

令和元年11月1日

—真のエネルギー地産地消による地域経済活性化—

電力系統安定化システムと低炭素エネルギー技術を活用した共進化プロジェクト

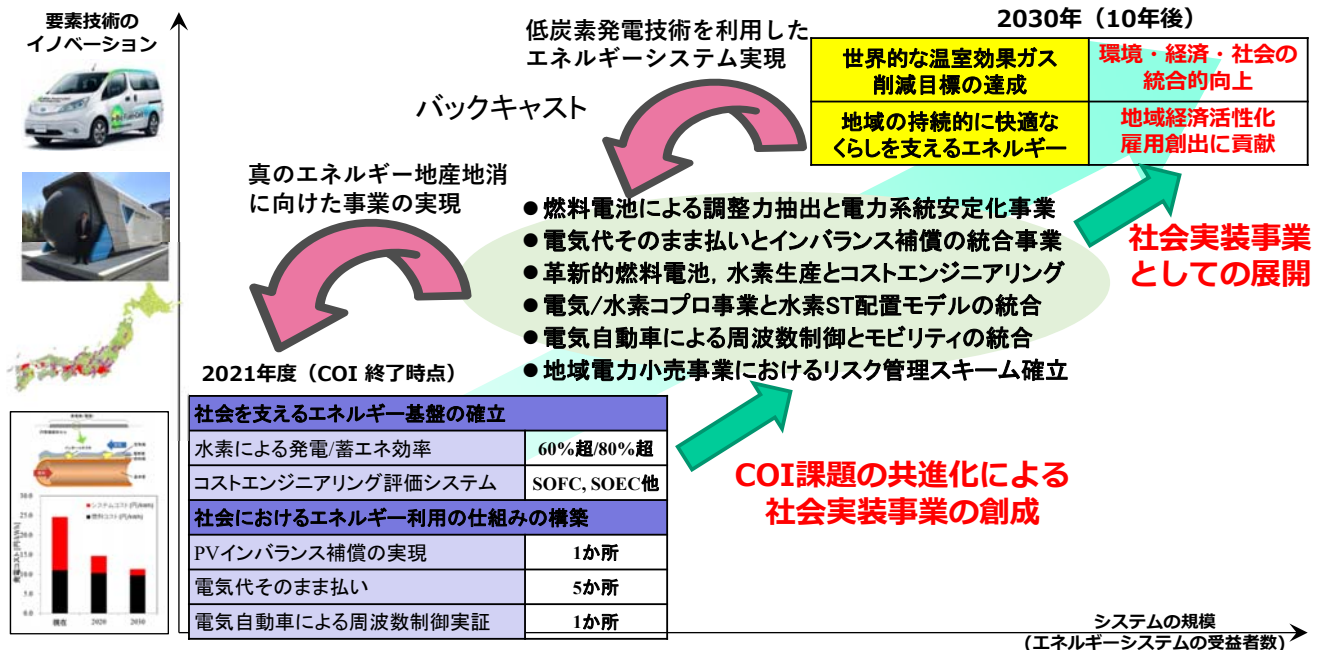
東京大学大学院新領域創成科学研究科
大友 順一郎

東京大学大学院工学系研究科
松橋 隆司

1

理想のエネルギーシステム実現に向けた我々の取り組み

-再生可能電源の大量導入に伴う系統安定性の問題の解決と地域の活性化-



2

2030年（10年後）

世界的な温室効果ガス削減目標の達成	環境・経済・社会の統合的向上
地域の持続的に快適な暮らしを支えるエネルギー	地域経済活性化 雇用創出に貢献

地域・コミュニティへの実装

- ・地域電力小売事業リスク管理・・・④
- ・地域電力小売事業のインバランス補償
(真の地産地消)・・・⑥

電力系統安定化システム開発

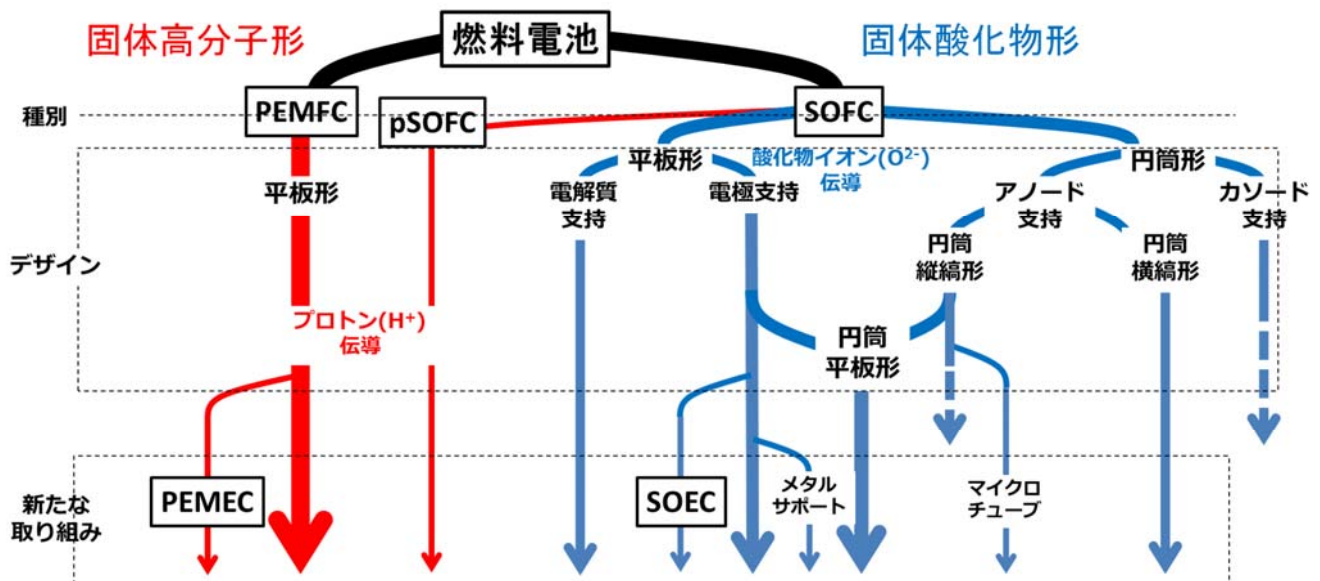
- ・電気/水素統合生産と水素ST配置・・・②
- ・EVIによる電力システム周波数制御・・・③
- ・地域電力小売事業のインバランス補償
(真の地産地消)・・・⑥

高度エネルギー技術開発

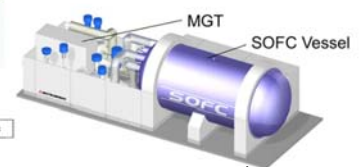
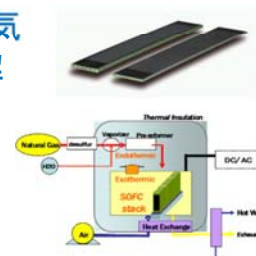
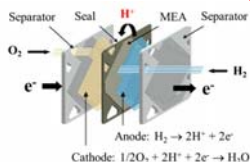
- ・燃料電池とコストエンジニアリング・・・①
- ・SOFCの調整力利用とセル影響評価・・・⑤

3

①燃料電池とコストエンジニアリング：様々なタイプの燃料電池のコスト評価



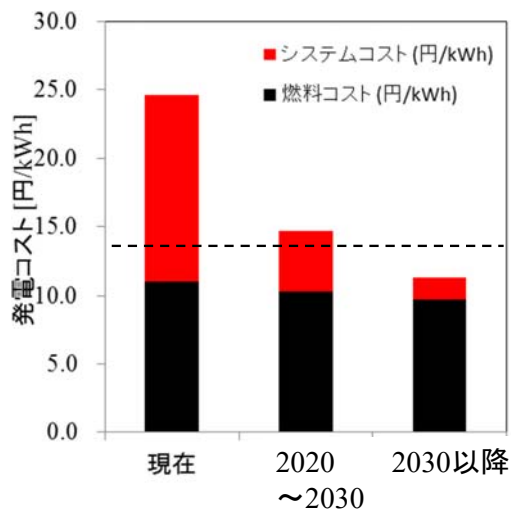
水電解 定置型 新型高効率FC 水蒸気
車載用 電解



4

中・大型 250 kw-SOFCコンバインドシステム

(都市ガス燃料コスト: 80円/Nm³)



	現在	2020~2030	2030以降
生産スケール (W/年)	< 2.5M	25M	250M
発電効率 (%)	55	58	60
寿命 (年)	<10	15	20
出力(W/cell-stack)	80	100	120
モジュールコスト (円/W)*	598	198	56
ガスタービン (円/W)**	200	150	100
BOS コスト (円/W)	87	59	48
システムコスト (円/W)	637	251	110

*SOFCモジュール: 220 kW

**ガスタービン: 30kW

(総合効率:75%, 熱利用を含んだ発電コスト)

発電コストの低減:

25円/kWh → 11円/kWh

27円/kWh → 14円/kWh

(都市ガス燃料コスト: 80円/Nm³) (都市ガス燃料コスト: 100円/Nm³)

業務用電力: 14円/kWh

5

J. Otomo et al., Int. J. Hydrogen Energy, 42(30) (2017) 19190.

Hydrogen production cost with solid oxide electrolyzer (1.5MW-SOEC)

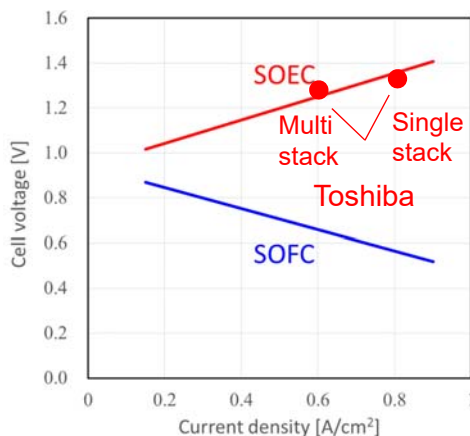


Fig. A. IV curves of SOFC and SOEC at 1023 K

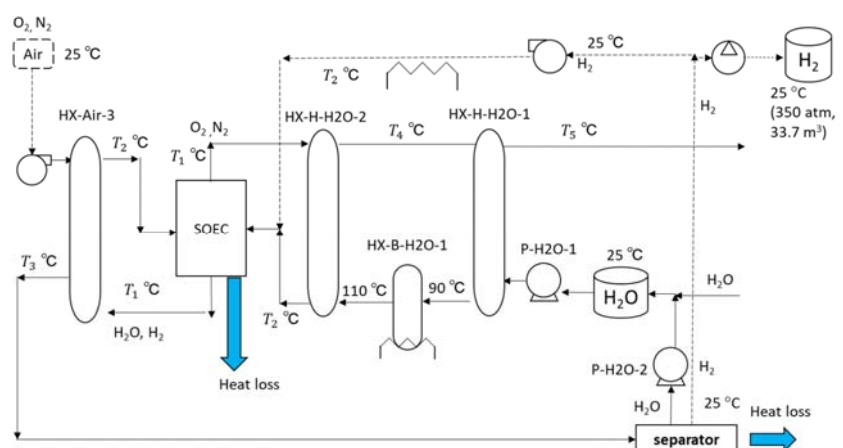


Fig. B. SOEC system including heat exchanger, compressor, and high pressure tank.

東芝 平板形SOEC:

表A. SOEC水素製造原単位 (750℃作動)

0.6~0.8A/cm² (@1.3 V, 750)

電流密度 (A/cm²) セル電圧 (V)

0.8; 1.35

(水蒸気電解時*)

水素圧縮電力原単位: 40MPa (kWh/Nm³-H₂)

0.32

水素製造原単位:

3.2

SOECモジュール (kWh/Nm³-H₂)

水素製造原単位: システム (kWh/Nm³-H₂)

4.1 (4.4)

電解効率 (括弧内は水素圧縮過程を含む) (%) (LHV))

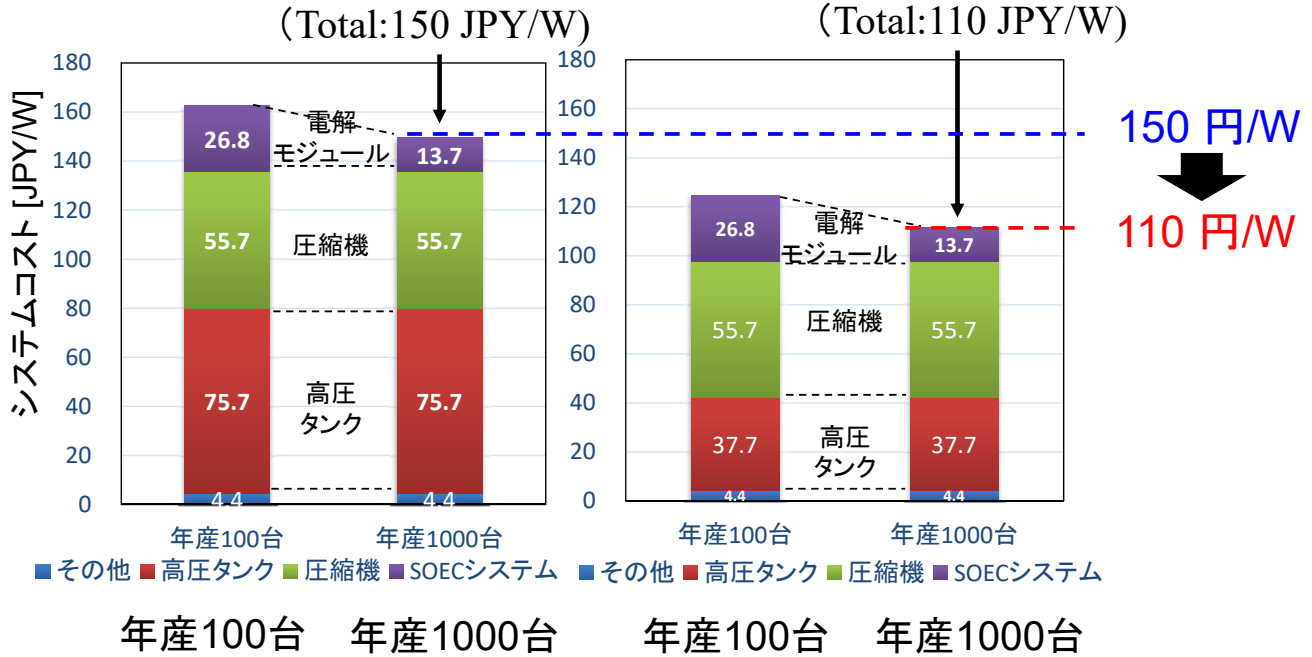
75 (69)

6

1.5 MW SOEC system cost structure *

(平板形SOEC)

高圧タンクコスト:半減の場合

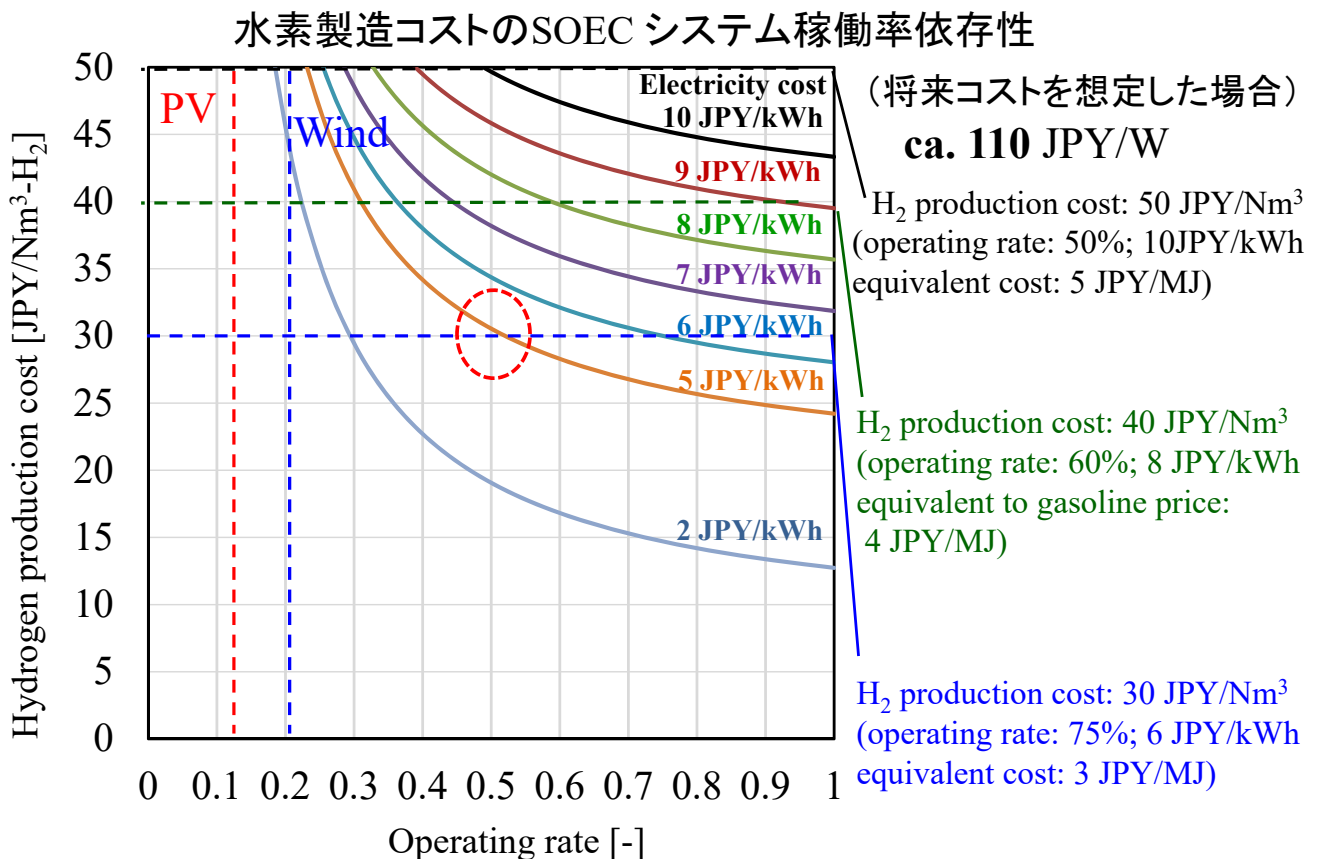


注:単位のWは
入力電力でわり算

(稼働率100%における
システムコスト)

PEMECのシステムコストも
同様のレベルになる

7



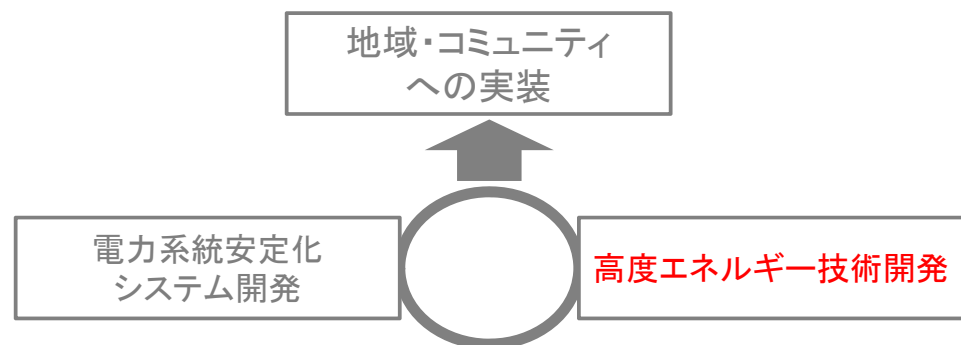
電力コスト5 JPY/kWh、稼働率50%以上の条件で、水素製造コスト30 JPY/Nm³が達成できる。

(system lifetime: 15 years; system cost: 111 JPY/W)

8

SOFCの電力システム調整力としての 利用可能性分析

九大・佐々木研究室 × 東大・松橋研究室



9

確率的起動停止計画 (Stochastic UC)

- 前日に、翌日の発電設備の起動停止スケジュールを決める。
- 需要や再エネ電源出力の予測に基づいて、運用コストを最小化する最適化問題を解く。



目的関数

$$\min_{u \in U} [c^T u + \sum_{\xi} \{Prob_{\xi} \cdot F(u, \xi)\}]$$

- u : 起動停止ベクトル (バイナリ変数)
- U : 起動停止の可能領域
- c : 起動コスト
- ξ : 想定シナリオ (→本研究においてはPVの出力変化シナリオ)
- $Prob_{\xi}$: シナリオ ξ の生起確率
- F : 燃料費関数

変数

- 起動停止スケジュール
- 発電機出力
- 再エネ出力抑制量

制約条件

- 需給バランス制約
- 各発電設備に関する仕様の制約
出力上下限, 時間あたりの負荷変動率上下限

10

結果1:調整力有(10円／(Δ kW・h))

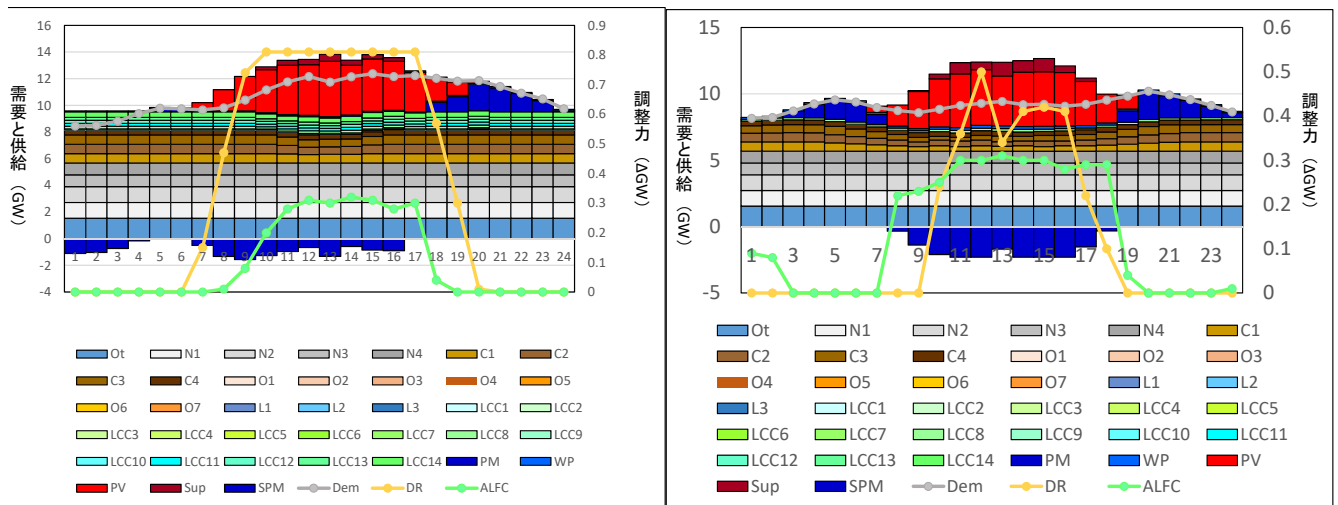
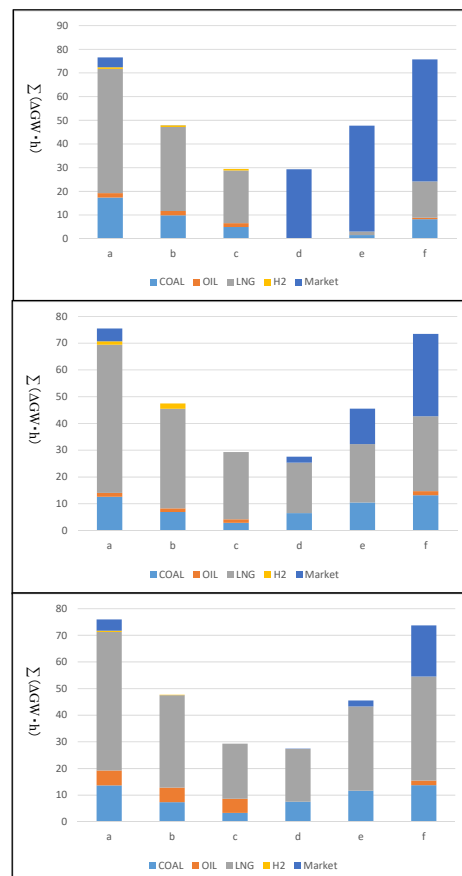


図2-2(a): 中間期平日

図2-2(b): 中間期休日

11

結果1:調整力コストと利用量の関係



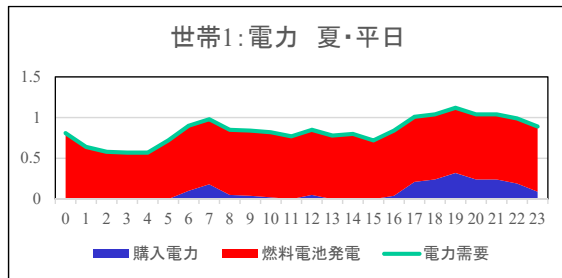
結果1-1:5円／(Δ kW・h)

結果1-2:10円／(Δ kW・h)

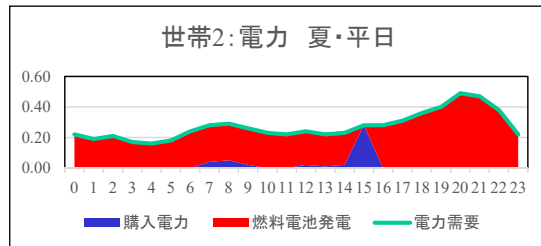
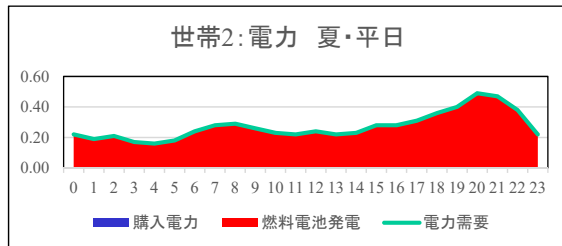
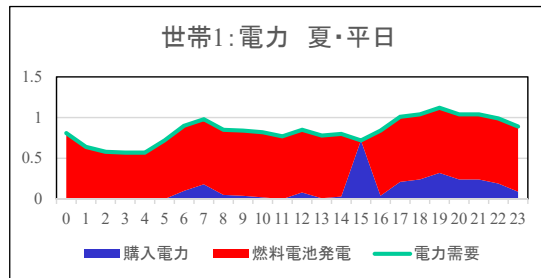
結果1-3:15円／(Δ kW・h)

12

調整力市場なし



調整力市場あり

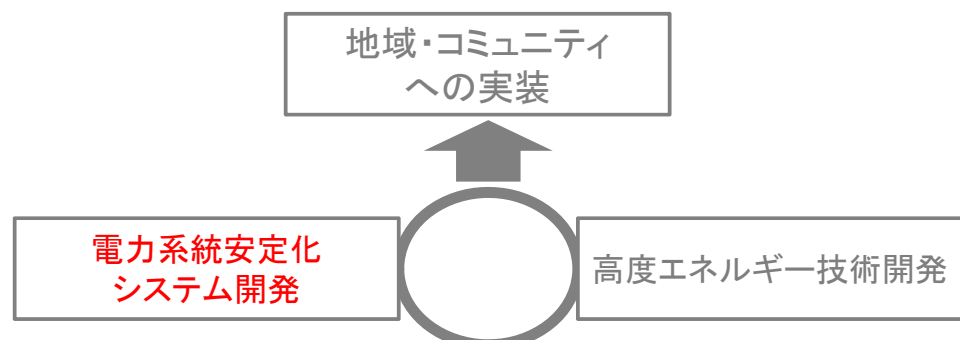


調整力報酬の有無により、運転パターンに変化が出ている。

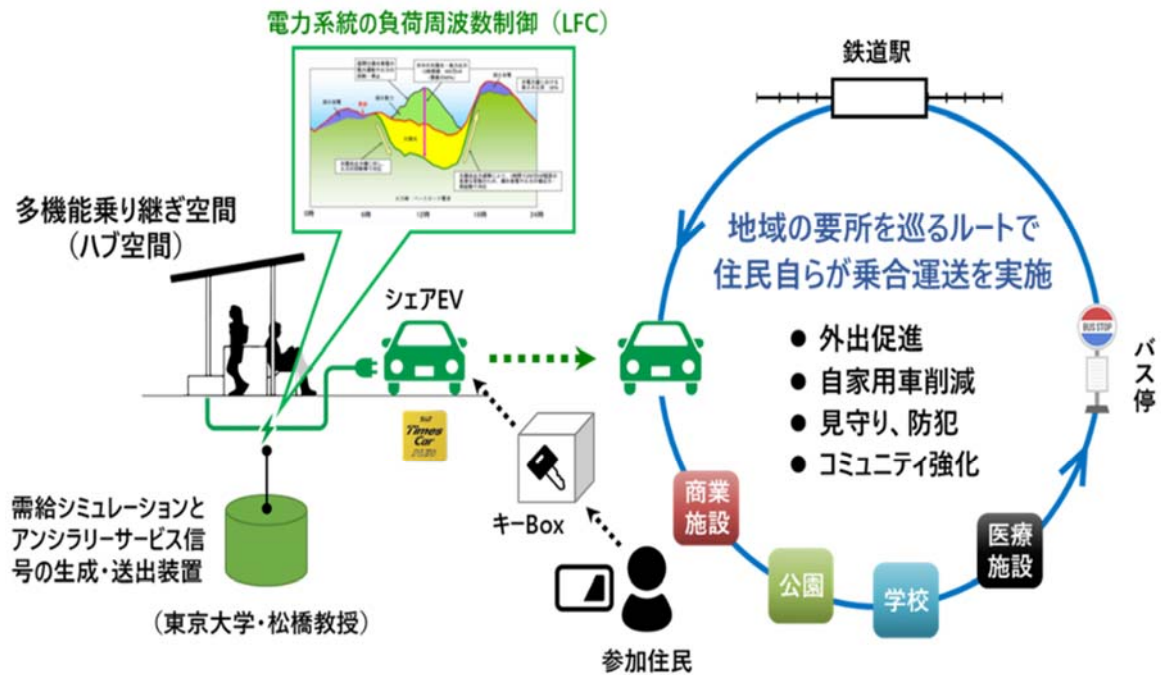
13

横浜でのモビリティ実証実験とV2Gによる 周波数制御の組み合わせ

中村・有吉研究室 × 松橋研究室



14



15

電気自動車による周波数調整システムの確立

目標: 再エネ大量普及と系統の周波数調整に必要な電力システム技術の明確化

□ EVの普及目標

- ✓ 次世代自動車戦略2010(経済産業省)
 - ・ 販売: 15~20%(2020年)
 - 20~30%(2030年)
- ✓ 次世代自動車振興センター
 - ・ 保有: 3%(2020年), 9%(2030年)

✓ 現状

- ・ 販売: 0.19%(2013年時)
- ・ 保有: 0.19%(2014年時)

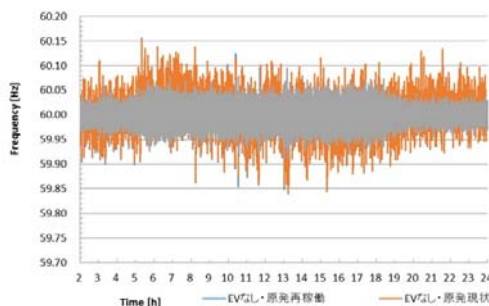
□ 需要家側資源としてのEV

Vehicle to Grid (V2G)

- 制御指令に対する応答が速い
- 一方向制御はSOCに影響大で不向き



EV所有により市場から報酬獲得 → EV普及のインセンティブとなる可能性



電気自動車(EV)を用いた周波数調整市場への
参入及びその実証実験(松橋, 中村, 有吉)

【脱炭素と系統安定化】

- 電力系統安定化のための周波数制御実験の開始

【今後の課題】

- 周波数調整事業の入札制度の設計
- EVによる周波数調整とモビリティとの共進化により事業スキームを確立し、社会実装へと展開する

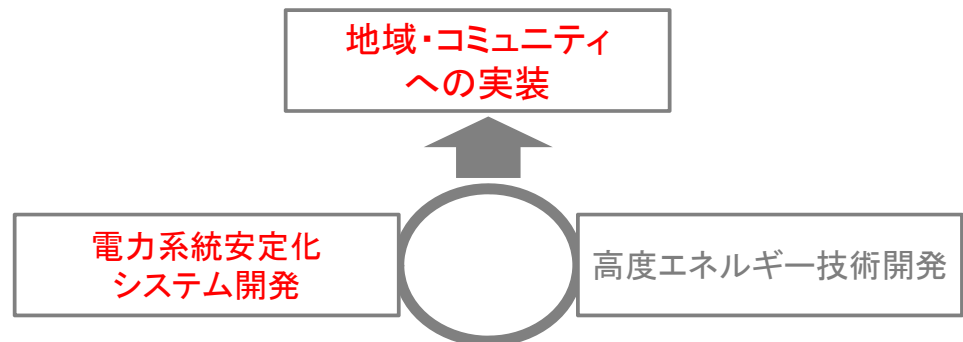
【新たに創出される価値】

- 周波数制御やインバランス補償に電気自動車が参画することによる新たな自動車の価値の創出

16

電気代そのまま払いとエコキュートによる インバランス補償の組み合わせ

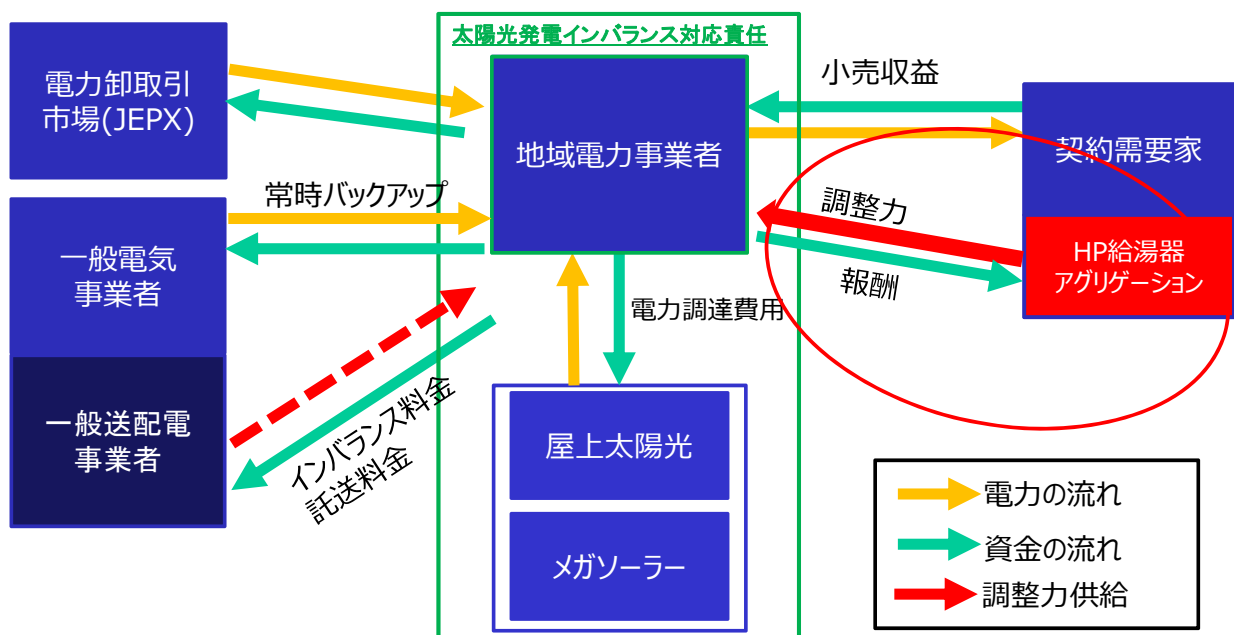
みやま×パナソニック×松橋研究室



17

HP給湯器導入モデルの概観

地域電力事業者の年間売上総利益 =
小売収益 - 電力調達費用 - 託送料金 - 需給インバランス料金 - DR報酬



18



<https://enesys.t.u-tokyo.ac.jp/coi/project/commercialization/> 2019.4.1引用

19

まとめ

- (1) 持続的共進化地域創成拠点では、九州大学・横浜国立大学・東京大学の連携の下、エネルギー・モビリティ及び情報・数学の各分野の共進化によりイノベーションを推進している。エネルギー部会では、将来の脱炭素社会からのバックキャストに基づき、**再生可能電源の大量導入に伴う系統安定性の問題の解決と地域の活性化(真の地産地消)**を挙げており、部会内、あるいは他部会との共進化によって問題解決を目指している。
- (2) エネルギー分野の課題解決には、エネルギー関連技術に加え、自動車技術、情報通信技術の活用が有望である。換言すると、**エネルギー技術、自動車技術、情報通信技術の共進化**により、エネルギー分野の課題解決が促進される。需要側技術を用いたインバランス補償や、電気自動車を用いた周波数制御の実証実験はその好例であり、今後の社会実装が大いに期待される。
- (3) この**共進化の実現には、技術革新と制度革新の双方が必要**である。具体的には、電力系統工学、エネルギー工学上の技術革新とアンシラリーサービス(需給バランスの監視や電圧・周波数の調整)の取引制度の設計などの制度革新である。