



戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期  
IoE社会のエネルギー・システム

テーマA-②

「再生可能エネルギー主力電源化に向けた  
革新的エネルギー・デバイスの便益評価」

九州工業大学大学院 工学研究院  
安部 征哉

パワーエレクトロニクス技術(PE技術)においては、近年、酸化ガリウム( $Ga_2O_3$ )や縦型GaNなど革新的なパワーデバイスの開発が進んできており、これらの適用により、パワーエレクトロニクス機器(PE機器)の小型化・高効率化など機器側の利点のみならず、電力損失の低減やエネルギーの利用率向上など、エネルギー供給システム全体においても利点があり、PE技術の普及を推進していく必要がある。

一方、PE技術の普及を推進するには、普及の障壁となる技術的課題を整理して新たな技術が導入された場合の社会的な効果を予め定量的に示して、社会コスト低減効果を共有する必要がある。

本サブテーマでは、革新的パワーデバイスが適用されたPE機器(革新的なエネルギーデバイス)が適用されたエネルギー供給システムの実現に向けて、その技術的な便益および経済的な便益を定量的に評価する。

# 国際競争力

| 評価軸   | 研究開発  |  |   |
|---|---|--|---|
|   | SIP-A-②<br>(日本)   | ECPE <sup>*1</sup><br>(EU)                         | CPES<br>(米) ※今後調査予定                                 |
| 適用デバイスの将来予測<br>( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , $\text{GaN}$ (縦型)) | ◎<br>( $\text{Si}$ , $\text{SiC}$ , $\text{GaN} + \text{Ga}_2\text{O}_3$ ,<br>$\text{GaN}$ (縦)) | △<br>( $\text{Si}$ , $\text{SiC}$ , $\text{GaN}$ ) | 機器への適用において,<br>$\text{Ga}_2\text{O}_3$ はまだ報告されていない。 |
| 適用先機器の抽出  | 太陽光発電（系統連系）<br>風力発電（系統連系, HVDC）<br>EV（充放電機器, モータインバータ, 非接触給電）<br>系統機器（変圧器, 電圧調整機器）              | ✗<br>(無)   | -   |
| 技術課題の抽出   | ○   | ○  | -   |
| 経済価値を考慮   | ◎   | ✗  | -   |
| 対外への情報発信  | ◎   | ○  | -   |

※1 Technology Milestones "ECPE Position Paper on Next Generation Power Electronics based on Wide Bandgap Devices –Challenges and Opportunities for Europe", May 2016より、著者らが項目毎に判定

技術ロードマップについては、多くの技術者・研究者に発信することが重要。

電気学会全国大会シンポジウム（国内），CIGREやIPEC（国際）で国内外に情報発信。

# 研究成果で期待される波及効果

現在流通しているPE機器の調査によりPE機器の現状分析を実施し、将来の革新的エネルギーデバイスの適用されうる機器が抽出される。これにより、将来に向けて開発すべきPE機器の方向性が明らかとなる。

この成果を学会などの発表を通して、専門の研究者や技術者へ提供する。さらに、本件の調査において、テーマ（B）のメンバーとは、作業会などを通して継続的に情報交換を実施し、本件の研究に関連する研究者の人的ネットワーク形成が可能となる。

加えて、革新的エネルギーデバイスによる技術的便益および経済的便益を定量的に評価することで、社会実装のために必要な技術課題や経済的指標が明らかとなる。これらをロードマップとして整理することにより、革新的エネルギーデバイスの開発・応用を世界に先んじて進展させることができ、Society 5.0の実現に向けて、大きく寄与できる。

# SIPで得られた主要な成果

- 革新的エネルギーデバイス適用によりPV導入量を大幅に拡大できることを定量的に明らかにした。  
解析例) PCS効率96%, 過積載率140%, Volt-Varありの場合**4倍**の導入が可能  
**(対策なし:76GW⇒ Volt-Var 制御:296GW)**  
**革新的エネルギーデバイスの導入による効果**
- 東日本系統の標準モデルをベースに日本エネルギー経済研究所が作成した将来シナリオ(2030, 2040, 2050年)を反映したモデルを構築し、適切なスマートインバータ(SI)の導入により、定常的な電力品質の維持が可能であることを明らかにした。  
【電力品質の適正化に必要なSIの導入率】
  - 2040年: 送電系統で100%(32.7GVA)、配電系統で50%(18.6GVA)以上
  - 2050年: " 100%(45.4GVA)、" 75%(38.1GVA)以上
- スマートインバータ適用によるPVの導入可能量の試算結果をもとに、CO<sub>2</sub>の限界削減費用を試算した。  
PVシステムの価格が10万円/kW(現状の6割減)としたとき、  
5,556円/t-CO<sub>2</sub>(PCS効率96%) ⇒ 4,702円/t-CO<sub>2</sub>(**-15%**, 効率99%)  
⇒3,016円/t-CO<sub>2</sub>(**-35.9%**, 効率99% & PCSコスト4割減)  
PVシステム価格が下がると、PCSの変換効率向上やコスト低減が、CO<sub>2</sub>の限界削減費用の減少に寄与することを定量的に明らかにした。これらのPCSの実現に向けた課題の抽出も進めた。

# 最終目標

| 達成目標（数値目標があれば記載） |   |
|------------------|---|
| ①                | Ga系次世代パワーデバイスを使用したPE機器（系統連系インバータ・スマートインバータ・MPPTコンバータ・蓄電池充放電装置など）に求められる仕様及びそれらを達成するための技術課題を抽出する。   |
| ②                | 革新的エネルギーデバイスの適用により国内の再エネ電源の接続可能容量やCO <sub>2</sub> 排出量に及ぼす効果を定量化し、未来社会のエネルギー・システム像を技術的および経済的な観点から提案し、課題を抽出する。  |
| ③                | 再生可能エネルギーが主電源化されたエネルギー供給システムの周波数安定性および電圧安定性を、革新的エネルギーデバイスの周波数制御機能、電圧制御機能の活用により確保することができるかをシミュレーションで明らかにする。  |
| ④                | 革新的エネルギーデバイスを適用による国内のエネルギー供給システムにおける経済的便益（例えば、CO <sub>2</sub> 削減の限界費用と革新的エネルギーデバイスの追加コストの関係など）を明らかにする。 <ul style="list-style-type: none"><li>全テーマの成果を取りまとめて、2つのロードマップ（社会ニーズロードマップと技術ロードマップ）を作成する。</li></ul> |

# 最終目標に対して得られた成果（全体）

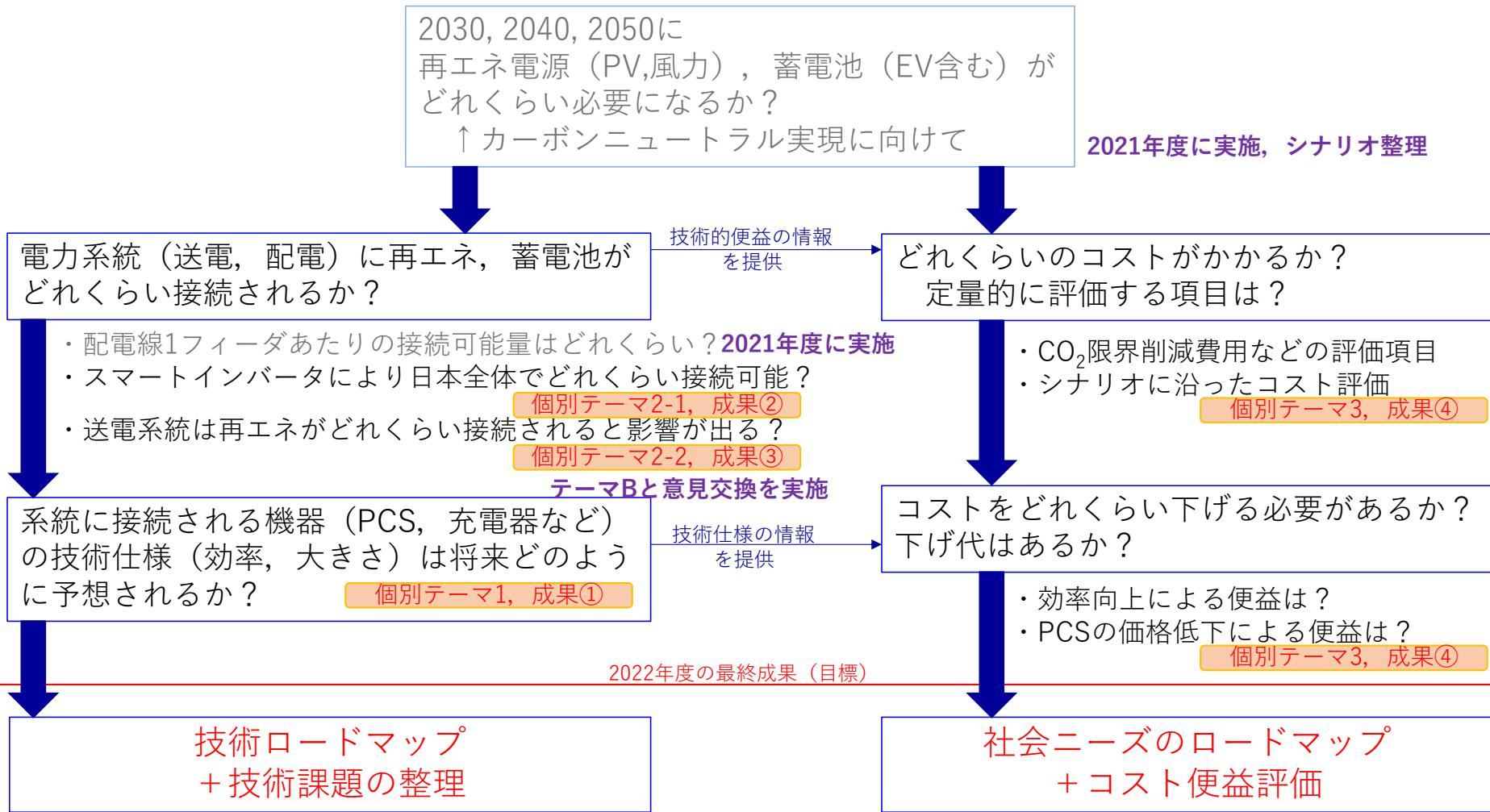
## 【テーマA-2 3ヶ年の研究工程】

| 個別テーマ                                       | 初年度<br>(2020.9~2021.3)                                    | 2年度<br>(2021.4~2022.3)   | 最終年度<br>(2022.4~<br>2023.3) |
|---|---|--|-----------------------------|
| 革新的パワーデバイスをPE機器へ適用するための技術的課題抽出              | 現状の構成部品の技術動向<br><br><b>革新的パワーデバイスの適用先の抽出</b>              | 革新的デバイスの適用可能性<br><br><b>現状の把握と革新的エネルギーデバイスの可能性調査</b>             | 革新的デバイスの適用に向けた技術課題          |
| 革新的エネルギーデバイスを適用したエネルギー供給システムにおける技術的便益の定量的評価 | 再生可能エネルギーを活用した配電系統構成<br><br><b>革新的デバイスが適用される配電系統構成の抽出</b> | 送配電系統の技術的優位性の定量化<br><br><b>革新的PE技術適用の送配電系統モデルの構築</b>             | 未来社会のエネルギー供給システム像           |
| 革新的エネルギーデバイスを適用したエネルギー供給システムにおける経済的便益の定量的評価 | 現状のデバイス、再生可能エネルギーに関する動向<br><br><b>技術ロードマップのための評価軸抽出</b>   | 革新的デバイス適用、再エネ導入量向上に向けた技術課題<br><br><b>再生可能エネルギー導入量向上の技術的課題の抽出</b> | エネルギー供給システムモデルの経済的便益の算出     |

- 革新的エネルギーデバイスの技術的便益の定量評価
  - 革新的エネルギーデバイスの適用による経済的便益の定量評価
- +上記を整理したロードマップ

# 最終目標に対して得られた成果（全体）

## 【テーマA-2 全体のフロー図】

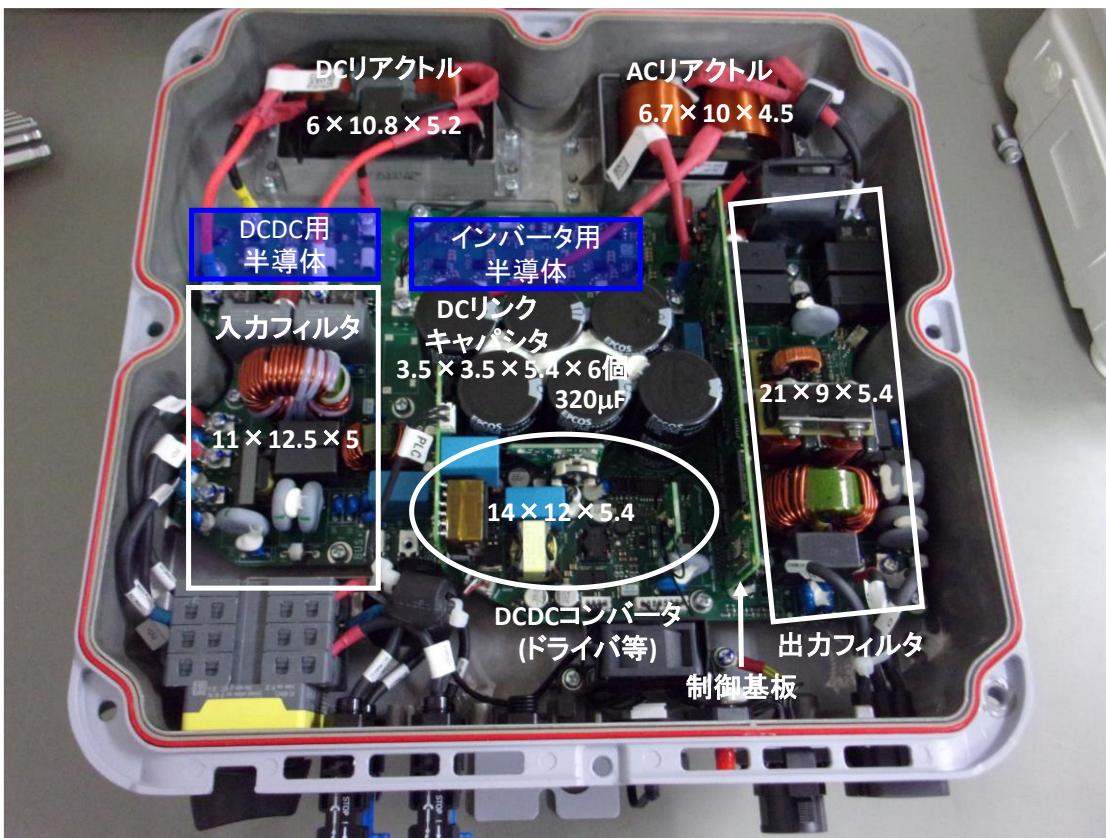


# 最終目標に対して得られた成果①

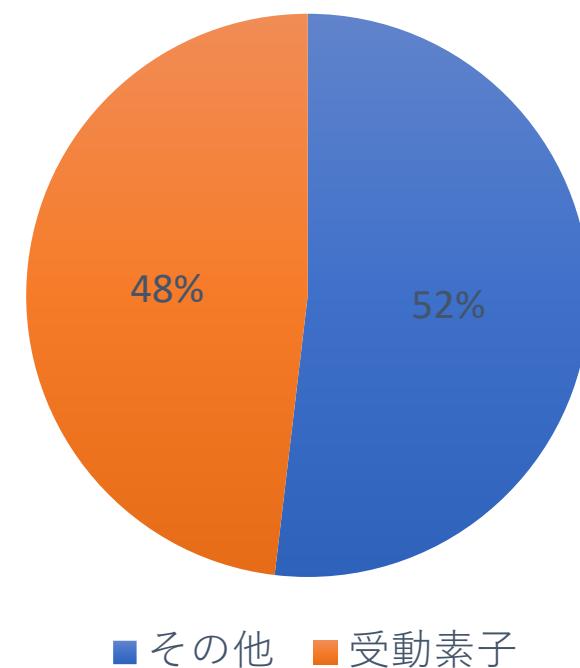
- ① 個別テーマ1 「革新的パワーデバイスをPE機器へ適用するための技術的課題抽出」  
・革新的エネルギーデバイス（Ga系次世代パワーデバイスを使用したPE機器）に求められる仕様及びそれらを達成するための技術課題を抽出する。  
・技術ロードマップを既存機器・システムからの移行を含めた形で作成する。

現状のパワーコンディショナーを分析することでさらなる小型化のための課題を抽出

## 【5kW単相パワーコンディショナーの分析】



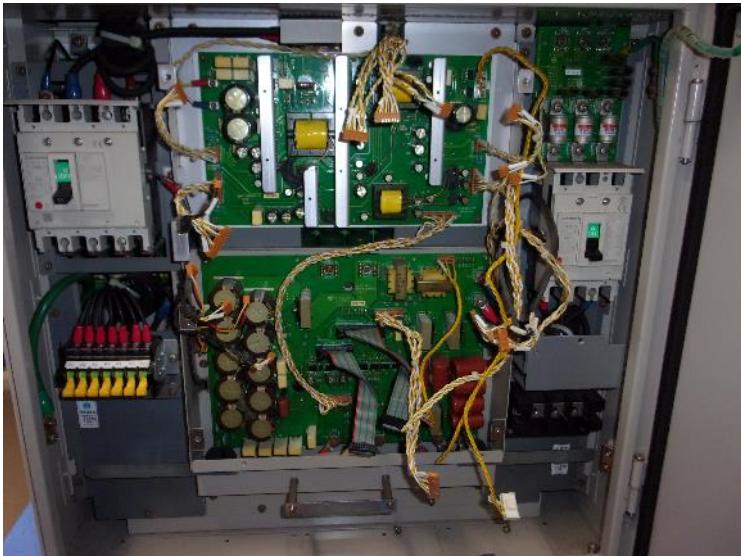
5kWパワーコンディショナーの構成



回路構成部品全体に対する  
受動素子の占める割合

# 最終目標に対して得られた成果①

【10kW3相パワーコンディショナーの分析】



内部構成



DCリアクトル・トランス



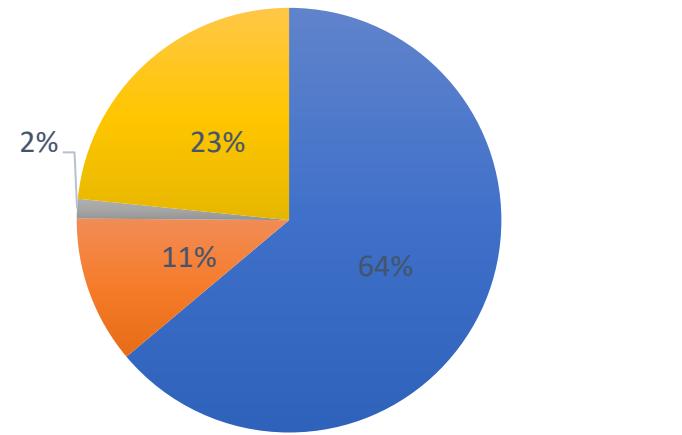
ノイズフィルタ



ACリアクトル

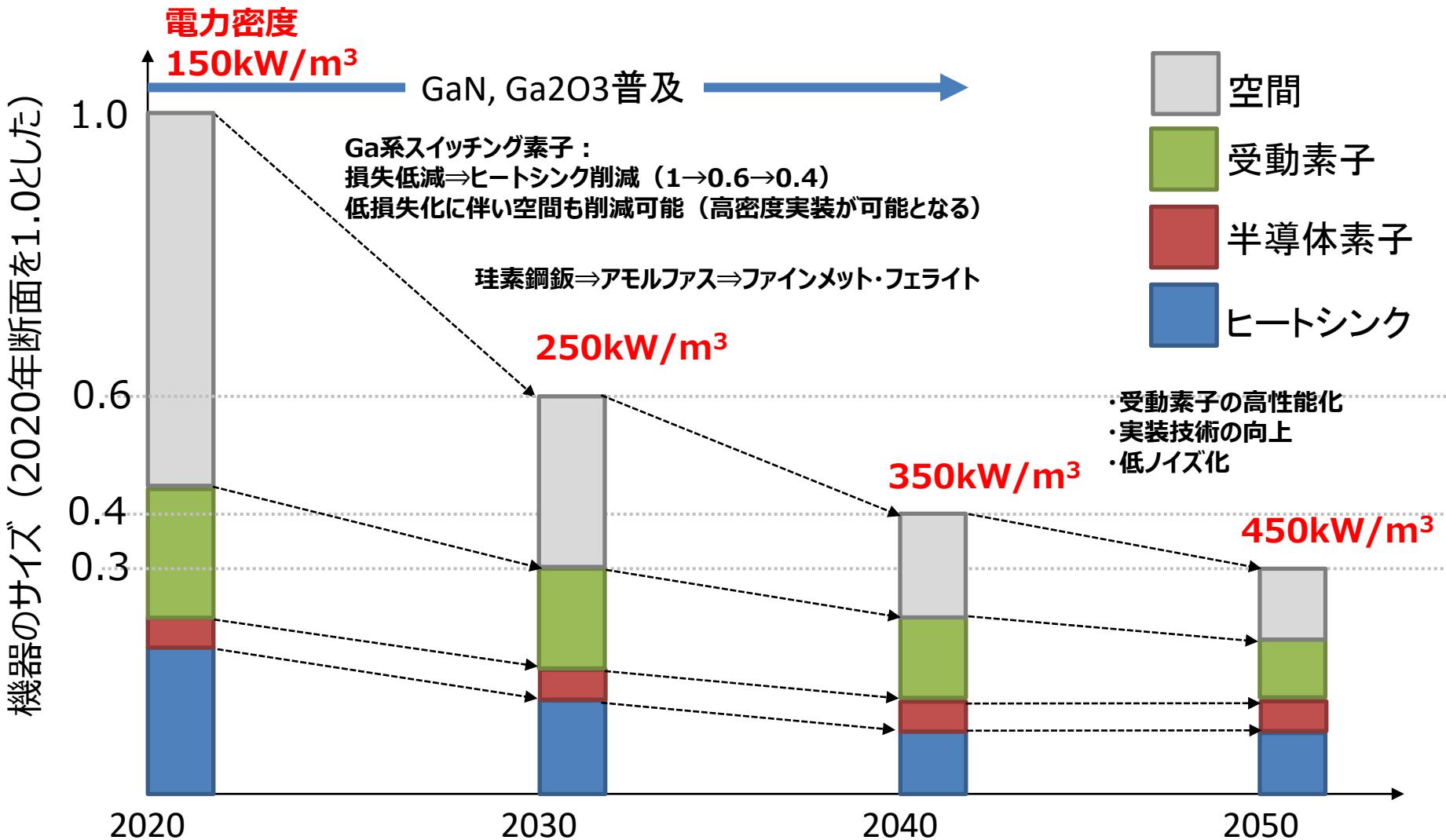


コンデンサ



回路構成部品全体に対する  
受動素子の占める割合

# 最終成果：PCSのサイズに関するロードマップ

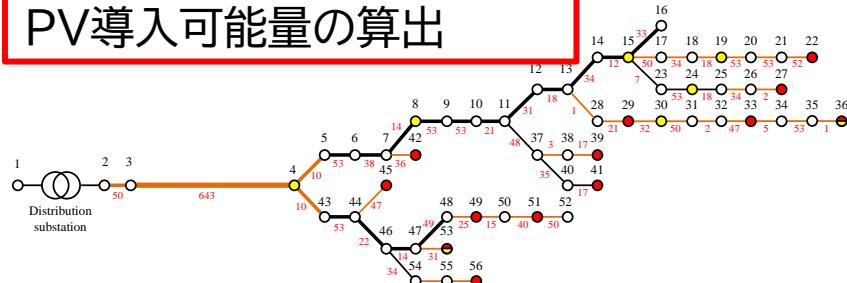


# 最終目標に対して得られた成果②

② 個別テーマ2-1 「革新的エネルギーデバイスを適用したエネルギー供給システムにおける技術的便益の定量的評価」 **(PV導入量拡大)**

・革新的エネルギーデバイスの適用により国内の再エネ電源の接続可能容量やCO<sub>2</sub>排出量に及ぼす効果を定量化し、未来社会のエネルギーシステム像を技術的および経済的な観点から提案し、課題を抽出する。

## JST-CRESTモデルによる PV導入可能量の算出



35ケースのJST-CRESTモデルから  
地域ごとに

PV導入可能量(kW)  
電力消費量(kWh) を算出

商業地 工業地 住宅地 農山村

## 地域ごとの電力消費量の算出

### 都道府県別の電力消費量

商業地

工業地

家庭

都道府県別  
エネルギー消費統計  
(資源エネルギー庁)

住宅地

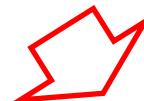
農山村

農業地域類型別の  
人口構成割合  
(農林水産省)

### 日本全国の地域別電力消費量

商業地 工業地 住宅地 農山村

日本全国のPV導入可能量  
(拡大推計値)

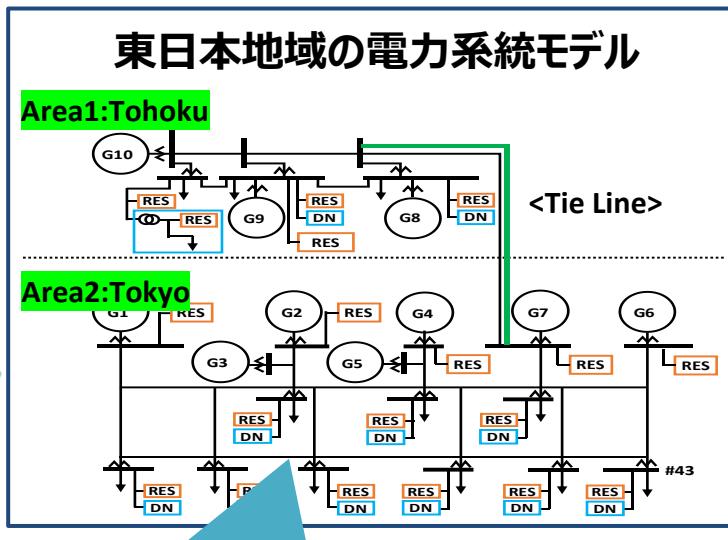


# 最終目標に対して得られた成果③

③ 個別テーマ2-2 「革新的エネルギーデバイスを適用したエネルギー供給システムにおける安定性の定量的評価」（革新的エネルギーデバイスの導入量拡大）

・再生可能エネルギー電源の導入拡大が電力系統における定常的な安定性に与える影響を評価するとともに、革新的エネルギーデバイスの系統サポート機能による影響緩和効果を定量的に評価する。

・多様な系統サポート機能を有する革新的エネルギーデバイスについて、有効化する機能の組み合わせや機能間の優先度の設定を種々検討し、有効な活用手法の在り方を整理する。



- 導入量：
  - 送電系統：0~100%
  - 配電系統：0~100%
- 機能設定：
  - 周波数サポート機能(1種)
  - 電圧サポート機能(2種)

- 電圧と周波数を同時かつ高速に解析できる環境を構築
- 将来シナリオを反映した東日本系統のモデル構築



各将来断面で電力品質の適正化に必要となるスマートインバータの導入量及び機能設定を明らかにする

# 電力品質解析(2030、2040、2050年／スマートインバータなし)

- IEEJ作成の2030年、2040年、2050年の需給シナリオを東日本電力系統モデルEAST10(電気学会)に反映し、周波数及び電圧の品質を解析
- 第1ステップ**：電圧品質評価
  - 2030年：適性範囲逸脱なし
  - 2040年：**32/365日で逸脱あり**
  - 2050年：**182/365日で逸脱あり**
- 第2ステップ**：電圧の適性範囲逸脱が見られる日にについて周波数品質を評価
  - 2040、2050年で過酷日を選定
  - 2040/8/22, 2050/8/30

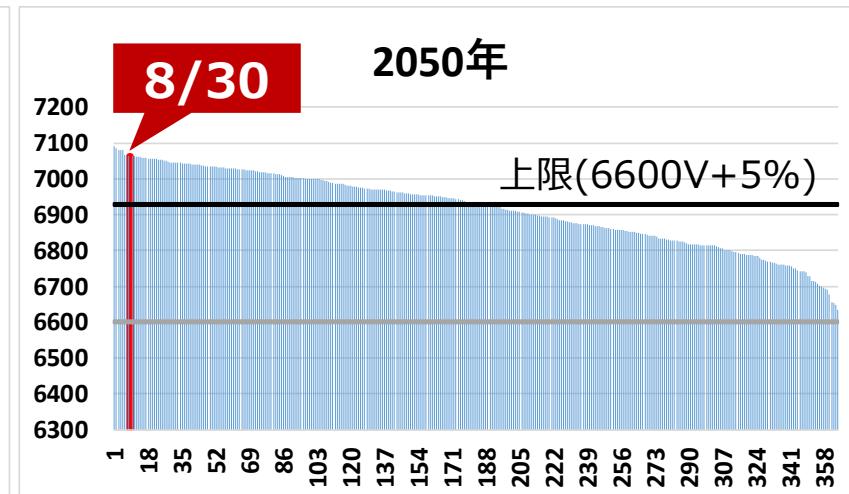
**【PV発電量と最大電圧の相関係数】**  
(0.7以上であれば強い相関あり)

| 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|-------|-------|-------|
| 0.70  | 0.86  | 0.74  |

**【周波数基準値±0.2Hz滞在率】**  
(目標値：100%)

| 対象日       | 滞在率   |             |
|-----------|-------|-------------|
| 2040/8/22 | 85.3% | (同月内4番目に低い) |
| 2050/8/30 | 80.8% | (同月内5番目に低い) |

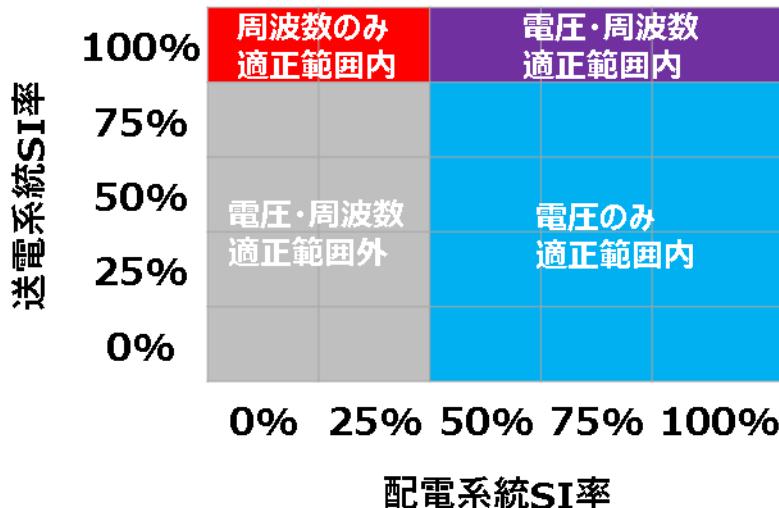
## 【2040、2050年の各日における配電系統の最大電圧（降順）】



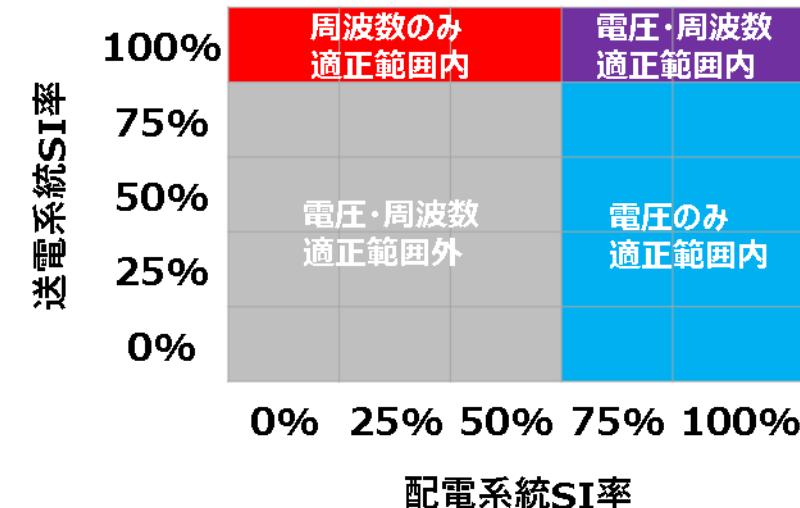
# 電力品質解析（2040、2050年過酷日／スマートインバータあり）

- 2040年、2050年の選定過酷日に対して、スマートインバータの導入量と電力品質の関係を解析し、品質を適正範囲内に収めるのに必要なスマートインバータの量を算定
  - 送電系統連系インバータ：周波数サポート(Frequency-Watt) \* 上げ調整のため5%の出力抑制
  - 配電系統連系インバータ：電圧サポート(Volt-Var)
- 計算結果(必要なスマートインバータの容量)
  - 2040年：送電系統で**100%(32.7GVA)**、配電系統で**50%(18.6GVA)**以上
  - 2050年：“**100%(45.4GVA)**、“**75%(38.1GVA)**以上

■ 解析対象日：2040/08/22



■ 解析対象日：2050/08/30



- 得られた結果を元に経済評価・CO2削減量を評価

※適正範団…周波数：50±0.2Hz / 電圧：6600V±5%

# 最終目標に対して得られた成果③

- ・標準的な東日本系統モデルをベースに構築したテストケースモデルを用い、スマートインバータの効果的な機能活用方法を検討し、新たに構築する下記モデルにて検証する機能活用パターンの絞り込みを完了
- ・2030年、2040年、2050年のシナリオ（テーマA-①提供）を反映した電力系統モデルを構築し、ベースケースとしてスマートインバータを導入しない場合の電圧および周波数品質の評価

## 電圧・周波数品質評価

| 対象年         | 電圧逸脱時間数<br>(8760時間中) | 周波数逸脱時間数(電圧変動が大きい8月について、744時間中) | 再エネ電源*供給割合(年間) |
|-------------|----------------------|---------------------------------|----------------|
| 2030        | 123時間                | 1.1時間                           | 12.1%          |
| 2040        | 1497時間               | 66.2時間                          | 42.7%          |
| <b>2050</b> | <b>2087時間</b>        | <b>181.7時間</b>                  | 70.3%          |

\*再エネ電源：太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス

再エネ増加と共に  
電圧・周波数品質が低下

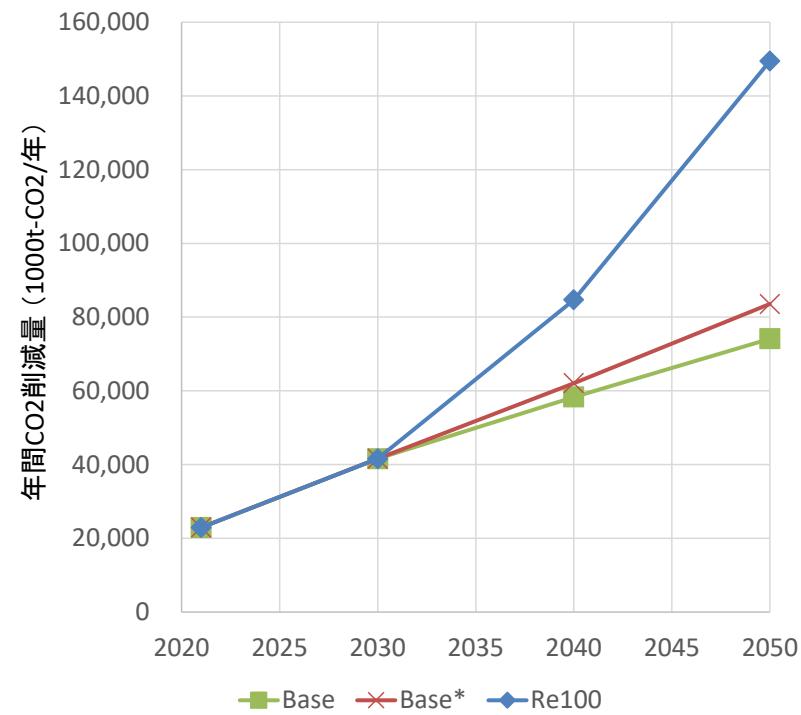
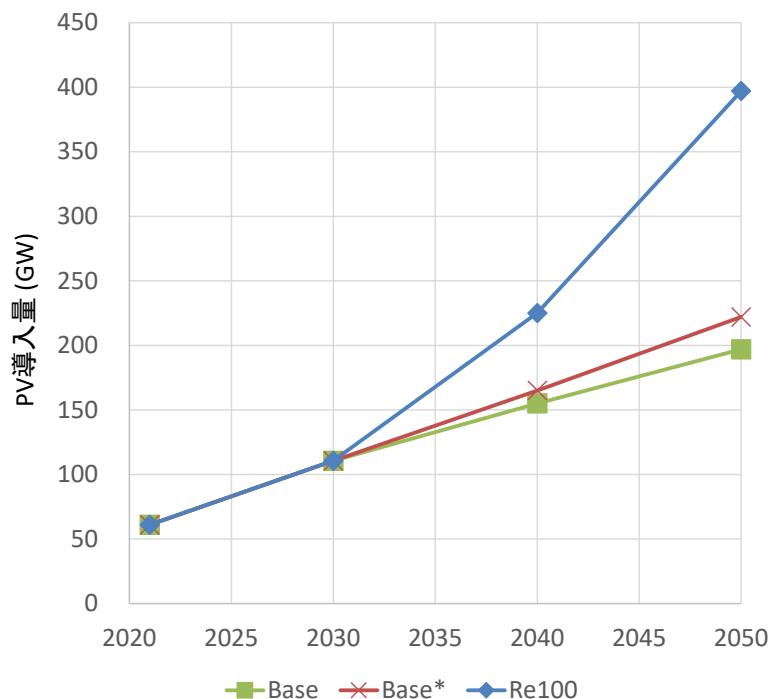
## スマートインバータの効果的な活用方法検討

| ケース                               | 周波数 | 電圧 | 概要  |
|-----------------------------------|-----|----|---|
| 周波数サポート×電圧サポート①(Volt-Var)（出力抑制なし） | △   | ×  | 高日射時に有効・無効電力共に上げ余力なし<br>→周波数への貢献限定的。電圧への貢献が難しい。 |
| 周波数サポート×電圧サポート①(Volt-Var)（出力抑制あり） | ○   | ○  | 出力抑制により有効電力だけでなく無効電力の余力も確保→周波数だけでなく電圧にも貢献       |
| 周波数サポート×電圧サポート②(力率一定)             | ○   | ○  | 力率保持制約により自ずと高日射時の出力変動が緩和→電圧と同時に周波数にも貢献          |

# 最終目標に対して得られた成果④

④ 個別テーマ3「革新的エネルギーデバイスを適用したエネルギー供給システムにおける経済的便益の定量的評価」(CO<sub>2</sub>排出量削減、CO<sub>2</sub>削減コスト低下)

- 各年次で求められる再生可能エネルギーの導入量や電化率、および革新的エネルギーデバイスの費用をパラメータとして入力し、CO<sub>2</sub>の限界削減費用およびCO<sub>2</sub>削減量などを算出する。
- 全テーマの成果を取りまとめて、技術ロードマップおよび社会ニーズのロードマップを作成する。



ロードマップのPV導入量から、年間CO<sub>2</sub>削減量を算出

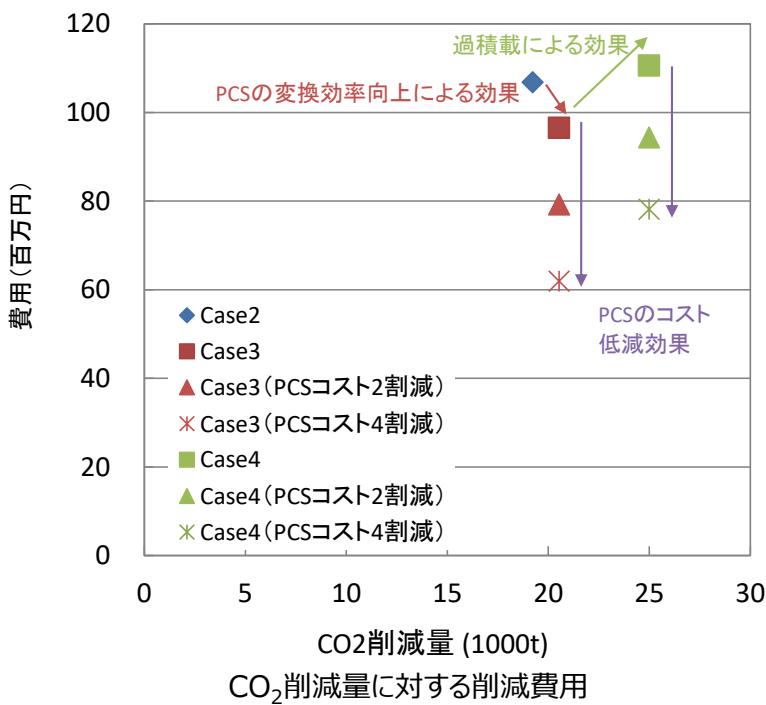
- 設備利用率：12%
- CO<sub>2</sub>排出係数：0.358kg-CO<sub>2</sub>/kWh

# 最終目標に対して得られた成果④

表 各パラメータ（PVシステム価格、PCSの変換効率向上、PCSのコスト低減、過積載）に対するCO<sub>2</sub>の限界削減費用

| PVシステムの基準価格<br>(円/kW) | Case2<br>(PCS効率96%) | Case3<br>(PCS効率99%) | Case3 &<br>PCSコスト<br>2割減 | Case3 &<br>PCSコスト<br>4割減 | Case4<br>(過積載率<br>180%) | Case4 &<br>PCSコスト<br>2割減 | Case4 &<br>PCSコスト<br>4割減 |
|-----------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 250,000               | 41,668 円<br>(右値の基準) | 39,533<br>▲5.1 %    | 37,425<br>▲5.3 %         | 35,317<br>▲10.7 %        | 38,840<br>▲1.8 %        | 37,217<br>▲4.2 %         | 35,594<br>▲8.4 %         |
| 175,000               | 23,612 円<br>(右値の基準) | 22,118<br>▲6.3 %    | 20,642<br>▲6.7 %         | 19,166<br>▲13.3 %        | 21,632<br>▲2.2 %        | 20,496<br>▲5.3 %         | 19,360<br>▲10.5 %        |
| 100,000               | 5,556 円<br>(右値の基準)  | 4,702<br>▲15.4 %    | 3,859<br>▲17.9 %         | 3,016<br>▲35.9 %         | 4,425<br>▲5.9 %         | 3,776<br>▲14.7 %         | 3,126<br>▲29.3 %         |

※CO<sub>2</sub>排出係数は0.54kg-CO<sub>2</sub>/kWh(火力発電相当)を適用



Case 2:スマートインバータ適用、PCS効率96%、過積載率140%  
Case 3:スマートインバータ適用、PCS効率99%、過積載率140%  
Case 4:スマートインバータ適用、PCS効率99%、過積載率180%

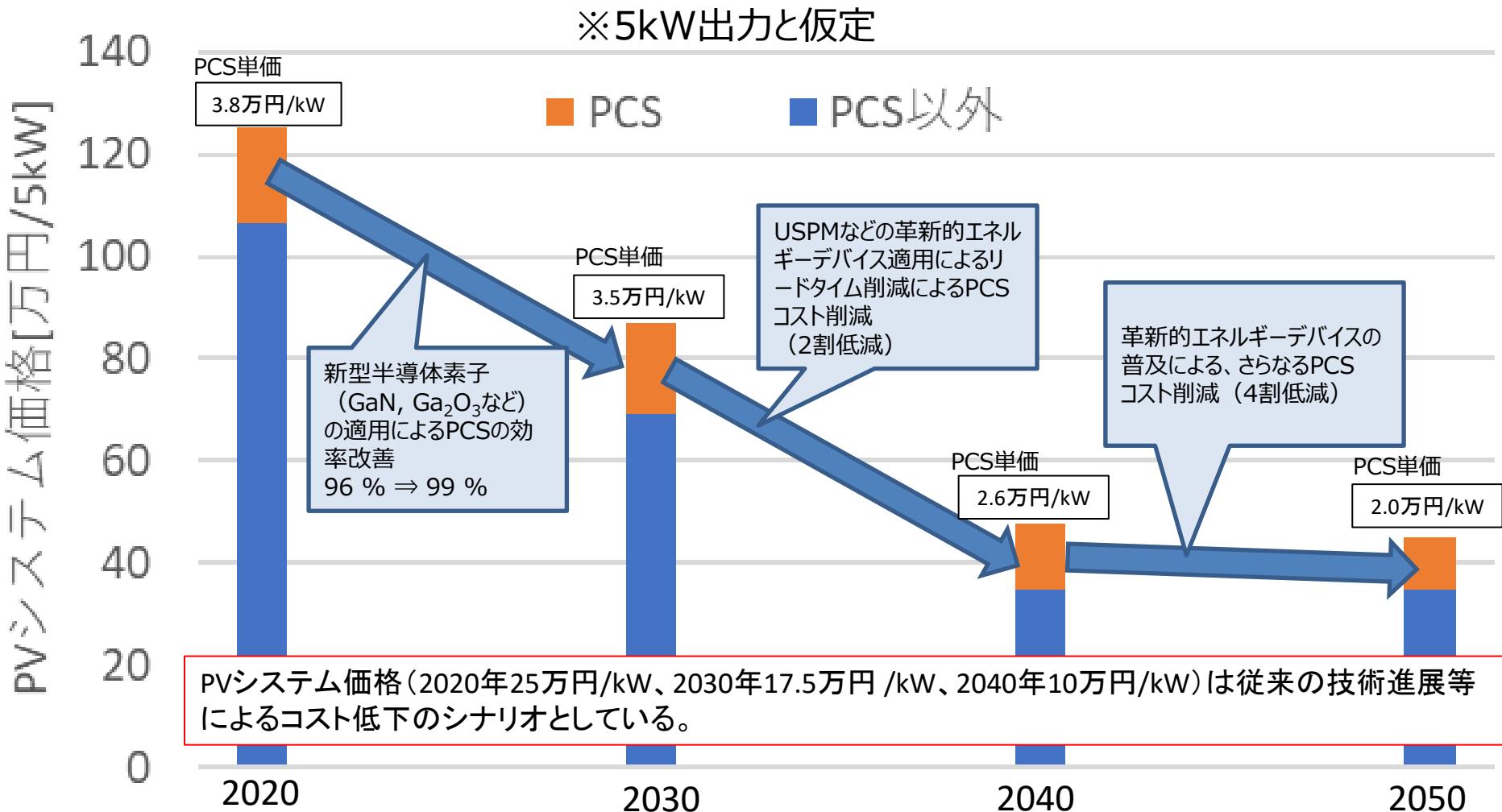
個別テーマ2-1のスマートインバータ適用によるPVの導入可能量の試算結果をもとに、CO<sub>2</sub>の限界削減費用（CO<sub>2</sub>の排出量を追加的に1トン削減するために必要な費用）を試算した。その結果、

PVシステム価格が下がると、PCSの変換効率向上やPCSのコスト低減が、CO<sub>2</sub>の限界削減費用の減少に相対的に効果的になることを明らかにした。

⇒将来の革新的エネルギーデバイス（USPM含む）の適用により得られる経済的な便益を定量的に示した

# 最終成果：PCS・PV価格のロードマップ

シナリオとCO<sub>2</sub>削減費用などを組み合わせ、10年ごとのマイルストーンとしてPCS価格のロードマップを下記に示す。(PVシステム価格の内訳として記述する。)



# 社会実装の実現可能性

2020年度よりテーマA-②とテーマBの研究実施者間で、合同の作業会を継続的に実施している。SIP終了後も、革新的エネルギーデバイスを社会に普及させていくために、継続的に意見交換をしながら研究開発を円滑に進めていく必要がある。そこで、この取組みを2023年度以降も継続的に実施できるような体制を構築する。例えば、2023年度に電気学会調査専門委員会の準備委員会を設置し、会議体の準備を進める。そして2024年度から電気学会にて調査専門委員会を立ち上げる。この委員会には、社会実装で不可欠なメーカー（半導体製造や装置製造など）の技術者をメンバーとして含むことを想定する。

本研究開発を通じて得られる人的ネットワークを活用することにより、上記の仕組みを2023年度までに構築することは十分可能と考える。

社会実装に向けた体制構築のために、テーマB研究者と継続的に意見交換をしながら研究開発を行っている。また、研究実施内容を審議するための検討委員会を設置し、実施項目の過不足を含めた適正量や、その実効性と実現可能性について審議している。なお、審議中の委員からの提言やアドバイスは適宜フィードバックする。上記活動を通して継続的に体制構築し続けており、構築した体制を基に社会実装への出口戦略に繋げていく予定である。

これまでの研究成果に関する講演発表を行うことでGa系素子の適用先やそれによる技術的・経済的便益を国内の研究者に情報提供することにより、我が国の $\text{Ga}_2\text{O}_3$ に関連する技術の向上・普及に寄与することが考えられる。

これまでに、国際会議やワークショップで本研究テーマの成果発表を行い国内の研究者に情報提供した。

# 成果の対外的発信

電気学会電力・エネルギー部門大会で1件の口頭発表

電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会で1件の口頭発表

電気学会全国大会（2022年3月開催）でのシンポジウム講演  
テーマA合同で実施

九州工業大学ワークショップで講演（2022年3月）

CIGRE2022 Kyoto（2022年5月）  
2件の論文を投稿

IPEC2022 Himeji（2022年5月）  
テーマBと合同でオーガナイズドセッションを提案  
テーマA②から2件、テーマBから2件

電気設備学会誌に寄稿（2022年10月）

2022 Singapore microgrid symposium（2022年11月）  
1件のポスター発表

- IPEC2022 Himejiにおいて、海外研究者と次の話題を中心に意見交換
  - Ga系(特にGa2O3)はSiと同程度のコストで生産可能。導通損失は同一周波数で比較すると小さくなるため高効率化が期待できること。(認識の共有)
  - 欧米と比較し日本は配電の電圧階級が低いため、同一容量において電圧管理が厳しう。スマートインバータなしの配電系統では再エネ導入量に制限があるが、スマートインバータ導入により再エネ導入量が著しく(4倍強)増大する。