

『世界に伍するFC生産技術の課題共有セッション』

- (1) FC生産技術 世の中の動向 および 国内メーカ課題
- (2) FC生産技術課題① MEAプロセス
- (3) FC生産技術課題② バイポーラプレート/セパレータプロセス

技術研究組合 FC-Cubic

パナソニック アプライアンス社

東芝エネルギーシステムズ株式会社

本田技研工業株式会社

株式会社本田技術研究所

トヨタ自動車株式会社

○佐藤 克己

菅原 靖、吉本 規寿

鈴木 直俊

小林 洋平

田中 之人

岡 憲俊、秋田 靖浩

Meet up Chubu vol.8

FC生産技術 世の中の動向 および 国内メーカー課題

2022年 12月22日

技術研究組合 FC-Cubic

パナソニック アプライアンス社

東芝エネルギーシステムズ株式会社

本田技研工業株式会社

株式会社本田技術研究所

トヨタ自動車株式会社

○佐藤 克己

菅原 靖、吉本 規寿

鈴木 直俊

小林 洋平

田中 之人

岡 憲俊、秋田 靖浩

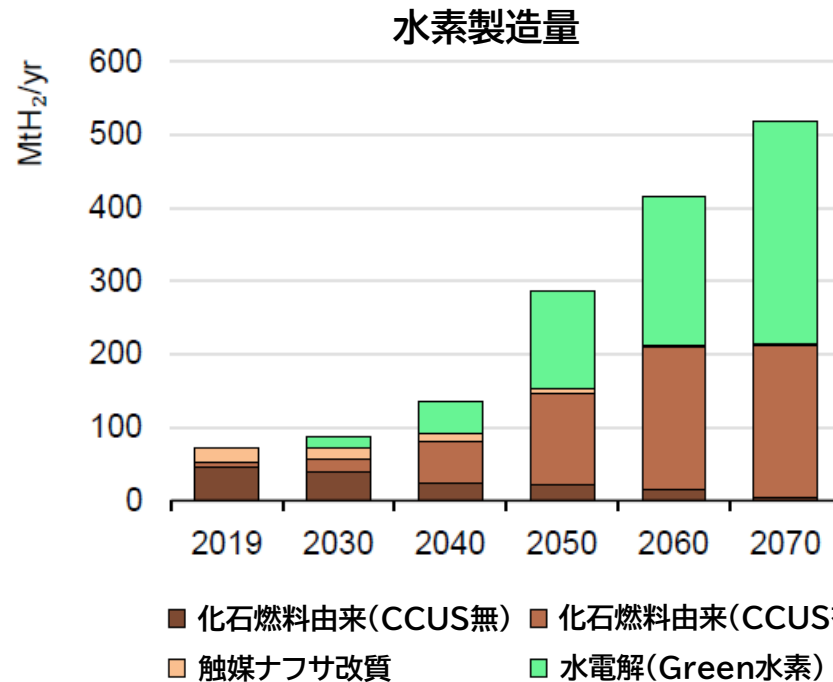
本講演のご説明内容

- (1) FC生産技術に関する世の中の動向
- (2) 各工程の課題・革新したいポイント概要
(MEA・バイポーラプレート・スタック)
- (3) スタック工程課題 ～エージング～

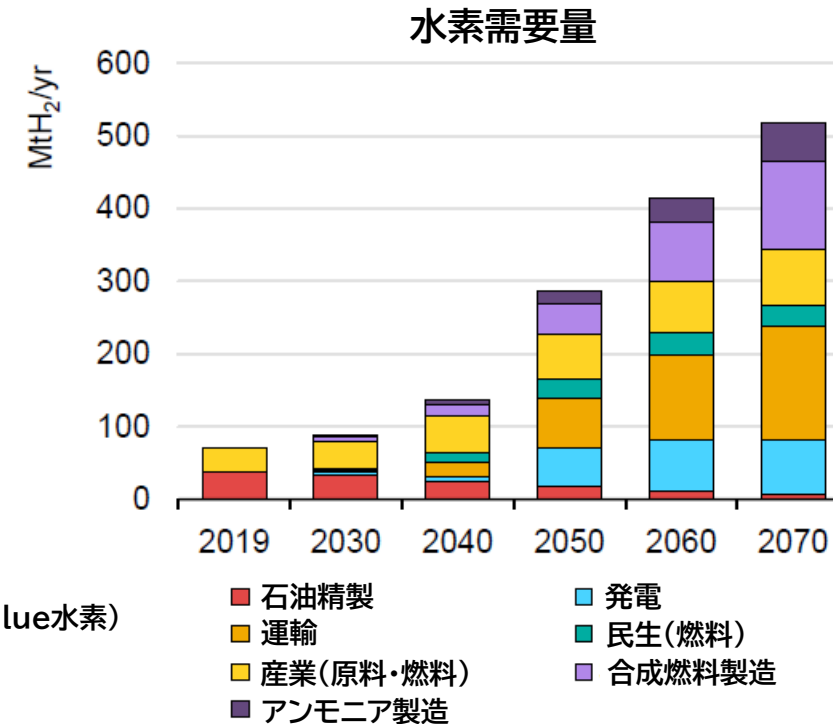
（１）FC生産技術に関する世の中の動向

世界の水素需要拡大状況

- IEAによる低炭素化の進展を前提(パリ協定における2℃目標達成等を前提)とするシナリオにおいて**2030年以降で世界の水素需要が急激に拡大**する見通し。
- 燃料電池モビリティ等の**運輸用途が最大**、産業の原料・燃料用途や発電用途に加え、水素を起点としたカーボンニュートラル燃料(アンモニア・合成燃料)の原料としても需要増が見込まれる。



【水電解】1GW製造装置:0.15-0.2Mt/年



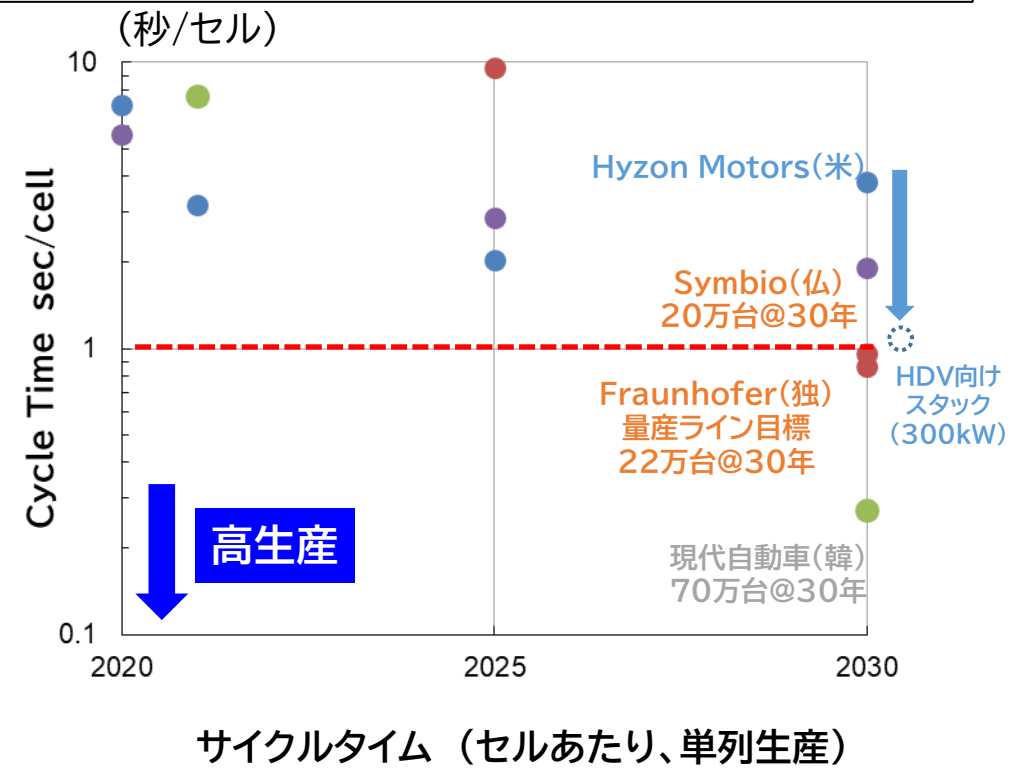
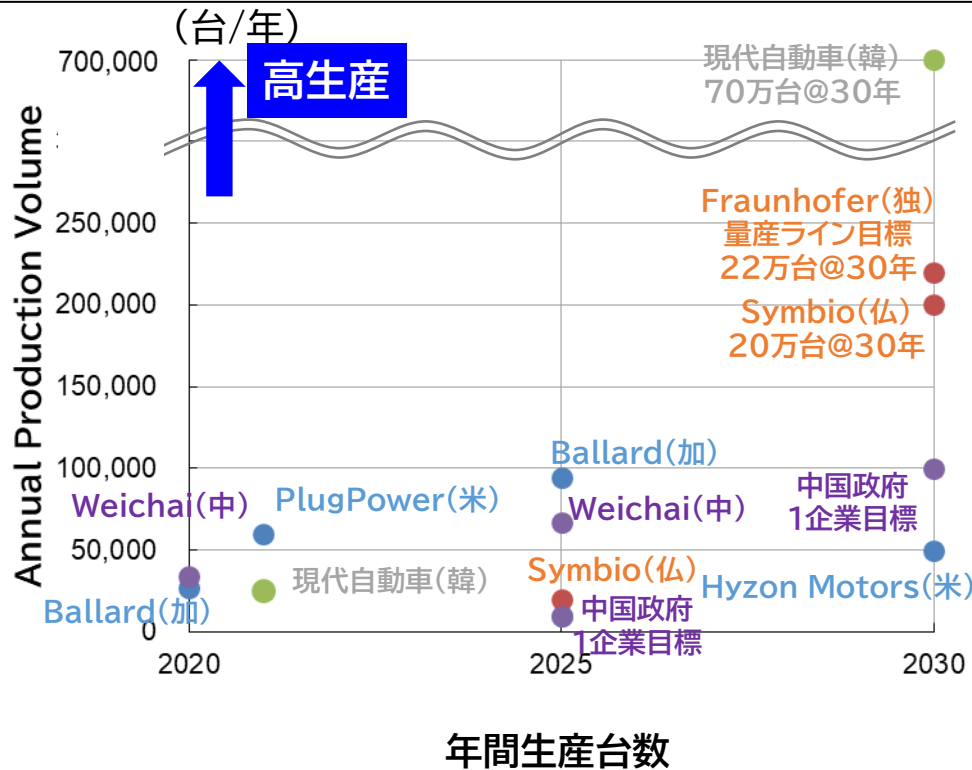
【発電】100万kW火力発電:0.3Mt/年

【運輸】大型FCトラック10万台:0.7-1.2Mt/年, FCV100万台:0.1Mt/年

【出典】IEA, "Energy Technology Perspective 2020"

主要FCスタックプレーヤーの将来の生産台数計画

- 海外の主要FCスタックメーカーは**2030年頃に年間生産台数で数万台～数十万台レベルの計画**を発表。先の市場予測からもグローバルで年産100万台レベルとすると、1メーカーあたりの年間生産台数の範囲。
- スタック1台(100kW)あたりのセル数を想定すると年産10万台以上で**セルあたりの製造スピードは1秒以下が要求**。



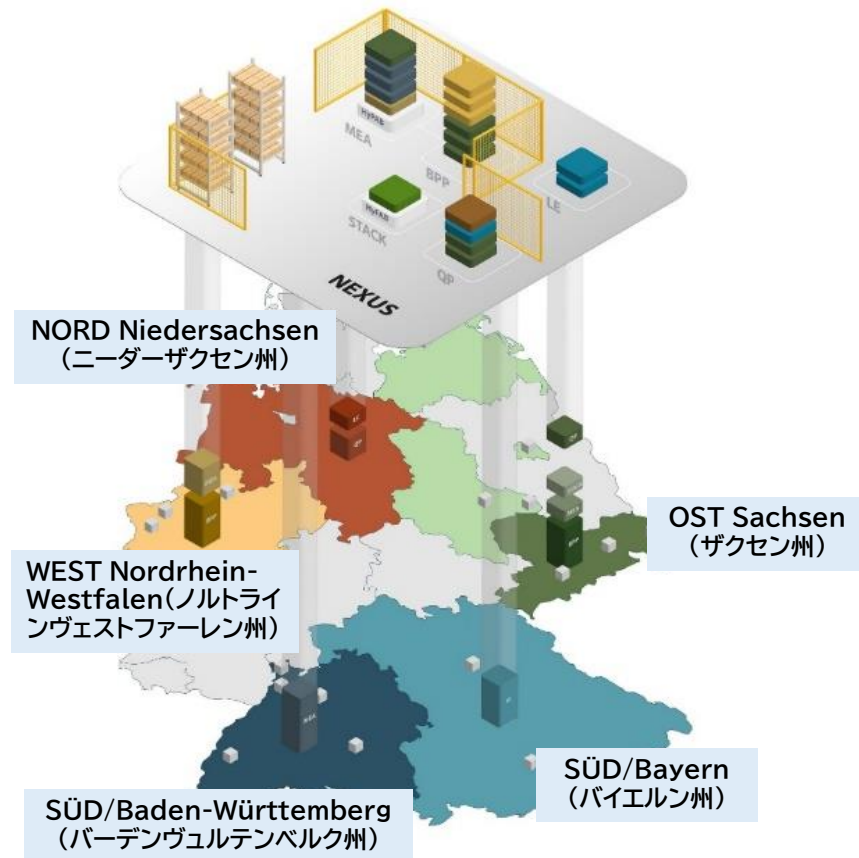
世界各地域におけるFC生産技術に関する取組

- 特に米国・欧州では政府機関が主導して主要研究機関を中心とした産学官連携による生産技術の開発プロジェクトを推進、中国ではFCコンポーネントの海外依存からの脱却を目指し、国内のサプライチェーン強化に舵を切る。
- 日本ではNEDO事業で生産技術開発を推進しているが、個社の製品実用化への支援が中心。

国・地域	主な取り組み状況	FCの数値目標
米国	DOEが量産コスト見積・分析を主導、これに基づき各企業・DOE研究機関で開発を継続的に推進	\$30/kW _{net} (50万台/年) (タンク除く)
欧州	独・Fraunhoferが国内外の量産技術開発のコアとなり推進 ・FCHJUの各プロジェクトに参画し開発推進 ・『FC生産国家活動計画』を策定、BMVIから資金を得ながら国内5州と連携して開発推進 FCHJUでも近年、複数の製造技術開発プロジェクトを推進	€32/ kW(20万台/年) CT<0.6秒/セル
中国	科学技術部が重要特別プロジェクトを指定し、コア部材(MEA・電解質膜・GDL用カーボンペーパー・触媒・BPP用基材)の大量生産設備技術の開発に予算をつけ推進 工業信息化部がロードマップを中国汽車工程学会に委託し策定 自動車動力電池産業革新連盟に燃料電池分科会を設置、燃料電池関係企業・検査機関・大学など30の団体の共同研究を促進	・MEA年産能力>20万m ² @2022年 ・FCシステム量産技術: 1企業あたり10万基/年 @2030年(5年で10倍)
韓国	政府のロードマップ(2019年)に先立ち現代グループが2018年の「FCEV VISION2030」において量産計画を発表するなど民間企業が主導	FCシステム70万基/年 @2030年 by 現代自動車
日本	NEDO事業でカーボンセパレータ製造プロセス・品質管理、膜製造プロセス、MEA連続生産装置の開発などを推進、ただし個社への開発支援が中心	0.2万円/kW(20万台/年) @2030年(NEDO2017)

FC生産技術で注目されるドイツの動向 (Fraunhofer)

- ドイツ連邦運輸・デジタルインフラ省(BMVI)は、**Fraunhoferの『燃料電池生産のための国家行動戦略』**に対して**8000万ユーロ(約104億円)**の資金調達を発表。
- 燃料電池生産の大幅なコスト削減と規模拡大を可能にする技術的ソリューションを開発することが目的。



自動車用FCシステム(**100kW**)を**€5000**で製造可能とすることを
目指し、Fraunhoferの3研究所が将来のFC量産に必要な技術を提
示

IPT @Aachen :生産技術

IWS @Dresden :材料・ビーム技術

IWU @Chemnitz :機械工具・成型技術

『**HOKOME**』
Project



左図のバーデンヴュルテンベルク州、バイエルン州、ニーダーザク
セン州、ノルトラインヴェストファーレン州、ザクセン州の5州に
Fraunhoferの20研究所の技術・イニシアチブを結束

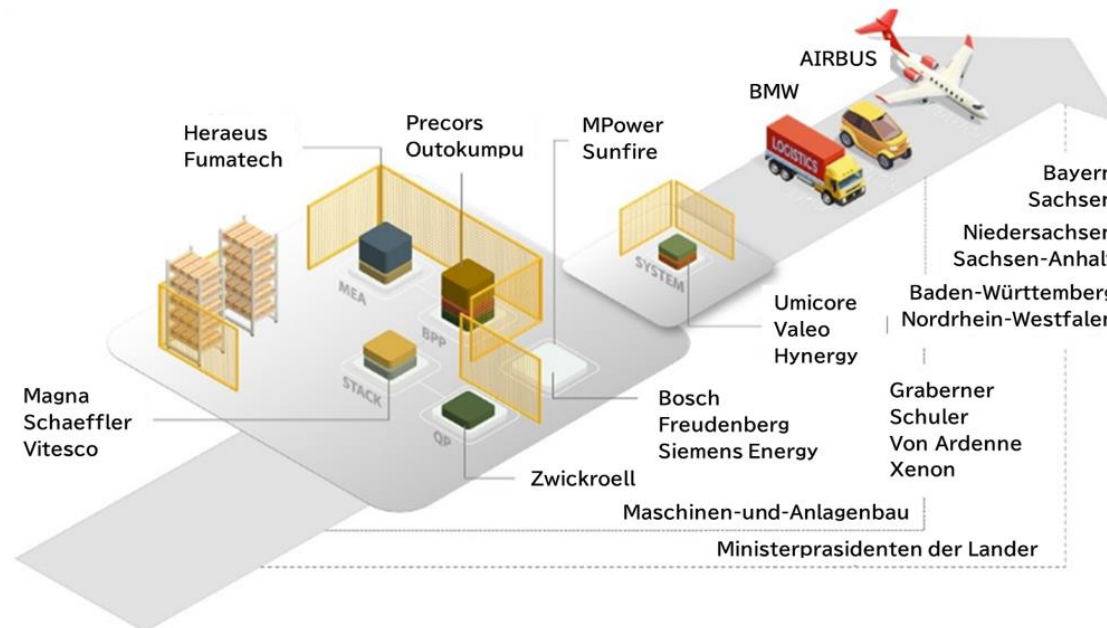


FCスタック**22万台/年・製造コスト€32/kW**を実現し、FCシステ
ムコストを**€100/ kW**に削減(タンクを除く)

【出典】<https://www.rokhy.de/>

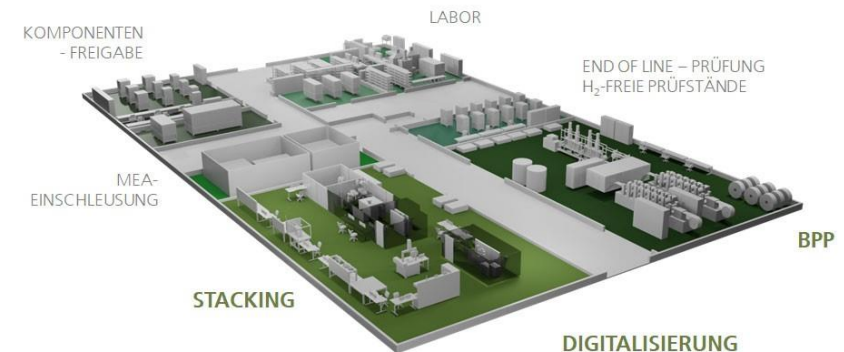
FC生産技術で注目されるドイツの動向 (Fraunhofer)

- Fraunhoferの『燃料電池生産のための国家行動戦略』ではMEA～スタック・システム製造技術において**多くの民間企業が強力にサポート**。
- ザクセン州**Fraunhofer IWUにReference factoryがあり、特に部材とスタックの製造のための高速化技術に焦点**を当てており、これにより耐用年数、技術、コストを大幅に向上させた生産技術開発に着手、燃料電池および水電解装置のための技術ツールボックスを提供する予定。



MEA～スタック・システム製造技術において多くの民間企業が関与しアクションプランをサポート

MEA:Fraunhofer ENAS
で開発され生産工程で組込



Fraunhofer IWUは金属BPP
の製造プロセスに注力

Fraunhofer IWUのReferenzfabrik
(Reference factory)

【出典】<https://www.hy-ber.de/de/struktur-und-leistungsangebot.html/>

欧米における主なFC生産技術開発プロジェクト

欧州・FCHJU

PJ名	目標	部材/スコープ	予算	メンバー
INLINE	●燃料電池システム全体の製造にかかるサイクルタイムを15時間から2.5時間未満に短縮	FC製造プロセスの最適化 統合タンク・バルブ	€ 3,286,069 (2017/2-2020/1)	FRONIUS INTERNATIONAL GMBH ELRINGKLINGER AG KARLSRUHER INSTITUT FUER
Fit-4-AManda	●スタックの製造を工業化し、新興の市場や需要を飽和させるために、手頃な価格の燃料電池システムを大量に提供	BPP MEA(CCM)	€ 2,999,185 (2017/3-2020/2)	
MAMA-MEA	●PEM燃料電池の価格を下げるために、CCMの生産量を増加させ、大規模生産によるスケールメリットを実現することを目指す	MEA(CCM)	€ 3,189,816 (2018/3-2020/2)	
VOLUMETRIQ	●自動車用PEM燃料電池の主要部品のEU中心の供給基盤を構築 ●自動車用燃料電池スタックプラットフォームと主要なセル構成部品の両方について、量産可能な製造プロセスと品質管理システムを検証	スタック	€ 4,988,450 (2015/9-2017/8)	
DIGIMAN	●PEM燃料電池アセンブリのデジタル化されたインライン品質管理、自動化による大量生産へのシナリオの提示 ●原材料の供給、組立から稼働中のデータ分析まで、自動車業界のバリューチェーン内で完全に自動化、EU内の統合サプライチェーンを確立	MEA BPP	€3,486,965 (2017/1-2020/1)	

米国・DOE

PJ名	目標	部材/スコープ	予算	メンバー
Novel Structured Metal Bipolar Plates for Low Cost Manufacturing	●2020年のコスト目標を達成する低コストメタルBPPの開発 ●SBIRプロジェクトで実証されたドーブ酸化チタンコーティング技術の大規模製造プロセスの開発 ●加工条件とドーブした酸化チタンの特性の関係を調査し、製造品質管理システムを開発 ●コスト<\$3/kW, 腐食<1μA/cm ² , 析出<0.1μm	Metal Bipolar Plate	\$537,500(2019) \$407,162(2020)	ORNL TreadStone Technologies Inc.
MEA Manufacturing R&D	●R2Rプロセスで作製したMEAの品質管理と診断方法の開発	MEA(GDE vs CCM) (R2R)	\$800,000(2020) ※2007年からのPJ(各年\$0.8~\$1M)	GM Mainstream Engineering (CRADA) Gore, Nel/Proton Onsite LBNL, NRC, CEA
Roll-to-Roll Advanced Materials Manufacturing Lab Collaboration	●膜/GDLに電極を直接コーティングするプロセスの開発 ●スループットと効率を向上させ、複雑性と無駄を削減した連続MEA製造プロセスの開発とコスト低減 ●プロセス中の単層および多層材料の品質を評価するインライン計装ツールの開発	MEA	\$3.0M/年 ※例年同規模の予算	ANL, LBNL, NREL, SNL, ORNL
Catalyst Layer Design, Manufacturing and In line Quality Control	●Reactive Spray Deposition Technology (RSDT)を用いて触媒を直接成膜し、性能、製造、コスト削減の目標を達成する水電解用の大規模(680cm ²)なMEAの製造を実証	MEA	\$2.5M (total)	Proton Onsite UCONN NEL Hydrogen Mainstream Engineering
In line Quality Control of PEM Materials	●品質指標をリアルタイムにフィードバックする製造によるプロセスの改善(直接的な製造技術の改善のためのモニタリング手法)		\$2.15M	Mainstream Engineering Corporation NREL
Low Cost Gas Diffusion Layer Materials and Treatments for Durable High Performance PEM Fuel Cells	●より安価で水管理のパフォーマンスを高めたGDLの開発 ●低コスト素材の使用および加工費、エネルギー投入量の削減 ●コスト\$14/kW _{net} MEA	GDL	\$1M (2019~2021)	LANL, ORNL, NREL

生産技術関連では『製造スピード改善』『材料ロス低減』『品質管理』『原料・プロセス低コスト化』に関するPJTが推進されている

世界動向分析からみたFC生産技術トレンド

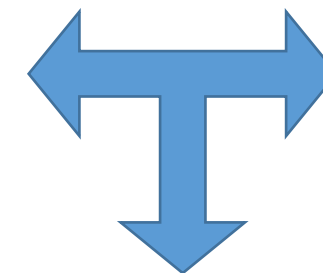
高効率生産

製造スピード改善

材料ロス低減

高品質管理

国内FC関連
産業界の現状



課題・革新すべきことは何か？



原料・プロセス低コスト化

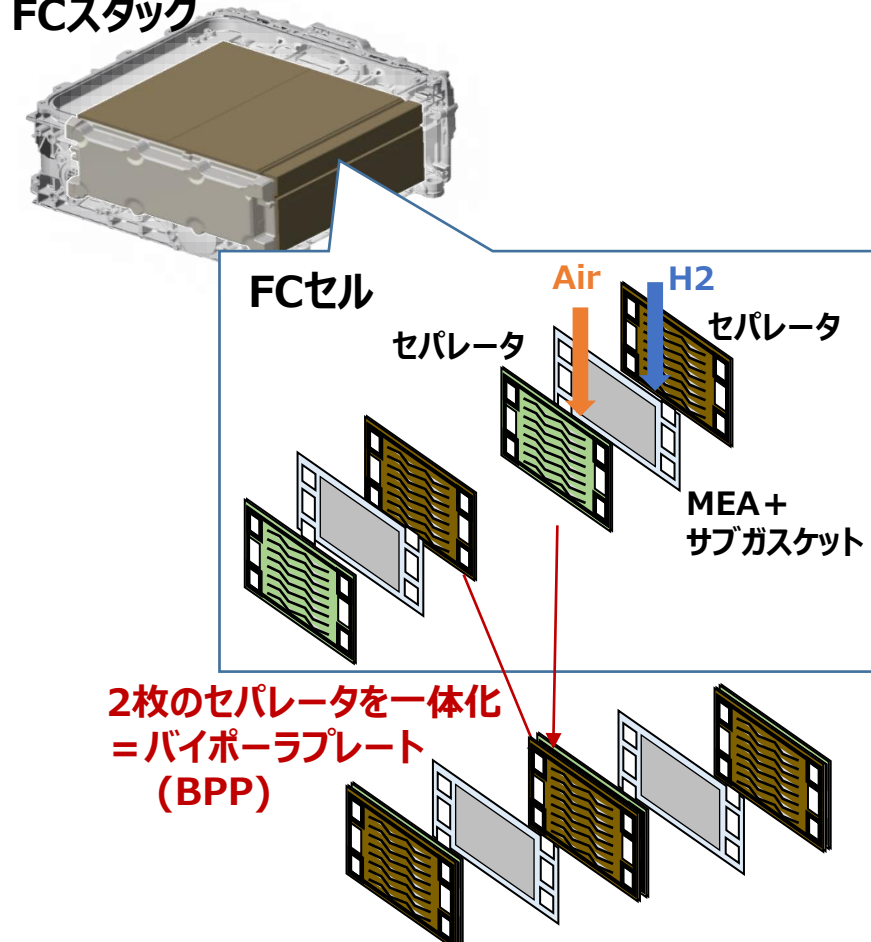
大学・研究機関・民間企業みなさまに
お力添えいただきたいことを発信

『高効率生産』『高品質管理』を追求するうえでの
課題・お力添えいただきたいことを発信

(2) 各工程の課題・革新ポイント概要 (MEA・バイポーラプレート・スタック)

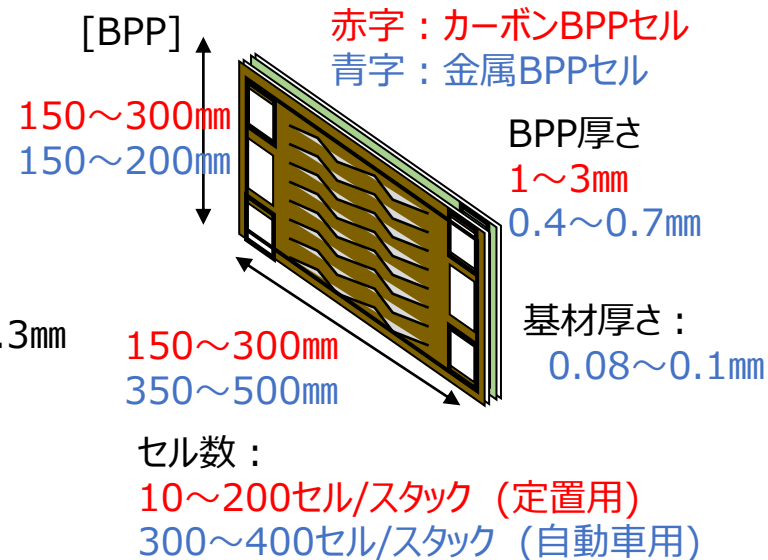
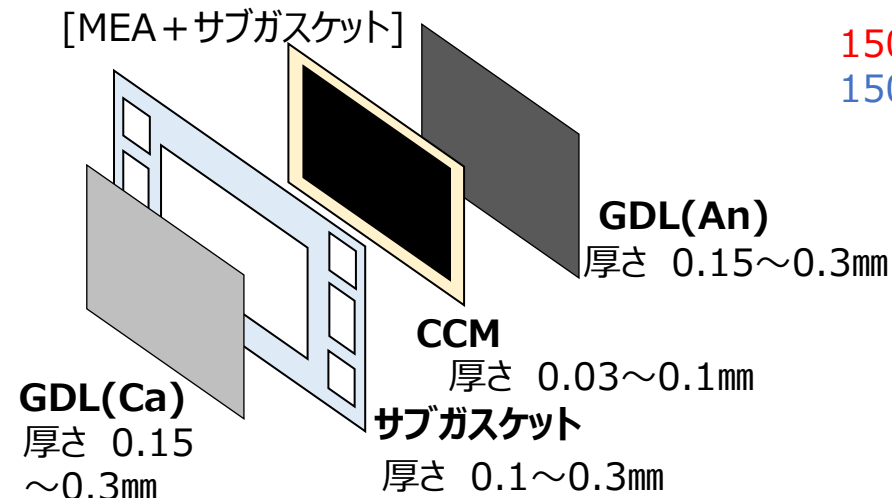
FCスタック・セル サイズおよび厚み

FCスタック



BPPとサブガスケット付MEAの
交互配置が一般的

セル構成部材寸法・厚み



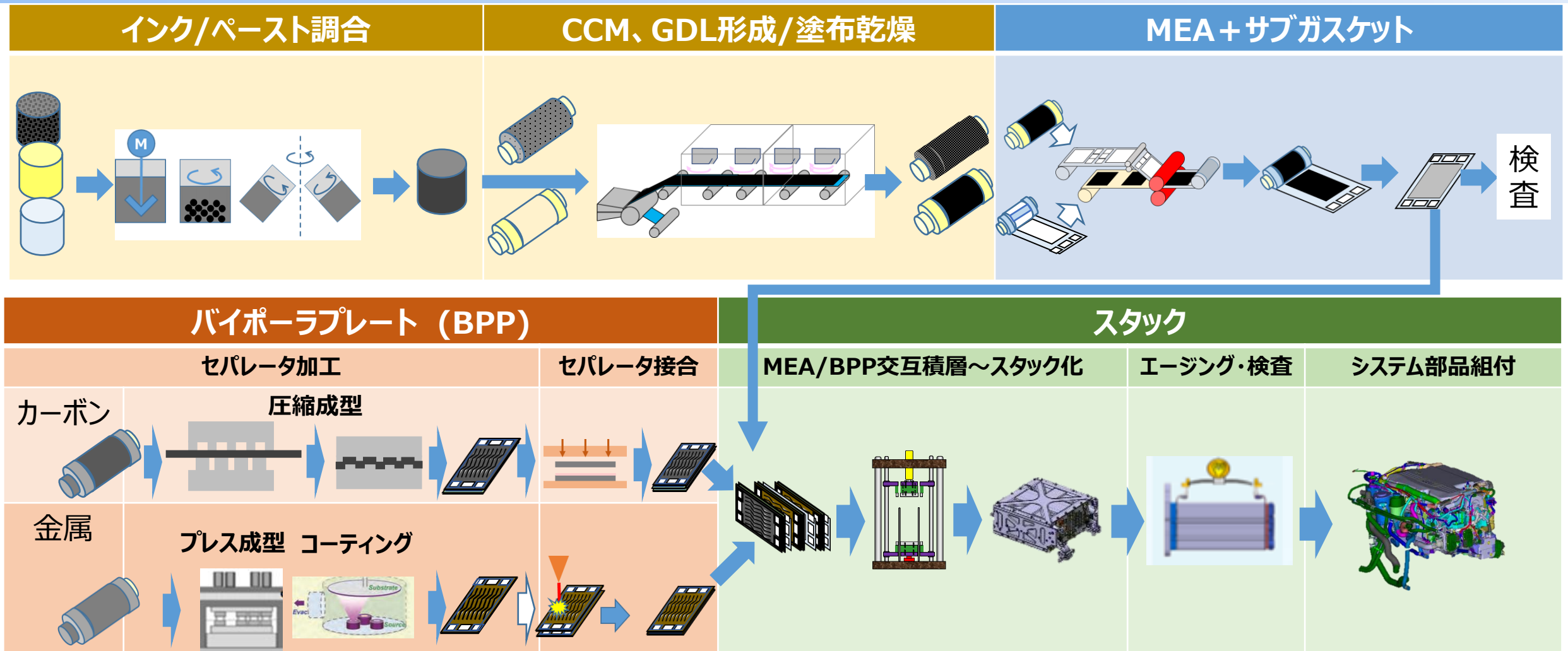
構成ワーク厚みは食品用ラップ材からボール紙程度
セル外形：A4~B4相当のサイズ⇒200~400セル積層

BPP種類と特徴

種類	材料構成例	セルピッチ	特徴
カーボン	グラファイト+樹脂	2~3mm	耐久性に優れる (> 8万時間)
金属	基材：SUS, Ti 表面：カーボン、金	0.9~1.3mm	接触抵抗低い (< 10mΩ/cm ²) 出力密度高くコンパクト化で有利

BPPは用途によりカーボンまたは金属のいずれかを選択

FCスタック生産工程 概略



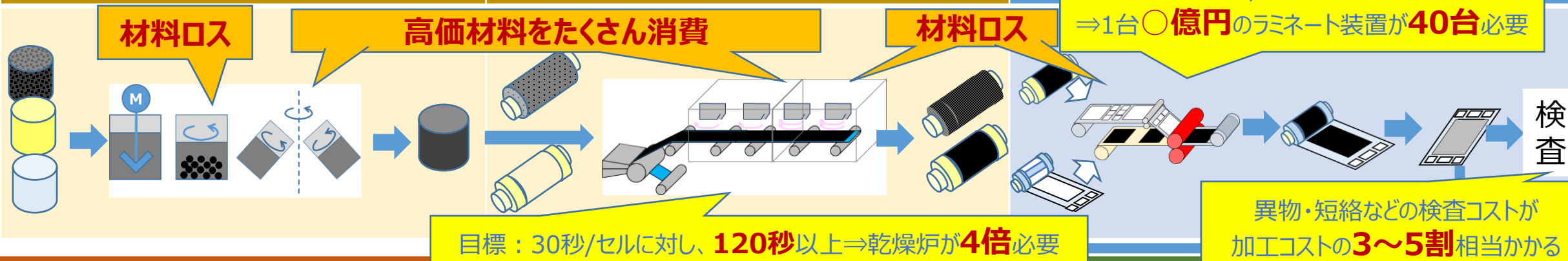
サブガasket付MEAとバイポーラプレートを作成・交互積層しスタック化

FCスタック生産工程 現状と課題

インク/ペースト調合

CCM、GDL形成/塗布乾燥

目標：0.5秒/セルに対し、**20秒**以上
⇒1台〇億円のラミネート装置が**40台**必要



バイポーラプレート (BPP)

スタック

セパレータ加工

セパレータ接合

MEA/BPP交互積層～スタック化

エージング・検査

システム部品組付

目標：0.5秒/枚に対し、1秒以上
⇒1台〇〇億円のプレス装置が**2台**必要

目標：0.5秒/枚に対し、**20秒**以上
⇒1台〇億円のPVD装置が**40台**必要

金属

プレス成型 コーティング

耐久性不足

目標：5分/スタックに対し発電エージングで**2時間**以上
⇒1台〇億円の発電装置が**24台**必要

- ・必要最小限の材料で十分な機能を有する理想構造を作れていない
- ・従来の生産速度や品質保証法では膨大な設備投資とスペースが必要

FCスタック工程 産業界として実現したい姿

インク/ペースト調合

CCM、GDL形成/塗布乾燥

MEA+サブガasket

少ない高価材料で高機能化

乾燥短時間化(<5秒/セル)

高速化(0.5秒/セル)

検査レス・
低減

材料ロス低減

材料ロス低減

検査

高速化
(0.5秒/セル)

バイポーラプレート (BPP)

スタック

短時間化(5分/基)

加工精度・高機能維持と高速化両立

カーボン

ローラエンボス成型

セパレータ接合

MEA/BPP交互積層～スタック化

エージング・検査

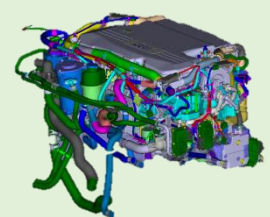
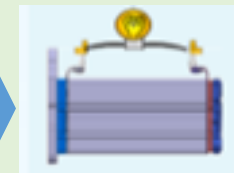
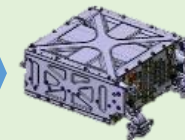
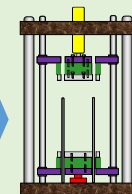
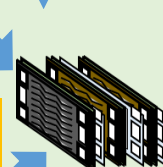
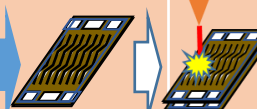
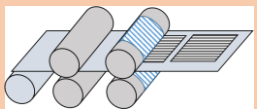
システム部品組付

金属

RtoR
PVDコート

ローラエンボス成型

耐久性向上



- ・全工程で高速化を追求(CT=0.5秒/セル、5分/スタック)
- ・MEA、BPPは効率的に高機能化可能な工法を実現したい

FCスタック工程 産業界として実現したい姿

インク/ペースト調合

CCM、GDL形成/塗布乾燥

MEA+サブガasket

少ない高価材料

招待講演②『MEAプロセス』でご説明

秒/セル)

検査レス・
低減

材料ロス低減

材料ロス低減

検査

招待講演③『バイポーラプレート・
セパレータプロセス』でご説明

金属

RtoR
PVDコート

ローラエンボス成型

耐久性向上

スタック

短時間化(5分/基)

MEA/BPP交互積層～スタック化

エージング・検査

システム部品組付

このあと『エージング工程課題』
についてご説明

(3) スタック工程課題 ～エージング～

エージングとは？ ～目的と機能要件～

◆エージングの目的

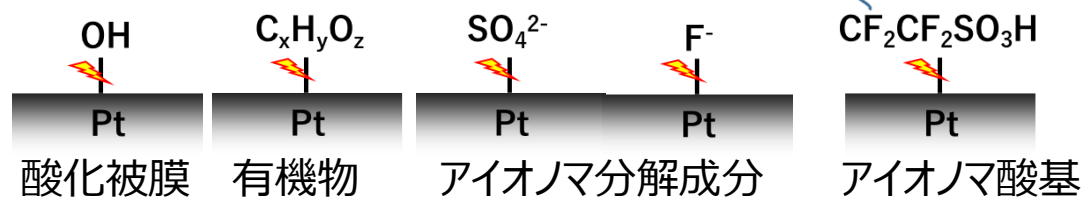
製造直後のセル・スタック出力は本来出力よりも大幅に低く、そのまま出荷して運転しても十分な出力が得られない



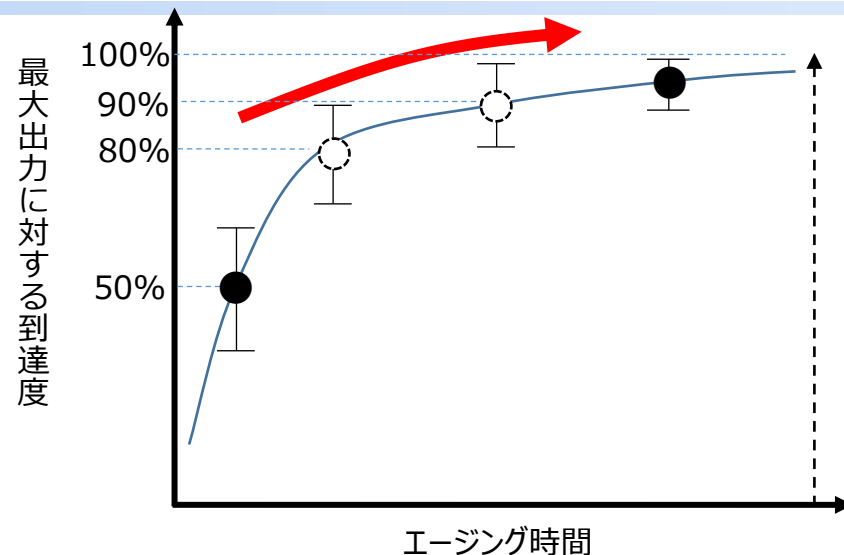
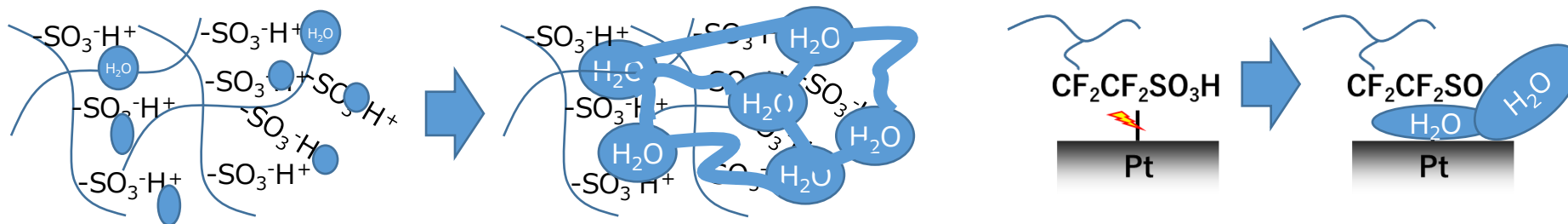
出荷後運転により**最大出力が発現可能な状態にするために、最低限の活性化処理(=エージング)**が必要

◆エージングに求められる機能要件

1) Pt触媒表面のクリーニング、付着物除去



2) 電解質膜・触媒層アイオノマの湿潤、Pt触媒表面までのプロトンパス形成



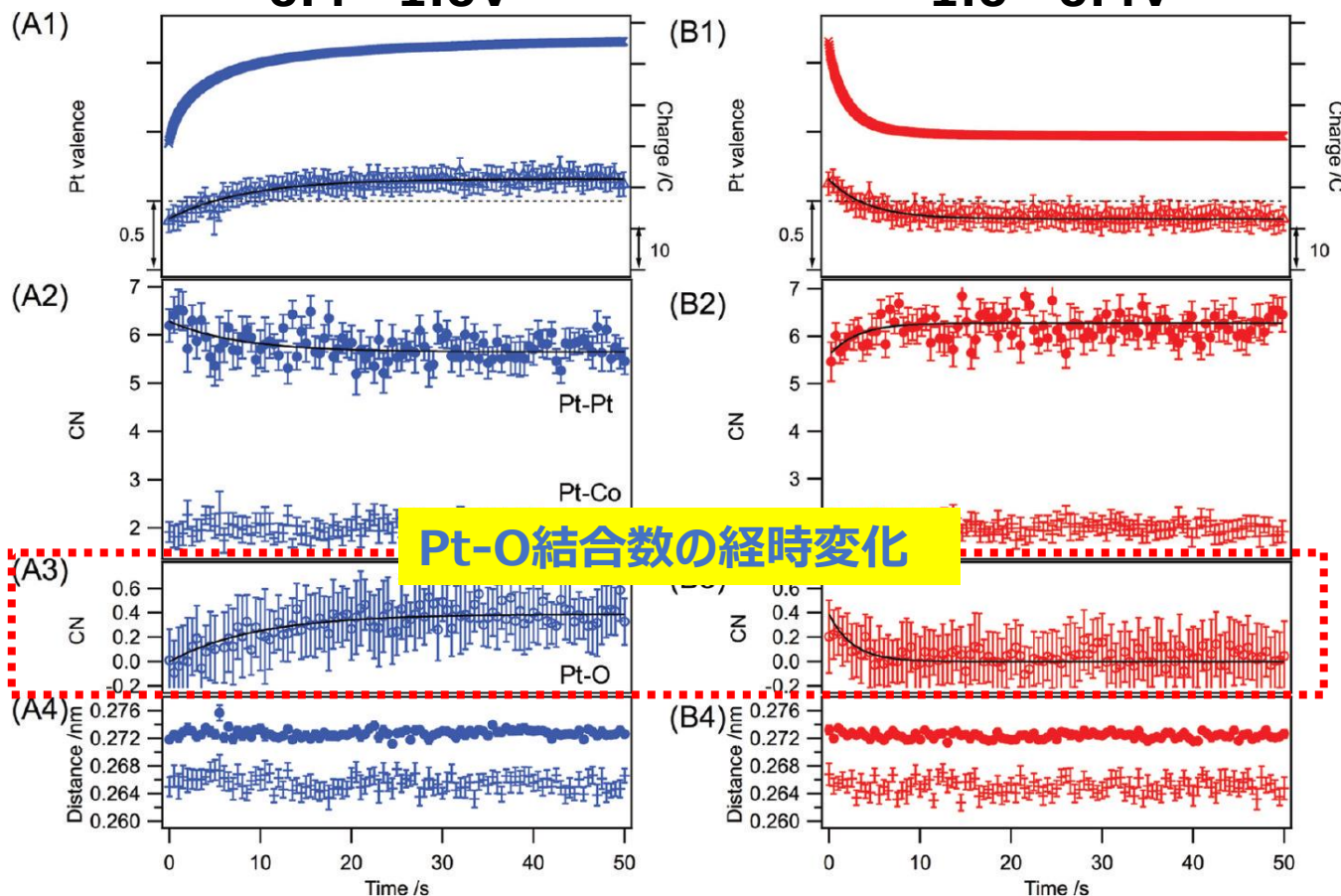
エージングに関する公知情報

1.0→0.4Vスweep×約4sec でPt-O結合除去

膜の分解成分アニオンは高電位でPtに吸着しやすい

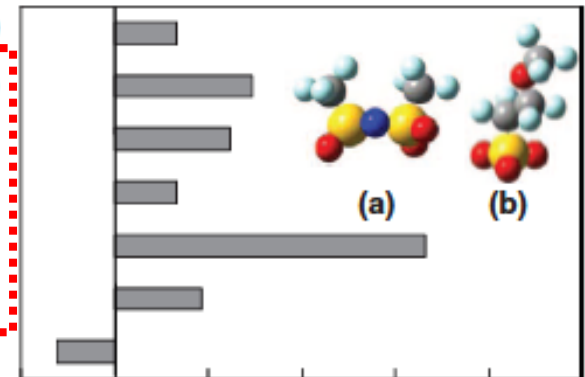
0.4→1.0V

1.0→0.4V

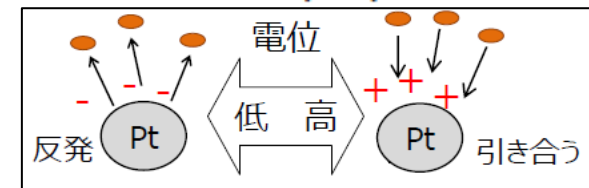
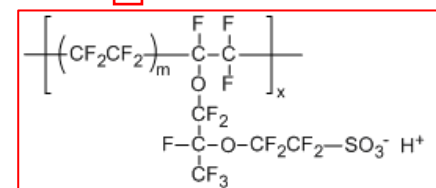


N.Ishiguro et.al., ACS Catal. 2012, 2, 1319–1330

- (a) $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{NSO}_2\text{CF}_3(\text{ads})$
- (b) $\text{CF}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{SO}_3(\text{ads})$
- (c) $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{SO}_3(\text{ads})$
- (d) $\text{CF}_3\text{SO}_3(\text{ads})$
- (e) $\text{SO}_4(\text{ads})$
- (f) $\text{HSO}_4(\text{ads})$
- (g) $\text{ClO}_4(\text{ads})$



分解

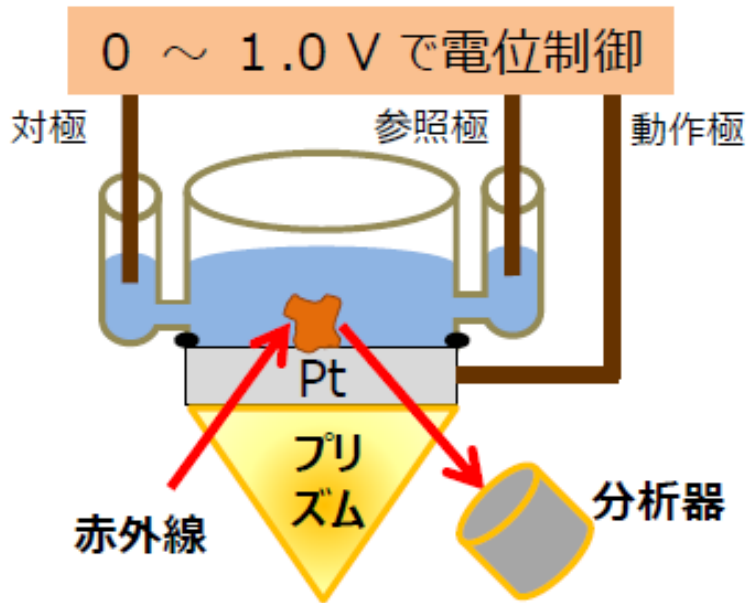


K.Kodama et.al., J.Electrochem.Soc. **161**(5)F649-F652(2014)

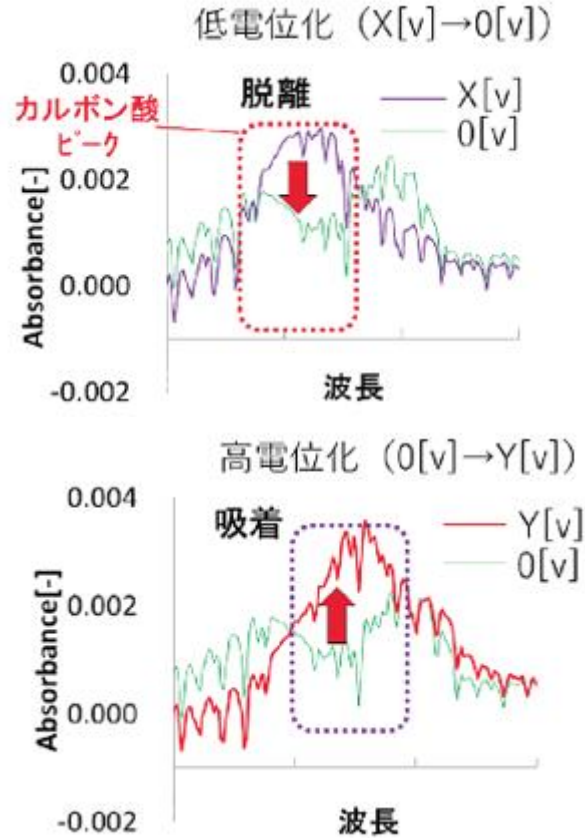
酸化被膜・PEM分解由来アニオンの除去には低電位化が有効ではないか？

エージングに関する公知情報

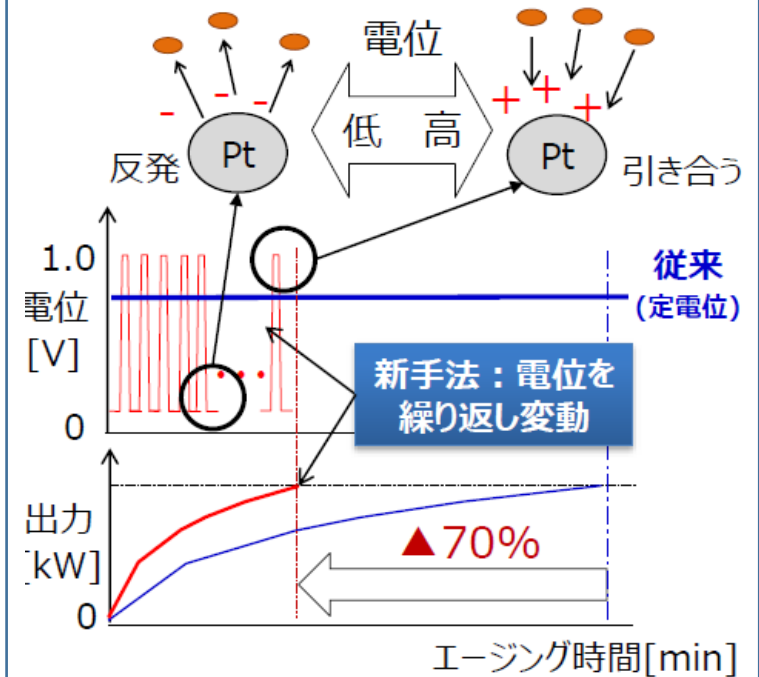
表面増強赤外分光法 (SEIRAS) With 名工大 豊田中研



不純物脱離吸着を『可視化』



低電位化の有効性確認



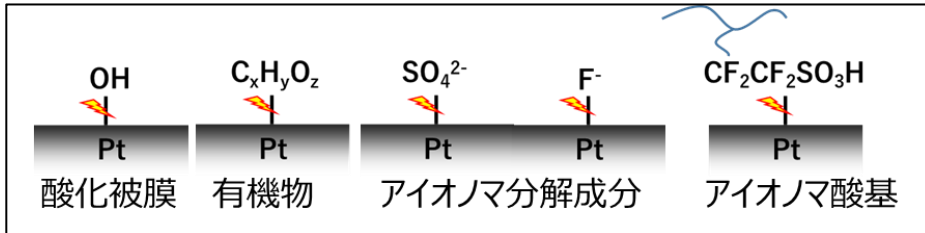
電位変動エージング法
により▲70%短時間化

トヨタ自動車・テクニカルレビューvol.66, Jan. 2021

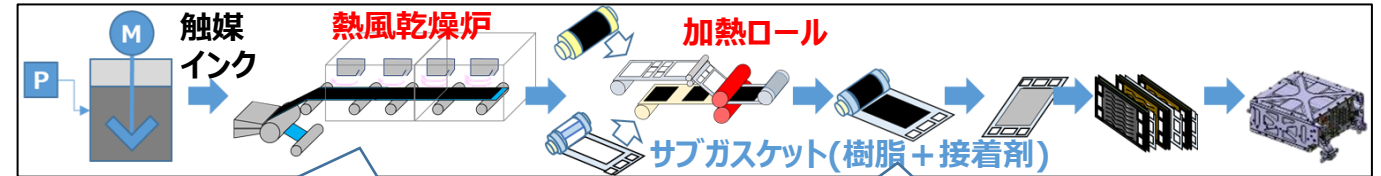
低電位化の有効性 および 電位変動エージングによる短時間化 を確認

エージング さらに知りたいこと

1) Pt触媒表面のクリーニング、付着物除去

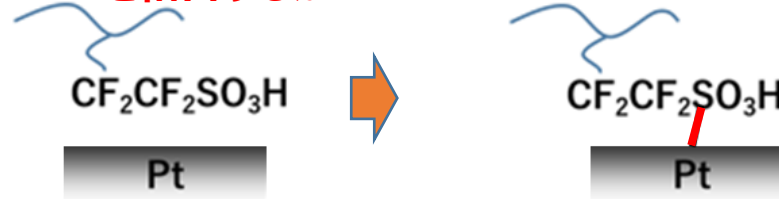


各化学結合がどの工程・段階で生成するか？



付着物発生原理・Ptに付着する経路

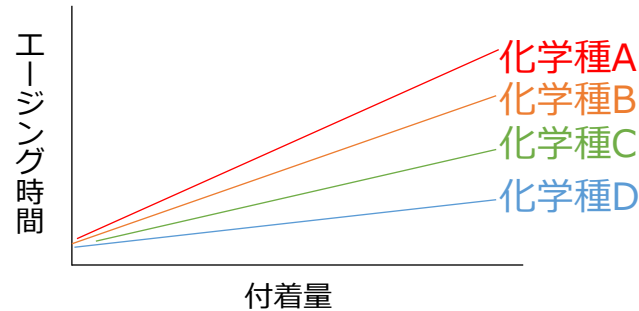
インク中のアイオノマやその分解物がいつどうやってPtと結合するか？



シール材料の有機物はどうなるとPtに付着するか？

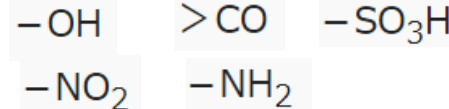


化学種によるエージング時間への影響

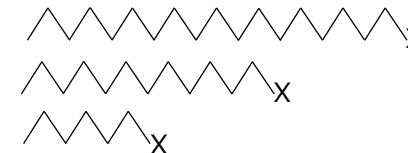


分子構造の影響寄与度、メカニズム

官能基
結合しやすさ



分子量、分子鎖長
動きやすさ

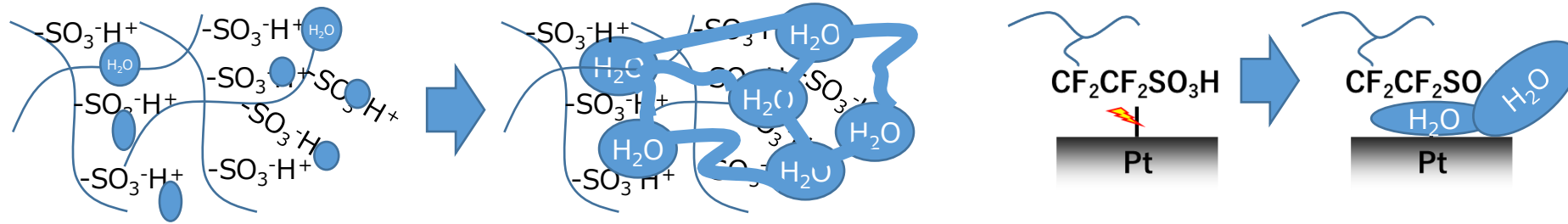


組み合わせとして
どう影響するか？

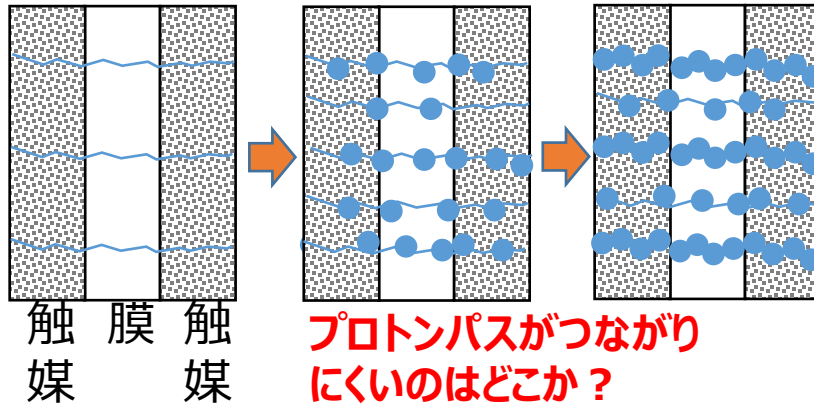
Pt表面に被毒物質を付着させない各工程要件の明確化

エージング さらに知りたいこと

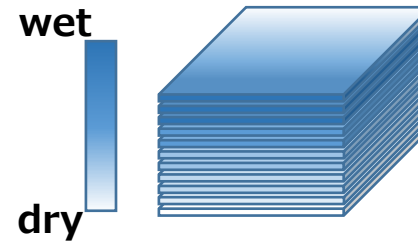
2) 電解質膜・触媒層アイオノマの湿潤、Pt触媒表面までのプロトンパス形成



MEA内の湿潤過程・律速要因の把握

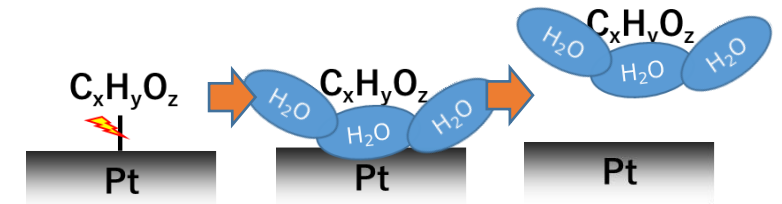


スタック内の湿潤過程・律速要因の把握



セル間のばらつきは
何が影響しているか？

湿潤・生成水によるクリーニング効果



湿潤過程のリアルタイム可視化把握手段

X線や中性子を活用してどこまで現象把握できるか？
CCM厚み方向の湿潤経過を追跡できないか？

エージングレスで湿潤・プロトンパス形成させる手段

外部加湿などを工夫して代替できないか？

エージング課題 まとめ

エージング短時間化・レス化に向け、今後以下の知見を明確にしていきたい

1) Pt酸化被膜・付着物クリーニング

- ①酸化被膜形成・付着過程の原理現象把握
- ②エージング時間に対する酸化被膜・付着物の化学種および量的影響

2) CCMの湿潤・Pt表面までのプロトンパス形成

- ①Pt表面～アイオノマ～PEMの湿潤・プロトンパス形成過程の把握
- ②Ptクリーニングにおける生成水の効果
- ③状態把握するためのリアルタイム可視化手段
- ④エージングレスで湿潤・プロトンパス形成させる手段

3) プロセス全体の各工程における要件