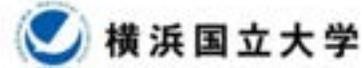
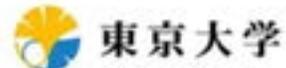
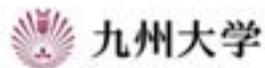
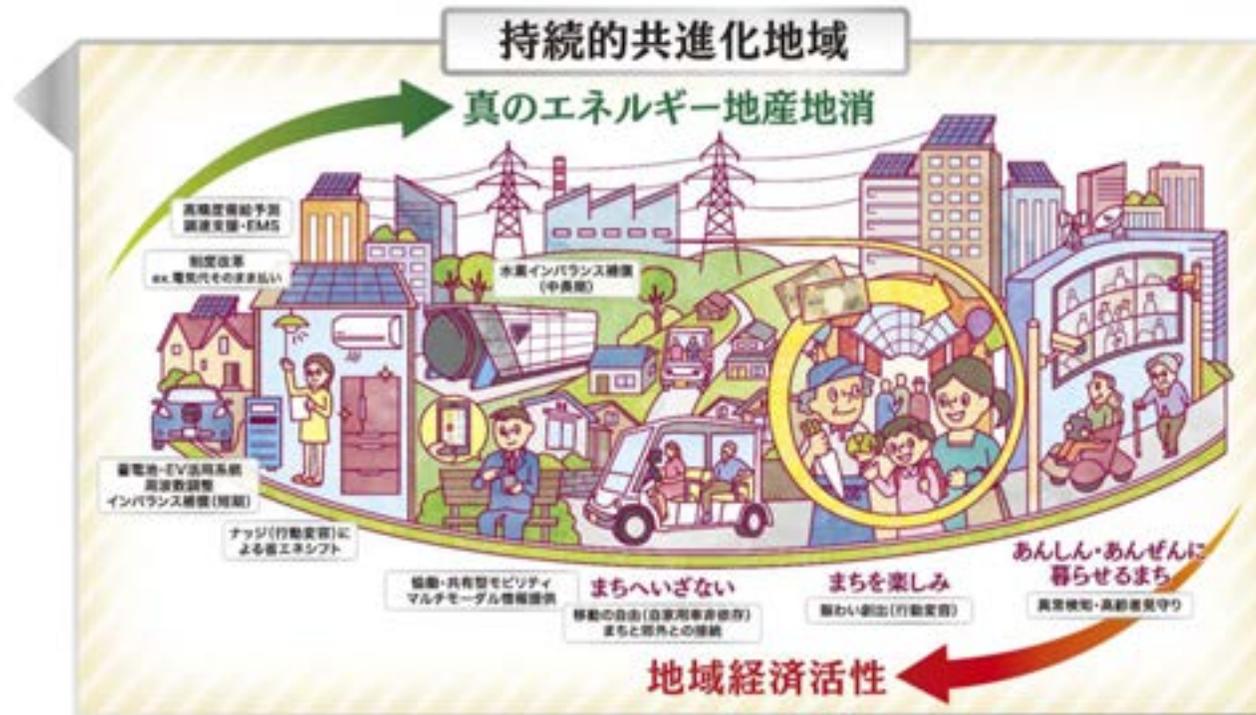


# 電力システムのイノベーションと 電気代そのまま払いの相乗作用

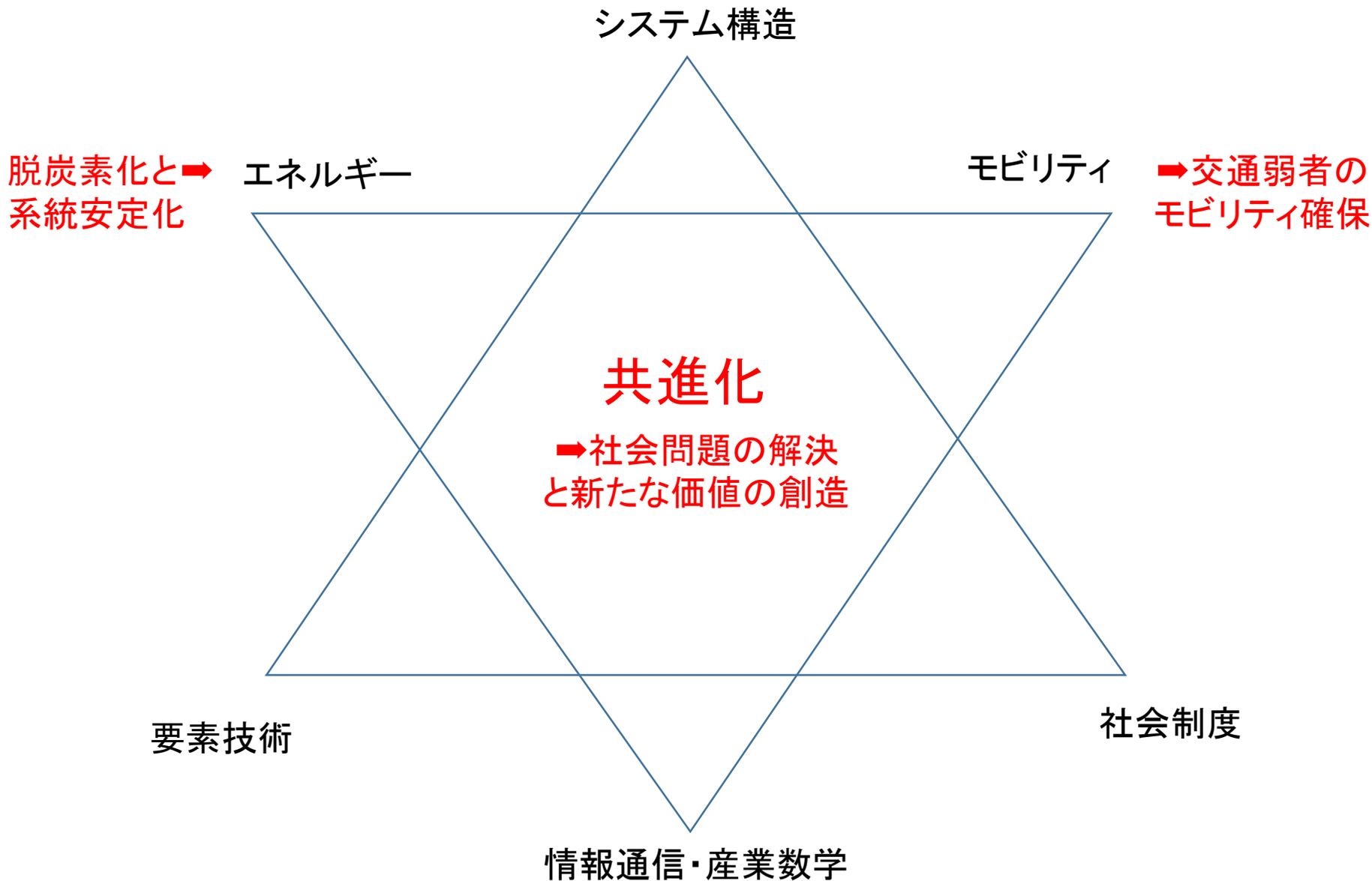


平成30年12月20日

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

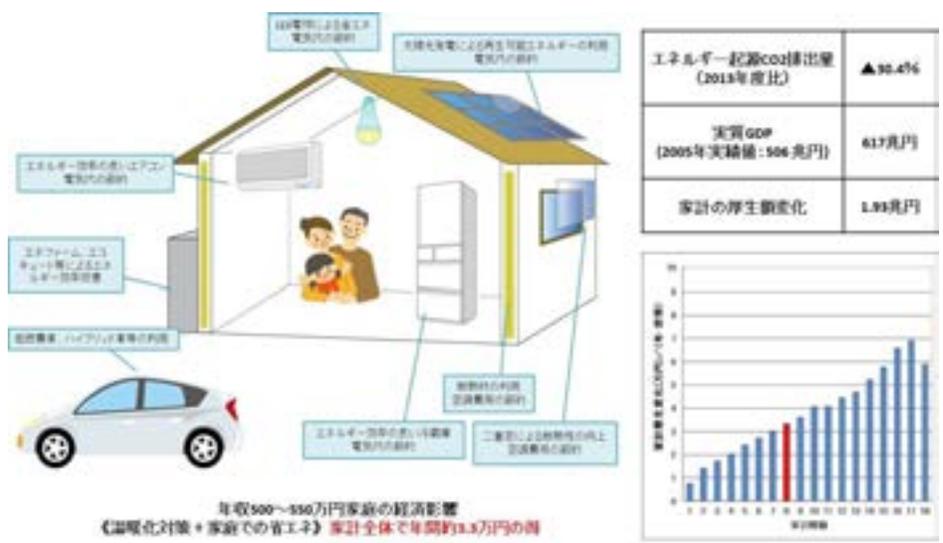
# 持続的共進化地域創成拠点の一概念



目標: パリ協定が国民生活に与える影響の定量化

## 【脱炭素と国民生活安定化・H29年度進捗】

- パリ協定が国内経済・国民生活に与える影響の定量化

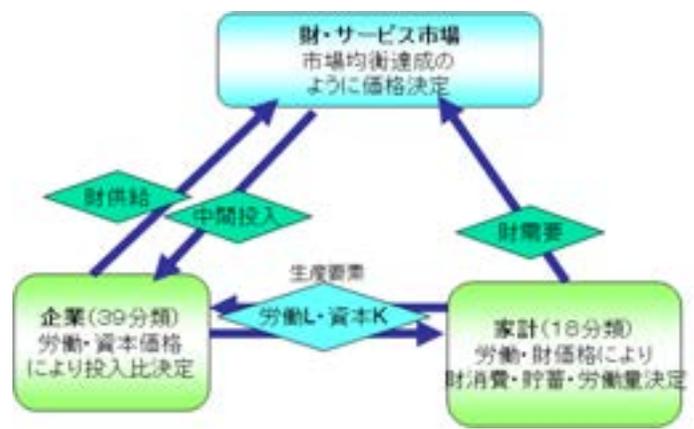


## 【今後の課題、フェーズ3での目標達成への道筋】

- 2030年の温室効果ガス削減が国民生活に与える影響の定量化と豊かな脱炭素社会の設計

## 【新たに創出される価値・意義】

- 2030年の豊かな脱炭素社会のシナリオ開発による社会の活性化とイノベーションの推進



## 応用一般均衡モデル—部門—

部門	1	2	...	18	19	20
食料	1				1	200
住居	2				2	200-250
電気代	3				3	250-300
ガス代	4				4	200-250
他のエネルギー	5				5	350-400
上下水道料	6				6	400-450
交通	7				7	450-500
一般家庭	8				8	500-550
その他	9				9	550-600
その他	10				10	600-650
その他	11				11	650-700
その他	12				12	700-750
その他	13				13	750-800
その他	14				14	800-850
その他	15				15	850-900
その他	16				16	900-1000
その他	17				17	1000-1250
その他	18				18	1250-1500
その他	19				19	1500

家計消費財18部門 ← 生産財39部門  
交換行列(消費財に対する各生産財の産出)

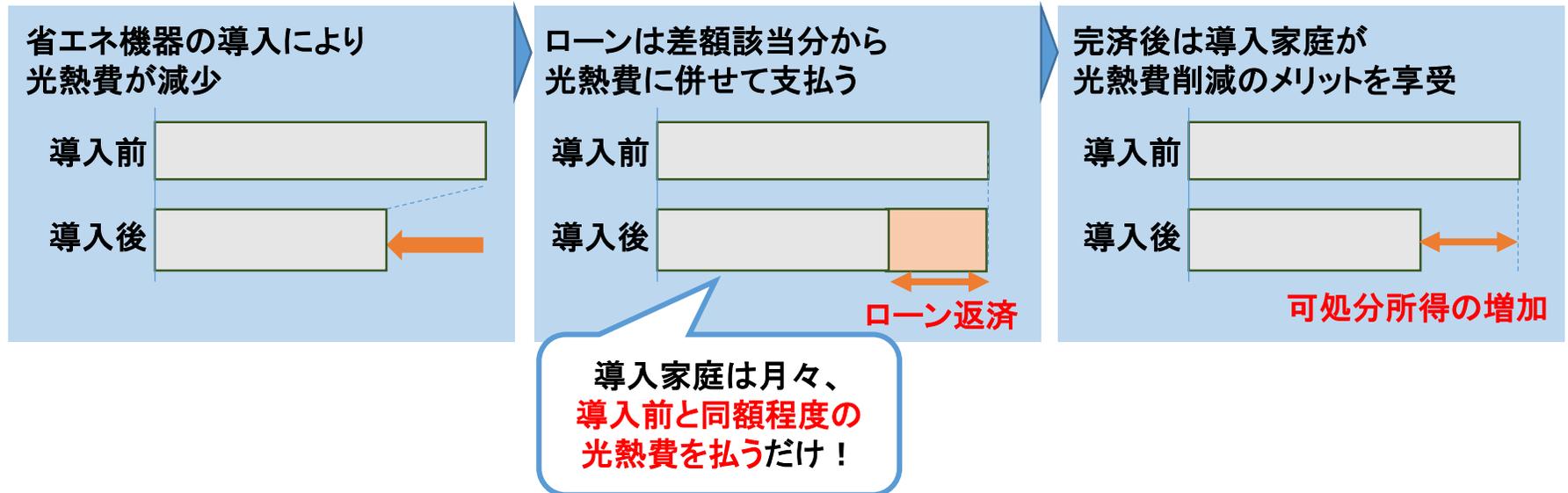
エネルギー経済モデルの開発と日本のGHG削減目標の影響評価(松橋, 高瀬他)

# 電気代そのまま払いの仕組み

## ➤ 初期支払いゼロで省エネ機器・新エネ機器を設置

- 一定期間以内に初期コストを回収できる省エネ機器を特定
- 導入コストは光熱費の節約分と相殺する形で電気料金等と併せ回収

### ◆ 電気代そのまま払いの仕組み ◆



日本に適した制度を設計

# スマホアプリの概要

<https://ecoapp.t.u-tokyo.ac.jp/support/>



## ホーム

本アプリのトップページとなります。

年月別の支出金額の合計及び予算に対する消化状況がご確認いただけます。

## 設定（ユーザー設定）

ユーザーの居住地や世帯人数、ご利用の電力会社などが設定できます。

家計簿eco+は国立研究開発法人科学技術振興機構の「センターオブイノベーションプログラム『共進化社会システム創成拠点』」の研究の一環として、省エネ及び低炭素社会に関する研究の目的で開発されたものです。我々は、家庭部門への省エネ家電等の普及を促す方策の一環として、「電気代そのまま払い」を提唱してまいりました。

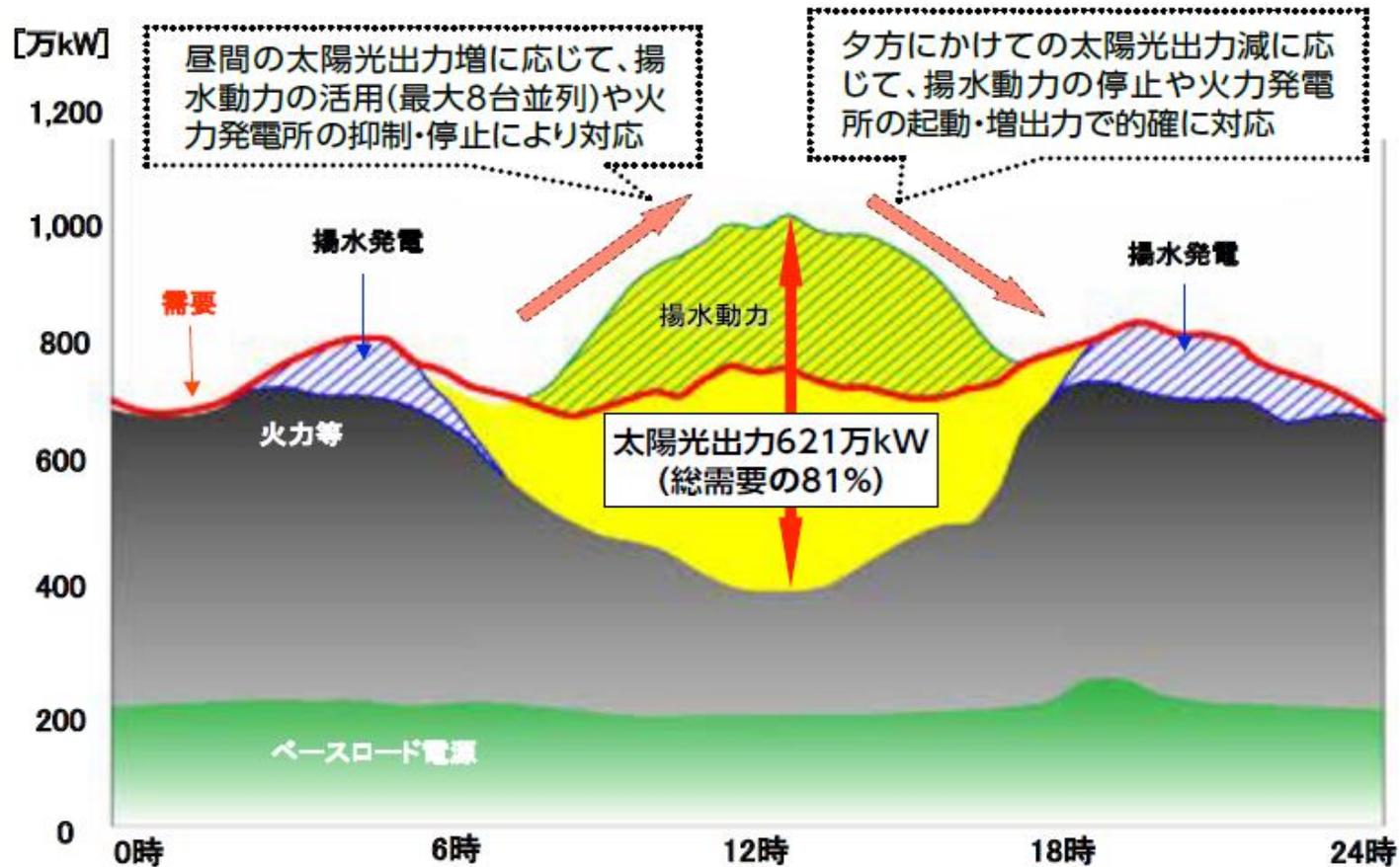
（研究プロジェクトについてのWebサイト：<http://enesys.t.u-tokyo.ac.jp/coi/>）

# 再生可能電源の大量導入と系統の安定性

- ① 日本政府による2030年エネルギーミックス案  
→再生可能は全発電電力量の**22~24%**
  
- ② 電力システム改革  
→2016年4月家庭用小売電気の全面自由化  
→2020年頃 発送電分離(東京電力は2016年4月)
  
- ③ FITによる太陽光発電の爆発的増加  
→全国認定量 8454万kW 全国導入量 4204万kW (2017年3月末時点)  
→九州認定量 **1694万kW** 九州導入量 **800万kW(2018年6月時点)**  
(東日本大震災後の九州電力管内の最大電力需要は1500万~1600万kW  
夏期平日のピーク値は**1300万kW程度**  
中間期平日のピーク値は850万kW程度)
  
- ④ 再生可能電源の大量導入  
→系統の安定性に影響(特に九州地域)  
→**技術と制度のイノベーションによる問題解決**

# 再生可能電源の大量導入と系統安定性

- 再エネ電源が大量連系した電力供給エリアでは、系統運用上の課題が顕在化している。



Supply and demand in Kyushu Electric Power Company, (May 3<sup>rd</sup>, 2018)

# 電力システム改革と系統安定性の問題

## □ 電力システム改革と再生可能電源急増による系統安定性への影響

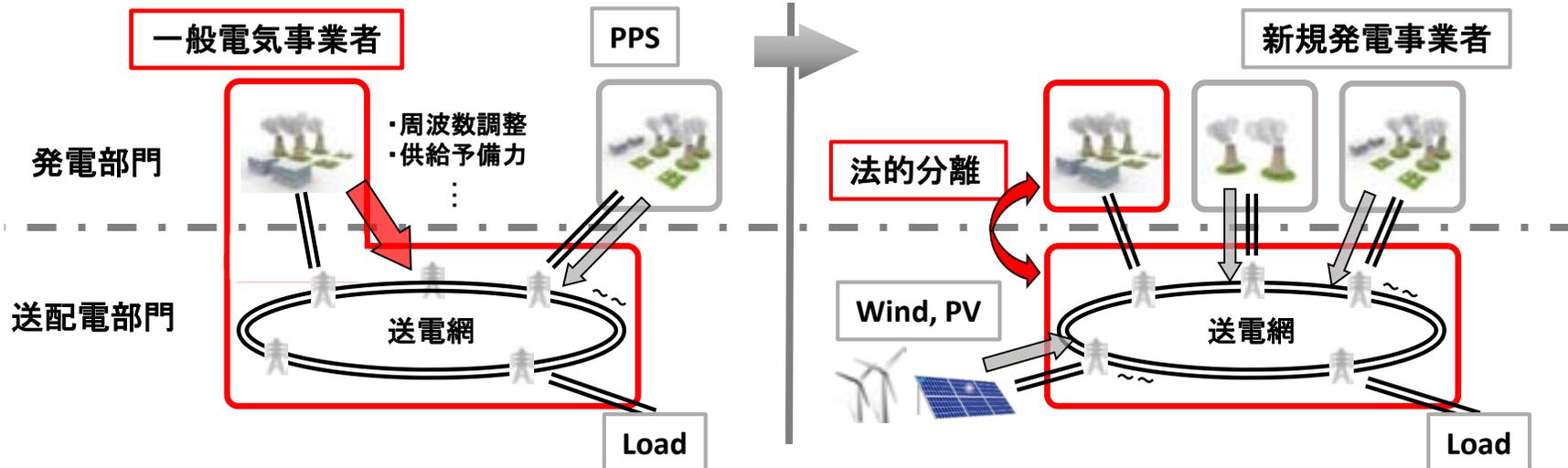
✓ 従来

- 垂直統合型の電力会社が一括してアンシラリーサービスを提供

✓ 自由化と送配電部門の分離後

- 電力会社の送配電部門は発電設備を非保有
- アンシラリーサービスは外部から調達

電力システム改革

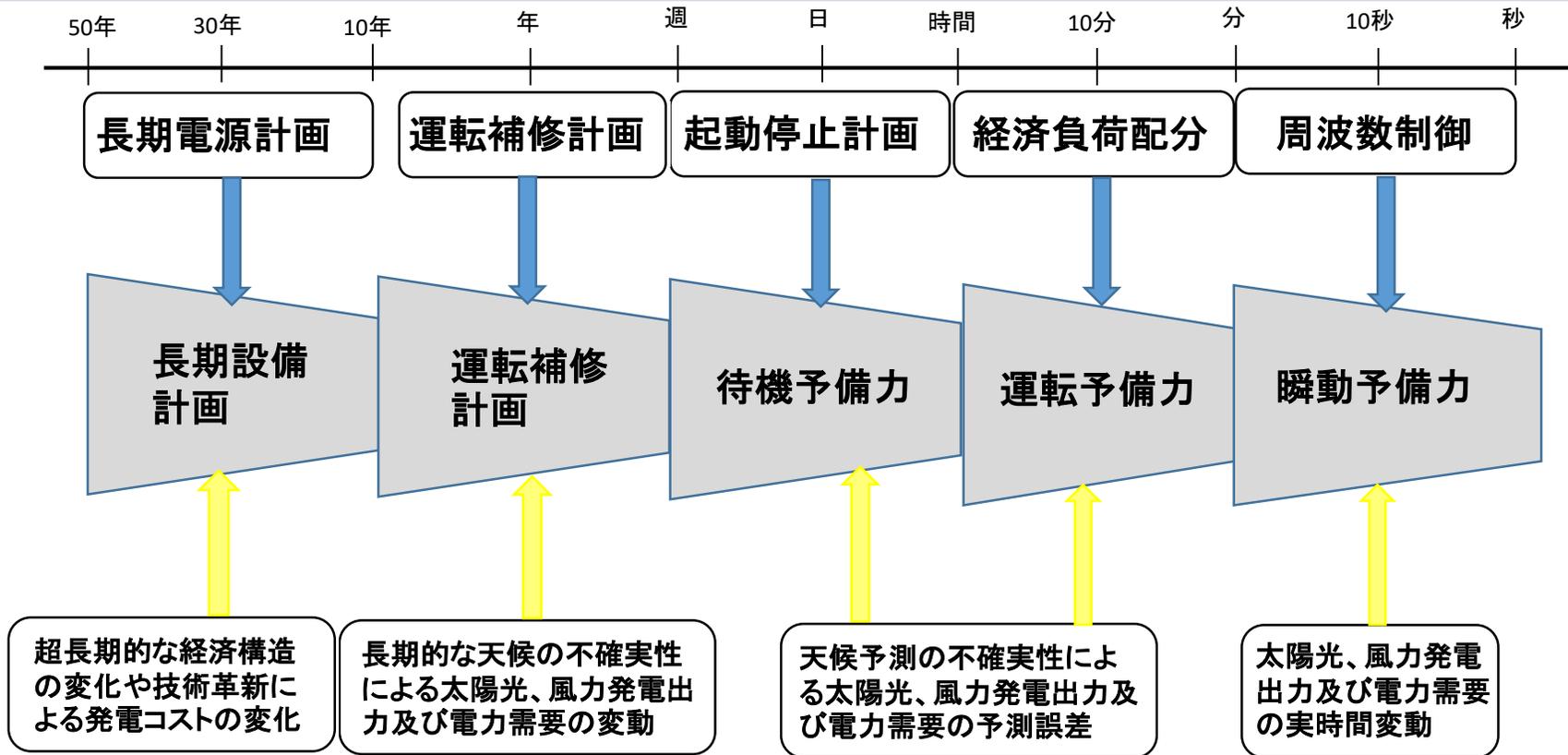


固定価格買取制度による太陽光発電の爆発的増加

- 全国認定量 8454万kW    全国導入量 4204万kW (2017年3月末時点)
- 九州認定量 1694万kW    九州導入量 800万kW (2018年6月時点)

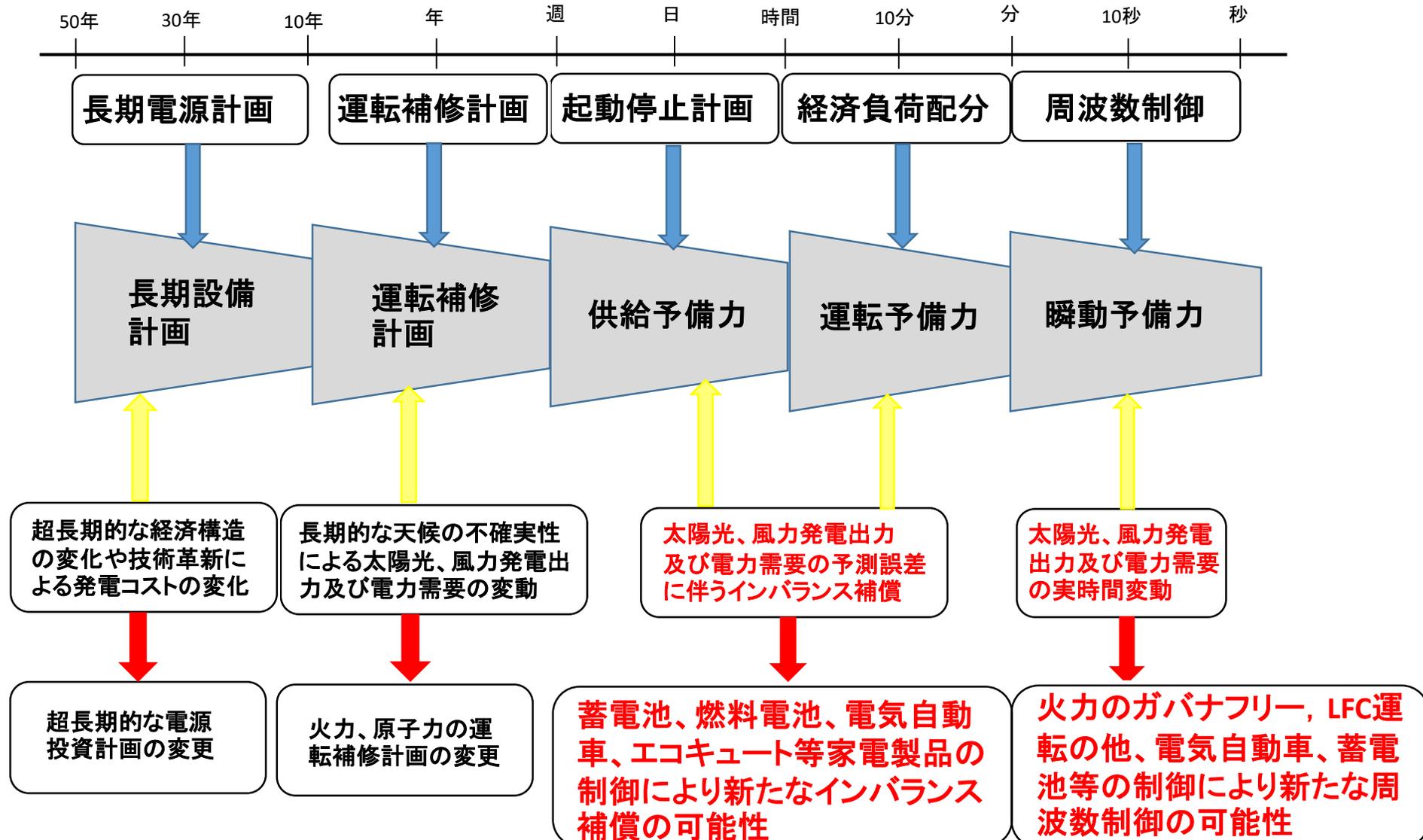
# 電力系統計画・運用における需給調整

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。



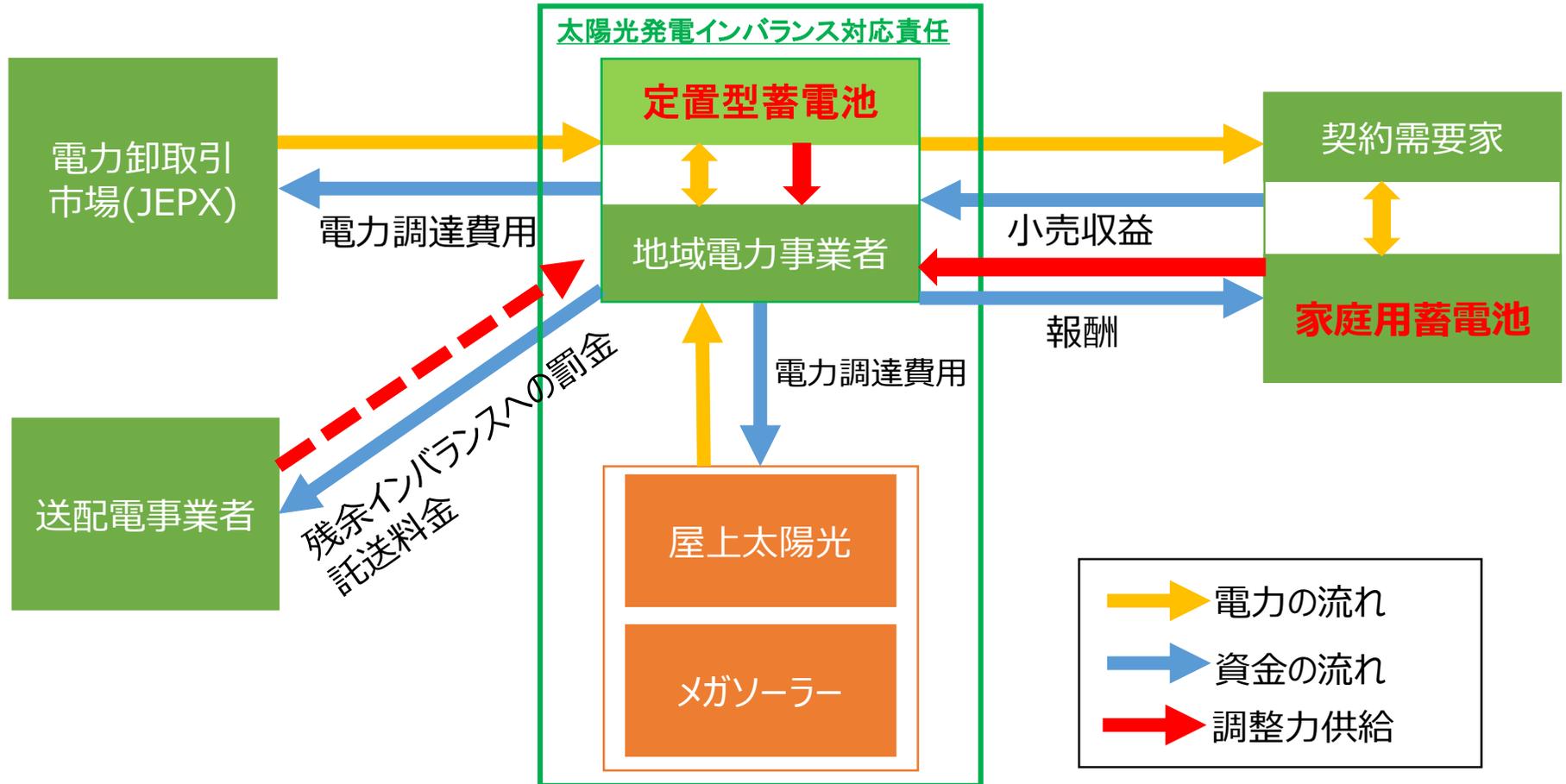
# 電力系統計画・運用における需給調整

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。

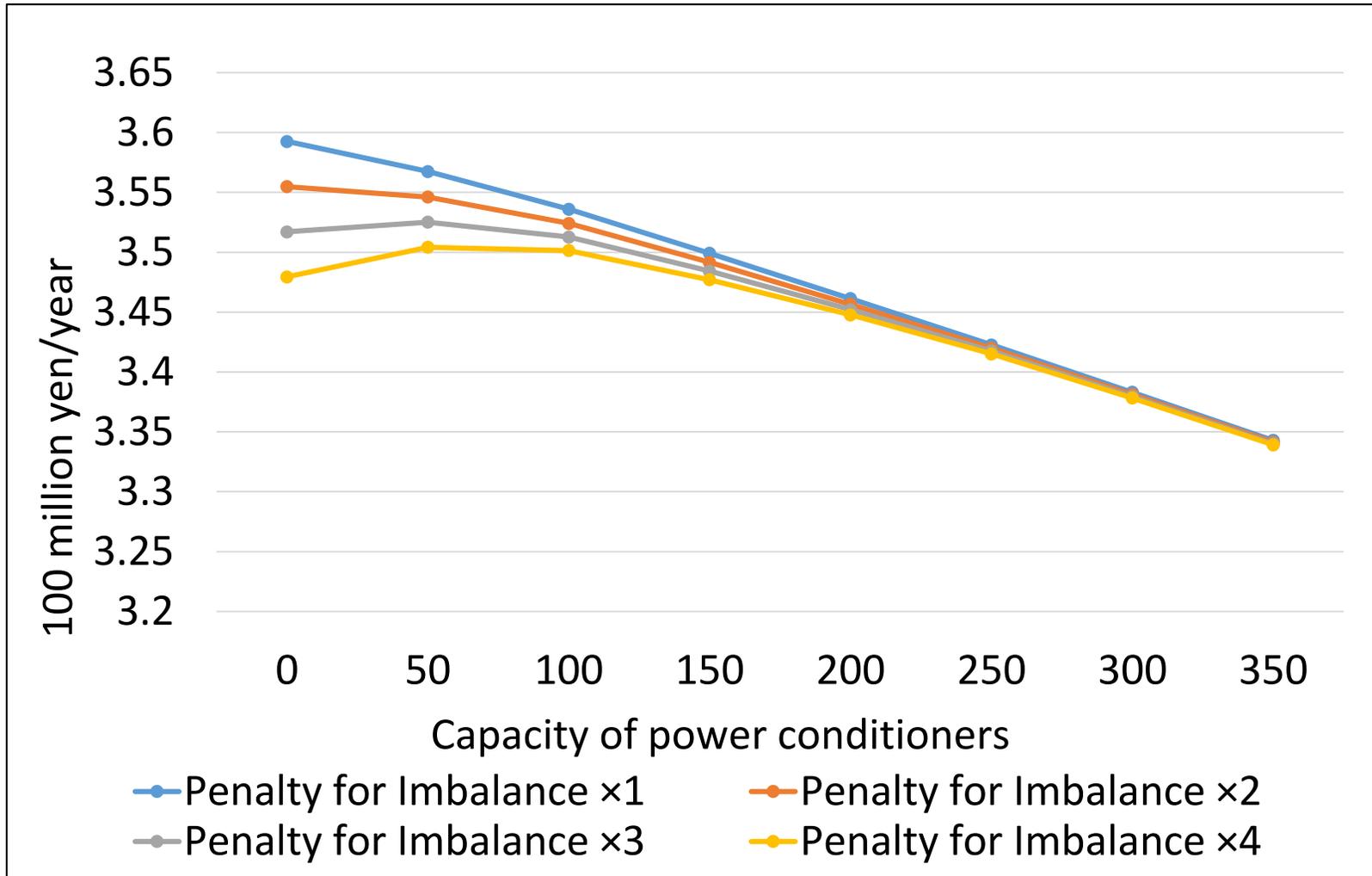


# 定置型及び家庭用蓄電池の小売システムのモデルとインバランス補償の仕組み

地域電力事業者の期待キャッシュフロー =  
 小売収益 - 電力調達費用 - 託送料金 - 期待インバランス罰金 - 蓄電池費用

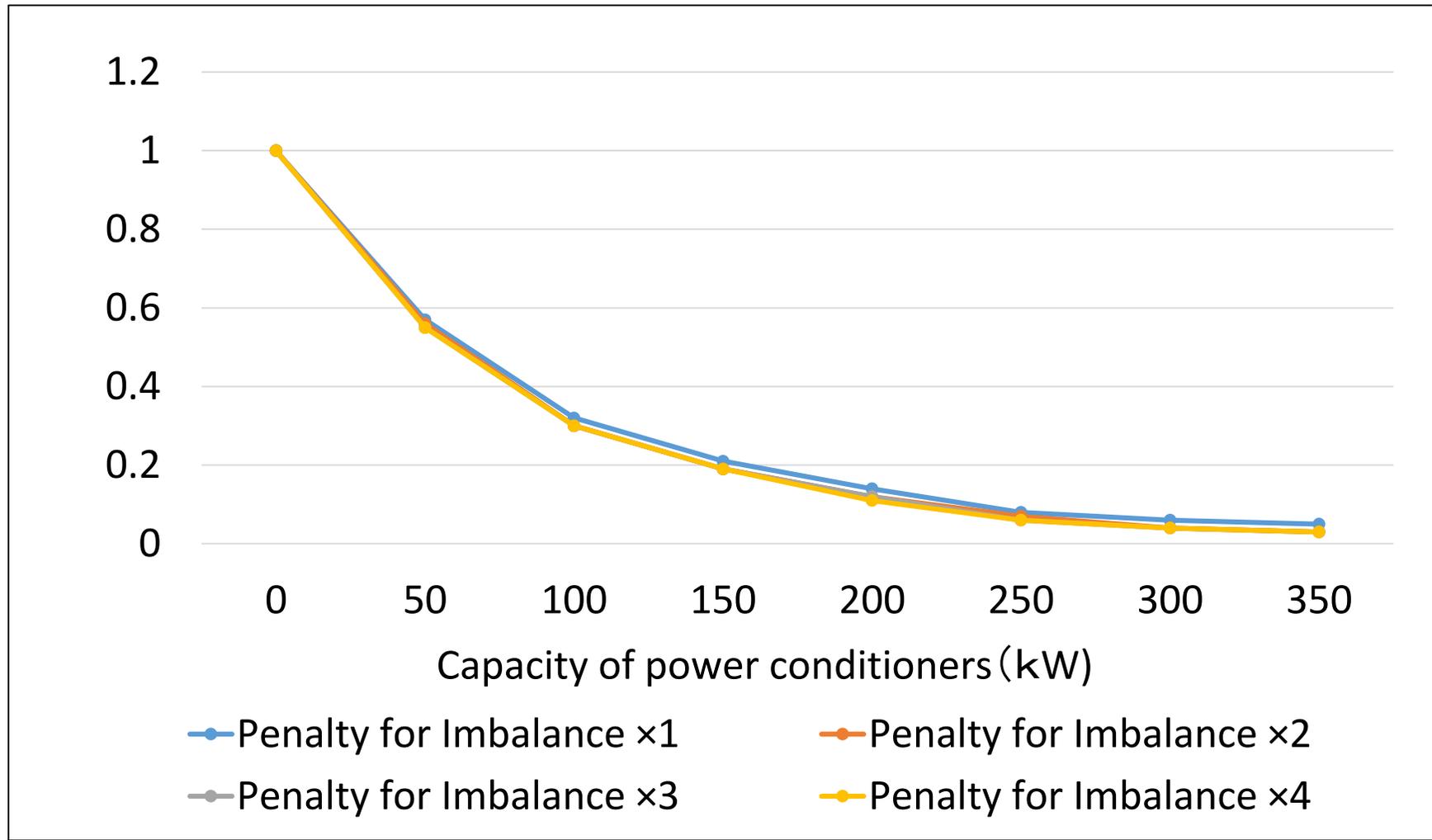


# Comparison of stationary and home batteries



Relationships between capacity of batteries and annual cash flow

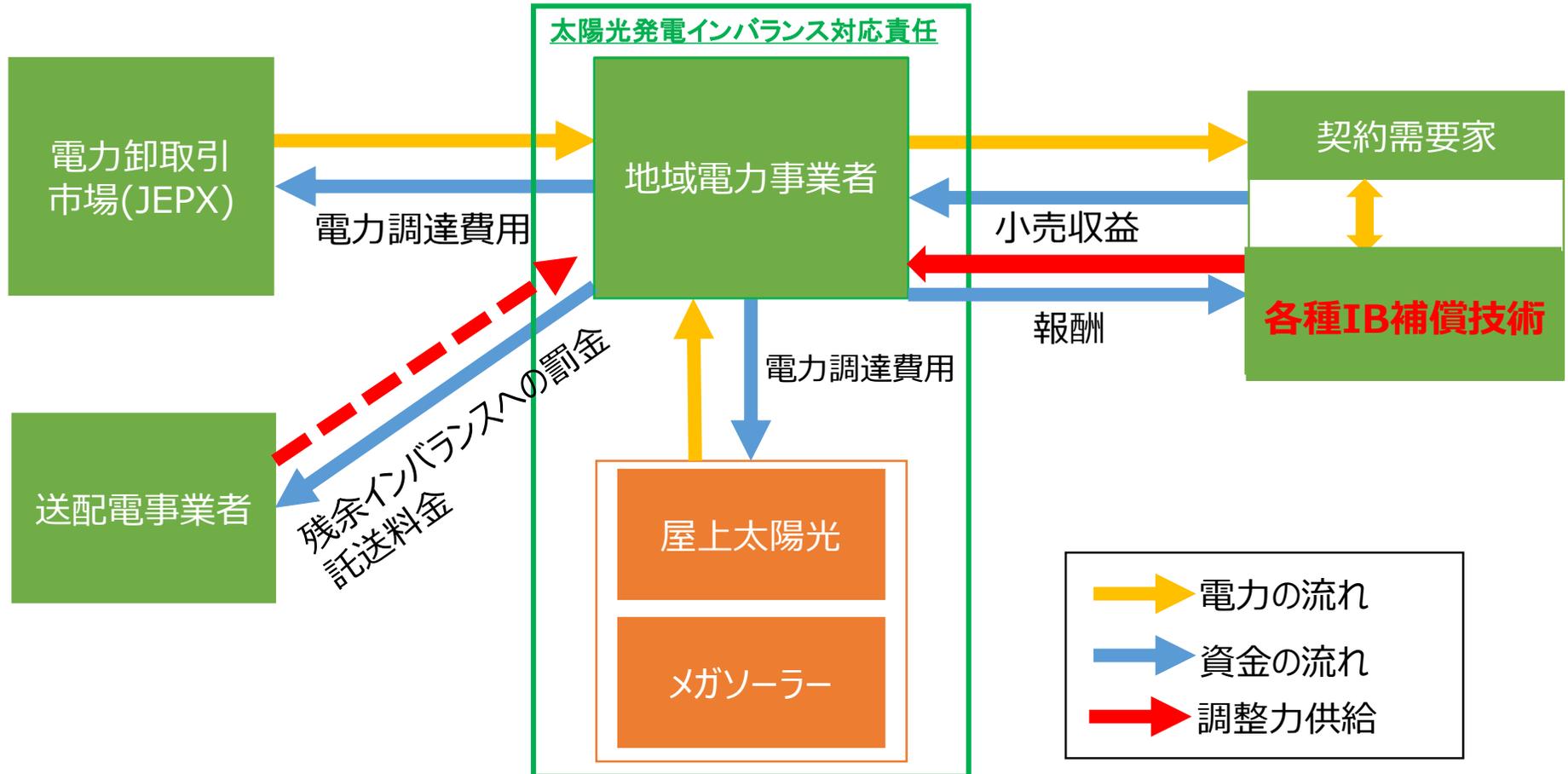
# Comparison of stationary and home batteries



Relationships between capacity of batteries and residual imbalances

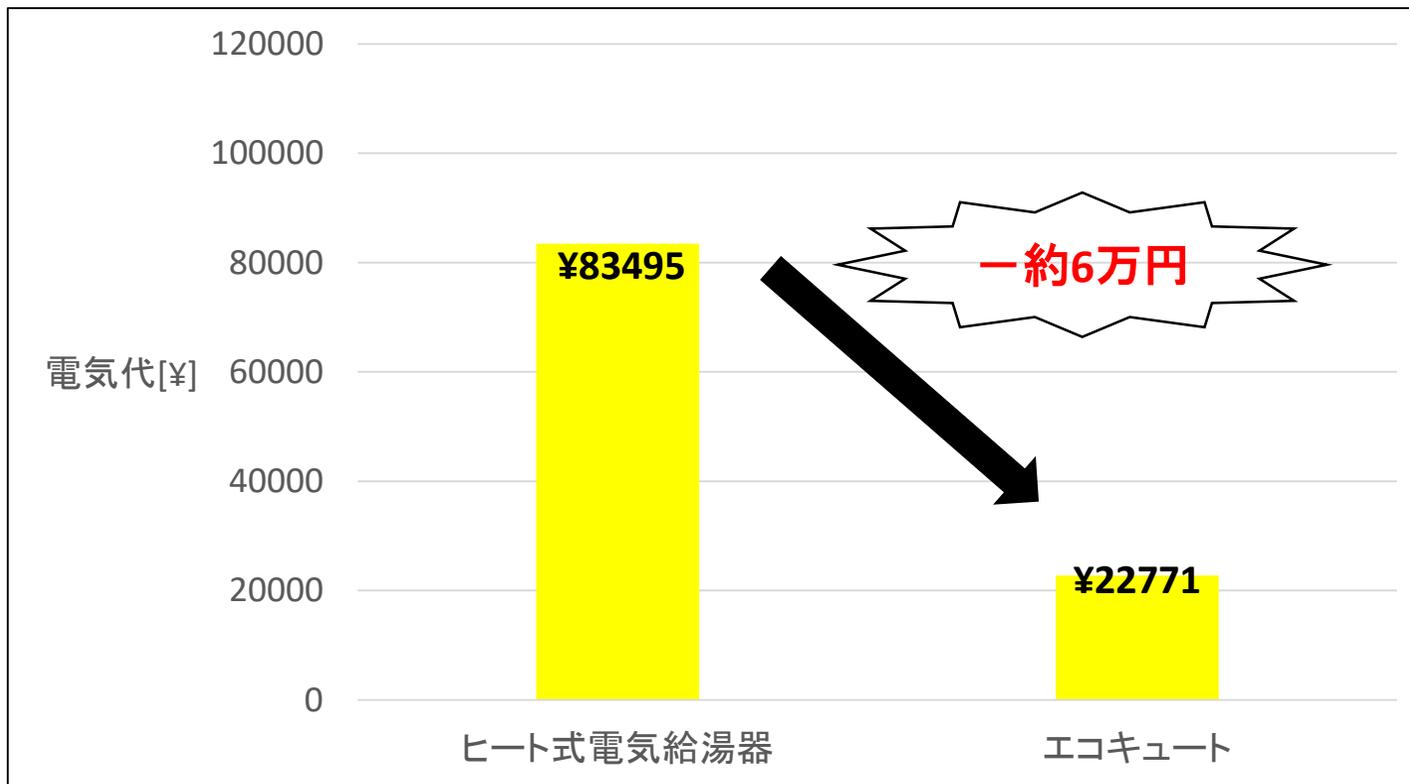
# 各種技術を用いたインバランス補償の仕組み

地域電力事業者の期待キャッシュフロー =  
 小売収益 - 電力調達費用 - 託送料金 - 期待インバランス罰金 - IB補償固定費



## 電気代の比較

- 試算結果によると、ヒート式電気給湯器からエコキュートに買い替えば、電気代は年間でおよそ6万円節約できる。



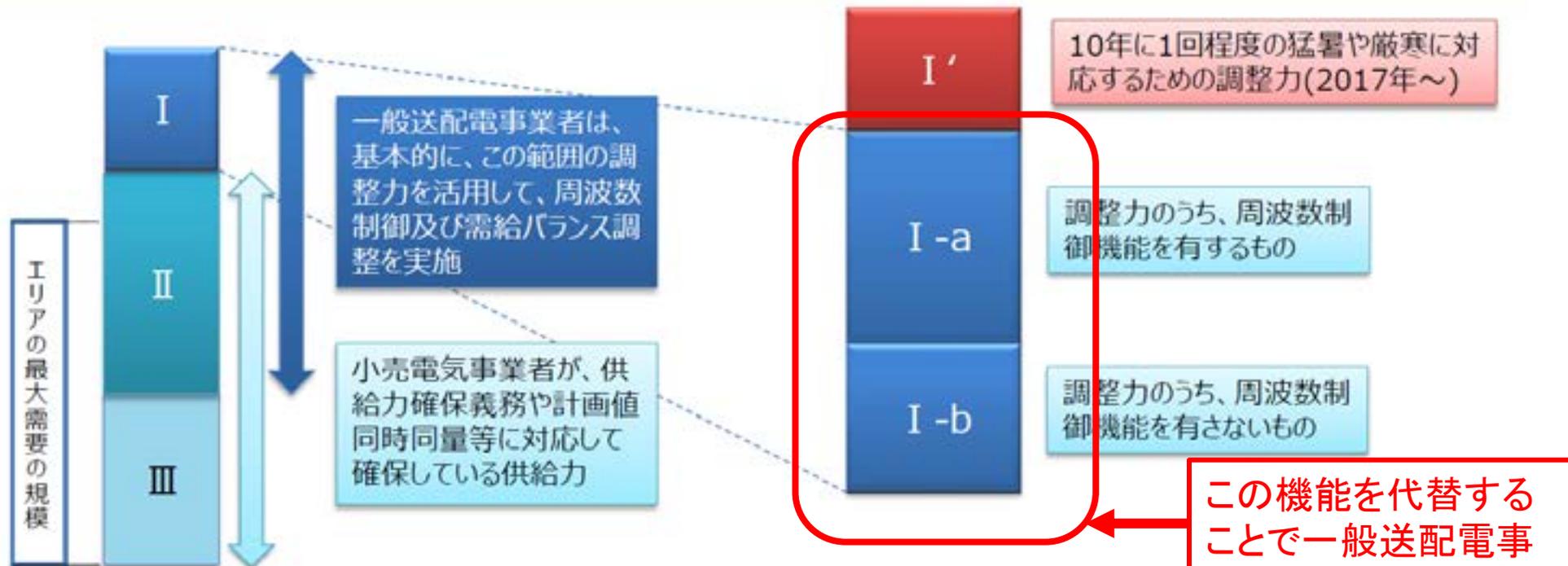
エコキュートを「電気代そのまま払い」で

例えば、PanasonicのエコキュートNSシリーズ(40万)を、ヒート式電気給湯器から買い替えた場合、およそ7年でローンを完済。

➡これに加え、インバランス調整に対する報酬を「電気代そのまま払い」のローン返済に充てることが出来れば、返済期間をさらに短くすることができる。

# 需給調整市場における位置づけ

- 供給力、調整力は、電源種として全く異なる訳ではないため、  
 電源Ⅰ：一般送配電事業者の専用電源として、常時確保する電源等  
 電源Ⅱ：小売電気事業者の供給力等と一般送配電事業者の調整力の相乗りとなる電源等  
 とし、調整力として機能しない電源については、電源Ⅲと定義している。
- また、昨年度より実施された調整力公募においては、電源Ⅰを更に細分化（Ⅰ-a、Ⅰ-b）するとともに、厳気象対応用の調整力（電源Ⅰ'）を新たに定義し、一般送配電事業者はこれら調整力を駆使して需給調整を行っている。



(注) オンライン調整が可能な電源であっても、一般送配電事業者からオンライン指令する契約をしない場合には「電源Ⅲ」に含まれる。

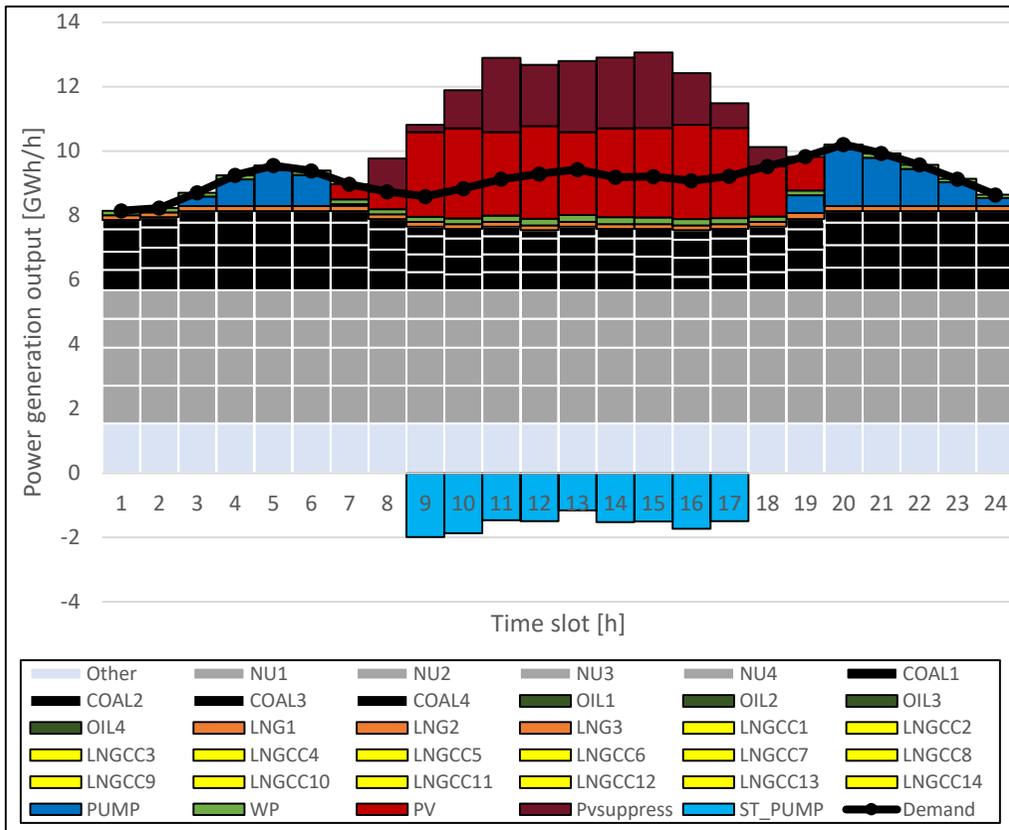
# 起動停止計画 (Unit Commitment)

- 前日中に、翌日の発電所の起動停止をコスト最小化の原理に基づき決定する。
- 全ての一般電気事業者が実施しているもので、再生可能電源の大量導入により、これまでの起動停止計画の維持が難しくなっている。

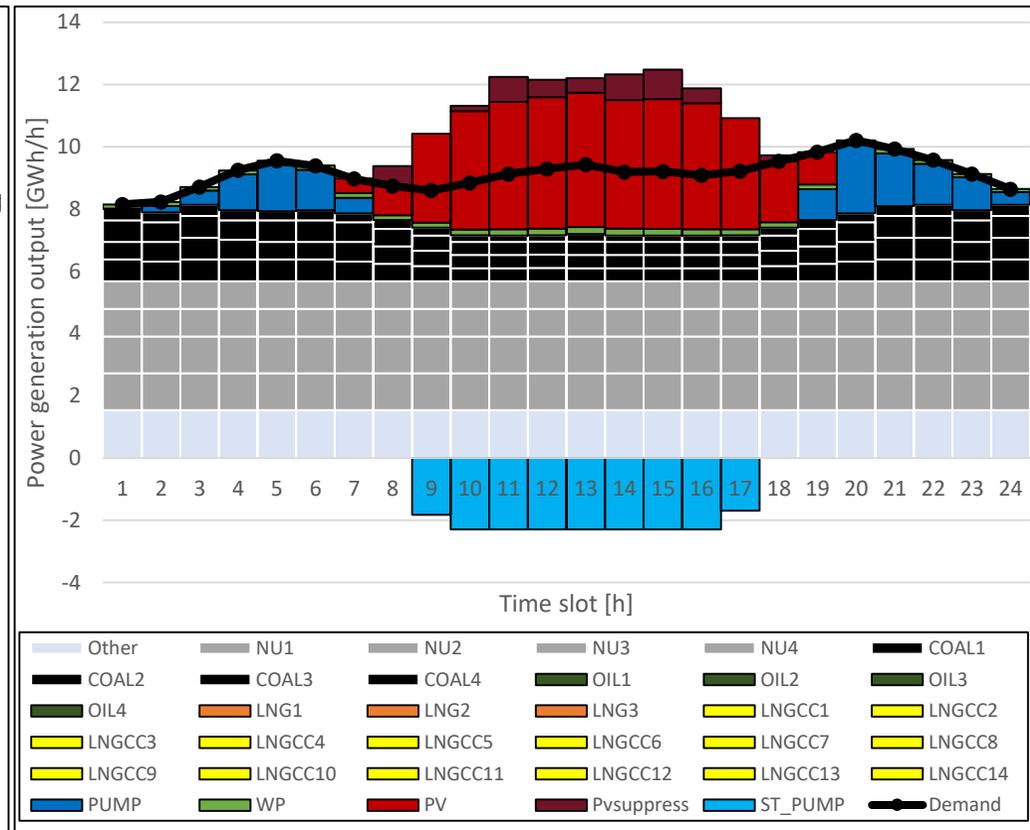


E. Nishiura, R. Matsuhashi. A Study on Unit Commitment Taking Uncertainties in Forecast of Renewable Energy Outputs into Consideration. Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering, Paris, October, 2018.

# 外部調整力(電源 I -b)の有無による起動停止計画の変化



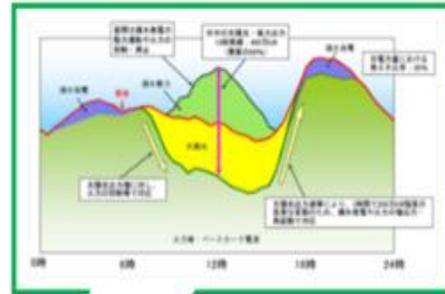
外部調整力(電源 I -b)がない場合



外部調整力(電源 I -b)がある場合

# 横浜国大中村教授、有吉准教授のカーシェアリング事業

## 電力系統の負荷周波数制御 (LFC)



多機能乗り継ぎ空間  
(ハブ空間)



シェアEV



キー-Box



参加住民

需給シミュレーションと  
アンシラリーサービス信号の生成・送出装置



(東京大学・松橋教授)

鉄道駅



地域の要所を巡るルートで  
住民自らが乗合運送を実施

- 外出促進
- 自家用車削減
- 見守り、防犯
- コミュニティ強化

商業施設

公園

学校

医療施設

バス停

# 電気自動車(EV)の利用

## ー電力技術と自動車技術の共進化のシーズンー

### □EVの普及目標

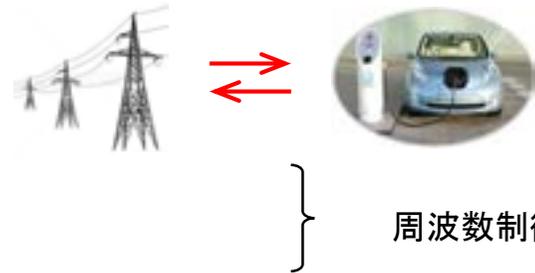
- ✓ 次世代自動車戦略2010(経済産業省)
  - 販売：15～20%(2020年)  
20～30%(2030年)
- ✓ 次世代自動車振興センター
  - 保有：3%(2020年), 9%(2030年)

- ✓ 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(充電or放電)への制御はSOCへの影響が大きく不向き



周波数制御に適性あり

EVを所有することで市場からの報酬が得られる ➡ EV普及のインセンティブとなる可能性

# EVを用いた周波数制御実験の概要 1

## □ Place of experiments

- EV was located in Yokohama National University and it was connected to power grids.
- A remote Controller to manage the V2G system was placed in the University of Tokyo.

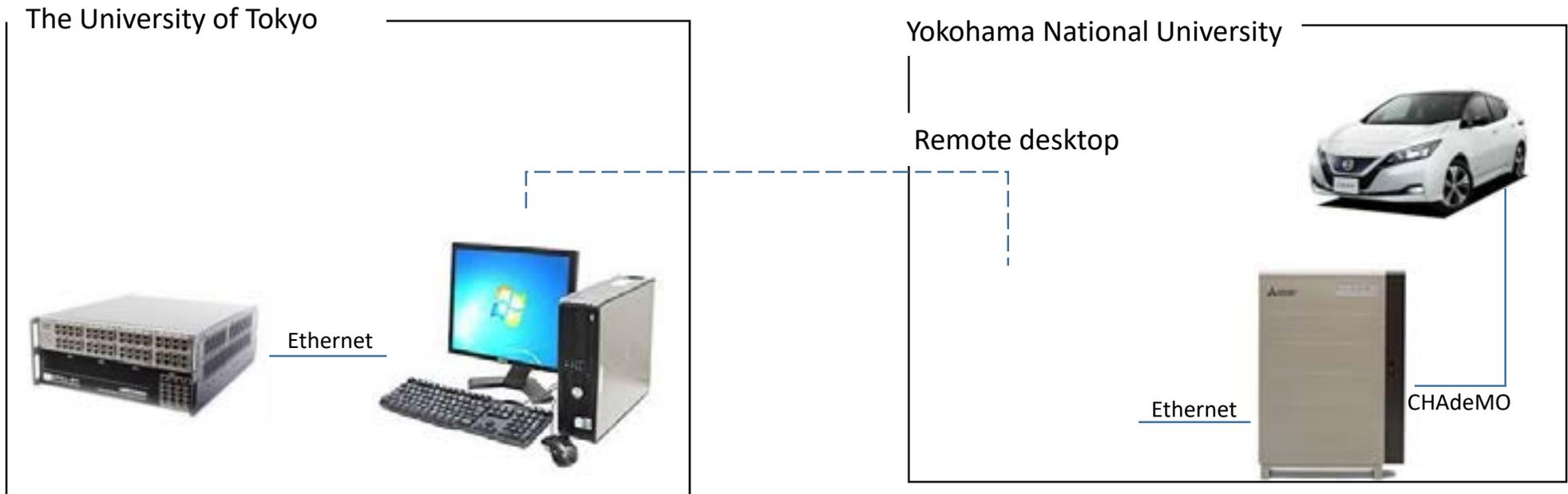
## □ Facility of experiments

- Nissan Leaf, an electric vehicle
- SMART V2H, a power conditioner for EV made by
- Mitsubishi Electric Corporation
- A real time simulator, OP5600, Opal-RT



# EVを用いた周波数制御実験の概要2

- ❑ VPN is institutionally difficult. We use remote desktop to control the PC connected to the EV-PCS.
- ❑ We control charge and discharge of EV as a basic experiment. We make a simulation of using EV for LFC.



**K. Takeda, M. Okazaki, G. T. Nhut, R. Matsuhashi, R. Ariyoshi and F. Nakamura, “A Study on Using Electric Vehicles for Load Frequency Control in Power Systems”, Proceedings of Grand Renewable Energy 2018, Yokohama, June 2018**

# 実際の電力システムを想定した周波数制御シミュレーション1

## □ Power demand

- Data of Kyushu electric utilities (2017.5.1)

## □ Power constitution

- Power capacities in Kyushu electric utilities are shown in the table below.
- Capacities of renewable power sources are assumed to be the values in 2017.11, and the values 30% larger than the previous ones.

Power constitution of the system

	Capacity (MW)
Fossil-fired	9939
Hydropower	1840
Nuclear (low)	1780
Nuclear (high)	4699

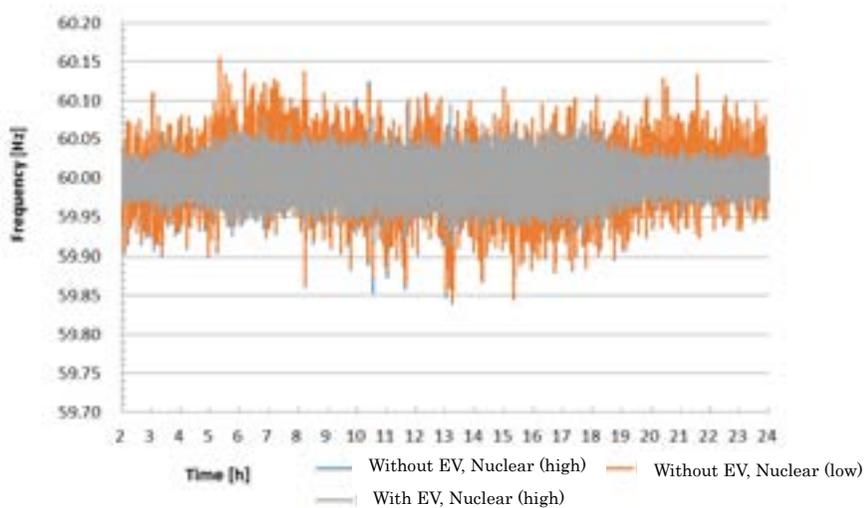
Renewable power sources in the system

	Capacity (MW)
Wind (low)	490
Wind (high)	639
Solar (low)	7670
Solar (high)	10274

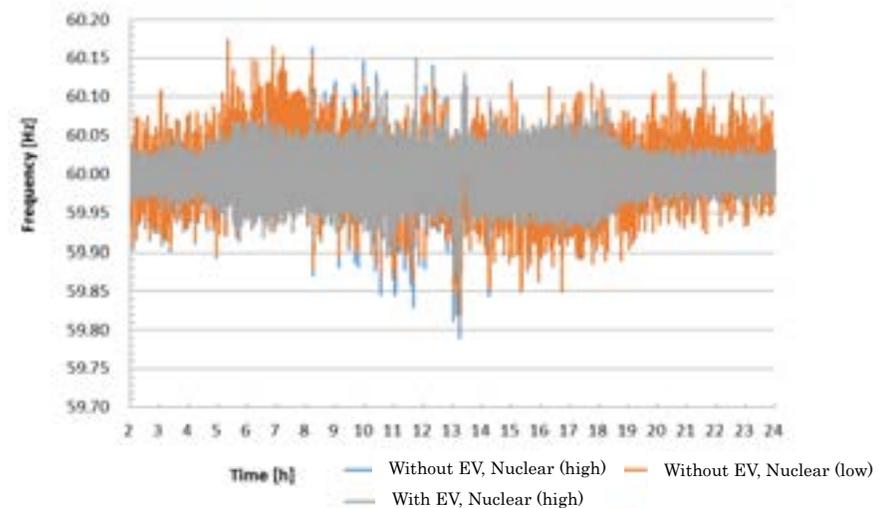
# 実際の電力システムを想定した周波数制御シミュレーション2

- Simulation results

Frequency in low renewable case



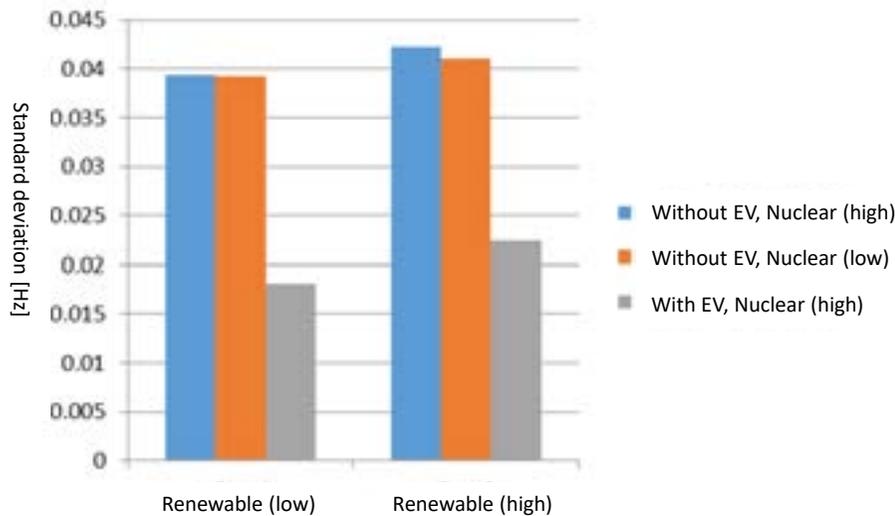
Frequency in high renewable case



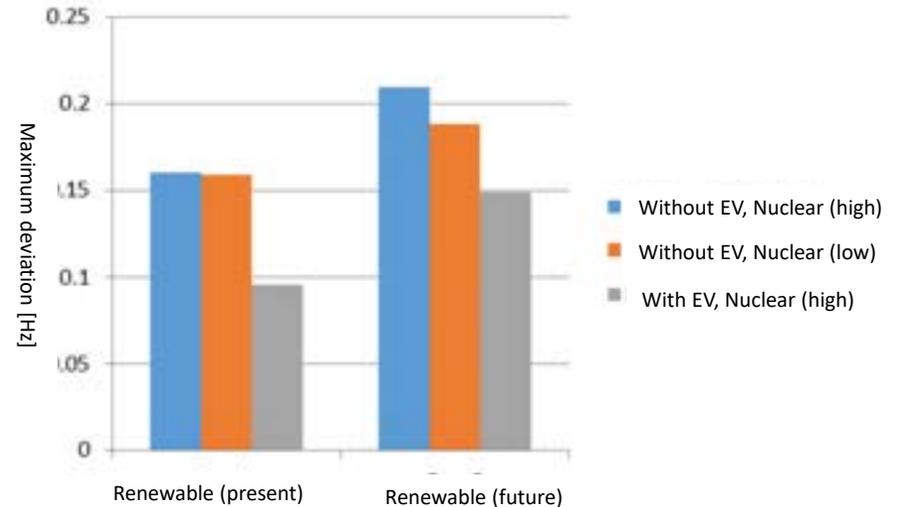
# 実際の電力システムを想定した周波数制御シミュレーション3

- Simulation results

Standard deviation of frequency



Maximum deviation from the standard frequency



**K. Takeda, M. Okazaki, G. T. Nhut, R. Matsuhashi, R. Ariyoshi and F. Nakamura, “A Study on Using Electric Vehicles for Load Frequency Control in Power Systems”, Proceedings of Grand Renewable Energy 2018, Yokohama, June 2018**

# EVによる周波数制御の経済性評価1

—EVによる負荷周波数制御と従来の周波数制御技術のコスト比較—

## □ 定格運転時の燃料コスト

石炭, LNG複合, 在来型LNG, 石油

安い → 高い

## □ LFC調整コスト

石油, 在来型LNG, LNG複合, 石炭

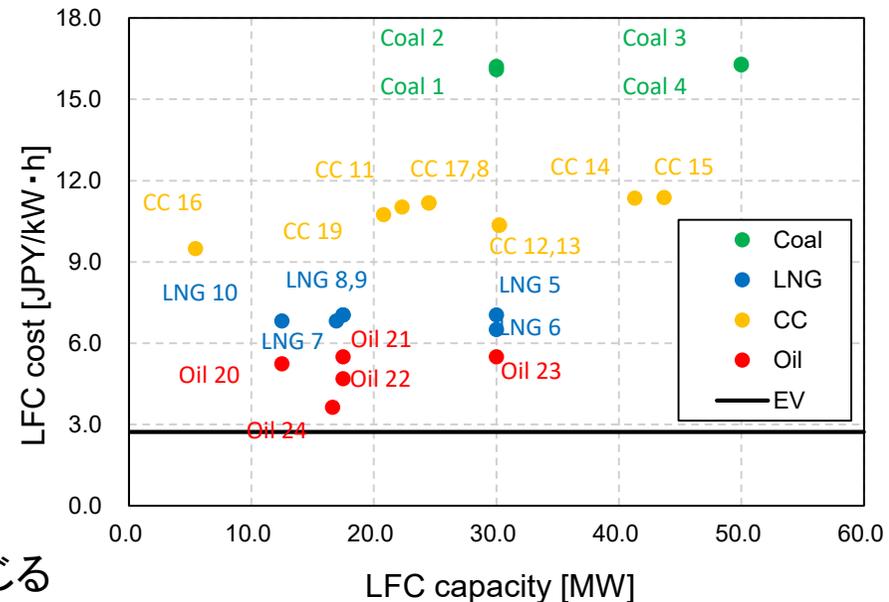
安い → 高い

$$Cost_{LFC} [\text{JPY}/\text{kW} \cdot \text{h}] = \frac{(P_{100} - P_{95}) \times Price_{sell,t} - (FC_{100} - FC_{95})}{P_{max} \times 0.05}$$

$$= Price_{sell,t} \frac{FC_{100} - FC_{95}}{P_{max} \times 0.05}$$

燃料費の項によってのみ価格差が生じる

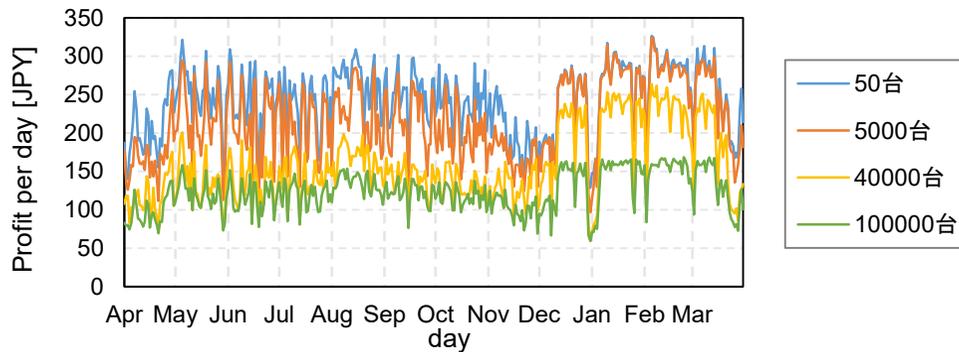
定格運転, 売電価格が20JPY/kWhの時



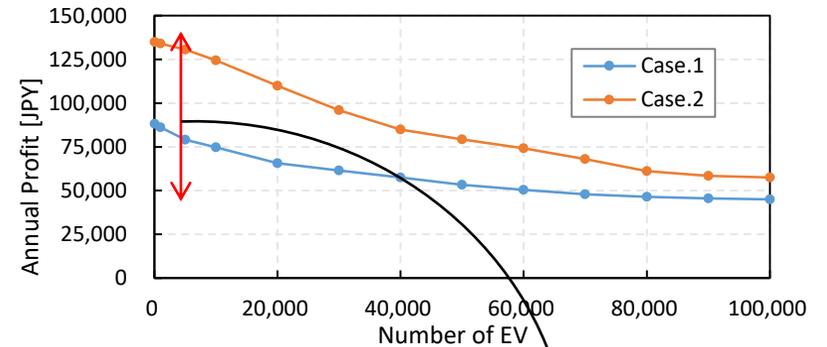
# EVによる周波数制御の経済性評価2

## — 負荷周波数制御による電気自動車の獲得報酬 —

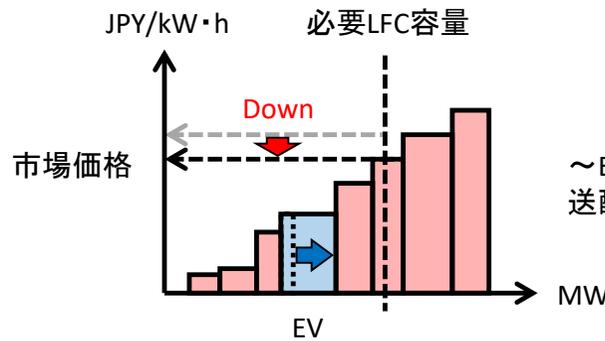
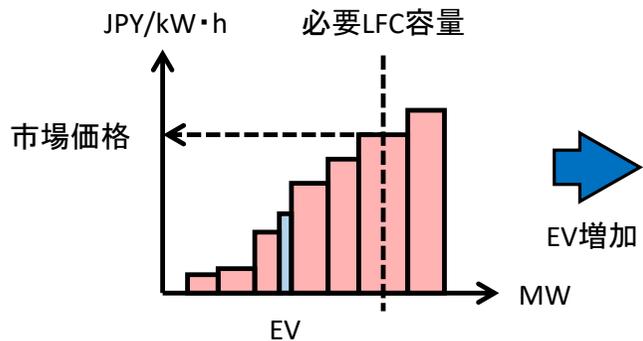
### □ EV導入台数による影響



EV1台当たりの獲得報酬



年間獲得報酬：約5万～13万円



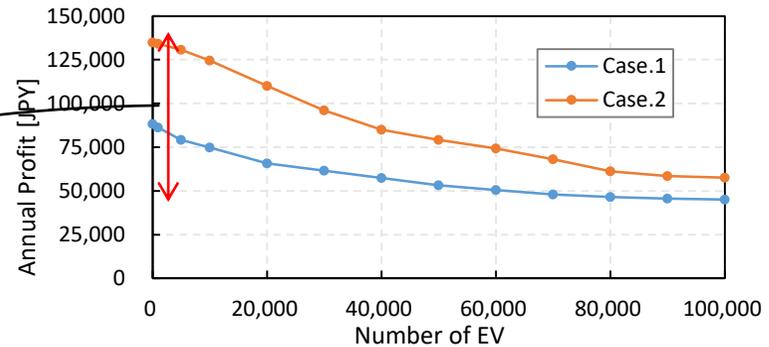
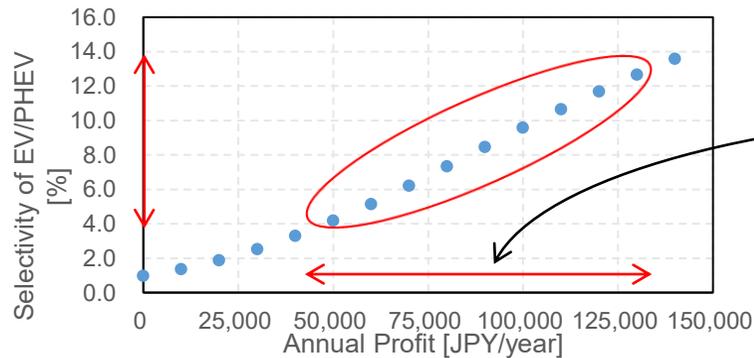
～EV0台→5000台の時～  
送配電会社の支払いは899億円から828億円に減少

# EVによる周波数制御の経済性評価3

## — 負荷周波数制御への参加による電気自動車の普及拡大 —

### □ 市場獲得報酬による選択率への影響

- 収益の増加に伴い, EV・PHEVの選択率は上昇
- 5万~13万の時 → 約4%~14%



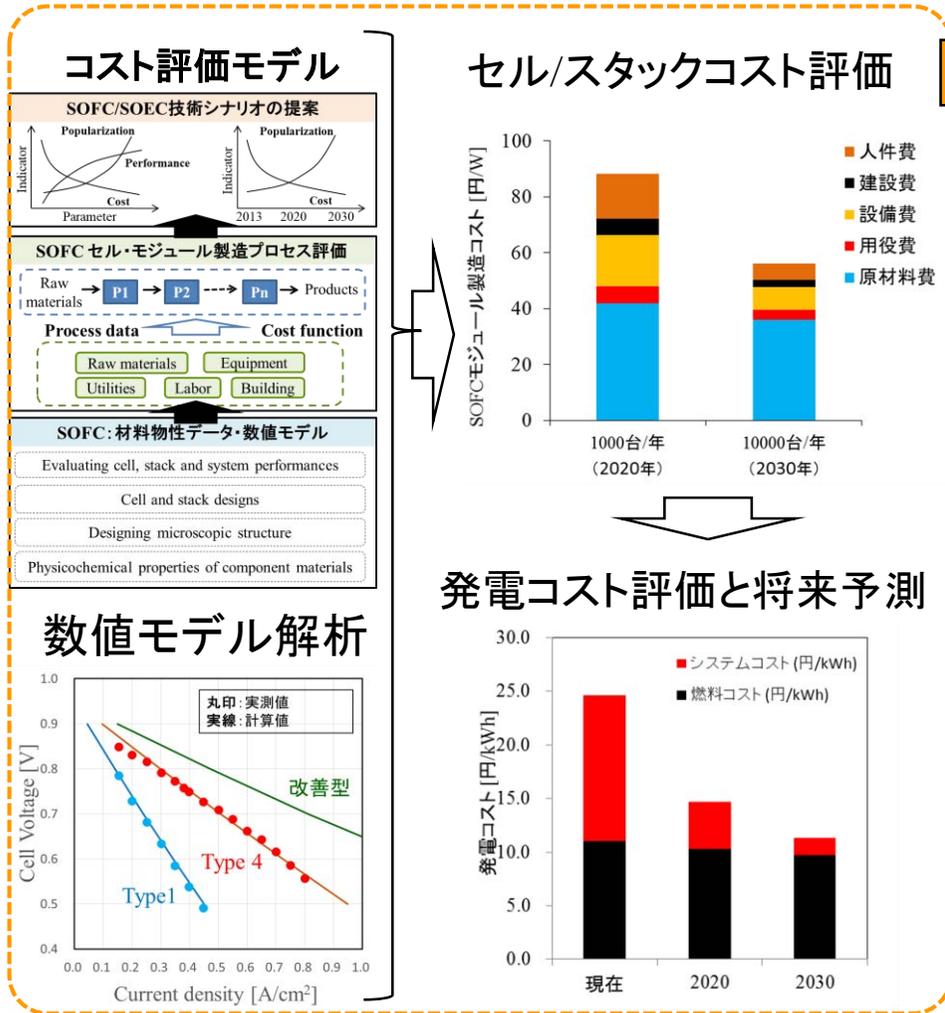
# まとめ

- (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・モビリティ及び市民生活支援の各分野における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、脱炭素社会を目指す再生可能電源の大量導入と系統安定性の問題の解決を挙げており、モビリティ部会とも連携しつつ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。

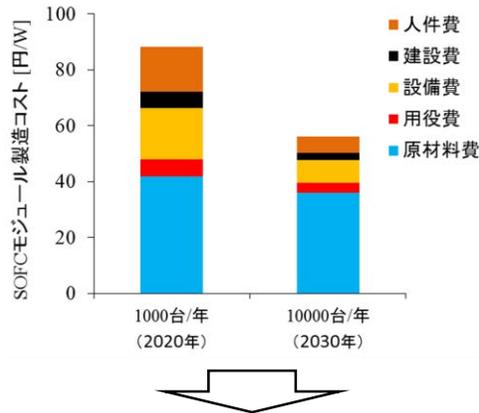
# エネルギーシステムのコストエンジニアリング

## 【コスト評価手法の汎用化の取り組み】

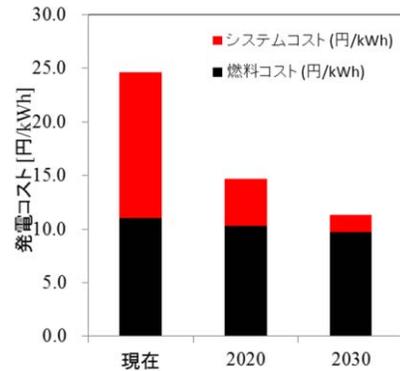
SOFC・SOECシステムの数値モデル解析を併用した性能・コストの統合的な評価



### セル/スタックコスト評価

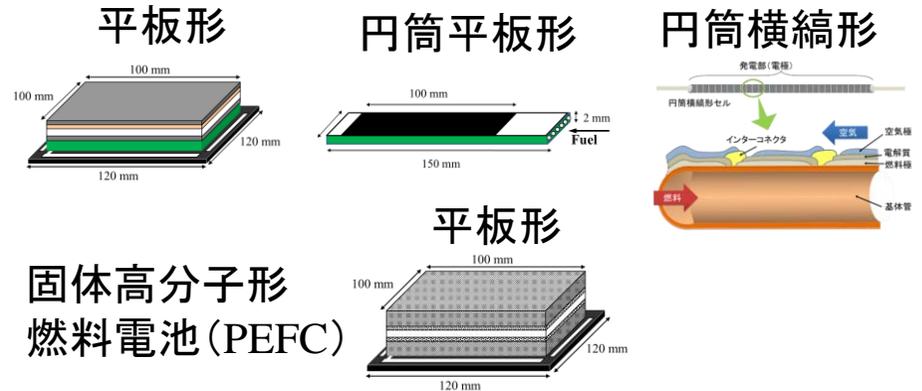


### 発電コスト評価と将来予測



## コスト評価手法の汎用化の推進

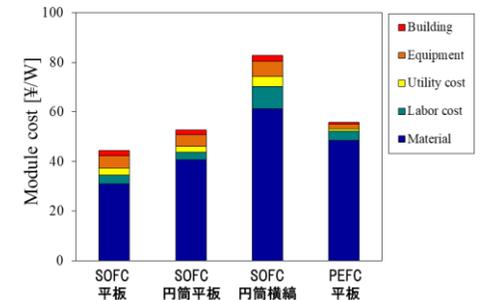
### 固体酸化物形燃料電池 (SOFC)



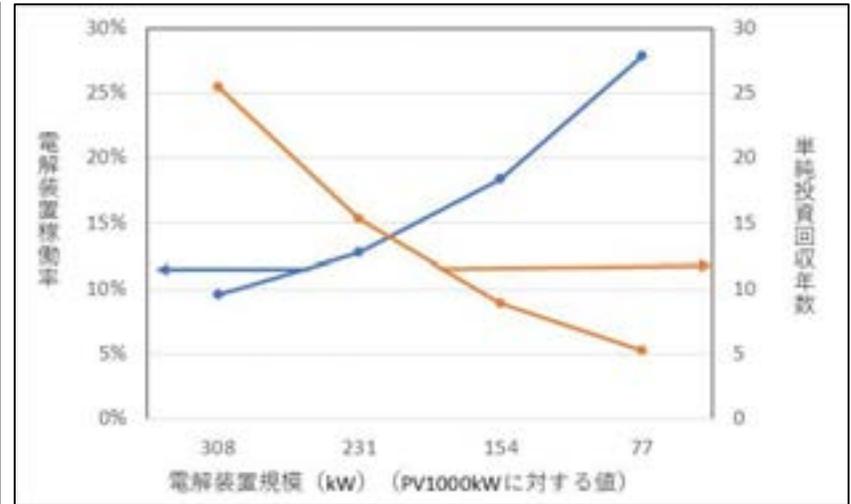
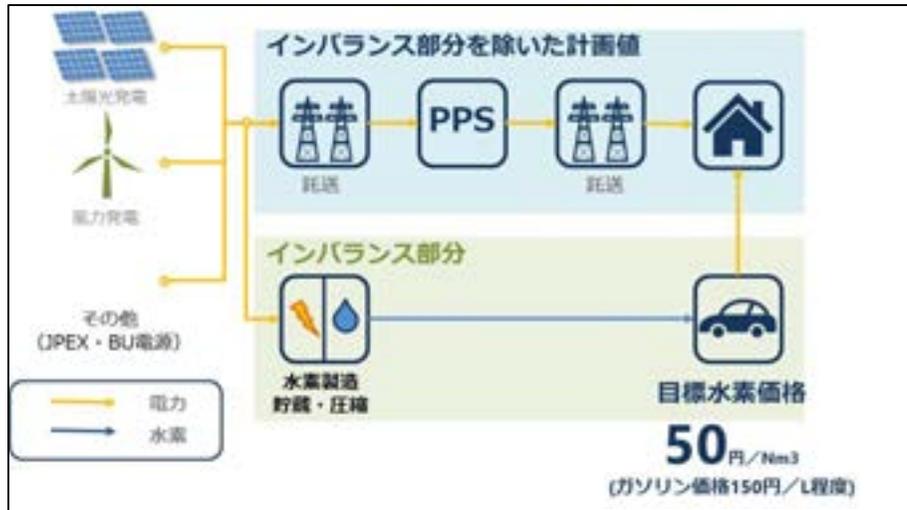
様々なデザイン・材料・システムへの拡張を実施

➡ 将来の燃料電池導入シナリオへの柔軟な対応が可能

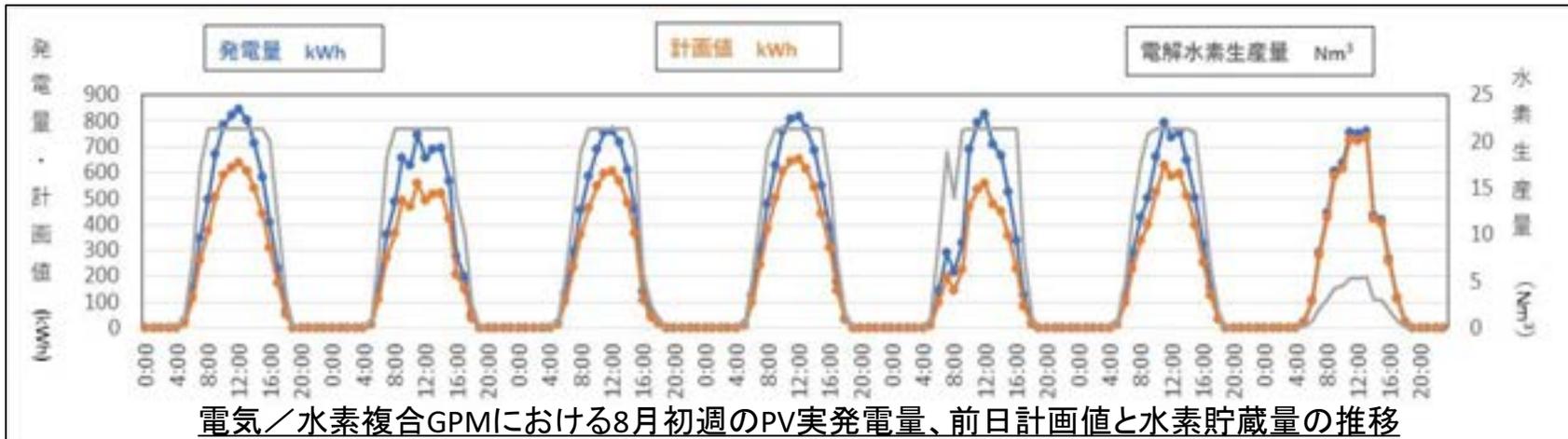
➡ 水蒸気電解への展開も可能



# 都市OSを考慮した電力システムと水素関連技術の導入効果の評価



PV発電量の予測誤差⇒インバランス⇒電解水素⇒電気と水素の複合生産システム＝コプロダクション⇒  
 電気と水素の生産比率を調整⇒投資回収年数5.4年



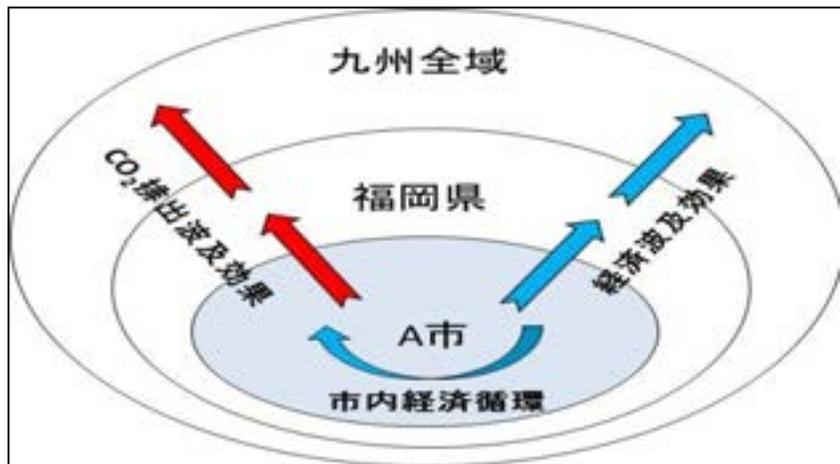
電気／水素複合GPMにおける8月初週のPV実発電量、前日計画値と水素貯蔵量の推移

## 【まとめ】: 主な研究進捗・成果、今後の課題、達成への道筋 (1ページ限定)

目標: 都市OSアセスメントのフレームワーク開発

### 【脱炭素と国民生活安定化・現状の進捗】

- 都市OSアセスメントのツールを用いた本事業のA市のエネルギー・経済・環境・イノベーション等項目への効果を定量評価

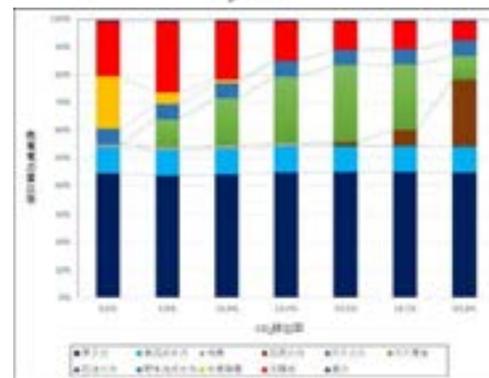


### 【今後の課題、達成への道筋】

- 本事業のA市への波及効果を都市OS評価モデルに代入し、A市の都市OS上の改善度を評価する。

### 【新たに創出される価値】

- 本事業に適した他市、地域への普及促進イノベーションの実現



CO<sub>2</sub>排出量制約が65.4%から16.4%の間では、PV出力が抑制されているが、有効利用されていない。  
 ➔ 燃料電池自動車への水素供給や複合発電への混焼を検討  
 ➔ PV出力抑制が起き、燃料電池自動車への水素供給が可能な地点を探索し、フェーズ2、3において実証実験等を検討する。