

2023年2月9日

「令和4年度 地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業」
成果発表会

**自律分散型エネルギーシステムを支える
双方向充電システムに関する技術開発**

パナソニックホールディングス株式会社
マニユファクチャリングイノベーション本部
岡山 芳央

1. 開発全体概要、CO₂削減効果など

2. 技術開発の内容及び成果のご紹介

2-1. 蓄電デバイス搭載定置式双方向急速充電システム

2-2. 小型双方向車載充電器 システム開発

2-3. 小型双方向車載充電器 GaNモジュール開発

開発全体概要

◆開発の概要・目的

環境省が提唱する「地域循環共生圏」＝自律分散型エネルギーシステム構築には下記が必要

①EV蓄電池の活用 ②急速充電の系統への影響回避 ③再生可能エネ急増による系統需給バランス確保

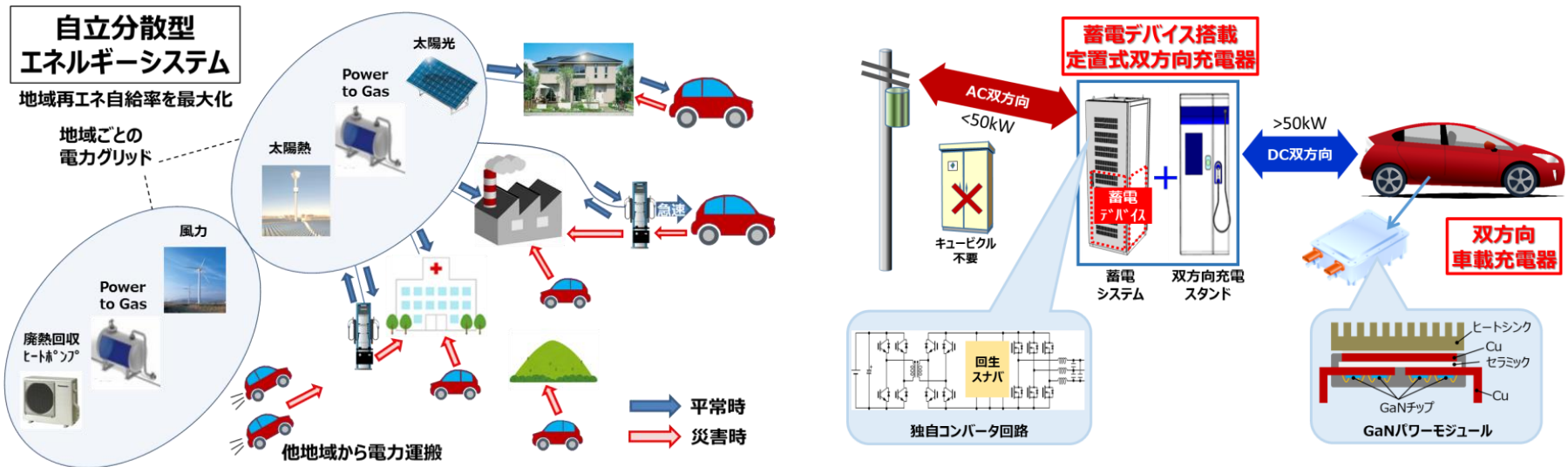
そこで、蓄電デバイス搭載により系統負荷と設置コストを大幅に低減する双方向充電システムを開発

・独自コンバータ技術により小型高効率を実現する蓄電デバイス搭載定置式双方向急速充電システム

・GaNデバイスを使いこなす制御技術とパワーモジュール技術による小型高効率な双方向車載充電器

これにより、自律分散型エネルギーシステムの普及を促進し、低炭素社会実現への貢献を目指す。

◆実施期間：2019～2021年度（3年間）



◆開発目標となる仕様及び性能

蓄電デバイス搭載定置式双方向急速システム：

20kW/20kWh蓄電デバイス搭載システムを開発、最大変換効率93%以上（損失30%削減）

双方向車載充電器：3.3kW双方向車載充電器を開発、電力密度15W/in³（従来比 容量30%減）

CO₂削減効果、事業終了後の事業化の取組など

◆CO₂削減効果の試算

蓄電デバイス搭載定置式双方向充電システムの電力変換効率改善によるCO₂削減効果

⊕小型双方向車載充電器の電力変換効率改善によるCO₂削減効果

⊕本技術開発による再生可能エネルギーの利用拡大がもたらすCO₂削減効果

= 開発品1台当たりの単年度CO₂削減量 (t-CO₂/台・年)

蓄電デバイス搭載定置式双方向充電システム: **5.28** 双方向車載充電器: **0.432**

年度	2050
単年度CO ₂ 削減量 (万t-CO ₂ /年)	164
累積CO ₂ 削減量 (万t-CO ₂)	2,551
CO ₂ 削減コスト (円/t-CO ₂)	8,120

年度	2022	2024	2026
各種規格対応	各種規格対応	追加規格対応	
コスト見極め			
信頼性評価		信頼性評価	追加信頼性評価

◆事業終了後の事業化の取り組み（右上の線表参照）

- 2022年までに社内事業化部門とともに事業化検討を実施
- 2023～24年までに各種規格に対応し、事業化に必要な仕様を開発
- 2024年までに高効率化による周辺部品の削減等、低コスト化を推進
- 2024～25年を目処として、社内関連部門の販売ネットワークを核として、まずはV2H事業者やOEM各社等を中心に商品生産・販売開始を実施

◆開発成果の発信

2023年3月開催予定のApplied Power Electronics Conference (APEC) に開発成果2件を投稿

蓄電デバイス搭載定置式双方向急速充電システム

- ✓ 蓄電デバイス搭載システムと双方向急速充電スタンドの技術開発
- ✓ 両システムを用いた統合動作を実施

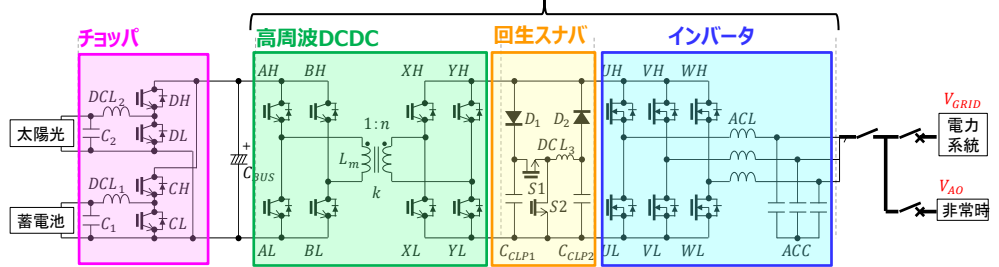
項目	仕様書目標
蓄電デバイス搭載システム	➤ 電力変換段数減とSiC活用による高効率・小型化回路において、20kW入出力、変換効率93%以上の実現（シミュレーションおよび実機動作） ➤ シームレスな充放電確立（シミュレーションおよび実機動作） ➤ システムの信頼性を高めるための絶縁設計に対応し、放熱性を考慮した筐体設計によるプロトタイプ開発 ➤ 火災予防条例に適合させるための「条例キュービクル適合品」の開発 ➤ 系統接続時に要求される系統連系試験項目対応
双方向急速充電スタンド	➤ 広範囲なDC側電圧レンジ（150～500V）に対応する電力変換効率90%以上の実現（シミュレーションおよび実機動作） ➤ AC/DC変換回路と蓄電デバイスが蓄電残量に応じて充放電電力を適切に制御する（CCCV制御など）システム駆動制御の実現（シミュレーションおよび実機動作） ➤ システムの信頼性を高めるための絶縁設計に対応し、放熱性を考慮した筐体設計によるプロトタイプ開発 ➤ CHAdeMO通信規格への対応 ➤ 系統接続時に要求される系統連系試験項目対応
統合システムの実証	➤ 両システムの統合動作によるピークカット動作の実現

蓄電デバイス搭載システム開発

高精度なシミュレーション技術为背景としたフロントローディング開発を実施。弊社独自技術により電力変換段数を削減し、小型・高効率化を達成

弊社独自の高周波絶縁DC/AC変換技術

GAP-D³ 回路



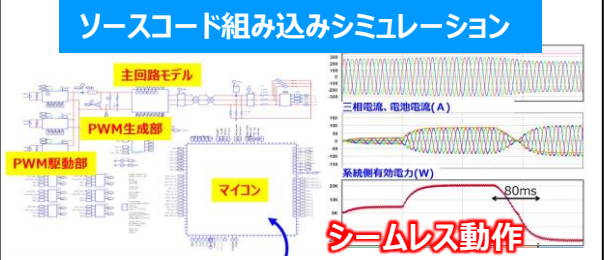
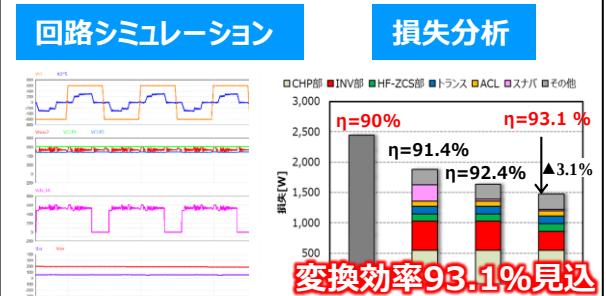
GAP-D³ : Grid-interconnection system by Asymmetrical Phase-shifted Double bi-Directional control isolated DC-AC converter

他社比較

	他社品	Panasonic
PCS容量	20kW	20kW
体積	2980 L	1140 L
変換効率	90.0%	93.4%

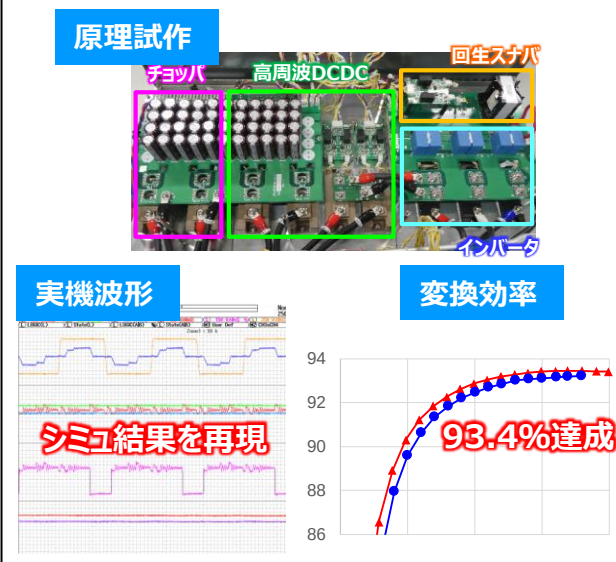
取組①(シミュレーション)

高精度シミュレーションによるフロントローディング開発



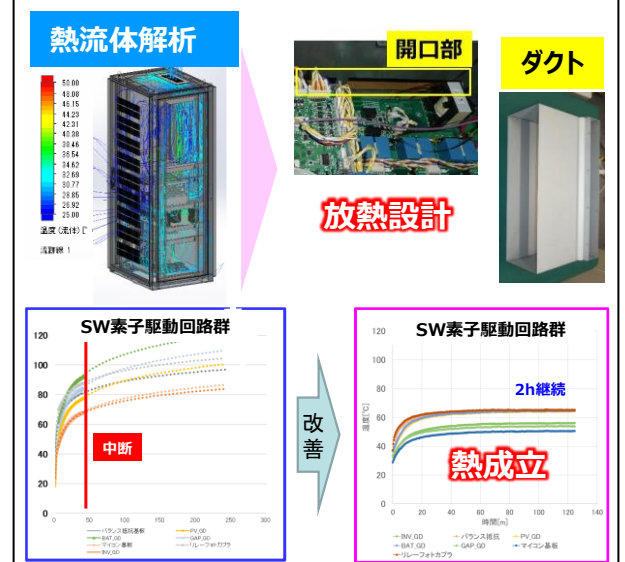
取組②(実機開発)

シミュ結果(理想条件)と実機波形を照合し、短期間に実機立ち上げを実現



取組③(筐体設計・熱設計)

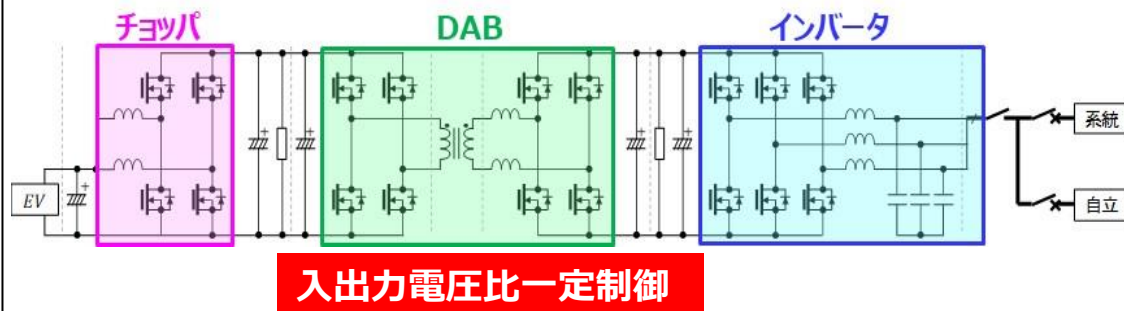
熱流体解析シミュレーションを用いた最適放熱設計により筐体小型化



双方向急速充電システム開発

双方向絶縁+ワイドレンジ電圧動作（150～500V）が要求される技術的に困難な仕様において、10kW×2台の大電力システムを実現

双方向急速充電システム 回路構成



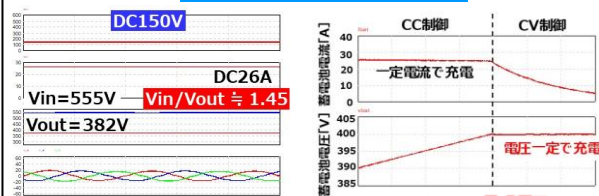
他社比較

	他社品	Panasonic
PCS容量	6kW	20kW
変換効率	90%	92.2%

取組①(シミュレーション)

高精度シミュレーションによるフロントローディング開発

回路シミュレーション



入出力電圧比一定制御

CCCV制御

損失分析

		DAB	CHP	その他
インバータ				
inv_SiC損失	W	540.4	540.4	540.4
ACL 鉄損	W	6.0	6.0	6.0
ACL 銅損	W	51.0	51.0	51.0
その他	W	300.0	300.0	300.0
合計損失	W	1719.8	1756.1	1810.8
効率	%	92.1	91.9	91.7

変換効率92.1%見込

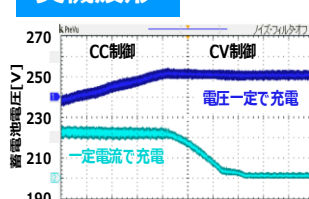
取組②(実機開発)

シミュ結果（理想条件）と実機波形を照合し、短期間に実機立ち上げを実現

原理試作



実機波形



CCCV制御

変換効率

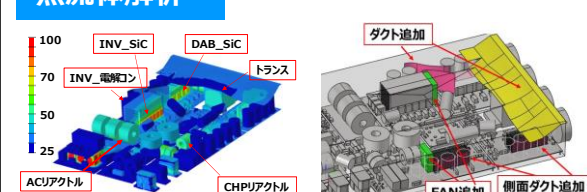


92.2%達成

取組③(筐体設計・熱設計)

熱流体解析シミュレーションを用いた最適放熱設計により筐体小型化

熱流体解析



シミュレーション

放熱設計

項目	シミュ値 修正前	シミュ値 修正後	実測値	目標値	判定
INV_SiC_Q7	167	119	116	140	○
DAB_SiC_Q3	210	121	121	140	○
CHP_SiC_Q4	127	96	101	140	○
INV-電解コン	29	31	26	90	○

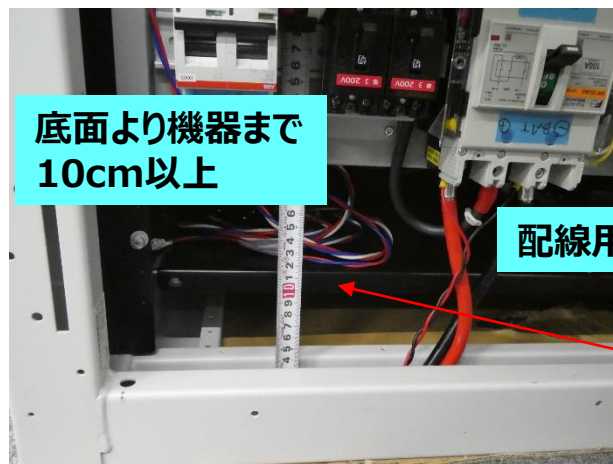
シミュ設計を実機反映し熱成立

条例キュービクル仕様の筐体を設計し「条例キュービクル適合品」を取得。条例要件に関連する部分の対応について以下記載する

10mmの丸棒が入らないこと

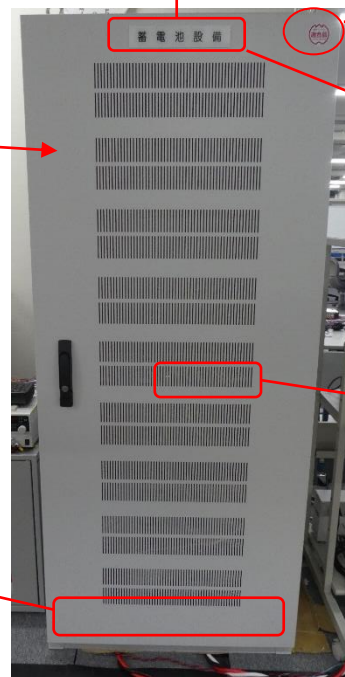


- ・板厚 1.6mm以上
- ・耐酸、耐アルカリ塗装



底面より機器まで
10cm以上

配線用遮断器

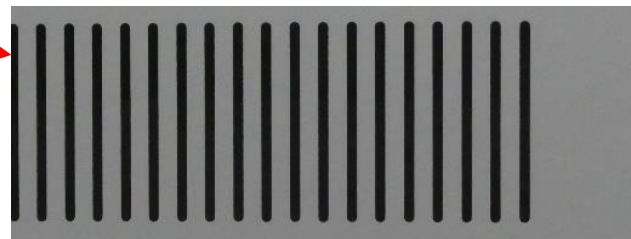


条例キュービクル適合
を示すシール



蓄電池設備

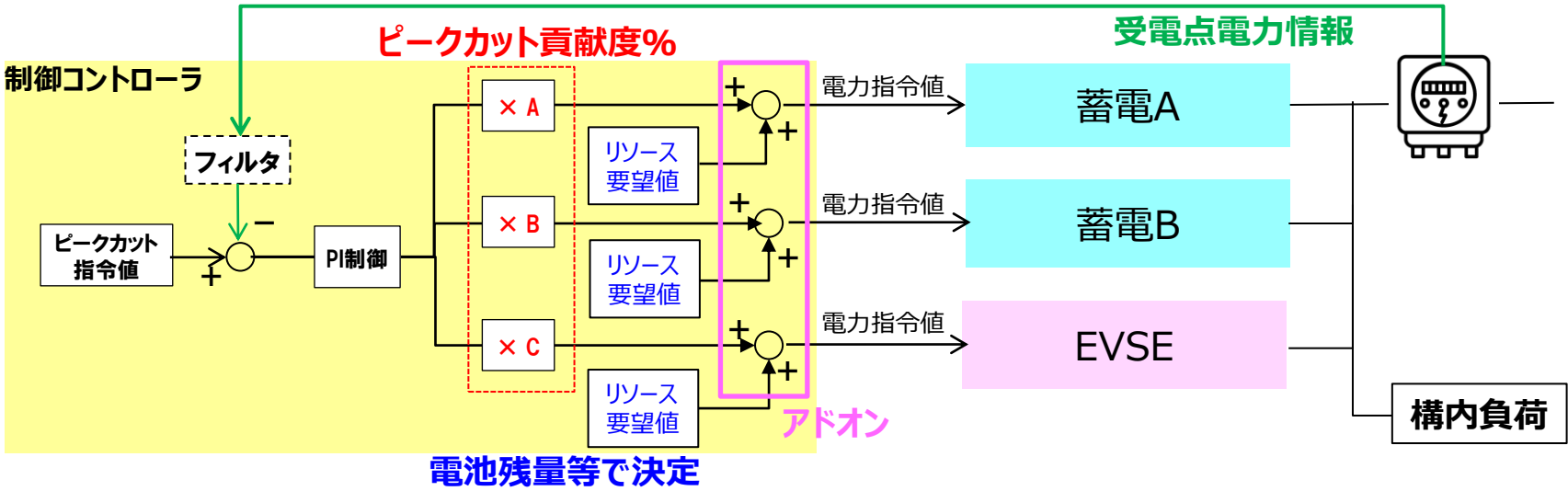
条例第13条第2項に定める標識



10mmの丸棒が入らないこと

多数台接続を想定した自律分散性の高い制御方式を確立し、実機動作を確認

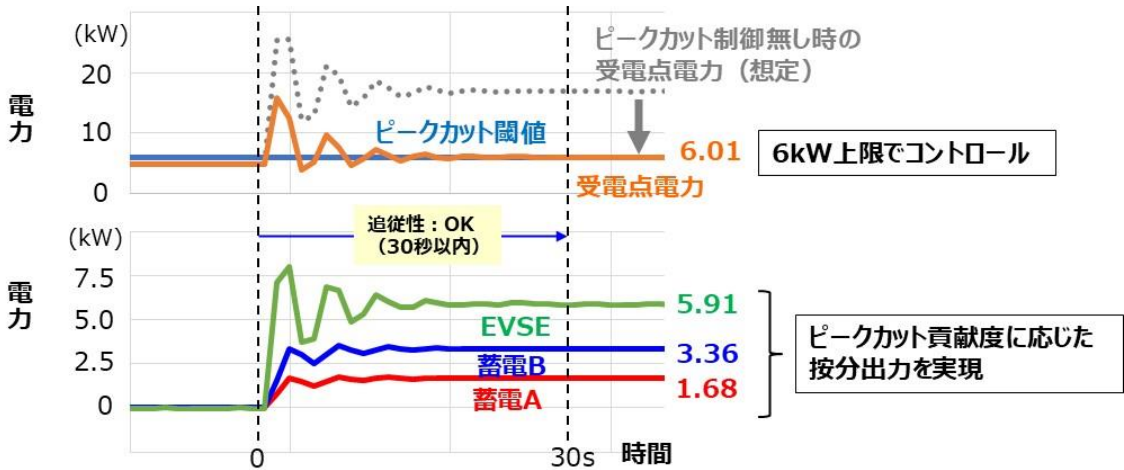
- リソース要望値とピークカット貢献度の両立
- リソースの参入離脱、状況変化においても安定動作を実現



実証した動作モード

- Case 1 : 全台要望値0kW
- Case 2 : EVSE充電時
- Case 3 : 蓄電B貢献度急変

Case 1 の動作波形



小型双方向車載充電器 システム開発

小型双方向車載充電器 システム開発 開発項目

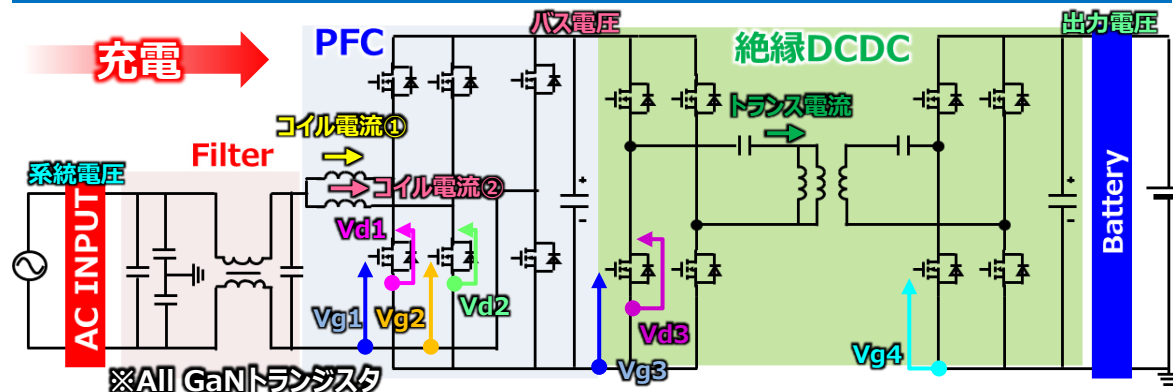
✓ GaN搭載 + 約500kHz高周波駆動により、小型双方向3.3kW車載充電器を開発

項目	仕様書目標抜粋
小型双方向車載充電器システム開発	✓ 高速スイッチングデバイス(GaNあるいはSiC)を用いた高効率ソフトスイッチング制御技術を用い、3.3kW AC/DC変換PFC回路の基本動作を実証し、最大周波数として500kHz以上の動作を検証すること。 ✓ PFC回路以外の絶縁DC/DC回路とDC/AC変換インバータ回路の開発を実施し、絶縁DC/DC回路とDC/AC変換インバータ回路の500kHz以上の高周波動作を実証すること。 ✓ PCBフィンディングを用いた小型トランスを設計し、絶縁DC/DC回路の500kHz以上の高周波動作を実証すること。 ✓ 高周波化によるシステム全体の小型化の検討を行い、高周波動作する双方向PFC/インバータ回路と絶縁DC/DC回路を組み合わせた小型双方向充電器システムのボードを作製し、15W/in³の電力密度・容量サイズ従来比30%減を実証すること。 ✓ 基本動作課題および連携動作時の動作課題を抽出しソフトウェア制御手法を最適化することで、基本システム動作（立ち上げ、通常運転、双方向動作）を実証すること。
小型双方向車載充電器筐体プロト開発	✓ 高放熱性および絶縁規格を考慮して小型電源ボードを組込んだ筐体を設計し、車載充電器のプロトタイプ設計を完成させること。 ✓ 車載充電器規格である高温環境下における最大動作温度等の安全規格や防水規格を考慮、非定常状態時における保護回路の導入検討などを実施すること。
小型双方向車載充電器規格対応準備	✓ 系統に接続する際に必要となる規格項目を抽出して適合可能性を検討すること。

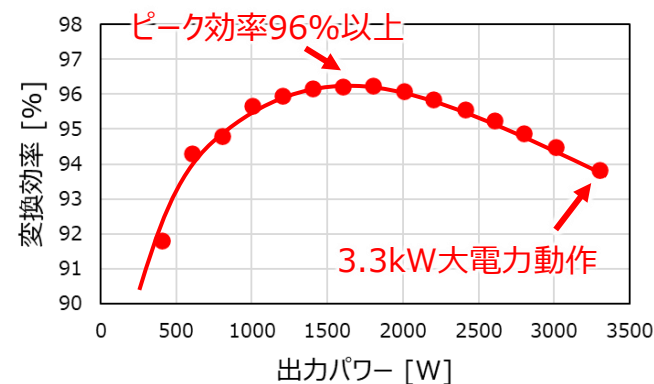
車載充電器統合システム充電動作実証

- ✓ 実機にてPFC+絶縁DCDCの統合システム充電動作実証、3.3kW大電力動作実現
- ✓ PFC、絶縁DCDC共にソフトSW動作実現、96%以上のピーク効率を実証

車載充電器統合システム(PFC+絶縁DCDC)回路図



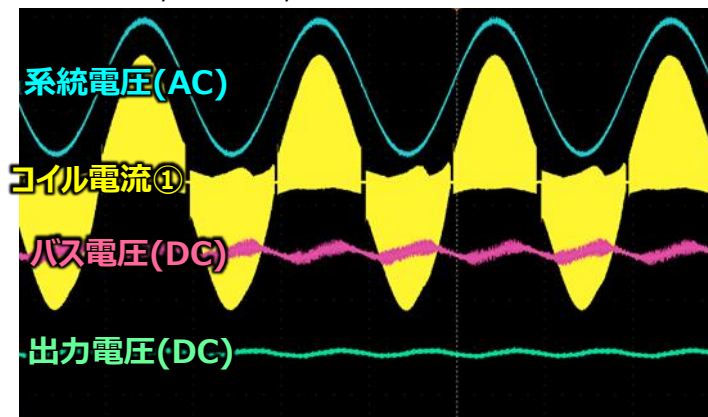
変換効率の電力依存性



車載充電器統合システム実機動作波形

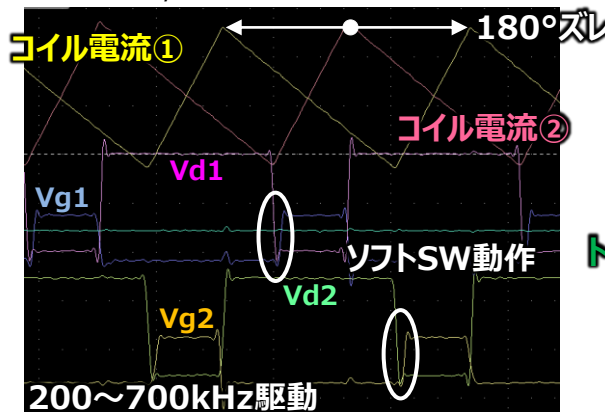
統合システム動作波形

※200VAC/400VDC/200VDC 3.3kW負荷条件



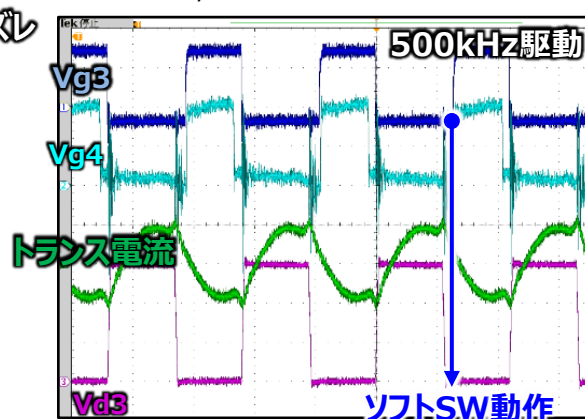
PFC動作波形

※200VAC/400VDC 3.3kW負荷条件



絶縁DCDC動作波形

※400VDC/200VDC 3.3kW負荷条件

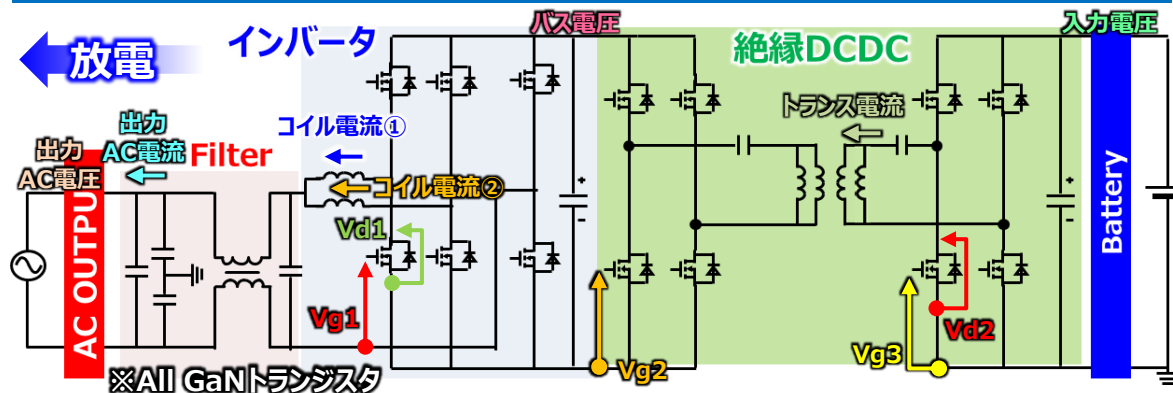


PFC + 絶縁DCDCの一体型統合システムにおいて3.3kWの大電力動作実現、基本システム動作(通常運転)を実証

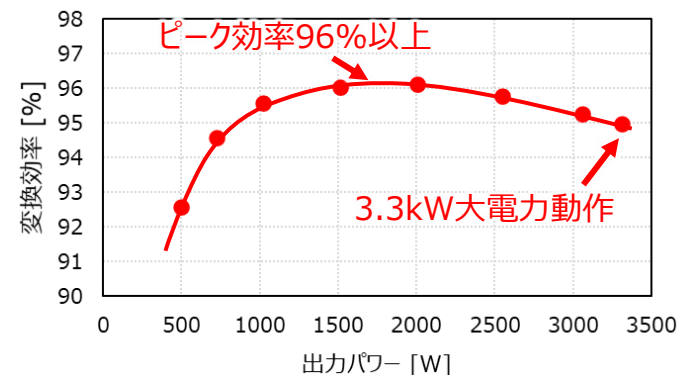
車載充電器統合システム放電動作実証

- ✓ 実機にてインバータ+絶縁DCDCの統合システム放電動作実証、3.3kW大電力動作実現
- ✓ インバータ、絶縁DCDC共にソフトSW動作実現、96%以上のピーク効率を実証

車載充電器統合システム(インバータ+絶縁DCDC)回路図



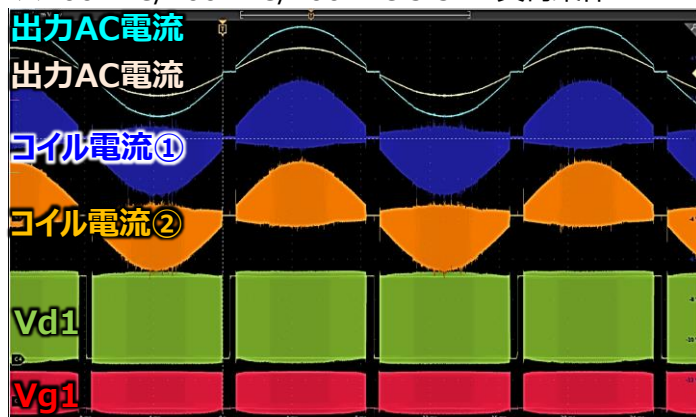
変換効率の電力依存性



車載充電器統合システム実機動作波形

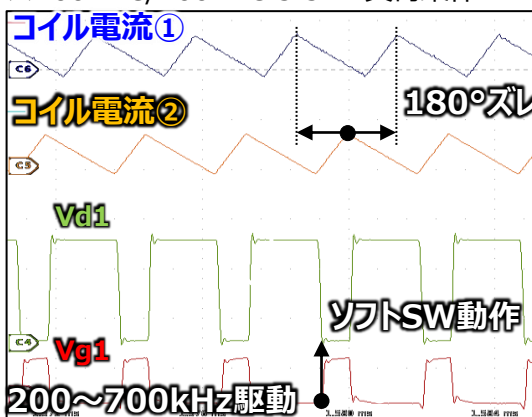
統合システム動作波形

※400VDC/400VDC/200VAC 3.3kW負荷条件



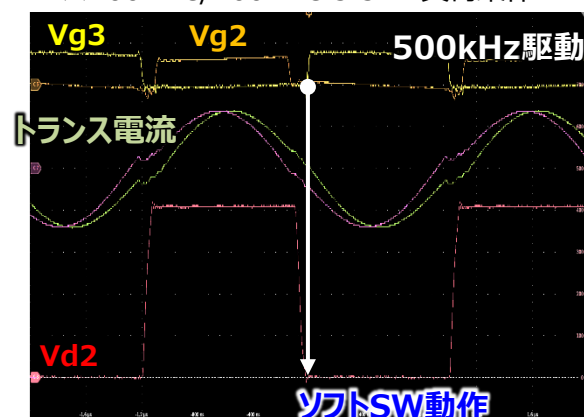
インバータ動作波形

※400VDC/200VAC 3.3kW負荷条件



絶縁DCDC動作波形

※400VDC/400VDC 3.3kW負荷条件

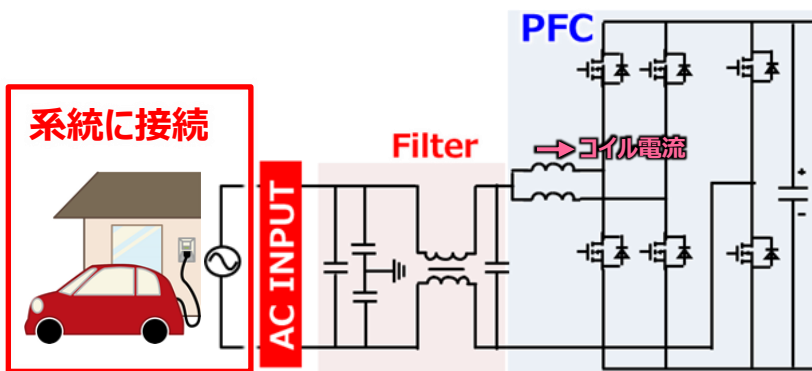


インバータ+絶縁DCDCの一体型統合システムにおいて3.3kWの大電力動作実現、**基本システム動作(双方向動作)実証**

系統接続適合性検討

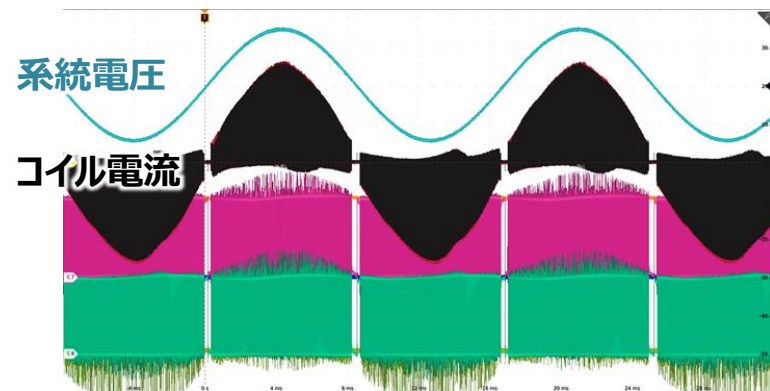
- ✓ 3.3kW車載充電器システムの系統接合時の適合可能性を検討
- ✓ ISO17409(力率) / IEC61000-3-2(高調波)の規格範囲内であることを検証完了

系統接合時の適合性を検討



PFCの動作波形

200VAC/400VDC 3.3kW動作条件



系統接続時に必要な規格をピックアップし、
3.3kW動作時に規格を満たすかどうか検証

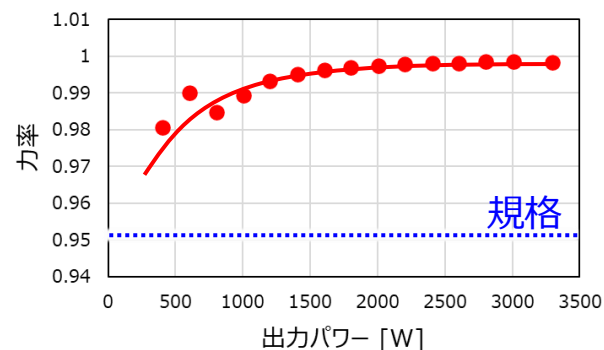
ISO17409 / IEC61000-3-2 規格適合検証

ISO17409

力率

0.95以上

ISO17409
規格範囲内確認

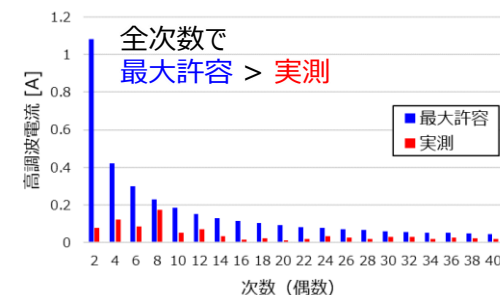
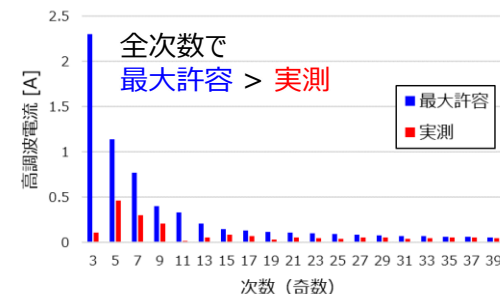


IEC61000-3-2

次数 h	最大許容高調波電流 (A)
奇数次高調波	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times (15/h)$
偶数次高調波	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times (8/h)$

※最大許容電流を上記から抽出

IEC61000-3-2
規格範囲内確認

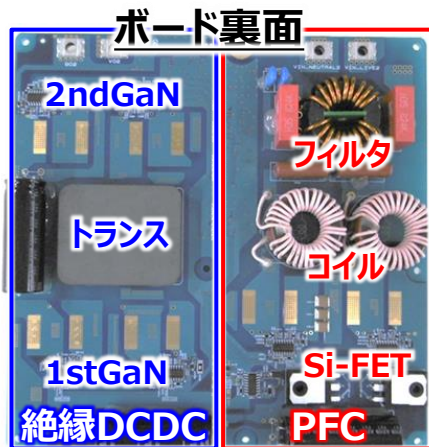
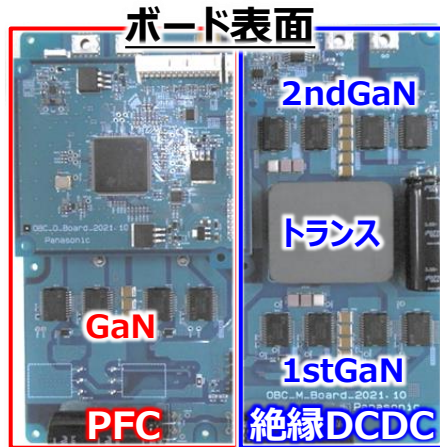


系統接続時に必要な規格項目を抽出、規格適合性検証完了

本開発プロトタイプの汎用製品との比較

- ✓ 低背な統合システムボードを作製し、水冷放熱構成を導入することで、
汎用製品よりも約62%サイズを低減した小型な車載充電器プロトタイプ実現

本開発車載充電器プロトタイプの汎用製品との比較



	汎用製品	本開発品
外観	 他社汎用品	
電力	3.3kW	3.3kW
放熱方式	空冷	水冷
高さ	80mm	51.7mm
サイズ	7.8L	3.0L
サイズ比率	1	0.38

62%減

水冷放熱構成を導入し、小型・低背な**車載充電器のプロトタイプを完成**

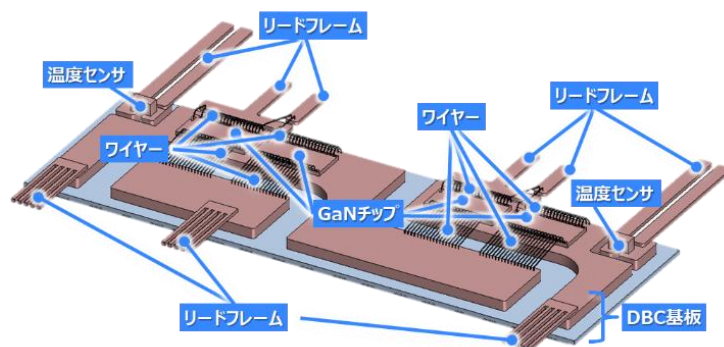
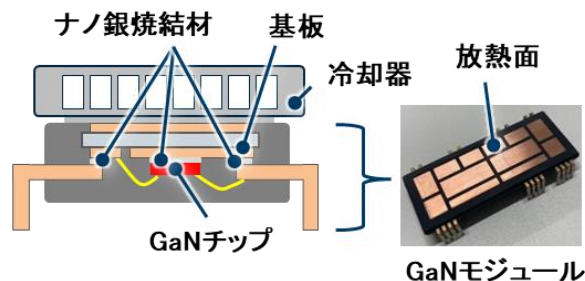
小型双方向車載充電器 GaNモジュール開発

✓ モジュールの耐熱信頼性確保とCLLCコンバータへの組込み検証実施

項目	仕様書目標抜粋
小型双方向 車載充電器 GaNモジュール 開発	✓ 高速スイッチングデバイス(GaNあるいはSiC)を用いた高効率ソフトスイッチング制御技術を用い、3.3kW AC/DC変換PFC回路の基本動作を実証し、最大周波数として500kHz以上の動作を検証すること。 ✓ 高周波化によるシステム全体の小型化の検討を行い、高周波動作する双方向PFC/インバータ回路と絶縁DC/DC回路を組み合わせた小型双方向充電器システムのボードを作製し、15W/in3の電力密度・容量サイズ従来比30%減を実証すること。 ✓ パワーモジュールに関しては、 ✓ 小型化と高放熱性を両立するパワーデバイス搭載モジュールを設計し、モジュールサンプルの動作確認を実施すること。 ✓ 製造プロセスの改善により耐熱信頼性(150℃耐熱)課題を対策し、完成度の向上を図り、車載充電器の筐体プロトタイプへの組込み検証を実施すること。

モジュールの構造

✓ GaNチップ4個を1パッケージ化し、チップおよびリードフレームはナノ銀焼結材で接合



構成部材	材料および主な寸法仕様
GaNチップ	横型GaN 5.42×2.65mm
温度センサ	サーミスタ 3.2×1.6mm
リードフレーム	0.5mmt Cu
DBC基板	回路層/放熱層:0.8mmt Cu 絶縁層: 0.32mmt Si ₃ N ₄
ワイヤー	Φ50μm Auワイヤー
接合材	ナノ銀焼結ペースト

《接合特性の比較》

接合材	ナノ銀焼結ペースト	高温はんだペースト
金属成分	Agのみ	Sn90/Sb10
シア強度 ※1 (実測値)	69MPa	60MPa
熱伝導率 (カタログ)	300W/mK	47W/mK
耐熱信頼性 温度	175℃以上	150℃ (150℃超で合金層 成長による強度劣化)

※1 初期のシア強度測定結果

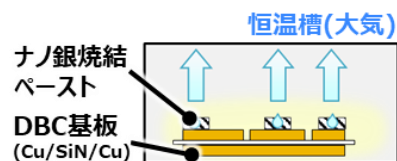
ジャンクション温度175℃以上を見据え
ナノ銀焼結接合でのモジュール化を検討

モジュールの信頼性課題

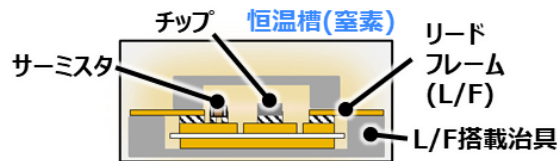
✓【課題】①GaNチップ接合部 ②リードフレーム(L/F)接合部 のクラック耐性改善

《モジュールの製造プロセスフロー》

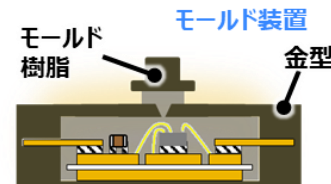
予備加熱



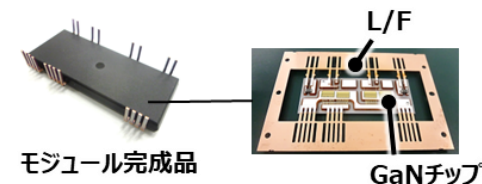
焼結



樹脂モールド

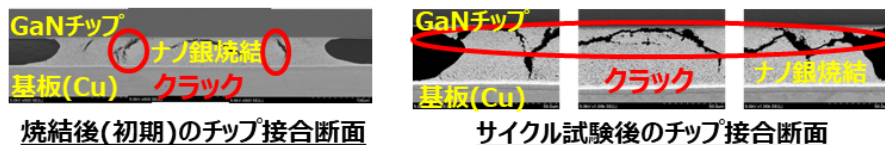


サイクル試験



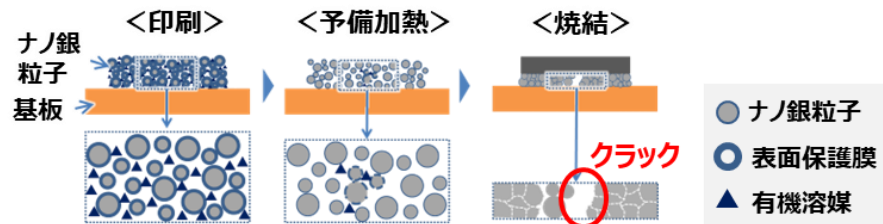
課題①：GaNチップ接合部のクラック耐性改善

【不具合】焼結後・サイクル試験後にクラック発生
⇒熱抵抗増加によるモジュールの放熱性能低下



【不具合メカニズム推定】

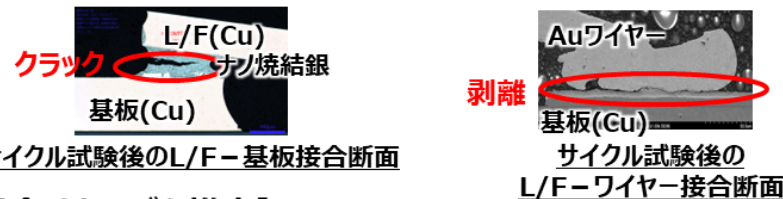
予備加熱の残存有機物により焼結結合が阻害されクラック発生



【取組み①】焼結材の材料・プロセス最適化による残留溶媒の最少化
＜目標指標：クラック率≤30%＞

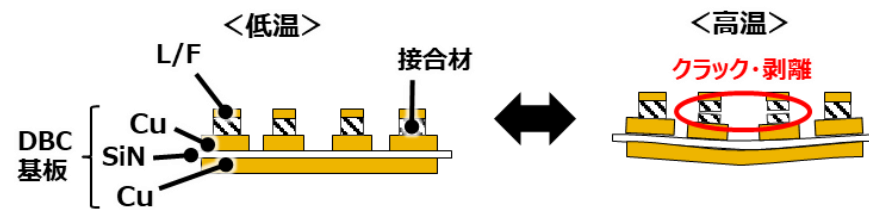
課題②：リードフレーム(L/F)接合部のクラック耐性改善

【不具合】サイクル試験後にクラック・剥離発生
⇒オン抵抗増加によるモジュールの電気性能低下



【不具合メカニズム推定】

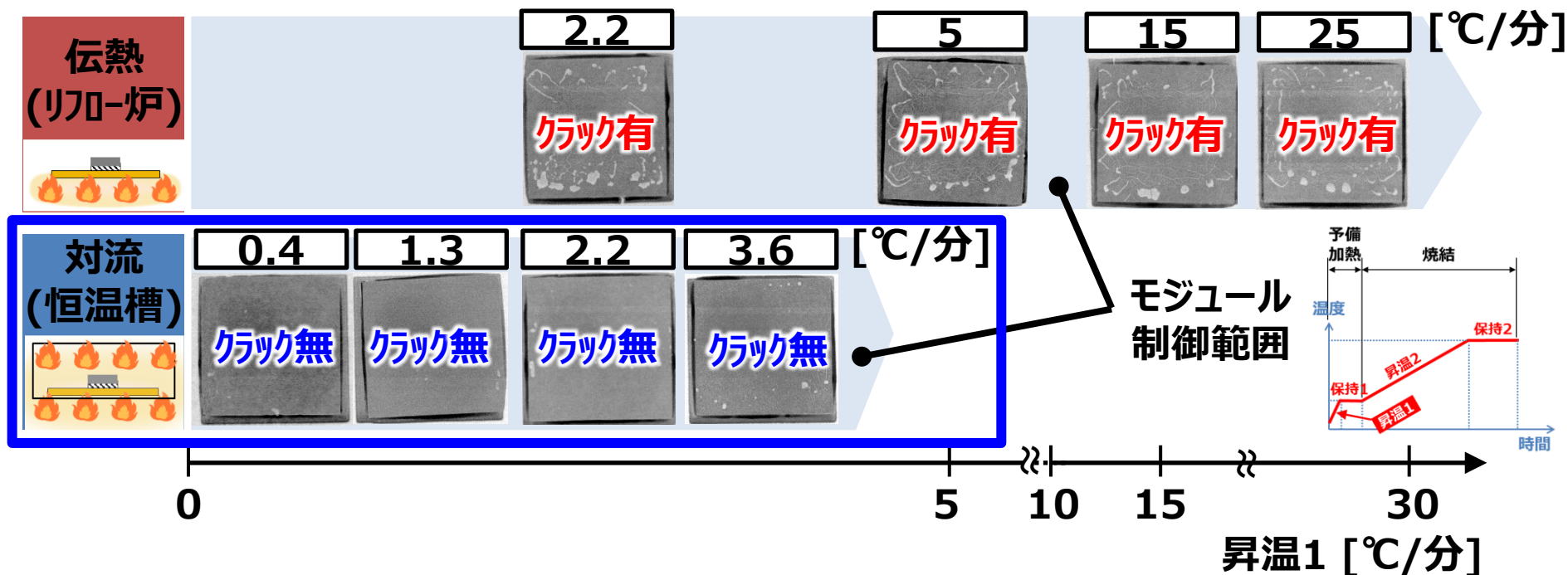
接合材と基板の熱膨張差による熱応力によりクラック発生



【取組み②】シミュレーションに基づく基板設計の最適化による反り抑制
＜目標指標：オン抵抗増加率≤20%＞

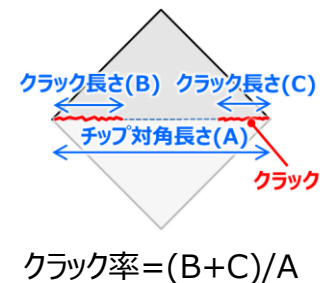
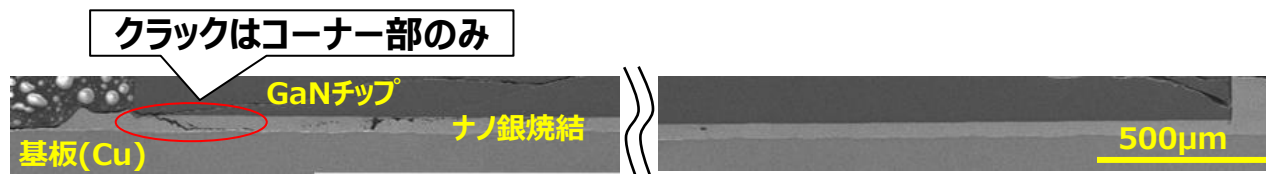
取り組み① プロセスアプローチによる残留溶媒の最少化

- ✓ 加熱方式：恒温槽による対流方式により均一加熱
- ✓ 昇温時間：予備加熱の昇温時間(昇温1)を最適化(0.4～3.6℃/分)



対策後のモジュールでのクラック率

熱衝撃後のクラック率(-40⇔150℃, 1000cyc) : 8.7% (目標30%以下)

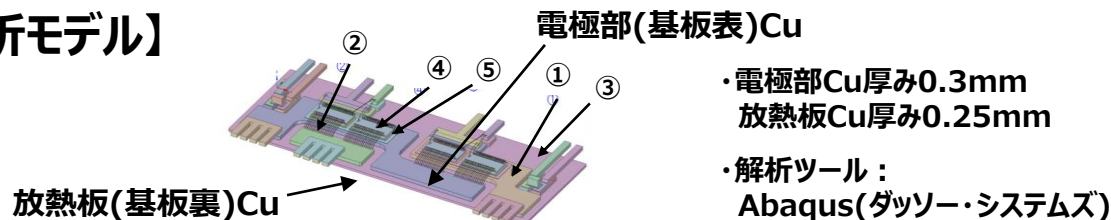


取り組み② 基板パターンの最適化による反りの抑制

✓ 基板表裏Cuの類似形状化により表裏Cuの熱膨張差を低減することで基板の反りを抑制

熱応力シミュレーションを用いて、温度変化時の反り量を抑制可能な基板パターンを検証

【解析モデル】



部品	材料	ヤング率 [GPa]	ポアソン比	熱膨張係数 [ppm/K]
①電極部	Cu	123	0.35	16.5
②ワイヤー	Au	90	0.44	14.1
③セラミック板	Si ₃ N ₄	310	0.3	2.6
④チップ	Siで代替	170	0.3	2.978
⑤ナノ銀焼結材	Ag	17.28	0.3	21.7

【解析結果】 放熱板Cuの形状を変更し、25℃→300℃における基板の反り量を確認

	ベタ形状	電極部Cuパターン類似形状	中心部のみの形状
裏面 放熱板 イメージ 図	青：基板 赤：Cu		
解析 結果	反り量 0.757[mm] z拘束 x,y,z拘束 Cu膨張 電極部<放熱板 ⇒下凸反り状態	反り量 0.064[mm] Cu膨張 電極部=放熱板 ⇒ほぼフラット状態	反り量 0.572[mm] Cu膨張 電極部>放熱板 ⇒上凸反り状態

変位コンター変形倍率：×5

対策後のモジュールのオン抵抗増加率

熱衝撃後のオン抵抗増加率(-40⇔150℃,500cyc)：9% (目標20%以下)

クラック無

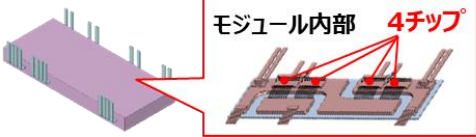
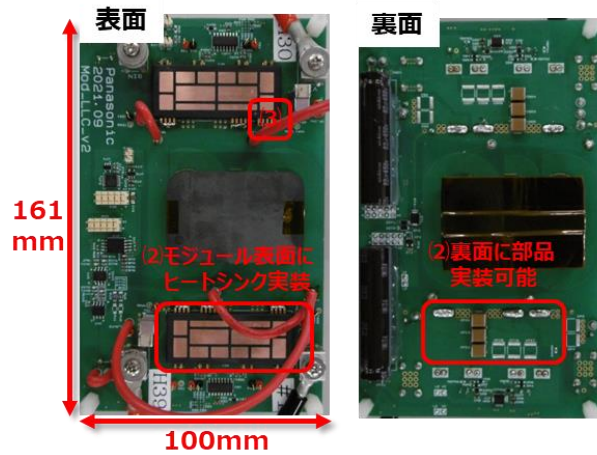
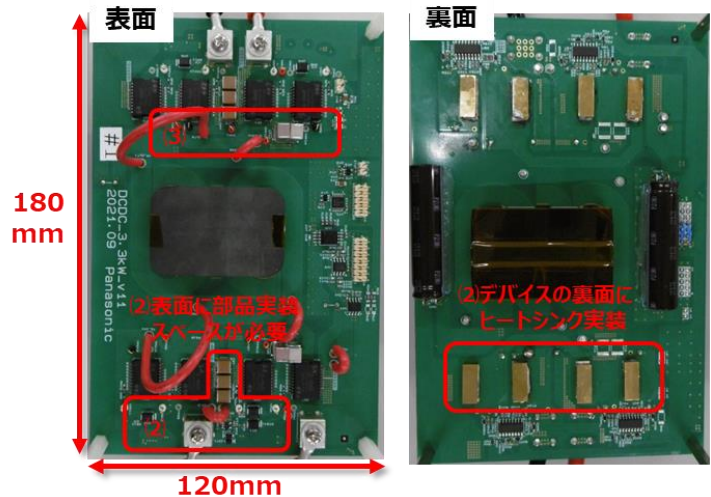
リードフレーム(Cu)

ナノ焼結銀

基板(Cu)

モジュール化による効果

✓ モジュール化により、CLLCコンバータの基板サイズ25%小型化、効率0.3%改善

	新規モジュール実装(マルチチップ)	従来実装(パッケージ実装)
特徴	 モジュール内部 4チップ (1)トランジスタ(モジュール)の占有面積が小さい (2)モジュール搭載部の基板裏面にも部品多数配置可 (3)レイアウトがシンプルで配線が短い	 パッケージのX線写真 1チップ (1)トランジスタの占有面積が大きい (2)裏面に放熱機構を配置するため部品配置面積大 (3)レイアウトが複雑で配線が長い
基板写真	 表面 裏面 161 mm 100mm (2)モジュール表面にヒートシンク実装 (2)裏面に部品実装可能	 表面 裏面 180 mm 120mm (2)表面に部品実装スペースが必要 (2)デバイスの裏面にヒートシンク実装
基板サイズ	16100mm ²	21600mm ²
効率 ※1	97.1%	96.8%

25%小型化

0.3%改善

※1 400V/3.3kW/500kHz/ZVS・ZCS動作

ご清聴ありがとうございました