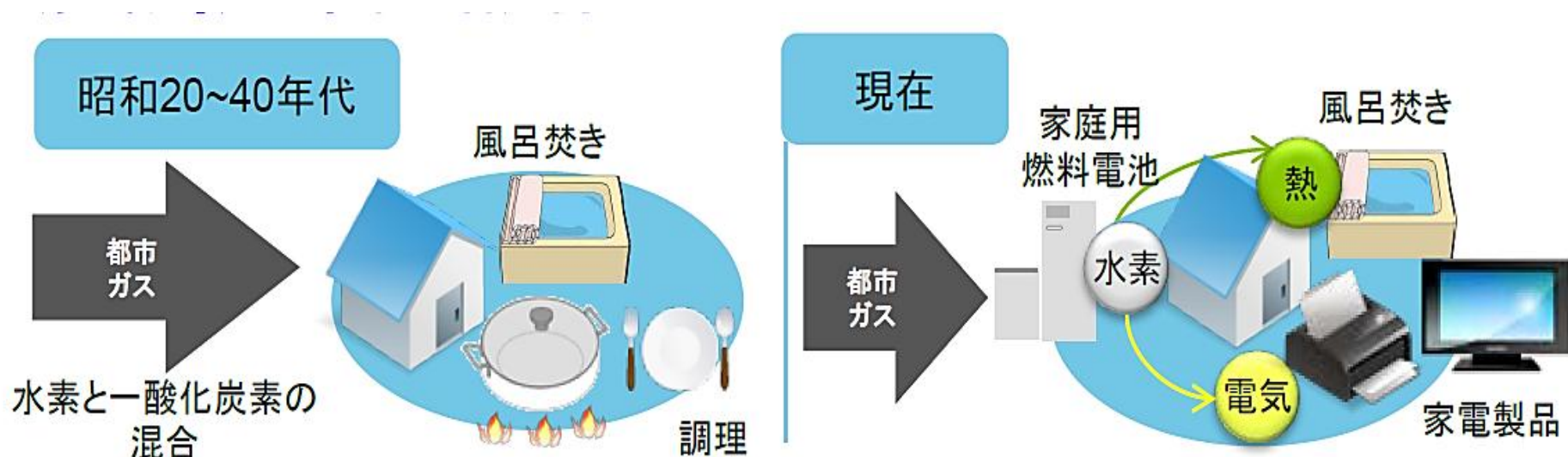
*2 (旧) 松下電器産業 (H20/10～)



コージェネレーションとは

- コージェネレーションとは、一つのエネルギーから、電気と熱を同時に作り、エネルギーを有効利用するシステム。
- 燃料電池は、水素と酸素の化学反応で電気を作る。装置内に電気抵抗があり、一部が熱エネルギーとなる。
- 装置の温度の上昇を防ぐために、冷却水を通す。冷却水はお湯になり、家庭で給湯や暖房として、利用できる。

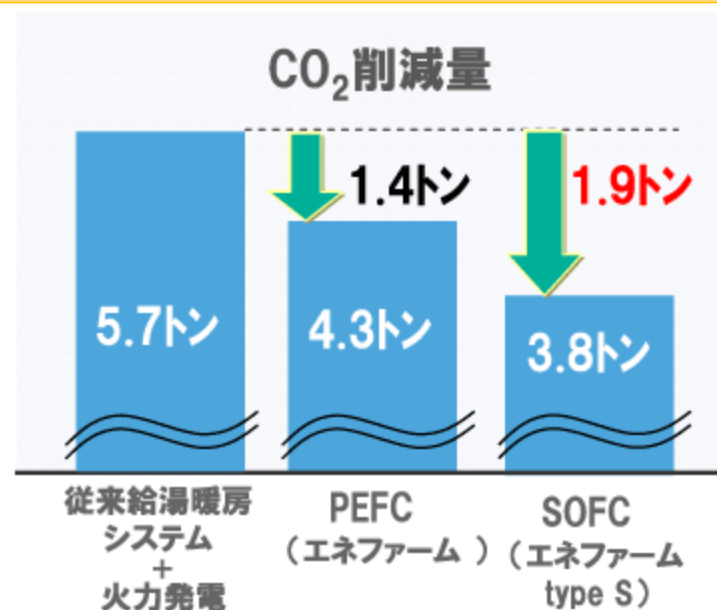
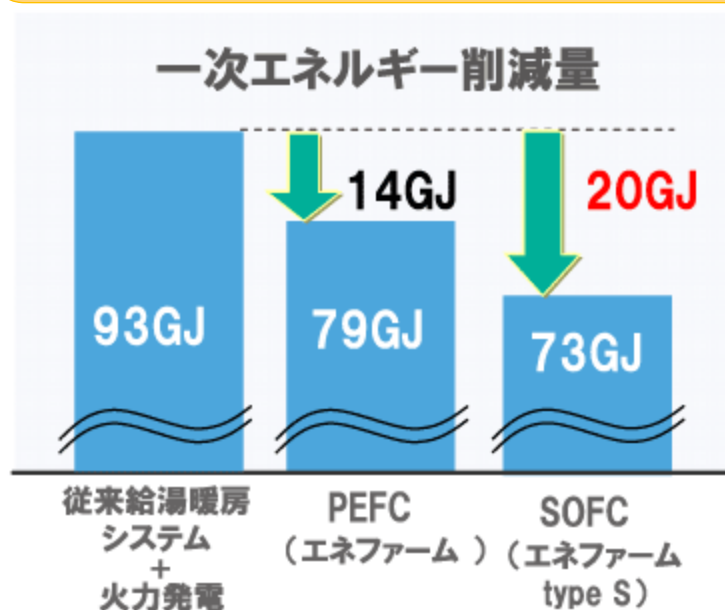




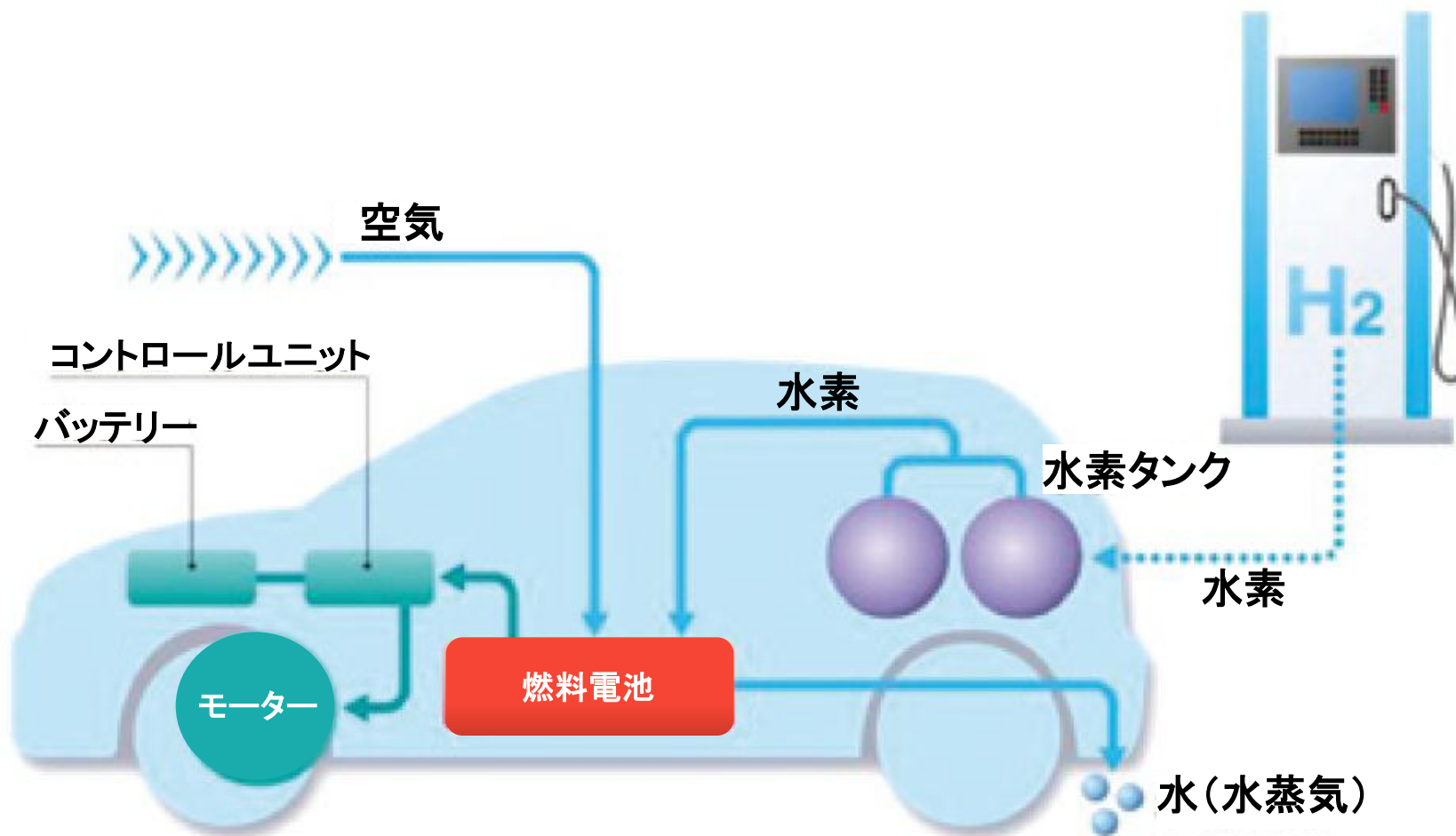
出所: 岩谷産業株式会社、水素エネルギー協会「水素エネルギー読本」、財団法人日本自動車研究所

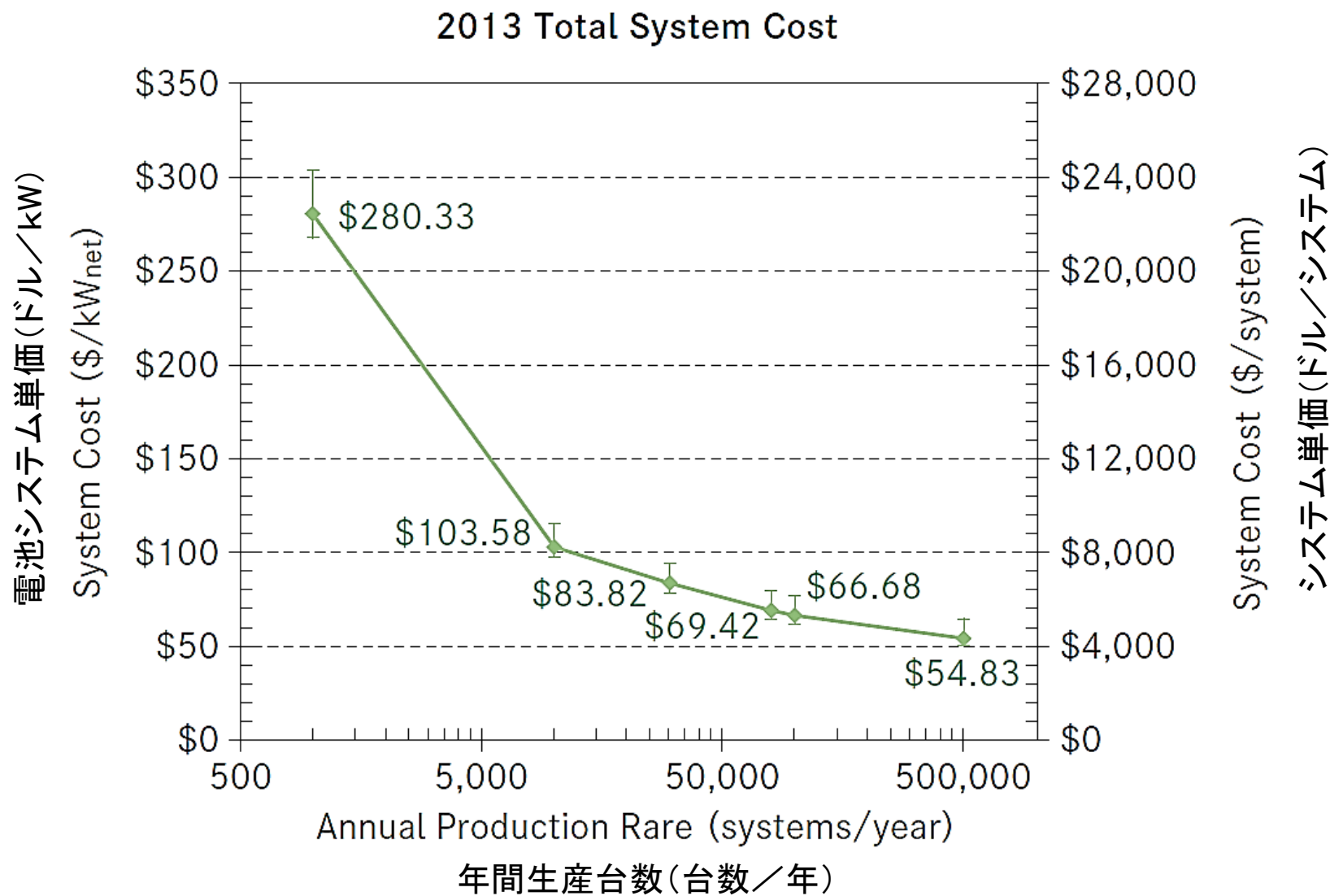


従来システムと比べて、一次エネルギー削減量**20GJ**／年、CO₂削減量は**1.9トン**／年



エネファーム：家庭用燃料電池







トヨタ FCV “MIRAI”

- ・ 2014 年 12 月 15 日 国内市販開始
- ・ 水素：70 MPa 対応
- ・ 航続距離約 650 km
- ・ 4 名



ホンダ FCV CONCEPT

- ・ 2015 年度市販開始
- ・ 水素 70 MPa 対応
- ・ 航続距離 480 km 以上
- ・ 5 名



Hyundai Tucson FCEV

- ・ 2014 年に米国でリース開始
- ・ 水素 70 MPa 対応
- ・ 水素を無料提供



出典：各種資料より NEDO 作成

70MPa(メガパスカル)

圧力の単位 700気圧（海底7000mの圧力に相当）

	電気 EV	水素 FCV	バイオ燃料 内燃機関	天然ガス 内燃機関
Well to Wheel CO ₂	△～◎	△～◎	△～◎	○
供給量	◎	◎	△	○
航続距離	△	◎	◎	○
給油時間 (充電／充填)	△	◎	◎	◎
インフラ	○	△	◎	○

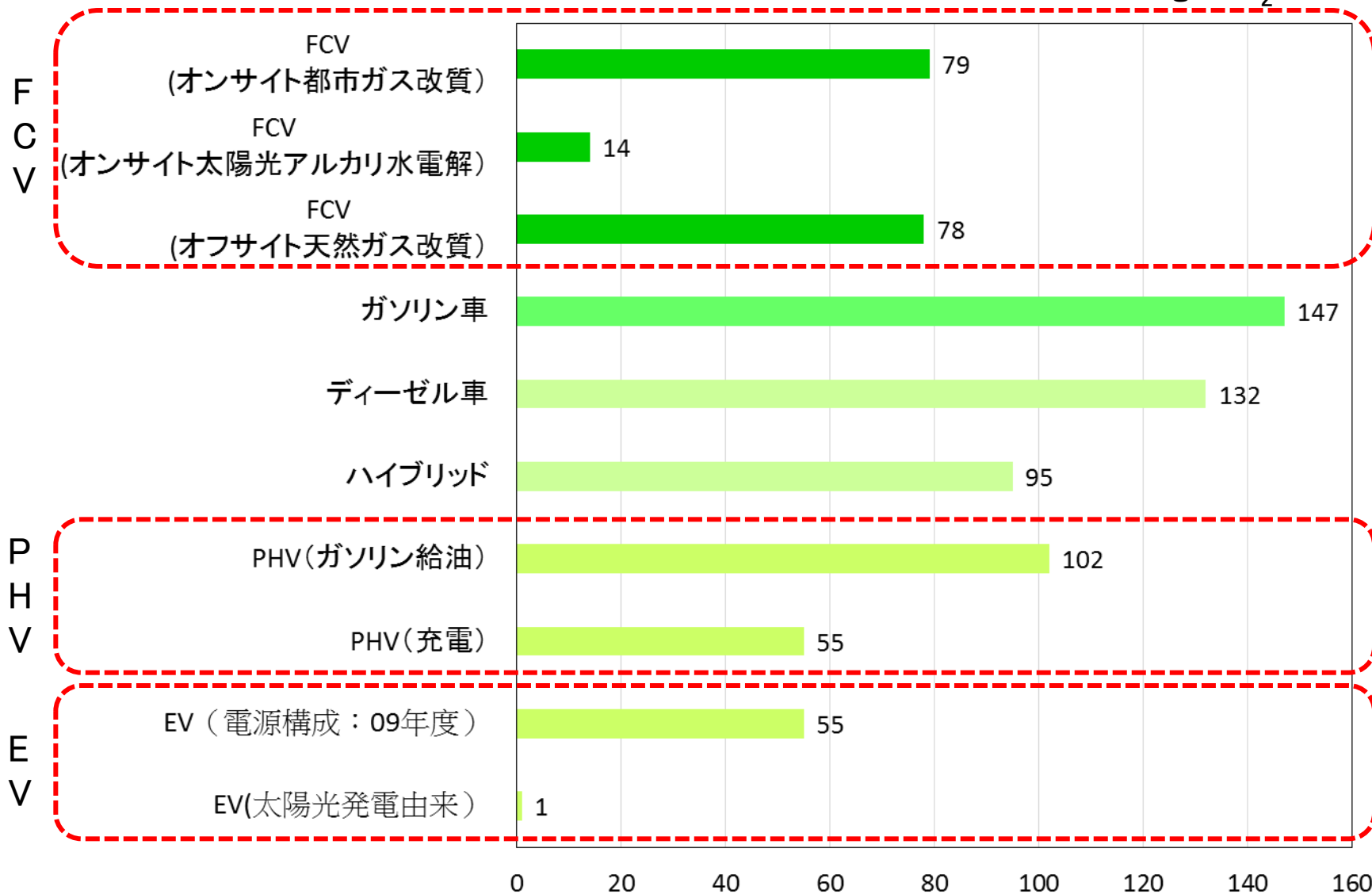
それぞれの代替燃料の特徴を活かして利用

Well to Whell：井戸元から車で利用されるまで



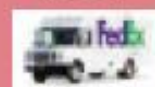
CO₂排出量(Well to Wheel※ JC08モード)

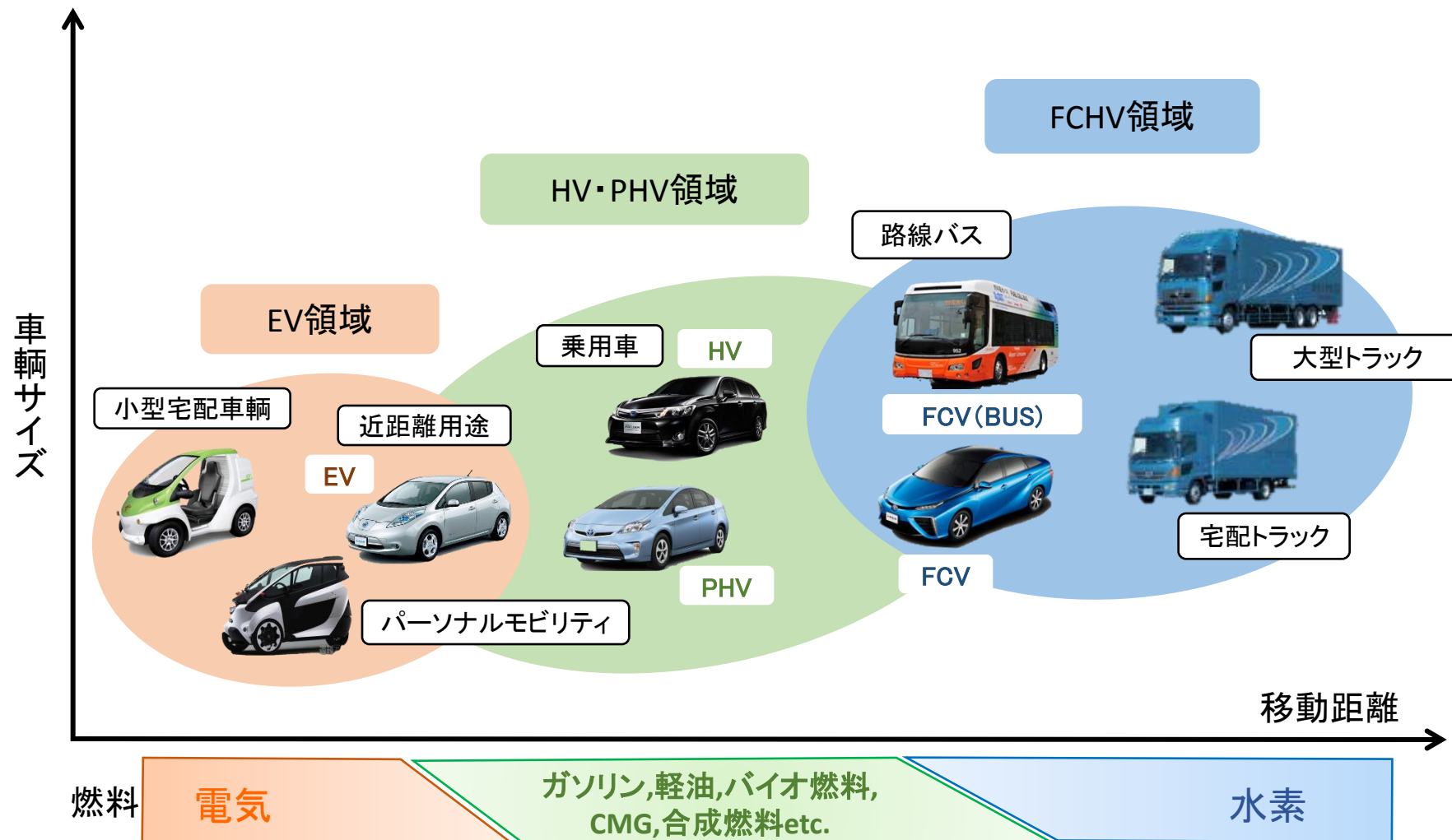
g-CO₂/km



※Well to Wheel : 井戸元から車で利用されるまで



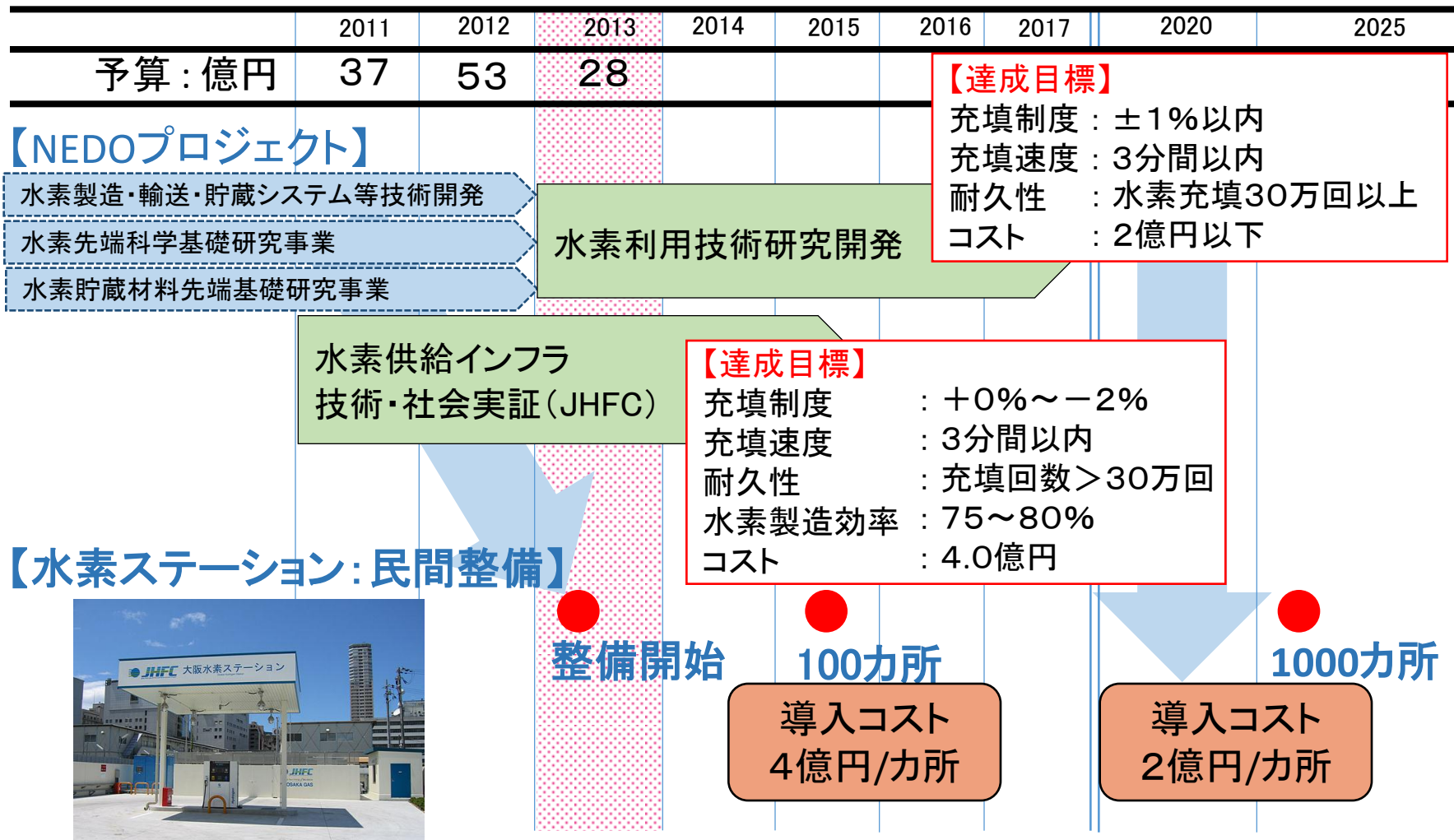
用途の拡大						
車種の拡大	乗用車	業務用車両	二輪車	バス	トラック	特殊自動車
	普通車  実用化水準	タクシー ハイヤー 	スクーター 	路線バス リムジンバス  実証・開発中	配送車  海外で 実証・開発中	フォークリフト  実証・開発中
	小型車  未定	実証・開発中	実証・開発中	コミュバス  未定	トラック  海外で 実証・開発中	農業機械  海外で 実証・開発中
	大型車  海外で 実証・開発中		中・大型バイク  未定	都市間高速バス 大型観光バス  未定	トレーラー  未定	建設機械  未定
			鉄道		船舶	
			鉄道車両  実証・開発中		船舶  海外で 実証・開発中	



EV: 近距離用、HV・PHV: 乗用車全般、FCV: 中長距離用途



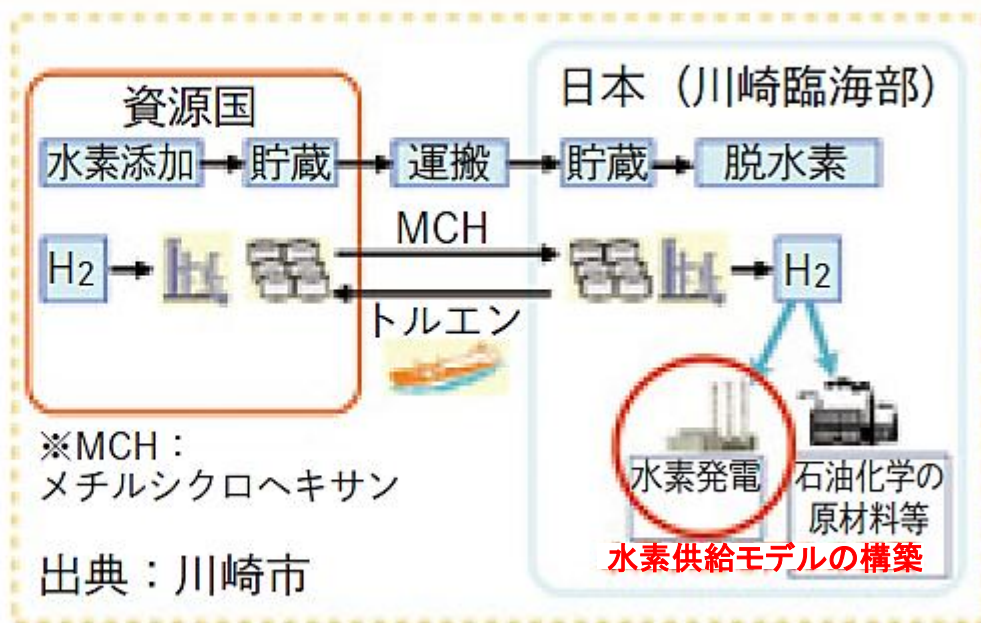
- NEDOプロジェクトでは、コスト低減のための要素技術、規制見直しに向けたデータの整備を実施。
- 民間企業では開発技術を用い、インフラを整備。



水素混焼発電

国内ではコークス炉ガスなど、水素リッチガスを燃料とするガスタービンの運転実績あり

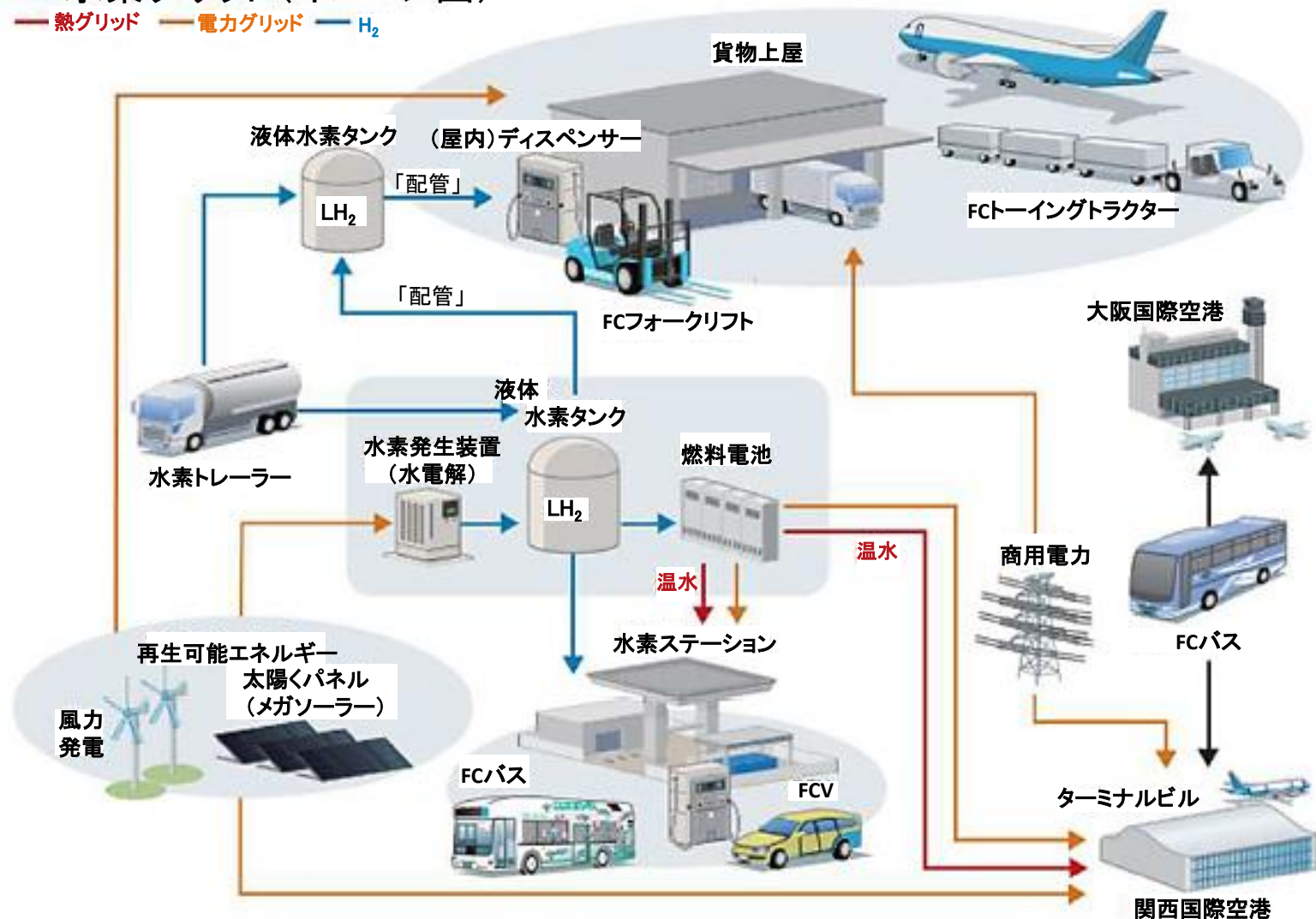
既存技術でも対応可能

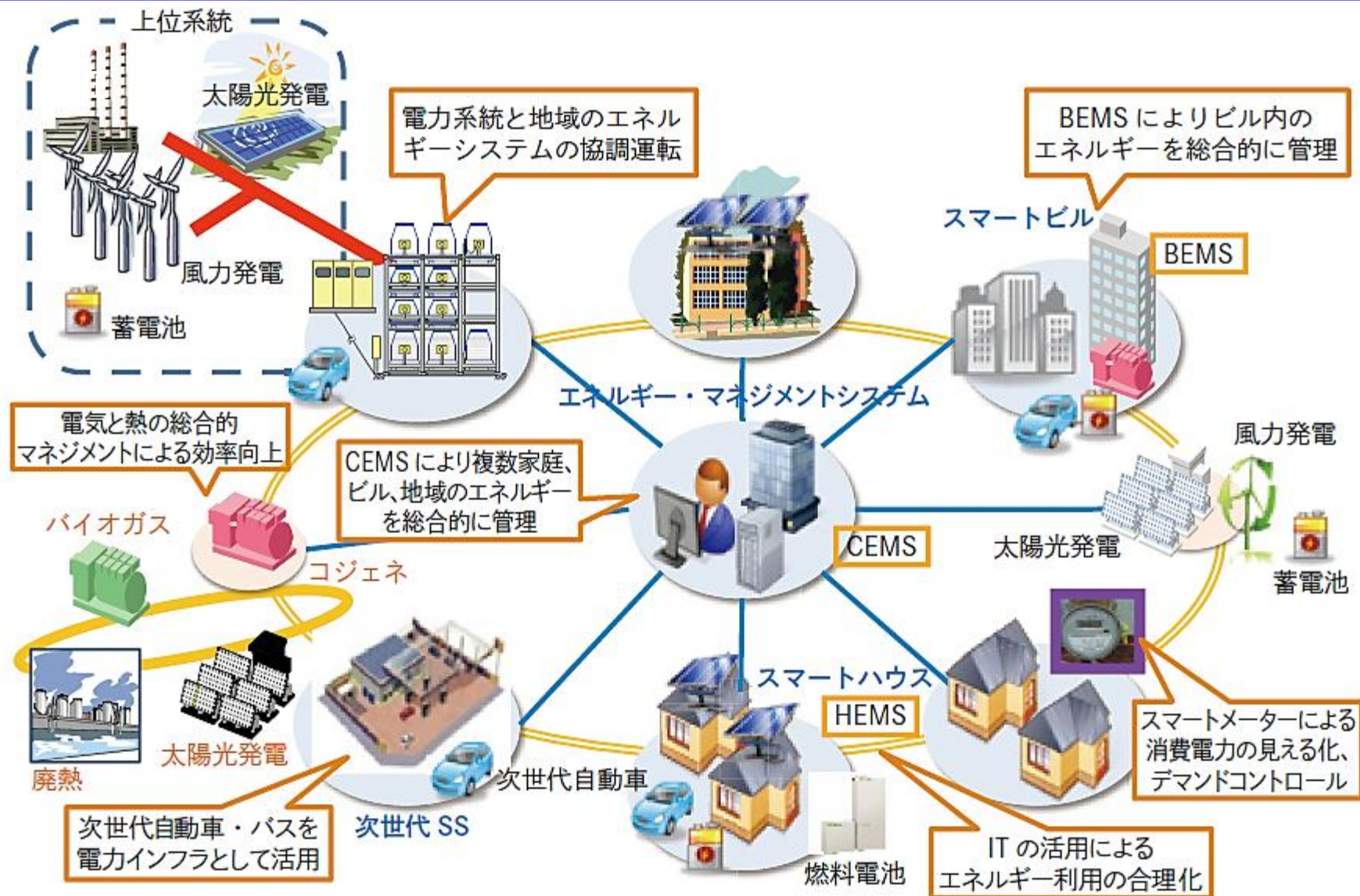


現在計画されている水素関連プロジェクトにも、水素発電を活用するものが存在。
(※事例は川崎市)

KIX水素グリッド(イメージ図)

— 熱グリッド — 電力グリッド — H_2





CEMS : コミュニティマネジメントシステム

BEMS : ビルマネジメントシステム

HEMS : ホームマネジメントシステム