

SOFCの現状と課題

～今後取り組むべき基盤技術開発～

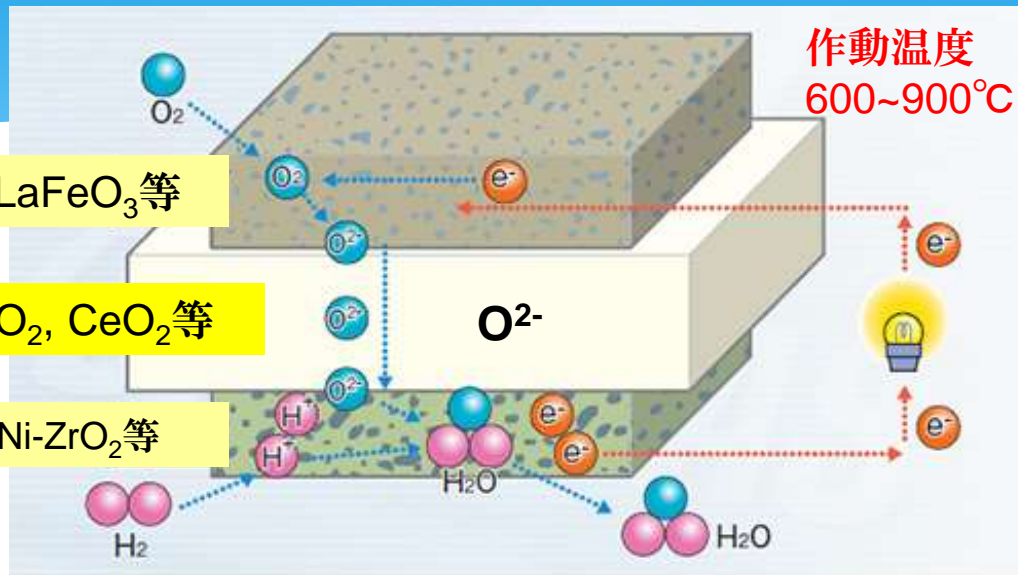
2019/06/21

燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)
要素・基盤技術WG SOFC技術SWG
主査 水谷 安伸

本日の発表内容

1. はじめに
2. 現状認識
3. 取り組むべき課題
4. 課題へのアプローチ、技術開発への期待
5. おわりに

SOFC (固体酸化物形燃料電池) について



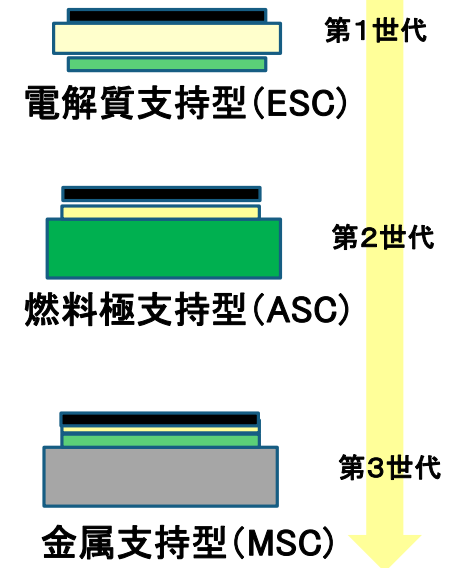
空気極: LaFeO_3 等

電解質: ZrO_2 , CeO_2 等

燃料極: Ni-ZrO_2 等

作動温度
600~900°C

SOFCセルの構成と発電原理



燃料電池の種類

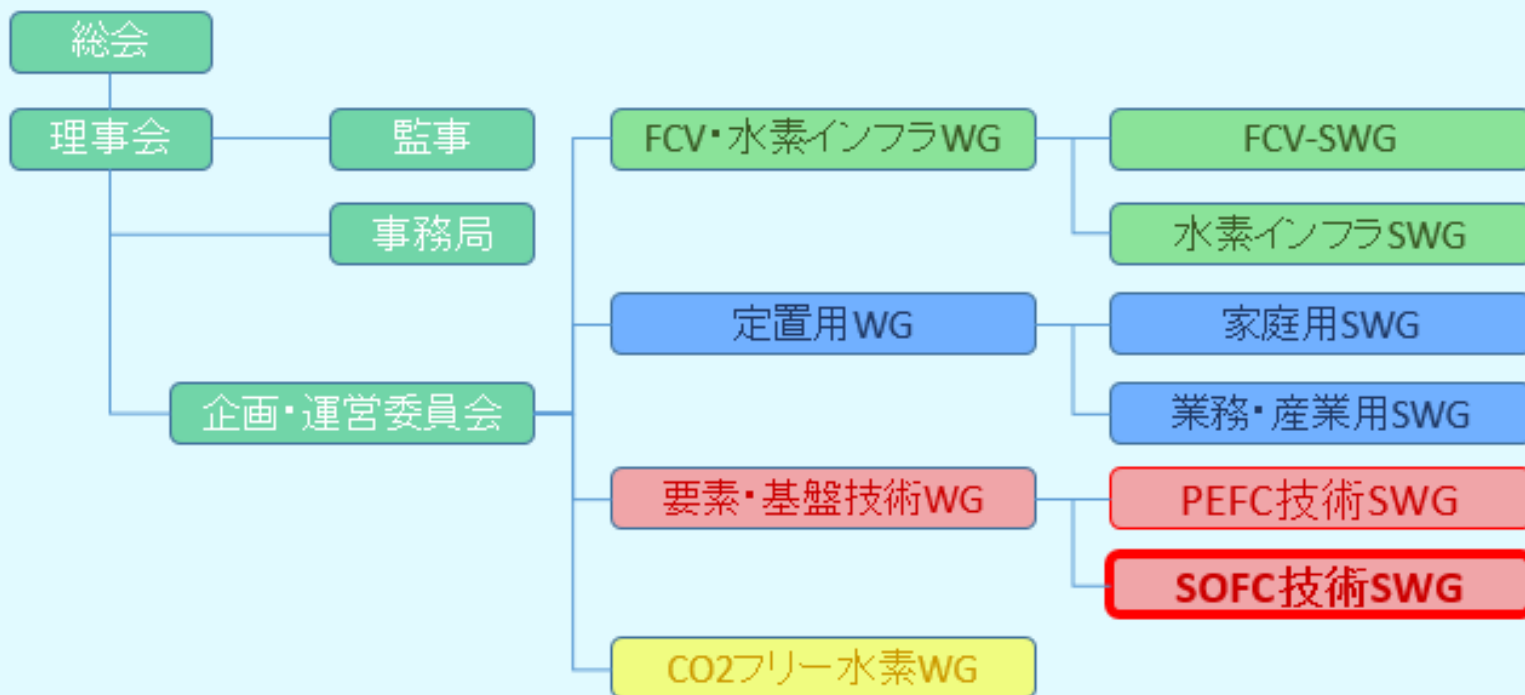
	PEFC 固体高分子形	PAFC リン酸形	MCFC 熔融炭酸塩形	SOFC 固体酸化物形
作動温度	低温	低温	高温	高温
電解質	高分子 (固体)	リン酸 (液体)	熔融炭酸塩 (液体)	セラミックス (固体)
作動イオン	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}

< 特長 >

- ① 高い発電効率 (45~65%)
- ② 様々な燃料に対応可能
- ③ 可逆動作が可能 (蓄エネ)
- 貴金属を使用しない
- 高温排熱が利用可能

燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)

要素・基盤技術WG SOFC技術サブワーキング



<メンバー>

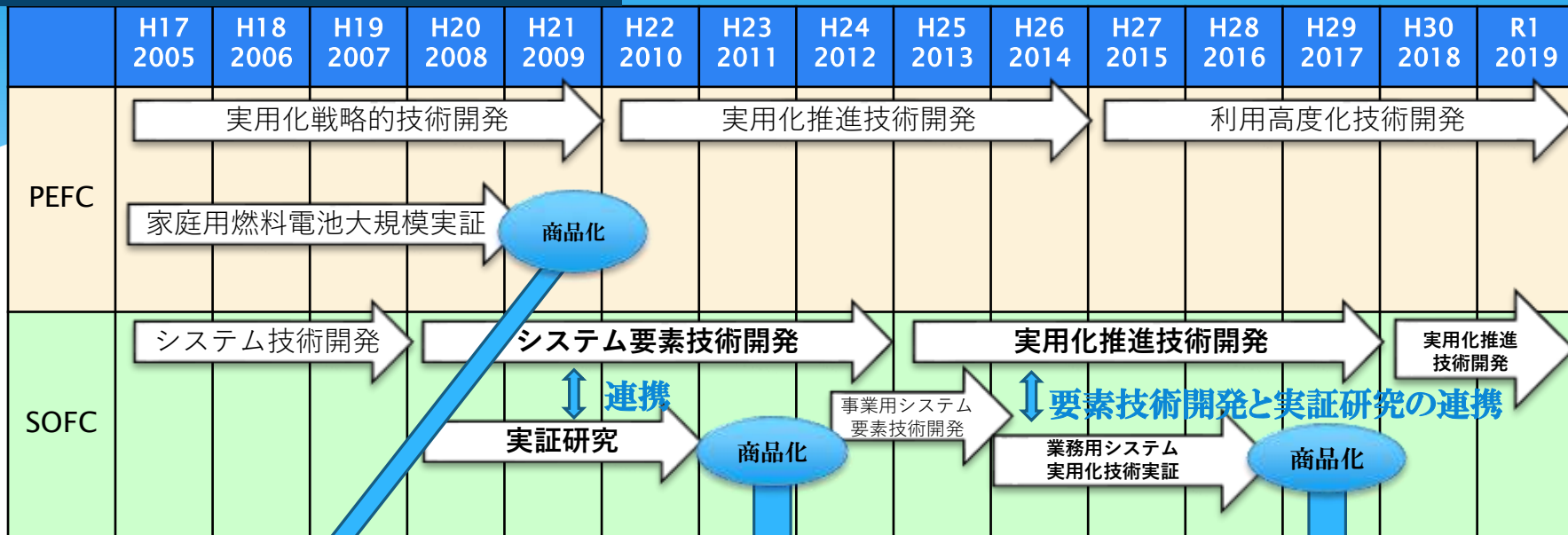
SOFCセルスタックメーカー、SOFCシステムメーカー、ユーティリティ(ガス会社)

<活動概要>

- * SOFCで取り組むべき技術課題、研究開発課題の検討
- * 国内外の技術動向調査・ベンチマーク
- * 業界からの要望とりまとめ → 本日は業界からの要望・提言としてご報告

SOFC技術開発の沿革と成果

NEDO燃料電池プロジェクトの沿革



2009 Panasonic
エネファーム(PEFC)販売開始



2011 2012 Aisin
エネファームTypeS(SOFC)販売開始

9万時間
(10年間)
の耐久性
に目途



2017 MHPS 250kW
業務・産業用燃料電池(SOFC)販売開始

NEDOプロジェクトの成果が実用化につながった(産学官連携研究開発の有効性)

・特に9万時間(10年間)の耐久性は日本の技術優位性(最新機は10年メンテフリー)

現状認識：水素・燃料電池戦略ロードマップ目標との対比

現状	販売実績	発電効率	コスト
家庭用燃料電池	2011年度 EF Type-S 販売開始 2018年度 42千台(累計276千台) SOFC/PEFC = 49% / 51%	46% 52~53%	約250万円 約130万円~
業務・産業用燃料電池	2017年 販売開始 2017年度 17台 2018年度 17台(15台)	50~55%	約100万円/kW

現状と目標値との間に大きなギャップ



さらなる本格普及に向けてはコスト低減、技術開発が必要

水素・燃料電池戦略ロードマップ	目指すべきターゲット	達成に向けた取組
家庭用燃料電池	2020年頃の自立化、2030年までに530万台 2020年頃までにSOFC型100万円を実現 2030年頃までに投資回収年数を5年とする	<ul style="list-style-type: none"> 既築・集合住宅などの市場の開拓 セルスタックの高効率化・高出力密度化等の技術開発 セルスタック等の劣化原因の解消に向けた技術開発
業務・産業用燃料電池	<p>○2025年頃に排熱利用も含めたグリッドパリティの実現</p> <p>低圧：機器50万円/kW、発電コスト25円/kWh 高圧：機器30万円/kW、発電コスト17円/kWh</p> <p>○発電効率、耐久性の向上</p> <p>2025年頃に55%超→将来的には65%超 9万時間→2025年頃に13万時間</p>	

現状認識：家庭用燃料電池の現状と見通し



- * 現状延長ケースから成長シナリオへの転換、打ち手が必要
- * 2009に導入した機器が10年を経過(リプレース対応)
10年以上の継続使用もしくはリプレースされないと現状シナリオ維持も困難に
→長寿命化技術開発への期待

打ち手1. コスト低減

CAPEX セルスタック低コスト化、長寿命化
OPEX 運用コスト低減(効率)、長寿命化

打ち手2. 販売先拡大

建物、地域、燃料
新たな顧客価値創造(BCP、スマート)

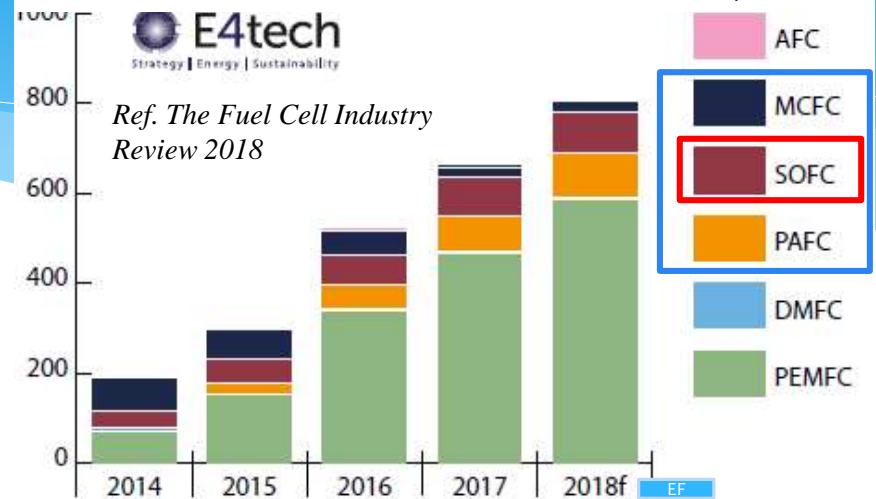
現状認識～業務・産業用燃料電池

日本のコージェネ導入実績



Ref. コージェネ財団Webpage

世界の燃料電池導入実績 (MW)



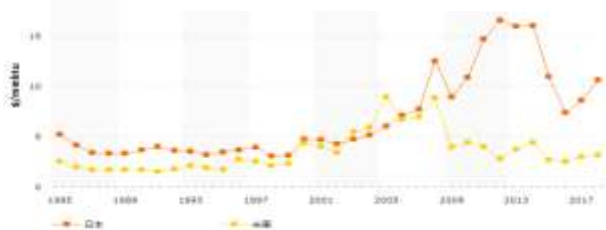
定置用燃料電池全体では2018年に240MWの導入(市場は拡大している)

- SOFCは設置台数・容量が増加 (90MW)
- トップランナーはBloom Energy (80MW)
- 分散電源としての導入(経済性、BCP)

2017年度の導入は200MW程度

- 燃料費上昇でコージェネ販売減速
- 環境価値、BCP防災価値で導入

天然ガス価格の推移



電力・ガス自由化⇒新たなビジネスモデル
新たな顧客価値創造が必要(電源価値)

Product & Install Unit Economics (\$/kW) ¹	Q4'17	Q3'18	Q4'18	FY'17	FY'18 ³
ASP	5,295	7,231	6,756	5,542	7,155
TISC ²	4,231	5,648	5,344	5,084	5,425
Profit (Loss)	1,064	1,583	1,412	458	1,730

Total Acceptances (100 kW units)
257 systems

⇒ システム価格は5千ドル/kWレベルに(低コスト化も進んでいる)



Ref. Lettre to Shareholders, Feb. 3, 2019, Bloom Energy

SOFCにおいて今後取り組むべき課題とアプローチ

- * 課題1 低コスト・長寿命化 (SOFCの本格普及に向けて)
- * 課題2 高効率化 (発電効率向上)
- * 課題3 新たな顧客価値創造 (電源価値向上)
- * 課題4 多燃料対応による適用市場拡大
(将来の水素社会・脱炭素化に向けて)

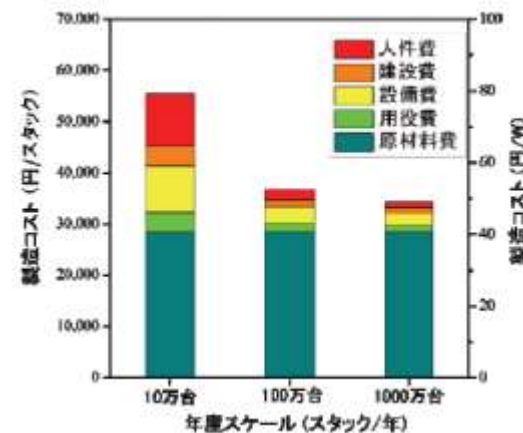
SOFCにおいて今後取り組むべき課題とアプローチ

- * 課題1 低コスト・長寿命化 (SOFCの本格普及に向けて)
- * 課題2 高効率化 (発電効率向上)
- * 課題3 新たな顧客価値創造 (電源価値向上)
- * 課題4 多燃料対応による適用市場拡大
(将来の水素社会・脱炭素化に向けて)

取り組むべき課題1 : 低コスト・長寿命化に向けて

	現状	短期 2020	中期 2025	長期 2030~2040
セルスタックコスト	>10万円/kW	10万円/kW	5万円/kW	2~3万円/kW
システムコスト 家庭用 業務・産業用	130万円~ 100万円/kW (設置工事別)	100万円 100万円/kW (設置工事含む)	高圧30万円/kW 低圧50万円/kW	<20万円/kW
スタック耐久性	10年9万時間	→ → →	15年13万時間	>15年

	課題への対応策
セルスタック 出力密度(W/cm ²) 体積密度(kW/L)	量産効果 → プロセスコスト低減 → 原料コスト低減 0.3 → 0.5 → 1.0 0.2~0.3 → 2.0 → 4.0
システム	補機簡略化、ロバストセルスタック
製造プロセス	ハイスループット
設計開発プロセス	加速試験法、モデルベース劣化診断
その他	低廉原料、低温作動、PCFC、MSC



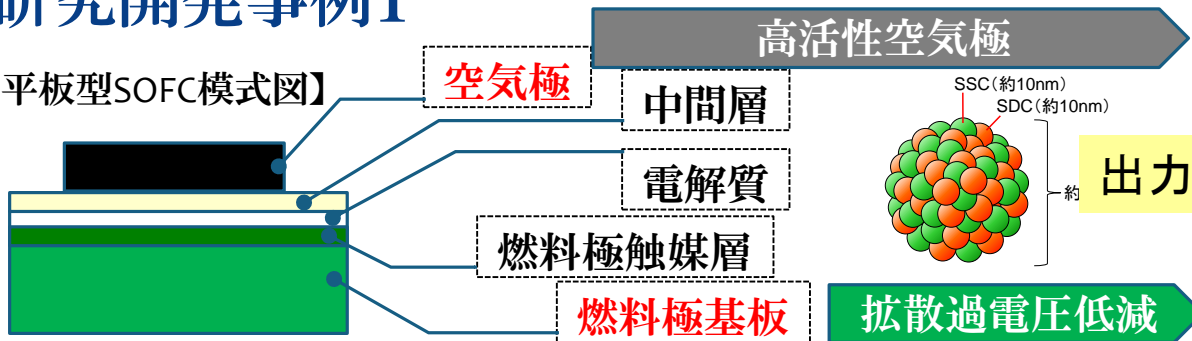
Ref. LCS調査報告書、H26.3)より
SOFCのコスト試算(量産効果)

ロードマップ実現のためには**高出力密度化による低コスト化**に加えて**13万時間の耐久性実現**が有効
→ これまでの産官学連携基盤研究の成果、評価解析プラットフォーム活用、標準化等

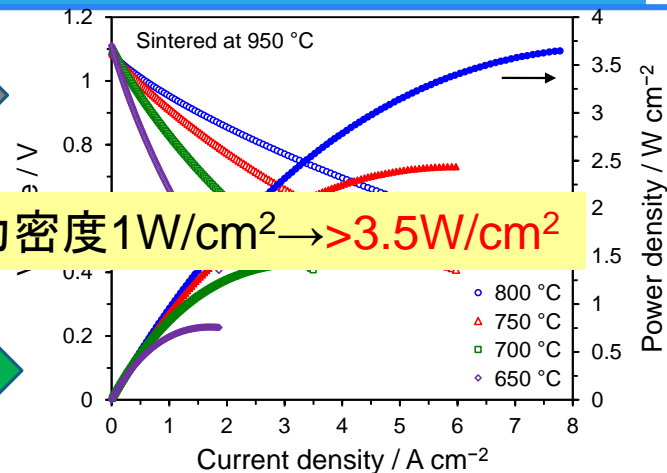
低コスト化に向けて～高出力密度化の可能性と研究事例

研究開発事例1

【平板型SOFC模式図】



H. Shimada et al., *J. Power Sources*, 302, 308-314 (2016).



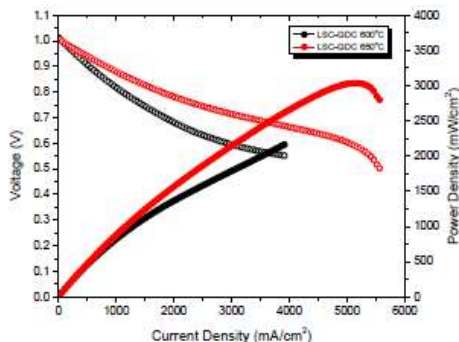
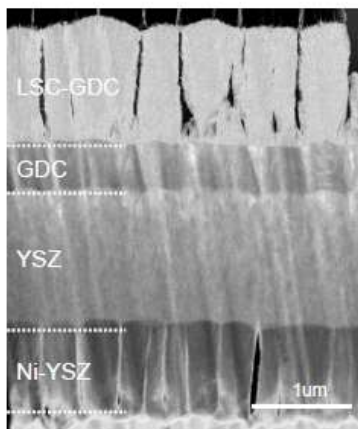
研究開発事例2

新規プロセス電極

Cell Performance

LSC-GDC / GDC / YSZ / Ni-YSZ, Hydrogen Fuel

650°Cで3W/cm²
600°Cで2W/cm²



N.Q. Minh, 20th Annual Solid Oxide Fuel Cell Project Review Meeting(2019)

研究開発事例3

DOEプロジェクトにおけるSOFC次世代スタック

Power Weight Ratio

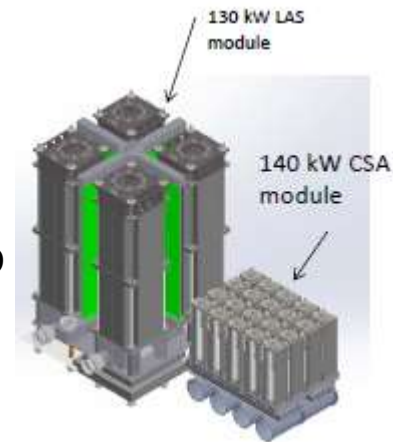
76→463W/kg

重量当たりの出力
(6倍)

Power Volume Ratio

185→778W/L

体積当たりの出力
(4倍)



20th Annual Solid Oxide Fuel Cell Project Review Meeting(2019)12

長寿命化に向けて (NEDO事業における取り組みと今後の展開)

○ 現行プロジェクトの取り組みと成果(～2019)

- * Cr被毒、S被毒、中間層改良
- * 劣化メカニズム解明、評価解析技術の確立

劣化評価解析技術、9万時間耐久は国産SOFCの技術的優位性

● 今後の取り組み課題とアプローチ(2020～)

- * 評価解析技術の活用と標準化
- * さらなる長寿命化(13万時間15年耐久)への対応
- * 変動対応、高燃料利用率など高負荷運転における耐久性向上

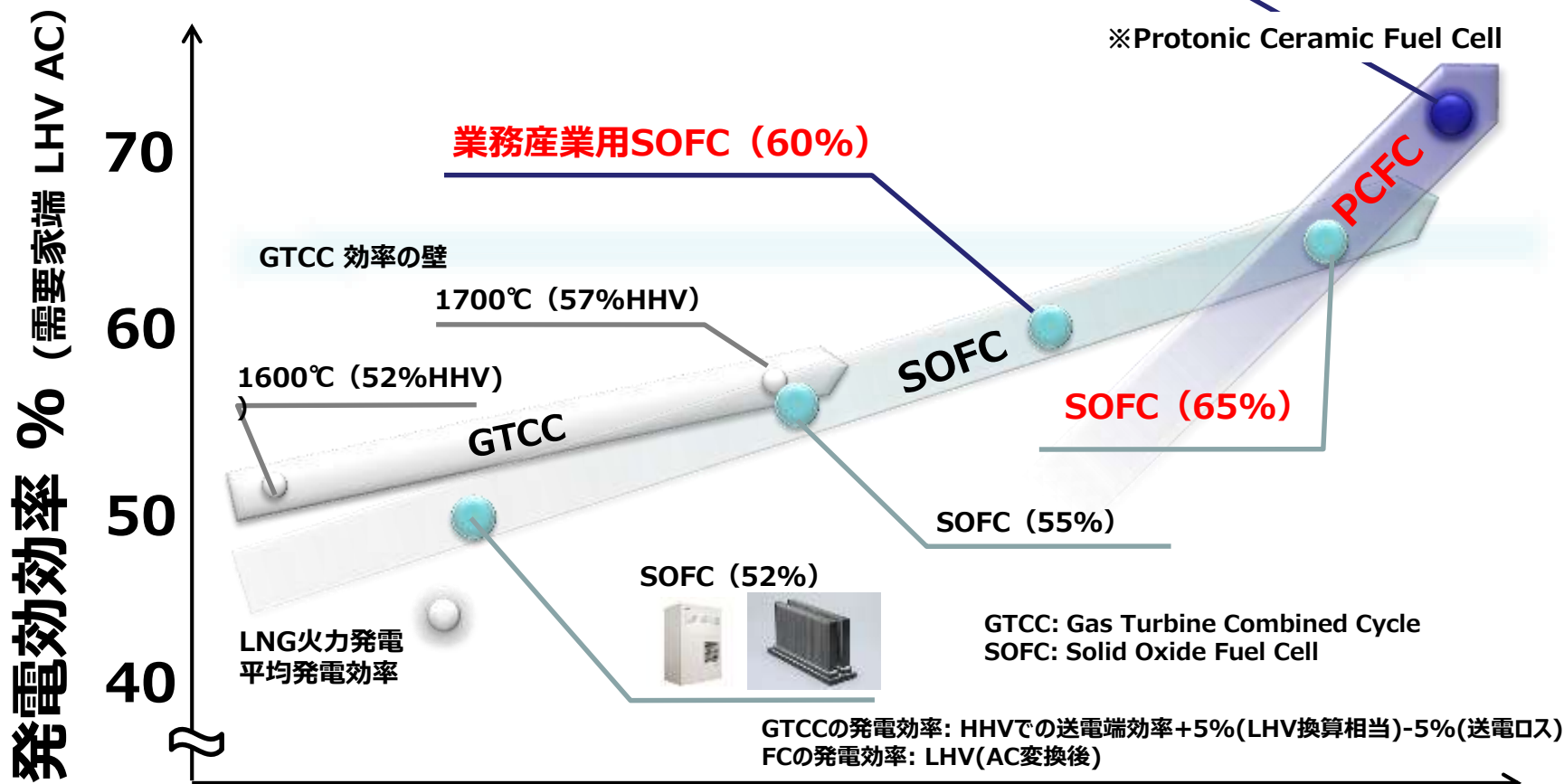
⇒ 詳細はこの後、堀田氏のプレゼンにてご紹介

SOFCにおいて今後取り組むべき課題とアプローチ

- * 課題1 低コスト・長寿命化(SOFCの本格普及に向けて)
- * 課題2 高効率化(発電効率向上)
- * 課題3 新たな顧客価値創造(電源価値向上)
- * 課題4 多燃料対応による適用市場拡大
(将来の水素社会・脱炭素化に向けて)

SOFCの発電効率向上～開発ターゲットと時期

超高效率SOFC (>70%)



2018

2020

2030~40

発電効率 55% → 60% → 65% → 70%

NEDOプロ現事業の成果

次期への目標、取り組み

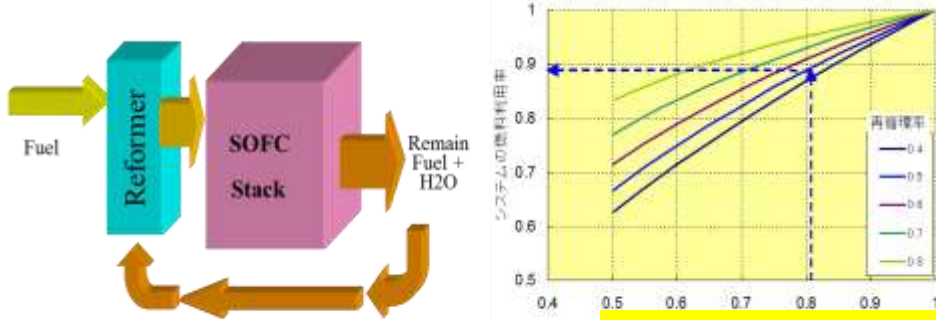
60-65%機開発実証

70%要素研究開発

取り組むべき課題2： 高効率化に向けて ～ 課題へのアプローチ～

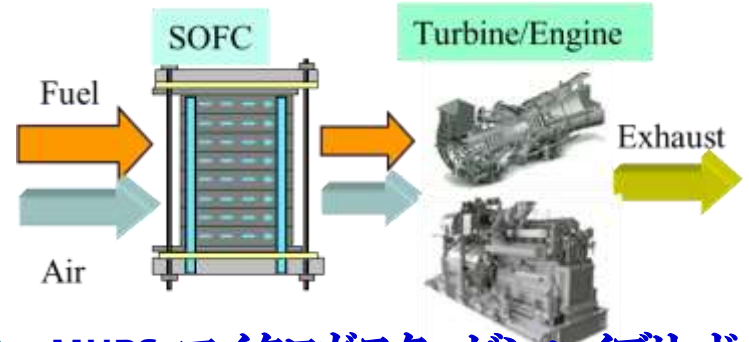
米国DOE ARPA-e
“Integrate”のアプローチ

(1) 燃料リサイクル、化学再生



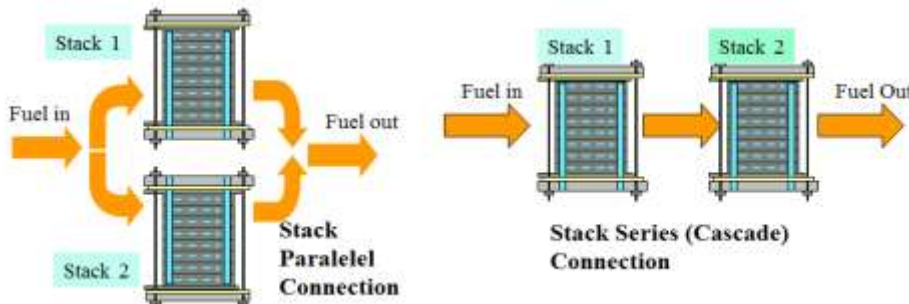
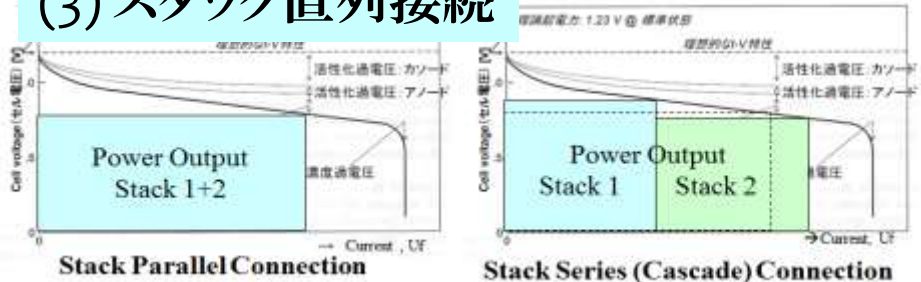
SWPC; エジェクターリサイクル 60-65% 実証段階

(2) コンバインドシステム



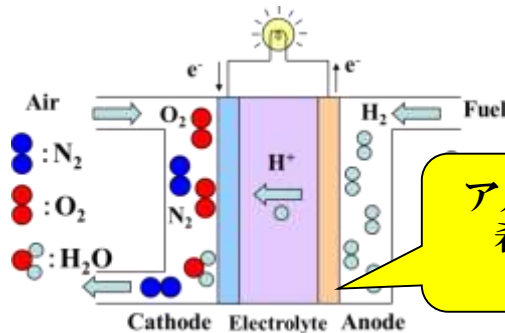
MHPS; マイクロガスタービンハイブリッド

(3) スタック直列接続



Fuel Cell Energy社のMCFC 45%→60%

(4) セルスタックの抜本的な高効率化 プロトン伝導型SOFC (PCFC)の例



- 中温作動 400-600C、低コスト
- 貴金属レス、高効率(高燃料利用率)

70% 要素技術開発

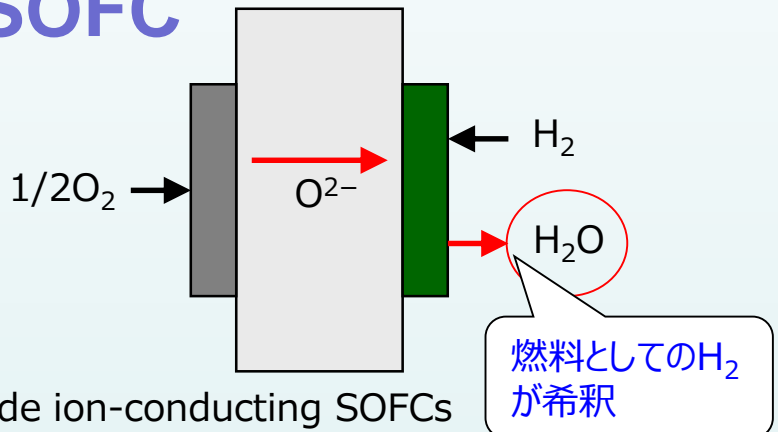
超高変換効率新規プロトン導電デバイスの開発 (NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム2017-2018) , (2019)

従来の酸化物イオン導電型セラミックス燃料電池

($Zr(Y)O_2$, $Ce(Gd)O_2$ *fluorite*).

システム発電効率 ; 52%

SOFC

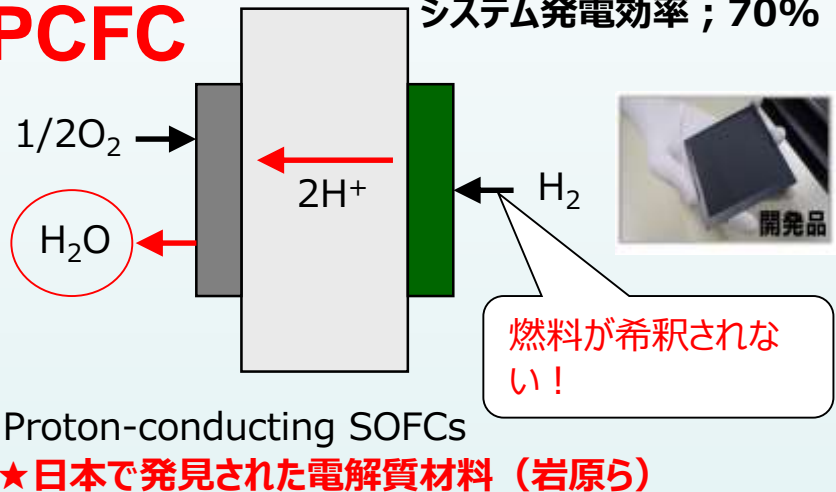


プロトン伝導セラミックス燃料電池

(ABO_3 ; $BaZr(Y)O_3$ *Perovskite*)

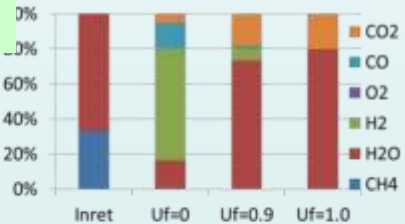
システム発電効率 ; 70%

PCFC



SOFC

750°C
S/C=2.0

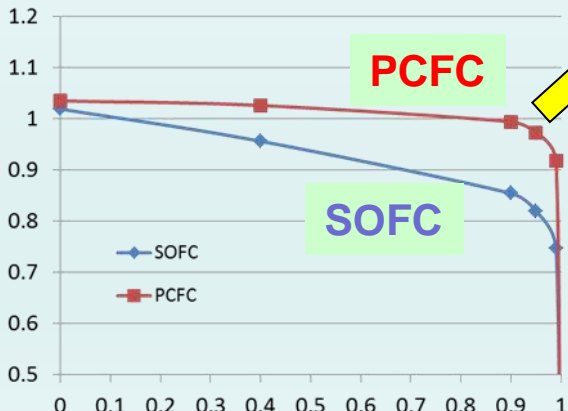


PCFC

600°C
S/C=2.0



メタン燃料におけるガス組成



燃料利用率と起電力の関係

高燃料利用率で運転可能 × 高燃料利用率でも高い電圧
= 水素でもメタンでも高効率

東京ガス・九州大学のグループが SOFC+PCFC で理論的に 81% の発電効率が実現可能と試算

プロトン伝導セラミックセル(PCC)の研究開発

○これまでの取り組みと成果(～2019)

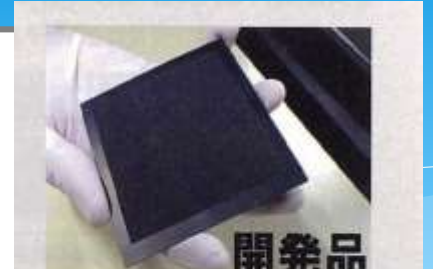
- * 超高変換効率新規プロトン導電デバイスの開発
(NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム 2017-2018)

PCFCデバイスの技術課題を抽出し、将来の可能性を提示

●今後の取り組み課題とアプローチ(2020～)

- * ホール伝導(内部短絡)の抑制
- * 新規材料開発(電解質、電極)
- * 革新製造プロセス

→ PCFC基本モジュール(デバイス化)の実現



NEDOプレスリリース
(2018/07)
世界初、実用サイズのプロトン
導電性セラミック燃料電池セル
(PCFC)の作製に成功
日経エレクトロニクス2019/03



電気化学コンプレッサ

PCEHC
Electrochemical
Hydrogen
Compression

水素分離

H2 Separation

用途展開

PCFC
超高発電効率燃料電池
>70%(LHV AC)

CO2回収

CO2 Capture FC

高効率水素製造

PCEC
Steam
Electrolysis
Co-electrolysis
Power to fuel

SOFCにおいて今後取り組むべき課題とアプローチ

- * 課題1 低コスト・長寿命化(SOFCの本格普及に向けて)
- * 課題2 高効率化(発電効率向上)
- * 課題3 新たな顧客価値創造(電源価値向上)
- * 課題4 多燃料対応による適用市場拡大
(将来の水素社会・脱炭素化に向けて)

取り組むべき課題3. 新たな顧客価値創造に向けて(電源価値)

- * 電気代+ガス代による顧客メリット・投資回収(単一ビジネスモデル)からの脱却
- * ハウスメーカーへの訴求ポイント(防災、安全安心)、業務産業用はBCP対応
- * 新たな電力ビジネスモデルへの対応(高効率分散型電源としての価値)
- * 民生/業務、電気/熱/運輸のセクターカップリング

SOFCとしてどのようなスペックが必要か/基盤技術課題は何か

- ・ 蓄電池とのハイブリッドが増える(Panasonic新型EF、Bloom Energyの事例)
- ・ トrendはベースロード電源から調整電源へ(VPP実証)
- ・ 起動停止耐性、負荷変動対応性(強靱化)、部分負荷でも高効率など

高効率分散電源

Bloom Energy先進アプリケーションの例

- ① 統合エネルギー貯蔵
- ② BCP電源
- ③ マイクログリッド

金属支持セルにより広がる 市場セグメント

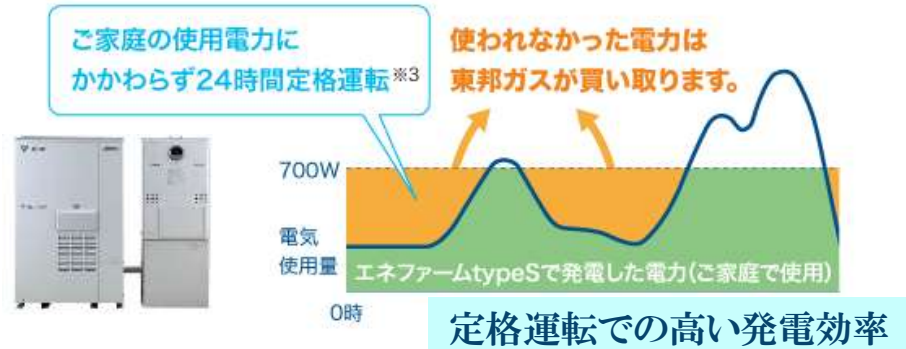
(Ceres Power社の事例)

東邦ガスにおけるSOFC導入事例とビジネスモデル展開

2017年 エネファーム余剰電力買取



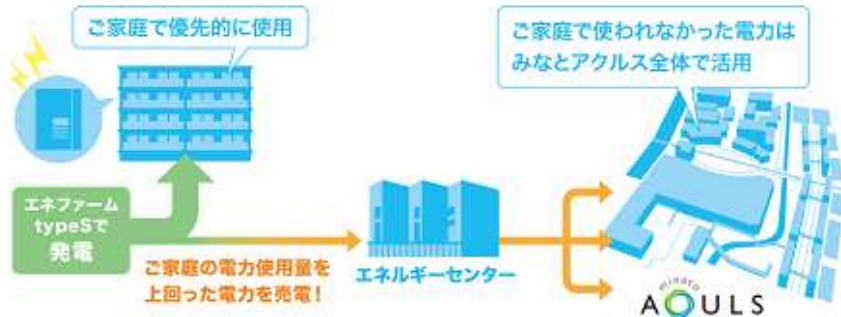
○イメージ図であり、実際の電気の流れとは異なります。



2018年 みなとアクルス(スマートタウン) 集合住宅全戸にSOFCを導入



$0.7\text{kW} \times 265\text{戸} = 185.5\text{kW}$
(地域電源の5%)



スマートハウス、スマート集合住宅からスマートタウンへ市場拡大

2019年 豊田市VPP実証

今後期待される新たな市場



変動運転における耐久性

強靱性SOFC開発に向けて

固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発/耐久性迅速評価方法に関する基礎研究
高効率・強靱化セルスタックのための課題抽出・設計指針の提示

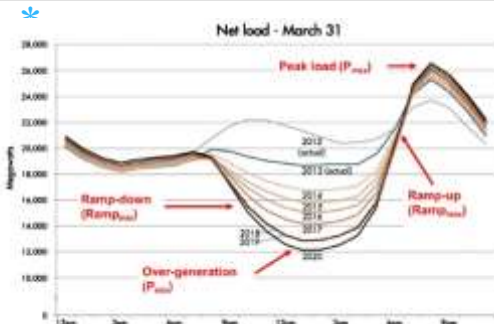
○ 現行プロジェクトにおける取り組みと成果 (2018~2019先導研究)

- * 海外のMSC(金属支持セル)の技術調査とベンチマーク
- * 様々な材料、コンセプトのMSCを試作評価して可能性を検証
- * 物理プロセスと化学プロセスの組合せで作製(産総研) →
- * 負荷変動、急速起動停止における課題抽出

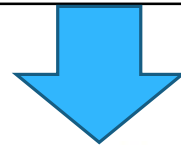


● 今後の取り組み課題とアプローチ (2020~)

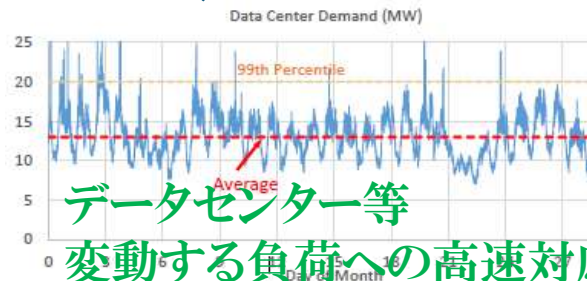
- * 小型セルから大型セルへ
- * 新規電極開発、製造プロセス開発



再生可能エネルギーを
補完する調整電源



アウトカム
広がる市場



モバイル用途を含む
様々なアプリケーション

SOFCにおいて今後取り組むべき課題とアプローチ

- * 課題1 低コスト・長寿命化(SOFCの本格普及に向けて)
- * 課題2 高効率化(発電効率向上)
- * 課題3 新たな顧客価値創造(電源価値向上)
- * 課題4 多燃料対応による適用市場拡大
(将来の水素社会・脱炭素化に向けて)

取り組むべき課題4：多燃料対応による適用市場拡大 ～水素社会・脱炭素化に向けて～

	2020年	2025年	2030年	2040年
都市ガス(LNG)	国産天然ガス 海外天然ガス 沿岸地	バンド熱調 (熱量変動)	水素混合／切替 Dual-fuel Bi-fuel	CO ₂ フリーメタン
多燃料	LPG対応	バイオガス LPG Bi-fuel	純水素 Multi-fuel	低炭素燃料製造
脱炭素化		石炭ガス化CCS	水素エネキャリア	SOEC リバーシブル

現状～早期実証

将来に向けて今後取り組むべき

- SOFCは元来、多燃料への対応性が高いが、現状では限定された都市ガスと一部LPGのみ。
- 適用燃料拡大により市場が大きく拡大。(都市ガス+LPGで家庭用は2倍の市場)
- バイオガスへの関心が高まるなど、今後、燃料の低炭素化が進む
- 欧州ではSOFC→SOEC→蓄エネに向けた研究開発(水素／カーボンニュートラルメタンシステムへ)

海外における取り組み事例(様々な実証が進行中)
⇒国内でも早期に実証に取り組むべきではないか

同じスタックで発電と電解を実現

FCH-JU
“DEMO-SOFC”
バイオガスSOFC実証

REFLEXプロジェクト
SMARTHYES

Sunfire
リバーシブルSOFC実証
メタネーション実証

SOFC/SOEC (rSOC)への期待

○背景

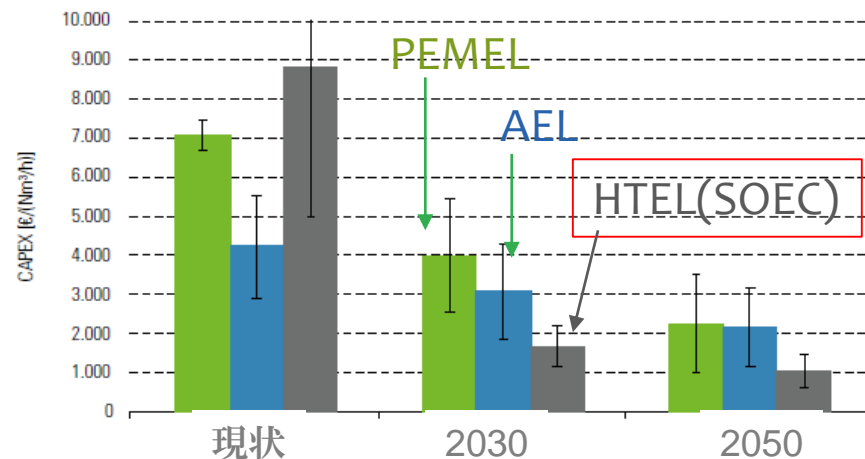
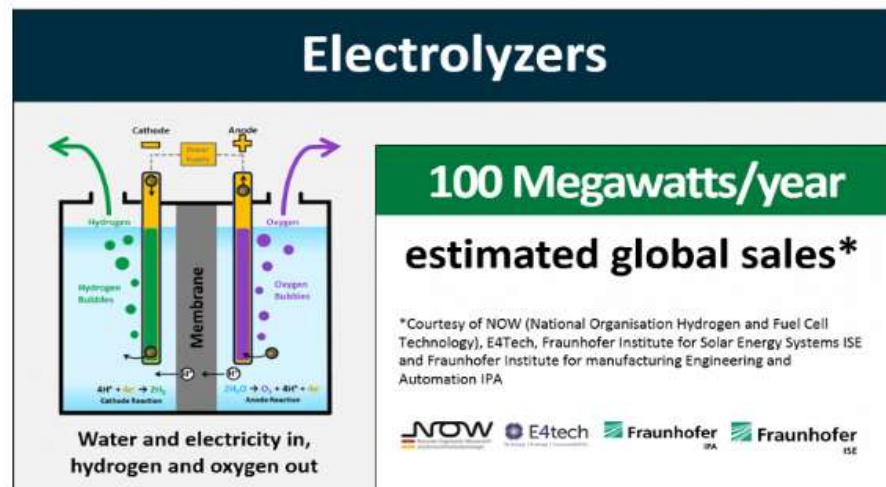
- * Power to Gasの進展により電解装置は既に100MW/年の市場規模
- * **国産SOFCスタックの適用市場拡大により量産効果(低コスト化)が期待できる**
- * 低コスト水素製造(原理的に高効率)
- * 同じスタックで発電と電解が可能

○取り組みの現状(国内)

- * スタック試験、>10kWラボ試験にて4kWh/Nm³H₂の見通し(高効率)
- * 耐久性に課題

●今後の取り組み課題とアプローチ

- * 耐久性迅速評価技術の活用(長寿命化)
- * システムレベルでの課題抽出・高効率実証



各種電解装置のCAPEX(将来コスト)見通し

Ref. https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie_v04.1.pdf

これまでの取り組みと今後取り組むべき研究開発(まとめ)

研究開発項目	これまでの取り組みと成果	今後取り組むべき研究開発
①低コスト・長寿命化	9万時間10年耐久 100万円/kWレベル 寿命劣化評価手法確立	13万時間15年耐久 40万円/kWレベル に向けた高出力密度化、長寿命化
②高効率化	発電効率 50~55%	発電効率60%-65%の実証 発電効率70%に向けた要素技術開発(PCFC等)
③新たな顧客価値創造 (電源価値)	コージェネとしての導入 定格連続運転	分散電源としての導入 調整力向上、ロバストセルスタック 開発(MSC等)
④多燃料対応による適 用市場拡大(水素社 会・脱炭素化)	都市ガス燃料	バイオガス実証 水素社会に向けた SOFC/SOEC、リバーシブル実証

引き続きこの後のプレゼン ①産総研、②デンソー、③東京大学でもご説明

おわりに

○ SOFCはエンジンやPEFCでは実現できない特長

- ①高効率、②低炭素を含む多燃料対応、③リバーシブル(エネルギー貯蔵)

○現状を踏まえて今後取り組むべき方向性

- ①低コスト・高耐久、②高効率化実現、③顧客価値創造による適用市場拡大、④燃料対応等、低炭素・脱炭素への適応性向上

○基盤研究において今後取り組むべき課題を整理した

- ・低コスト(高出力密度)と高耐久の両立→産官学連携評価解析プラットフォーム
- ・高効率システム実証、超高効率に向けた要素技術開発
- ・新たな電力システム、電力ビジネスに対応した調整力向上(ロバストセル)
- ・用途拡大のための燃料多様化技術
- ・脱炭素に向けたSOFC/SOEC、リバーシブルへの展開

産官学連携研究開発の一層の推進を期待