

脱炭素社会に向けたグリーン水素



光島重徳

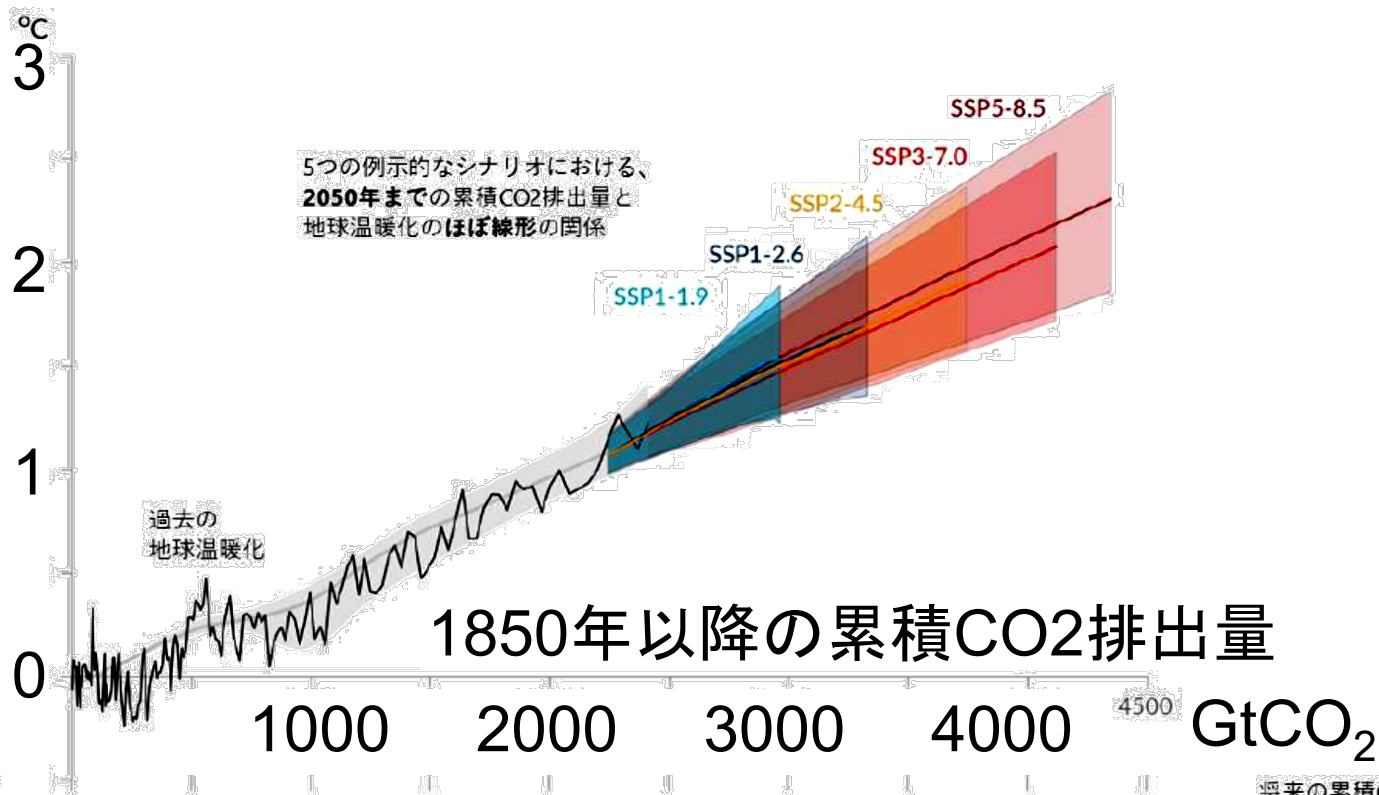
(横浜国立大学 大学院工学研究院

先進化学エネルギー研究センター グリーン水素研究ラボ)

CO₂排出が増えるたびに地球温暖化が進行

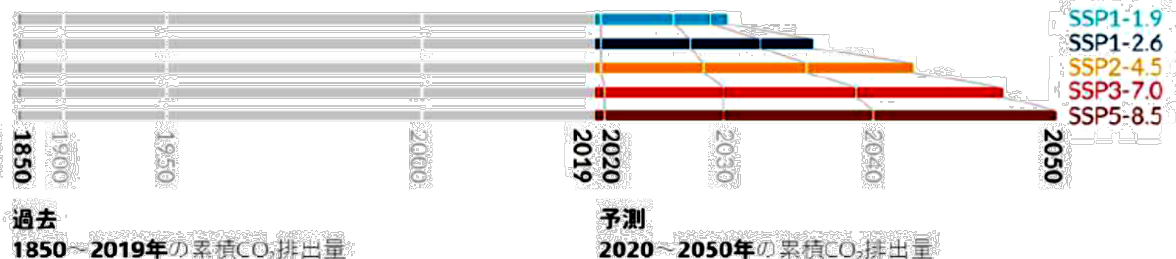
累積CO₂排出量 (GtCO₂) の関数としての1850~1900年以降の世界平均気温の上昇 (°C)

第5次から未来のシナリオを導き出すにあたり、人口や経済成長、教育、都市化、技術的および地政学的な動向など、社会経済的な要素を加えた



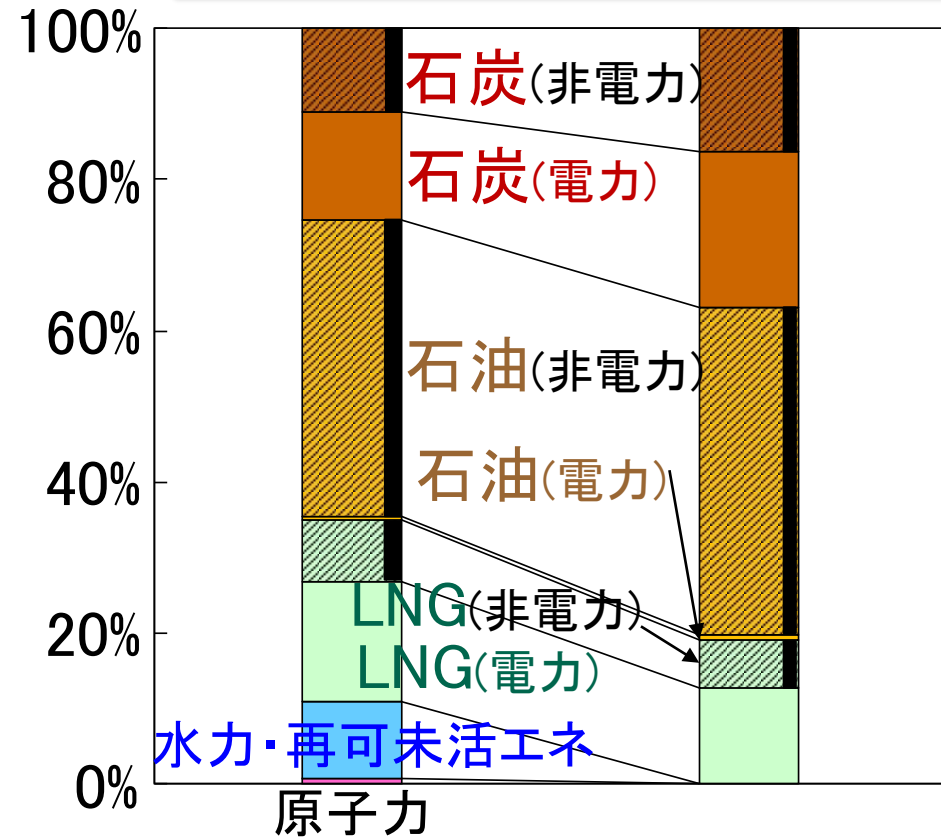
(気象庁HP)IPCC AR6/WG1報告書 SPM 暫定訳 (jma.go.jp)

図SPM.10 累積CO₂排出量と世界平均気温上昇との間の、ほぼ線形の関係



将来の累積CO₂排出量はシナリオにより異なり、どの程度の温暖化が起きるかを決定する

脱炭素のためには非電力分野での再エネ利用技術が鍵



- CO₂フリーの一次エネルギーである水力・再可未活エネおよび原子力は(ほぼ)全て電力経由で利用
- 発電では114 Mt-C/yr、発電以外では221 Mt-C/yrのCO₂排出

脱炭素

- 石炭・石油のエネルギー利用を止めるレベル
- 電力のCO₂フリー化では不十分
- **非電力利用分野の再エネ電化や再エネ利用が不可欠**

一次エネルギーの比

エネルギー白書より

CO₂量の比

温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度／排出係数

- 原料炭: 0.0245 tC/GJ
- 原油: 0.0187 tC/GJ
- LNG: 0.0135 tC/GJ



5 再生可能エネルギー基盤のエネルギーシステム

YOKOHAMA National University

ACERC開設記念シンポジウム「持続可能な社会のエネルギーを考える」 2021.12.11

再エネ電力⇒エネルギー～化学品原料

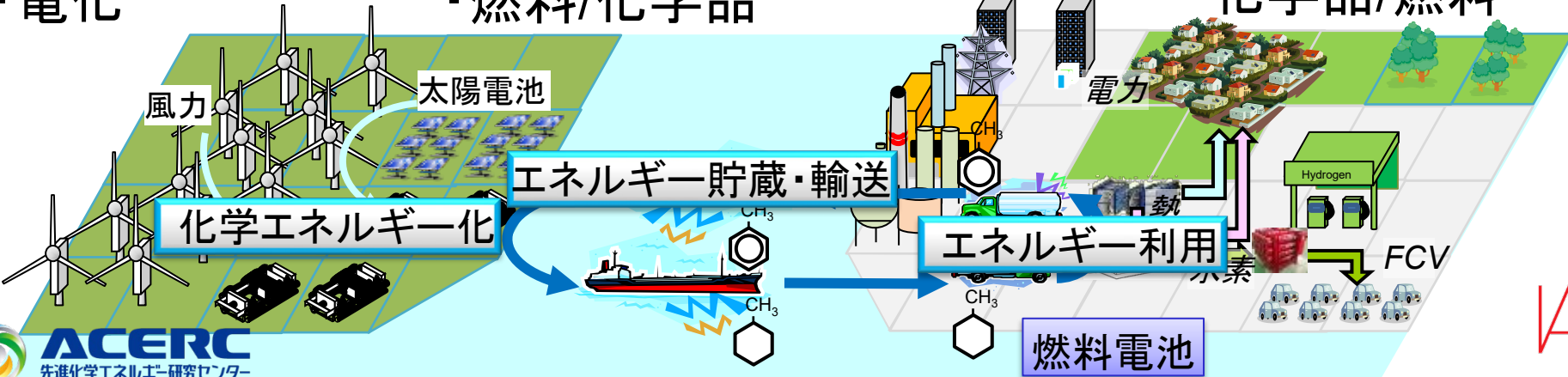
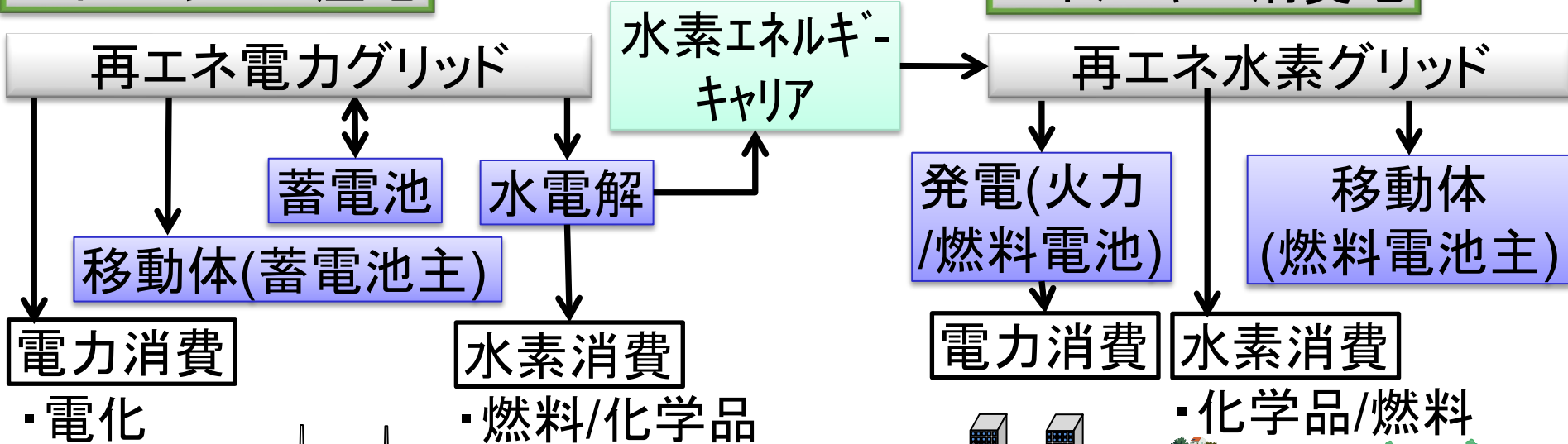
- 化学物質としては水を分解した水素

再エネ電力⇒水素製造

- 水電解が現状の解

エネルギー生産地

エネルギー消費地





6 再エネ化・電化の考え方

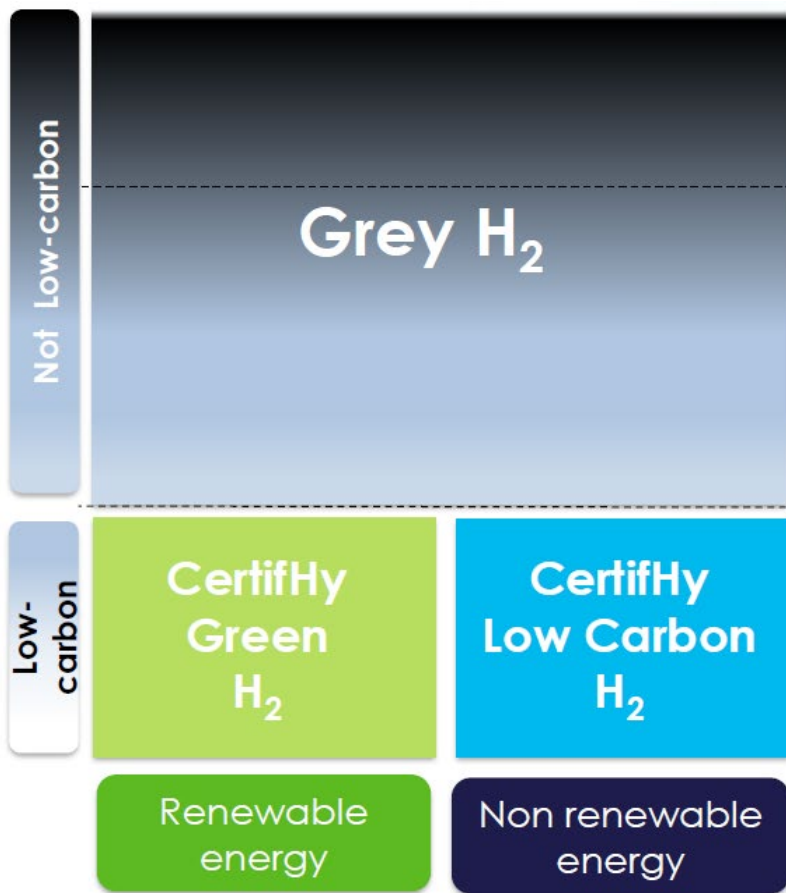
エネルギー生産地 ---変動性の再エネ電力過剰／インバランスが課題

- 電力として利用する分には蓄電池
- 過剰分のグリッド地域外への輸送には水電解⇒水素⇒水素エネルギーキャリア

エネルギー消費値 ---地域のグリッドの再エネ不足/再エネ水素導入

- 地域にとっては水素が一次エネルギー
- 電力網と直接接続できる機器は直接電化
- 移動体などは水素燃料電池で間接電化

- グリーン水素: 再生可能エネルギー由来の低炭素水素
- ブルー水素: CCS(CO₂貯留)等による低炭素水素
- 製造プロセスを考慮した低炭素水素の認証の取り組み例



市場の水素の95%以上の天然ガス水蒸気改質ベースのベンチマーク
(= 91 g CO₂ eq / MJ_{H₂})



-60%(バイオ燃料の閾値)

低炭素の閾値
(= 36.4 g CO₂ eq / MJ_{H₂})

- 蓄電池には比較的短時間の電力システムの安定化
- 水素には電力と運輸や工業との複合=電化の役割を期待

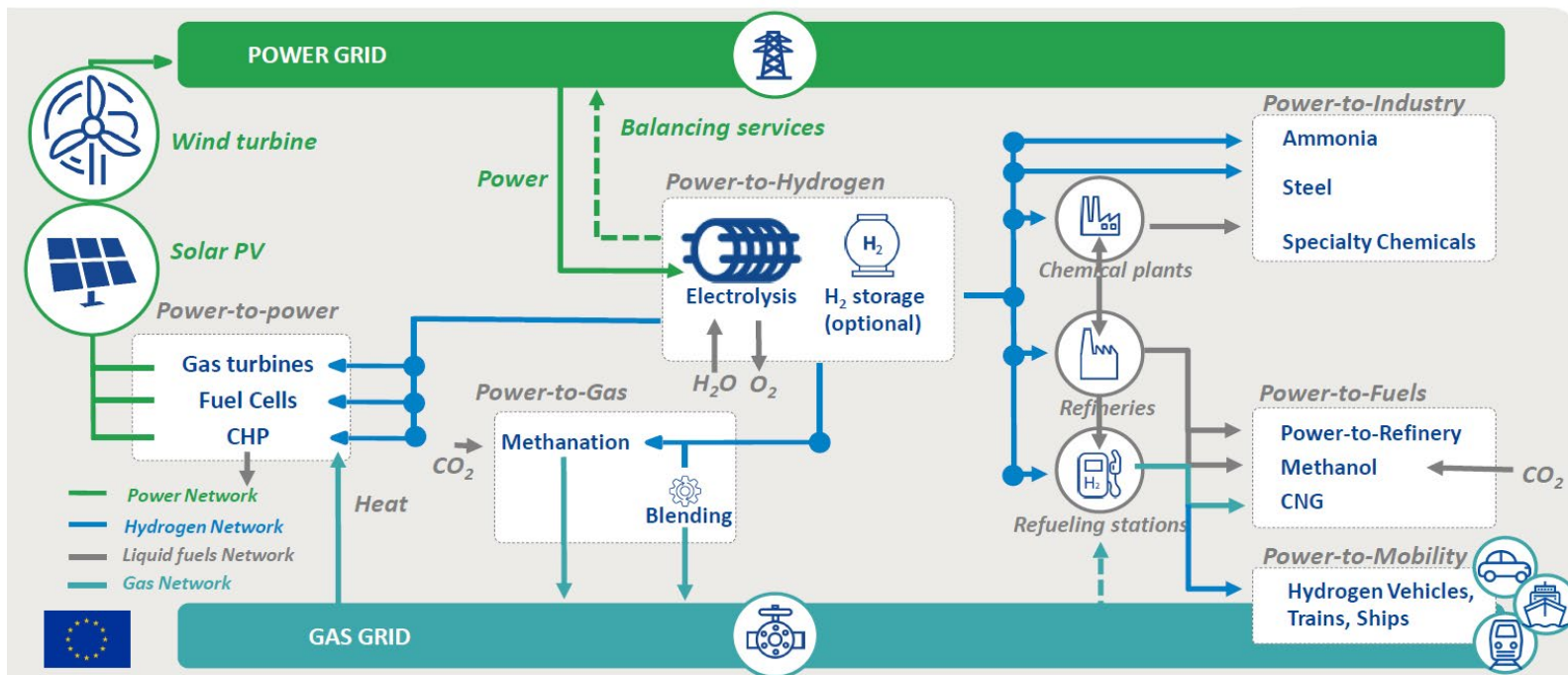
再エネ電力を水素(エネルギー)に変換:水電解

Today's H₂ Production: enabler of Sectorial integration

H₂ is the best option for deep decarbonisation for a number of sectors



FCH-JU programme review (2019)



再エネ電力による需給不一致対策

- 1.蓄電設備によるバランシング
- 2.地域間送電によるバランシング
- 3.エネルギー変換(水素製造等)によるバランシング ⇒ ガスパイプラインの利用など = P2G

ベネルクス地域のパイプライン(H₂: 赤)

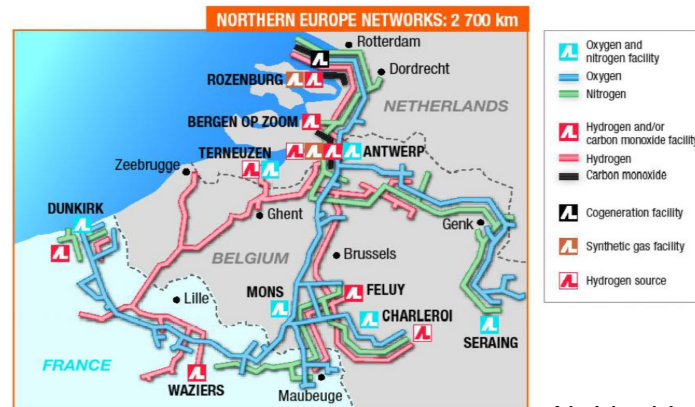


Fig.6 - Industrial Gas Pipelines in the Benelux Region (Source: Air Liquide, 2006)

Air Liquide 2006

<時間的なインバランス>

- 火力のアイドル
- 設備利用率低下

<空間的なインバランス>

- 南北の送電能力不足(日本も)
- 日本国内の再エネ量の不足

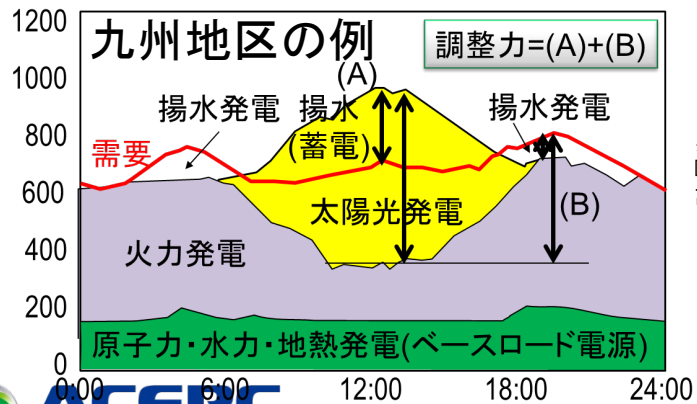
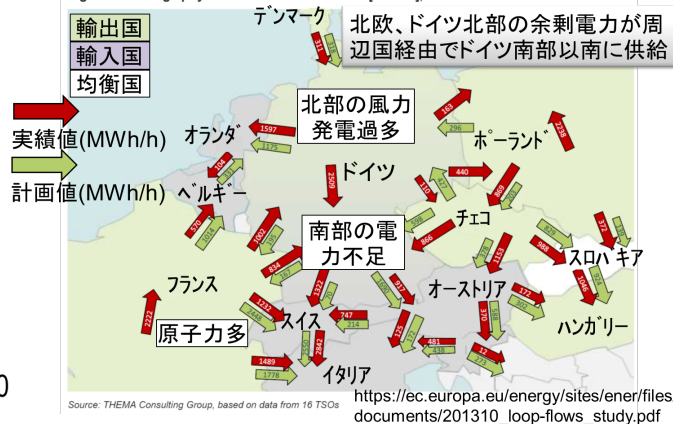


Figure 7: Average physical and scheduled flows [MWh/h], 01.01.2011 - 31.12.2012



<https://ja.wikipedia.org/wiki/電力系統>

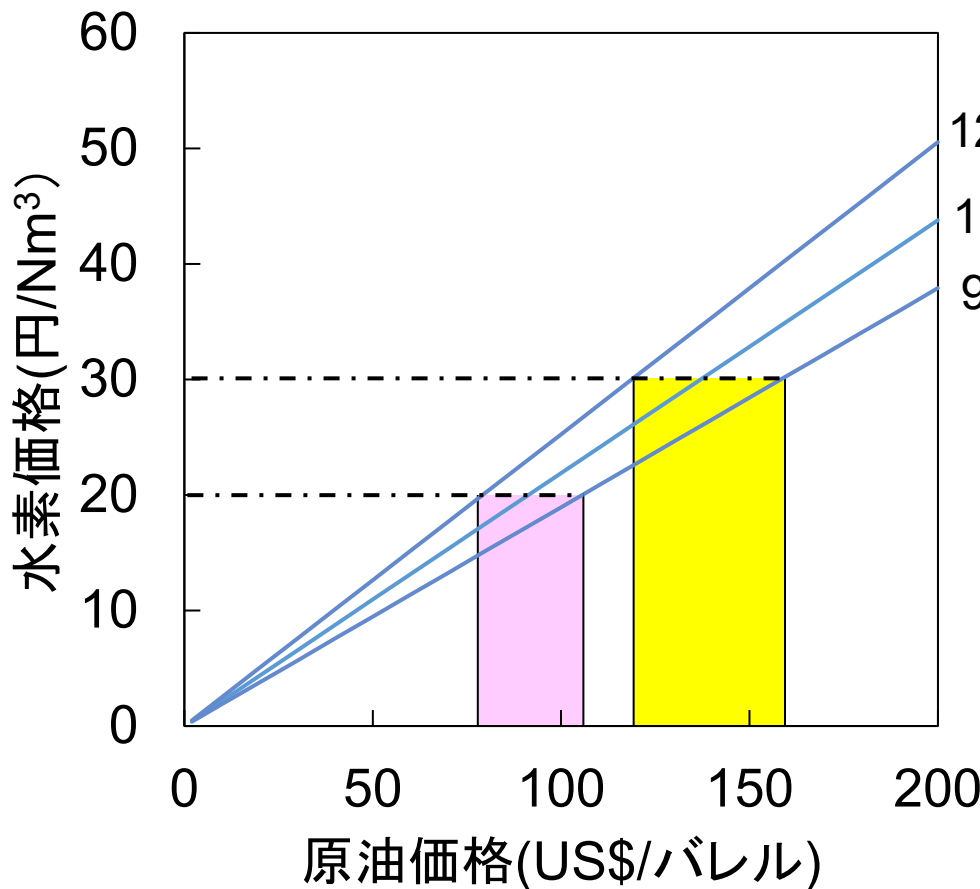




10 水素の価格の目標～原油と熱量換算で比較

水素基本戦略(2017.12): 30円/Nm³(2030)⇒ 将来: 20円/Nm³

原油の市場価格の振れ幅から現実味がある価格帯の目標設定



再エネで可能?
量的な制約は?

- (広義の人工光合成(の一部))
- 再エネ電力+水電解
 - 光触媒での水分解
 - バイオマス水素

現在のステーション価格
(FCVユーザ向けに決めた末端価格)
～100 円/Nm³
1充填 < 4 kg ≒ 4000円



11 水電解水素のコスト構造

- 電解槽の特性を線形近似した水素製造コストの構造
- コスト感度が最も大きいのは**電力単価**と**Aの設備利用率因子**

$$P'_{c,opt} = \frac{Q_0}{\theta_F} \{2\sqrt{AC\beta} + B + C(U_0 + \eta_{act})\}$$

A: 電極面積当たりの固定費-設備利用率/電解槽価格他

B: 電力コスト以外の原料等の変動費

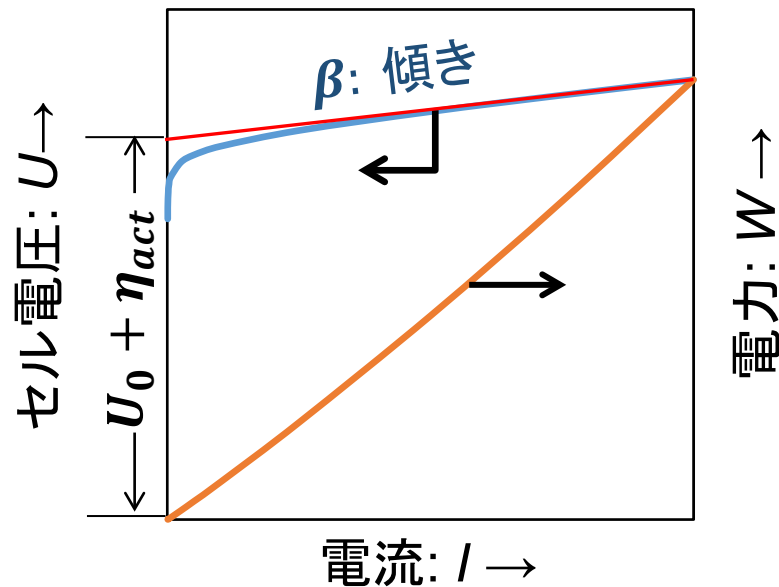
C: 電力単価

η_{act} : 活性化過電圧(電極触媒能)

Q_0, θ_F : 理論電力原単位及びファラデー効率

β : 電解槽の見かけの内部抵抗

η_{act} : 電極の性能



低コスト化

- 電力単価(C): 変動電源の受け入れ向上
- 固定費(A): 電極面積当たりの電解槽価格 (高稼働率化/高平均電流密度化)

- 電源変動耐性: 起動停止モード (耐劣化) 変動モード ⇒ 低内部抵抗(β)化
- 低コスト材料化



12 目標の水素価格と電解槽の性能

前提: ベースをセル電圧 1.8 V, 電流密度 0.6 A/cm², 電流効率 98%
システムコスト 26万円/(Nm³/h)

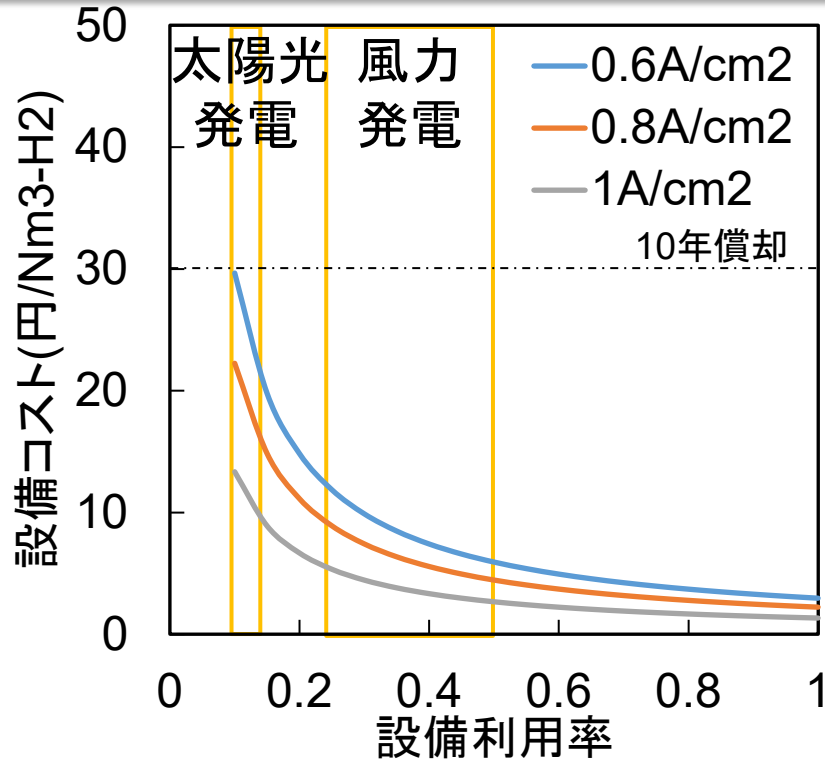
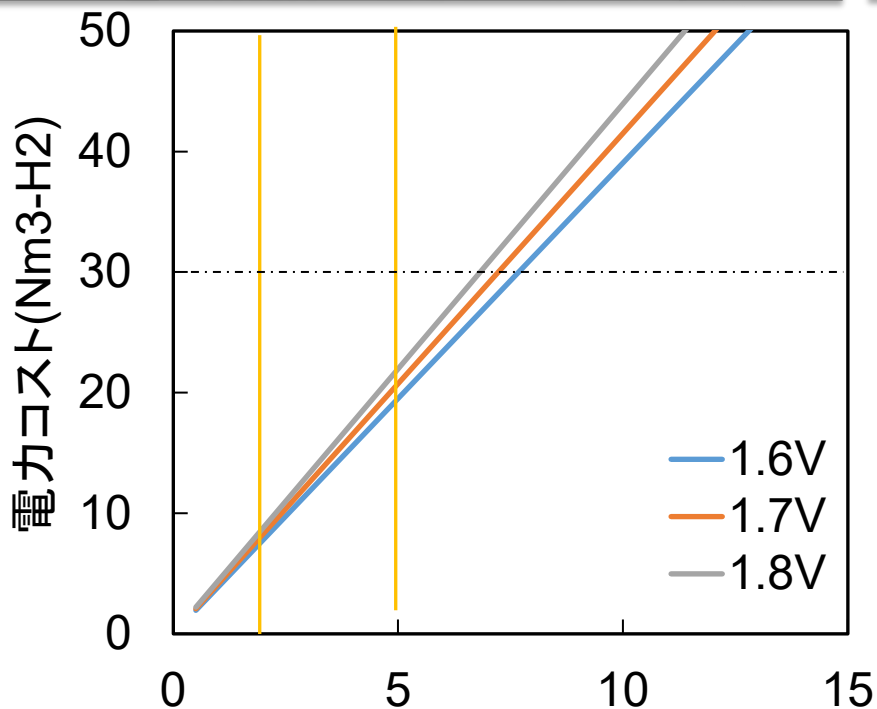
基本計画の
数値ベース

⇒ 2.44 kWh/Nm³, 4.40 kWh/Nm³, 5900万円/MW設備

※ 高電流密度化およびセル電圧削減効果についても検討

- 電力料金の感度は非常に大きく、5円/kWhでも約20円/Nm³-H₂に相当
- セル電圧削減の感度は相対的に小

- 設備利用率の感度は非常に大きく、約60%以上の利用率が望ましい ↔ グリーン電力
- 装置側では高電流密度化が重要





13 再エネ電力の将来見通しと電解槽の特性

YOKOHAMA National University

ACERC開設記念シンポジウム「持続可能な社会のエネルギーを考える」 2021.12.11

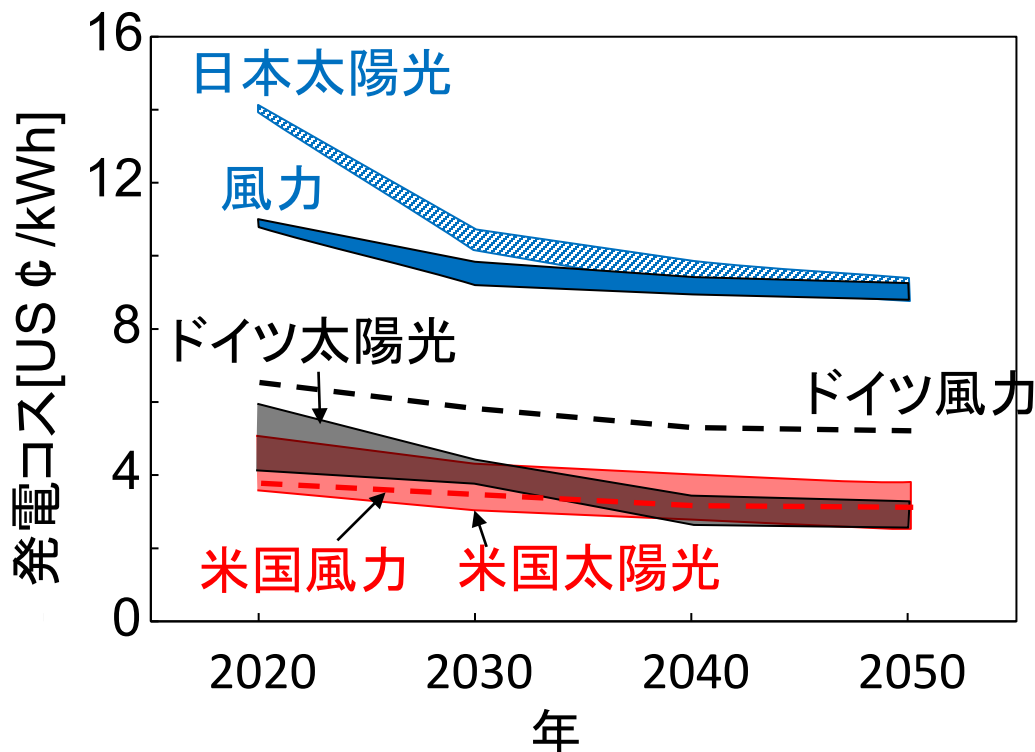
水電解槽システムとして安い再エネ電力＝低質の電力利用が不可欠

再エネ電力の見通し

日本 10～14 ¢ /kWh ⇒ 9 ¢ /kWh

欧米 4～ 7 ¢ /kWh ⇒ 3～4 ¢ /kWh

電力予備力としての付加価値による
電力調達コスト削減が必須



日本エネルギー経済研究所, 再生可能エネルギーに関する海外コスト調査分析事業調査報告書(H30.3)



14 各種の実証/商用大型水電解

YOKOHAMA National University

ACERC開設記念シンポジウム「持続可能な社会のエネルギーを考える」 2021.12.11

アルカリ水電解

旭化成

常圧, $1.8 \text{ V} \times 0.6 \text{ A cm}^{-2} \times 3\text{m}^2$
NEDO FH2Rで10 MW級
(1.5~10 MWの変動運転試験)
食塩電解
(数十MW)



Sunfire

30 bar, 2,230 Nm³/h
10 MW, 4.7 kWh/Nm³



カチオン交換膜水電解

日立造船

0.5MW / 100 Nm³/h

MWパッケージ
0.5 MW x 2
国内: 0.8 MPa (技術的には2~3 MPa可能)



ジーマンス

定格 1.25 MW
~3.5 MPa, 225 Nm³/h





15 水電解槽開発の強み、弱み、開発の必要性

強み

- 食塩電解⇒アルカリ水電解、固体高分子形燃料電池⇒プロトン交換膜水電解の基盤技術
- 電解槽材料の基盤技術・製造技術

弱み

- 国内の法規制／高圧ガス管理法の下では海外製商用電解槽の運転不可など
- 国内の再エネポテンシャル小／国内市場小⇒海外展開前提

必要性

- 再生可能エネルギー基盤のエネルギーシステムの中で製造・変換・輸送・貯蔵・利用にわたる技術を保有、海外展開することが必須



再生可能電力を用いた高効率・コストミニマムのP2Gシステム、その電解槽および使用材料を開発するガイドライン共通評価法や開発手法を提案

地政学的要因

技術的要因

地理的要因
地域エネルギー
経済要因

- 機能発現機構モデル
- 劣化機構モデル
- 試験法標準化
- 電解槽シミュレーター

材料データ
ライブラリ

産業育成

- 再エネの変動性
- 規模
- 電力/水素出etc.

電解槽基本仕様に適合した
材料・電解槽の選定・開発手法

- 材料メーカー
 - 材料評価法
 - 高度分析支援
- 電解槽メーカー
 - 材料評価法
 - 電解槽設計支援
- システム開発
 - システム設計支援

システムモデル/
シミュレーター

システムに最
適化した材料・
電解槽仕様

電解槽
基本仕様

立地条件に適合した高効率・コストミニマム
P2Gシステムの設計手法

- 電源/電解槽/蓄電池の容量比
- 制御アルゴリズム
- システム機器仕様

水素製造システム

標準化の基盤としてNDA1, 産業界との知財創生の基盤としてNDA2を設定したプラットフォーム

知財合意: 協力企業との関係を包括



NDA1(共通の条文)
横国大が代表

企業1
企業2

企業等の開発支援

NDA1

- 技術情報提供 (各企業で活用)
- 技術情報に関するフィードバック

企業と挙動で開発

NDA1+2

- 共同実施者
- 双方向の技術情報提供
- 知財の共願

企業2
企業3

PJ内で測定法+新材料

NDA2(個別の条文, 自由な機関の組み合わせ)

NEDOプロの横連携

再エネ対応システムモデル



東北大:システム設計指針の提案

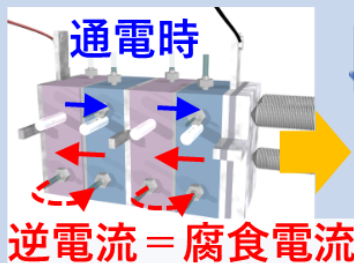
横国大
構成材料評価
基盤技術の開発



産総研
SPEWE触媒の
活性評価法開発・
劣化要因解析

大阪府大:AWE触媒
の活性評価法の開発

ラボスケール電解槽による基礎解析



試験法提案



- 劣化条件模擬法
- 触媒評価法
- 膜評価法
- 材料開発加速

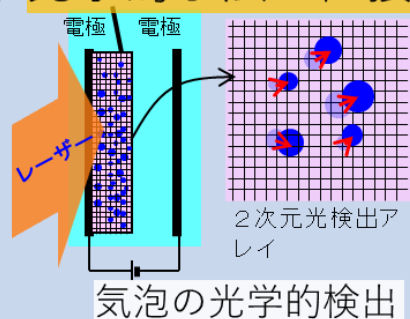


デノラ: 基準電解槽を用いた長期劣化試験



横国大: 電解槽内物質輸送現象の解析

光学的手法・直接観察による気泡の分析



気泡排出を最大化する電解槽構造

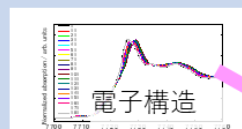


京大:レーザー光によるファインバブル解析



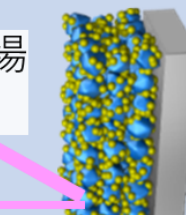
横国大:気泡の直接観察とモデル化

動作状態での触媒能解析



その場解析

放射光
SPring-8



電極触媒



京大:放射光による性能発現・劣化機構解析



立命館:放射光による劣化機構解析



19 まとめ

- 二酸化炭素排出量抑制のためには再生可能エネルギーの大幅導入が必要 --- 2°Cシナリオには非電力分野の再エネ化も必須
- 太陽光や風力などの変動性の再生可能エネルギー大規模導入のためには水電解技術(グリーン水素製造技術)は必須 (Power to X)
- 日本は食塩電解や燃料電池などで水電解に必要な基盤技術を保有するが、法規制、国内市場(再エネポテンシャル)など課題も多い
- NEDO／アルカリ水電解および固体高分子形水電解の高度化にて、Power to 新たなオープンイノベーション体制で基盤技術と新技術の開発を推進
 - ✓ 再エネ利用電解槽の使い方、性能発現・劣化機構
⇒材料やシステム開発の指針