「水素・燃料電池プロジェクト評価・課題共有ウィーク」発表資料

「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発／SOFCに関して用途の実用化、商品性向上に向けた調査事業」

－シミュレーション解析によるエネルギーインフラ評価・解析－

平成31年6月21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

調査テーマ:
「SOFCに関して用途の実用化、商品性向上に向けた調査事業ーシミュレーション解析によるエネルギーインフラ評価・解析ー」

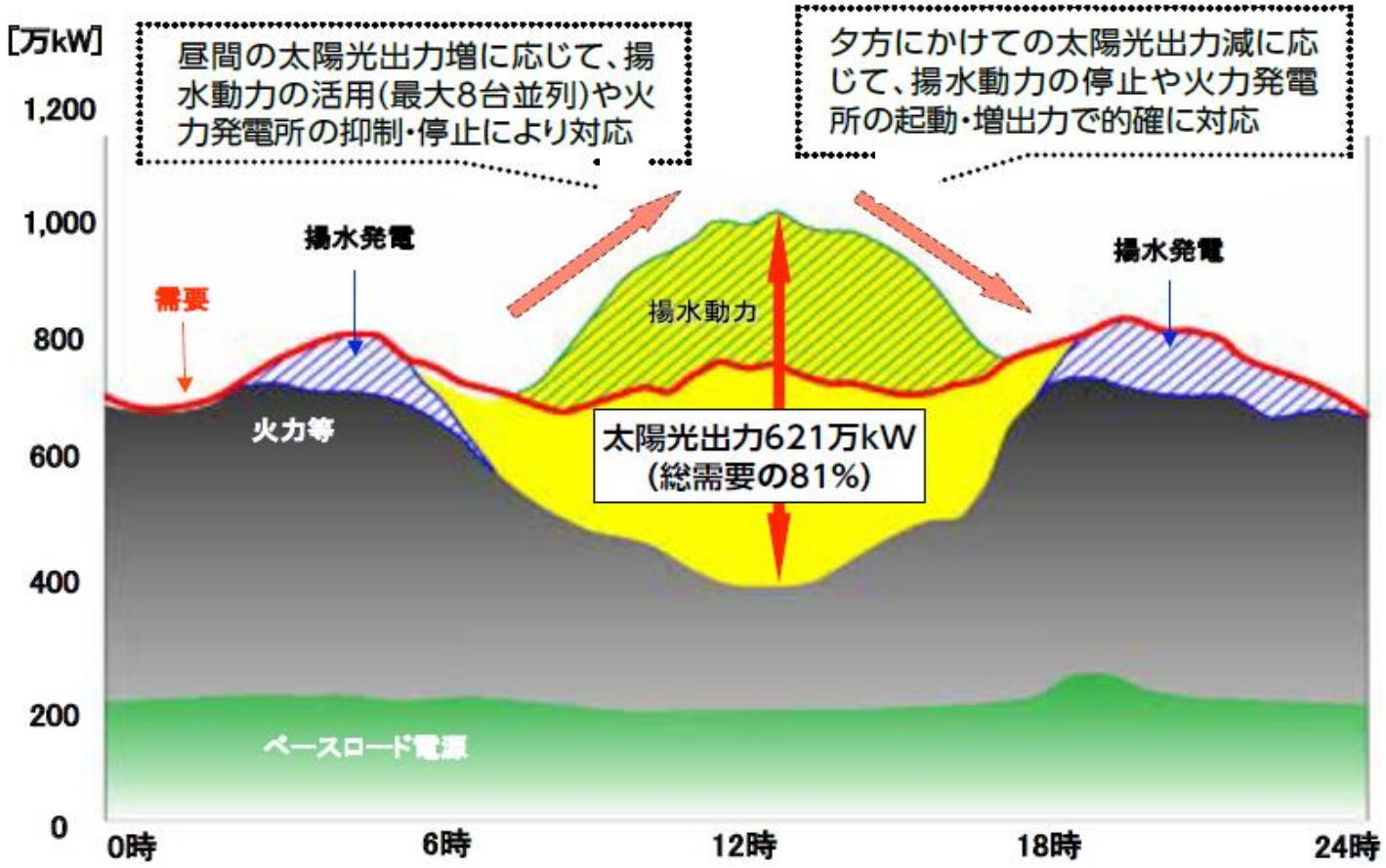
本調査の目標

本事業では、エネルギーシステム全体の評価の観点からSOFCが競争力を有するための発電効率と部分負荷特性、負荷追従性、設備コストと寿命に関する仕様を定量化する。特に、最新の状況を考慮し、電力システムの運営上想定される需給調整面における問題点に着目し、SOFCの導入による電力システム全体の経済性と系統安定性の向上度を評価することにより、SOFCの技術開発目標と共に、新たなSOFCの価値を創造することを目的とする。

このSOFCの価値とは、「電力システムにおけるインバランスの補償に対する貢献度」、「電力システムの経済性向上への貢献度」「電力システムのCO2排出量に対する貢献度」等であり、この各項目を定量的に明らかにする。

再生可能電源の大量導入と系統安定性

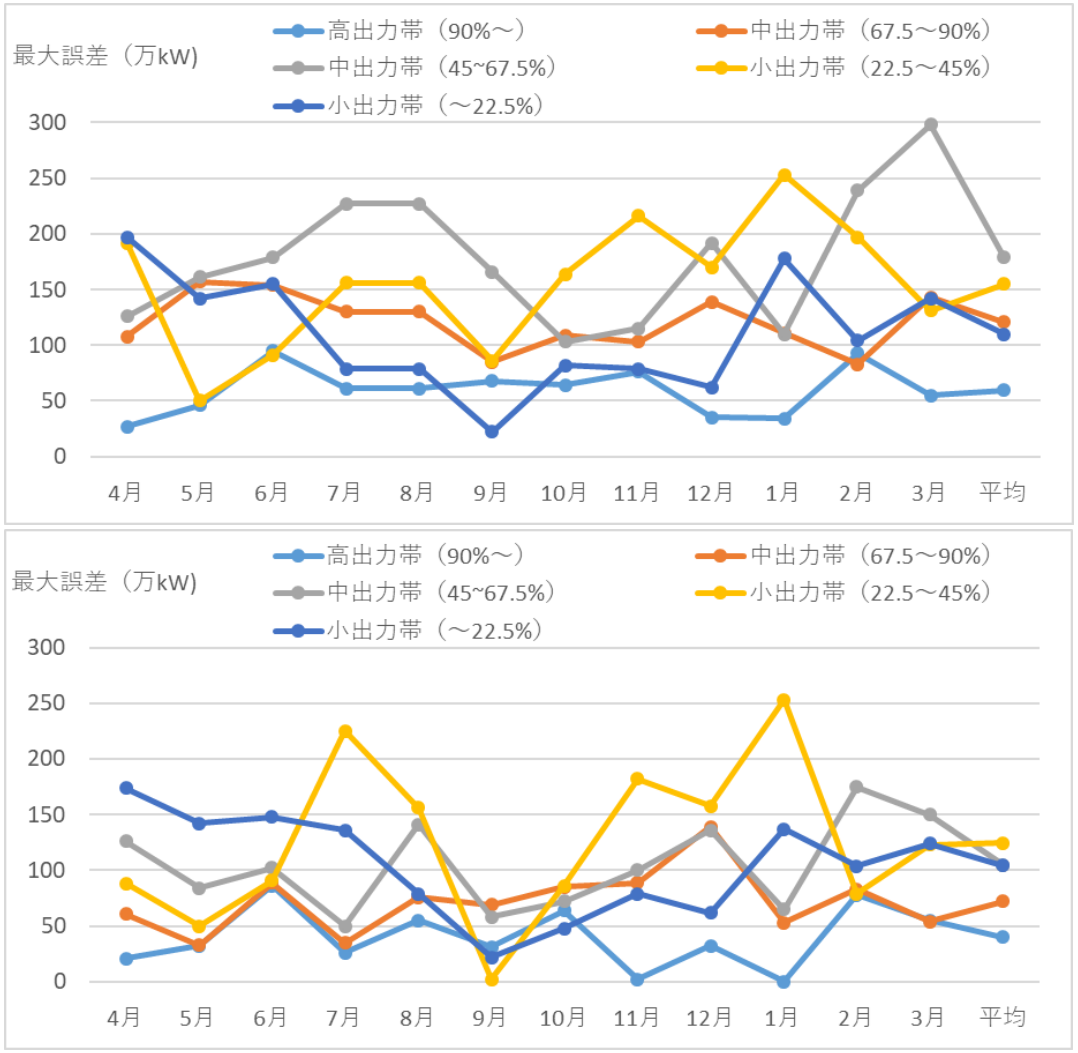
- 再エネ電源が大量連系した電力供給エリアでは、系統運用上の課題が顕在化している。



Supply and demand in Kyushu Electric Power Company,(May 3rd, 2018)

KYUDEN GROUP environmental report 2018, Kyushu Electric Power Company, 2018.6.27

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）

経済産業省　系統ワーキンググループ第9回，再エネ出力制御に関する具体運用方法の基本的な考え方（九州電力），http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/keitou_wg/pdf/009_01_00.pdf

（参考）需給調整市場における商品区分

2018年11月第7回需給調整市場小委員会資料

商品の要件（変更後）

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve-for FIT (RR-FIT)
指令・制御	オフライン（自端制御）	オンライン（LFC信号）	オンライン（EDC信号）	オンライン（EDC信号）	オンライン
監視	オンライン（一部オフラインも可※2）	オンライン	オンライン	オンライン	専用線：オンライン 簡易指令ｼｽﾃﾑ：ｵﾌﾗｲﾝ※2,5
回線	専用線※1 （監視がオフラインの場合は不要）	専用線※1	専用線※1	専用線※1	専用線　または 簡易指令システム
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内※3	45分以内
継続時間	5分以上※3	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)
並列要否	必須	必須	任意	任意	任意
指令間隔	－（自端制御）	0.5～数十秒※4	1～数分※4	1～数分※4	30分
監視間隔	1～数秒※2	1～5秒程度※4	1～5秒程度※4	1～5秒程度※4	未定※2,5
供出可能量（入札量上限）	10秒以内に出力変化可能な量（機器性能上のGF幅を上限）	5分以内に出力変化可能な量（機器性能上のLFC幅を上限）	5分以内に出力変化可能な量（オンラインで調整可能な幅を上限）	15分以内に出力変化可能な量（オンラインで調整可能な幅を上限）	45分以内に出力変化可能な量（オンライン(簡易指令システムも含む）で調整可能な幅を上限）
最低入札量	5MW （監視がオフラインの場合は1MW）	5MW※1,4	5MW※1,4	5MW※1,4	専用線：５MW 簡易指令システム：１MW
刻み幅（入札単位）	1kW	1kW	1kW	1kW	1kW
上げ下げ区分	上げ／下げ	上げ／下げ	上げ／下げ	上げ／下げ	上げ／下げ

※1 簡易指令システムと中給システムの接続可否について、サイバーセキュリティの観点から国で検討中のため、これを踏まえて改めて検討。
※2 事後に数値データを提供する必要有り（データの取得方法、提供方法等については今後検討）。
※3 沖縄エリアはエリア固有事情を踏まえて個別に設定。
※4 中給システムと簡易指令システムの接続が可能となった場合においても、監視の通信プロトコルや監視間隔等については、別途検討が必要。
※5 簡易指令システムには上り情報を送受信する機能は実装されていない。現時点ではDRの参入がその大宗を占めることが想定され、エリア需要値の算定に影響は生じないが、今後、VPP等の発電系が接続することでエリア需要の算定精度が低下することが考えられるため、上り情報が不要な接続容量の上限を設ける等の対応策を検討。

提案する方式・方法の内容(2)

モデル開発について

2030年を想定し、SOFCの部分負荷特性を考慮した

①特定街区内または集合住宅内のミクロなエネルギーシステムモデル、

②市町村地域レベルのエネルギー供給システムを表すモデル

③一般電気事業者を想定した系統全体の電力システムモデル

の三通りのエネルギーシステムモデルを開発し、トータルシステムとしての費用構造を分析する。

調整力の供給について

1. 火力発電等による調整力

- 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. 市場調達による外部調整力

- 需給調整市場が開かれた状況を想定
- DRや自家発などの外部資源から調整力を調達可能とする
- 調達価格:4000[円/(kW・年)]

バックキャストのためのシナリオ分析

3つの要素

① 市場調達と水素関連技術の有無
- 基本ケース
- 市場調達ケース
- 水素導入ケース

② CO_2排出量制約
- 制約なしの場合から、計算結果がInfeasibleとなるまで徐々に強くする

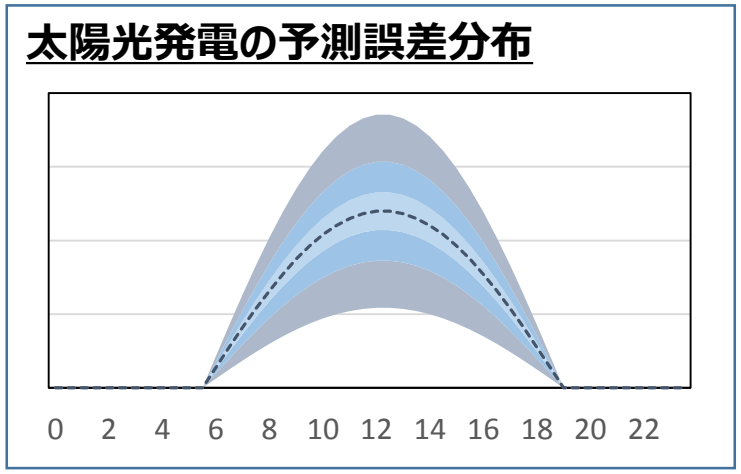
③ 再生可能エネルギー導入量
- 現状ケースと増加ケースを考える

	太陽光発電	風力発電
再エネ現状ケース	707万kW	46万kW
再エネ増加ケース	1245万kW	147万kW

現状ケース:2016年値を使用
増加ケース:接続承諾済量を参照

必要調整力に関する制約

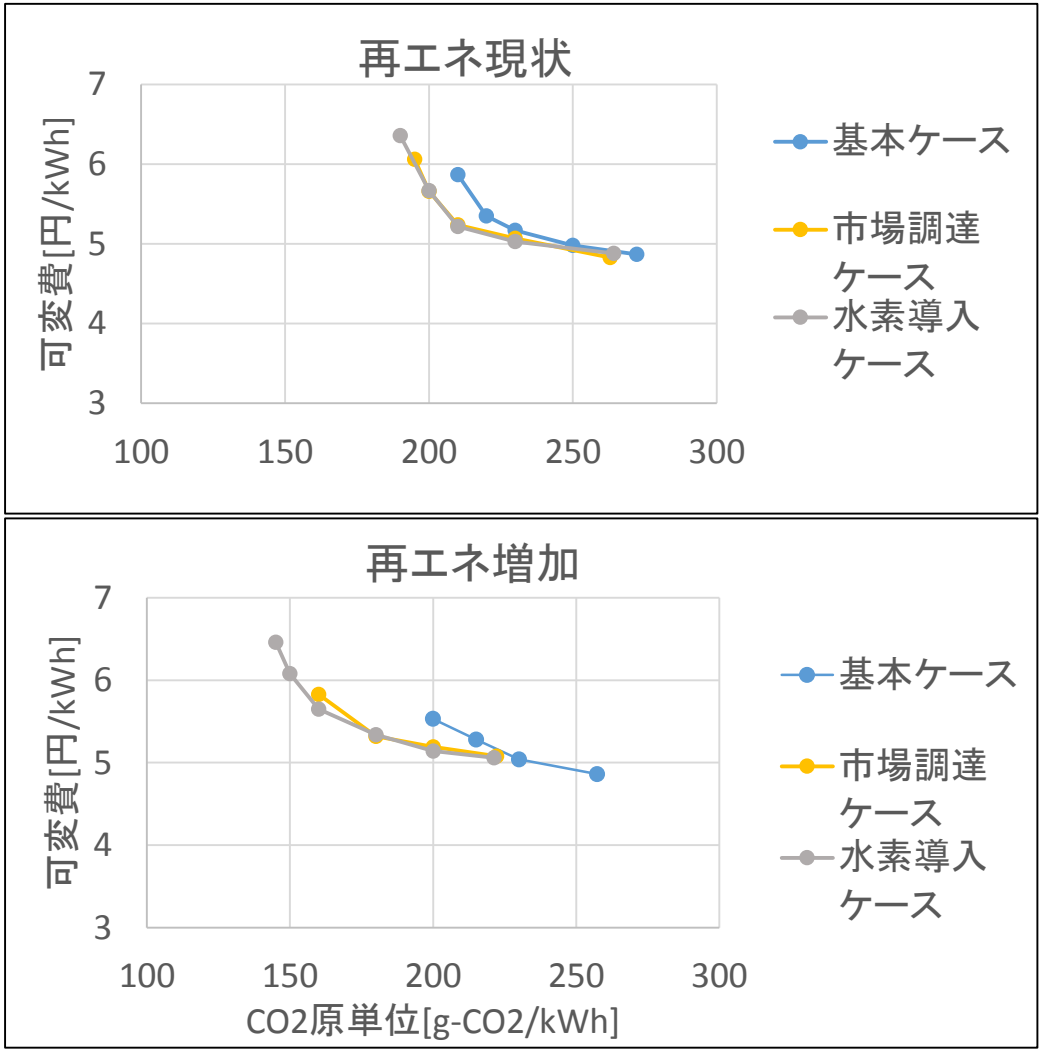
- 予測誤差が生じた際に、誤差分を補償できるだけの調整力を他資源によって確保する。
- 必要調整力量は想定される予測誤差によって決まる。
- 高橋（2017）の先行研究を参考に、予測誤差をラプラス分布で近似。
- $P(dx) = exp(-\sqrt{2}|dx|/\sigma)/\sqrt{2}\sigma$



Scenarios	Error band	Probability
a	$2.1\sigma \sim 4.1\sigma$	2.1%
b	$0.8\sigma \sim 2.1\sigma$	13.6%
c	$0 \sim 0.8\sigma$	34.1%
d	$-0.8\sigma \sim 0$	34.1%
e	$-2.1\sigma \sim -0.8\sigma$	13.6%
f	$-4.1\sigma \sim -2.1\sigma$	2.1%

各シナリオでのCO_2原単位とコスト
ーバックキャストへの示唆1ー

- 総コストを総需要量で割った発電単価を計算
- 市場・水素導入によってCO_2排出原単位を低減
- 九電の2013年度CO_2排出原単位:613[g-CO_2/kWh]
- 可変費は6.5[円/kWh]程度まで上昇



結果1：調整力有（10円／（ΔkW・h））

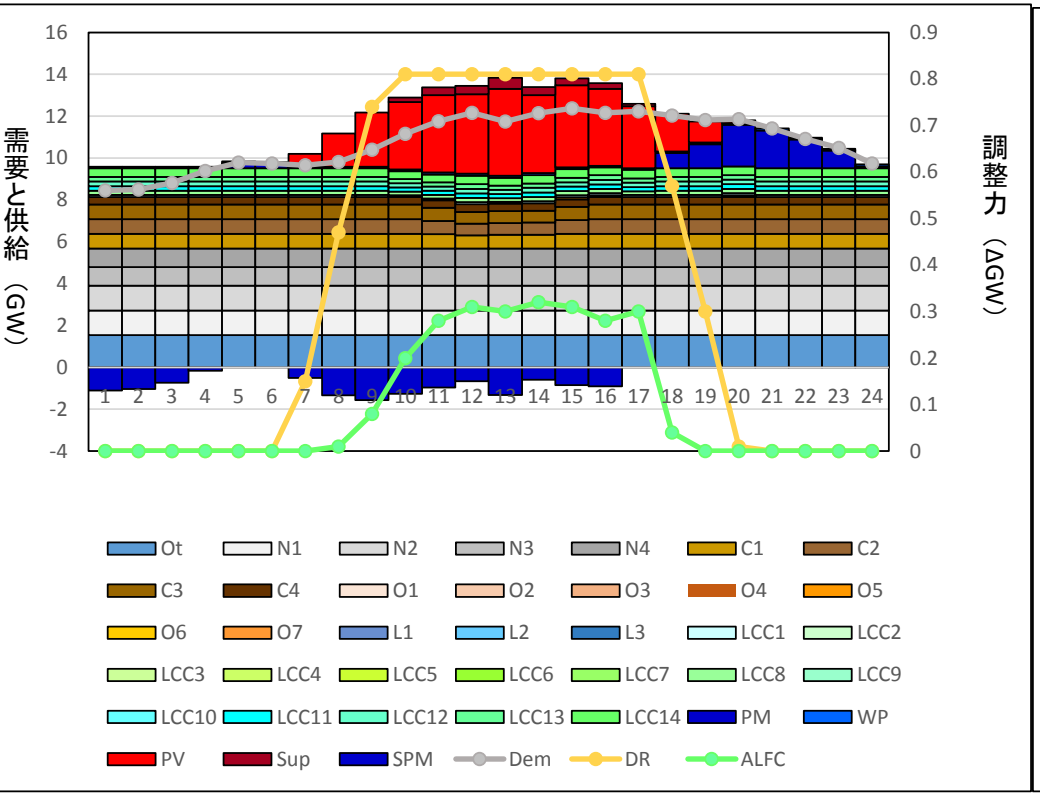


図2-2(a)：中間期平日

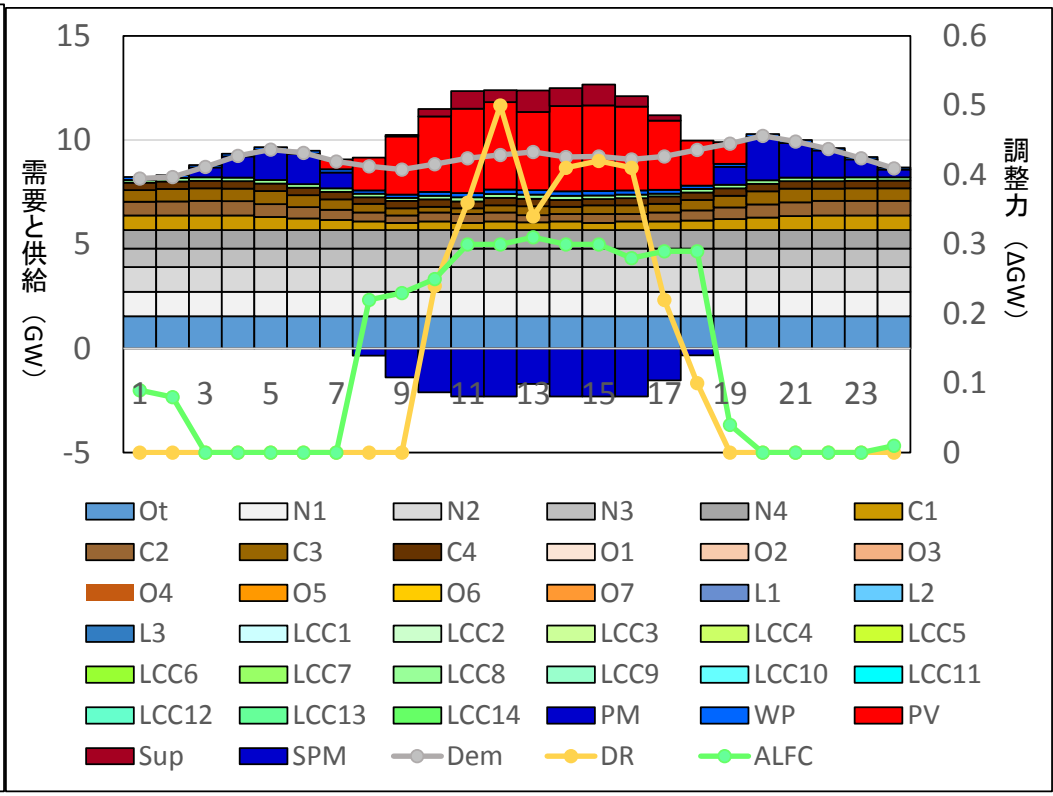
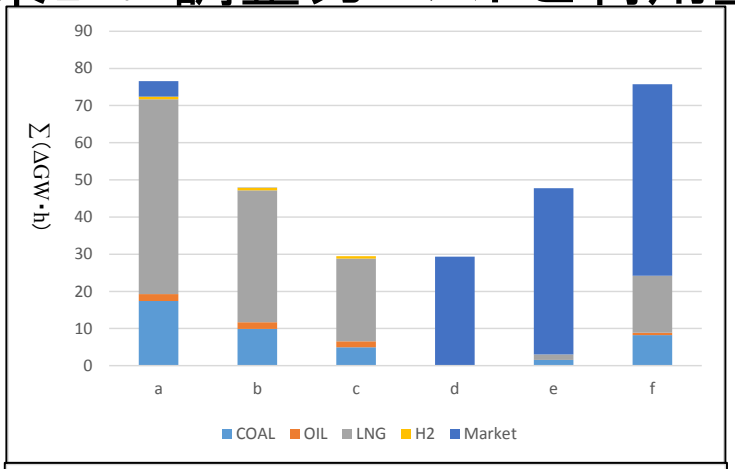
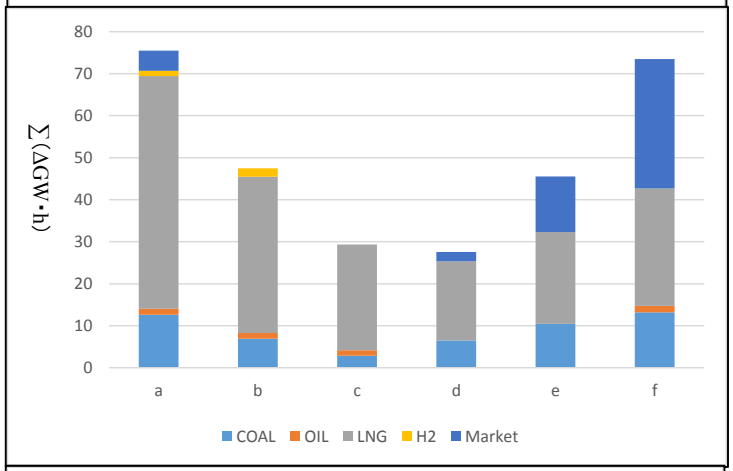


図2-2(b)：中間期休日

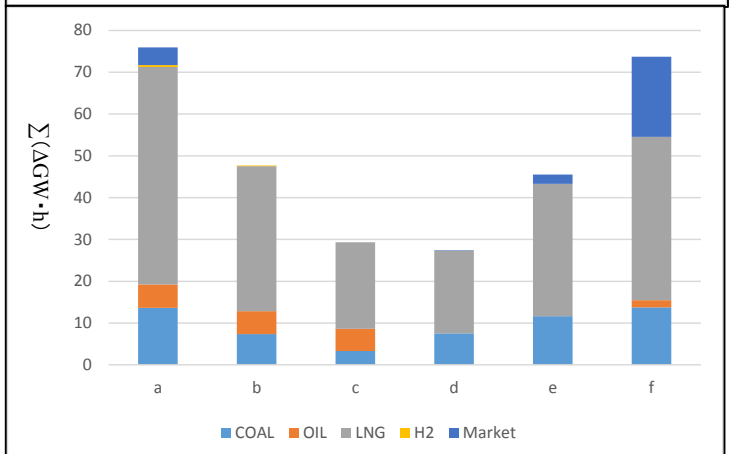
結果1-4：調整力コストと利用量の関係



結果1-1：5円／（ΔkW・h）



結果1-2：10円／（ΔkW・h）



結果1-3：15円／（ΔkW・h）

提案する方式・方法の内容(2)

モデル開発について

2030年を想定し、SOFCの部分負荷特性を考慮した

①特定街区内または集合住宅内のミクロなエネルギーシステムモデル、

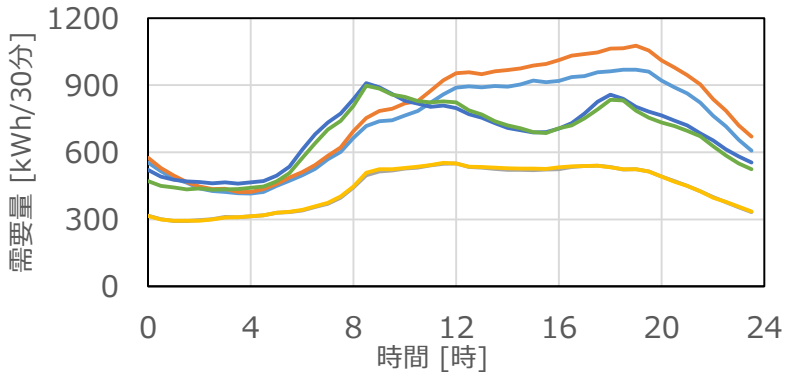
②市町村地域レベルのエネルギー供給システムを表すモデル、

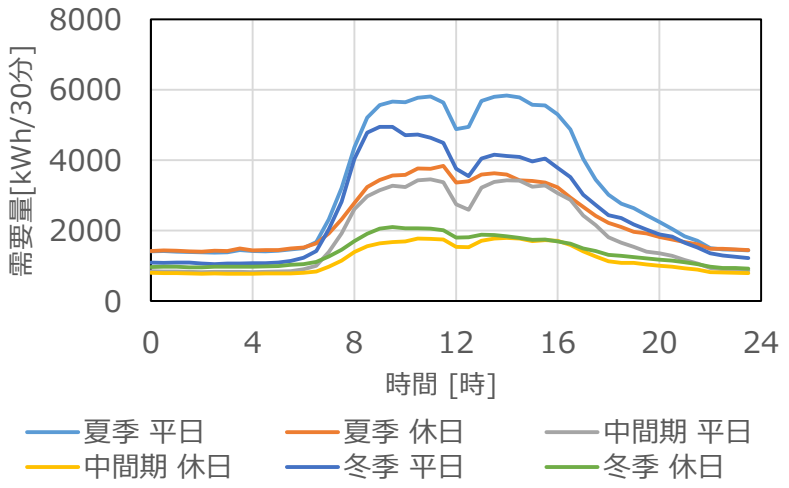
③一般電気事業者を想定した系統全体の電力システムモデル、

の三通りのエネルギーシステムモデルを開発し、トータルシステムとしての費用構造を分析する。

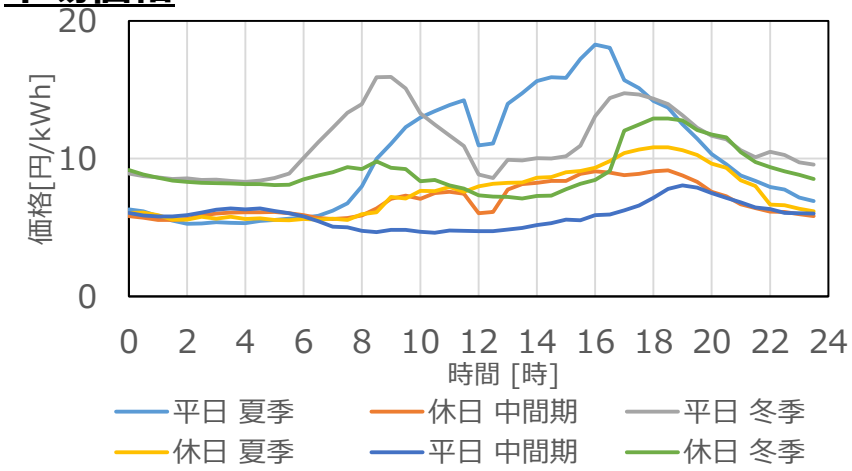
地域電力小売り事業における入力データ例

低圧需要量(↑)と高圧需要量(↓)

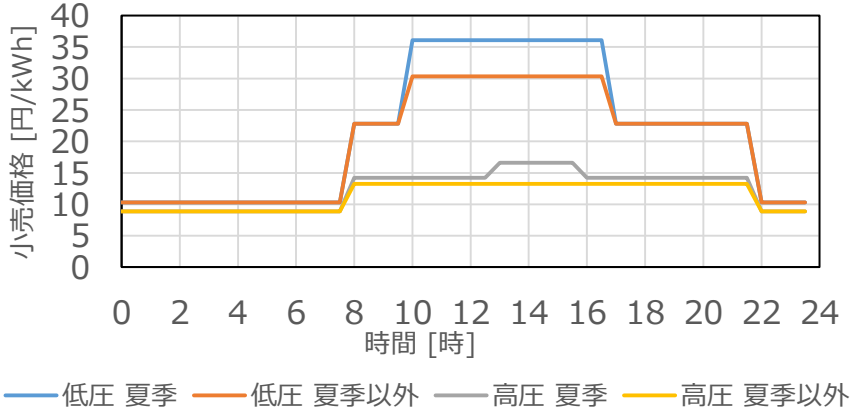




市場価格

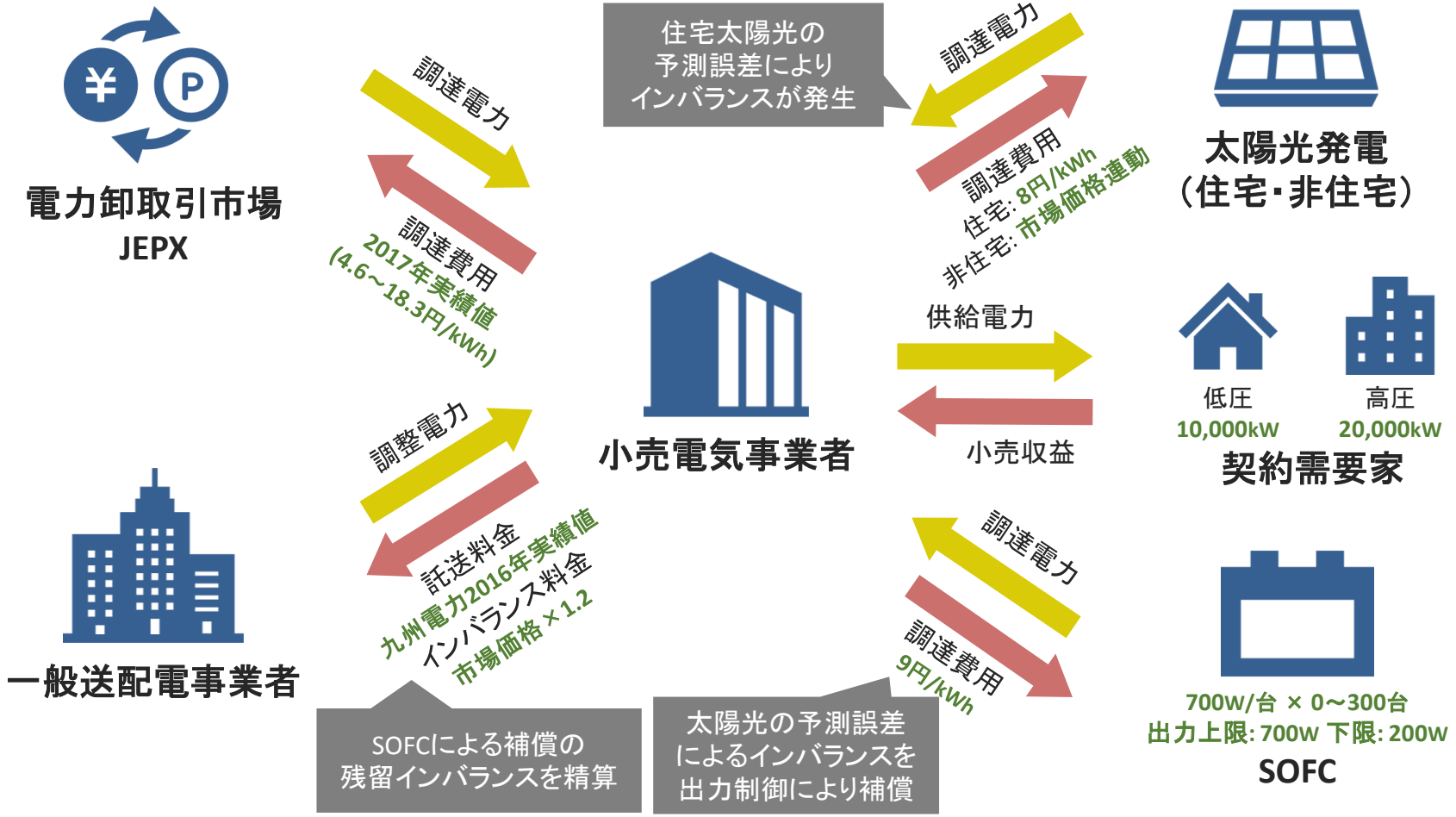


地域電力事業者の電力小売価格

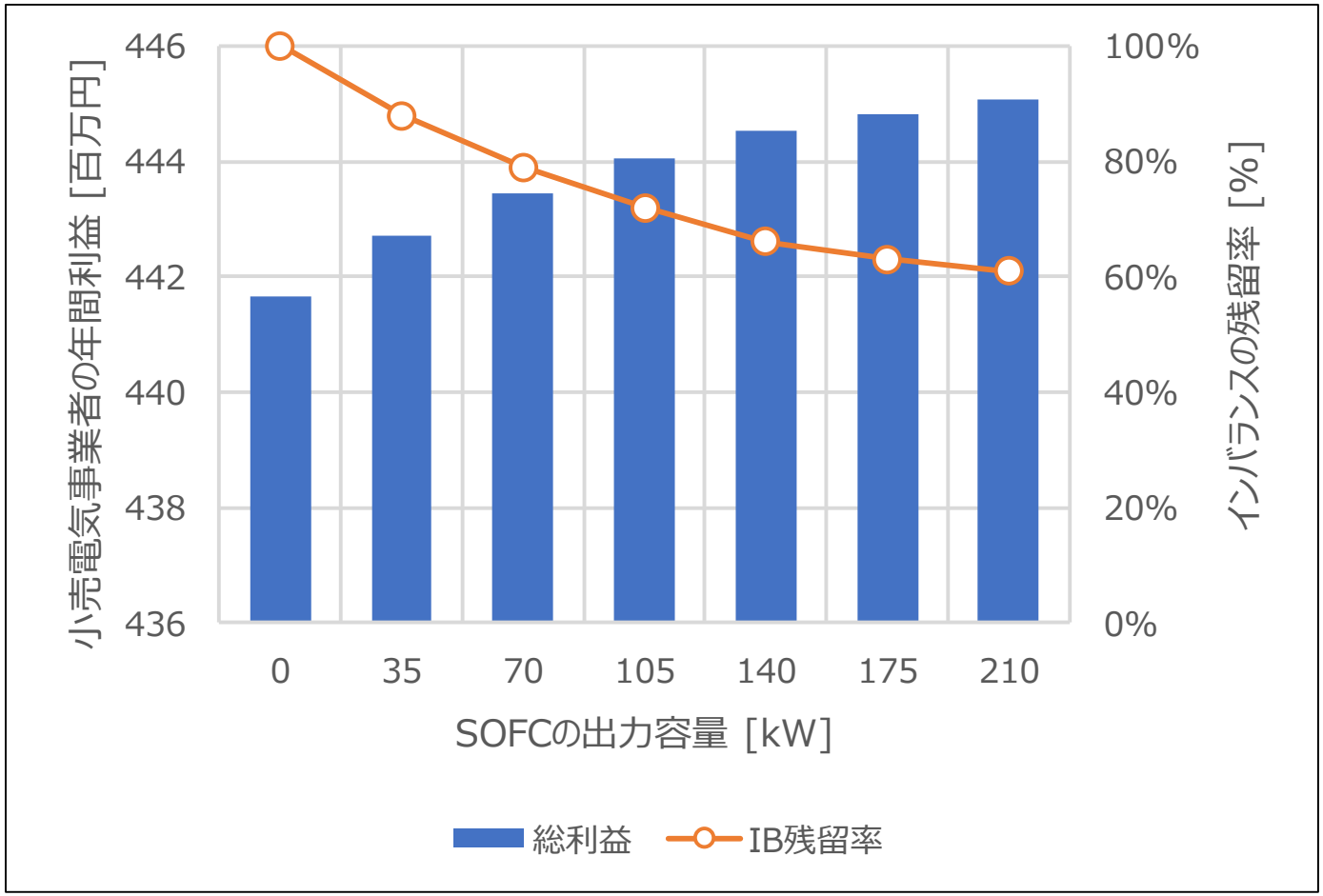


SOFC市町村レベル需給モデルの概要

目的	地域の小売電気事業者によるFIT終了後の太陽光発電とSOFCの活用の事業性評価
モデル概要	■ 卒FIT後の住宅用PVを調達する際の予測誤差を、SOFCの出力制御により補償することで、インバランスを抑制。 ■ 住宅用PVの予測誤差をラプラス分布に基づき6つの確率帯に離散化。 ■ 小売電力事業者の利潤の期待値が最大となるSOFCの運転パターンを推計。

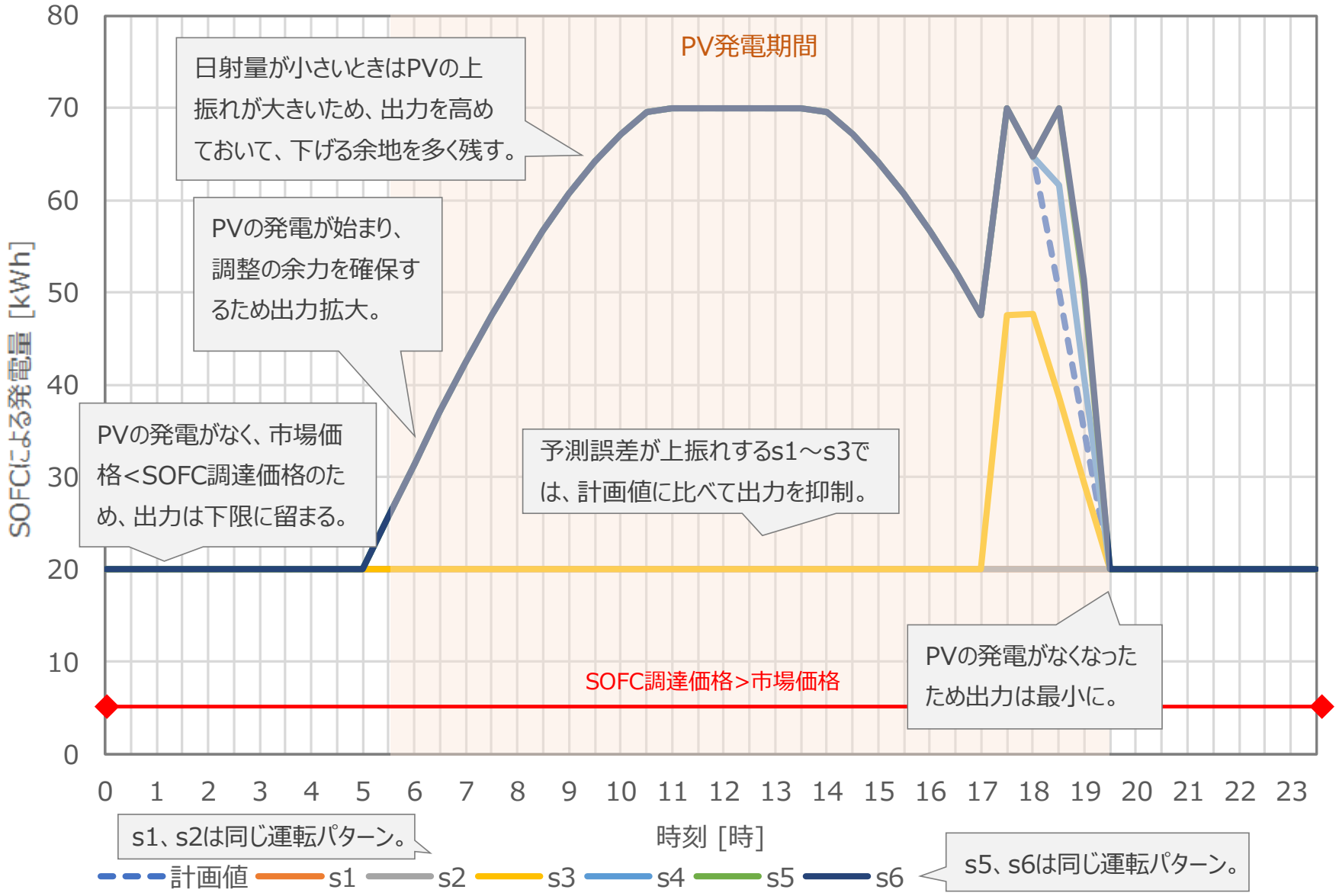


地域電力システムにおけるSOFC導入効果とその利用法（1）

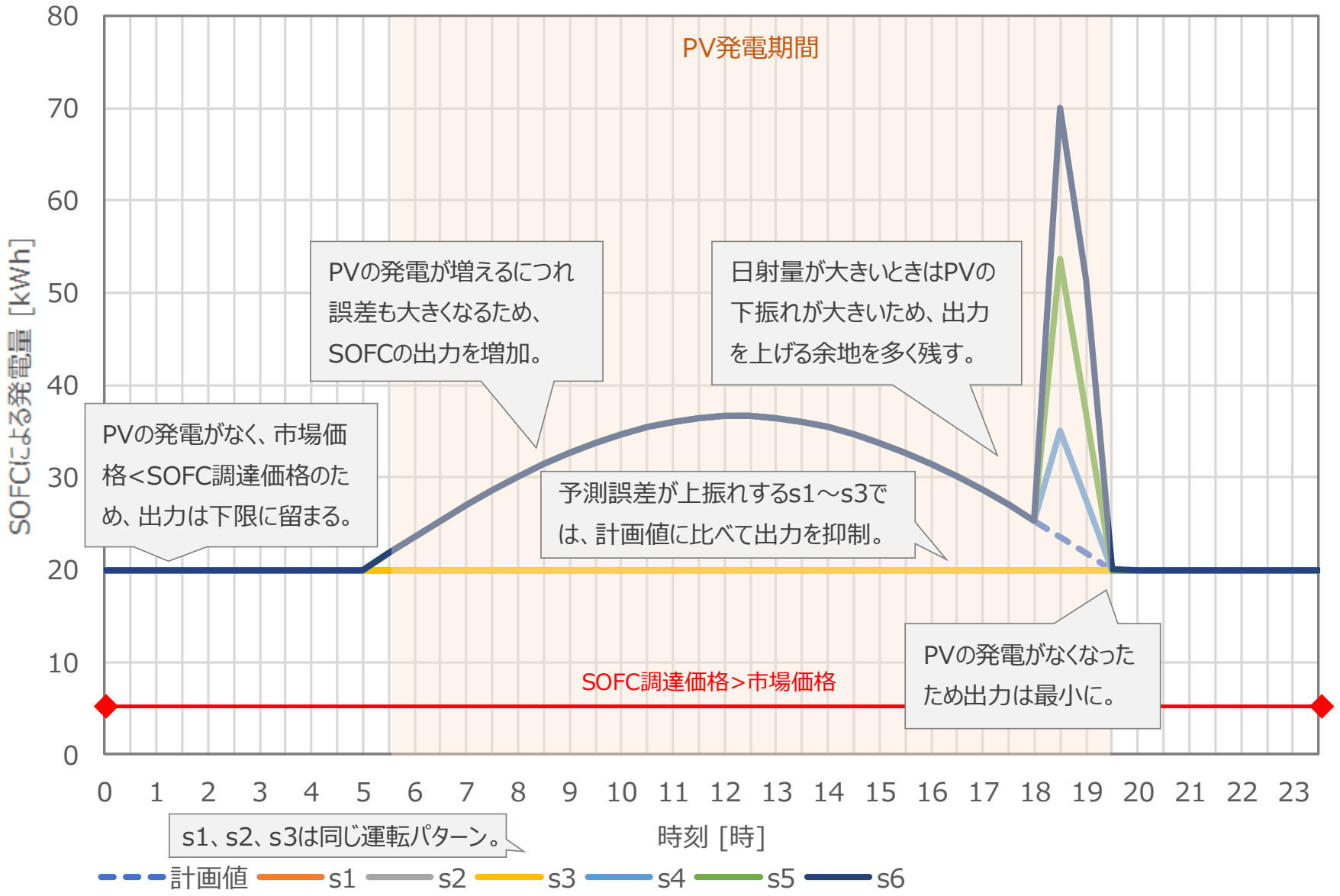


出力容量別の小売電気事業者の利益とインバランス残留率

中間期・休日・日射量小


80
70
60
50
40
30
20
10
0
SOFCによる発電量 [kWh]
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
時刻 [時]
PV発電期間
日射量が小さいときはPVの上振れが大きいため、出力を高めておいて、下げる余地を多く残す。
PVの発電が始まり、調整の余力を確保するため出力拡大。
PVの発電がなく、市場価格<SOFC調達価格のため、出力は下限に留まる。
予測誤差が上振れするs1～s3では、計画値に比べて出力を抑制。
SOFC調達価格>市場価格
PVの発電がなくなったため出力は最小に。
s1、s2は同じ運転パターン。
計画値
s1
s2
s3
s4
s5
s6
s5、s6は同じ運転パターン。

中間期・休日・日射量大


PV発電期間
PVの発電が増えるにつれ誤差も大きくなるため、SOFCの出力を増加。
日射量が大きいときはPVの下振れが大きいため、出力を上げる余地を多く残す。
PVの発電がなく、市場価格<SOFC調達価格のため、出力は下限に留まる。
予測誤差が上振れするs1～s3では、計画値に比べて出力を抑制。
PVの発電がなくなったため出力は最小に。
SOFC調達価格>市場価格
s1、s2、s3は同じ運転パターン。
SOFCによる発電量 [kWh]
時刻 [時]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
計画値
s1
s2
s3
s4
s5
s6

提案する方式・方法の内容(2)

モデル開発について

2030年を想定し、SOFCの部分負荷特性を考慮した

①特定街区内または集合住宅内のミクロなエネルギーシステムモデル、

②市町村地域レベルのエネルギー供給システムを表すモデル←質問1（②のモデルは一般化が困難）

③一般電気事業者を想定した系統全体の電力システムモデル、

の三通りのエネルギーシステムモデルを開発し、トータルシステムとしての費用構造を分析する。

特定街区内または集合住宅内のエネルギーシステムモデルにおけるSOFCの利用

- 本モデルにおいては、SOFCの所有者は一般消費者、運用者は当該街区でエネルギーマネジメントをおこなう事業者を想定する。

一例：燃料電池と太陽光発電を所有する住宅街区の場合

- 二酸化炭素ポテンシャルが高い
- 一括受電の場合、電力融通による全体システムの高効率化とコスト削減

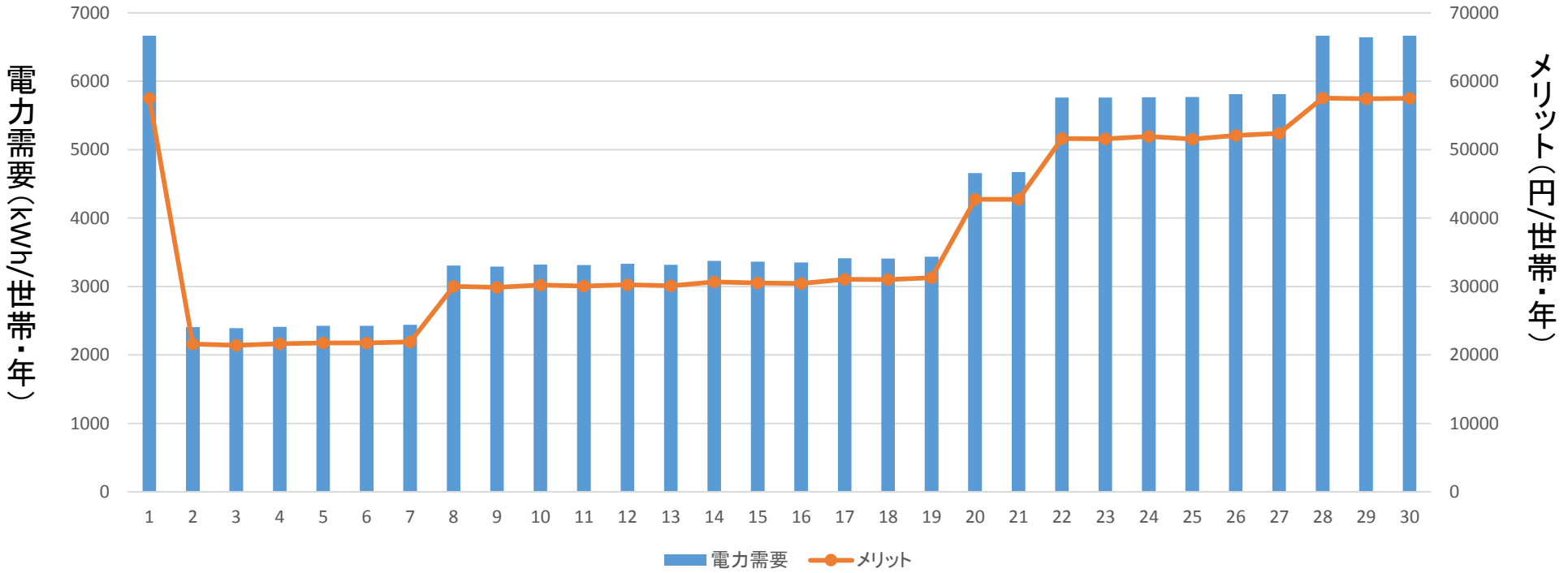
⇒新たな価値の創造

SOFCと屋根置PVを所有する住宅街区

HEMS，CEMSによるSOFC運転と電力融通のマネジメント

- 上記のような住宅街区または集合住宅におけるSOFCを含むエネルギーマネジメントシステムのモデルを開発する

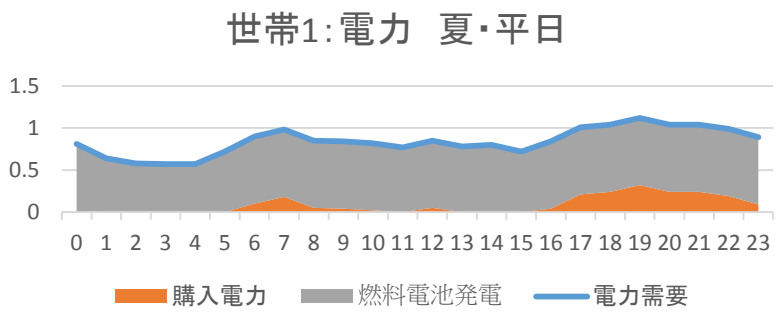
燃料電池導入による年間メリット(円/世帯・年)

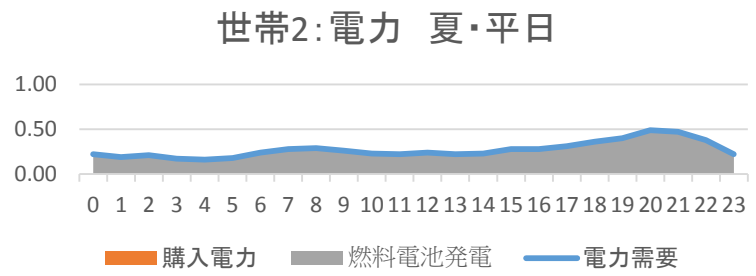


電力需要の大きさに応じて、年間世帯あたり2万～6万円強のメリットが出る。
これは投資回収年数にして、50～15年となる。(100万円の場合)

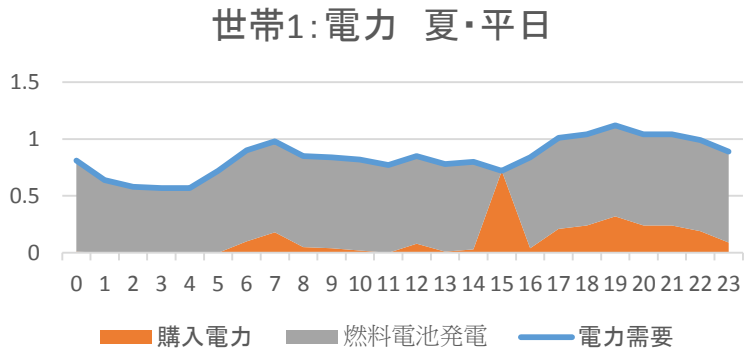
各家庭の電力需要の満たし方

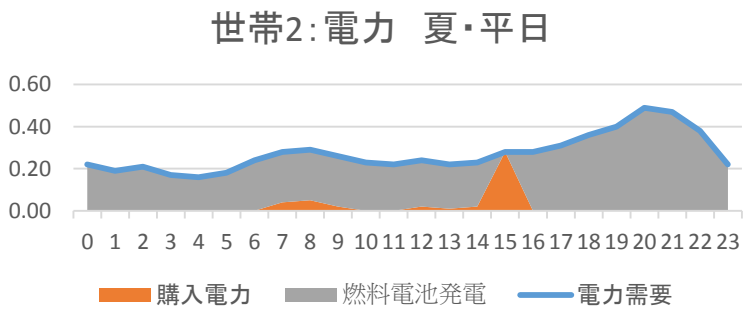
調整力市場なし





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。

今後の予定

(1) ①のミクロな電力システムモデルを③の旧一般電気事業者の電力システムモデルとの連携は以下のようにする。近々に開かれる予定の需給調整市場における調整力コストを①と③で共通のパラメータとして、①でSOFCの運転の変化を見ると共に、③ではSOFC等外部からの調整力購入量を評価し、SOFCにとって、適正な調整力コストを見出し、電力システムへの貢献度を評価する。

(2) ②の地域電力システムモデルの入力データ、前提条件を整備し、精度を上げる。

(3) ここでのモデル分析から決まる部分負荷、負荷変動速度の結果を提示し、「固体酸化物形燃料電池の耐久性迅速評価方法に関する基礎研究」と情報交換、意見交換を行い、この負荷変動特性が技術的な実現可能性および製品故障リスクなどとの関係を評価する。