

理研鼎業シンポジウム講演資料

エネルギー安定供給とカーボンニュートラル社会の実現

2022年12月16日

東京大学大学院 工学系研究科 教授
エネルギー総合学連携研究機構 機構長

松橋 隆治

1. エネルギー、社会の課題とその対応策を考える —人間、社会、産業としての対応—

SDGsの文脈から見たエネルギー問題

- i. 気候変動への対応は人類にとって最重要課題の一つである。我々は、2050年までのカーボンニュートラル社会の実現と共に、気候変動への適応策も併せて検討する必要がある。
- ii. 我々は現在、世界平和を脅かす深刻な事態を迎えている。この問題は、エネルギー供給の安定性とも深くかかわっている。
- iii. したがって、カーボンニュートラル（CN）社会の実現や気候変動への適応策と共にエネルギー供給安定性の確保に向けたイノベーションが必要である。

カーボンニュートラルなエネルギーシステムを 実現するための方策

- i. 再生可能エネルギー電源の増加と電化の推進が有力
- ii. CCUS (CO₂の回収、利用、貯留) も炭素燃料を利用しつつ、CO₂排出を削減するために有効
- iii. 安全・安心を確保したうえでの原子力技術の利用も可能性有

エネルギーシステムのセキュリティを 確保するための方策

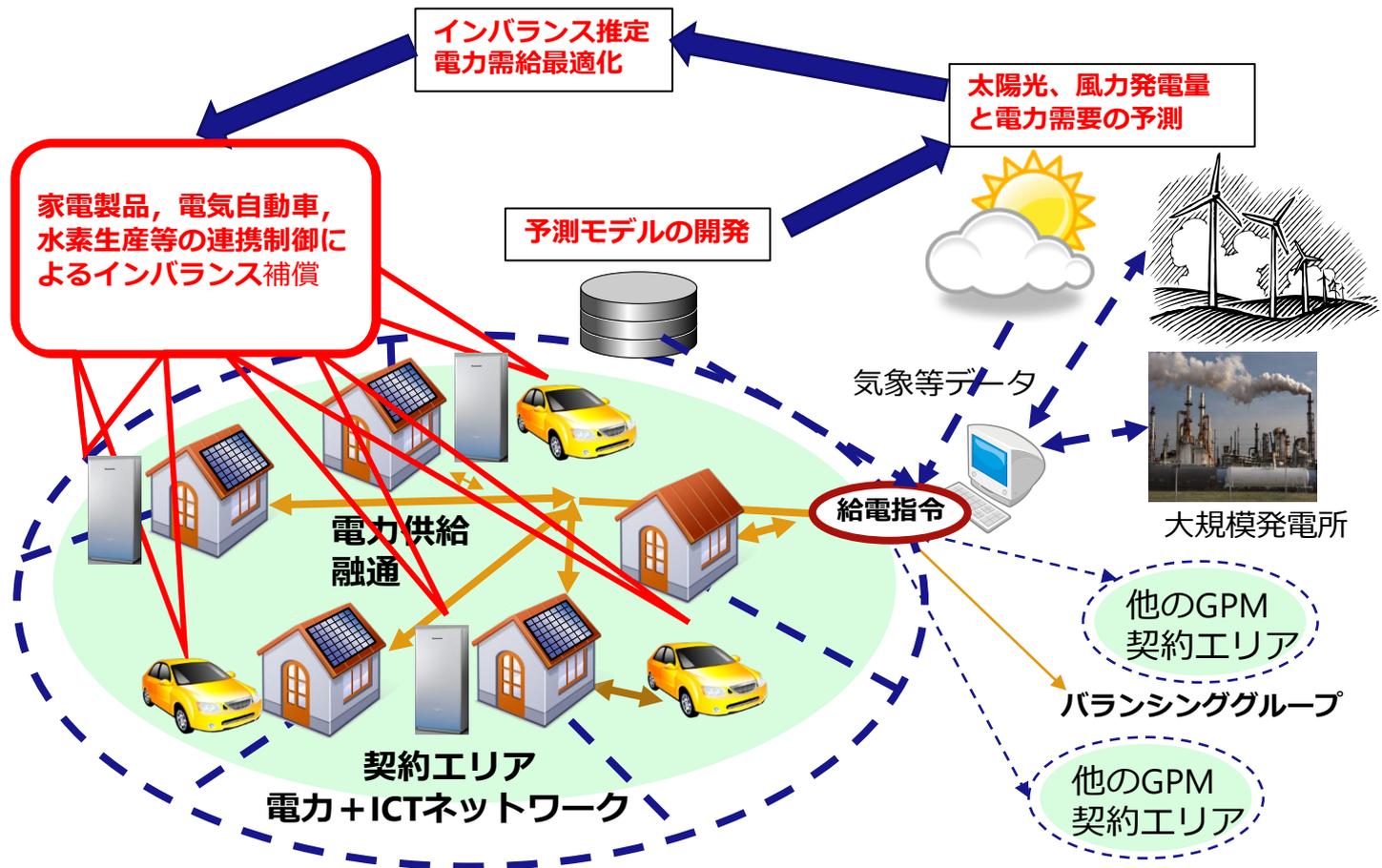
- i. 石油、天然ガス等エネルギー資源輸入の削減
(輸入相手国のカントリーリスクを考慮)
- ii. 再生可能エネルギーを含む国内エネルギー資源の増加
- iii. CO₂ と水素からの炭化水素の合成
(e-fuelやカーボンニュートラルメタン)

エネルギーシステムのセキュリティを維持しつつ カーボンニュートラル化を実現するための方策

- i. 再エネの増加、 e-fuelやカーボンニュートラル (CN)メタンの開発は本目的にかなう
- ii. 同様に、セキュリティとカーボンニュートラルの両者を同時推進できる手段は多い
- iii. 今回発生した事案は、両者を同時推進できる技術の普及を加速すると考察

2. エネルギーシステムのカーボンニュートラル化を実現するためのイノベーションの具体例

エネルギーのカーボンニュートラル化を実現するための Green Power Moderator (GPM) 概念図



エネルギーカーボンニュートラル化のためのSOFCによる調整力提供の実証的研究(1)

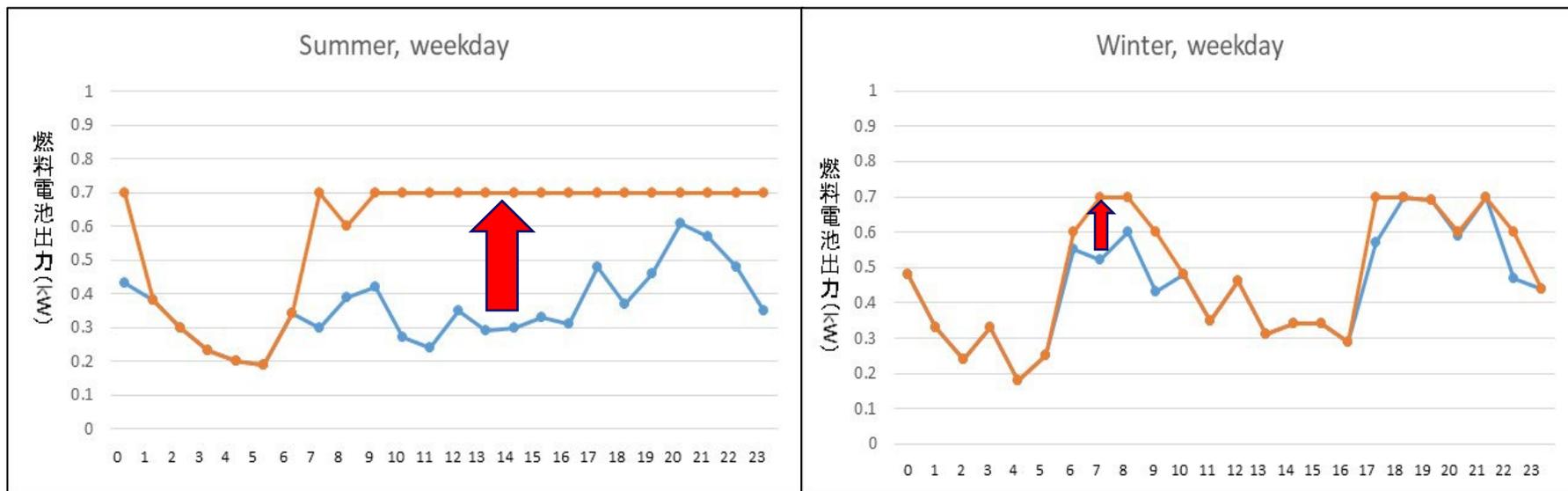
複数の家庭の電力、熱需要データを元に家庭用燃料電池の最適運用モデルを開発



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

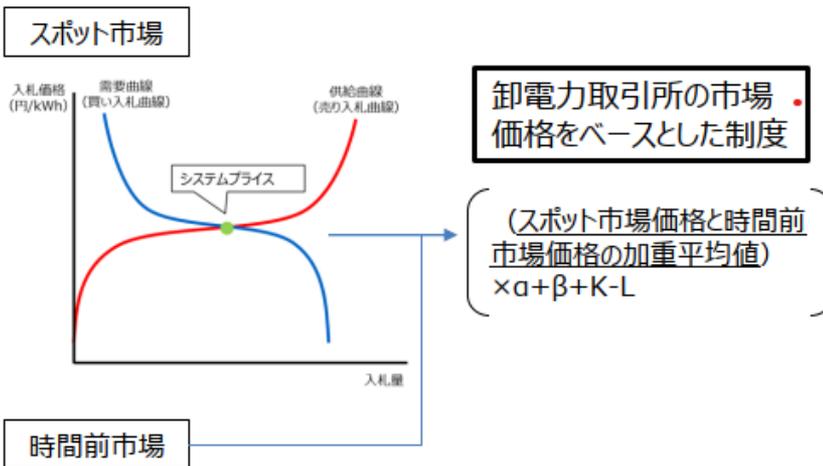


最適化結果より、調整力報酬による上げ代調整力供給を確認し、SOFCの利用率は調整力供給前後で64.2%から78.1%に向上した。(30世帯の1年間通しての値)

2022年度以降の新たなインバランス料金の詳細設計等について

- 資源エネルギー庁の審議会において、需給調整市場の創設に併せて、現行のインバランス料金制度を抜本的に見直すという方針の下、電力・ガス取引監視等委員会では、制度設計専門会合において、新たなインバランス料金制度の詳細設計及び関連情報の公表のあり方について、2019年2月から検討を行い、2020年3月にその内容を取りまとめた。

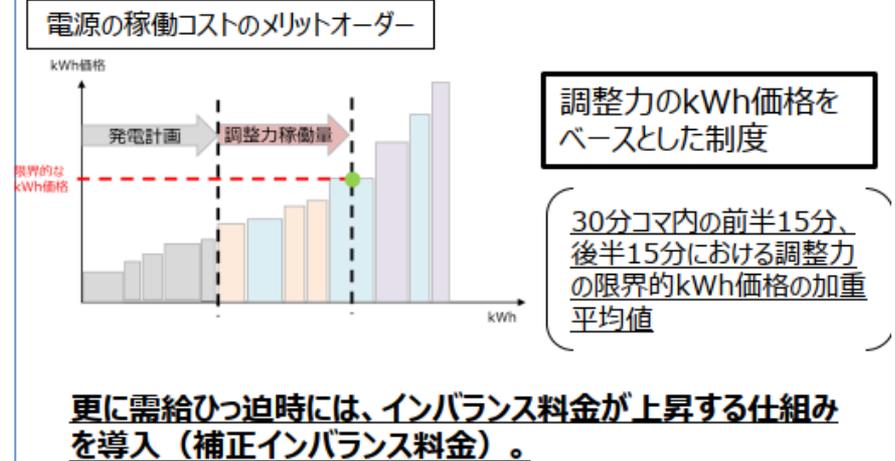
現行のインバランス料金制度



課題：

- ① 系統全体の需給バランスを一致方向に促すインセンティブが弱い。
- ② 一般送配電事業者は、インバランス料金では調整力コストを十分に回収できない。

2022年度以降のインバランス料金制度



対応：

- ① 系統利用者に対し、系統全体の需給バランスを一致方向に促すインセンティブを付与。
- ② 調整力のkWh価格をインバランス料金に反映することで、一般送配電事業者は、需給調整コストを回収可能。

9

エネルギーカーボンニュートラル化のためのSOFCによる 1MWメガソーラーのインバランス補償の実証(2)

表 1 実証に用いたPVシステム

項目	値
太陽光発電アレイ容量	1,311.75kW
緯度	33.968度
経度	135.104度
傾斜角	10度
方位角	真南
パワーコンディショナー容量	1,000kW

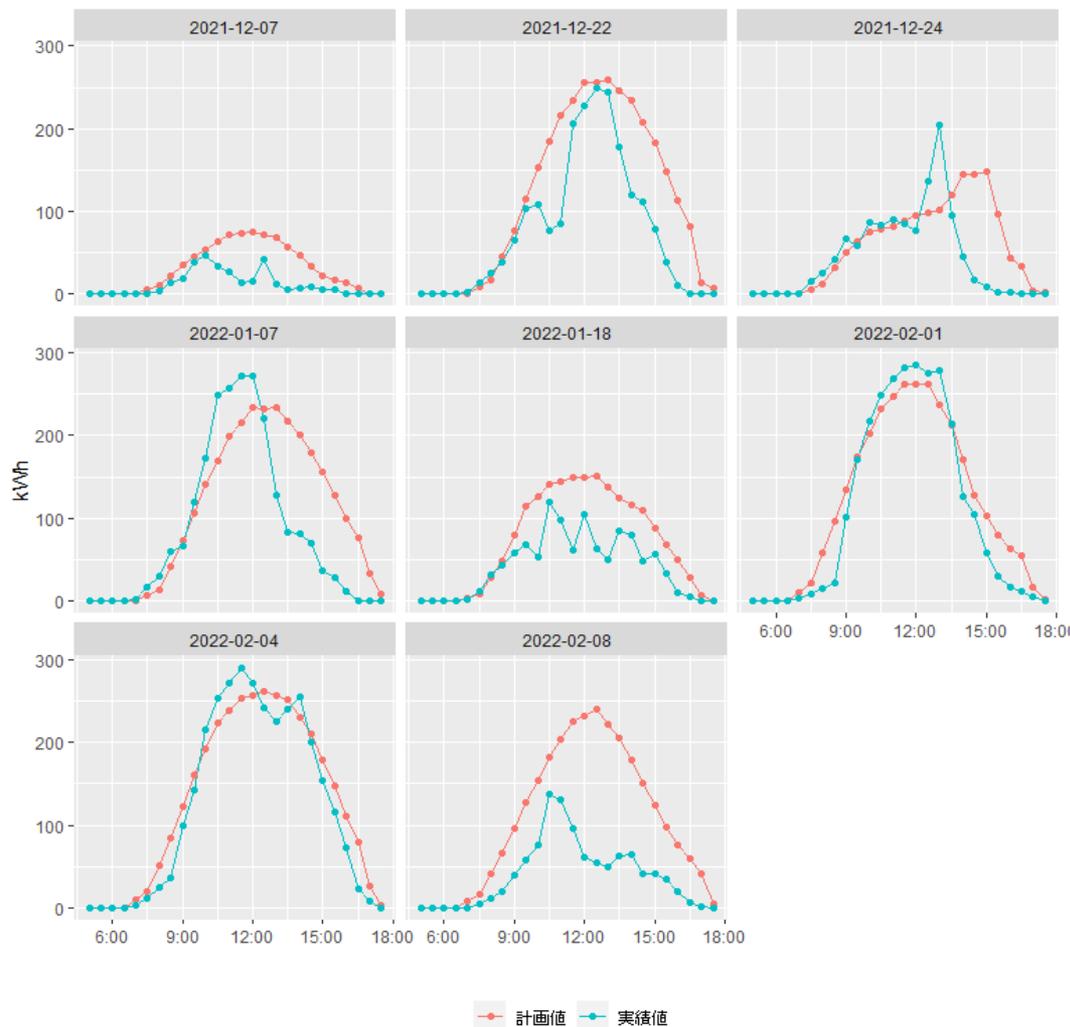


図 4 実証日における太陽光発電の計画値と実測値

エネルギーカーボンニュートラル化のためのSOFCによる 1MWメガソーラーのインバランス補償の実証(3)

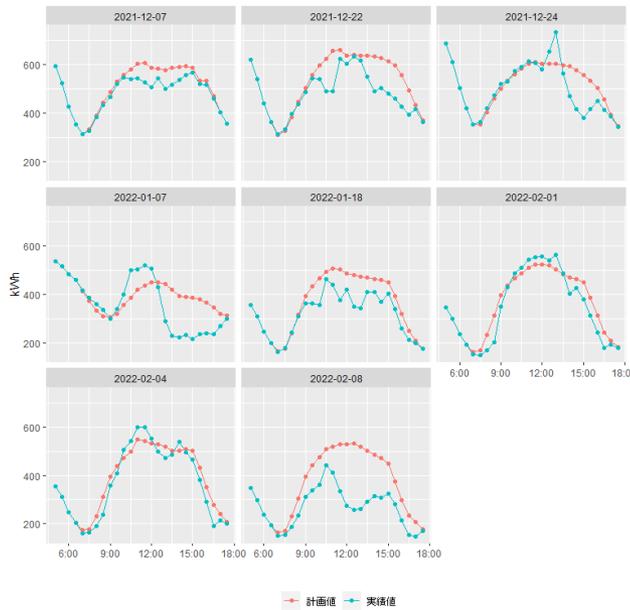


図 5 実証日におけるバランシンググループの計画値と実測値
(インバランス制御なし)

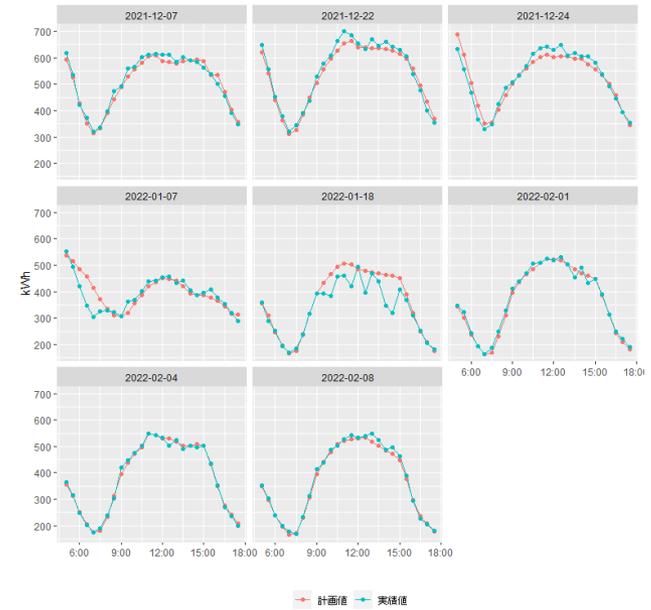


図 6 実証日におけるバランシンググループの計画値と実測値
(インバランス制御あり)

SOFC 型燃料電池「エネファーム type S」(定格出力700W/台であり、発電出力は50～700W) 3,000～3,500台について、機器を外部からの通信によって制御した。

エネルギーカーボンニュートラル化のためのSOFCによる 1MWメガソーラーのインバランス補償の実証(4)

表 3 実証日におけるバランシンググループ（太陽光発電+燃料電池）の誤差指標（インバランス制御なし）

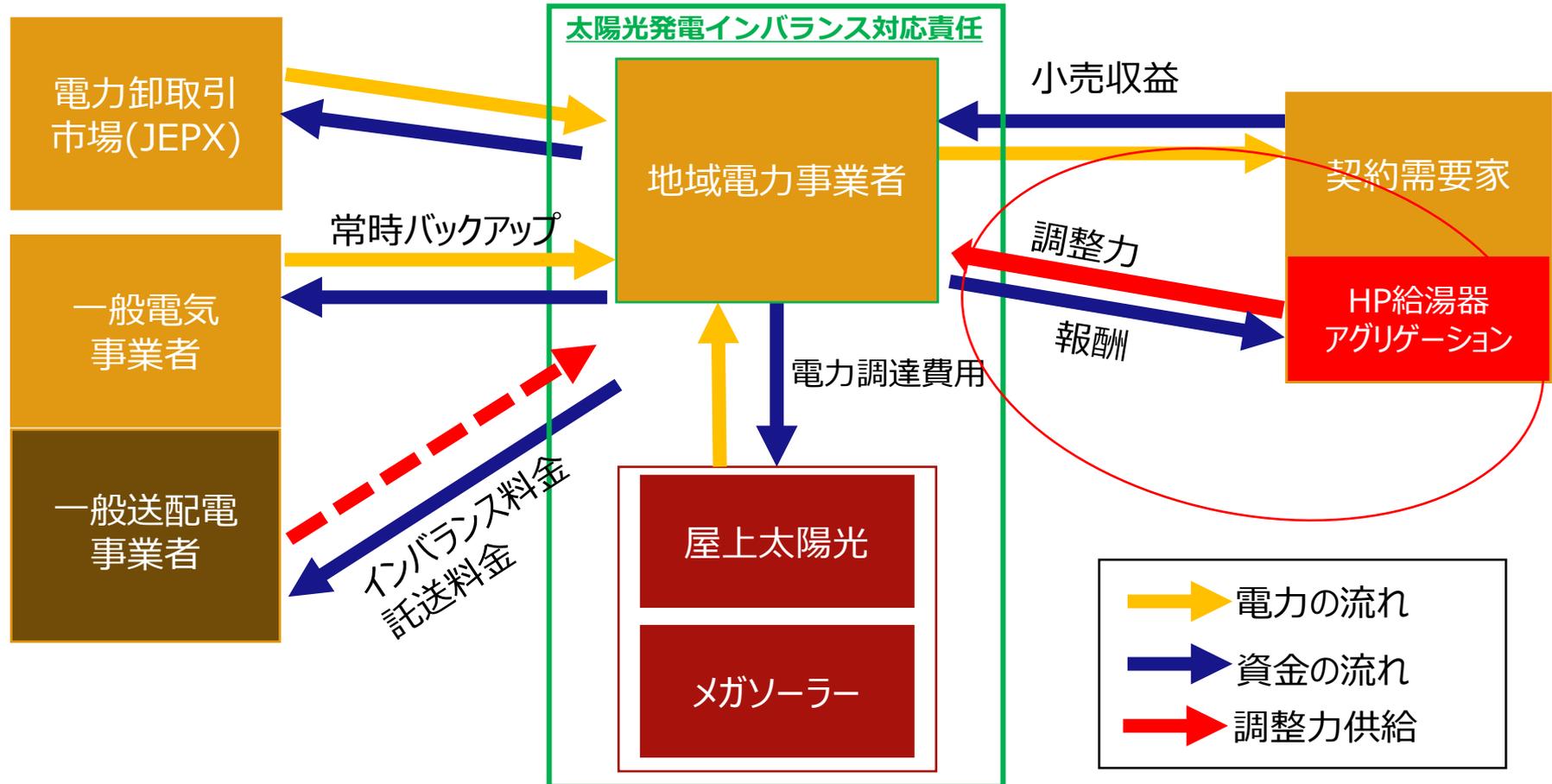
日付	ME	RMSE	MAE	MAPE	RMSPE
2021-12-07	-25.99	25.99	37.85	5.04	0.07
2021-12-22	-51.85	53.57	78.13	11.17	0.16
2021-12-24	-18.10	39.27	65.83	8.46	0.15
2022-01-07	-32.31	67.88	93.08	24.89	0.37
2022-01-18	-45.30	45.93	62.87	13.06	0.18
2022-02-01	-16.61	33.84	45.01	11.99	0.18
2022-02-04	-12.49	31.32	38.66	9.60	0.14
2022-02-08	-99.48	99.48	129.86	36.16	0.47
期間通算	-37.77	49.66	74.89	15.05	0.25

表 4 実証日におけるバランシンググループ（太陽光発電+燃料電池）の誤差指標（インバランス制御あり）

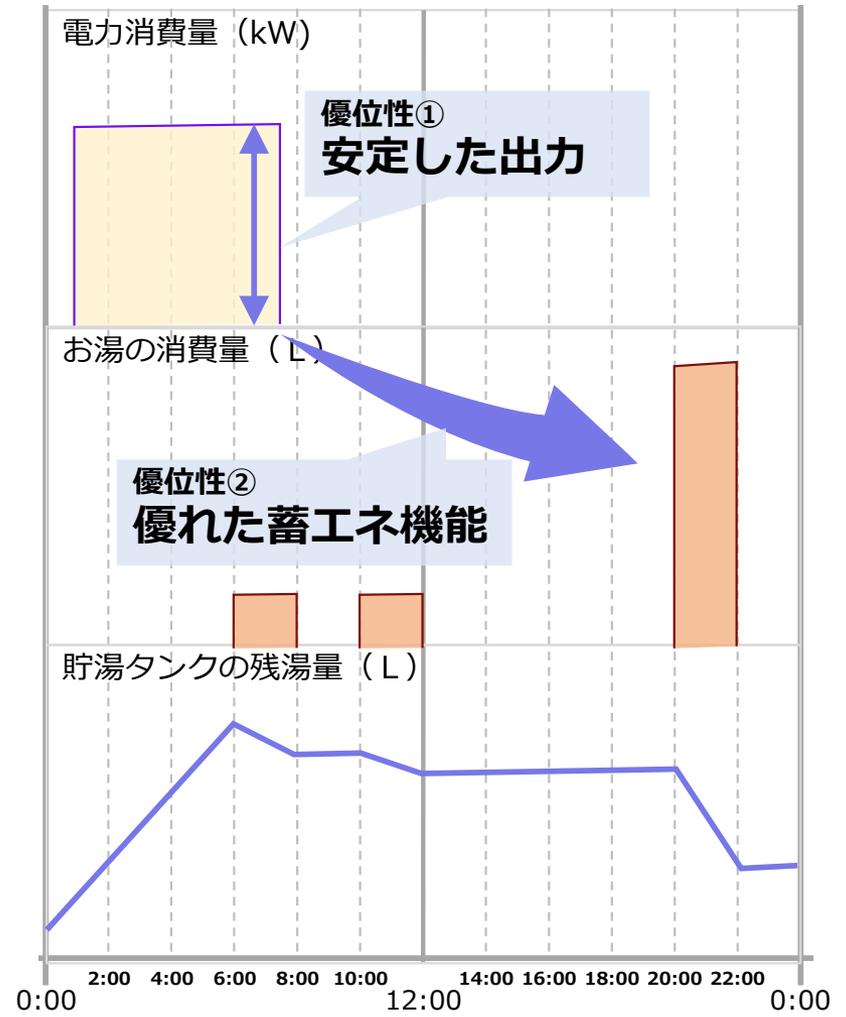
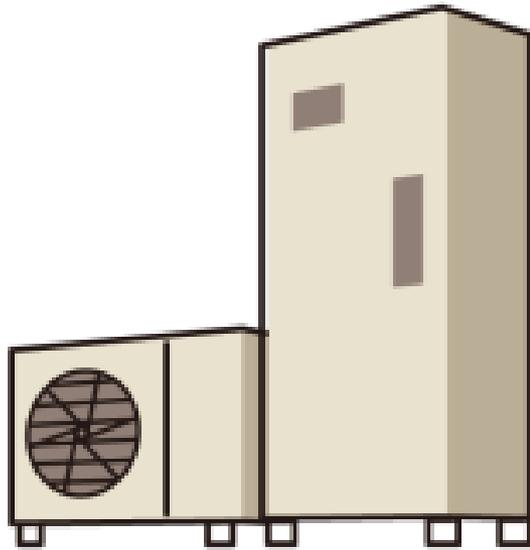
日付	ME	RMSE	MAE	MAPE	RMSPE
2021-12-07	5.83	14.17	17.37	2.75	0.03
2021-12-22	10.98	19.38	21.70	3.60	0.04
2021-12-24	2.83	22.55	28.03	4.34	0.05
2022-01-07	-5.89	24.24	37.78	6.68	0.11
2022-01-18	-28.09	31.08	49.41	8.64	0.14
2022-02-01	5.24	10.25	13.88	3.05	0.04
2022-02-04	0.08	6.69	9.34	1.90	0.03
2022-02-08	6.78	8.67	11.53	2.25	0.03
期間通算	-0.28	17.13	27.02	4.15	0.07

エネルギーカーボンニュートラル化のためのHP給湯器による 太陽光発電のインバランス補償の実証(1)

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

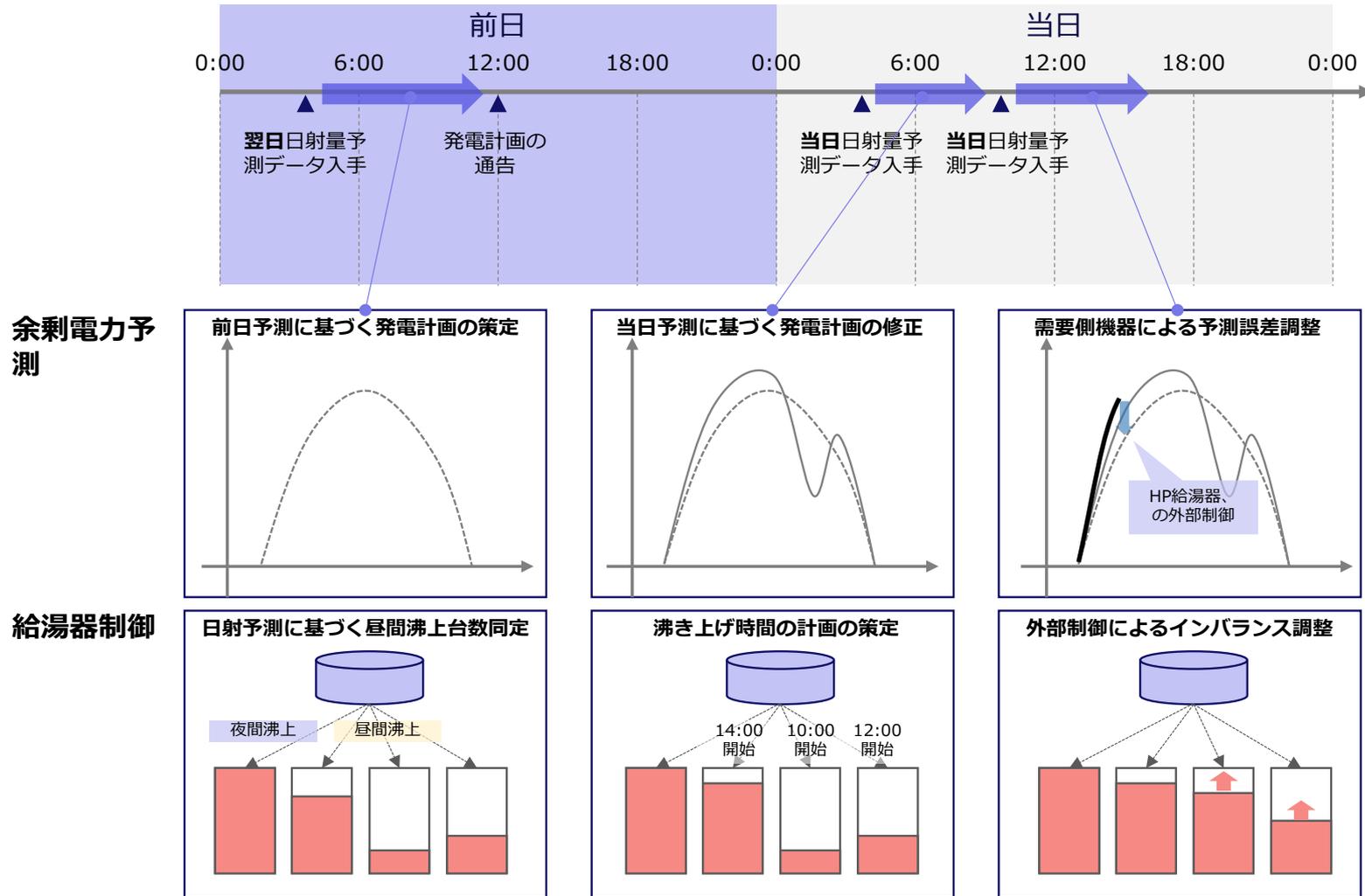


エネルギーカーボンニュートラル化のためのHP給湯器による 太陽光発電のインバランス補償の実証(2)

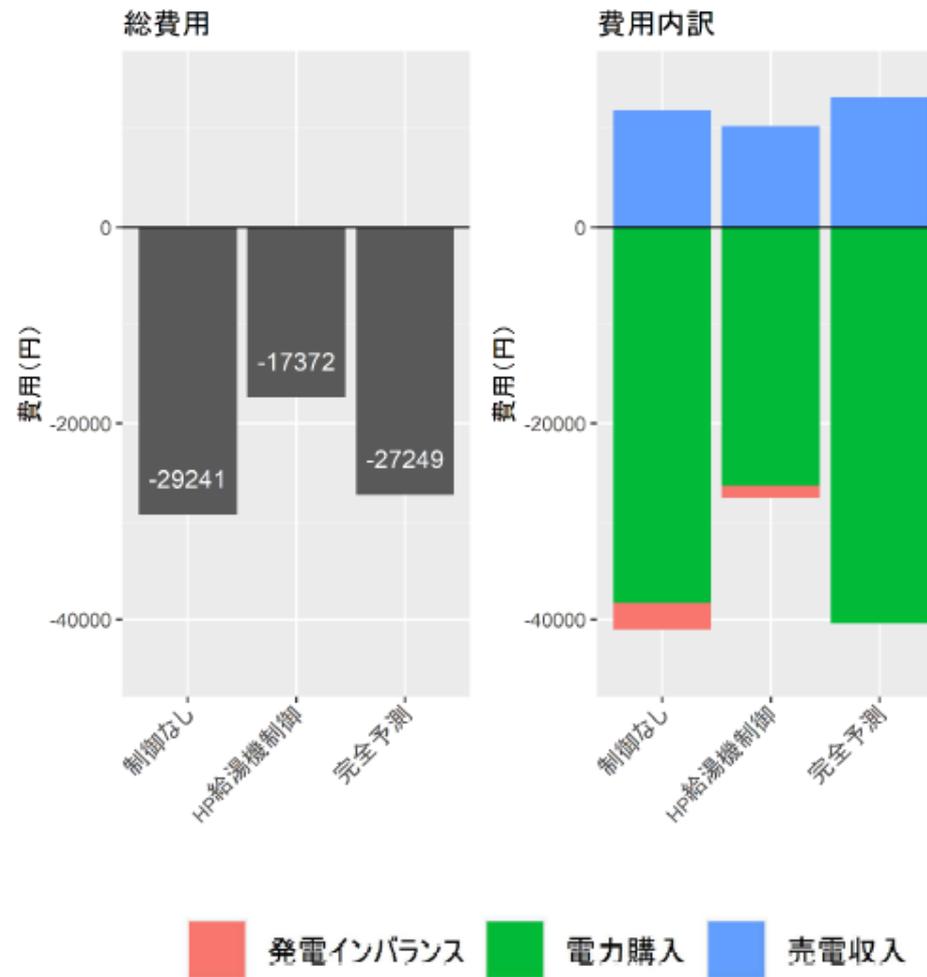


優位性	留意点
① 安定した出力	① 運転・停止の回数 (給湯効率への影響)
② 優れた蓄エネ機能	② 湯切れ防止
	③ HPの制御機構との調整

エネルギーカーボンニュートラル化のためのHP給湯器による 太陽光発電のインバランス補償の実証(3)



エネルギーカーボンニュートラル化のためのHP給湯器による 太陽光発電のインバランス補償の実証(4)



HP 給湯機の外部制御による経済性評価結果

エネルギーカーボンニュートラル化のための再エネ大量導入とEV、蓄電池、HP給湯器等による調整力提供の社会実装例(1)

■ネクステムズ事業概要のご紹介



太陽光電気エネルギーを **制御技術** で整える

エリアアグリゲーション事業

Area Aggregation
(AA事業)

宮古島
実証事業
推進

エネルギー
コンサル
ティング事業

制御システム
開発事業



太陽光電気エネルギーを **無料設置** で届ける

再エネサービスプロバイダ事業

Renewable Energy Service Provider
(RESP事業)

住宅等向け
PV自家消費
電力販売

住宅等向け
EQ温水熱
販売

系統向け
PV余剰電力
販売



比嘉 直人 (ヒガ ナオト) 略歴

1995年3月 琉球大学工学部卒業

1995年4月 沖縄電力グループの(株)沖縄エネテックに入社

宮古島メガソーラー実証設備のシステム設計責任者、国内初の可倒式風車導入のシステム設計責任者、国内最大級の廃材由来の木質燃料ペレット製造設備の調査設計などを歴任し、JICA事業等でアジア・大洋州への再エネ等技術調査・導入などのプロジェクトを経験。

宮古島スマートコミュニティ実証事業を実施。エネルギー管理士。(株)ネクステムズ 代表取締役
(株)宮古島未来エネルギー、(株)久米島未来エネルギー (株)石垣島未来エネルギー 代表取締役

エネルギーカーボンニュートラル化のための再エネ大量導入とEV、蓄電池、HP給湯器等による調整力提供の社会実装例(2)

■ ネクステムズ事業概要のご紹介



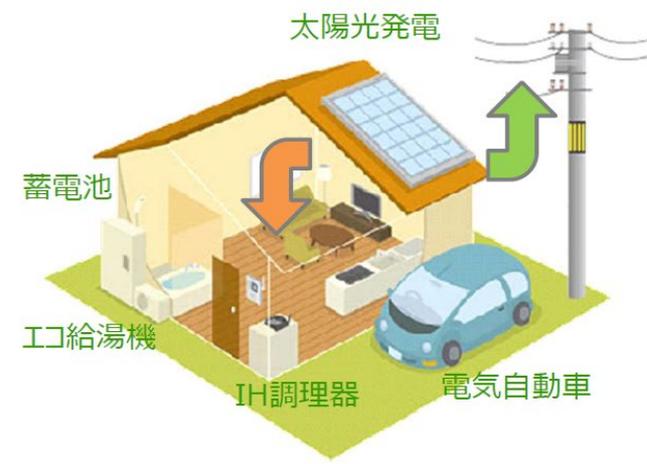
エリアアグリゲーション事業 Area Aggregation



再エネサービスプロバイダ事業 Renewable Energy Service Provider

オンサイトPPA
On-site Power Purchase Agreement
太陽光発電と蓄電池等の無料設置
事業者による設備保守メンテナンス

自家消費売電 + 余剰電力売電



エネルギーカーボンニュートラル化のための再エネ大量導入とEV、蓄電池、HP給湯器等による調整力提供の社会実装例(3)

再エネプロバイダ普及状況

2018年度 市営住宅40棟

太陽光発電 : 1,217kW
PV-PCS : 858kW
エコキュート : 120台



2019年度 福祉施設10箇所

太陽光発電 : 420kW
PV-PCS : 317kW
エコキュート : 38台



2020年度 来間島

太陽光発電 : 303kW
蓄電池PCS : 44台 237kW
エコキュート : 19台



2021年度～2022年度 (コロナ影響で延長)

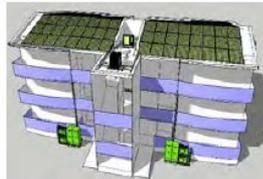
<戸建住宅600戸>

太陽光発電 : 4,000kW
蓄電池PCS : 3,300kW



<市営住宅500戸>

太陽光発電 : 1,200kW
蓄電池PCS : 850kW

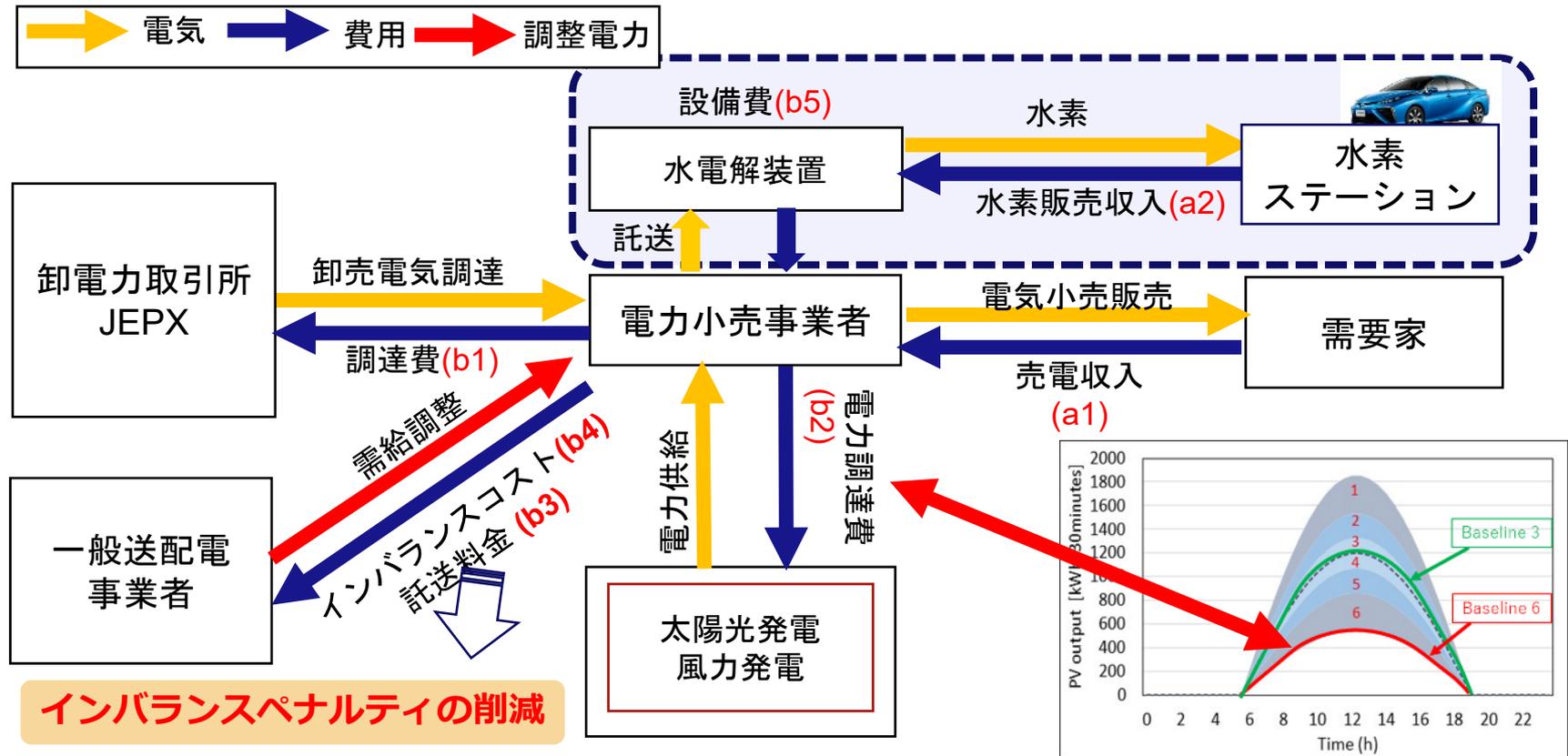


<事業所20箇所>

太陽光発電 : 300kW
蓄電池PCS : 100kW
エコキュート : 50台



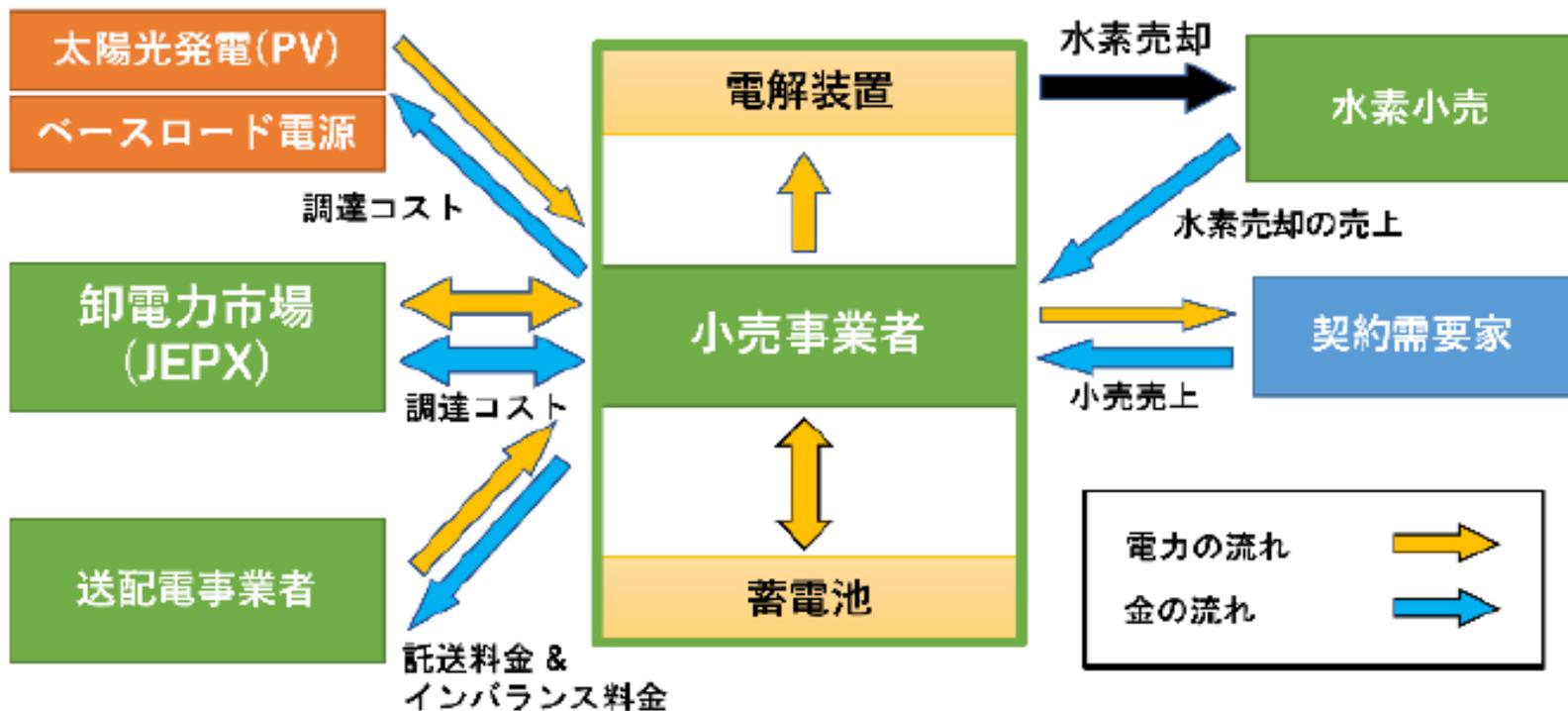
エネルギーカーボンニュートラル化のための水電解装置による水素製造と太陽光発電のインバランス補償(1)



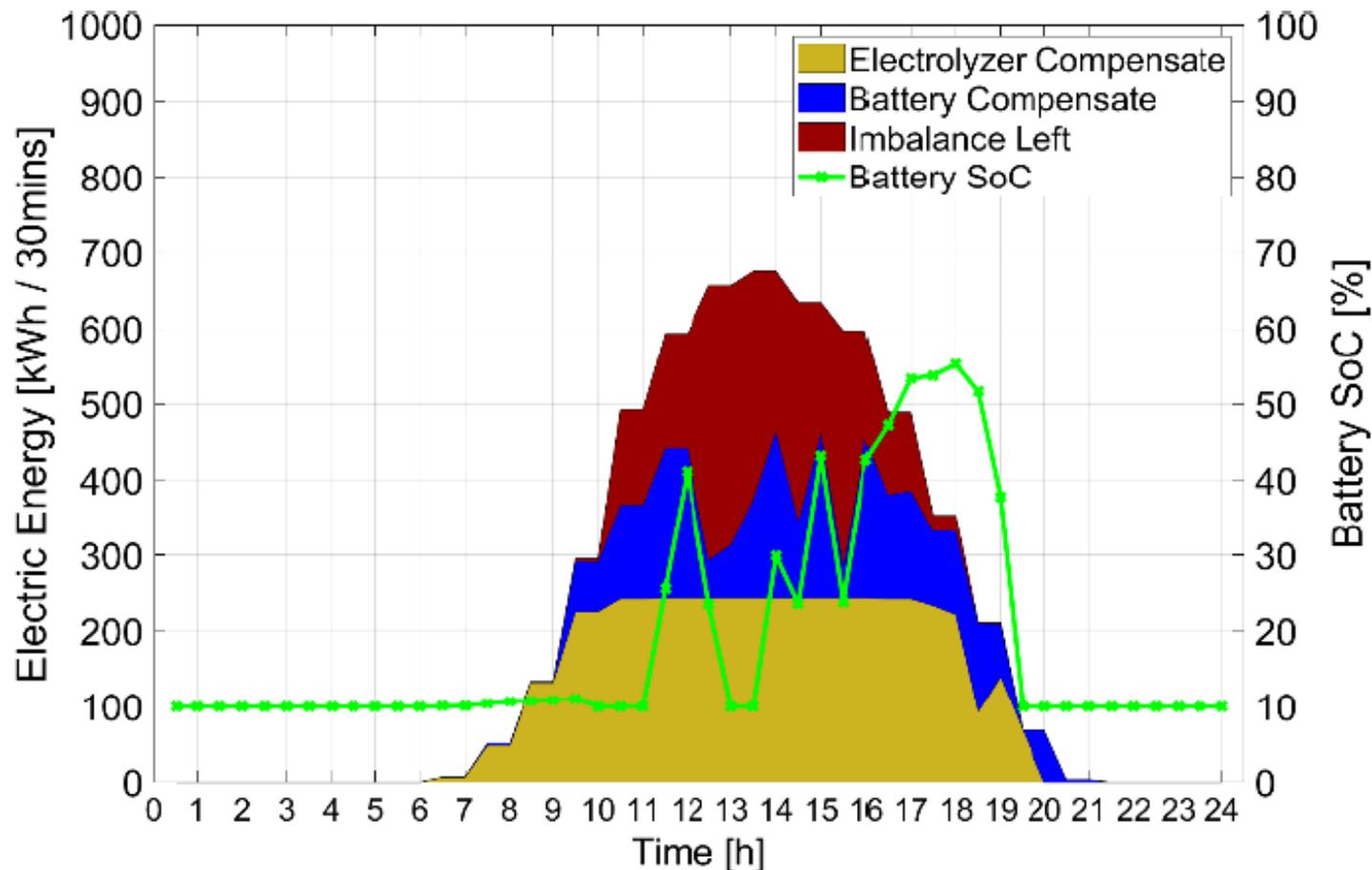
インバランスペナルティの削減

$$\text{Cash flow} = \text{売電収入 (a1)} + \text{水素販売収入 (a2)} - \text{卸電力調達費 (b1)} - \text{太陽光発電電力量調達費 (b2)} - \text{託送料金 (b3)} - \text{インバランスコスト (b4)} - \text{水素製造装置費 (b5)}$$

エネルギーカーボンニュートラル化のための再エネ大量導入と水電解装置・蓄電池を併用した調整力提供の研究(1)



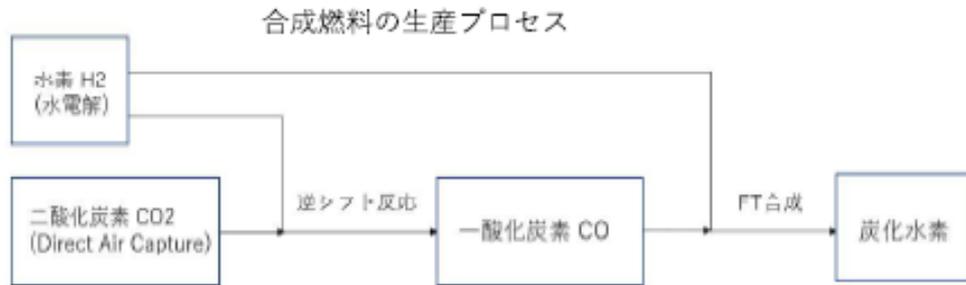
エネルギーカーボンニュートラル化のための再エネ大量導入と水電解装置・蓄電池を併用した調整力提供の研究(2)



蓄電池と水電解装置の協調による太陽光発電のインバランス補償動作

松原雅, 吉岡剛, 松橋隆治, 電力小売事業者における蓄電池と電解装置の協調運転とJEPX価格変動リスク回避に関する研究, エネルギー資源学会論文誌, 2022年43巻6号 p. 235-244

カーボンニュートラルな合成炭化水素燃料の製造プロセス(1)



Step1: 水電解でH₂を得る

Step2: Direct Air Capture(DAC)でCO₂を得る

Step3: 逆シフト反応でCOを得る

Step4: FT合成反応で炭化水素を得る

CO₂フリーの電気を使用することが必要:

電気分解に使われる電気のCO₂排出原単位が約**0.1kg-CO₂/kWh**以上であれば、合成燃料の生産が同量の化石燃料の燃焼よりも多くCO₂を排出する

東京電力のCO₂排出原単位 (2020年) : 約0.44kg- CO₂/kWh

・逆シフト反応:
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$

・FT合成反応:
 $(2n+1)\text{H}_2 + n\text{CO} \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n\text{H}_2\text{O}$

・生成物がC₈H₁₈の場合、反応全体:
 $25\text{H}_2 + 8\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_8\text{H}_{18} + 16\text{H}_2\text{O}$

C₈H₁₈の選択率が70%だと仮定する

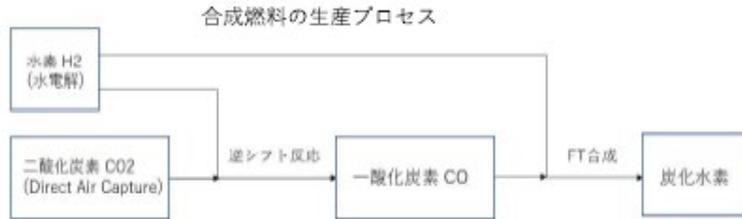
カーボンニュートラルな合成炭化水素燃料の製造プロセス(2)

・最適なシステム構成のイメージ：

電解装置容量がPV容量の2割、
蓄電池容量がPV容量の1.8倍くらい

・年間水素生産量：
約1200万Nm³、1086t

・年間合成燃料生産量：
約290万L、2000t

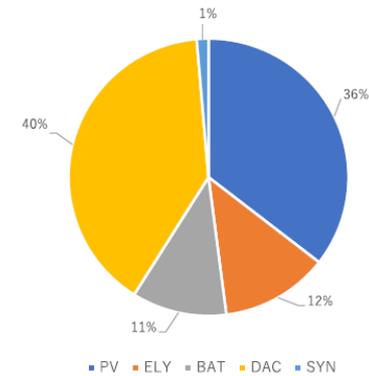


現在と将来における前提条件の比較

項目	現在	2030年以降の将来
電解装置の導入コスト	20 万円/kW	2.2 万円/kW
水電解水素発生原単位	0.208 Nm ³ /kWh	0.27 Nm ³ /kWh
DACコスト	3.54 万円/t-CO ₂	1.1 万円/t-CO ₂
FT合成コスト	2.3 円/kg-C ₂ H ₁₈	1.15 円/kg-C ₂ H ₁₈
FT合成選択率	70%	80%

その他：
太陽光発電のコスト(LCOE): 1.54円/kWh
蓄電池のコスト：0.5万円/kWh

最適解におけるコストの内訳



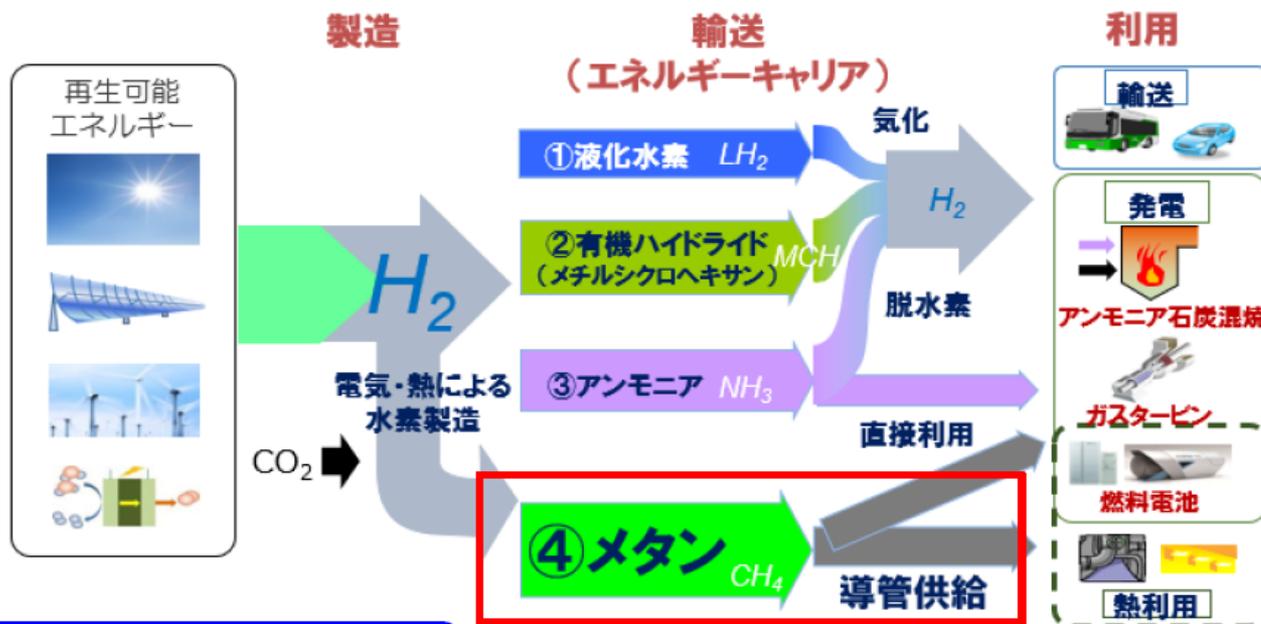
最適化結果 システムの構成とコスト

PVの設置容量を50MWに固定した時の最適解

水素生産量 [MW相当] - f	蓄電量の導入 容量[MWh]	合成燃料の生産 コスト[円/L]	電解装置の導入 容量[MW]	PVによるエネ ルギーの割合	蓄電池によるエ ネルギーの割合	エネルギー 使用率	電解装置の設備 利用率
5.1 - 18	91.8	72.37	11.87	64.1%	35.9%	92.5%	43%

カーボンニュートラルメタンに関する政策動向

- カーボンニュートラルメタンは、CO₂を用いた水素利用の一形態である。
- CO₂フリー水素とCO₂を利用したメタネーションによる脱炭素化は、新たなインフラ投資をせずとも、ガス利用機器も含む既存の都市ガスインフラを有効活用できるメリットがある。



メタン以外のエネルギーキャリアは、水素気化段階や利用段階において、新たな設備投資が必要となる

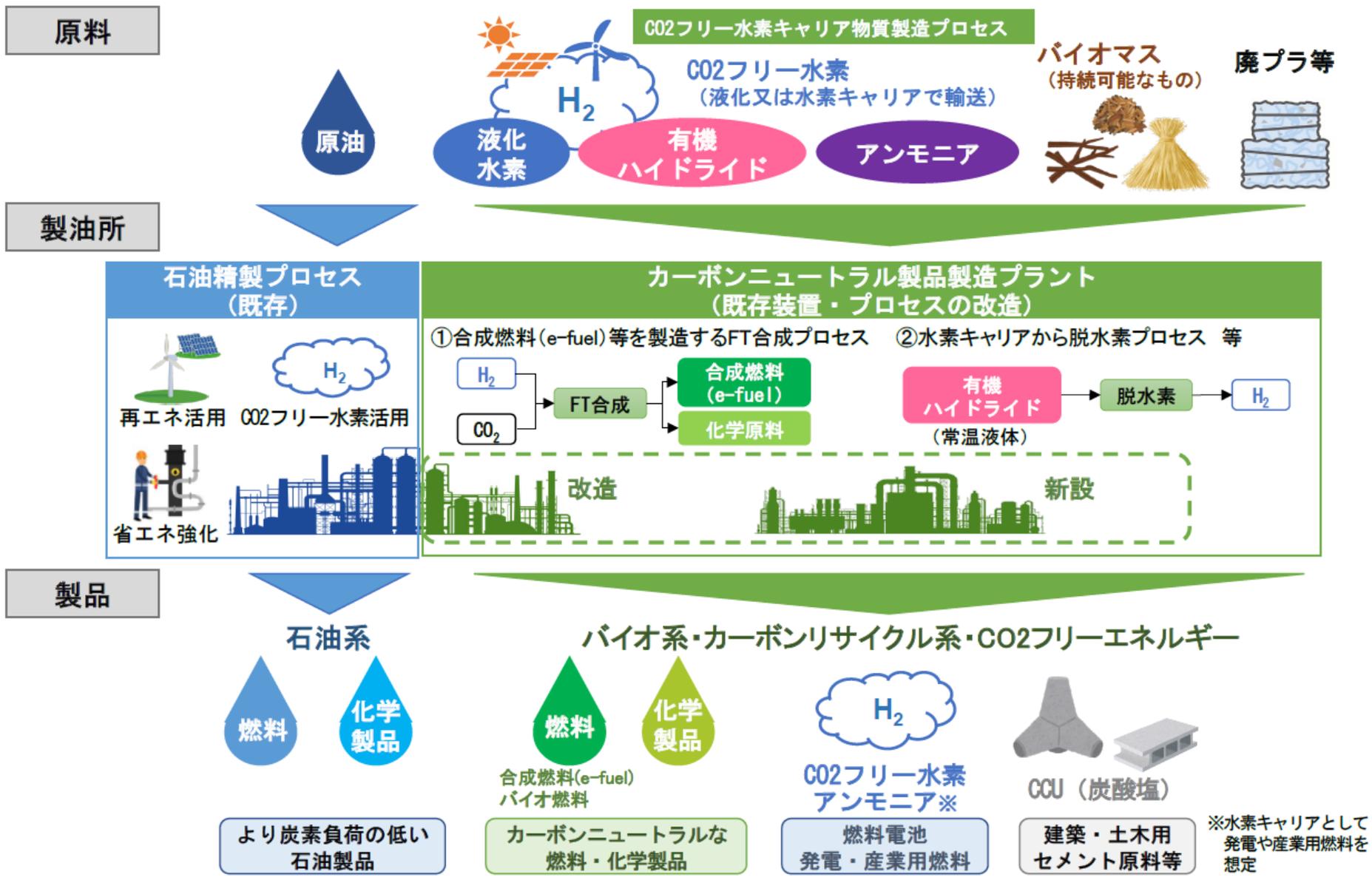
新たなインフラ投資不要



出典：第1回2050年に向けたガス事業の在り方研究会
日本ガス協会説明資料

水素の利活用にあたっては、大量かつ効率的に輸送する技術(キャリア)の開発が不可欠であり、輸送方式に応じていくつかのバリエーションが考えられるが、それらを**適材適所で活用することが重要**。

カーボンニュートラル合成燃料 e-fuelに関する政策動向



養殖業のエネルギーシステムとカーボンニュートラル化(1)

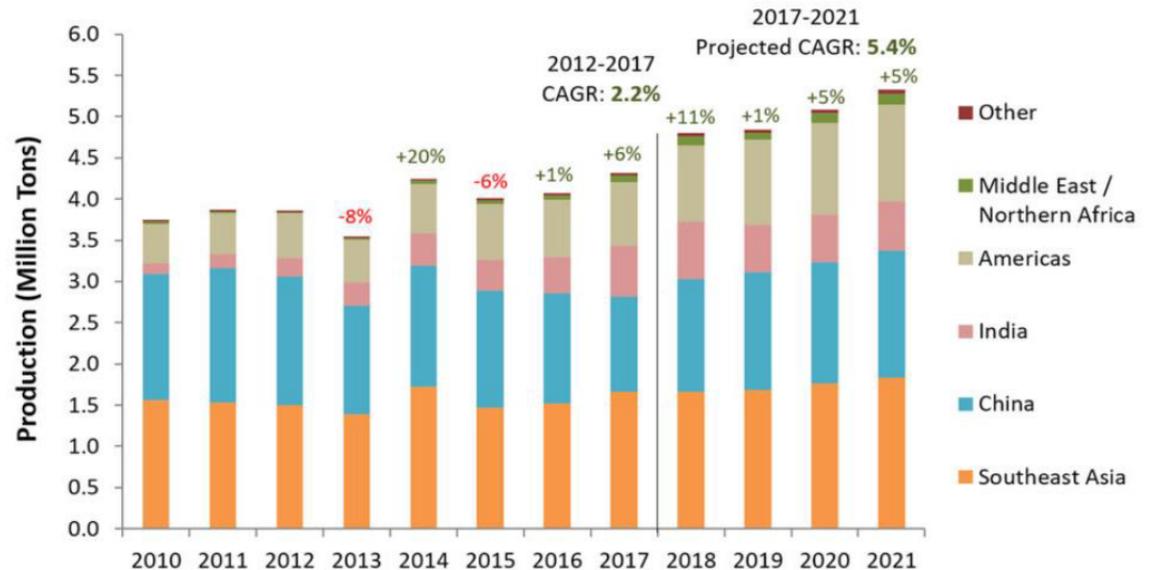
世界全体のエビ生産量

Shrimp production around the world

- Gradual increase
- Large production in Asia

Shrimp production in Asia

- Steady growth
- Stronger growth (Vietnam and China)



Source: Anderson, J. L., D. Valderrama, and D. E. Jory. "GOAL 2019: Global shrimp production review." In *Glob. Aquac. Advocate*. 2019.

- 1) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashia and Tran Thi Bich ChauVoc, A design on sustainable hybrid energy systems by multi-objective optimization for aquaculture industry, *Renewable Energy*, Volume 163, January 2021, Pages 1878-1894, 2020.
- 2) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashi, An Optimal Design on Sustainable Energy Systems for Shrimp Farms, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 165543-165558, 2019.

養殖業のエネルギーシステムとカーボンニュートラル化(2)

Shrimp industry in Vietnam in 2017:

- Area: 706,000 ha
- Revenue: \$4,000 million (50%)

Area in 2020: 900,000 ha

Problems:

- High energy consumption
- Environmental problems

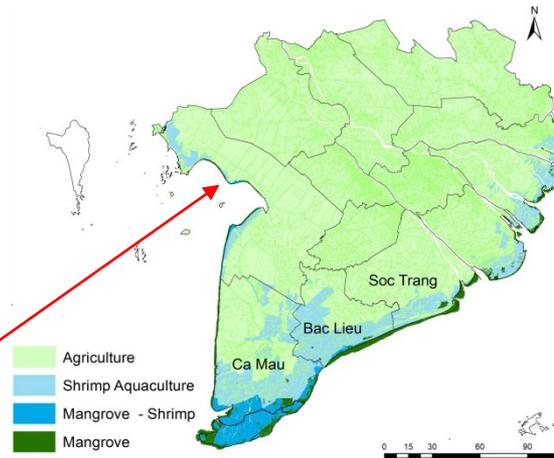
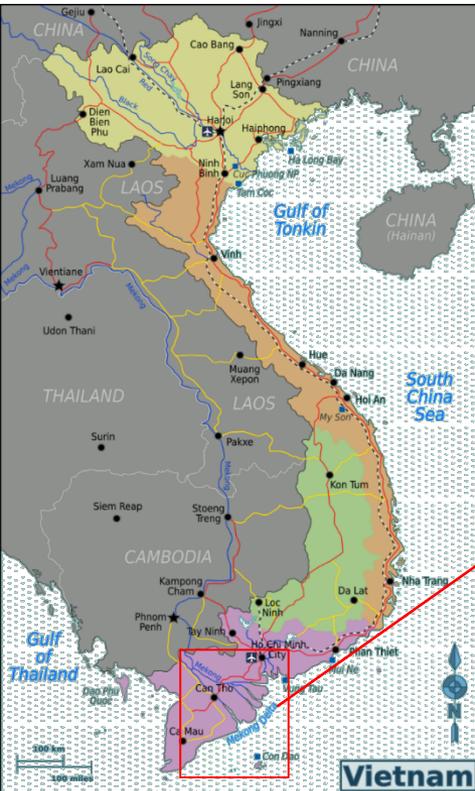
→ **Solution???**



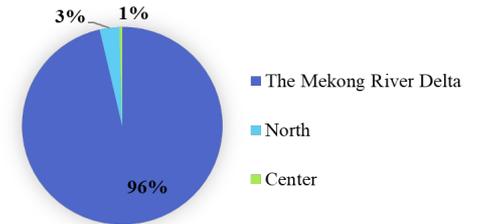
- 1) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashia and Tran Thi Bich ChauVoc, A design on sustainable hybrid energy systems by multi-objective optimization for aquaculture industry, Renewable Energy, Volume 163, January 2021, Pages 1878-1894, 2020.
- 2) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashi, An Optimal Design on Sustainable Energy Systems for Shrimp Farms, IEEE Access, vol. 7, pp29 165543-165558, 2019.

養殖業のエネルギーシステムとカーボンニュートラル化(3)

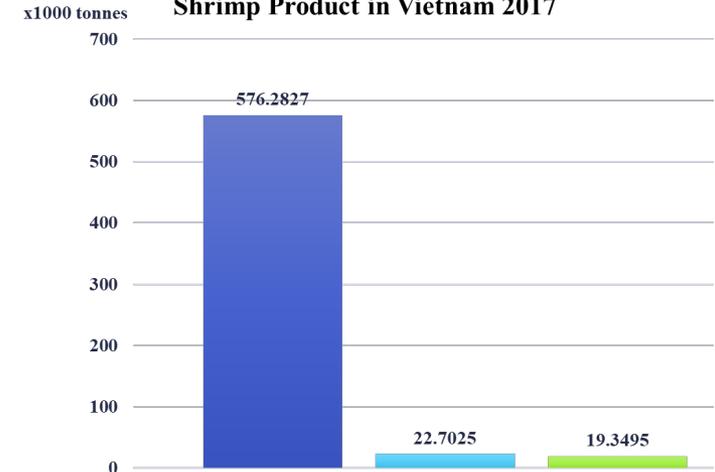
• Shrimp Farms in the Mekong Delta



Shrimp Farming Area in Vietnam 2017



Shrimp Product in Vietnam 2017



- 1) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashia and Tran Thi Bich ChauVoc, A design on sustainable hybrid energy systems by multi-objective optimization for aquaculture industry, Renewable Energy, Volume 163, January 2021, Pages 1878-1894, 2020.
- 2) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashi, An Optimal Design on Sustainable Energy Systems for Shrimp Farms, IEEE Access, vol. 7, pp. 165543-165558, 2019.

養殖業のエネルギーシステムとカーボンニュートラル化(4)

カントー大学にて (2019.12.16)



養殖業のエネルギーシステムとカーボンニュートラル化(5)

メコンデルタ養殖池地域にて (2019.12.18)



養殖池における空気送入の様子



空気送入の為 池底に設置する器具



停電時に稼働する発電機

養殖業のエネルギーシステムとカーボンニュートラル化(6)

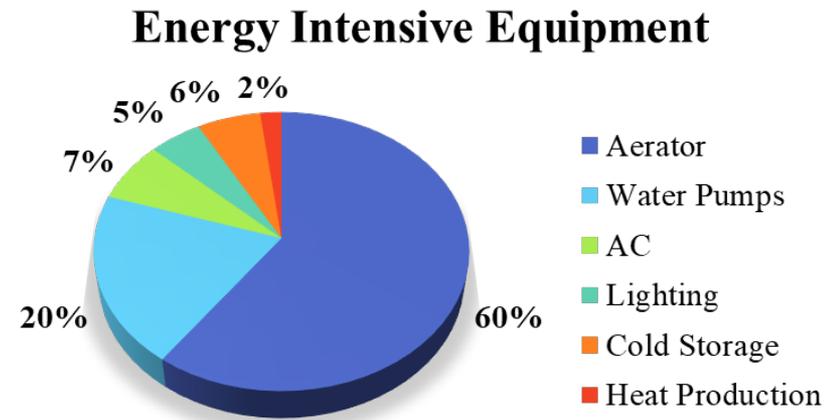
Power via 22 kV distribution line (EVN)

Electricity tariff:

- Normal hours: 6 USct/kWh
- Peak hours: 11 USct/kWh

Energy consumption of aerators = 60%

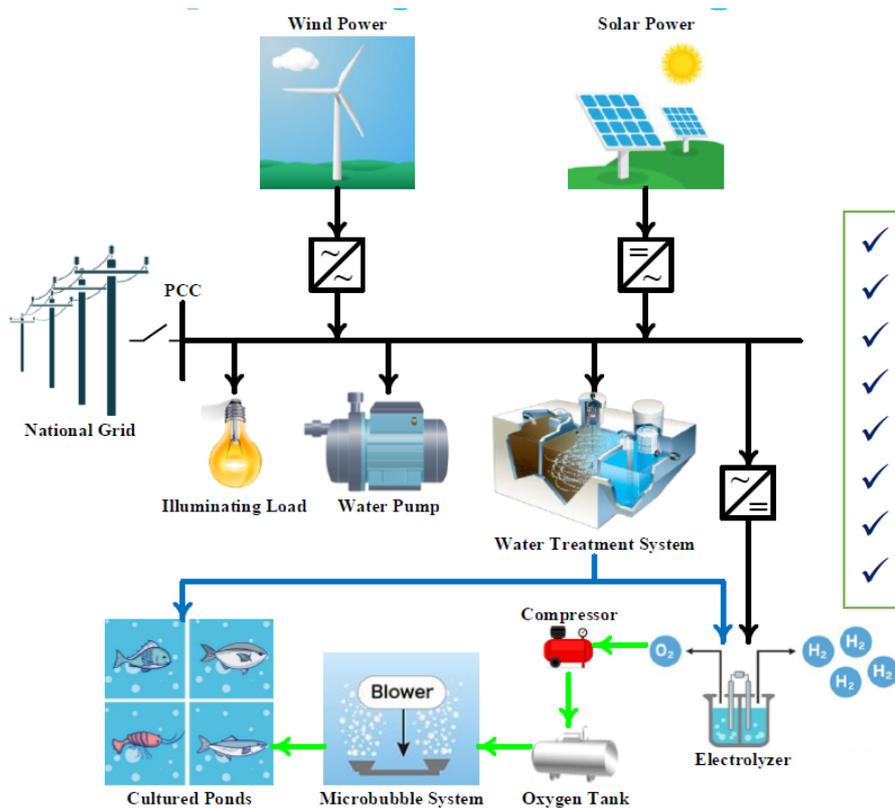
Annual energy consumption = 2280 MWh (2016)



- 1) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashia and Tran Thi Bich ChauVoc, A design on sustainable hybrid energy systems by multi-objective optimization for aquaculture industry, Renewable Energy, Volume 163, January 2021, Pages 1878-1894, 2020.
- 2) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashi, An Optimal Design on Sustainable Energy Systems for Shrimp Farms, IEEE Access, vol. 7, pp33 165543-165558, 2019.

養殖業のエネルギーシステムとカーボンニュートラル化(7)

提案システムの概念図



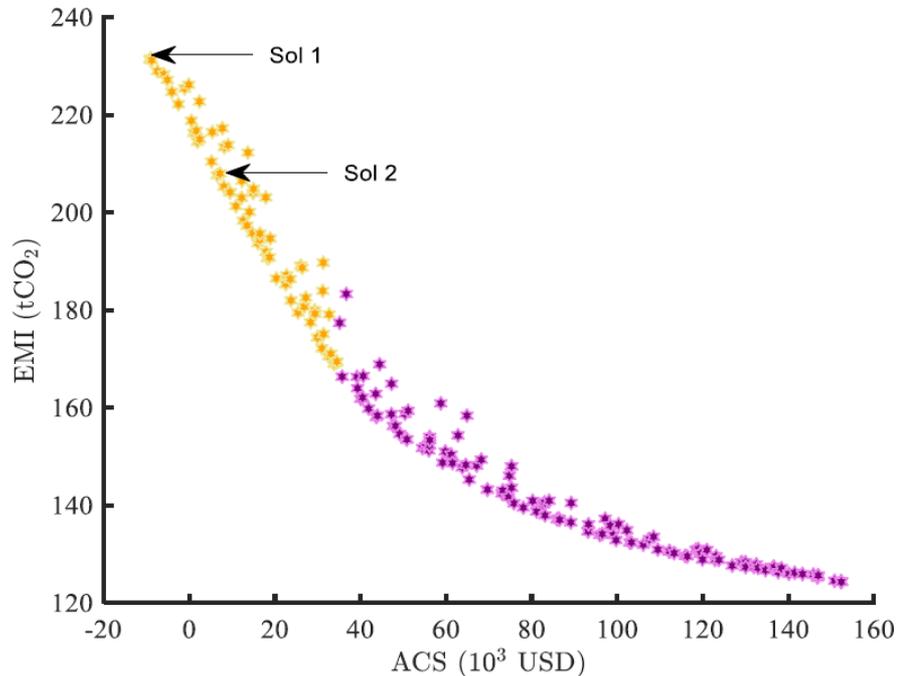
Attractive features

- ✓ Pure oxygen in situ with high absorption efficiency above 90%.
- ✓ Great volumes of nitrogen eluded
- ✓ Curtailing gas injected to shrimp ponds
- ✓ Reducing energy requirement for compressors by 1/5
- ✓ Controlling electrolyzer according to DO demand
- ✓ Low energy demand and operation costs
- ✓ Selling surplus electricity to national grid
- ✓ By-product hydrogen used for different applications

- 1) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashia and Tran Thi Bich Chau, A design on sustainable hybrid energy systems by multi-objective optimization for aquaculture industry, Renewable Energy, Volume 163, January 2021, Pages 1878-1894, 2020.
- 2) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsuhashi, An Optimal Design on Sustainable Energy Systems for Shrimp Farms, IEEE Access, vol. 7, pp.34 165543-165558, 2019.

養殖業のエネルギーシステムとカーボンニュートラル化(8)

最適化計算の繰り返しによるパレート最適解の導出

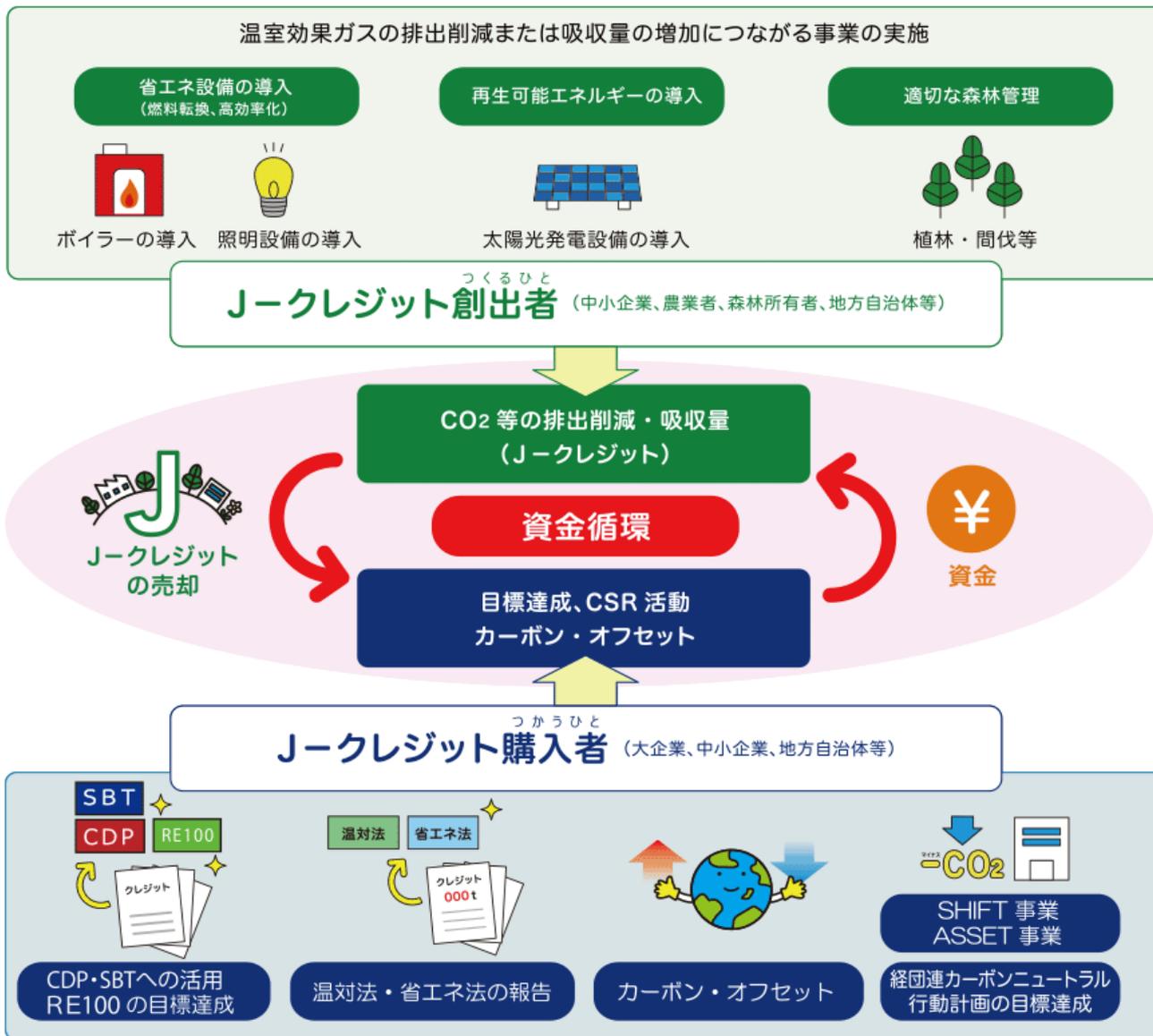


Description	Sol 1	Sol 2	CAS
PV capacity (kW _p)	998.65	998.62	-
Wind turbine capacity (kW _r)	999.09	998.96	-
Fuel cell capacity (kW)	0.06	12.30	-
Hydrogen tank capacity (kg)	0.51	12.25	-
ACS (USD)	-9,112	7,160	35,090
EMI (tCO ₂)	231.35	208.01	261.96

- 1) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsushia and Tran Thi Bich ChauVoc, A design on sustainable hybrid energy systems by multi-objective optimization for aquaculture industry, Renewable Energy, Volume 163, January 2021, Pages 1878-1894, 2020.
- 2) Nhut Tien Nguyen, Ryuji Matsushashi, An Optimal Design on Sustainable Energy Systems for Shrimp Farms, IEEE Access, vol. 7, pp.5 165543-165558, 2019.

Jクレジット制度(1)

カーボンニュートラル技術の実装の制度的支援

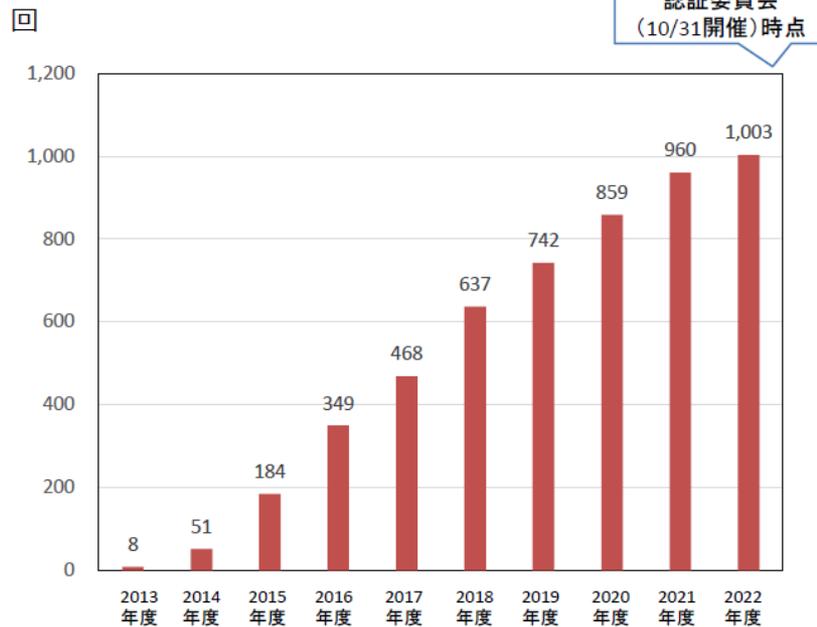


Jクレジット制度(2)

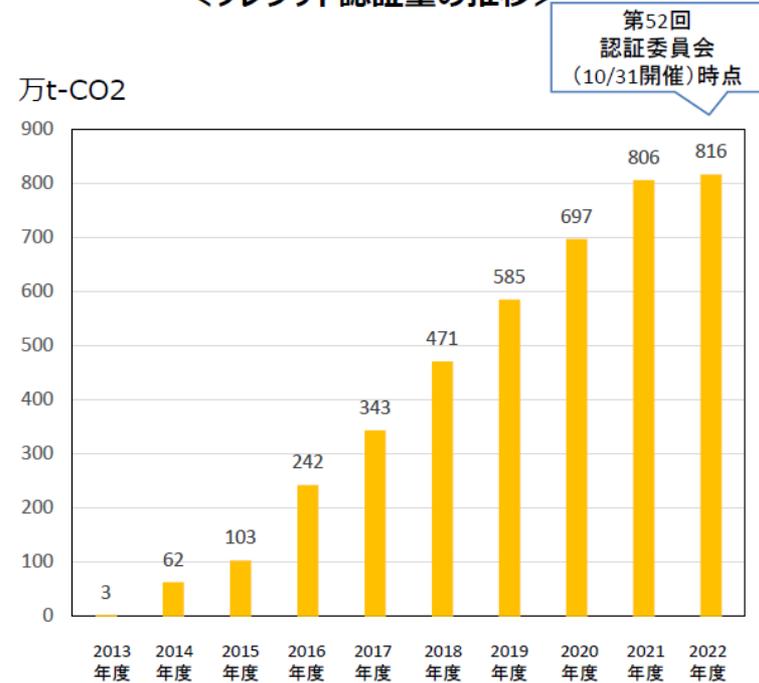
CN技術の実装の制度的支援

- ・ J-クレジット制度クレジット認証回数 (移行含む) : **延べ1,003回**
- ・ J-クレジット制度クレジット認証量 (移行含む) : **816万t-CO2**

<クレジット認証回数の推移>



<クレジット認証量の推移>

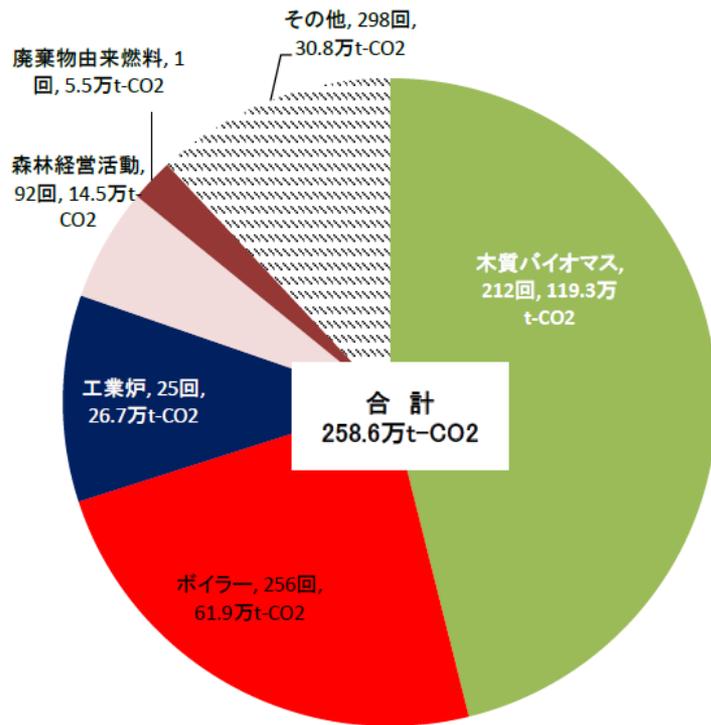


2022年10月31日時点の実績

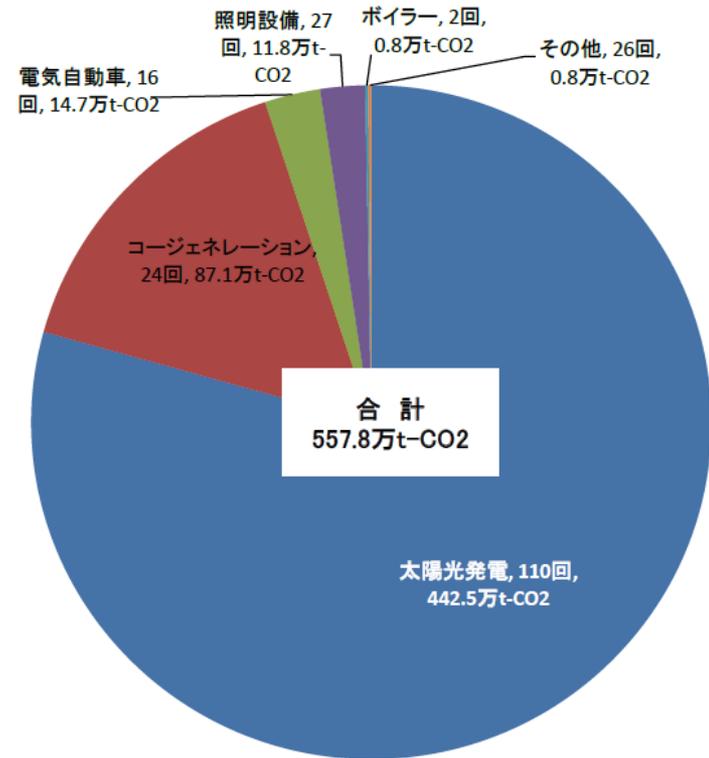
Jクレジット制度(3)

カーボンニュートラル技術の実装の制度的支援

適用方法論分類 (通常型)



適用方法論分類 (プログラム型)



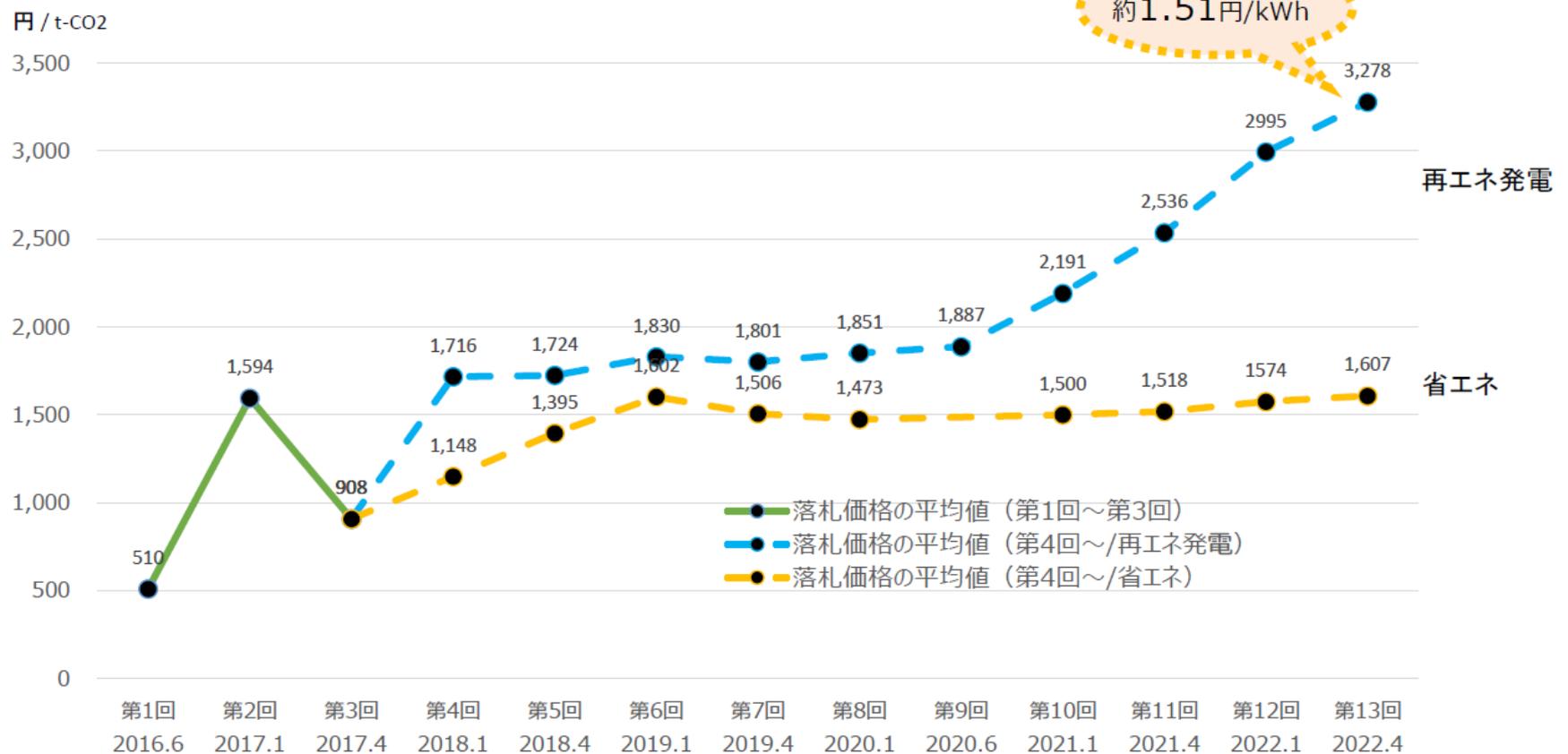
※各グラフの値は旧制度からの移行分を含む。

2022年10月31日時点の実績

Jクレジット制度(4)

カーボンニュートラル技術の実装の制度的支援

- 需要の高まりに応じて、平均落札価格も上昇している。



※平均値は、落札価格に当該落札トン数を乗じた合計を総販売量で除したもの。

まとめ

- (1) 今日、SDGsの観点からエネルギーを見た場合には、我々エネルギーのセキュリティを確保しつつ、カーボンニュートラル社会の実現を図るエネルギー政策の方向性が重要である。
- (2) エネルギーのセキュリティを維持しつつ、カーボンニュートラル化を実現するためのイノベーション例を紹介した。個別のイノベーションを実証、実装する際の要点は、社会体制の大きな変革の方向性を見定めると共に、現状の制度設計に整合した詳細な技術仕様の設定を行うことである。電気化学関連技術の社会実装では、水素とCCU関連が重要であるが、これらを取り巻く制度設計にも注意が必要である。
- (3) カーボンニュートラル社会を実現するためのイノベーションは、我々が確立する社会理念に沿うものであると共に、エネルギー政策・制度の転換と整合性をとることにより、相乗効果で健全な社会の発展を促すことが望まれる。電気化学、水素、CCUなどに関連する技術システムは、これまでのエネルギーシステムと比較すると、気候条件、地理条件と輸送、貯蔵などが関連する複雑で多様なものとなる可能性がある。