

2023年7月11日

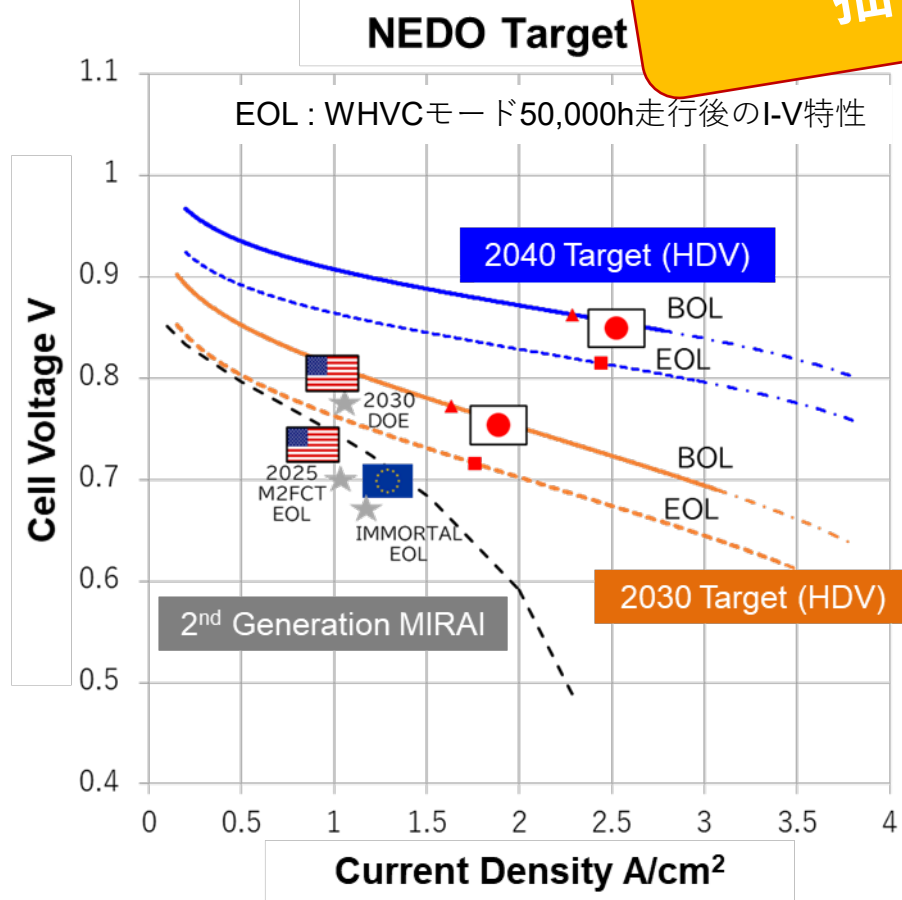
**技術ロードマップを実行するために
日本の産官学が果たすべき使命
～ 2040年に向けたアグレッシブな研究開発 ～**

国立大学法人山梨大学
水素・燃料電池ナノ材料研究センター
飯山 明裕

2030年頃および2040年頃のFCスタックの技術目標

- 2030年頃および2040年頃の技術目標（I-V目標、作動条件、耐久性）
- 2040年のI-V目標に対しては、材料のみならず、システム全体の最適化、システム設計、ラック設計、冷却システム、ラック設計、冷却システム、ラック設計、冷却システム

大型トラックの競争力のある製品要件から抽出された目標となっている。



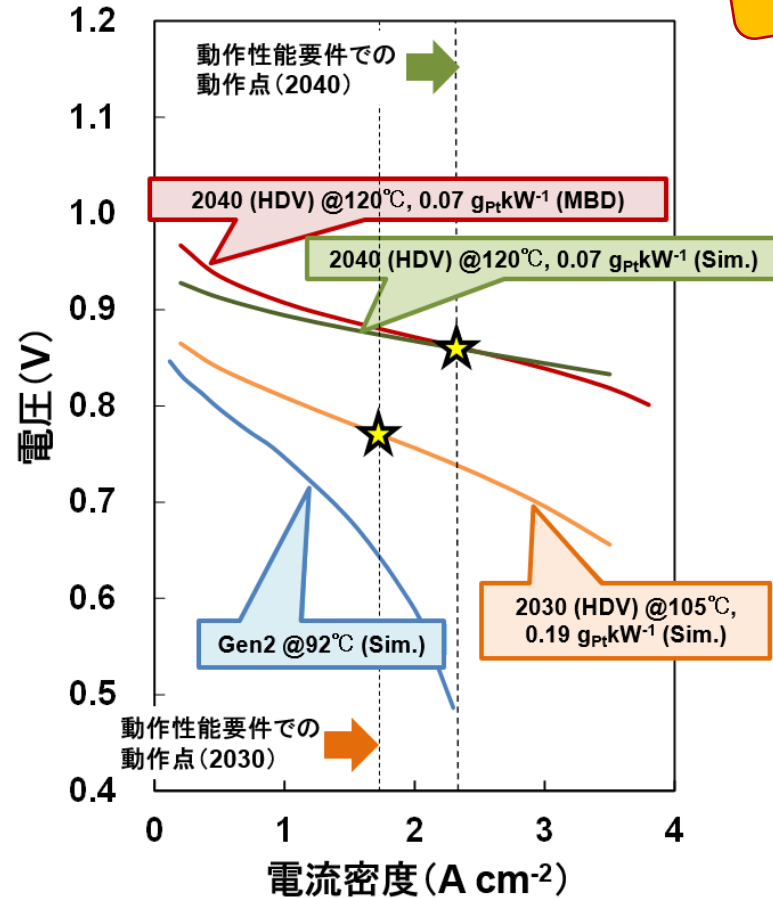
項目	2030年頃の目標	2040年頃の目標
FCスタック性能		
I-V要求性能*1	BOL : 0.77V@1.63 A/cm ² EOL : 0.72V@1.76 A/cm ²	BOL : 0.86V@2.29 A/cm ² EOL : 0.81V@2.44 A/cm ²
作動温度範囲	起動最低温度 : -30°C (外気) 作動最高温度 : 105°C (冷却水出口温度)	起動最低温度 : -30°C (外気) 作動最高温度 : 120°C (冷却水出口温度)
入口湿度	20%RH	12%RH
耐久性	50,000 h	50,000h
コスト		
FCシステム (FCスタック)	0.9 万円/kW *2	
Pt量	0.19 g/kW *3	0.07 g/kW *4,*5

*1 大型トラックの製品要件から導出された2030年頃、2040年頃の目標I-V特性上の熱定格動作点
 *2 大型トラック年産10万台前提のコスト、水素貯蔵システム、二次電池、インバータ、モータ等の電動化部品を含まない
 *3 Pt目付量0.24 mg/cm²としてスタック1基あたりの定格出力114 kW, MEA面積273 cm², 330セルを前提条件とした数値
 *4 Pt目付量0.14 mg/cm²としてスタック1基あたりの定格出力190 kW, MEA面積293 cm², 330セルを前提条件とした数値
 *5 2050年にはPtの資源循環可能なレベルまでの低減が必要

要求I-V性能を達成するための材料目標への割付

- 2Dシミュレーション（MEA厚さ方向+セル流れ方向）を用いて、HDV用燃料電池の動作点でのセルI-V性能と過電圧、および内部分布を予測し、各材料の性能目標を割り出す。
- 動作点においてセル内部の温度は最大で冷却不足による過熱が起きる可能性があるため、この範囲を考慮した材料開発が必要

“桁違い”の物性・特性が求められている。



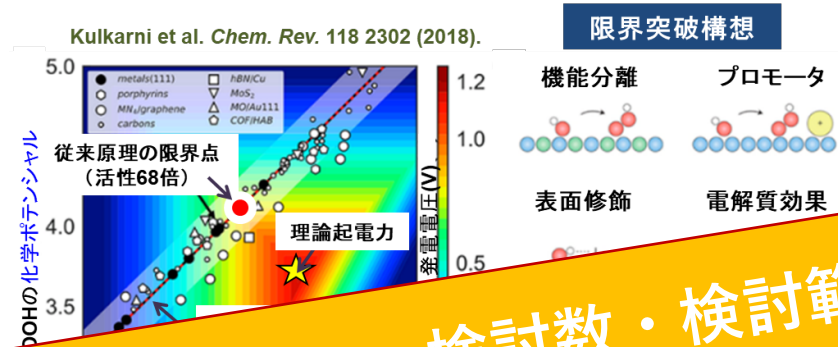
主要材料	物性・特性	2030	2040
電解質膜	厚さ (μm)	8	1
	プロトン伝導率 (S/cm)	0.032 @120°C, 30%RH 0.12 @80°C, 80%RH	0.15 @55~125°C, ≥12%RH
	H ₂ 透過係数 (mol s ⁻¹ m ⁻¹ Pa ⁻¹)	8×10 ⁻¹⁵	4×10 ⁻¹⁵
空気極触媒層	厚さ (μm)	6	4
	Pt目付量 (mg/cm ²)	0.200	0.120
	質量活性 (A/g) @0.1 MPa _{O₂} , 100%RH, 80°C	1,740 (Gen2 MIRAI比 3.4倍)	39,000 (Gen2 MIRAI比 78倍)
	プロトン伝導率 (S/cm)	0.032 @120°C, 30%RH	0.15 @55~125°C, ≥12%RH
	酸素移動抵抗 (s/m)	10	8
空気極GDL	Pt溶解速度	—	× 1/30 (vs. 3nm of Pt particle)
	ガス移動抵抗(s/m)	18	18

(※) 電解質膜のプロトン伝導率は補強材込、クエンチャ添加など、耐久性を担保した状態での伝導率。2030年目標との対比から120°Cの伝導率を示しているが、55~125°Cの範囲（湿度12%RH以上）で、この目標を満たすことが前提

2040年頃に向けた材料開発シナリオ：触媒材料

スケーリング則をいかに脱するか

- 過電圧分離から1桁以上の活性向上が必要 (> 70 mV)
 - 報告例のある既存触媒ベースでは2030年目標が限界と判断
 - 伸び代は大きい既存の触媒とは異なる開発が必要
- ⇒ 検討数 vs. 検討範囲の技術的な戦略 (検討数/検討範囲の向上)
- DX技術が必須 (MI・計算・自律自動実験を含む)
 - 計算は検討範囲を絞り込むスクリーニング技術が鍵



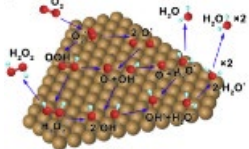
“桁違い”の活性向上のために、検討数・検討範囲の向上が必要で、DX技術が必須とされる。

貴金属 (2030年目標の発展)

Pt単原子層化 (究極の比表面積化) と電子状態最適化でPtの極限を狙う (質量活性~68倍 vs Gen2 MIRAI)

更なる伸び代として、電解液側の制御、表面修飾で吸着中間体ごとの安定性を変化

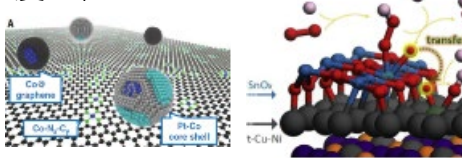
Chem 2019, 5, 1486-1511



合金の検討 × 表面形成 × 電解液 (など)

ハイブリッド

異なる触媒で近接させ、スケーリング則の支配を脱する可能性。活性点密度は低い



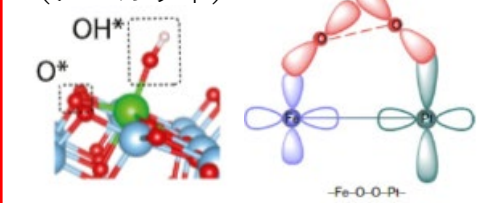
Pt合金 + カーボンアロイ Pt合金 + 酸化物

Science 2018, 62, 1276-1281
J. Am. Chem. Soc. 2019, 141, 9463

合金の検討 × 助触媒 × ハイブリッド条件

超低白金

酸化物などの表面を利用し、中間体の吸着を適した状態を構築、世界最高活性が報告されている (アルカリ中)

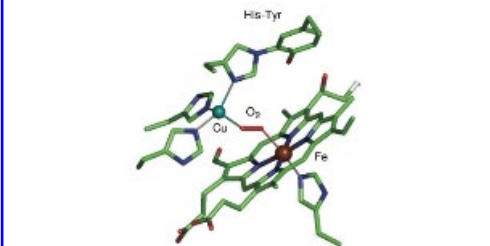


J. Phys. Chem. C 2019, 123, 19486
Nature Energy 2021, 6, 614

母相表面 × 表面サイト × 電子伝導

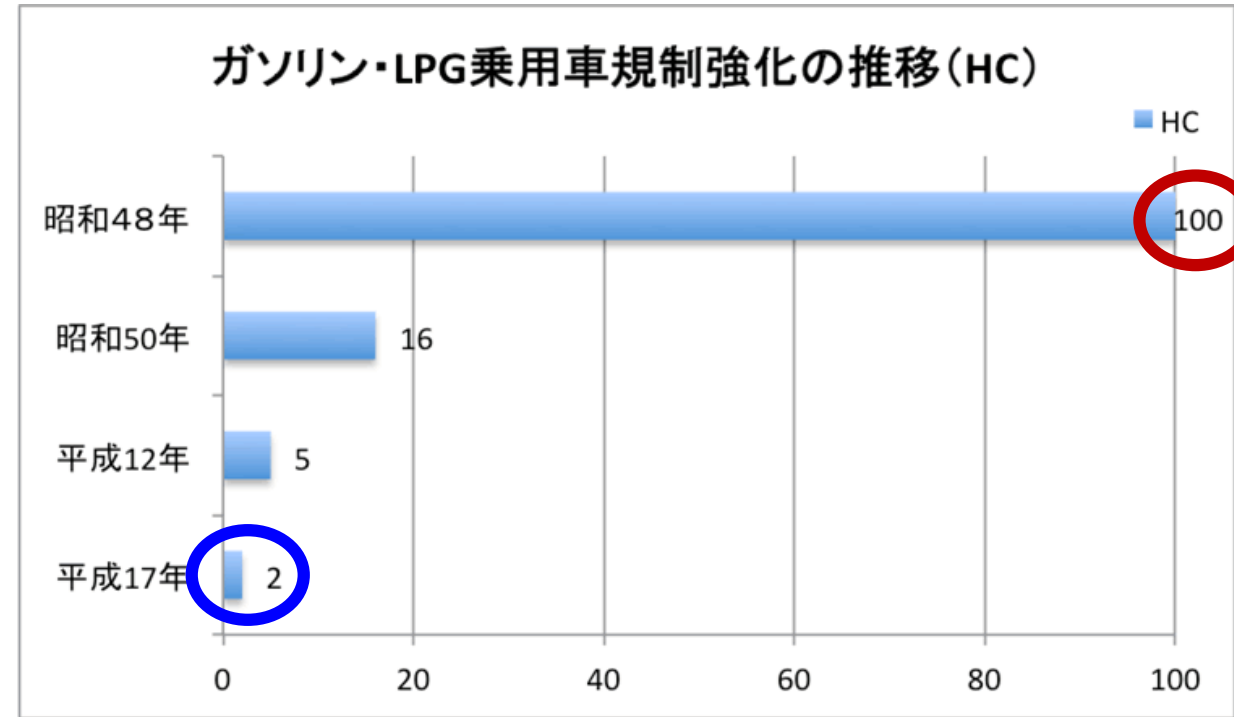
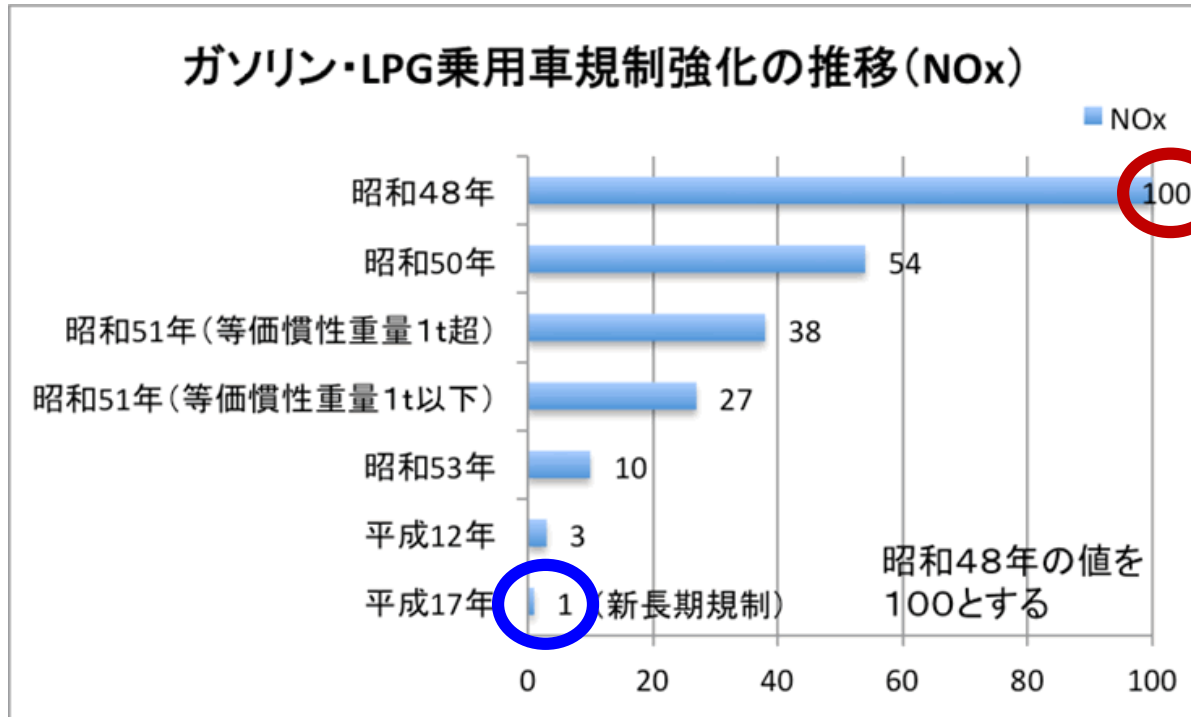
錯体・シングルアトム触媒

Cyt c oxidaseのような理想的な活性サイトを追求。FCV用の大電流化と耐久性が課題



Inorg. Chem. 2010, 49, 3567-3572

計算での候補材料のスクリーニングが期待される

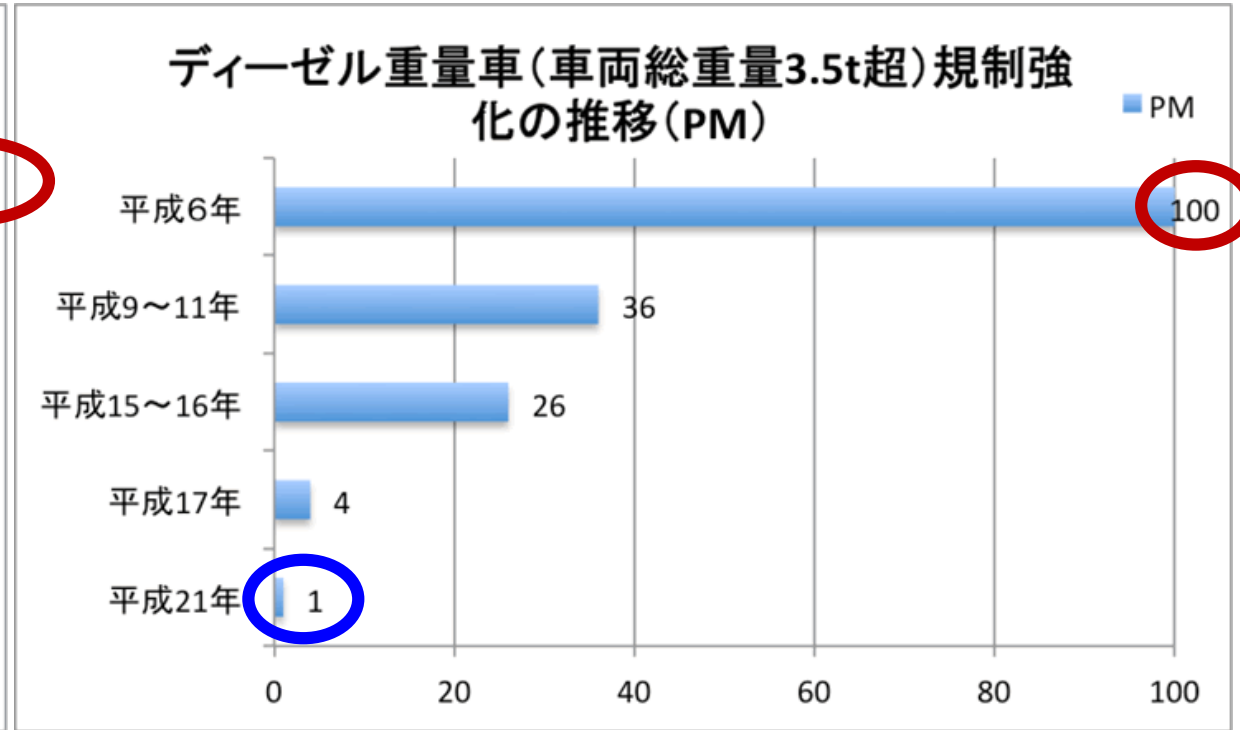
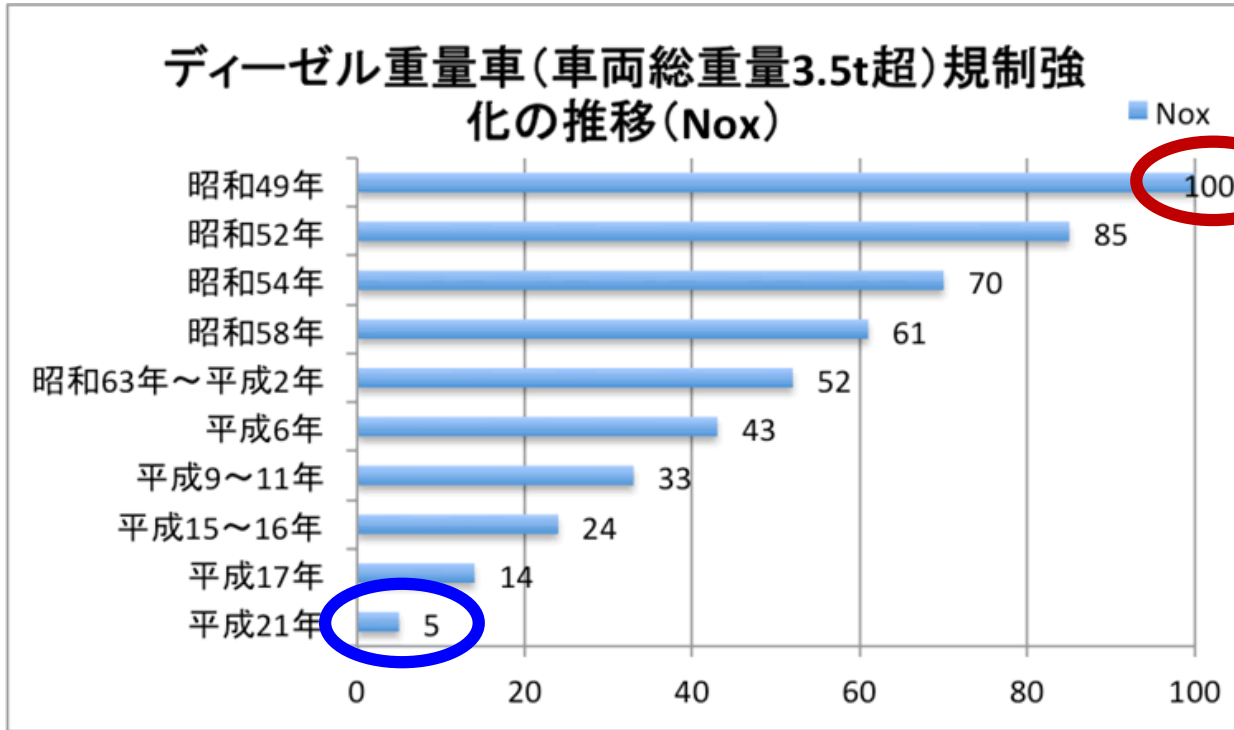


出典：独立行政法人環境再生保全機構HPより

■ NOx、HC、CO、を二桁下げる技術への挑戦

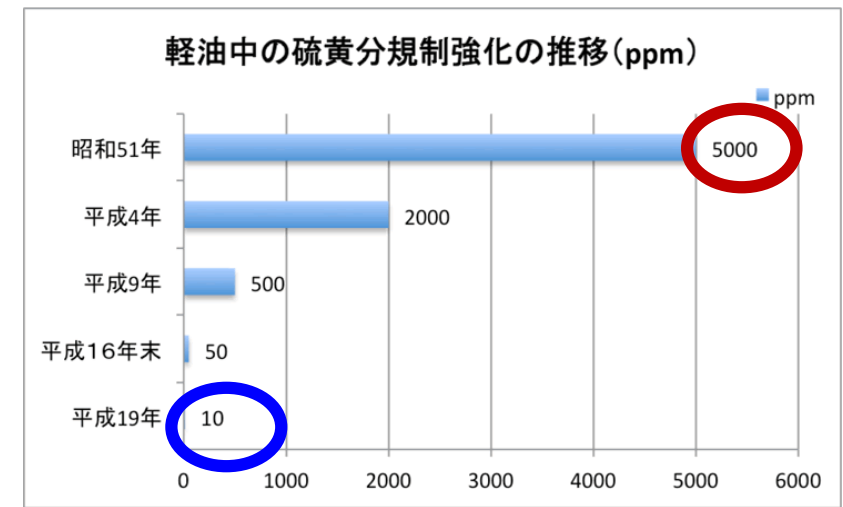
- 自動車会社、学会、触媒会社、燃料会社が密接に連携して取り組んだ。
- 三元触媒システム（制御含め）などの革新的技術の構築により、排気と出力・耐久性の両立に成功。

出典：独立行政法人環境再生保全機構HPより



■ NOx、PMを二桁下げる技術への挑戦

- 自動車会社、学会、触媒会社、燃料会社が密接に連携して取り組んだ。
- NOx浄化システム・DPFシステム（制御含め）、軽油中の硫黄分除去などにより、大型商用車において、排気と出力・耐久性の両立に成功。



■ 産官学の密接な連携

- ✓ 産官学連携：大学のエンジン・燃焼研究室と企業との連携
 - 排気ガス浄化コンセプト
- ✓ 人材育成：大学でエンジンに触れた学生の企業就職

■ 評価・解析技術の高度化と普及

- ✓ 透明単気筒可視化エンジン、燃焼シミュレーション
- ✓ 排気ガス分析装置
 - ダイナモ併用実車データ全自動模擬評価

■ 材料技術開発力の高度化

- ✓ 触媒メーカー・燃料会社との連携

■ 研究・開発力の大幅向上：**DXのアグレッシブな導入・普及・活用**

✓ 基盤としてのデータベースとデータプラットフォーム、インフォマティクス（MI、PI、MEI）、自動・自律実験、計算技術・モデル化技術、自然言語処理

- 本質的影響因子の抽出と**定量解釈**（竹中ら、電気化学、91（2））（実験計画法）
- 人工知能モデル内部の**ブラックボックス化対応**（竹中ら、同上）（学生向け全自動実験事例）
- 自動・自律実験、マルチモーダル評価設備の高額化/大型化

■ 産官学の密接な連携による**高度な即戦力人材育成**

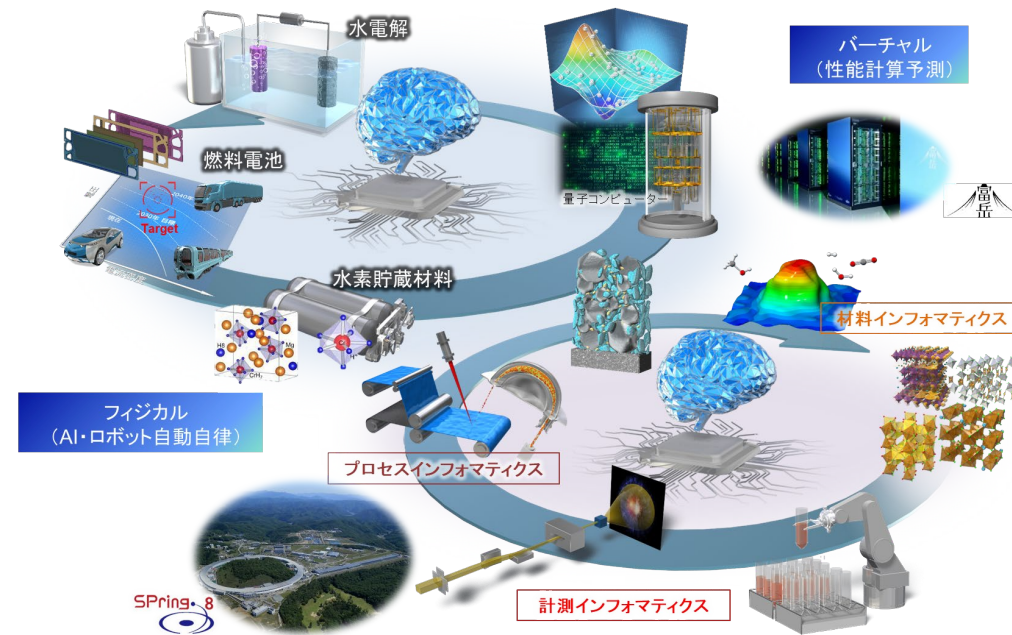
✓ 一か所で交じりあって一緒に取り組む流動性の高いチームング

- **複数の専門分野融合で構成されたチーム**を構成
- 過去にも、超LSI技術研究組合（'76年～'80年、VLSIの実用化）、ACE（新燃焼システム研究所'87年2月設立、現(株)新エイシーイー）、など、競合会社の技術者たちが共同で共通の技術的課題に挑む事例あり。

2040年頃に向けた材料物性・目標の考え方

- 現行技術の進化による性能向上を目指す2030年頃までのPEFC技術開発に比べて、2040年以降の目標達成へのシナリオは、現行技術の延長線上にはない不連続な性能向上を必要とし、その時期や程度を正確に予測できるものではない
- ↓
- システム側からの必要条件をもとにロードマップの軸となる主要材料（触媒、電解質材料）の整理
 - **可能性のある材料系の現時点での案の提示**（排他的なものではない）
 - 個別の物質・材料にフォーカスせず、**材料のポテンシャルの科学的な理解を軸に分類**
- こうした材料の研究開発においては、現状技術の限界を打破するための基礎研究（新学理・革新コンセプトの創出）、かつ研究開発自体のやり方を変革することが重要

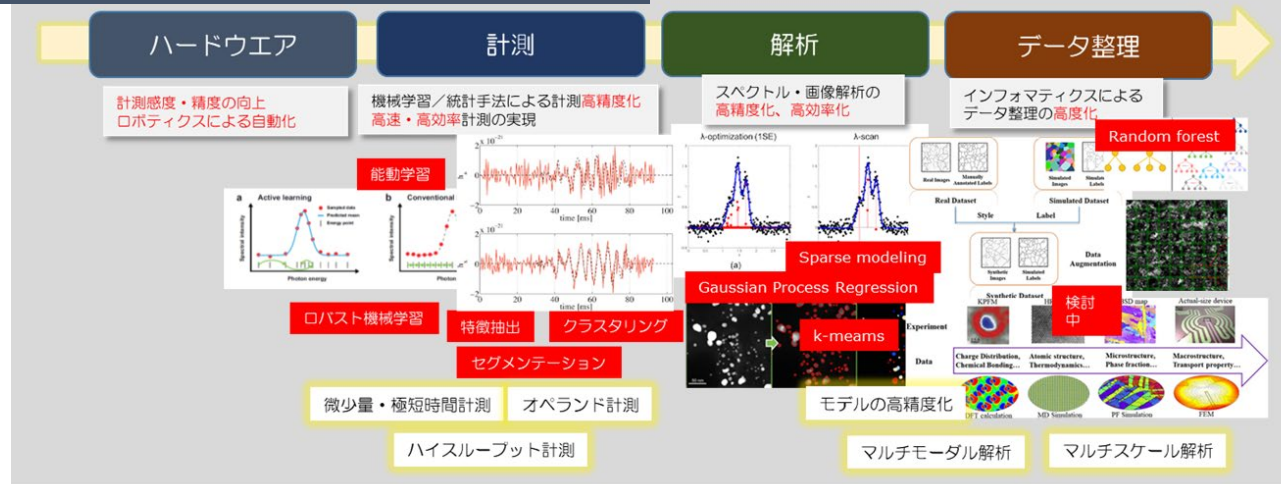
高度な解析、計算科学技術による現象・機構解明にもとづき材料設計の指針を提示するとともに、これらの解析・計算データを蓄積し、**デジタルトランスフォーメーション（DX）技術を活用することで、従来の試行錯誤による開発手法を打破し、科学的かつ効率的に材料・プロセスの探索を推進**、さらに、その過程で創生された材料候補のデータをフィードバックすることで開発サイクルを加速



2040年頃に向けた材料開発シナリオ：DX技術の活用推進

- DX技術は、2030年および2040年頃の目標をめざした**燃料電池・水素関連技術開発の加速化・効率化のための支援技術**
- 2030年頃までにDX技術開発を行いながら、開発した技術を順次標準的に使用
- スタック・生産技術・水素貯蔵などの要素技術開発・実用化技術開発に関連し、横断的・共通項目となるような技術として、**基盤（データベース、データプラットフォーム）、インフォマティクス（MI/PI/MEI）、自動・自律実験、計算・モデル化技術、自然言語処理**を設定
- DX技術の項目間も互いに密接に関係しており、連携の下で開発を推進

MEI（計測インフォマティクス）の適用領域



量子ビーム計測・先端計測機器への実装

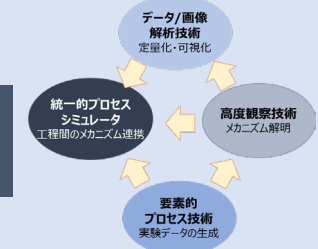
大量データ生成



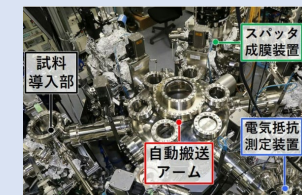
MI（マテリアルズ・インフォマティクス）



PI（プロセスインフォマティクス）



自動・自律実験



人材育成の在り方

今後、研究開発加速に向けて求められる人材

- 現状技術の究極や原理原則の追求によりイノベーションを実現する人材
- 個別要素技術を融合し、セル・スタックの機能設計ができる人材

研究人材の確保

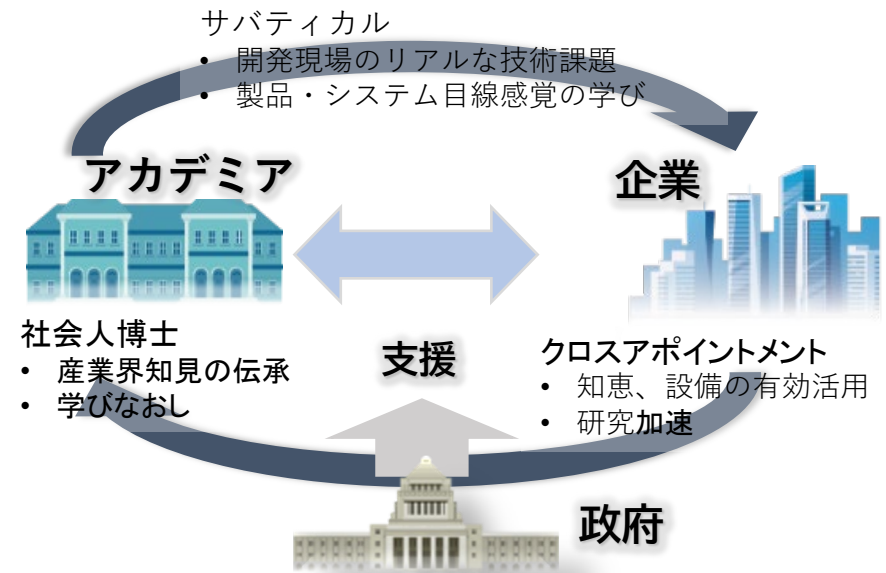
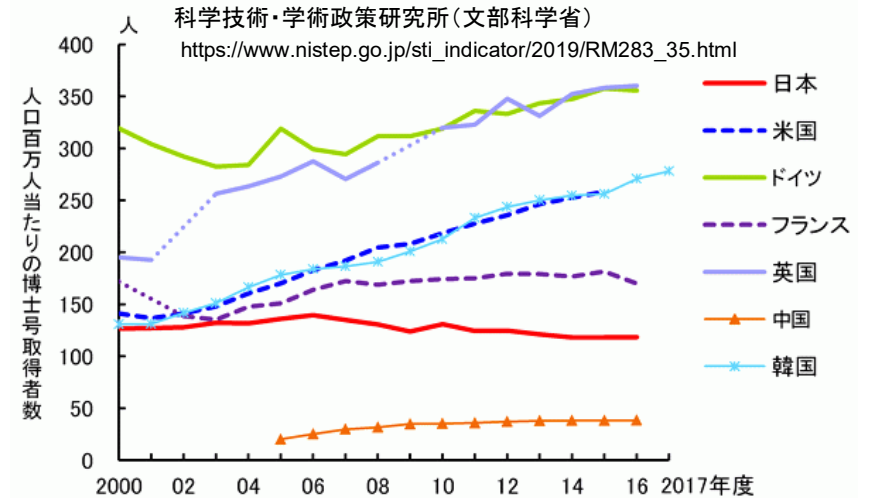
- 研究人材・**若手研究者**への長期的視点での投資
若手（高校/学士/修士）から、水素・燃料電池に触れる機会の創出
 博士課程・取得後の**異分野経験**などを含めたキャリアパスの整備
 博士取得後の雇用機会の確保
- **海外研究機関との連携**・人材の流動

異分野融合のチーム型研究

- 複数の**専門分野融合**で構成されたチーム構成
 材料/電気化学/分析解析/計算機科学/化学工学/
 プロセス/流体/伝熱/機械工学・・・
- **俯瞰的・統合的なマネジメント**ができるプログラムダイレクタの育成

産官学連携・人材流動による研究者育成

- 学から産（サバティカル）
 - 産から学（社会人博士）
 - 産学クロスアポイントメント
- の**人材流動**を通じた研究者育成



- 今回のロードマップは、大型商用車の競争相手（水素エンジン、LiB）に対しても、**競争力のある製品要件**から導かれた性能、耐久性の目標値になっている。
- ぜひとも、このロードマップの目標を実現して、CNの実現にとって最も総合的な損失の少ない、利点の多い選択肢を提供できるようにしたい。
- ただし、目標値そのものは既存の材料に比べて“**桁違い**”の性能、耐久性などが挙げられており、既存の産学官の研究・開発カレベルでは、実現は容易ではない。
- 研究・開発力強化のために**DX（人材育成含め）**は必須の取り組みであるが、『**材料開発などに比べ、DXは目標や取り組みが曖昧になりがち**』でもあるため、産官学が強く意識して、**アグレッシブ**に取り組む必要がある。