

地球環境科学(第7回)

水素エネルギー利用技術の現状と将来展望

岡崎 健

機械制御システム専攻
(機械科学科)

2004年12月2日(木)

講義内容

1. 何故 今 水素なのか？ 水素導入の本質的意義
2. 水素導入に向けた国内外の取り組み
3. 水素だからこそできる高度エネルギーシステム

水素の優れた多角的機能(エネルギー源、エネルギーキャリア)の活用

水素タービン、水素ディーゼルコジェネ、固体高分子形燃料電池、
分散エネルギーシステム、熱・化学・電気-マルチパスエネルギーシステム、
バイオマスと水素 など

水素エネルギー導入に向けた現実的な中間シナリオ

化石燃料→水素、 副生水素利用、 将来:再生可能エネルギー → 水素
(FutureGen : 石炭ガス化→水素、CO₂:分離、回収、隔離)

4. 水素社会に向けたビジョンと課題

何故 今 水素なのか？

- ・ 環境問題の危機的状況

(グローバル および ローカル)

日本 13 億ton-CO₂/year

世界 250 億ton-CO₂/year

- ・ 化石燃料エネルギー資源の枯渇

(限られた埋蔵量)

水素導入は、水素エネルギーシステム全体として、これらの問題に対して、正味の寄与、量的寄与を有しなくてはならない。あるいは、短期的にはこれらの寄与が小さくても、中・長期的には大きな寄与が期待できるシナリオが描けなくてはならない。 → 水素社会へのソフトランディングシナリオ

必要条件

- ・地球環境保全対策
- ・化石燃料枯渇防除

(正味の寄与、量的寄与)

1. 一次エネルギーから最終消費に至る

総合効率の格段の向上 (クリーンな水素の使い方)

短期トリガー 水素燃料電池自動車？ 定置用燃料電池コジェネ

2. 副生水素の利用

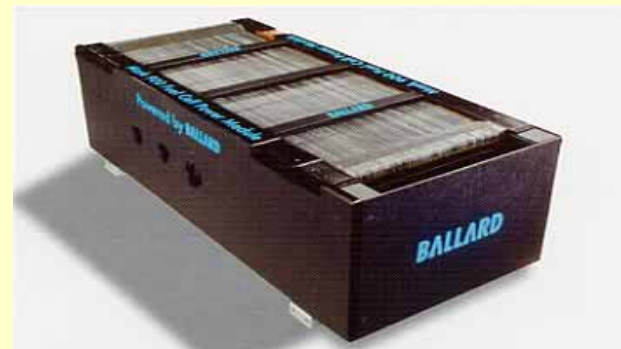
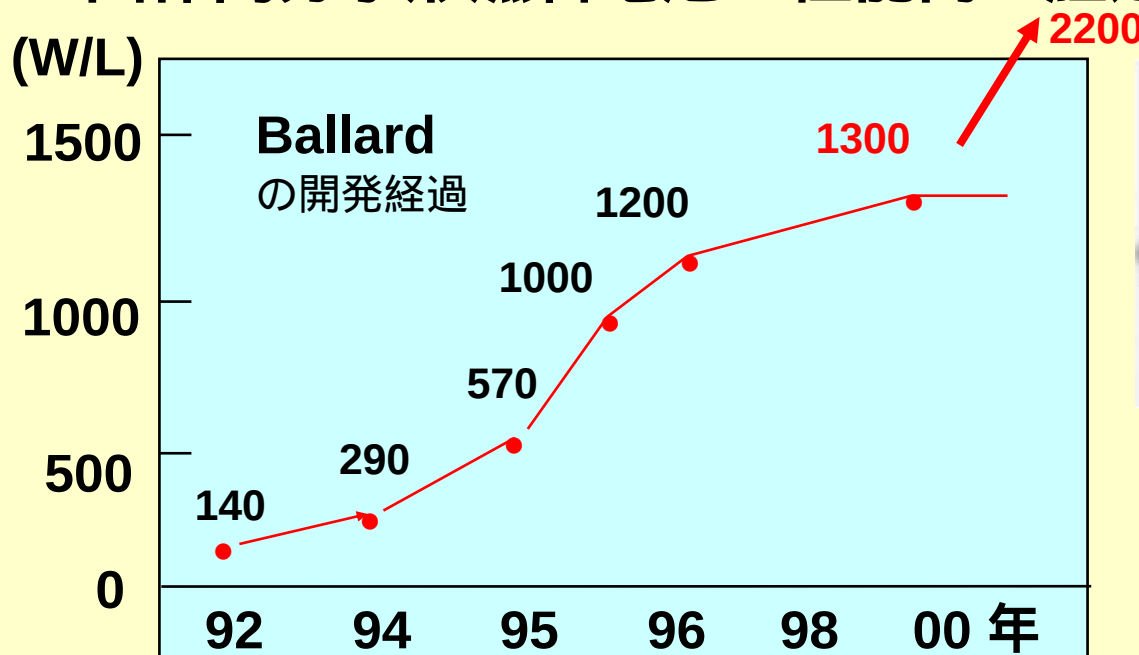
3. 再生可能エネルギー源の大量導入

(太陽, 風力, バイオマス など)

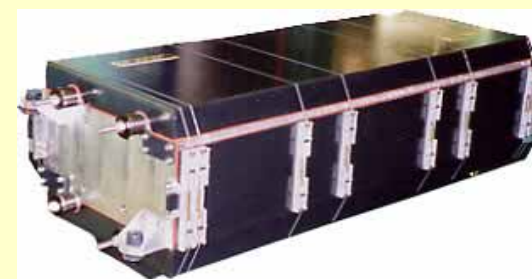
- ・水素エネルギー導入の究極の姿。
- ・現実的な中間シナリオが必要

自動車用燃料電池の開発状況（近年の水素導入機運のトリガー）

■ 固体高分子形燃料電池の性能向上経過



Ballard Mark 900. 80kW



IFC Series 300. 75kW

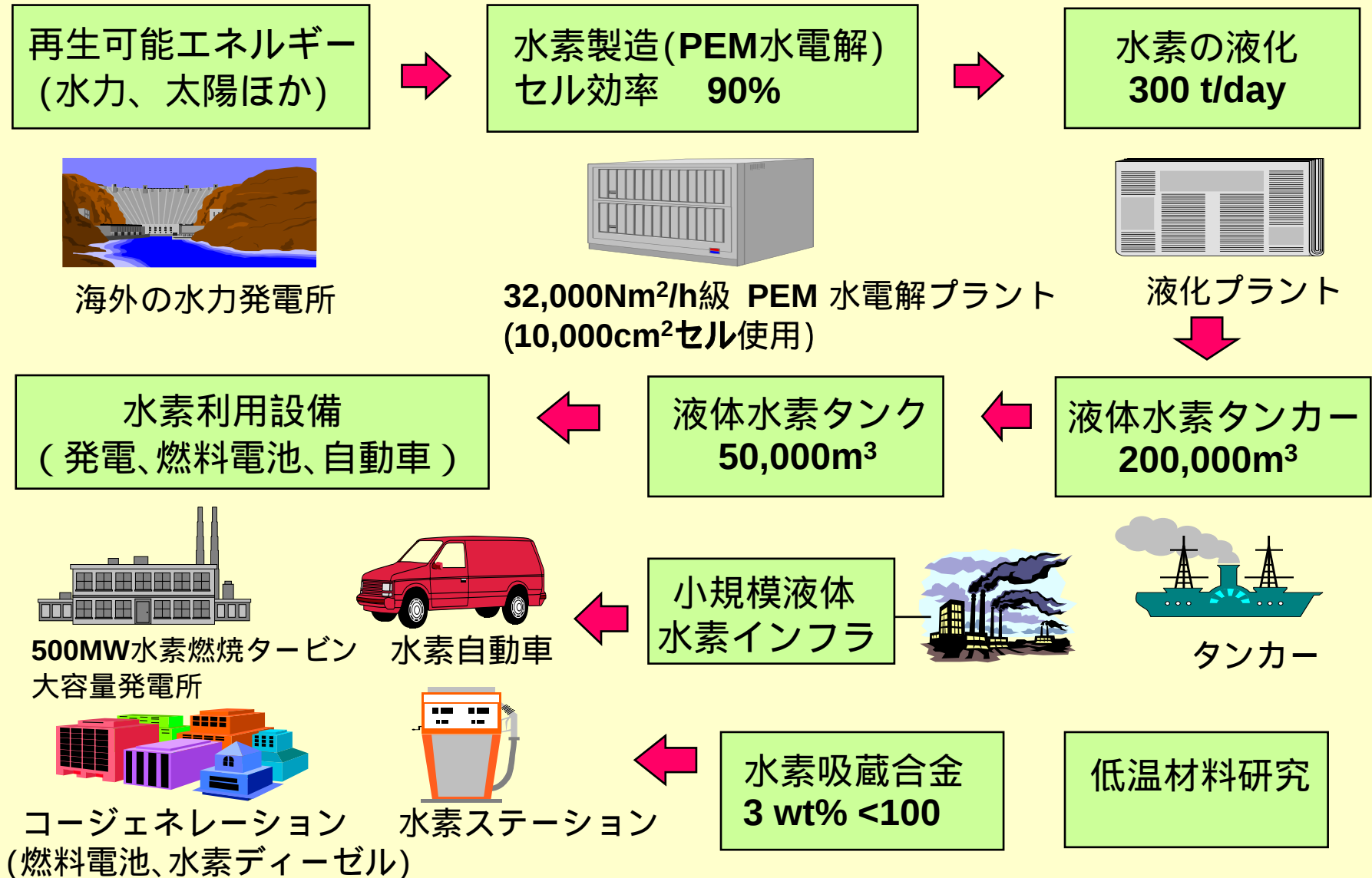
■ 燃料電池の課題

- ・ 長期寿命の検証
- ・ 発電システムの信頼性確立
- ・ コスト低減（5,000～10,000円/kW）

日本における水素導入の取り組み (WE-NET Project, 1993-1998, 1999-2002)

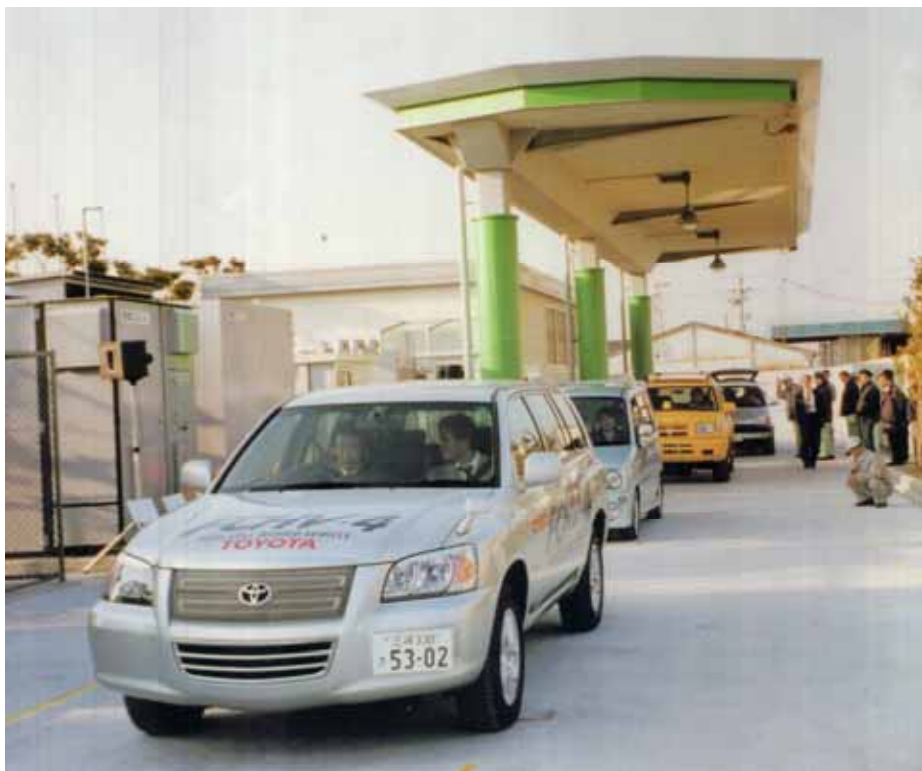
水素エネルギーシステムと技術開発目標

ENAA



Actual Activities in WE-NET Program

- Task 1 : Total Coordination, System Evaluation
- Task 2 : Safety Measures and Assessment
- Task 3 : International Cooperation
- Task 4 : H₂ Fueled Diesel Engine Co-generation System
- Task 5 : On-board MH-H₂ Storage System for FCV
- Task 6 : H₂ Fueled Stationary PEFC
- Task 7 : H₂ Refueling Station
- Task 8 : Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis
- Task 9 : Liquid H₂ Storage and Transportation
- Task 10 : Cryogenic Material
- Task 11 : H₂ Absorbing Materials
- Task 12 : Innovative and Leading Technologies



大阪水素供給ステーション
(天然ガス改質型)

(WE-NET : 1993-1998 Phase-I, 1999-2002 Phase-II)



鶴見水素供給ステーション
(副生水素利用型、イメージ図)

ENAA

California-Fuel Cell Partnership (各社の圧縮水素燃料電池車)

ENAA



Daimler-Chrysler
NECAR -Advance. GH₂



Honda FCXV3. GH₂



Ford Focus. GH₂



Hyundai FCEV. GH₂



GM Wagon. GH₂



Nissan FCV. GH₂

ヨーロッパのFCV実証プロジェクト

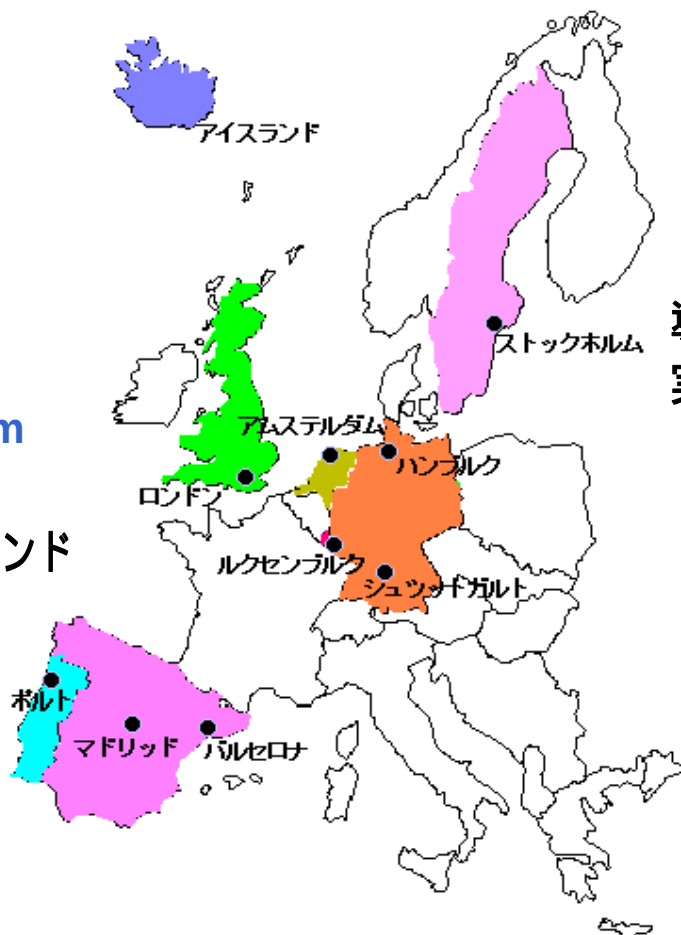
1. **CUTE** (Clean Urban Transport for Europe) & **ECTOS** (Ecological City Transport System)
2. **CEP** (Clean Energy Partnership)
3. **CITYCELL** (IRIS BUS)



CUTE & ECTOS の実施国・実施都市

ECTOS Ecological City Transport System

導入台数: 3台
実施国: アイスランド



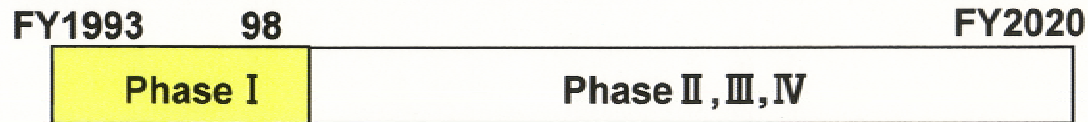
CUTE Clean Urban Transport for Europe

導入台数: 27台
実施都市: スtockホルム(スウェーデン)
ロンドン(イギリス)
アムステルダム(オランダ)
ハンブルク(ドイツ)
シュツットガルト(ドイツ)
ルクセンブルク(ルクセンブルク)
マドリッド(スペイン)
バルセロナ(スペイン)
ポルト(ポルトガル)

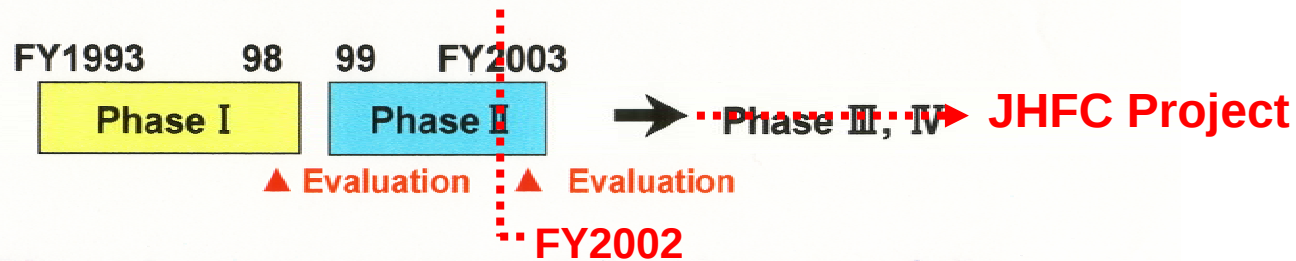


Schedule and Progress of WE-NET

- Original plan : 28 years, long term project



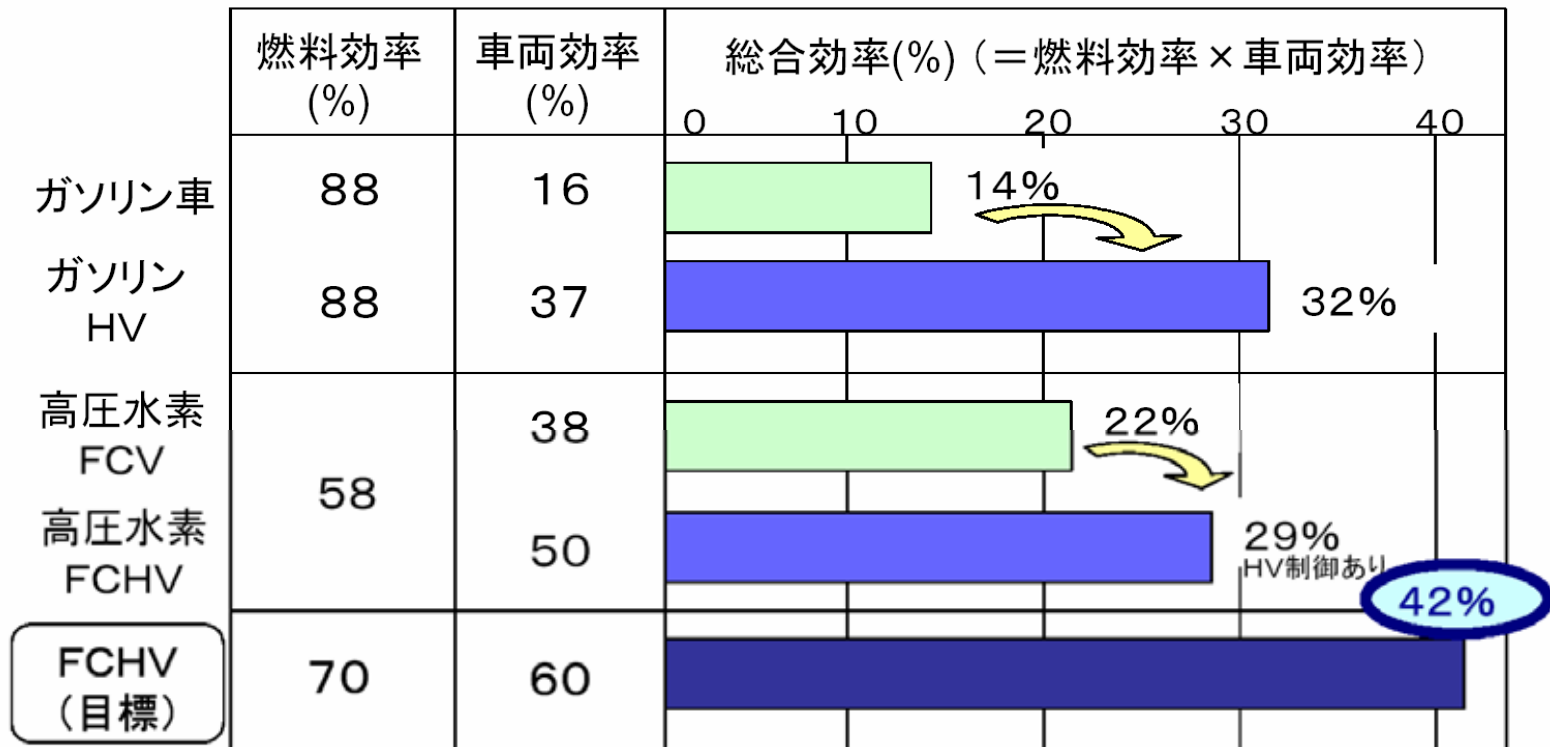
- Revised plan : Evaluate a project in max. 5 years but can be continued after evaluation



- Phase I program was completed successfully in FY1998 (March,1999).
- Phase II program has been started in FY1999 (April,1999) with new contracts.

But completed FY2002 (Mar. 2003),
and succeeded to a new project,
JHFC (Japan Hydrogen and Fuel Cell Development Project)

燃料電池自動車の総合効率(燃料効率×車両効率)



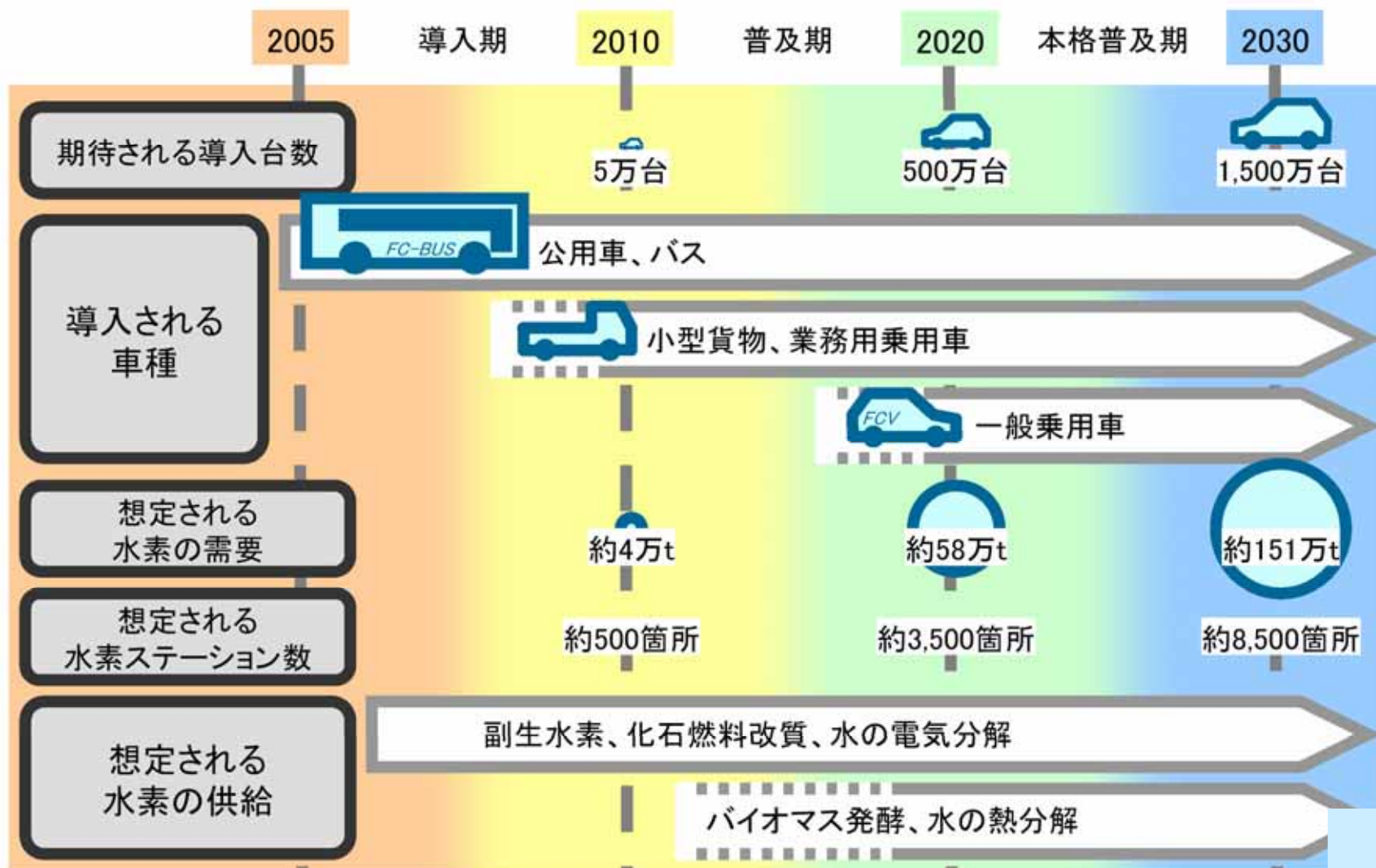
(トヨタ自動車資料より)

(注) HV : ハイブリッド自動車 (Hybrid Vehicle)

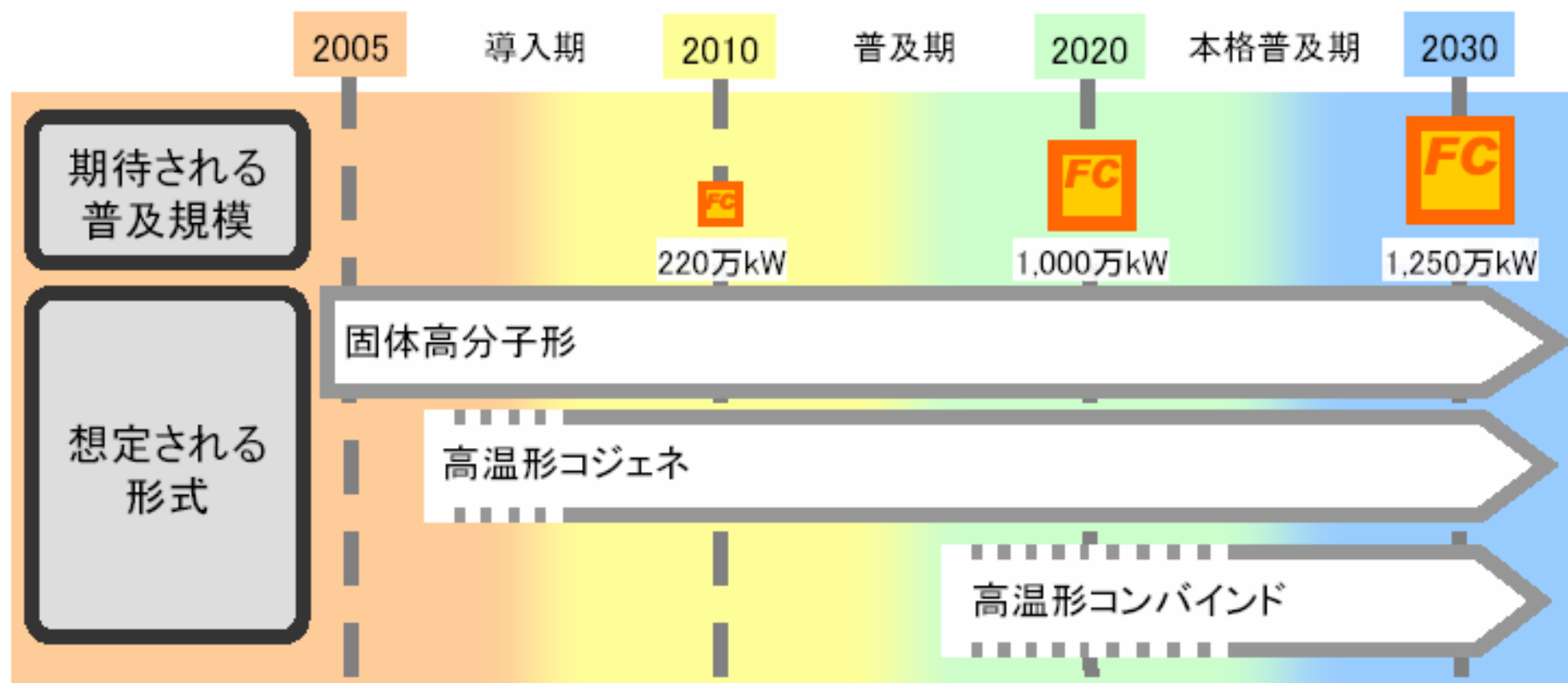
FCV : 燃料電池自動車 (Fuel Cell Vehicle)

FCHV : 燃料電池ハイブリッド自動車 (Fuel Cell Hybrid Vehicle)

水素エネルギー社会に向けたシナリオ (1) 燃料電池自動車



水素エネルギー社会に向けたシナリオ (2) 定置用燃料電池



「JHFC Park」 Showroom & Garage



(横浜市鶴見区大黒町)



JHFC Demonstration FCVs



Toyota FCHV



Nissan X-TRAIL



Honda FCX



Toyota/Hino FCHV-BUS2



Suzuki wagonR-FCV



DaimlerChrysler F-Cell



General Motors Hydrogen3



MITSUBISHI FCV

燃料電池自動車及びインフラ実証試験



実施体制(平成15年度)

経済産業省

[補助] 燃料電池自動車実証関係

(財)日本自動車研究所

ゼネラルモーターズ
ダイムラー・クライスラー
トヨタ自動車
日産自動車
本田技研工業
日本自動車研究所

NEW スズキ

NEW 日野自動車

NEW 三菱自動車工業

水素供給インフラ実証関係

(財)エンジニアリング振興協会

コスモ石油
新日本石油
東京ガス
日本酸素
昭和シェル石油
岩谷産業
ジャパン・エア・ガシズ

NEW 日本酸素

NEW 栗田工業

NEW シナネン

伊藤忠エネクス

出光興産

NEW バブcock 日立

新日本製鐵

水素ステーション設置状況



実証試験内容:

- 燃料電池自動車の公道走行試験
- 各種原燃料等を用いた水素供給ステーション運転試験

水素ステーションの取得データの検討

公表データ取得・整理(H15～)

旧JEVA取得データ(～H14)

(実測データについては、公表できる範囲で利用)

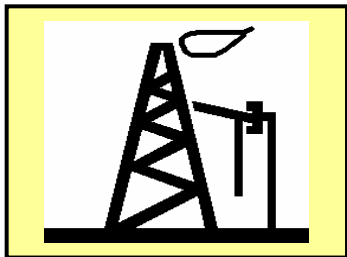
実測データ分析

運用・データ検討WG

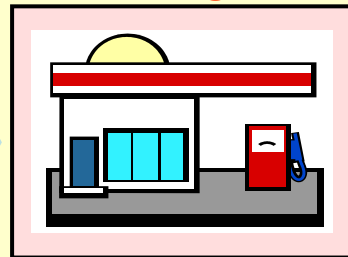
水素ステーション領域WG

自動車領域WG

W: Well

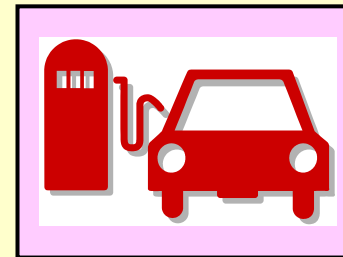


CT: Charge Tank



ステーションでの
燃料受入れタンク

FT: Fuel Tank



車両の燃料タンク

W: Wheel



Fuel Cell Bus Service in Tokyo

Term
Vehicle
Route

Aug. 2003 - Dec.2004
FCHV-BUS2 (1 unit)
2 routes of 20 to 40 km
3 to 4 round-trips per day

Ariake H2 Station



Tokyo Station

Service Route

Monzen-Nakacho

Ariake H2 Station

Tokyo Bigsite

Tokyo Teleport



水素利用技術の展開

水素だからこそできる

正味の総合効率の向上が可能な水素エネルギー利用技術

1. 水素タービン

(ガスタービンと蒸気タービンの双方の利点の結合)

2. 水素ディーゼルコジェネレーション

3. 固体高分子形燃料電池 (PEFC)

- PEFC 水素自動車、水素供給ステーション
- 水素をエネルギーキャリアとした分散エネルギーシステム

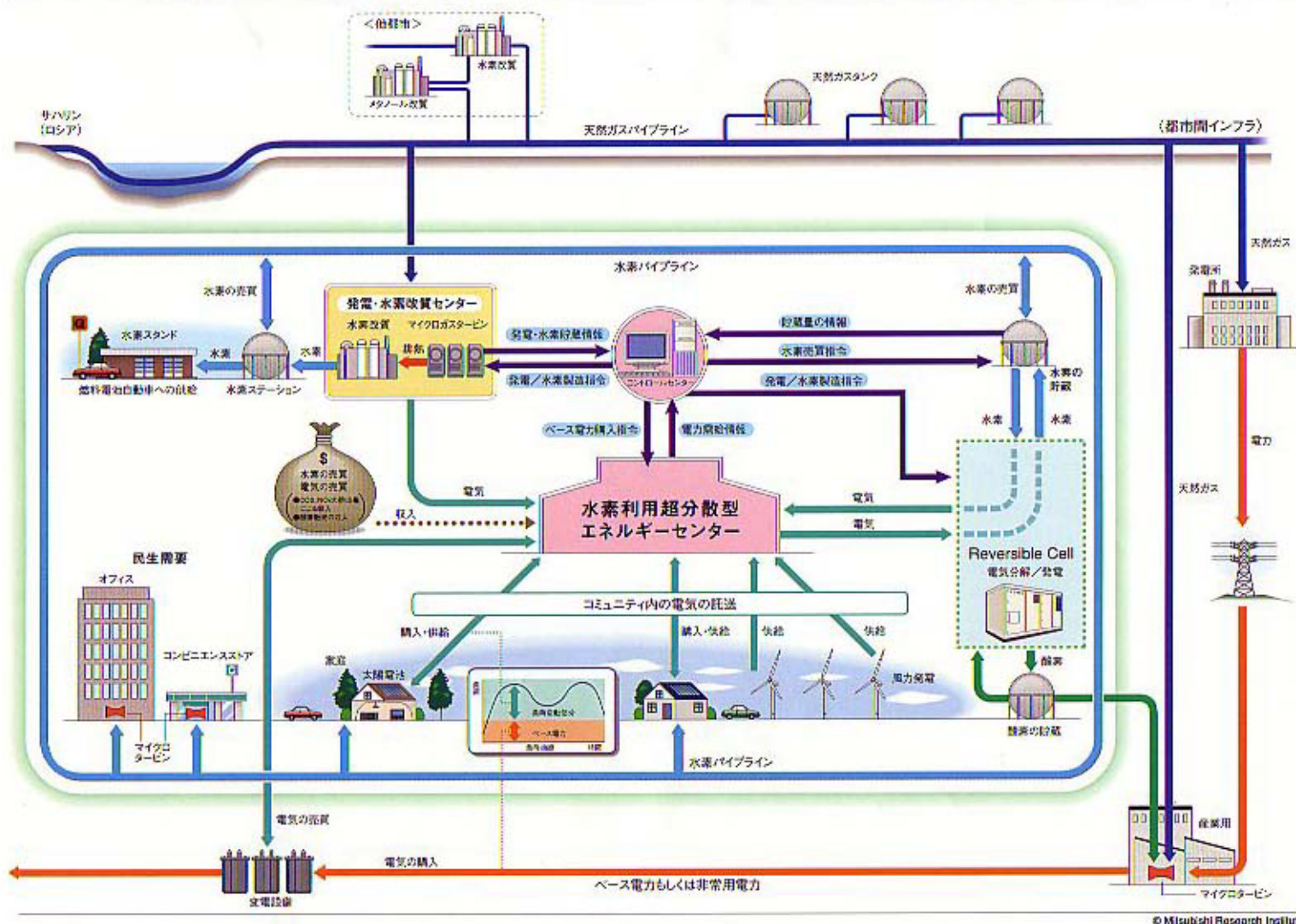
4. 水素を核としてエクセルギー増進を実現するマルチパス

エネルギーシステム

(熱 – 化学 – 電気、低質エネルギーの高質化再利用)

水素をエネルギーキャリアとした 超分散型エネルギーコミュニティ

水素利用超分散型エネルギーコミュニティ構想 — Reversible cellを用いた都市内エネルギーインフラの提案 —



(三菱総研
金田らによる)

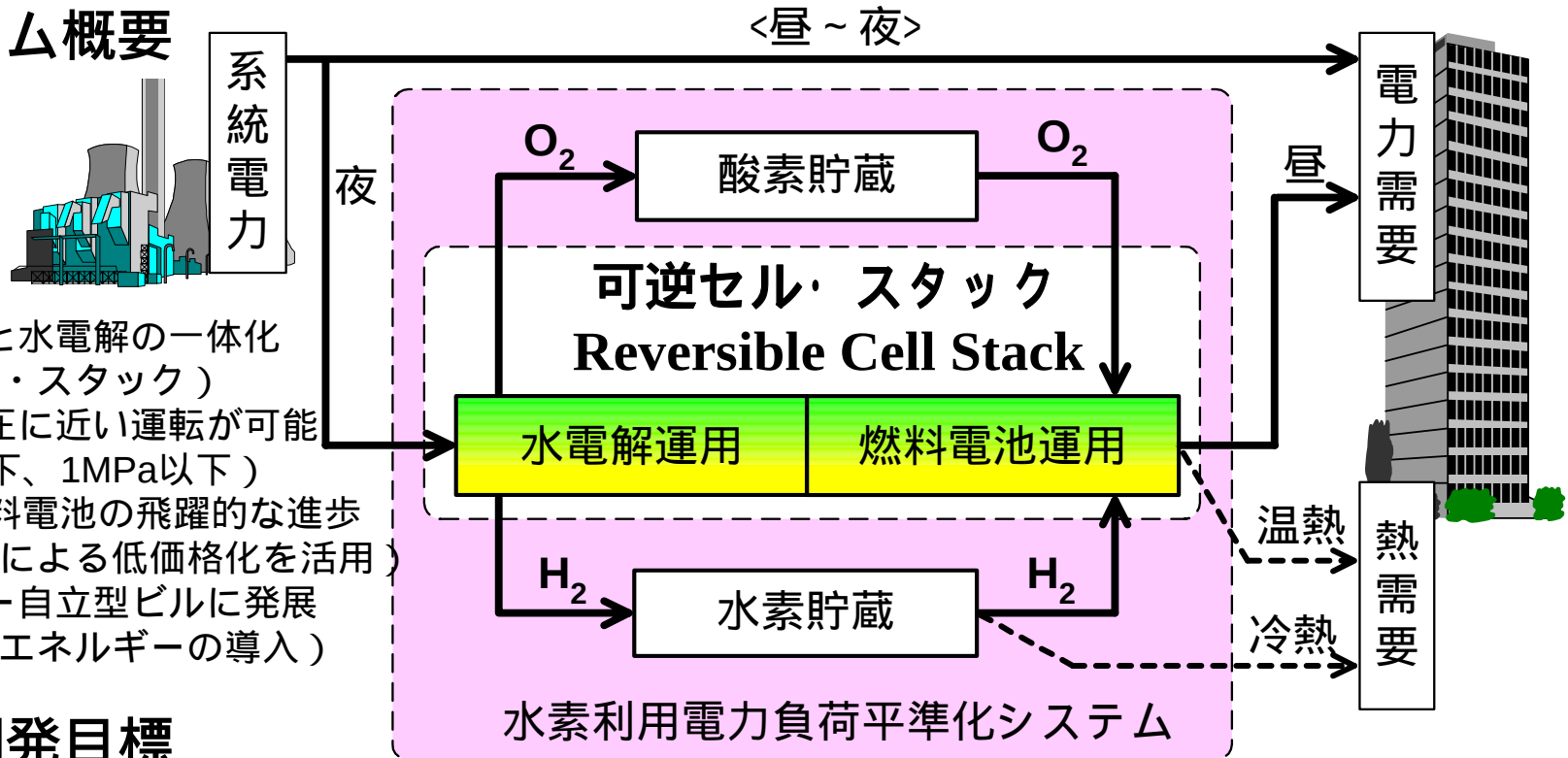
© Mitsubishi Research Institute

可逆セルスタックを用いた電力負荷平準化システム

■ システム概要

特徴

燃料電池と水電解の一体化
(可逆セル・スタック)
常温・常圧に近い運転が可能
(100℃以下、1MPa以下)
PEM型燃料電池の飛躍的な進歩
(量産効果による低価格化を活用)
エネルギー自立型ビルに発展
(再生可能エネルギーの導入)



■ 研究開発目標

kW級以上のPEM型可逆セル・スタックの開発

総合電気変換効率 : 45%以上

水素利用電力負荷平準化システムのシステム統合設計技術の獲得

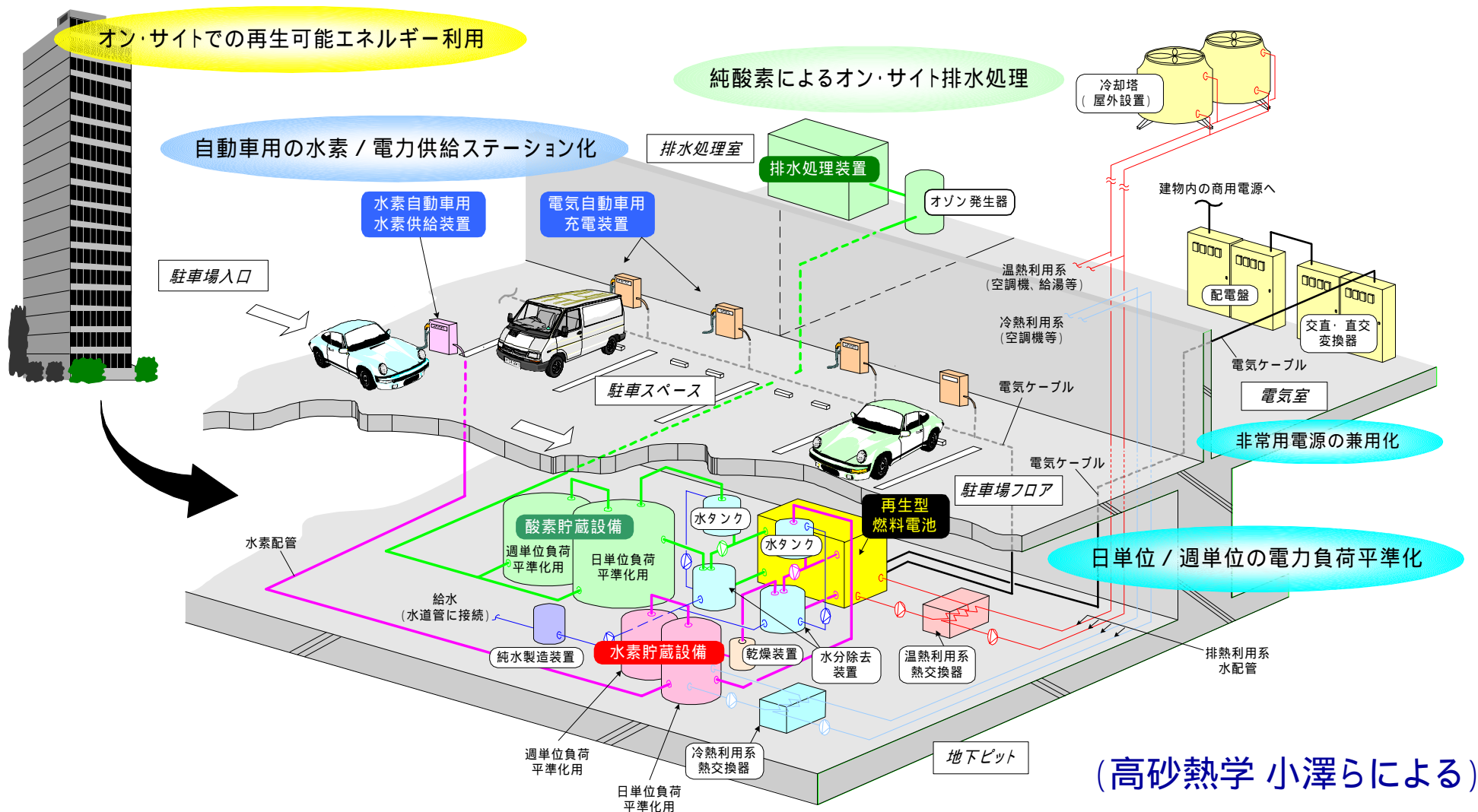
総合エネルギー利用効率 : 75%以上

エネルギー・コスト : 20%削減

電力の夜間移行率 : 50%以上

(高砂熱学 小澤らによる)

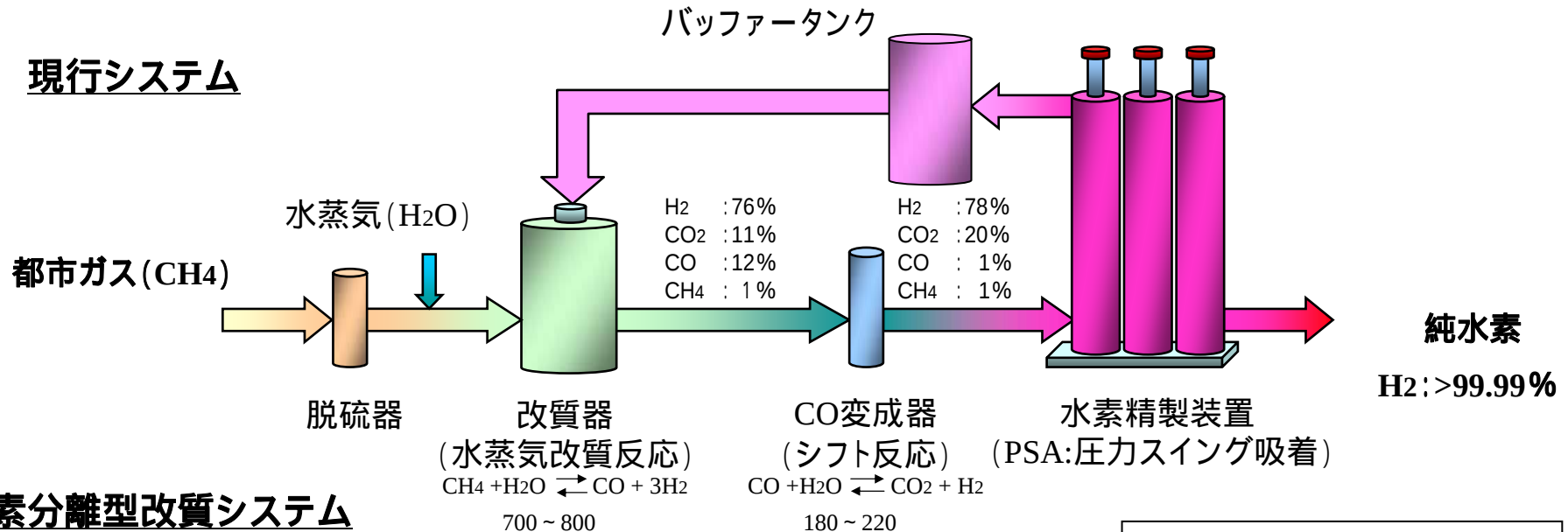
業務用建物設備における水素 / 電力供給ステーション ~



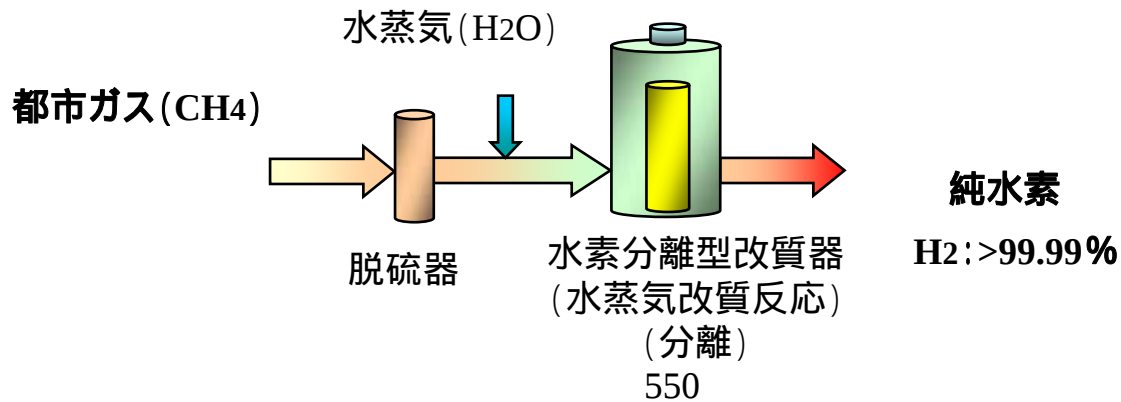
(高砂熱学 小澤らによる)

都市ガスからの純水素製造

現行システム



水素分離型改質システム



- ・コンパクト
- ・シンプル
- ・高効率

水素分離型改質器の原理

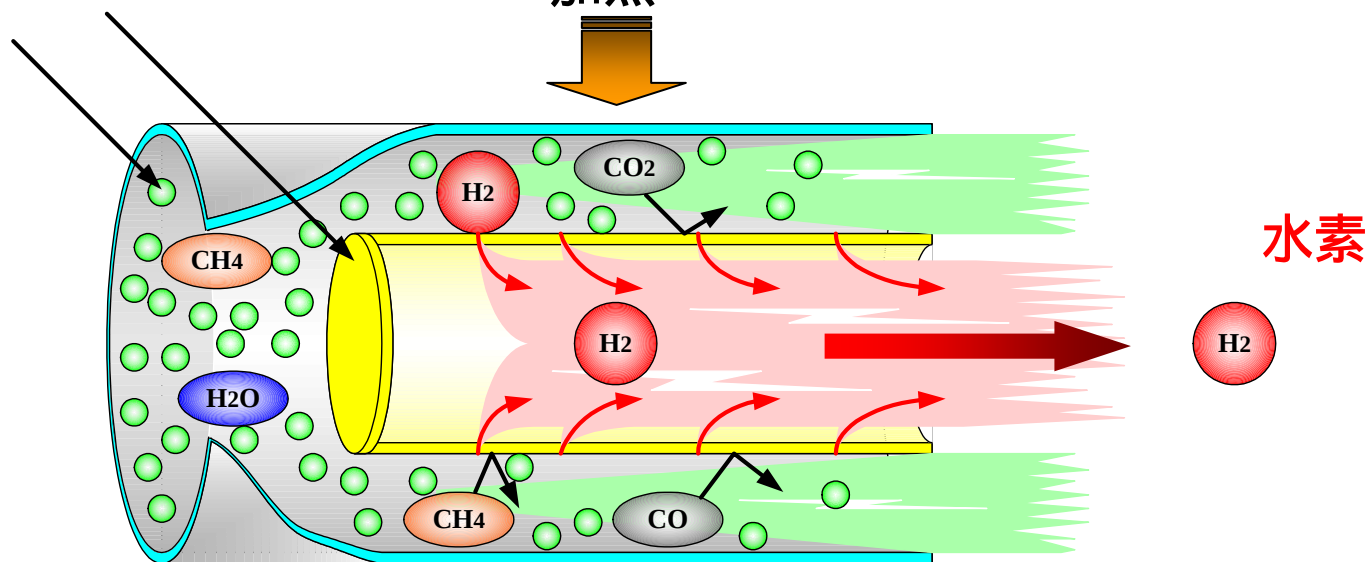
水素分離管 (Pd合金膜)

触媒

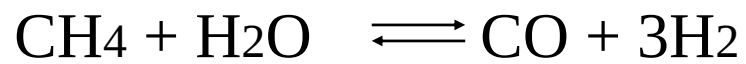
加熱

都市ガス (CH₄)

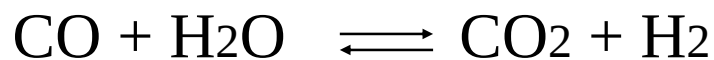
水蒸気



水蒸気改質反応



CO変成反応

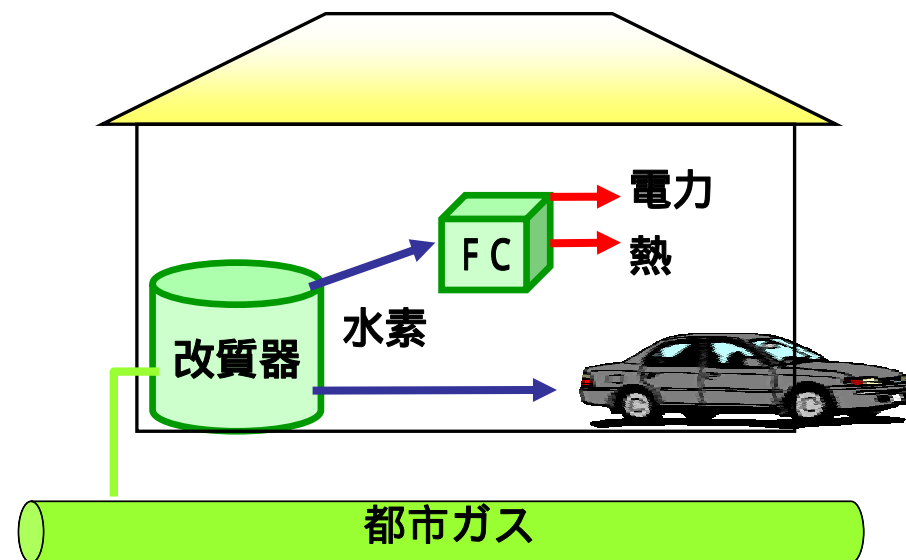
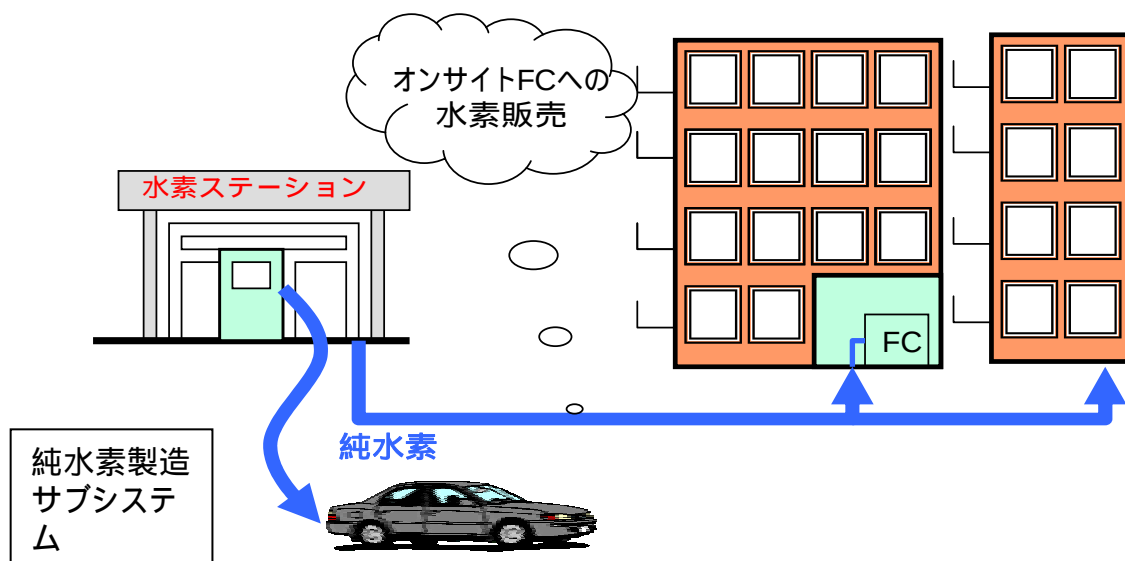


分離

分離

- ・コンパクト
- ・シンプル
- ・高効率

定置式FCとの組み合わせ例



1kW級システム実証例



純水素貯蔵サブシステム

純水素駆動型PEFC

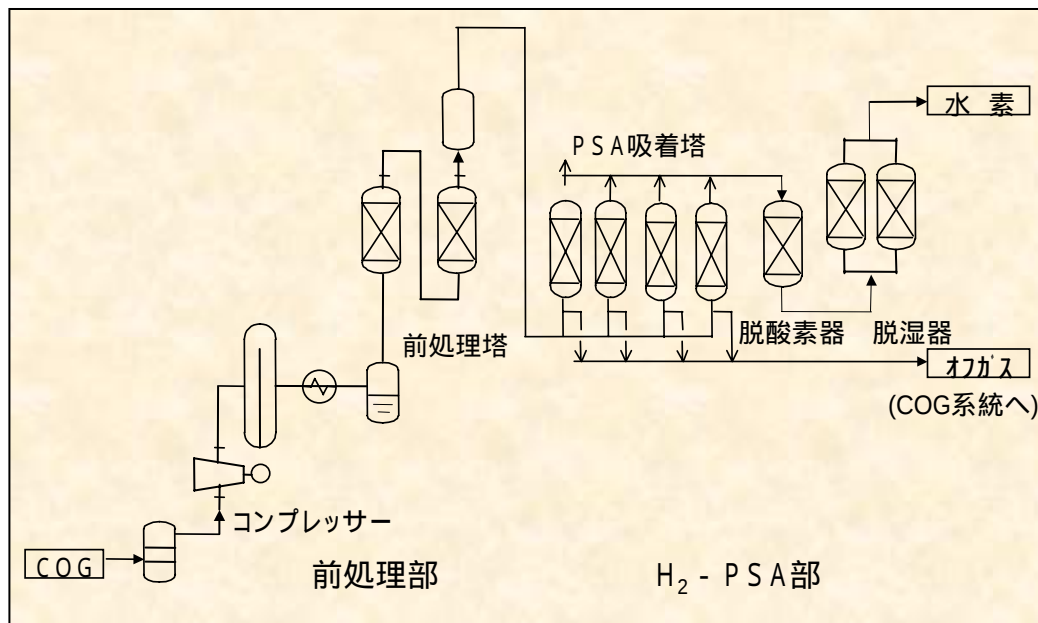
水素の高度利用
水素供給センター
水素パイプラインへの展開

.....



副生ガス(COG)からの水素製造方法

COG原料水素製造システムフロー



COG成分表

コークス炉ガスの代表的組成 (%)

H ₂	CH ₄	CmHn	CO	CO ₂	N ₂
56	30	3	6	2.5	2.5

発熱量: 22.7MJ/Nm³

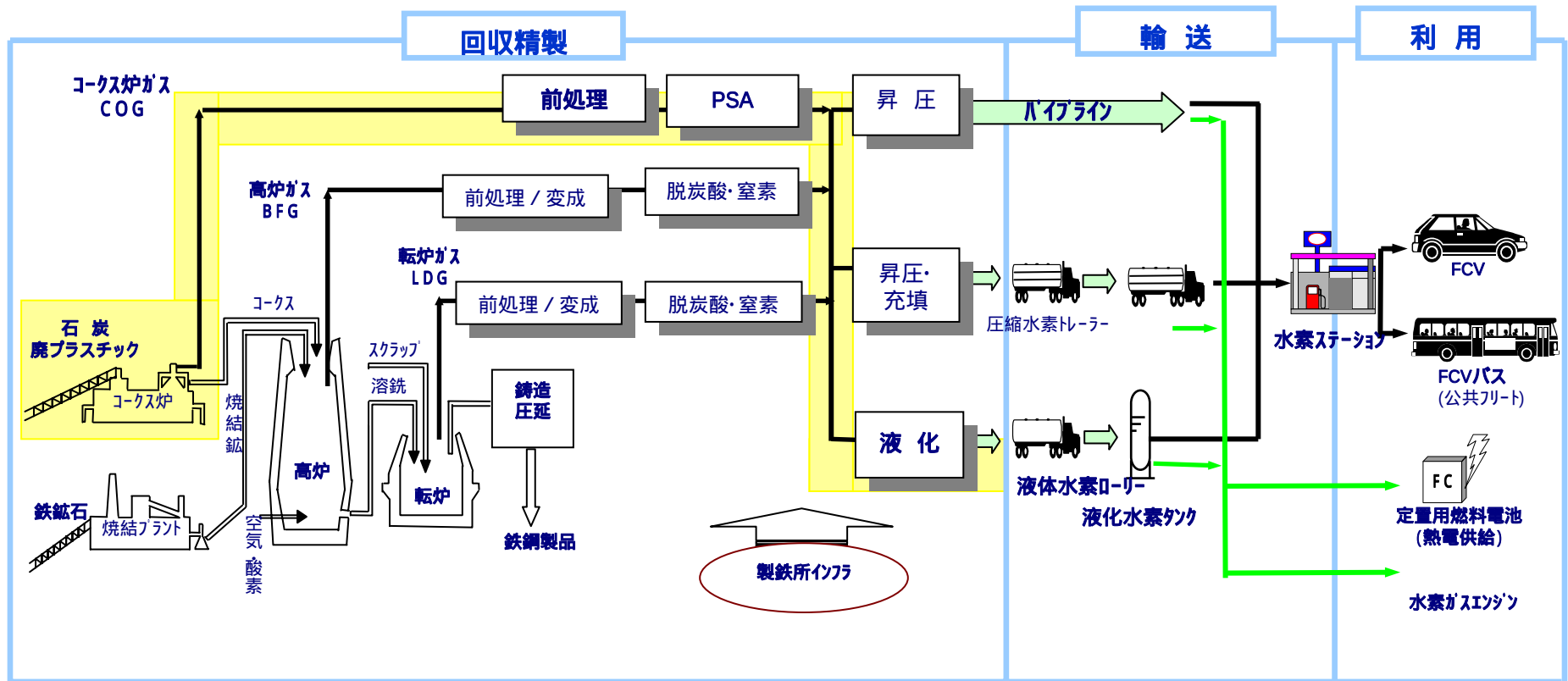
COG原料水素製造設備



(商業機、新日鐵八幡製鉄所)

新日本製鐵
NIPPON STEEL

COGからの液体水素製造供給実証試験



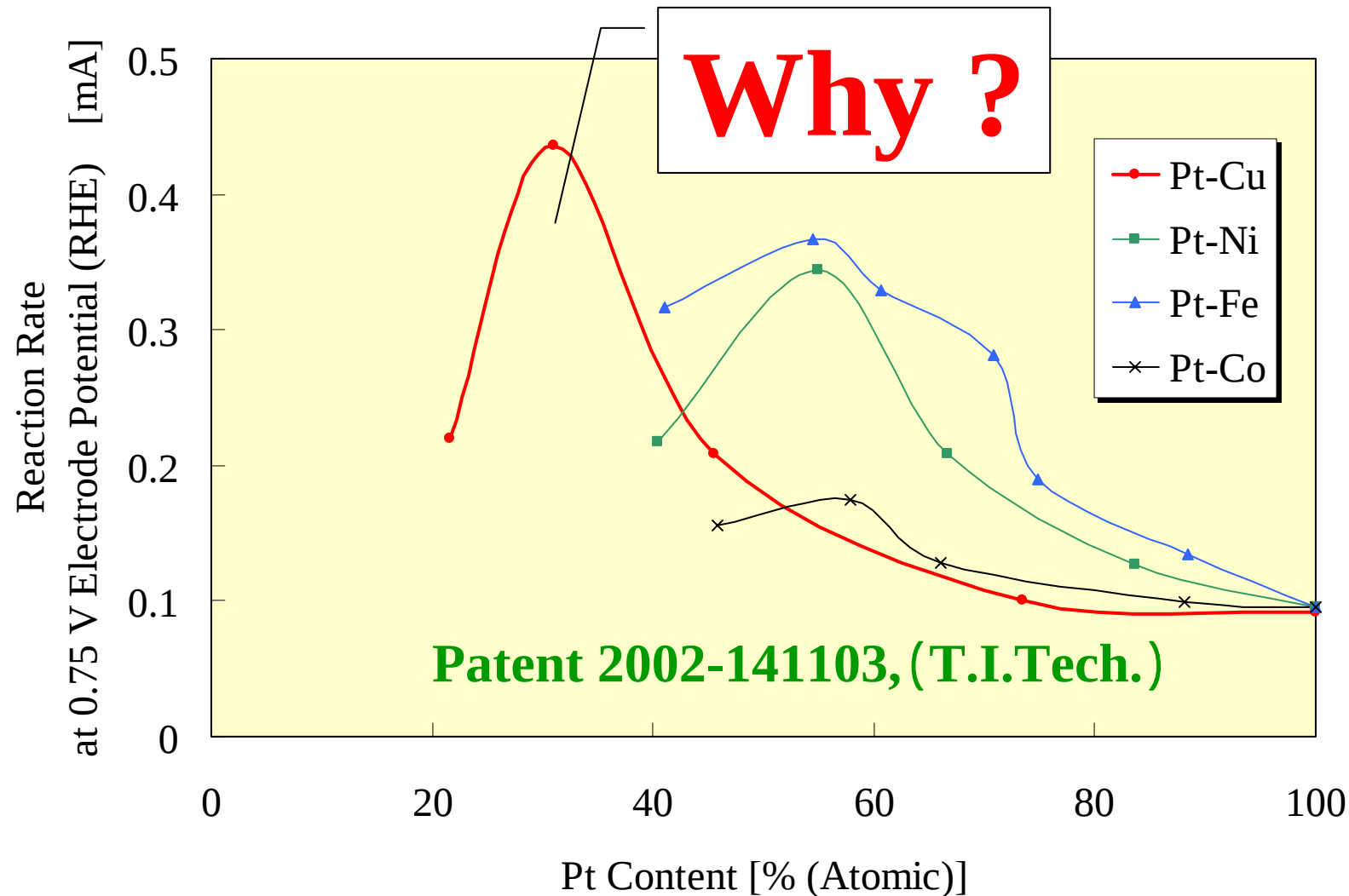
新日本製鐵
NIPPON STEEL



PEFC普及のための必須課題

- 耐久性の向上 (5000 - 80000 h)
- 高効率化 ($> 60 \%$)
- 高出力密度化 ($> 2.0 \text{ MW/m}^3$)
- 白金使用量の大幅低減, もしくは白金代替触媒
- 低コスト化 ($< 1/100$)

Drastic Improvement of Catalysis by Alloy



第一原理分子動力学法

Born-Oppenheimer近似

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F} = -\text{grad}(E)$$

$$E = -\sum_{i=1}^N \int_{\text{all space}} \psi_i^*(\mathbf{r}) \frac{1}{2} \nabla^2 \psi_i(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

$$+ \sum_{i=1}^N \int_{\text{all space}} \psi_i^*(\mathbf{r}) \hat{V}_{\text{core}} \psi_i(\mathbf{r}) d\mathbf{r} + \frac{1}{2} \int \frac{\rho(\mathbf{r}') \rho(\mathbf{r})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{r} d\mathbf{r}' + E_{\text{xc}}[\rho(\mathbf{r})]$$

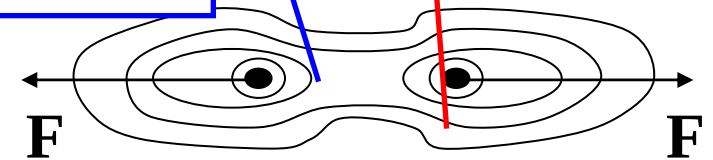
$$\psi_i(\mathbf{r}) = \psi_i(\mathbf{G}) \exp[i(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}] \quad : \text{平面波展開法}$$

$\hat{V}_{\text{core}}$: 擬ポテンシャル法

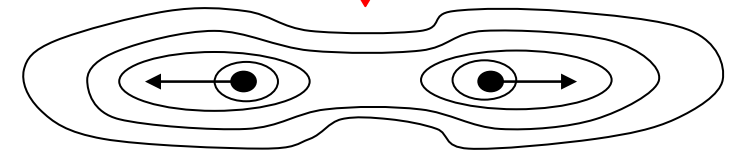
Dirac方程式に基づくノルム保存
擬ポテンシャル

有効原子核
(原子核 + 内核電子)

価電子雲



Δt 後

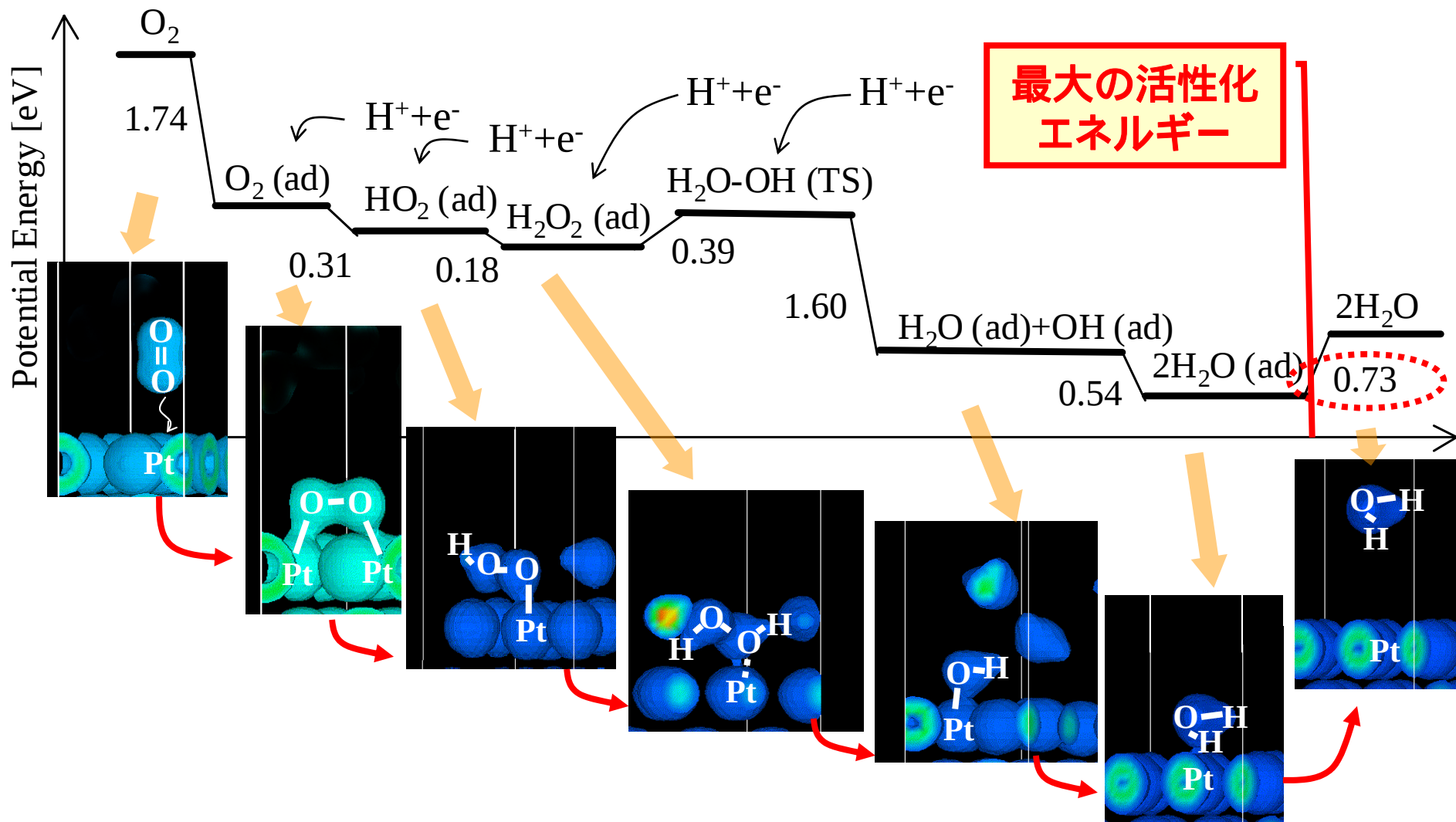


Ceperley-Alderの
局所密度汎関数

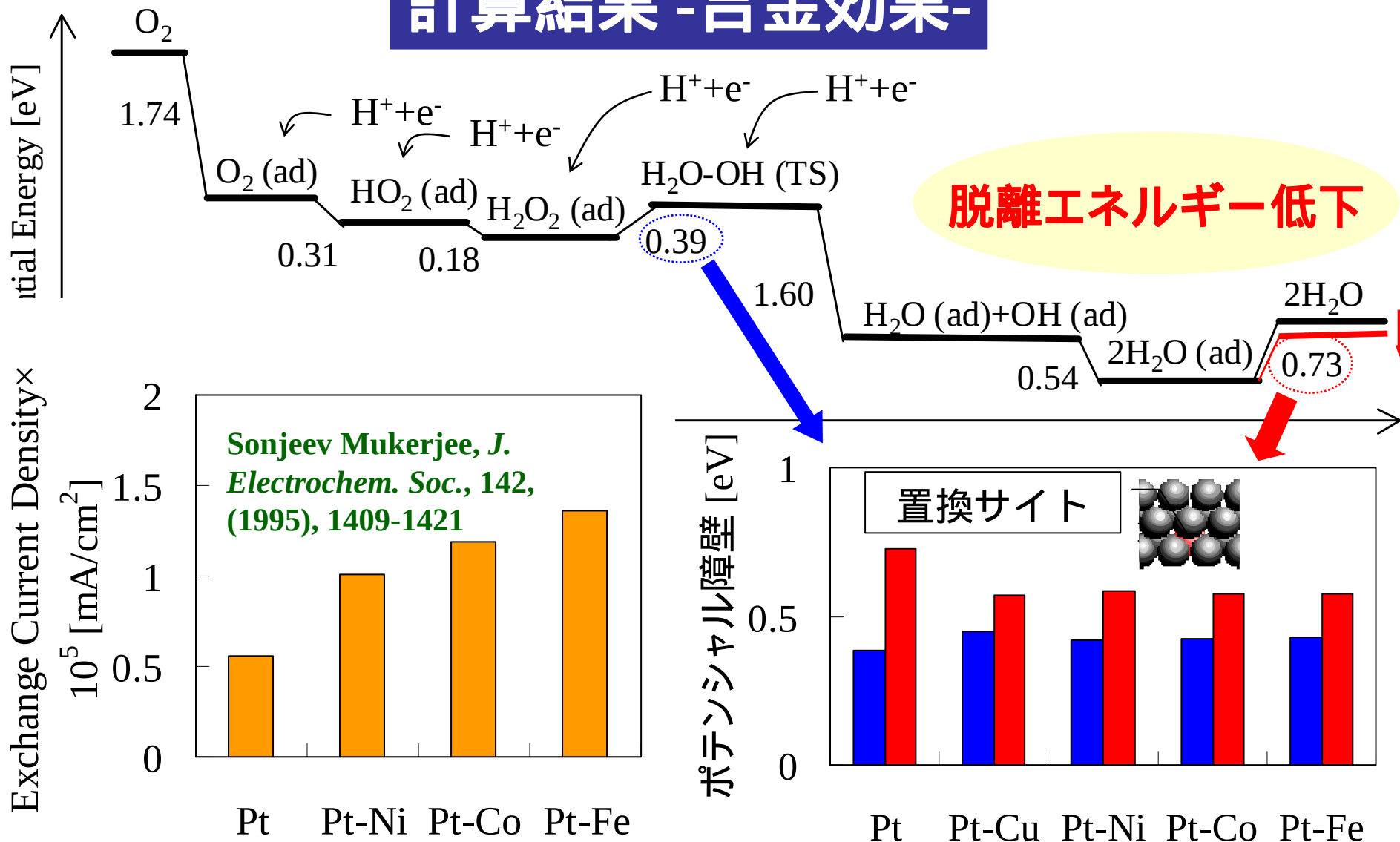
Schrödinger方程式 → ポテンシャル → 原子間力

Hellmann-Feynmanの定理

計算結果 -ポテンシャルエネルギー変化-

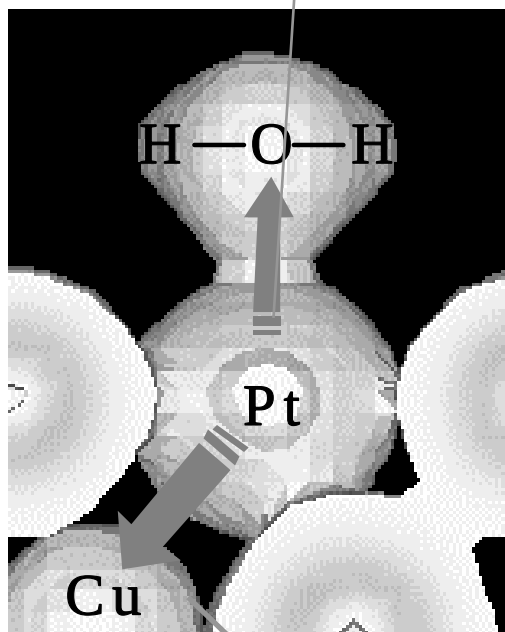


計算結果 -合金効果-

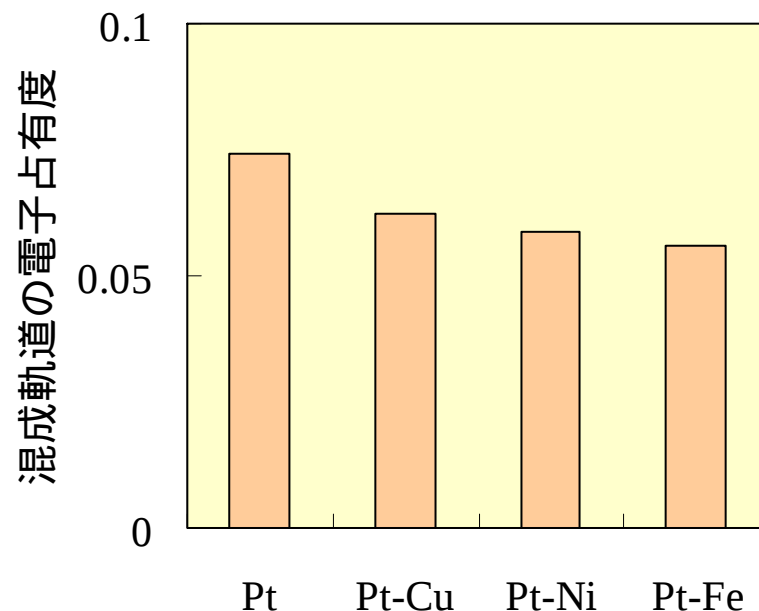


H₂O脱離促進機構

H₂O-Pt間混成軌道への
電子移動量が減少．



Ptの5dからCuの
4pへの電子移動

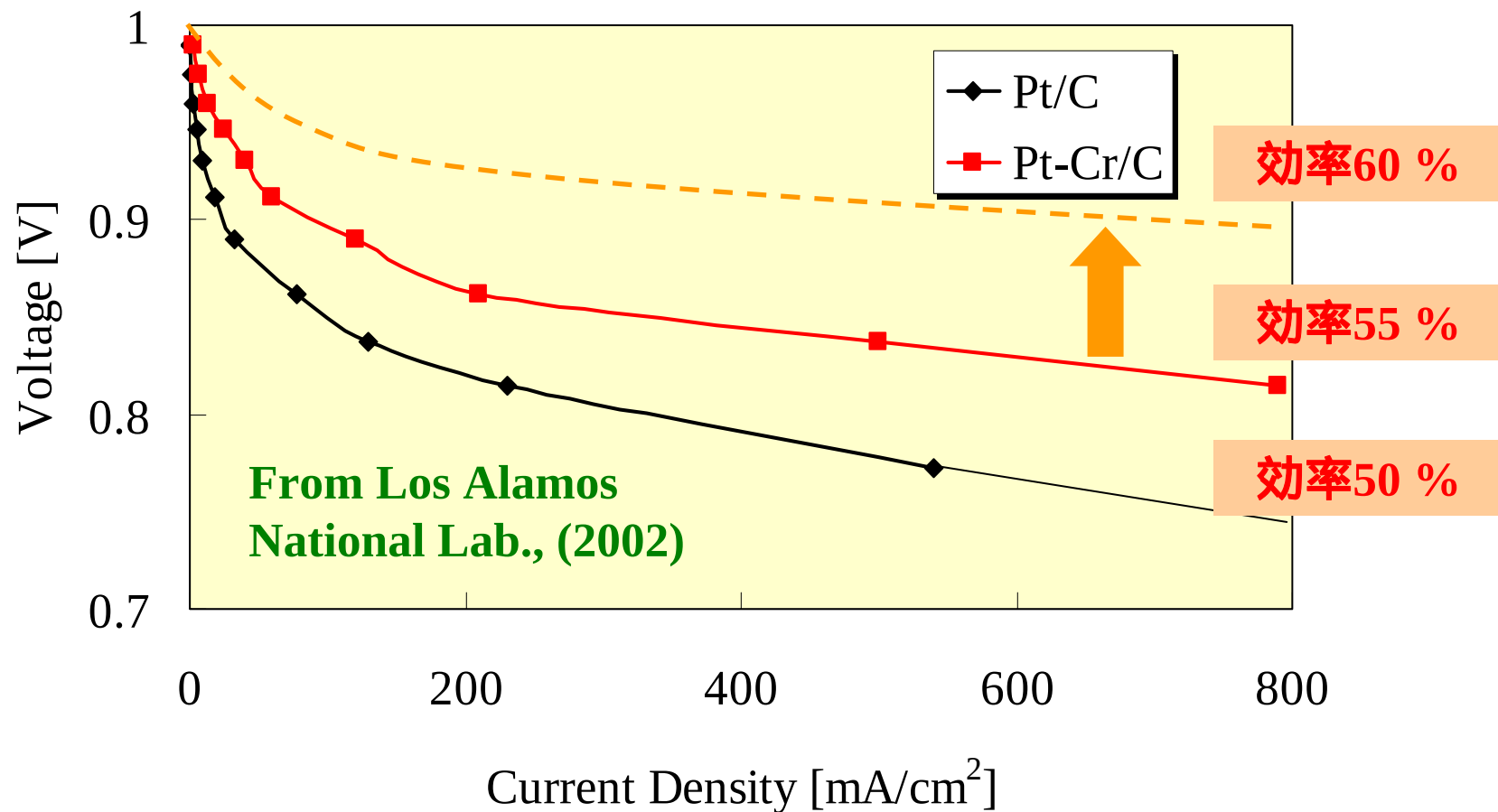


PtからCuへの電子移動に伴う
Pt中のdバンド空孔数の増大

H₂O-Pt間混成軌道の
電子占有数の減少

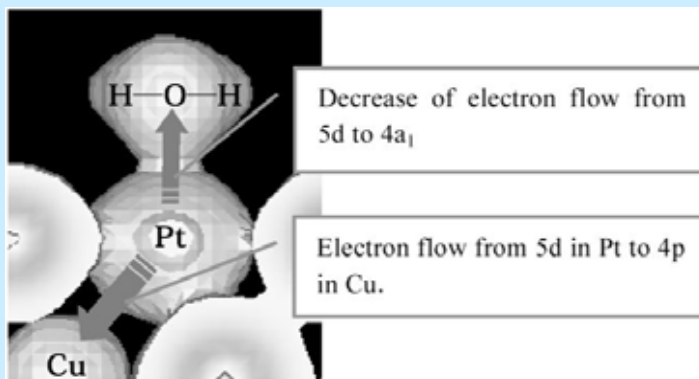
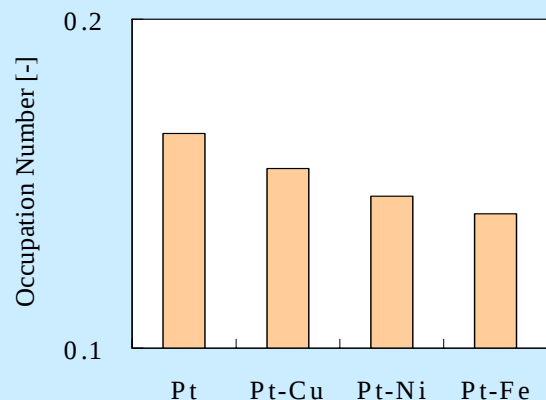
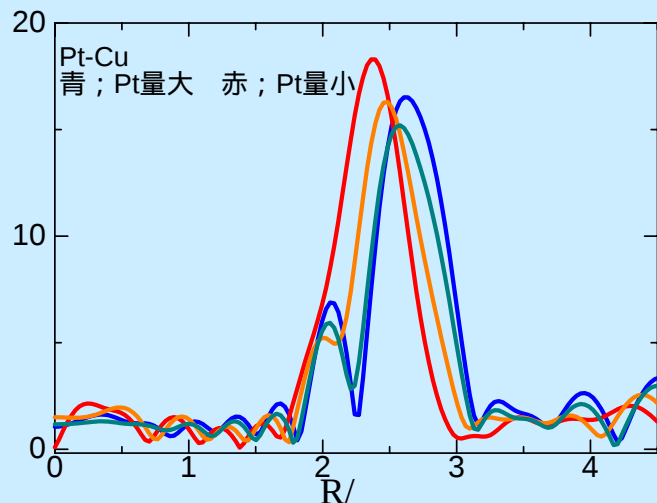
H₂O-Pt間相互作用の弱化

合金を用いたMEAの性能

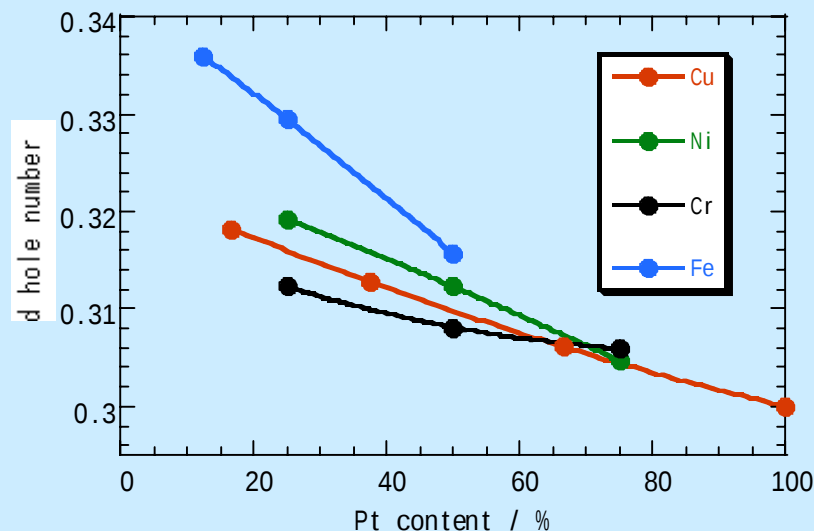


XAFSを用いた白金-3d遷移金属合金触媒の状態解析

Pt-Cu合金のフーリエ変換 (EXAFS)



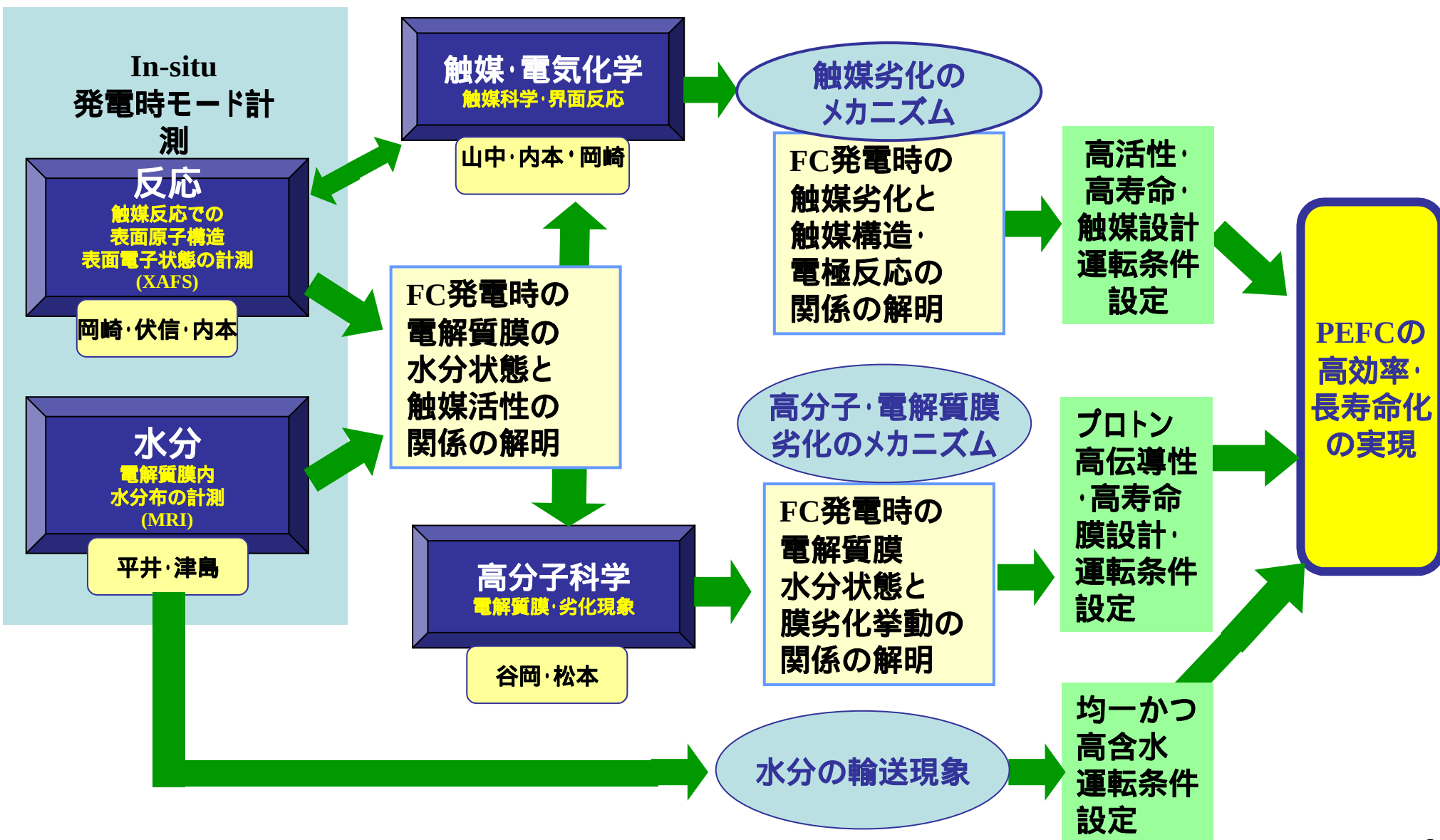
Pt-3d遷移金属合金のPt 5d電子空孔 (XANES)



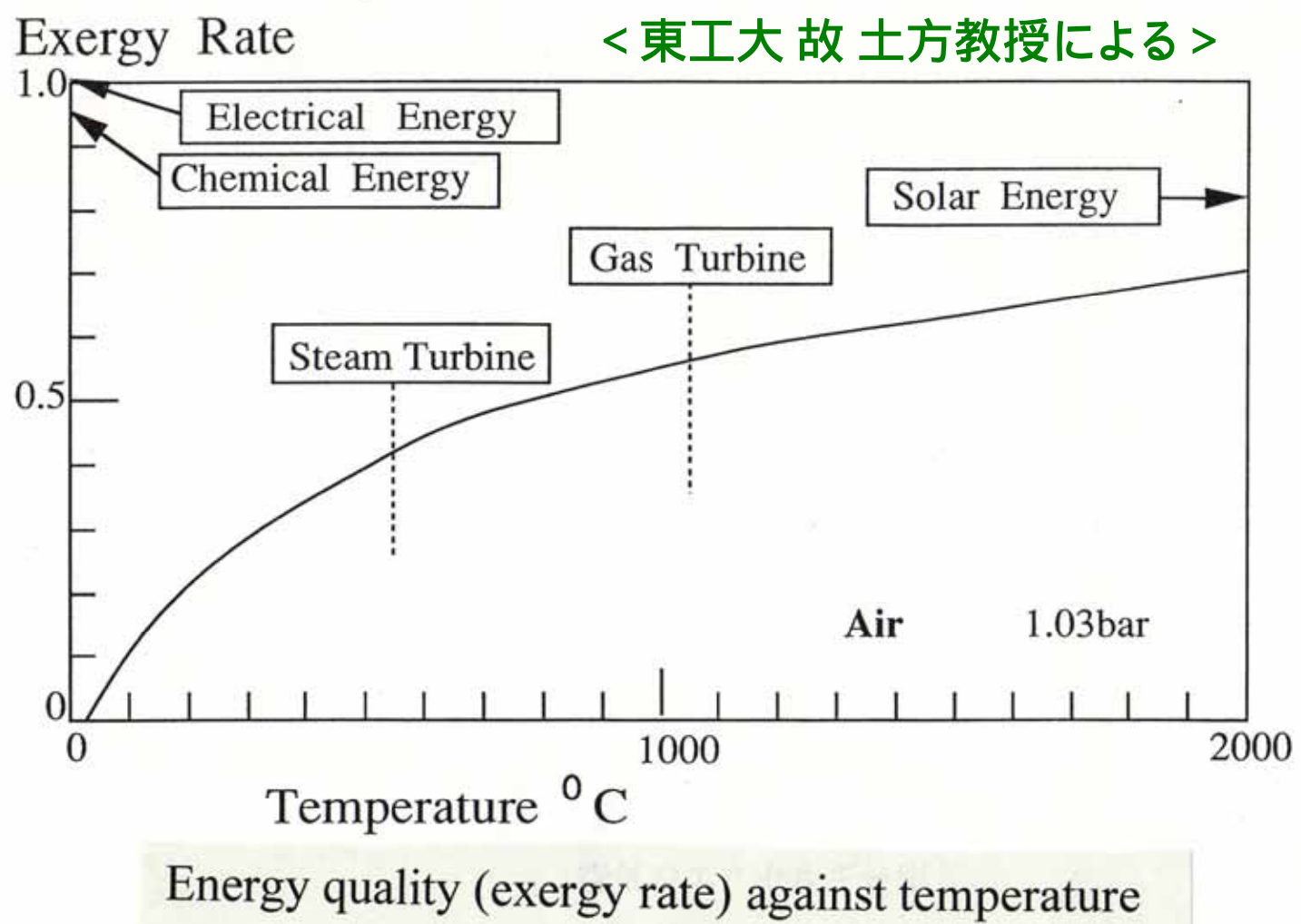
スパッタリングによって作製した白金-3d遷移金属合金の電子構造、局所構造の解析に成功

XAFS計測技術を用いたガス拡散電極の状態解析

東工大の総合力を結集したPEFC劣化機構解明と高効率・長寿命化

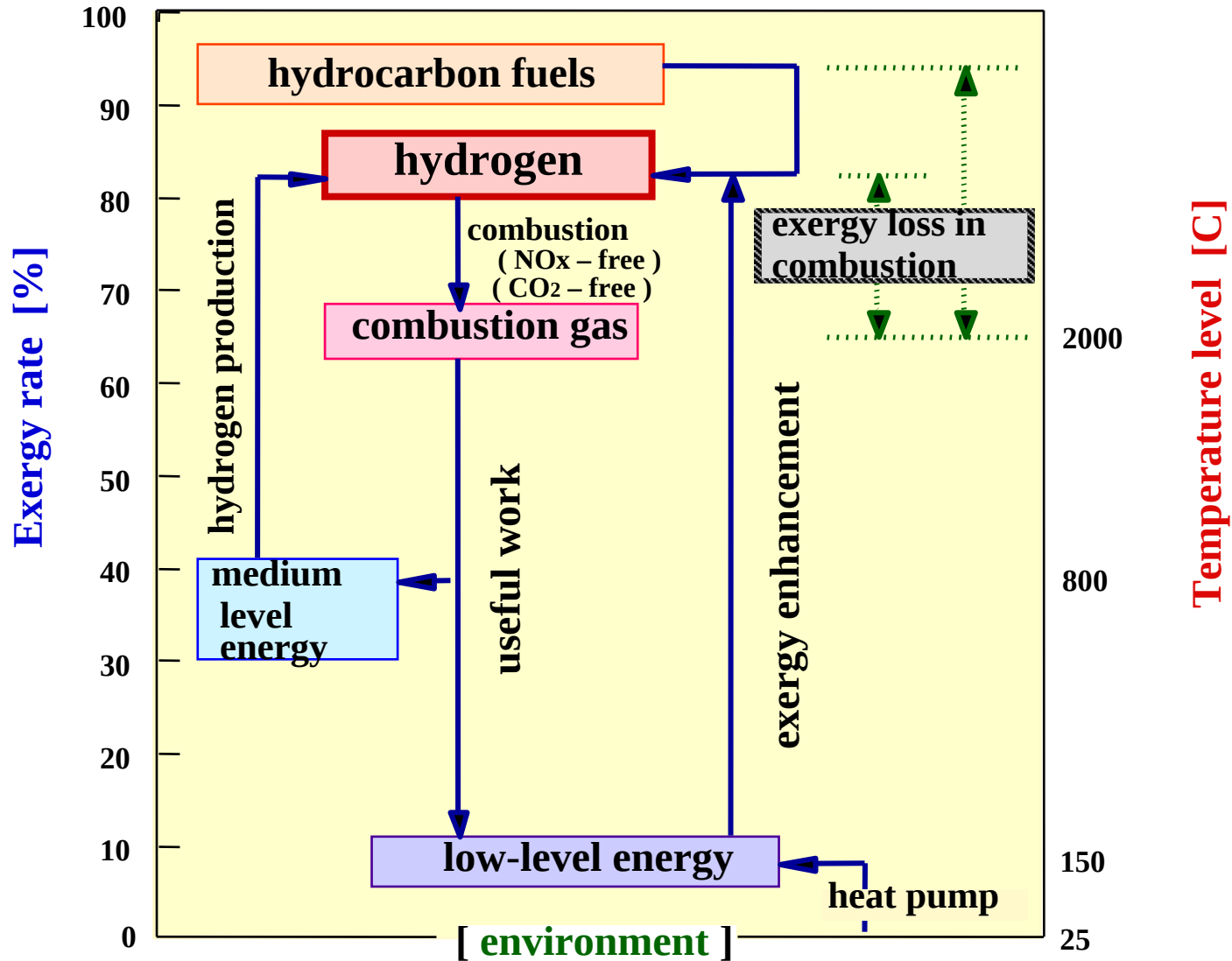


水素を核としてエクセルギー増進を実現するマルチパスエネルギーシステム (熱-化学-電気、低質エネルギーの高質化再利用)



各種エネルギー(熱-化学-電気)の質 (= エクセルギー/エンタルピー)

エクセルギー再生の原理



エクセルギー再生におけるメタノールの利点



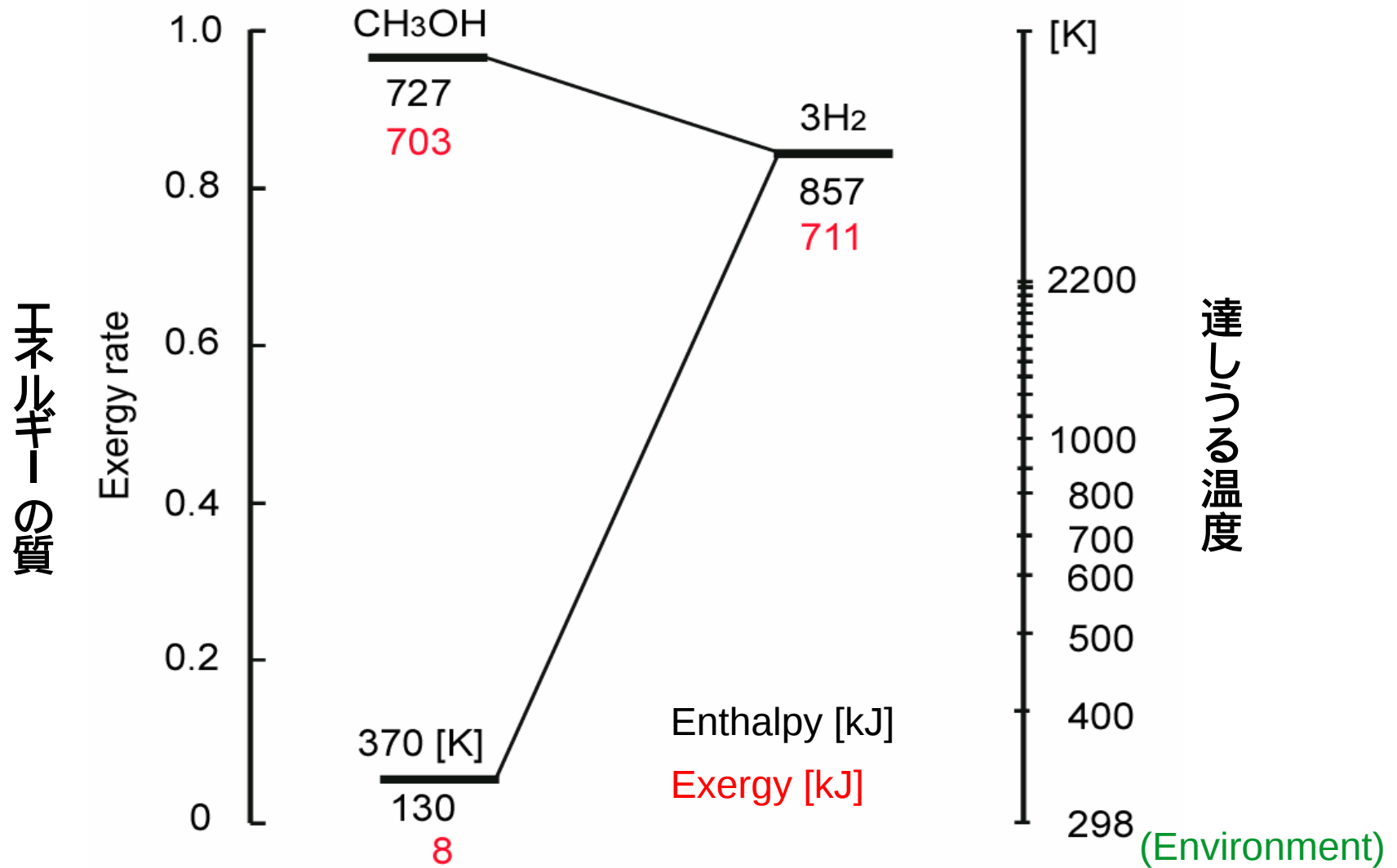
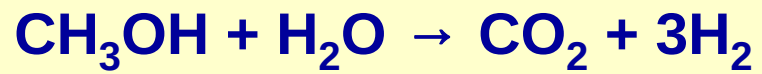
Heat value:

$$727 \text{ kJ/mol} \longrightarrow 286 \times 3 = 858 \text{ kJ/mol}$$

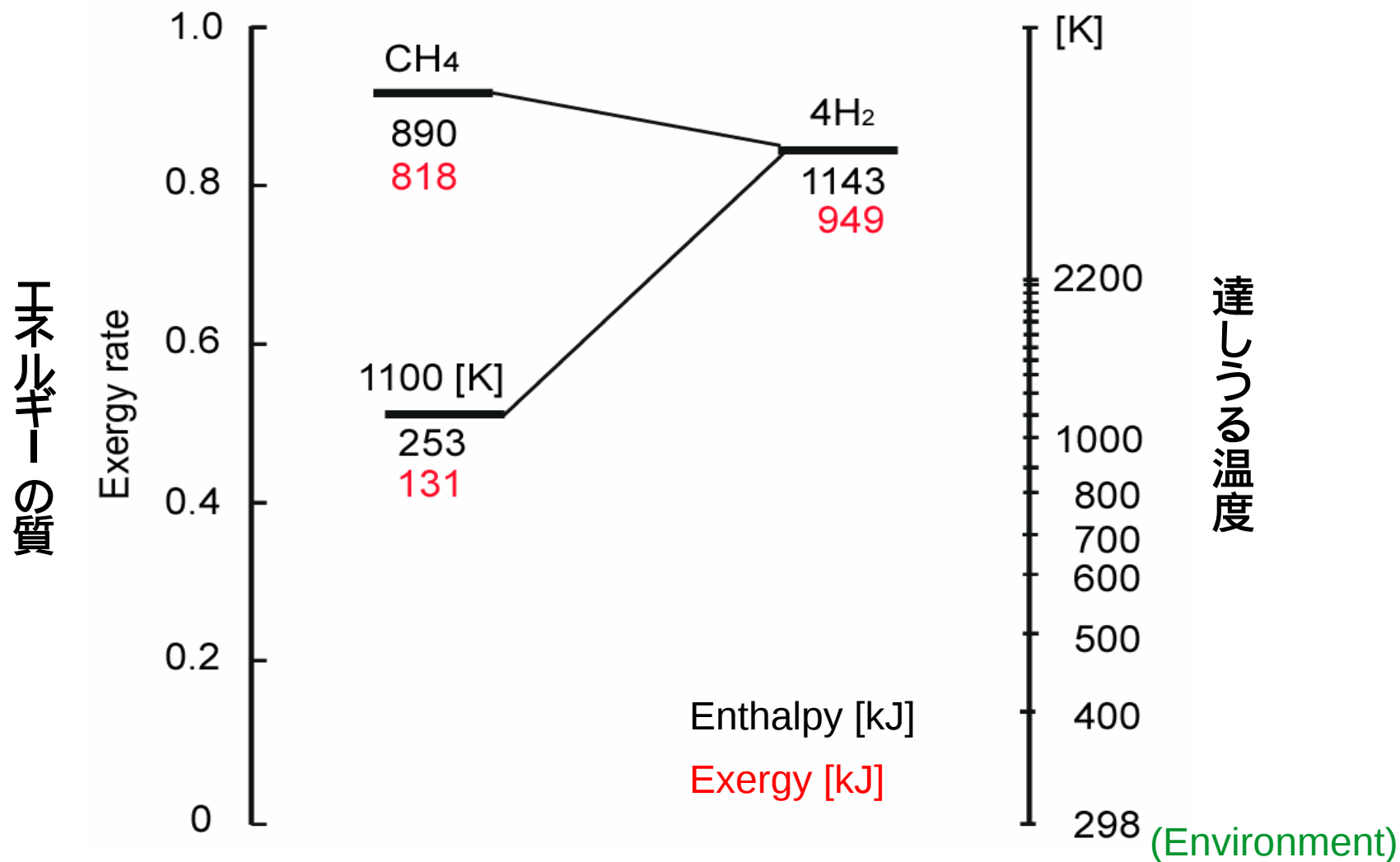
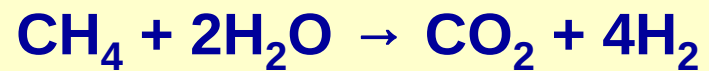
Exergy enhancement

Low quality thermal energy

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 6 \% \quad (\text{corresponding to } 100)$$



低温排熱の高付加価値化再利用



中温排熱の高付加価値化再利用

熱自己再循環型多目的バイオマス ガス化システム

特徴

・低質廃熱・廃蒸気の有効利用

(水蒸気供給増加による吸熱分の補充と高質化再利用)

・自己熱再循環による 反応場のみの高温化

(顕熱損失の低減と
タール発生防止・タールもガス化)

・H₂/CO比を任意に制御

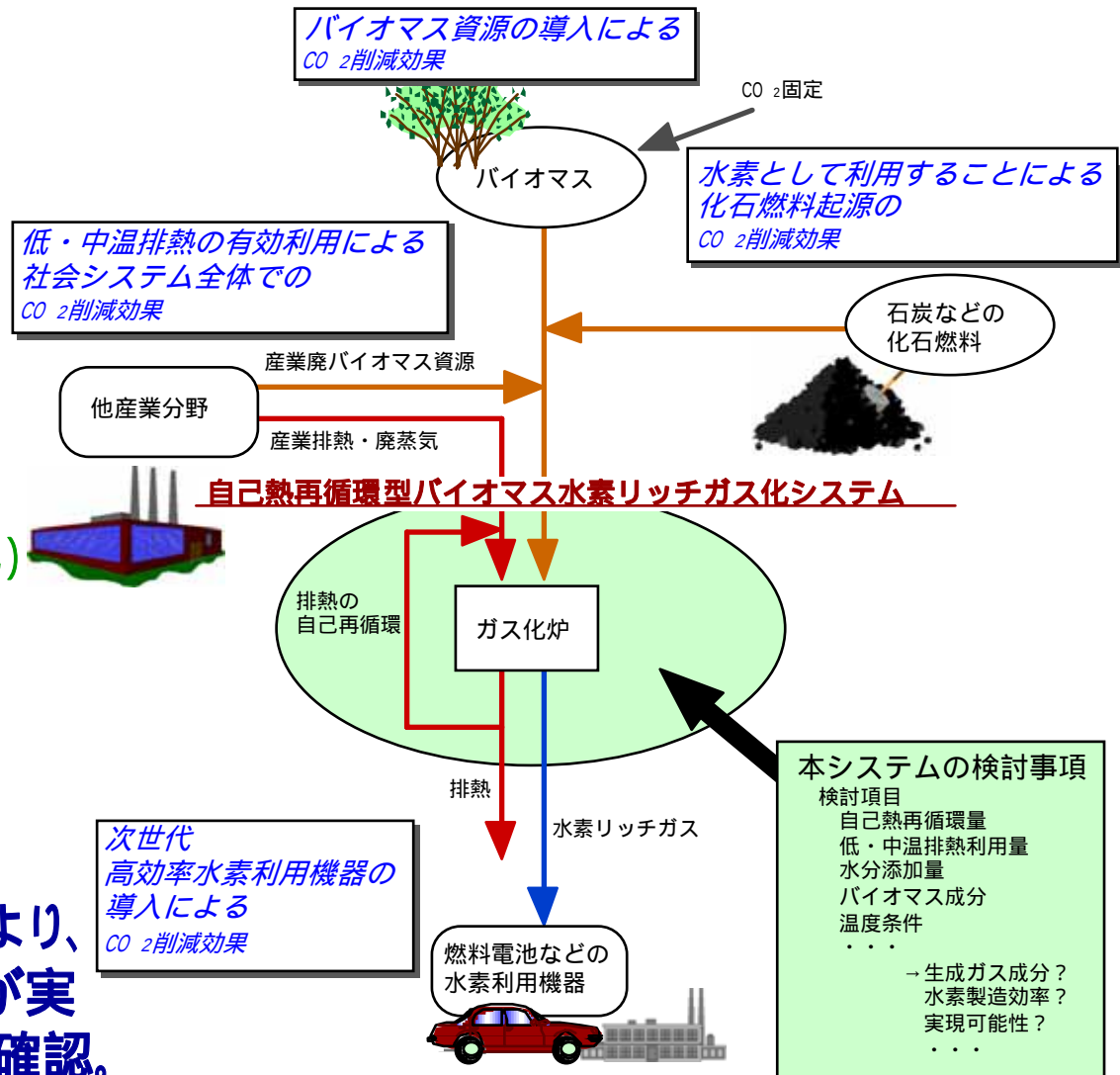
・H₂:CO = 1:0 → H₂

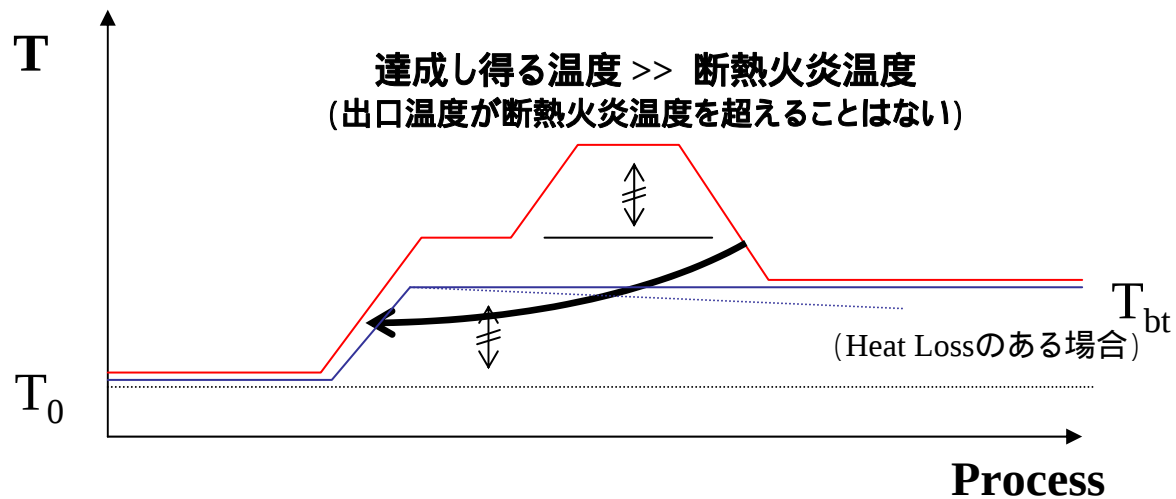
・H₂:CO = 1:1 → DME

・H₂:CO = 2:1 → CH₃OH

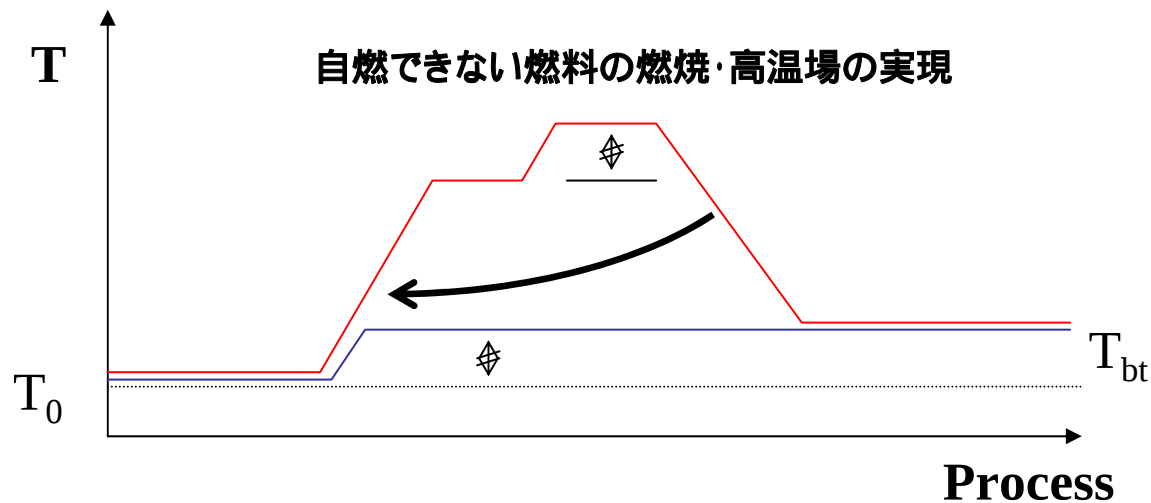
成果

- ・熱の再循環を組み込むことにより、従来の3倍近い水素リッチ化が実現できることを、実験と理論で確認。



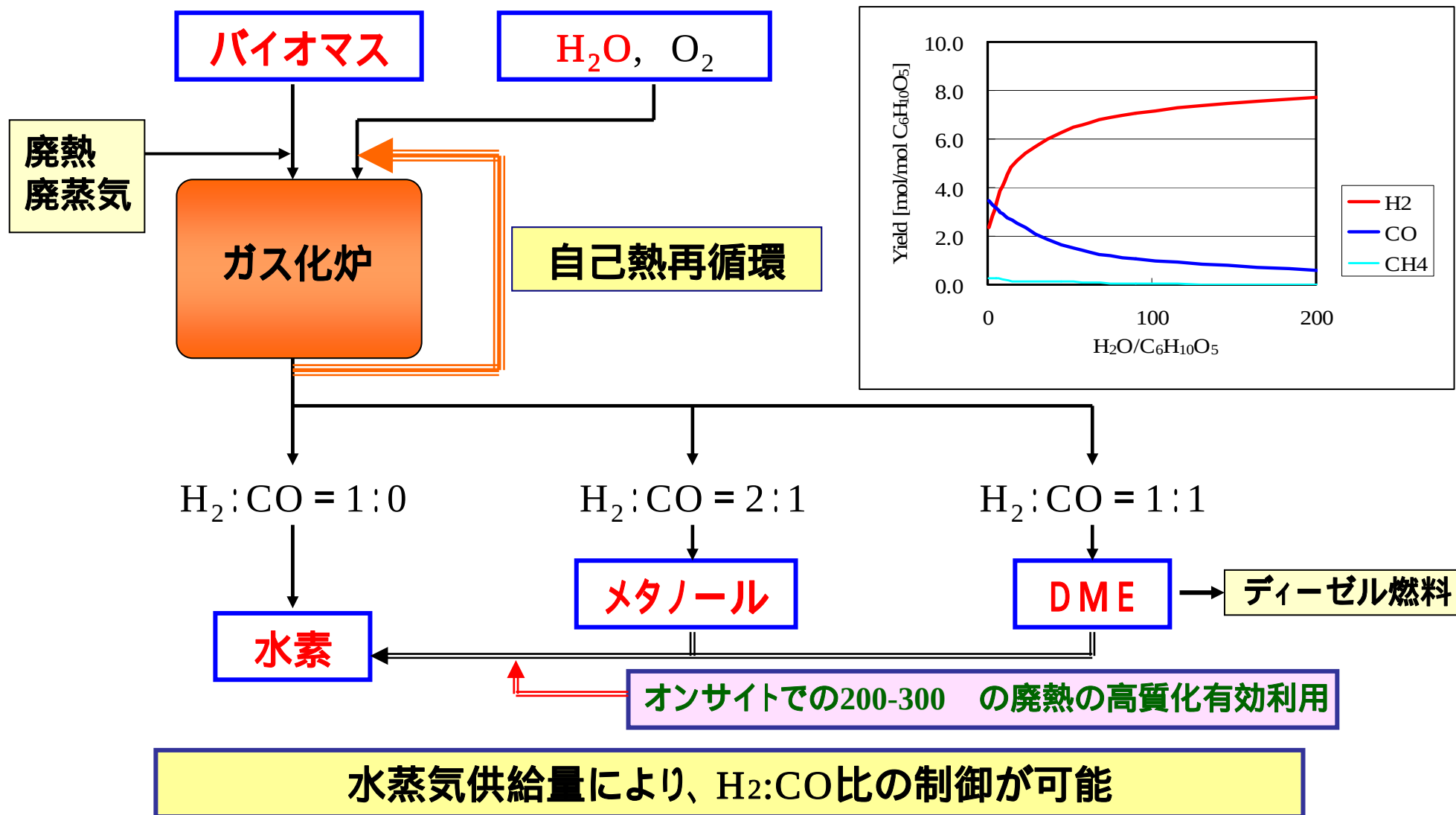


(a) 熱再循環(熱再生)燃焼の概念図

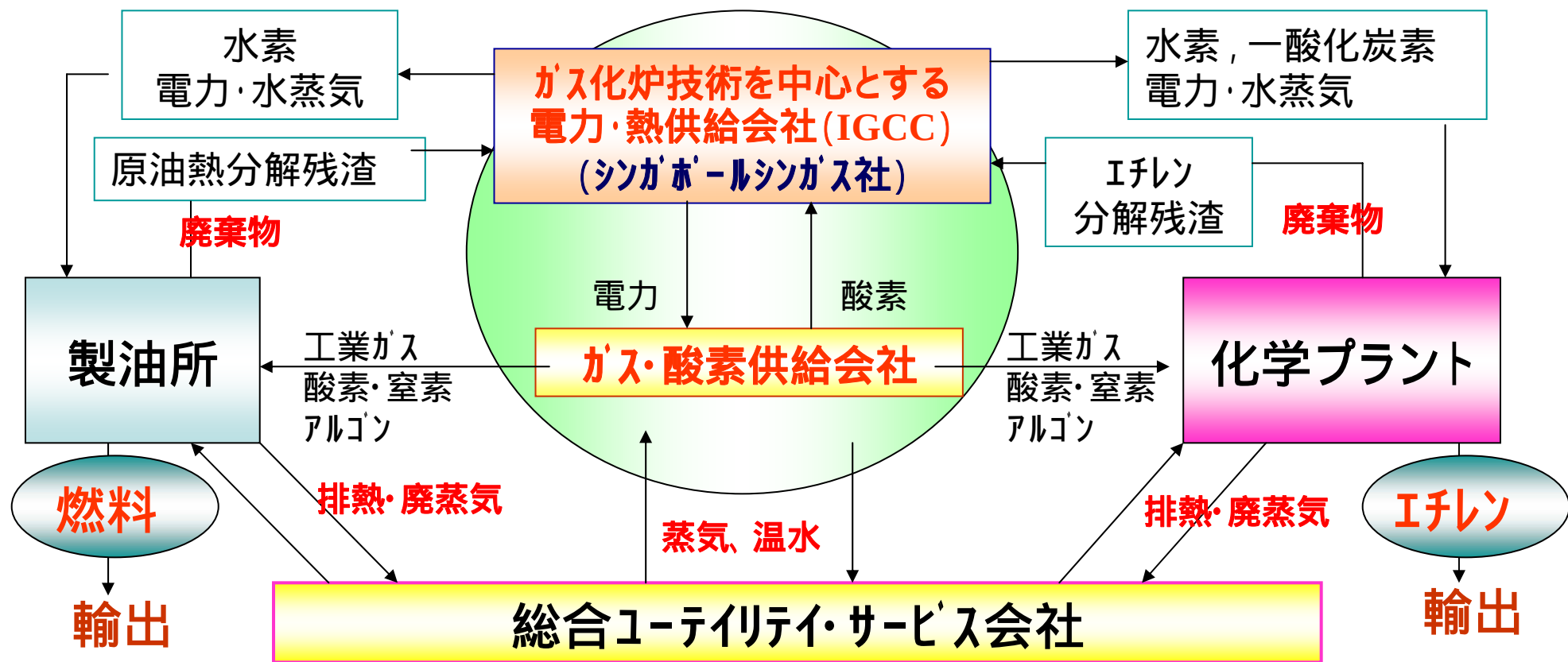


(b) 極低発熱量燃料の熱再循環燃焼

自己熱再循環ガス化によるバイオマス多目的高度利用システム



産業結合による新規製造形態の形成



石油系エネルギー技術を核としたコプロ事例
シンガポール・ジュロン島のエネルギー・ユーティリティ・ハブ

(東芝 渡辺による)

水素社会に向けたビジョン

長期ストラテジー

- ・再生可能エネルギーの大量導入 (× 100-1000)
- ・海外の余剰自然エネルギーの利用 (エネルギーキャリア ?)

現実的な中間シナリオ (時間スケール、空間スケール)

(たとえ、現在の正味寄与が小さいか、マイナスであっても)

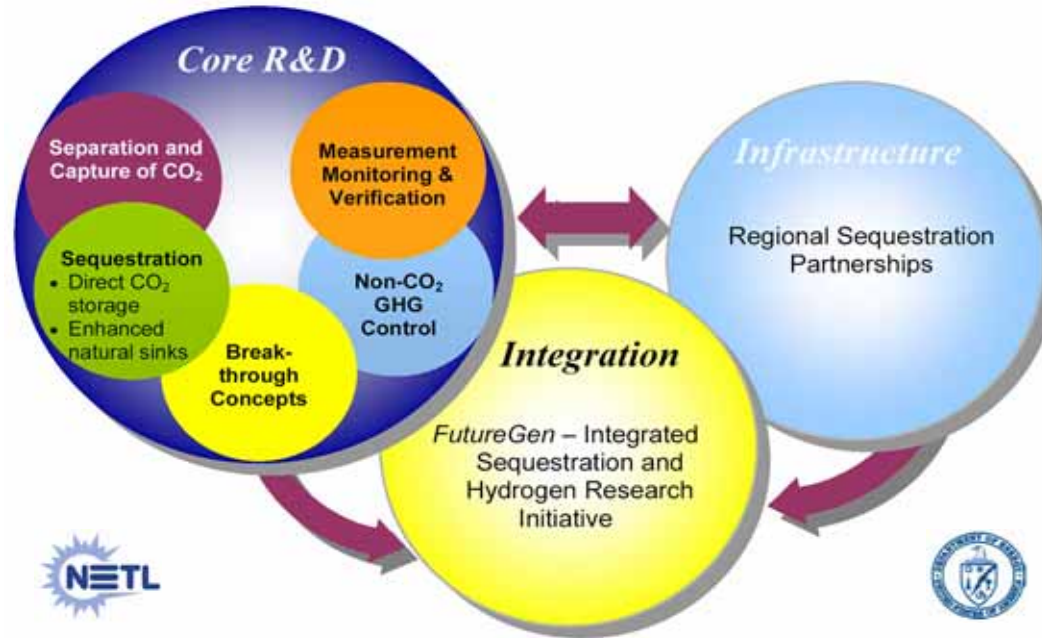
- ・水素自動車 (IC-engine, PEFC) ・小型分散コジェネ
- ・インフラ整備、輸送・貯蔵・供給システム、水素コミュニティー
- ・エネルギーキャリアとしての水素の多角的機能の活用技術
(エネルギー変換、輸送、貯蔵) (エネルギー・物質 産業コンプレックス)
- ・水素利用分散エネルギーシステムの最適化 (PEFC, MGT)
- ・化石燃料、バイオマス等からの高効率、高速、大量 水素製造
および副生水素の活用
- ・PEFCのコスト大幅低減、耐久性の格段の向上
- ・安全性の確立、水素の規制緩和、社会受容性の醸成、継続的政策

水素エネルギー導入の現実的な中間シナリオ

- 自然エネルギー（太陽光、風力）
（短中期では導入割合は極少）
- 副生水素の利用
- 化石燃料からの水素製造（現実的な中間シナリオ）
（高効率、高速、大量）
正味のCO₂大幅削減とリンクしなければ意味が無い

CO₂ Sequestration (US strategy)

Technology Roadmap and Program Plan (March, 2003)



US's Share of Fossil Fuel Reserves

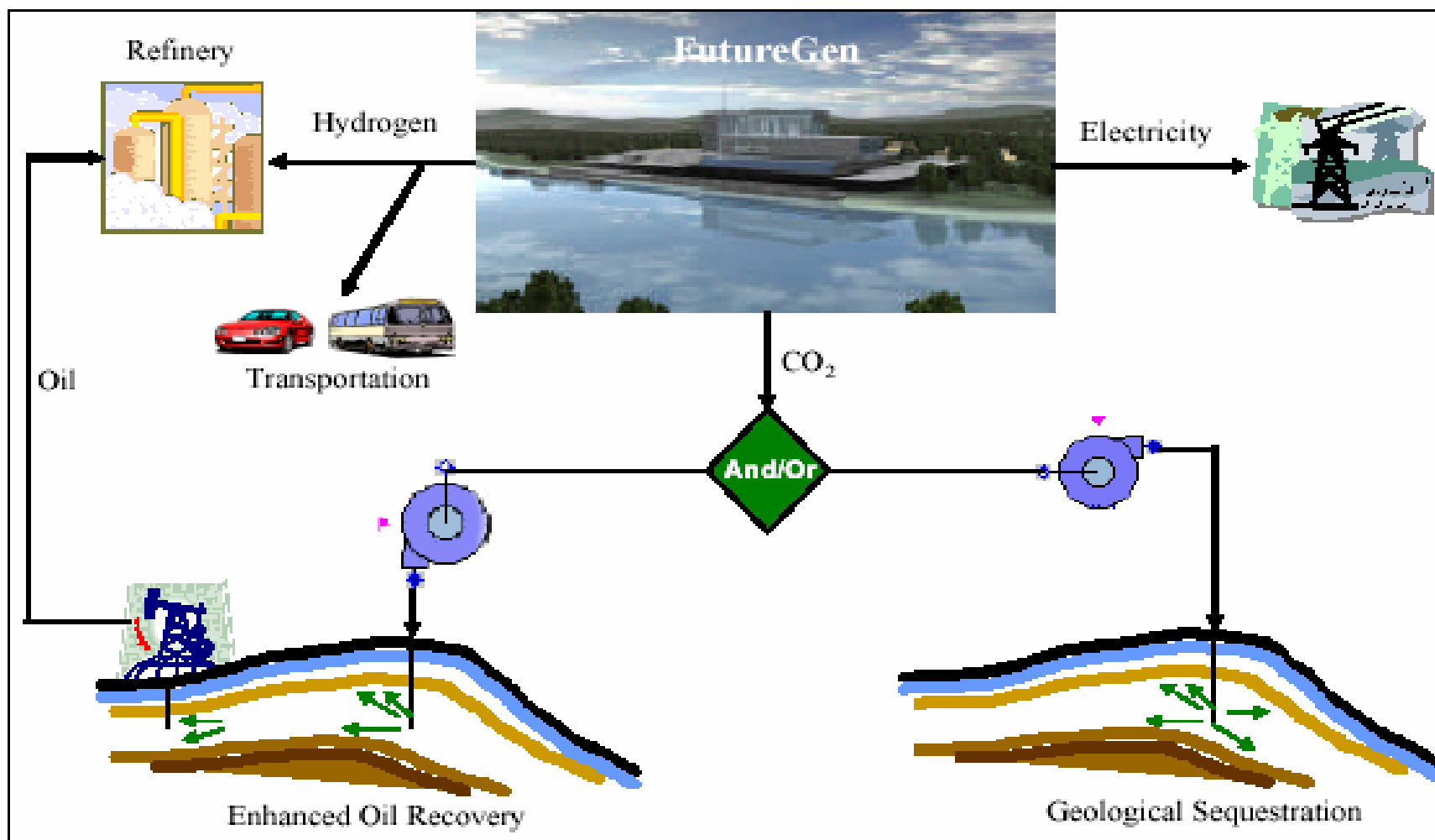
- **Coal** : 25 %
- **Oil** : 3 %
- **Natural Gas** : 3 %
(Russia : 30 %)

US's Energy Consumption/head

- five times of world average

- **The Vision 21 Program** : The President Clinton, 1999
(gasification, CO₂ separation-recovery-sequestration, production of hydrogen alcohol, etc.)
- **Climate Change, Hydrogen Initiative** : 1.2 B\$/5years, The President Bush, Jan. 28, 2003
- **FutureGen Project** : 1.0 B\$/10years, DOE, Feb. 27, 2003
(prototype coal plant combined with CO₂ recovery-sequestration and hydrogen (275MW))
- **International Carbon Sequestration Leadership Forum** : signed, June 25, 2003
(14 countries : USA, China, Russia, Japan, India (main 5) and others)

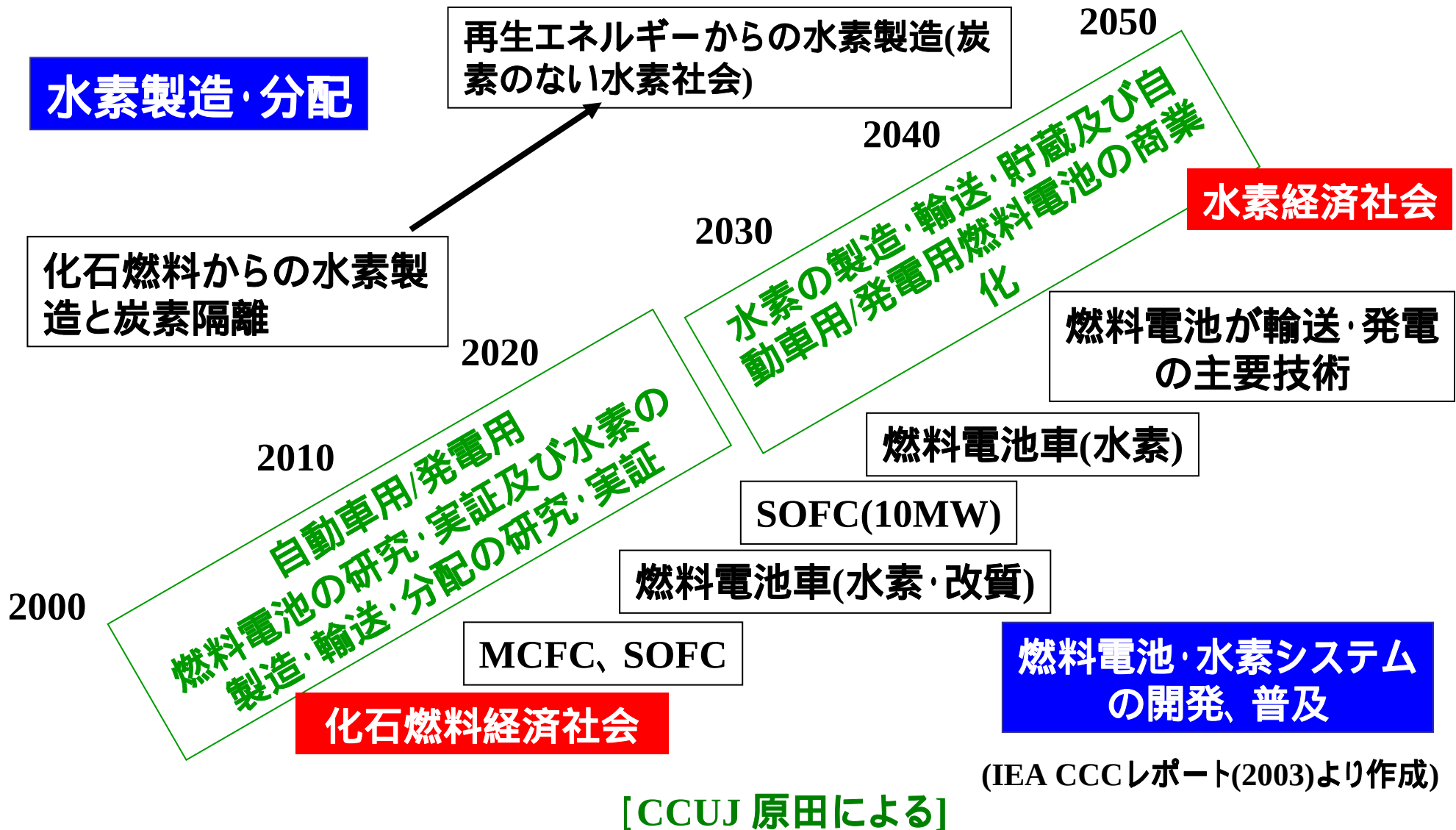
FutureGenのコンセプト



(出典: C.L.Millerら、第12回ピッツバーグ石炭会議(2003)論文より)

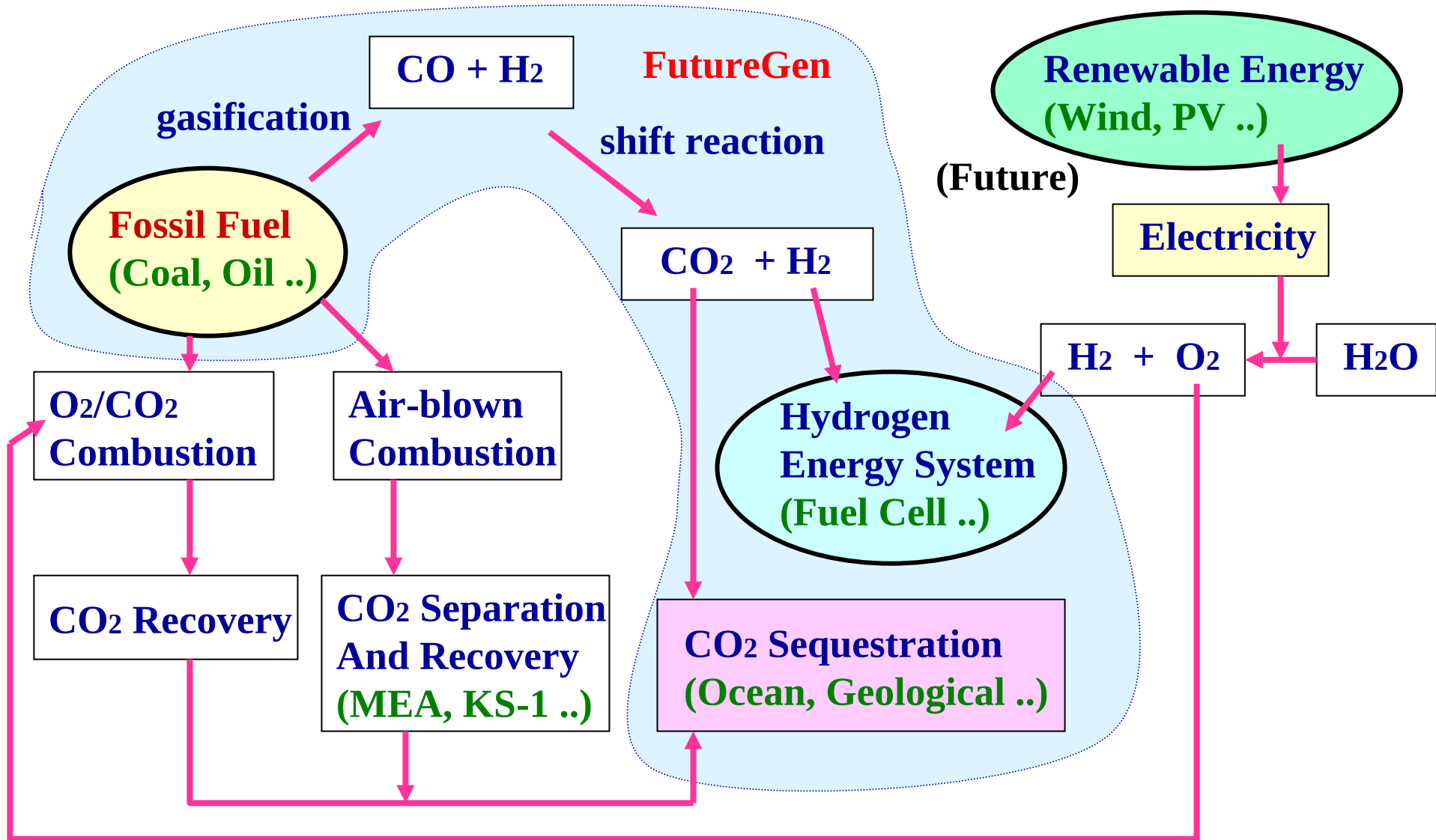
[CCUJ 原田による]

A Challenging European Hydrogen Vision



(IEA CCCレポート(2003)より作成)

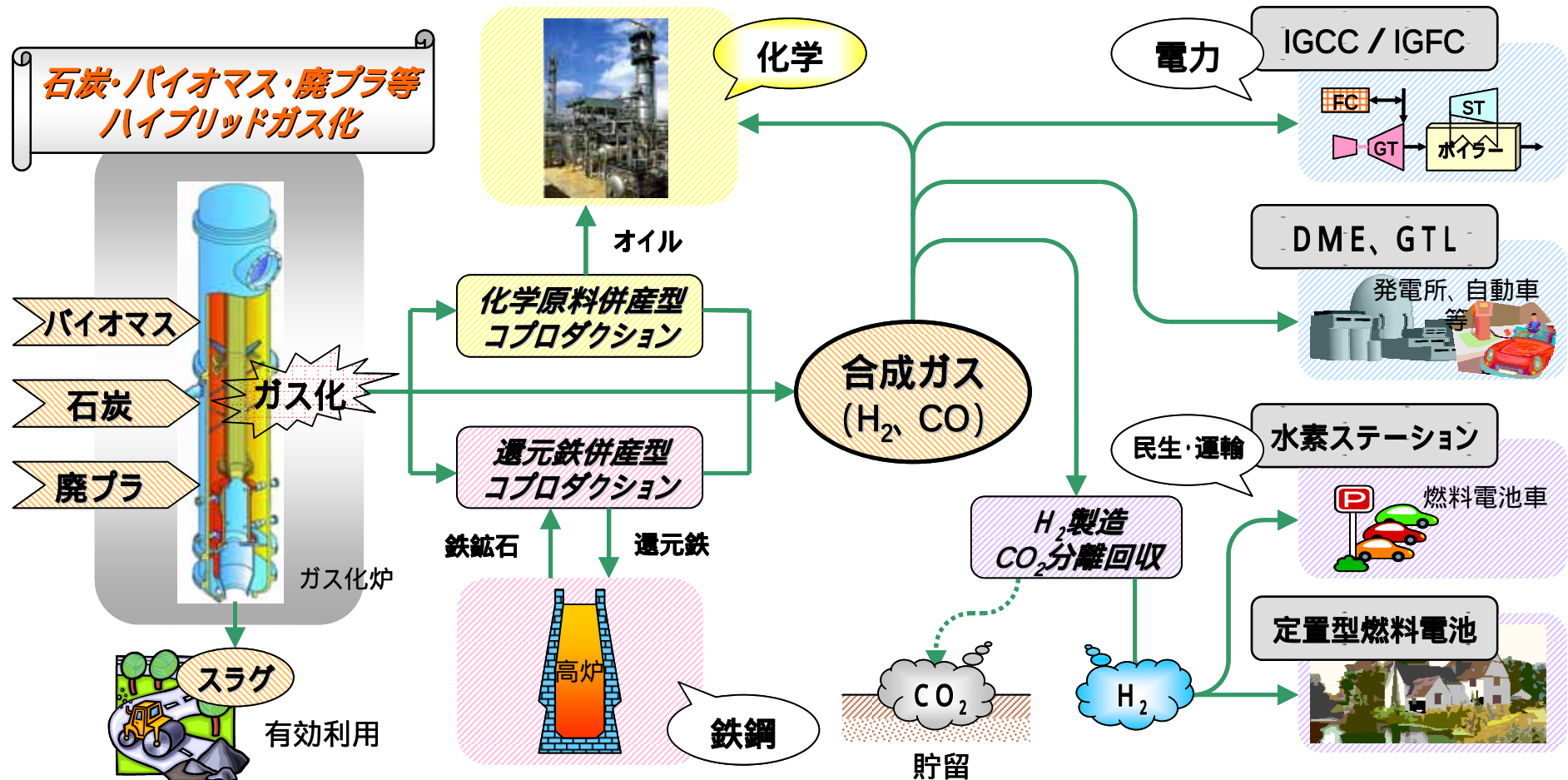
[CCUJ 原田による]



化石燃料・水素・再生可能エネルギー・CO₂ 隔離の統合 エネルギー・地球環境戦略

石炭ガス化を核とする多様なCCTモデル実証の展開

○ 2030年のゼロエミッション実現を目指す技術開発過程において鍵となる石炭ガス化技術を核として、石炭とバイオマス・廃プラスチック等とのハイブリッドガス化や電力と化学原料等とのコプロダクションなど、地域の実情に合わせて循環型社会の形成等を推進する多様なCCTモデル実証の展開を図る。



水素の高度利用を核とした 複合化システム技術開発

(インターフェイス、量的・速度論的マッチング)
(産業間連携、コプロダクション)

個別技術開発
製造
輸送
貯蔵
利用

それぞれの高効率化だけではなく、システムとしての高度化が、水素だからこそできる大きなブレークスルーを生む

化石燃料からの水素製造
とCO₂隔離の統合
(総合的地球温暖化対策)
(高効率化だけではCO₂削減は限界)

水素の多角的機能を活用した
中低質エネルギーの高質化再利用
(エクセルギー増進)

2010-2020年頃の実現に向けて、今から技術開発の行動を起こすべき