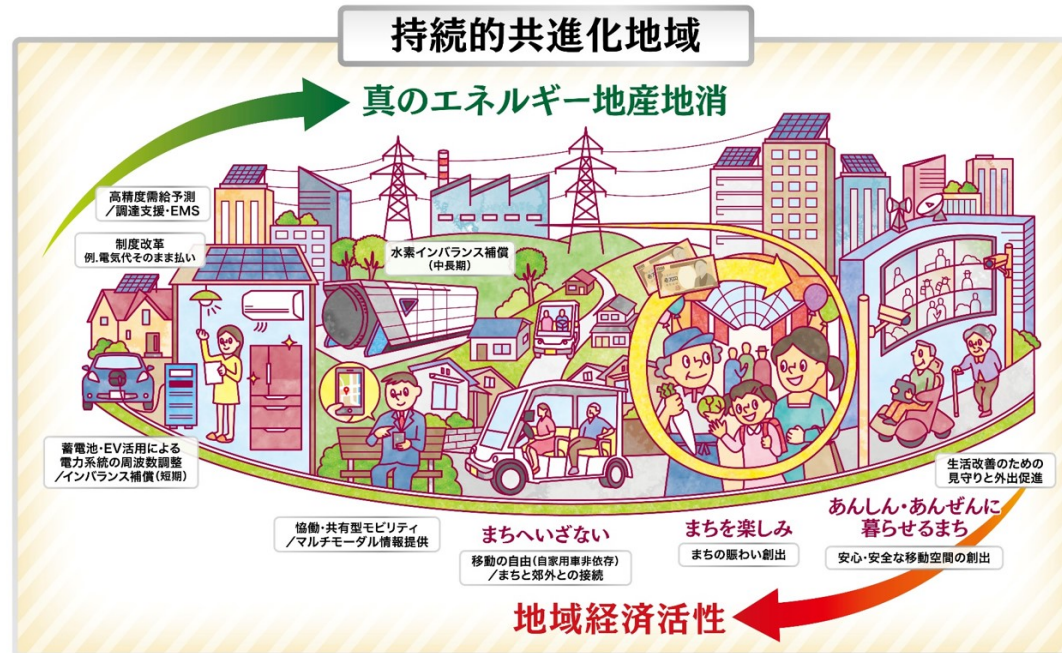


エネルギーシステムにおけるイノベーション —世界的な潮流である脱炭素化への展望—



令和元年12月3日

東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授
松橋 隆治

- 気候変動への対応策

エネルギー脱炭素化は、欧州諸国のみならず、中東の産油国やアフリカ諸国に至るまで世界的な潮流となっている。ただ、講演内容を詳細にみると、各国や各事業者とも自らの便益を確保しつつ、脱炭素化に貢献するのが基本姿勢である。

- エネルギーの供給安定性

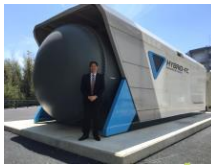
Energy transitionの成功とは、移行のプロセスを通じて、エネルギー供給安定性、公平性、環境の持続可能性を向上させることである。世界的には脱石炭の方向性であるが、日本では供給安定性から重要なエネルギーと位置付けられている。今後とも世界の動向を念頭に置き、国内の安定確保策を検討する必要がある。

- エネルギー技術の展開

再生可能電源の大量導入と脱炭素化の潮流の中で、水素エネルギーが必要との認識がある。また、エネルギーシステムのソフト面では、ブロックチェーン等のデジタル化が注目を集めている。

理想のエネルギーシステム実現のための バックキャスト

要素技術の
イノベーション



真のエネルギー地産地消
に向けた事業の実現

2021年度（COI 終了時点）

社会を支えるエネルギー基盤の確立	
水素による発電/蓄エネ効率	60%超/80%超
コストエンジニアリング評価システム	SOFC, SOEC他
社会におけるエネルギー利用の仕組みの構築	
PVインバランス補償の実現	1か所
電気代そのまま払い	5か所
電気自動車による周波数制御実証	1か所

低炭素発電技術を利用した
エネルギーシステム実現

- 燃料電池による調整力抽出と電力系統安定化事業
- 電気代そのまま払いとインバランス補償の統合事業
- 革新的燃料電池, 水素生産とコストエンジニアリング
- 電気/水素コプロ事業と水素ST配置モデルの統合
- 電気自動車による周波数制御とモビリティの統合
- 地域電力小売事業におけるリスク管理スキーム確立

2030年（10年後）

世界的な温室効果ガス
削減目標の達成

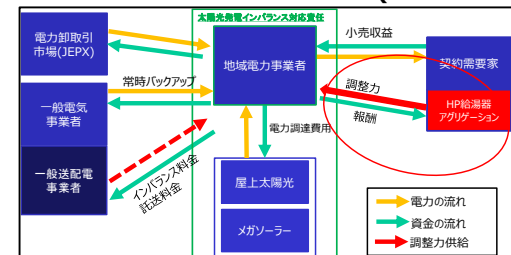
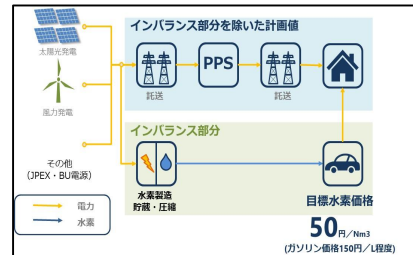
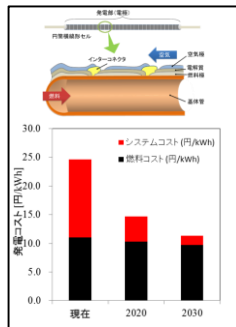
環境・経済・社会の
統合的向上

地域の持続的に快適な
く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

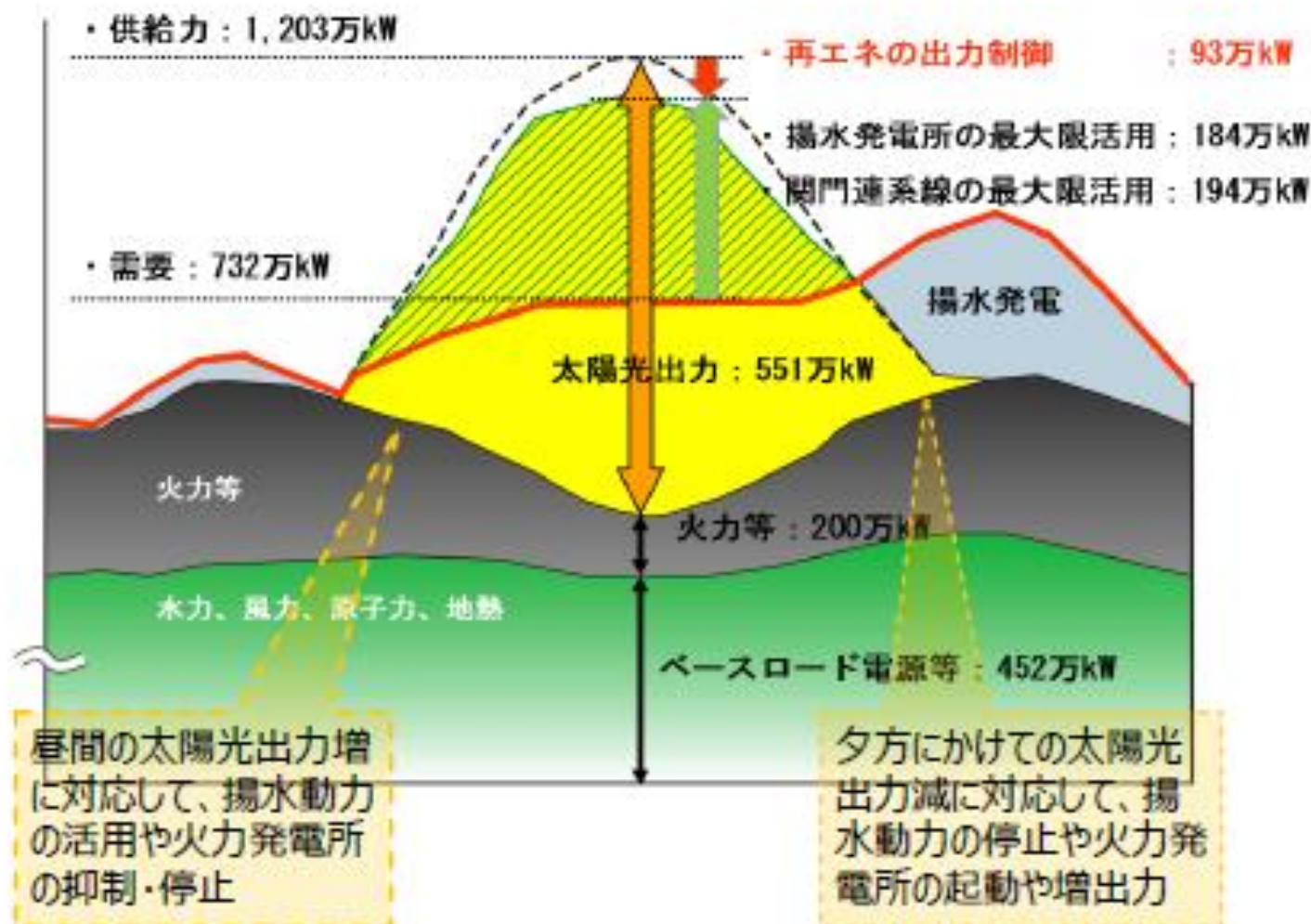
社会実装事業
としての展開

COI課題の共進化による
社会実装事業の創成

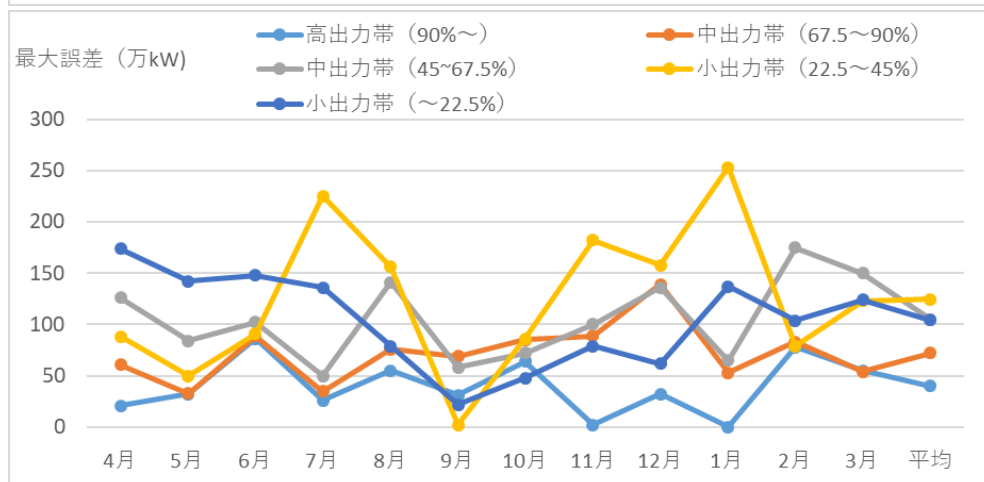
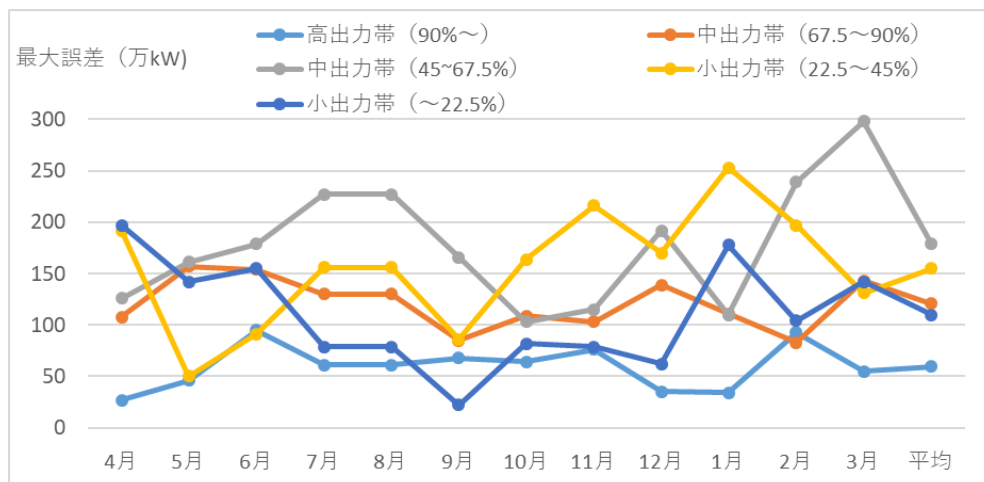


システムの規模
(エネルギーシステムの受益者数)

<九州の電力需給イメージ（2018年10月21日の例）>



予測誤差の現状(九州電力)

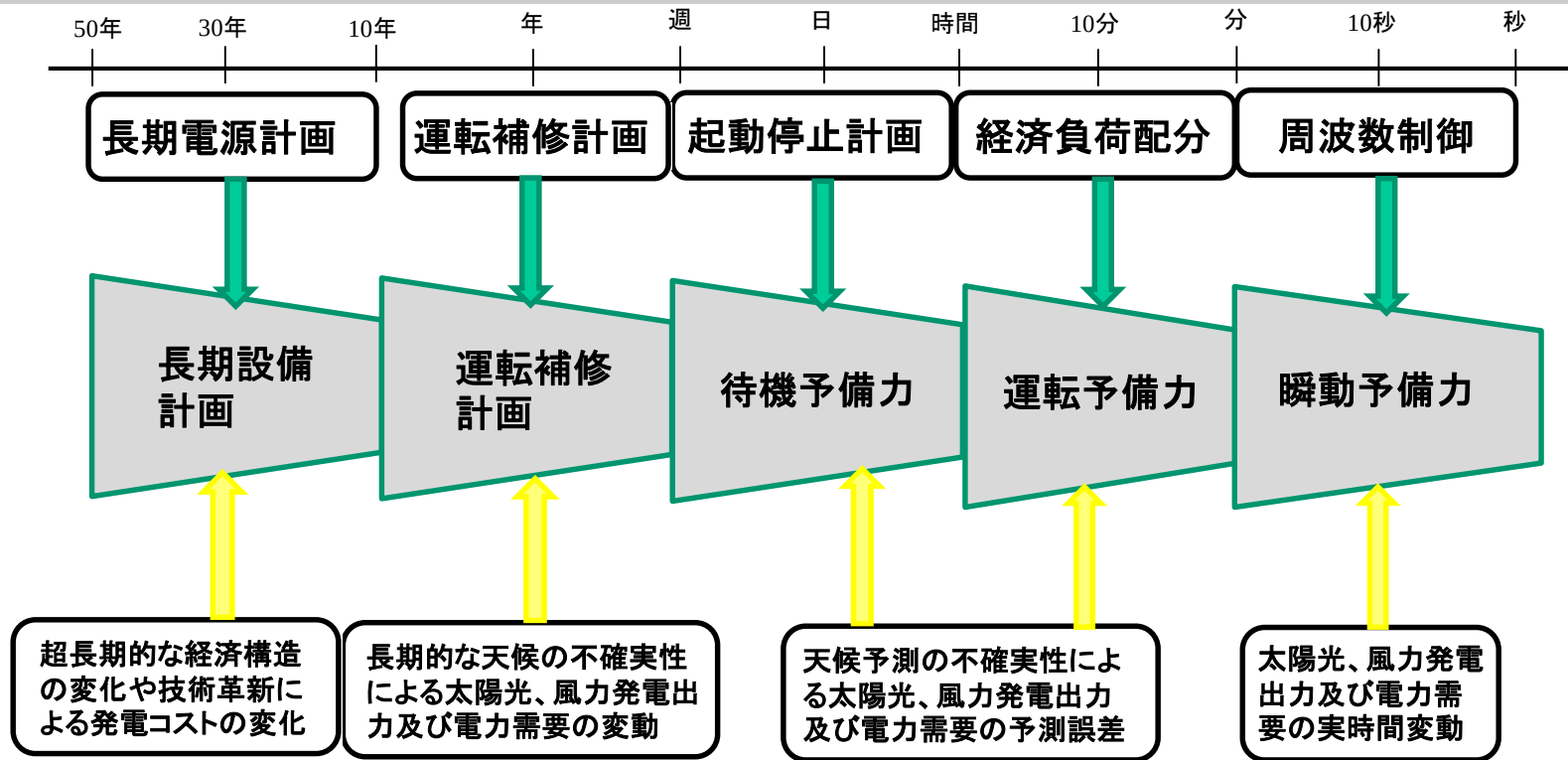


季節毎の変動誤差、中出力帯の誤差の大きさ等の要因分析、予測モデルへの反映が必要

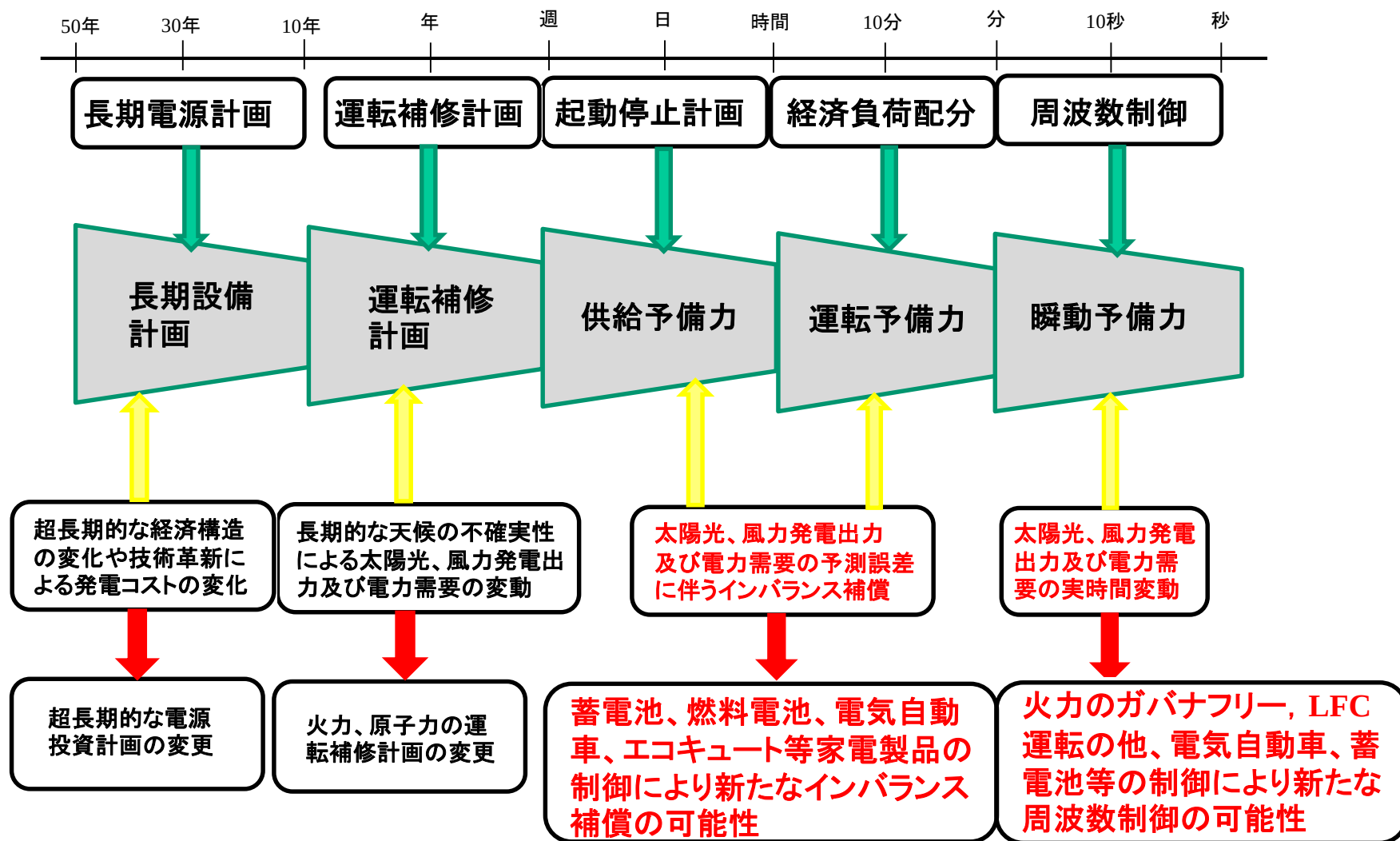
図 再エネ出力予測地と実績の誤差(上段: 前日12時想定、下段: 実需給2時間前)

電力系統計画・運用における需給調整

過去の電力系統の運用では、各時間帯での電力需要の不確実性に対応した需給調整を行ってきたが、再生可能電源大量導入と電力システム改革に伴い、従来とは異なる需給調整の技術・制度が必要となる。



新たな需給調整の技術・制度は、特に周波数制御、経済負荷配分、起動停止計画において必要である。ここでは、電気自動車等の需要側の機器を系統運用につなげる技術と制度の革新が求められている。



- 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き、運用コストを最小化する問題を解く。



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

起動停止モデルの計算結果例

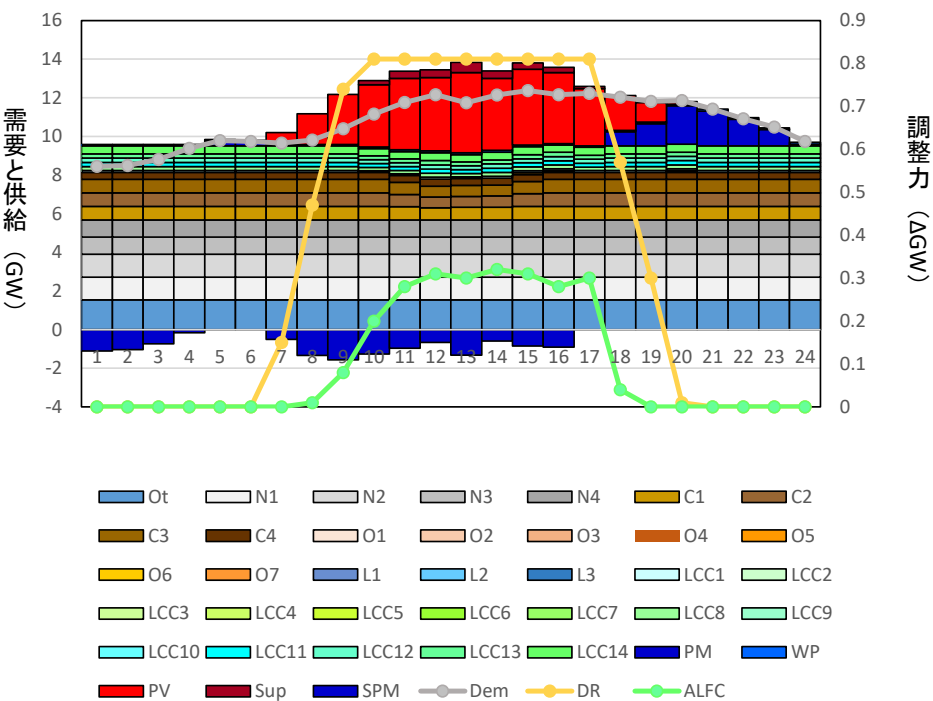


図2-2(a): 中間期平日

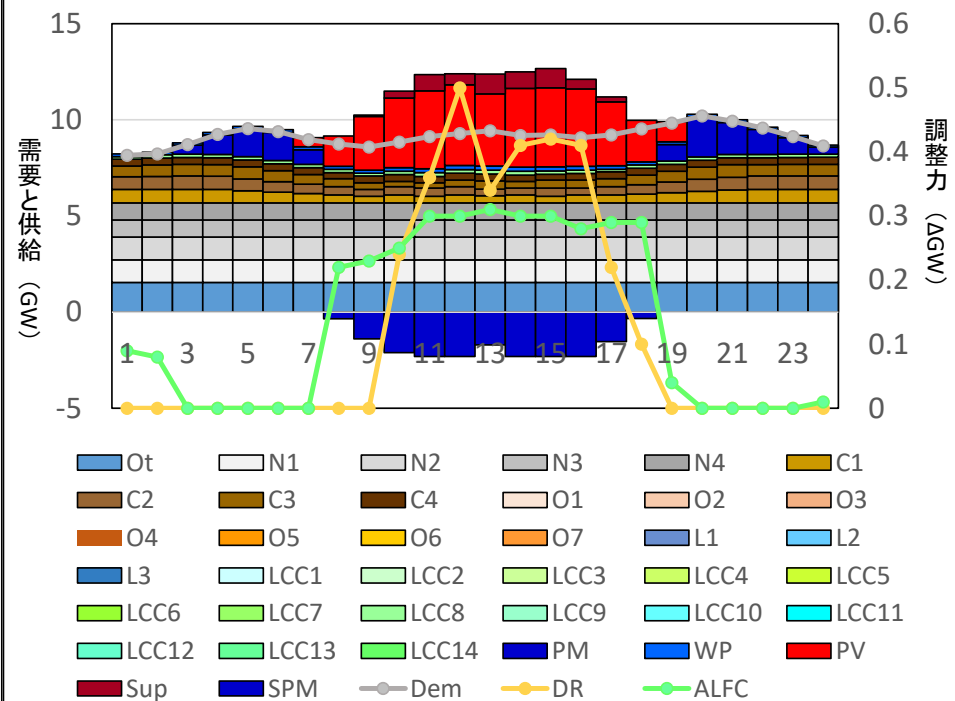
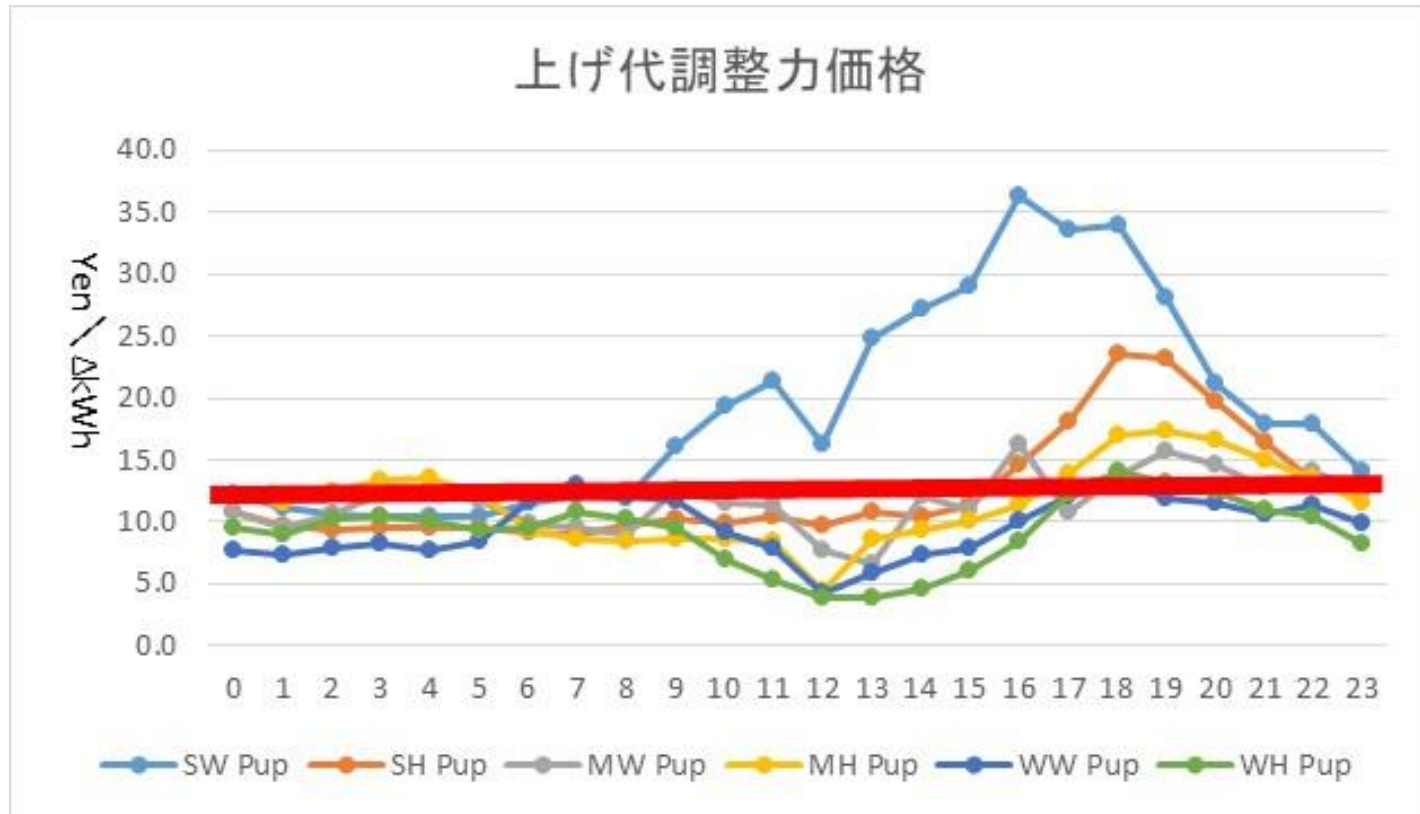


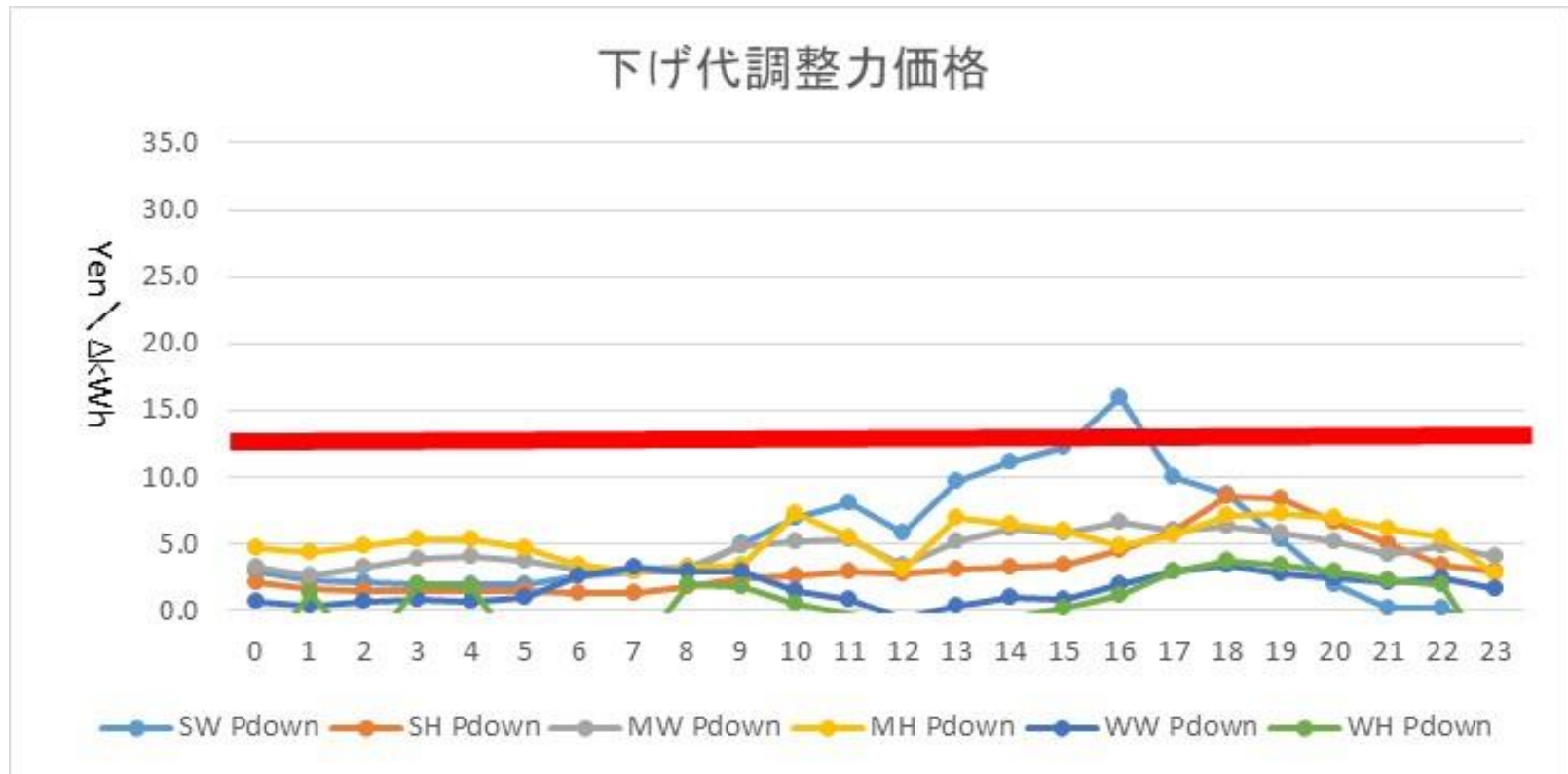
図2-2(b): 中間期休日

確率的起動停止計画モデルの シャドウプライスを用いた上げ代調整力価格の推定



- 上げ代調整力価格は、主として機会収益の損失時間が長いために、次頁の下げ代と比較して、調整力価格が高くなる。このことを燃料電池を用いた調整力提供の可能性と合わせて考えると興味深い。すなわち、特に家庭用の燃料電池では、昼間に部分負荷になる可能性が高いため、機会収益の損失なく、調整力提供ができるはずである。すなわち、家庭用燃料電池の集合運用による上げ代調整力提供は、この点からは有望と考えられる。

確率的起動停止計画モデルの シャドウプライスを用いた下げ代調整力価格の推定



- 下げ代調整力価格は、前頁の上げ代と比較して、機会収益の損失時間が短いため、調整力価格が低くなる。また、現在のOCCTOにおける審議内容から、下げ代調整力が、市場としてオープンになるか否かも微妙な状況となっている。このことから、燃料電池による調整力提供に関しては、当面の間、上げ代調整力の方を主として考えてはどうかと考えている。ただし、市町村レベルのモデルにおいては、余剰と不足の両方のインバランスを考慮する必要から、当面両方を考慮することで良いと思われる。

1. 火力発電等による調整力(現在の電力システム)

- 火力発電機等出力の上げ代・下げ代
- 多数台の部分負荷運転

2. 本ワークショップにて紹介する調整力の候補例 (現在、開発中もしくは社会実装の準備中)

- 電気自動車を用いた調整力の提供とモビリティ ①
- 家電製品(エコキュート)を用いた調整力の供給 ②
- 電気と水素のコプロダクションによる調整力の供給 ③
- 燃料電池(SOFC)を用いた調整力の供給 ④

①電気自動車(EV)による調整力の供給 周波数調整やインバランス補償への応用

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)

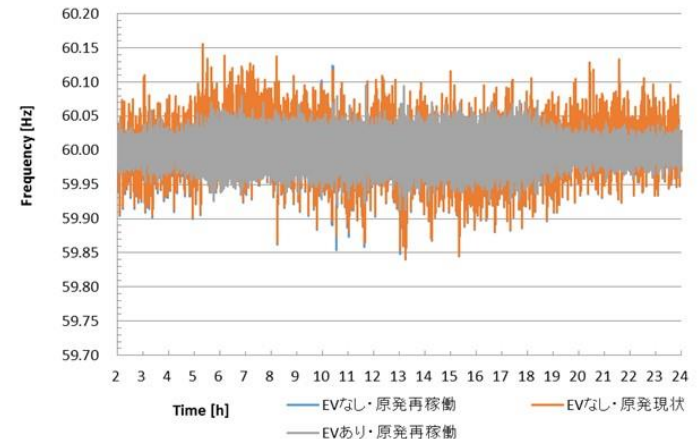
□ 需要家側資源としてのEV

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)

□ 実験場所

EVおよびLFCの実験場所:
横浜国大敷地内の建物及び駐車スペース
シミュレータ設置箇所: 東京大学



□ 実験装置

- 電気自動車
- リアルタイムシミュレータ Opal-RT
- パワーアンプ
- EV用リアルタイムコントローラ
- EV用パワーコンディショナ



【脱炭素と系統安定化・H30 年度進捗】

- 電力系統安定化の為の周波数制御実験の開始

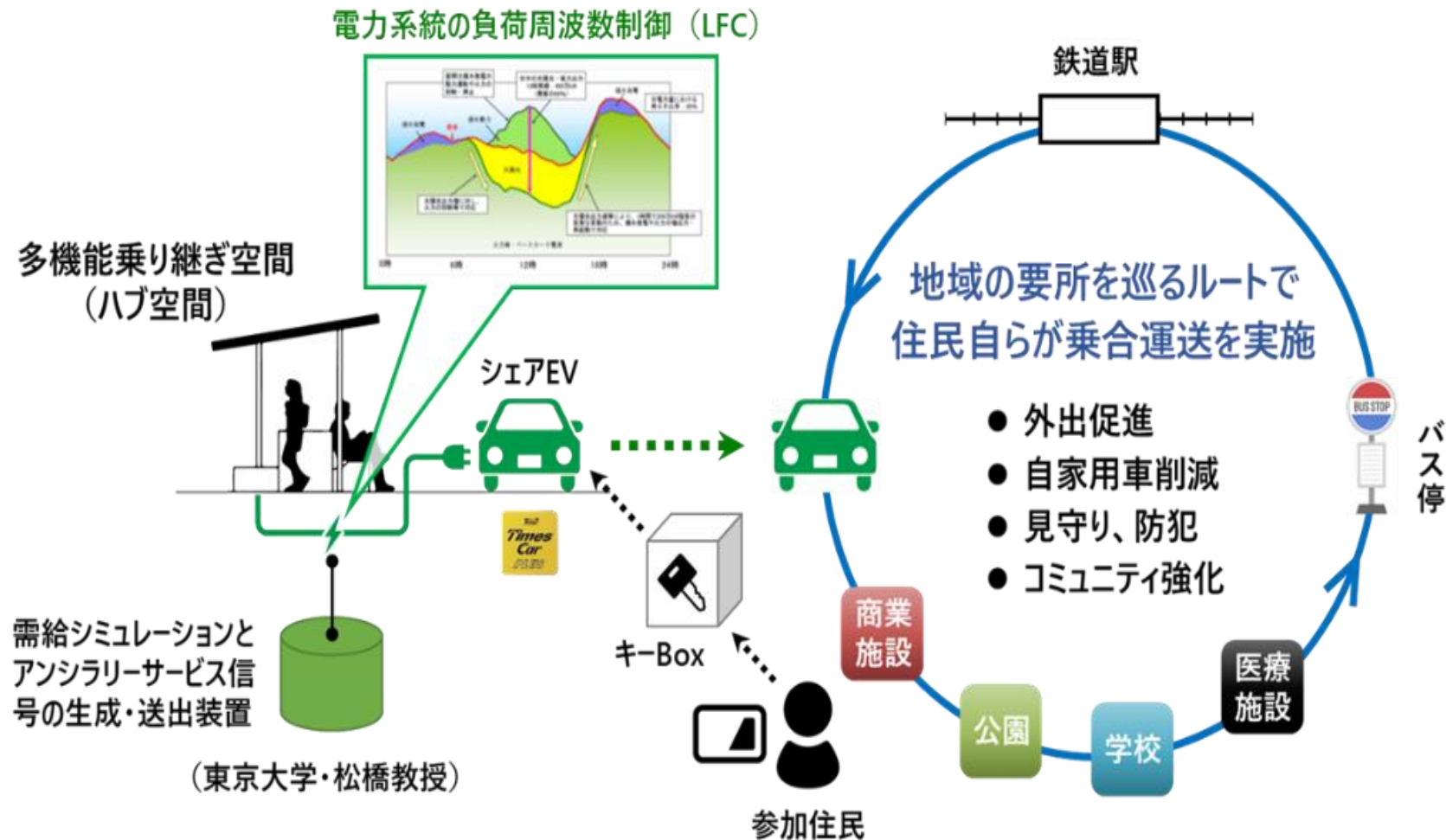
【今後の課題、達成への道筋】

- 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、の事業スキームを確立し、社会実装へと展開する事

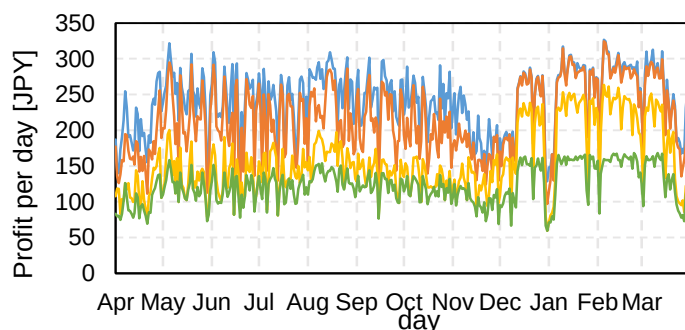
【新たに創出される価値】

- 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

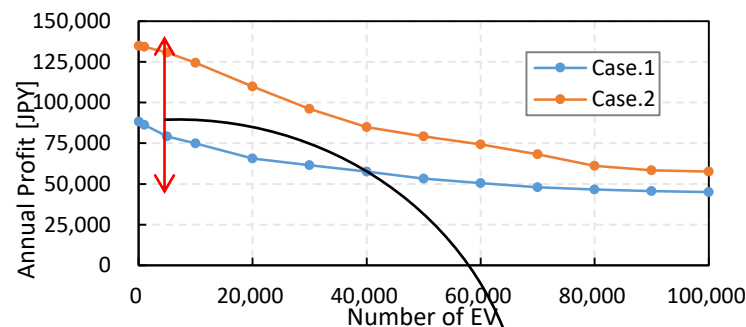
横浜国大中村教授、有吉准教授のカーシェアリング事業



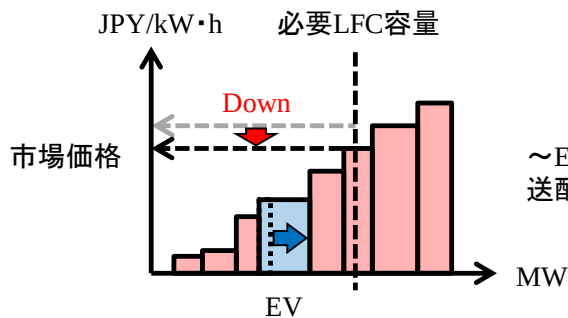
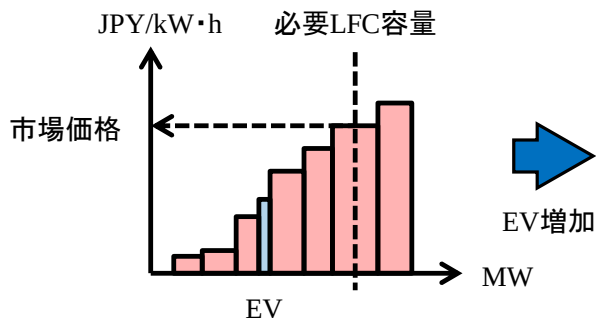
EV導入台数による影響



EV1台当たりの獲得報酬



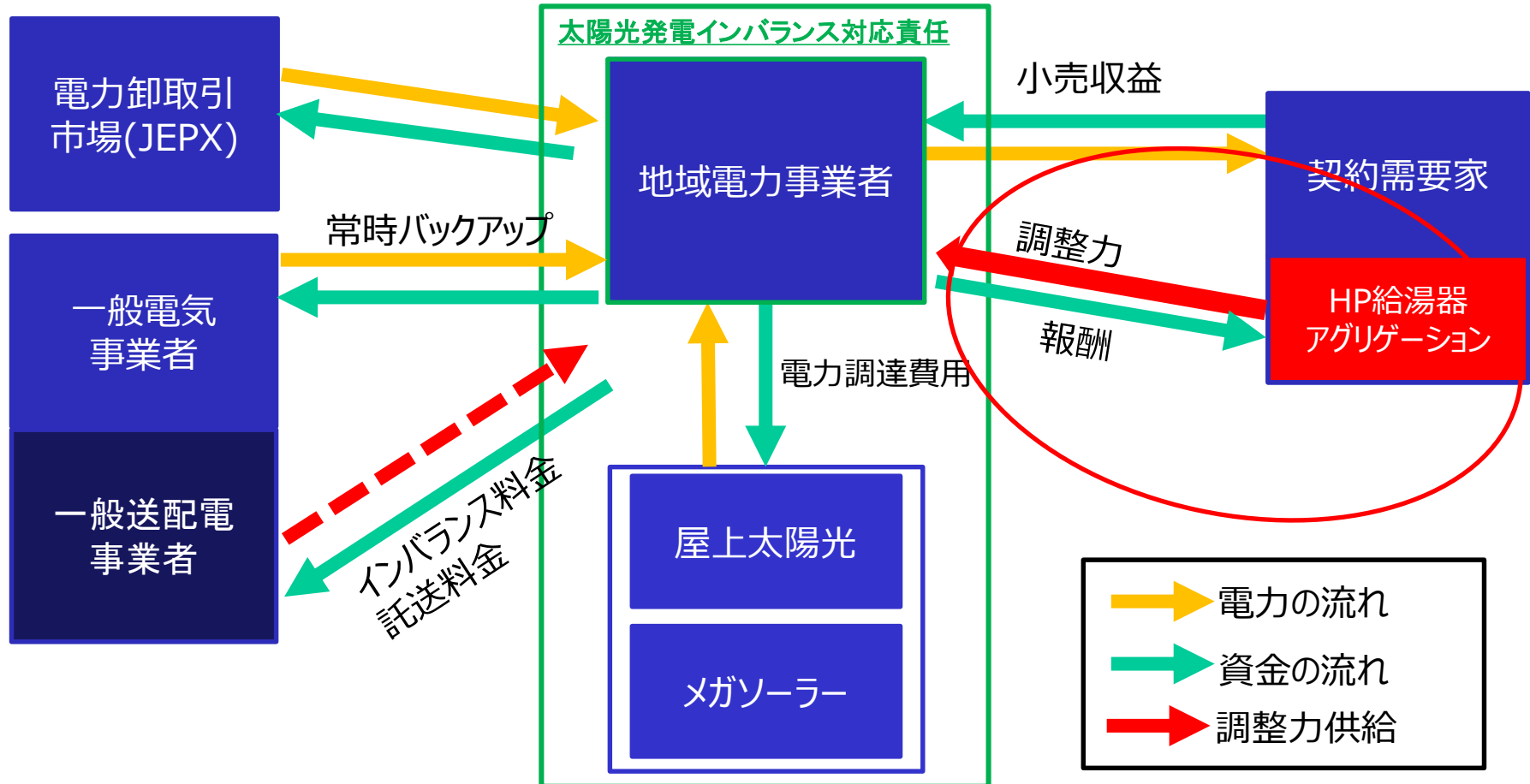
年間獲得報酬：約5万～13万円



～EV0台→5000台の時～
送配電会社の支払いは899億円から828億円の減少

②エコキュートによる調整力の供給 (インバランス補償への応用例)

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

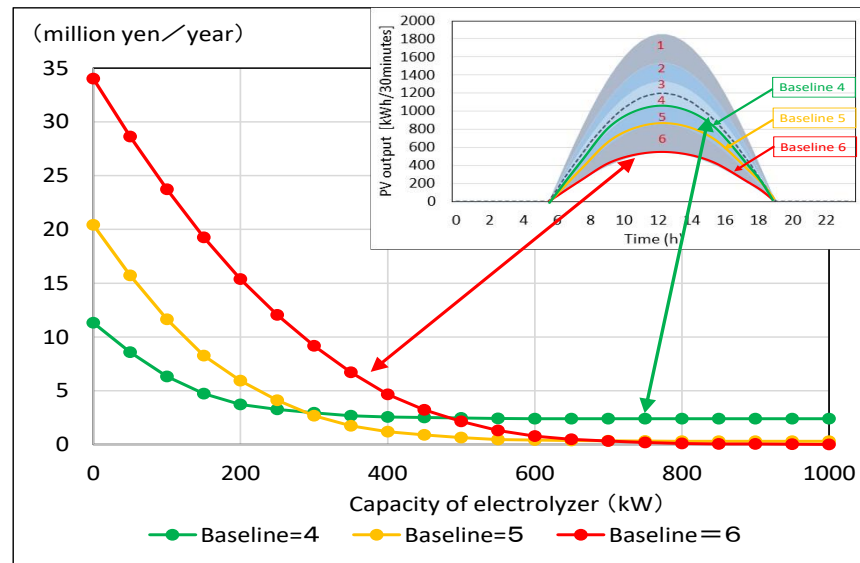
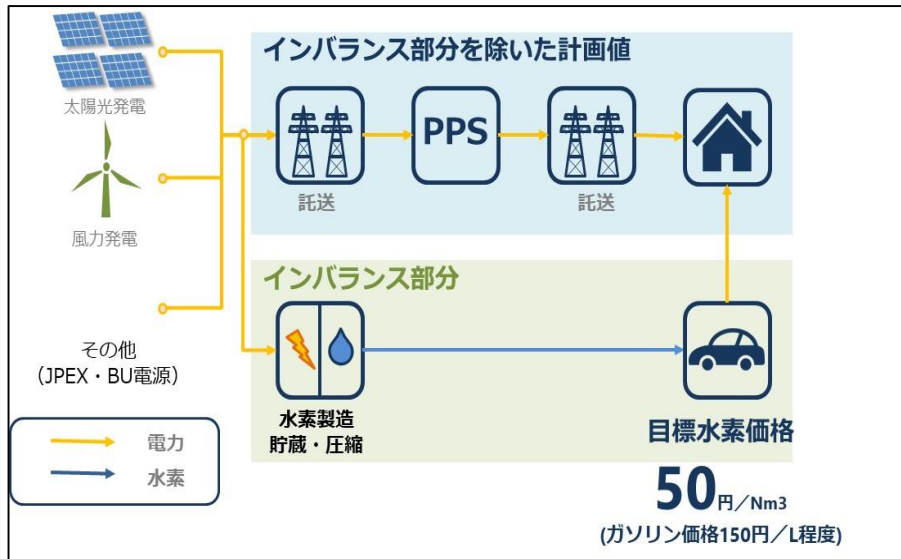




③電気/水素コプロダクションによる調整力の供給 (インバランス補償への応用例)

【今年度進捗】

- 太陽光発電等再生可能電源の予測誤差を考慮に入れ、電気／水素コプロダクションによるインバランス補償の最適化モデルを開発し、英文論文を発表し、実現可能性を明らかにする。



電気／水素コプロダクション事業における電気分解装置容量とインバランスコストの関係

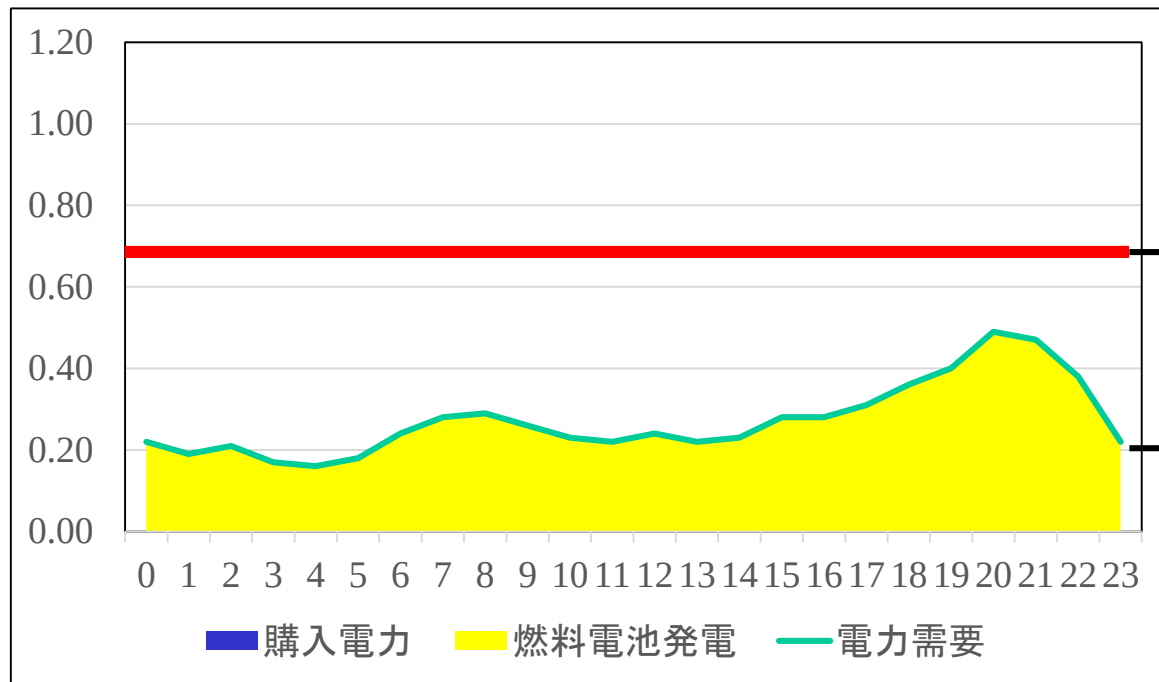
【今後の課題、達成への道筋】

- 電気・水素コプロダクション事業の詳細な事業性を明らかにし、2019年度中に適地を選定する。
- 2020年度に実証事業を実施し、社会実装へと展開する。

【新たに創出される価値】

- 本事業を全国に展開することで、脱炭素社会の構築と地方創生、更には水素のバリューチェーン構築に貢献する。

④燃料電池(SOFC)による調整力の供給 (インバランス補償への応用例)



最大出力700W(0.7kW)

最大発電容量との差が
上げ調整力キャパシティ



大量の家庭用燃料電池
をアグリゲートして、調整
力を供給

燃料電池による上げ代調整力供給例

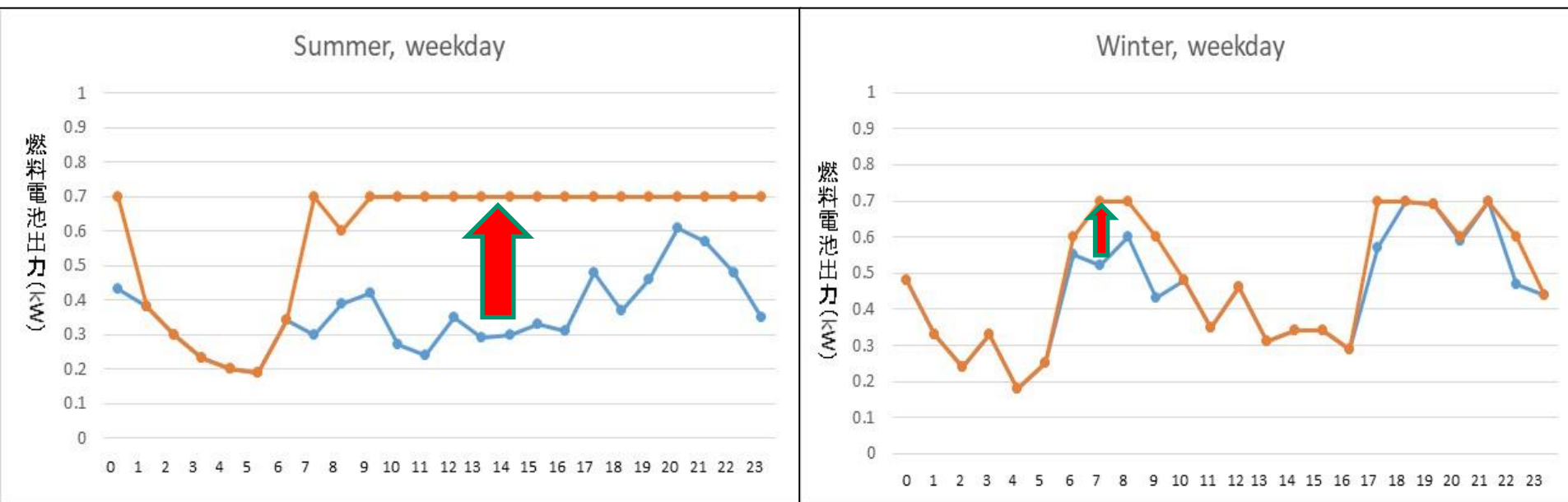
複数の家庭の電力、熱需要データを元に家庭用燃料電池の最適運用モデルを開発



調整力市場による上げ代報酬のある場合とない場合の燃料電池稼働の差を明示



燃料電池による上げ代調整力供給可能性を定量化した



最適化結果より、調整力報酬による上げ代調整力供給を確認し、SOFCの利用率は調整力供給前後で64.2%から78.1%に向上した。(30世帯の1年間通しての値)

- (1) 持続的共進化地域創成拠点では、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。このうち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のみならず、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の取引制度の設計など、制度革新である。