

単セル評価・耐久プロトコルの開発

2021.12.10

第6回 FC-Cubic オープンシンポジウム

技術研究組合 FC-Cubic

金坂 浩行

内容

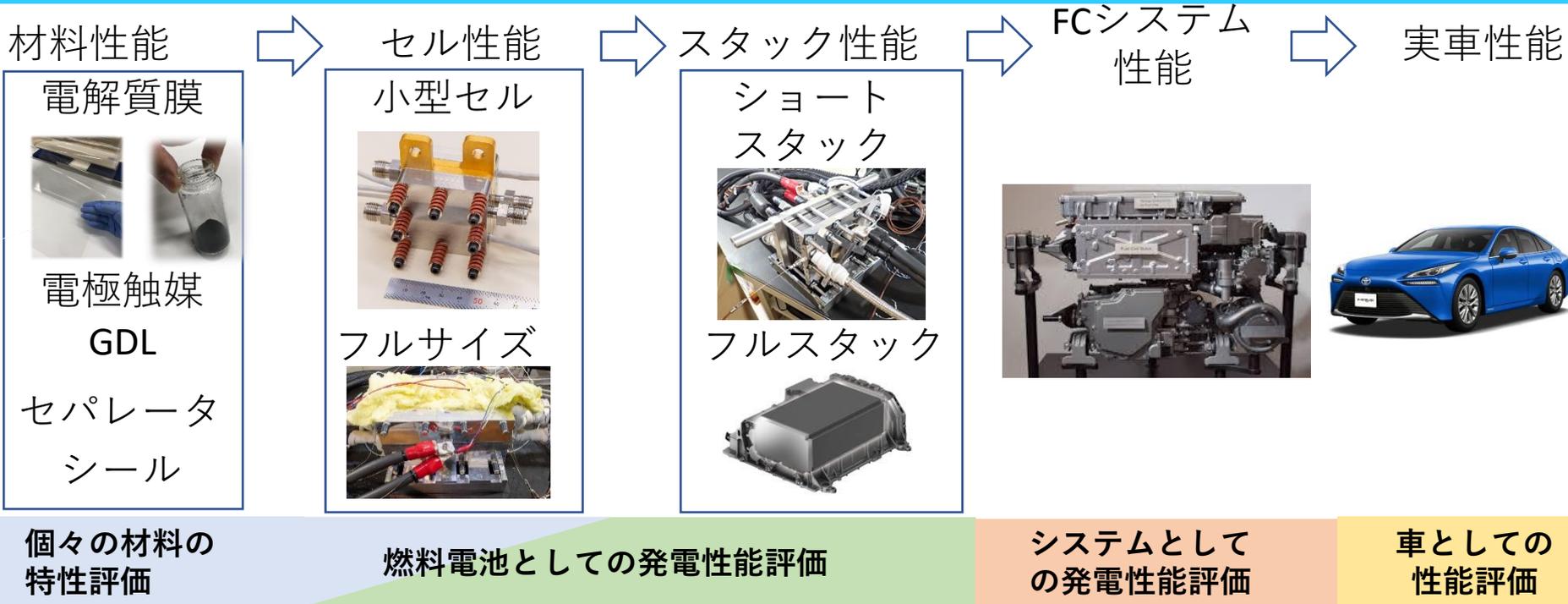
- ◆ 燃料電池の単セル評価・耐久プロトコルの必要性
- ◆ 乗用車向けの単セル評価・耐久プロトコル
- ◆ 大型トラック（HDV）向けの単セル評価・耐久プロトコル
- ◆ 今後
- ◆ まとめ

内容

- ◆ 燃料電池の単セル評価・耐久プロトコルの必要性
- ◆ 乗用車向けの単セル評価・耐久プロトコル
- ◆ 大型トラック（HDV）向けの単セル評価・耐久プロトコル
- ◆ 今後
- ◆ まとめ

燃料電池の単セル評価・耐久プロトコルの必要性

燃料電池の性能開発の流れ



新規材料の開発には小型の単セルレベルで行うのが効率的

OEM

新規MEA・MEA材料の選定

評価・耐久条件が違い、どの材料の性能がいいか判断できない

？
評価条件が違って、どれがいいかわからない。



？
耐久条件が違って、比較できない。



評価・耐久条件 1



評価・耐久条件 2



評価・耐久条件 3



評価・耐久条件 4

新規開発品
(MEA、膜、触媒)

↑ A社

サンプルα

↑ B社

サンプルβ

↑ C社

サンプルγ

↑ D社

サンプルη

評価・耐久条件が違い、他機関との材料の違いが把握できない

材料開発機関



異なる条件で評価・耐久を実施



異なるサンプルでの相互比較ができない



OEM : 材料選択の基準がわからない。
材料開発機関 : 材料の弱み・強みがわからず改良ポイントがわからない

OEM

新規MEA・MEA材料の選定

評価・耐久条件が違い、どの材料の性能がいいか判断できない

低電流密度の性能がいいD社ね。



高電流密度まで発電できるC社だね。



B社がいいね。



共通の評価・耐久条件

新規開発品
(MEA、膜、触媒)

↑ A社

↑ B社

↑ C社

↑ D社

サンプルα

サンプルβ

サンプルγ

サンプルη

共通の評価・耐久条件で、他機関との材料の違いが明確にわかる

材料開発機関



共通条件で評価・耐久を実施



異なるサンプルでの相互比較が可能

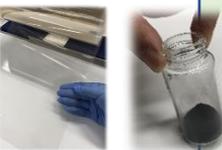


OEM

：材料選択の基準ができる

材料開発機関

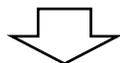
：材料の弱み・強みがわかり改良につなげられる



燃料電池の単セル評価・耐久プロトコルの必要性

燃料電池の単セル評価・耐久プロトコルの開発の流れ

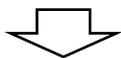
車の実走行での燃料電池の運転環境（温度、湿度、電流密度等）データ



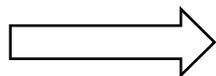
評価プロトコル：性能を出すのが厳しい条件（ex.低加湿、高温 等）を設定

耐久条件：性能劣化が最も大きい条件

⇒ **どういう条件で燃料電池は性能劣化するのか？**



燃料電池の性能劣化



発電部分の材料の性能劣化



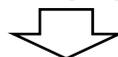
MEA（膜電極接合体：電解質膜、触媒、GDL）
シール
セパレータ等の劣化



個々の部材で性能劣化する条件での耐久が必要



個々の部材の性能劣化メカニズムの理解



実走行のデータから個々の部材毎に劣化に厳しい運転環境を抽出し、耐久プロトコルとして設定

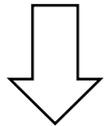
燃料電池の単セル評価・耐久プロトコルの必要性

耐久プロトコルの開発：加速耐久方法（AST）の必要性

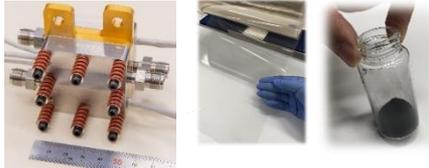
乗用車の
保障距離・時間



10万km～16万km
5,000hr～8,000hr



セル、MEA、材料開発



開発には
非現実的



連続運転で

209日～334日（7カ月～11カ月）必要



開発サイクルを回すには
短時間&実車耐久相当での性能確認が必要



実車の耐久状態と同等な加速耐久（AST）条件
の設定が必要



加速耐久プロトコル（AST）の開発

内容

- ◆ 燃料電池の単セル評価・耐久プロトコルの必要性
- ◆ 乗用車向けの単セル評価・耐久プロトコル
- ◆ 大型トラック（HDV）向けの単セル評価・耐久プロトコル
- ◆ 今後
- ◆ まとめ

乗用車向けの単セル評価・耐久プロトコル：現状のプロトコル ¹⁰

■ P E F Cの主要要素の目標値と評価法 (FCCJ推奨、案)

要素	項目	条件等	単位	現状	目標値		ツール	評価法		
					2030 (Early Stage)	2040 (Logically Max.)			手法	
触媒 (層)	活性 @0.9V [A/cm ²] (MEA)		A/cm ²	0.003 (300A/g相当)	0.02~0.04 (600~1200A/g相当)	24.1 (72x10 ⁴ A/g相当)	RDE	Ⅲ-2 触媒活性・耐久性評価方法(ハーフセル)	現状、プロトコルのある項目	
							セル	Ⅲ-2-1 ORR活性評価方法 Ⅲ-3 MEA評価方法 Ⅲ-3-2 ORR活性評価方法		
	酸素拡散抵抗		sec/m	10~20	2.7	2.7	↑	限界電流密度法	現在、プロトコルを整備している項目	
	プロトン輸送抵抗 (追加)			-	-	-	↑	EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy)		
耐久性	起動停止			TBD (~1000@ TEC10E50E)	TBD	TBD	RDE等	Ⅲ-2-2 電位サイクル試験方法 1/2	Final Targetとして60000サイクル (ECSA低下率が50%以下)	
	電位変動			TBD (~10000@ TEC10E50E)	TBD	TBD	セル	Ⅲ-2-2 電位サイクル試験方法 2/2	Final Targetとして40万cycle (ECSA低下率が50%以下)	
電解質膜	プロトン輸送抵抗	@70℃	RH100	mΩ・cm ²	7.1	3.6	-	面内：膜単体	Ⅲ-1 電解質膜材料物性・耐久性評価方法 Ⅲ-1-1 プロトン伝導度測定方法	
			RH30		55~100	50	-	面直：MEA	水素ポンプ法	FCCJにて議論中の案あり。 今後検証し、評価法を決めて行く。
		@150℃	RH30 (≒RH0)		-	-	5	未定	←	高温下での評価法については今後検討予定。
	ガス透過性	水素	cm ³ /(cm ² ・s・kPa)	(参考：90℃) 2.28*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁷ 以下	-	膜単体	Ⅲ-1 電解質膜材料物性・耐久性評価方法 Ⅲ-1-2 ガス透過性測定方法(水素/酸素)		
		酸素		-	(1-9)*10 ⁻⁹ 以下	-	↑	↑		
		水蒸気	g/(cm ² ・s・kPa)	-	-	-	↑	Ⅲ-1-3 水蒸気透過性測定方法		
耐久性	O C V			ND	ND	ND	セル	Ⅲ-3-1 高電位 (OCV) 保持試験方法		
	Dry/Wet			>10000	ND	ND	↑	Ⅲ-1-8 電解質膜の膨潤耐性評価方法 (湿度サイクル試験) 2/2	Final Targetとして、>20000回 (クロスオーバー電流の増加が初期の10倍になるまでの時間)	
拡散層	ガス拡散抵抗	アノード(水素)	sec/m	3	0.875	0.875	セル	限界電流密度法	FCCJにて議論中の案あり。 今後検証し、評価法を決めて行く。	
		カソード(酸素)		43	14	14	↑	↑	↑	
	ばね特性 (参考値)	アノード	Gpa/m	140~175	-	-	GDL単体	応力-歪測定	↑	
		カソード		112~175	-	-				
	電気抵抗 (貫層方向)		mΩ cm ²	5~10	1.5~2.5	1.5~2.5	↑	加圧下での電気抵抗測定	↑	
熱抵抗 (貫層方向)		K cm ² /W	5~6	0.5~1.5	0.5~1.5	↑	例. ISO 22007-2ホットディスク式 熱伝導度測定法	↑		

- 注：1. 備考に示す通り、現在FCCJにて議論中の案がある。ただし、今後検証し評価方法を決めていく必要があり、場合によっては今後変更することもある。
 2. 各要素の目標値は同時に達成することを目指すべき。
 3. [] 内は、固体高分子形燃料電池の目標・研究開発課題と評価方法の提案 (平成23年1月) の項目を指す。

* FCCJ燃料電池推進協議会 「固体高分子形燃料電池の主要要素の目標値と評価法 (案)」

資料5-1：P E F Cの主要要素の目標値と評価法 (FCCJ推奨、案)

乗用車向けの単セル評価・耐久プロトコル 各国の取組み

各国・各地域で単独で作成



2008

FCJ
固体高分子形燃料電池の
目標・研究開発課題と

2011

FCJ
新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)
固体高分子燃料電池実用化推進技術開発
基盤技術開発「セル評価解析の共通基盤技術」

セル評価解析プロトコル

平成24年12月
学校法人 大同学園
学校法人 立命館
国立大学法人 東京工業大学
一般財団法人 日本自動車研究所

2012

2006

US Fuel Cell Council
Single Cell Test Protocol

2008

PROGRAM ANNOUNCEMENT TO NATIONAL LABORATORIES
FOR SUBMISSION OF APPLICATIONS FOR RESEARCH AND
DEVELOPMENT PROJECTS

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY
AND RENEWABLE ENERGY

2010

U.S. DRIVE Partnership
Fuel Cell Technical Team

Cell Component Joints and Hoses Test and Productional Cycle
Protocol for Hydrogen Fuel Cells for Fuel Cells

Fuel Cell Technical Team Roadmap
November 2017

USDRIVE
DRIVING RESEARCH AND INNOVATION FOR
VEHICLE EFFICIENCY AND ENERGY SUSTAINABILITY

2017

JRC Scientific and Technical Reports

Testing the voltage and power
as function of current density

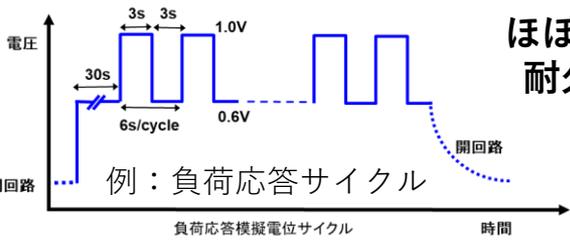
Polarisation curve for a
PEFC single cell

2010

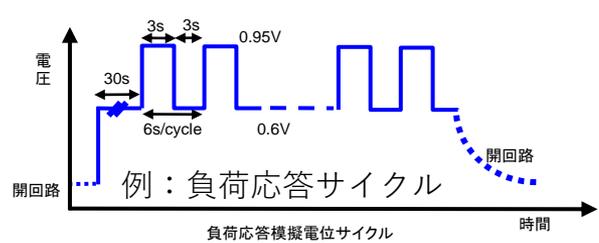
JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT

EU HARMONISED TEST PROTOCOLS
FOR PEMFC MEA TESTING IN
SINGLE CELL CONFIGURATION FOR
AUTOMOTIVE APPLICATIONS

2015



ほぼ同様な
耐久条件



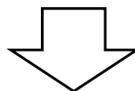
材料の耐久条件は米国
DOEの条件を推奨

内容

- ◆ 燃料電池の単セル評価・耐久プロトコルの必要性
- ◆ 乗用車向けの単セル評価・耐久プロトコル
- ◆ **大型トラック（HDV）向けの単セル評価・耐久プロトコル**
- ◆ 今後
- ◆ まとめ

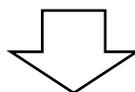
燃料電池の**用途拡大**：乗用車からより多くの用途への展開

⇒ 商用車、列車、船、建機等への用途展開
特に大型トラック（HDV）への適用が必要



大型トラック（HDV）向けの評価・耐久プロトコルは

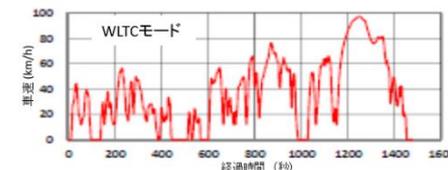
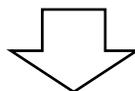
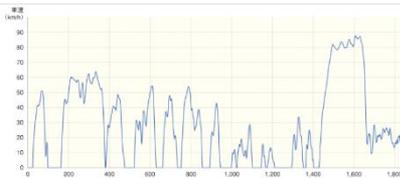
乗用車向けの評価・耐久プロトコルで**大型トラック向けは対応できるのか？**



車のサイズが違う（重い）



車の使われ方（走り方）が違う（走行距離が長い）



大型トラック（HDV）向けに評価・耐久プロトコルの検討が必要

	大型トラック 	乗用車 
総走行距離	100万 ～ 200万km	10万 ～ 16万km
総走行時間	35,000 hour ～ 50,000hour	5,000 hour ～ 8,000hour
走行時間分の耐久に必要な日数	1,458日～2,083日 (約4年～約6年)	209日～334日 (7カ月～11カ月)
乗用車向けの加速耐久条件の場合	乗用車向けと同じ条件だと 700～1,000hour の加速耐久必要 約35日～50日 (1～2カ月)	例えば 100hour の加速耐久 約5日

現状と同じ加速条件だと開発が進まない

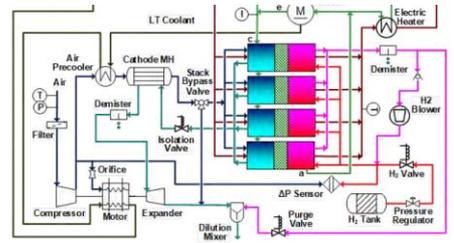
大型トラック向けの開発には、より加速した耐久条件が必要



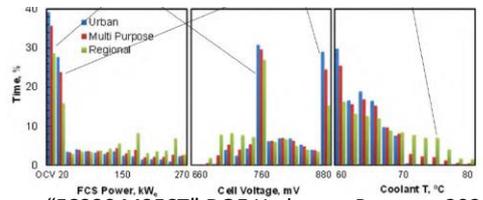
大型トラック (HDV) 向け評価・耐久プロトコル開発 海外の取組み



HDV向けシステム案

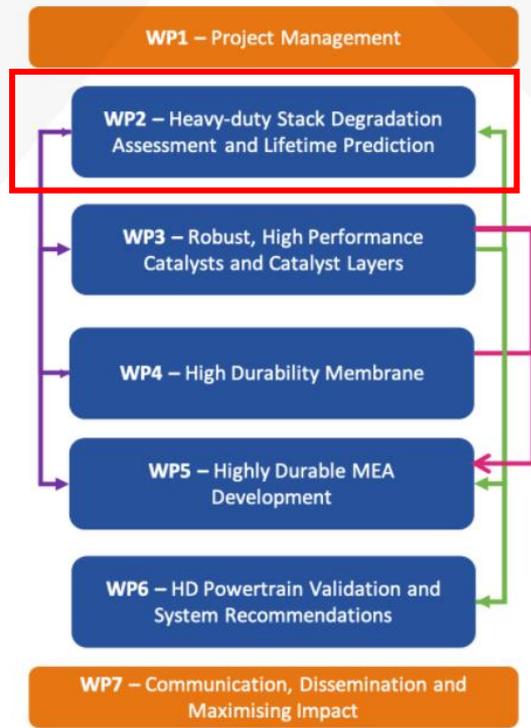


HDV向けのFCの運転環境推定



"FC339 M2FCT", DOE Hydrogen Program 2021 AMR and Peer Evaluation Meeting, 2021. June.9

Primary Labs : LBNL, LANL, ANL, NREL, ORNL
Partners : PNNL, BNL, NIST, Cornell, CMU, CSMN, Drexel Univ., Florida International Univ., Georgia Tech, Nortgaestern, UC Irvine, UC Merced, University at Buffalo, University of Tennessee, 3M, Akron Polymer Products, Ballard, Chemours, Cummins, Catepillar, Eaton, GM Kodak, Lubrizol, Mahle, Nikola otors, Pajarito Powder, Plug Power, NeoGraf Solutions, R&D Dynamics Corp, Raytheon Technologies, TreadStone Technologies



電気化学的特性測定グループ

Goal: 新規開発材料の電気化学的特性が明らかになる。得られた情報を新規アイデア発案に資するデータベースに提供する。

challenge: 前事業で開発された、高度化したMEA評価・解析技術基盤の構築。新規材料に対応したMEA試作技術。

MEA性能、電解質膜導電性、劣化シミュレーションの検証を行い、有効化する。

材料開発者、マネジメントグループ、マテリアルズインフォマティクスグループ

シミュレーショングループ

FCV, 新規材料開発者

FC-Cubic, 山梨県, みずほリサーチ&テクノロジーズ, NIMS, 日産アーク, 京大, 東北大, 九大, 東大, 東工大, JASRI, 名大, KEK, JFCC, 茨城大

CNRS, BOSCH, FPT, Johnson Matthey, AVL, PRETEXO, IMTEK

米国・欧州でHDV向けの国プロが進行中
 ⇒ HDV向けの評価・耐久プロトコル開発も主要課題

車の実走行での燃料電池の運転環境（温度、湿度、電流密度等）データ

評価プロトコル：性能を出すのが厳しい条件（ex.低加湿、高温等）を設定

耐久条件：性能劣化が最も大きい条件
⇒ どういう条件で燃料電池は性能劣化するのか？

燃料電池の性能劣化 ⇒ 発電部分の材料の性能劣化

MEA（膜電極接合体：電解質膜、触媒、GDL）
シール
セパレータ等の劣化

個々の部材で性能劣化する条件での耐久が必要

個々の部材の性能劣化メカニズムの理解

実走行のデータから個々の部材毎に劣化に厳しい運転環境を抽出し、耐久プロトコルとして設定

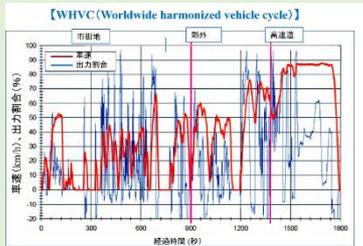
燃料電池の大型商用車（HDV）
の実走行データは現状、無い

評価条件、耐久条件
が決められない

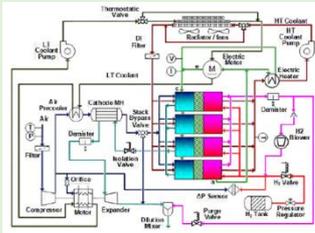
大型トラック（HDV）向け評価・耐久プロトコル開発

実際の車の走行データからの燃料電池・MEAの運転環境推定

車両・燃料電池システム



実車走行データ
(内燃機関)



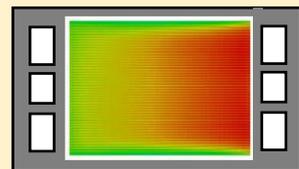
車の燃料電池
システム構成案

燃料電池（スタック）

この運転を成立させる条件
 ・温度・湿度・圧力・電流密度等
 が決まる

セルの面内分布のシミュレーション

セルの面内分布からの局所環境条件

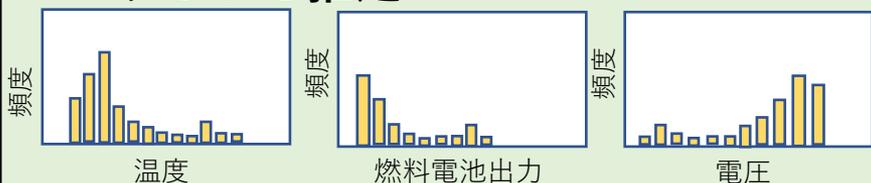


環境にさらされる時間（頻度）

燃料電池システム

での運転状況のシミュレーション

- ・どういう運転を
 - ・どのくらいの時間（頻度）
- するかを推定



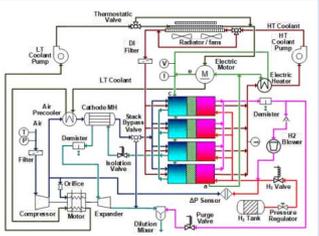
評価条件設定

MEAの運転環境条件推定

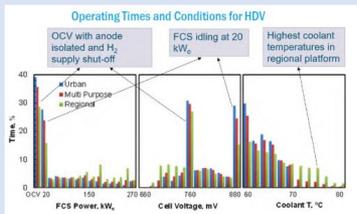
その環境にさらされる時間・頻度

加速耐久プロトコル設定

単セルの各種耐久条件での劣化解析データ



想定したFCシステムでのシミュレーション



HDV向けのFCの運転環境推定



内燃機関の大型トラックのフリートデータの活用

Fleet DNA@NREL

Fleet DNA: Commercial Fleet Vehicle Operating Data

The Fleet DNA clearinghouse of commercial fleet vehicle operating data helps vehicle manufacturers and developers optimize vehicle designs and helps fleet managers choose advanced technologies for their fleets.

This online tool, which provides data summaries and visualizations similar to real-world "genetics" for medium- and heavy-duty fleet vehicles, helps users understand the broad operational range of commercial vehicles across vocations and weight classes.



Fleet DNA

Delivery Vans	Delivery Trucks	School Buses	Transit Buses
Bucket Trucks	Service Vans	Tractors	Refuse Trucks

Composite Data for All Categories

View charts with data for all the vehicle categories above or download the [composite data for all vehicles](#).

Daily Average Driving Speed and Kinetic Intensity for All Vehicle Categories	Daily Stops per Mile Distribution for All Vehicle Categories	Average Acceleration and Number of Stops for All Vehicle Categories	Average Acceleration and Driving Speed for All Vehicle Categories



政府と業界のパートナー間の共同研究開発

- ・ 中型および大型トラックの効率、安全性、排出量に関連する課題に取り組む

INDUSTRY MEMBERS

- Allison
- Cummins
- Daimler
- DENSO
- Eaton
- Ford
- Meritor
- Navistar
- Oshkosh
- PACCAR
- Volvo

GOVERNMENT MEMBERS

- US DOD
- US DOE
- US DOT
- US EPA

Fleet DNA – Data, Vehicles and Technologies

“Fleet DNA”, Fuel Cell Truck Powertrain R&D Activities and Target Review Workshop, 2018. July.30

Technical Accomplishments - Data Collection

Fleet DNA Data Summary

	Vehicles	Vehicle Days	Distance (mi)	Deployments
Delivery Vans	595	162,344	4,296,569	198
Delivery Trucks	30	429	40,381	5
School Buses	212	368	22,223	4
Bucket Trucks	40	3,545	102,174	4
Service Vans	14	143	3,310	2
Class 8 trucks	191	1,496	162,804	17
Transit Buses	20	378	48,738	6
Refuse Trucks	43	654	34,318	7

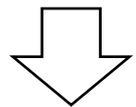
Fleet DNA Data Summary :

- 198 locations (FY14 – 37 locations, over 500% YOY growth)
- 1,283 vehicles (FY14– 620 vehicles, over 200% YOY growth)
- 169,357 days (FY14 – 4,687 days, over 3600% YOY growth)
- 4,710,517 miles (FY14 – 340,875 miles, over 1300% YOY growth)
- 246 deployments (FY14 – 77 deployment, over 300% YOY growth)



NOTE: Data in table only shown for major vehicle categories currently reported on

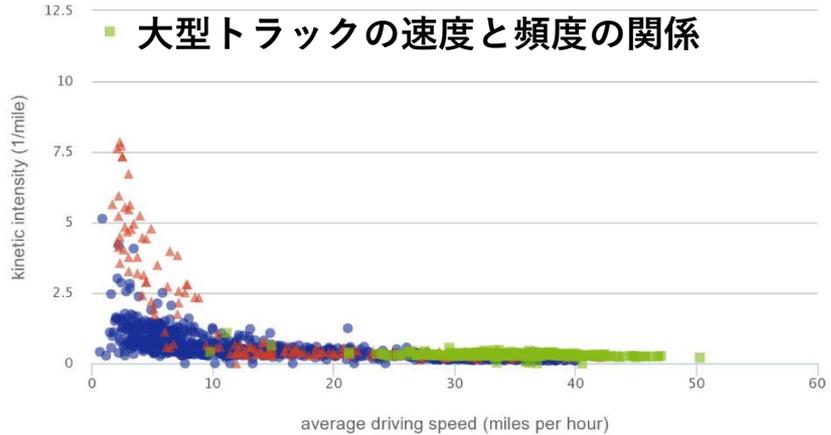
種々のサイズの車のフリート
データを蓄積



車サイズ別に走行条件を解析

“VSS160 Fleet DNA Phase1 Refinement & Phase 2 Implementation”, VTO AMR and Peer Evaluation, June 11,2015

Daily Average Driving Speed and Kinetic Intensity by Vocation for Tractors

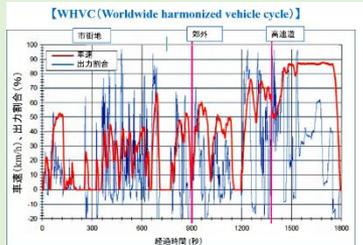
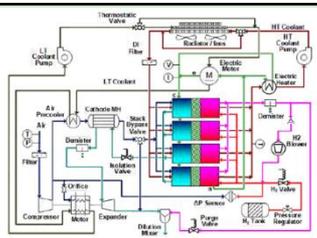


大型トラックの停止回数/マイルの頻度



車両・燃料電池システム

燃料電池（スタック）



車の燃料電池システム構成

実車走行データ

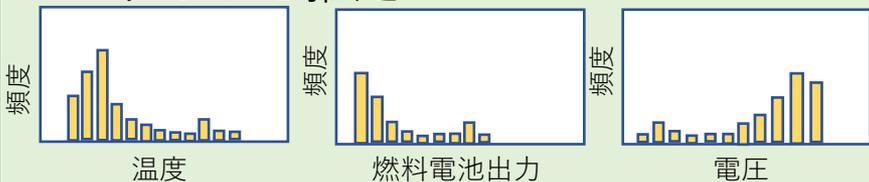
この運転を成立させる条件
 ・温度・湿度・圧力・電流密度等
 が決まる

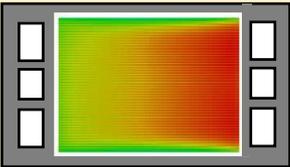
セルの面内分布のシミュレーション

産業界・評価PF/シミュレーションGr

との連携

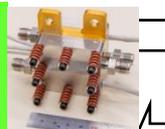
燃料電池システムでの運転状況のシミュレーション
 ・どういう運転をするか
 ・どのくらいの時間（頻度）するかを推定



セルの面内分布からの局所環境条件
 +

 環境にさらされる時間（頻度）

評価条件設定

単セルでの
 実測データ取得



MEAの運転環境条件推定

+

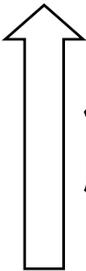
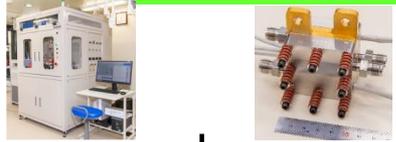
その環境にさらされる時間・頻度

加速耐久プロトコル設定

での劣化解析データ

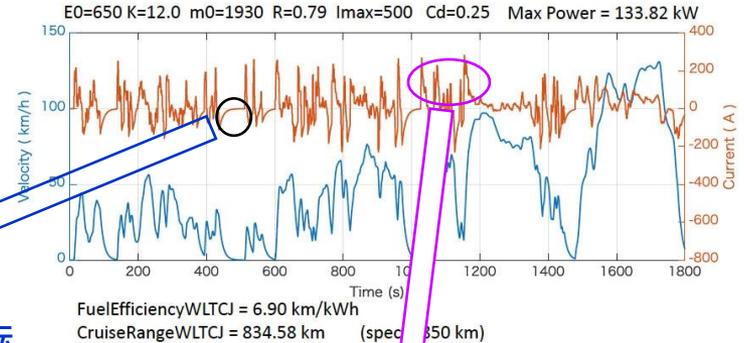
加速耐久プロトコル設定

単セルでの
実測データ取得



個々の部材毎に劣化に
厳しい運転環境を抽出

推定したMEA運転環境条件



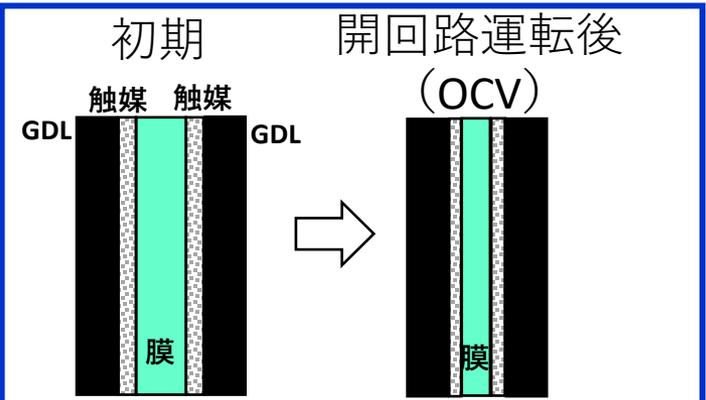
アイドリング運転
⇒ 開回路

電極触媒

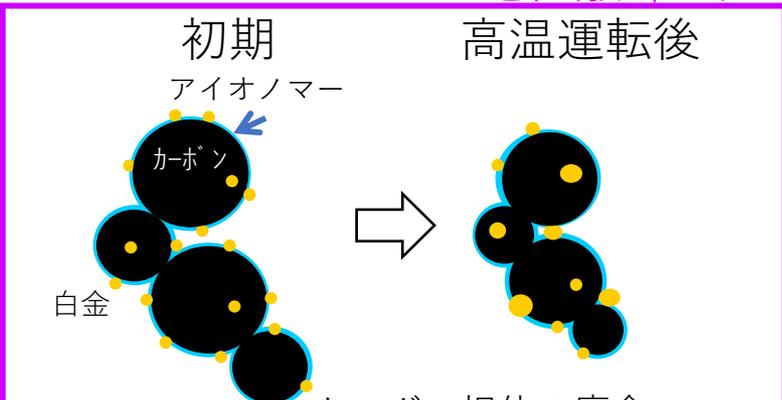
高負荷運転 ⇒ 高温化

劣化メカニズム

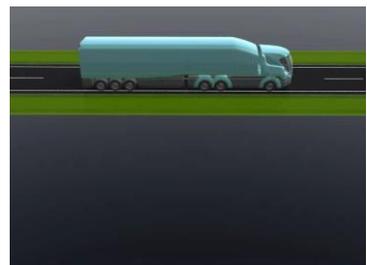
電解質膜



電解質膜の薄膜化



カーボン担体の腐食
白金の粒子成長
白金粒子の溶け出し・脱落



長時間運転



開回路にさらされる時間の増加

運転温度の高温化



腐食速度の増加
粒子成長、溶け出し速度の増加

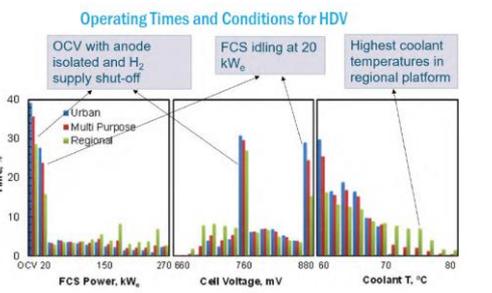
大型トラック
での使用環境

大型トラック (HDV) 向け評価・耐久プロトコル開発 米国、欧州との国際連携



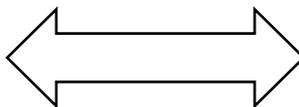
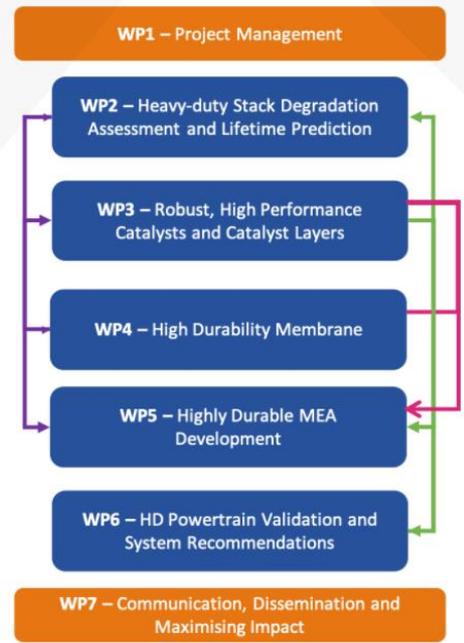
MILLION MILE FUEL CELL TRUCK
U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

Fleet DNA – Data, Vehicles and Technologies

HDV向けの燃料電池での

MEAへかかるストレスの情報共有
解析手法の情報共有
評価・耐久プロトコルの情報共有



米国、欧州のプロジェクトと大型トラックの走行データ入手も含め連携して進める

International Durability Working Group (iDWG)

8 Countries

from America, Europe, and Asia

30 Institutions

participants representing governments, universities, industry and labs

80 Researchers

facilitating data sharing, exchanging materials, promoting AST development

M2FCT | iDWG

with representation from the US, European Union (EU), Japan, and Korea to better coordinate international efforts currently underway to help commercialize fuel cells for trucks and heavy-duty applications.

M2-FCT HP より

[IDWG | M2FCT](http://idwg.org)
[\(millionmilefuelcelltruck.org\)](http://millionmilefuelcelltruck.org)

International Durability Working Group | Collaboration Areas



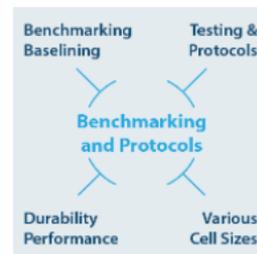
Stressors related to Heavy Duty

The primary goal of this group is to ensure all relevant stressors are taken into account while developing heavy-duty ASTs. Efforts include identifying and examining various stressors controlling and representing the durability of components and cells during heavy-duty fuel cell operation.



Characterization

This group will leverage the characterization tools and capabilities available to the various International groups to advance understanding of PEMFC performance and durability. The efforts include characterization of materials undergoing various degradation mechanisms due to stressors as well as elucidating the structural changes occurring in components from beginning to the end of life.



Benchmarking and Protocols

This group will explore MEA testing at various scales to better understand the scaling of performance and durability from small differential cells to operating stacks. The MEAs will be exchanged between the various organizations and the testing results shared. The various teams will utilize this data to validate both performance and durability models.

今後

- ・乗用車向けの単セル評価・耐久プロトコルについては、不足部分について検討中。順次、マニュアル化して展開
- ・大型トラック（HDV）向けの単セル評価・耐久プロトコルについては
 - 実車の走行データからの燃料電池の運転環境の推定
 - ：米欧との国際連携、産業界、シミュレーションGrと連携
 - 単セルでの各種耐久条件での劣化解析データ取得
 - ：評価機能（単セル評価装置）の増強（要望中）
 - 運転環境と単セルの劣化解析データを関連付けて耐久プロトコル決めに検討中のNEDOロードマップ策定とも連携し進める

まとめ

- ・ 新規MEA、MEA材料の開発促進のため単セル評価・耐久プロトコルが必要
- ・ 乗用車向けの単セル評価・耐久プロトコルはあるが、不足部分もあり現在、整備中。
- ・ 大型トラック（HDV）向けの単セル評価・耐久プロトコルは開発を進めるのに早急に整備が必要。実車の走行データ、シミュレーション技術、MEAの劣化解析技術とを連携させて取組中。
- ・ 実車の使用環境が違っていても基本となる劣化メカニズムは同じであることから、米国、欧州と実車の走行データの入手等を含め連携してA S T開発を促進していく。

以上