

**低炭素社会を実現する  
次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト  
(平成26年度～平成31年度 6年間)**

**プロジェクトの概要説明  
「研究開発成果」及び「実用化・事業化に向けた  
取り組み及び見通し」**

**平成28年9月6日**  
国立大学法人 千葉大学大学院工学研究科  
**佐藤 之彦**

# 研究開発項目①(10)新世代Siパワーデバイス技術開発

## 事業名

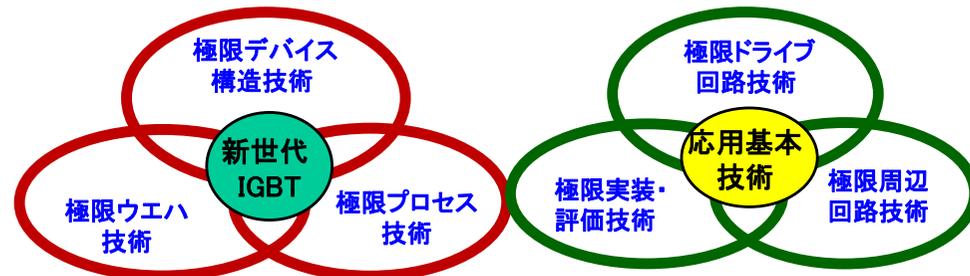
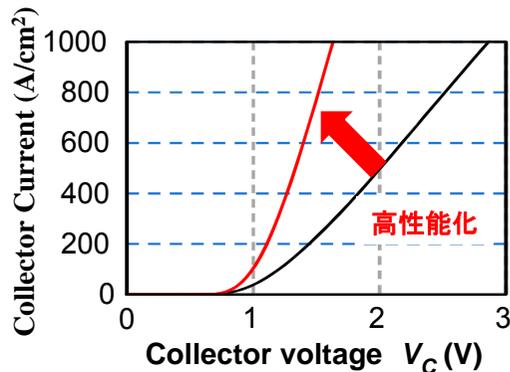
- 低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト  
研究開発項目①(10) 新世代Siパワーデバイス技術開発(委託事業)

## 事業の概要

- 本事業では、低欠陥ウエハ技術、3次元化等の新構造化技術等を駆使することにより、現状のSiCパワーデバイスと耐圧、電流密度等で同等以上の性能を有する新世代Siパワーデバイスを開発する。

## 事業期間

2014年度～2016年度(延長検討中)  
(平成26年度～平成28年度)



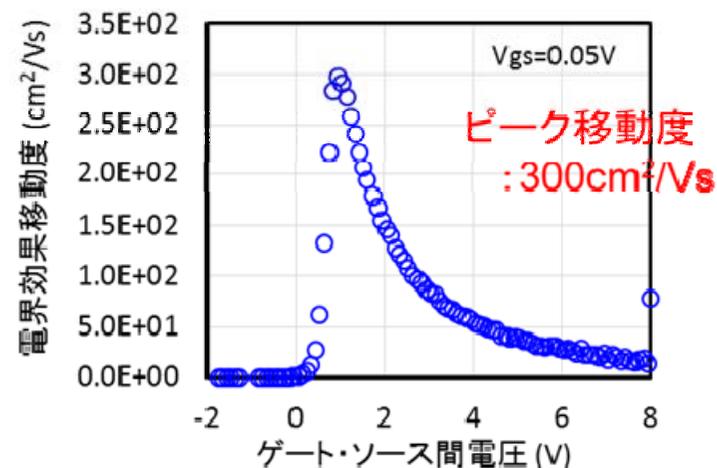
## 主な成果

### (1) 新世代IGBT試作

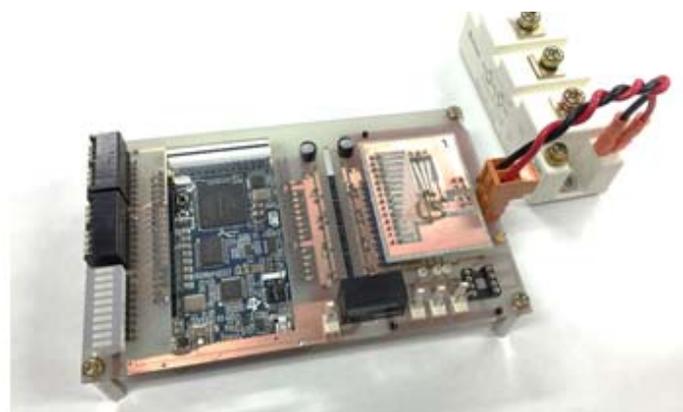
・新世代Si-IGBTを試作するため、まず縦型MOSFETの試作を行った。ピーク移動度では、 $300\text{cm}^2/\text{Vs}$ （目標; $300\text{cm}^2/\text{Vs}$ ）のMOSFETを得ることに成功した。この技術を活用して新構造縦型IGBTを試作し、**良好な電流密度が得られている。**

### (2) ドライブ回路技術

・新開発のゲートドライブ回路を高電圧パワーエレクトロニクス回路に組み込み実証評価する環境を構築し、**インバータ動作により連続運転**を行った。3kVスイッチング環境を構築した。



縦型MOSFETの電界効果移動度



IGBTおよびゲートドライブ回路評価環境

**事業名**

- 低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト  
研究開発項目③次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発  
(2)次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の実用化助成(助成事業)

**事業の概要**

- 本事業では、産業機器、自動車、民生機器等のアプリケーション毎に要求されるパワーエレクトロニクスのスペックを、最適な材料(SiC、GaN等)、設計技術、実装技術等を組み合わせ、最適な応用システムの構築により実現することを目的とする。

**事業期間**

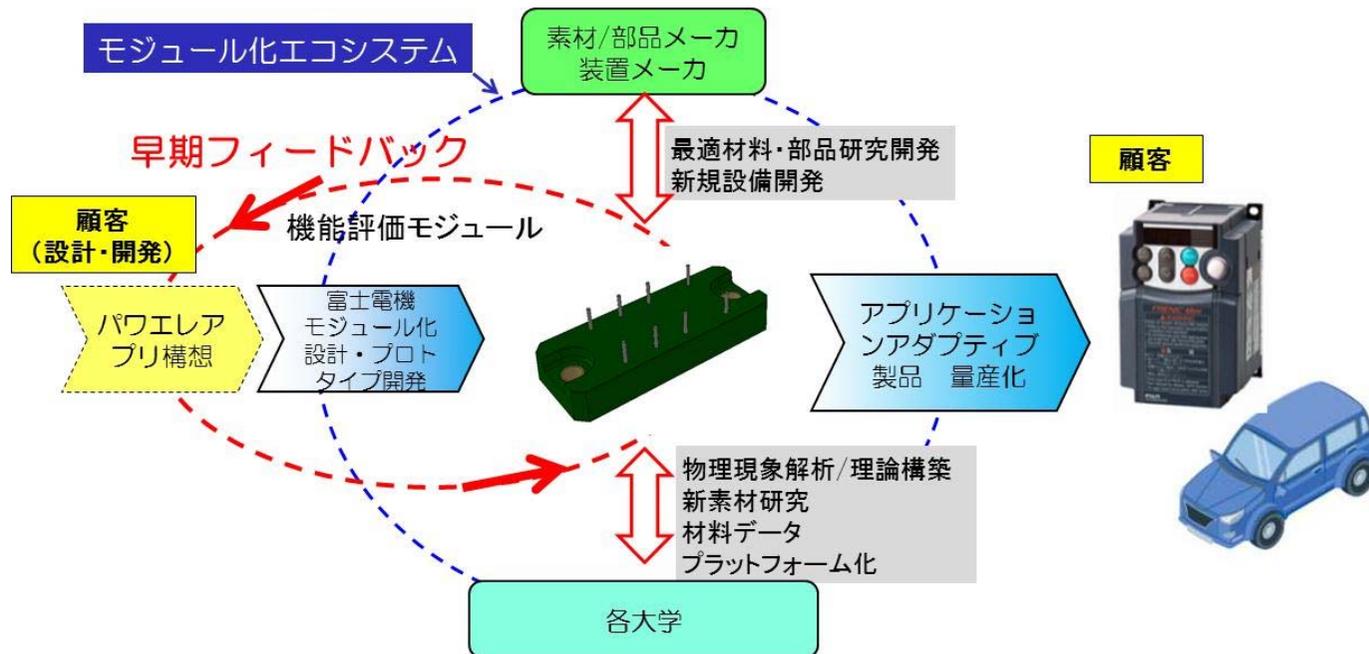
2014年度～2019年度  
(平成26年度～平成31年度)

**事業数**

3件

➤ 世界のパワエレを牽引する次世代パワーモジュール研究開発と日本型エコシステムの構築 (助成先:富士電機株式会社)

顧客カスタム要求を満たしつつ、超短納期で低コストな次世代パワーモジュールの開発と、それを実現するエコシステムを構築し、EV(電気自動車)分野、新エネルギー分野などで世界を牽引する。



➤ 世界のパワエレを牽引する次世代パワーモジュール研究開発  
と日本型エコシステムの構築 (助成先: 富士電機株式会社)

主な成果

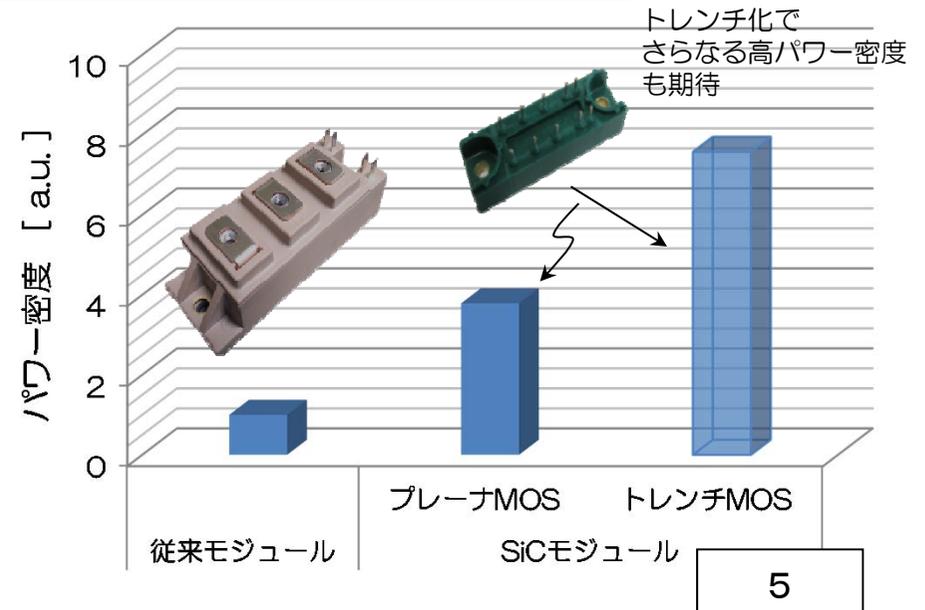
- 1) **パワーモジュール製品の創出**  
産業用/EV用向けモジュールを開発し、  
従来モジュールを大きく上回るパワー密度を達成。
- 2) **製品コスト約30%減**  
低熱抵抗構造(従来比1/2)の開発し、  
小型モジュールの設計・試作・評価を行い、  
コスト目標達成の目途付けを完了。
- 3) **量産化までのリードタイム約50%減**  
各種技術のプラットフォーム化を進め、  
目標リードタイム達成の目途付けを完了。  
特に温度サイクル試験においては、試験期間を  
従来の1年から約10日に短縮。
- 4) **顧客へのサンプル供給期間約1/4**  
部品内製化、治具組立、ロットによる  
自動テストの開発を行い、目標供給期間の  
目途付けを完了。

5) **日本型パワーモジュールエコシステムの構築**

10大学11企業と共同研究体制を組むことで、  
材料・要素技術のプラットフォーム化、信頼性試験  
の物理現象を解明し試験期間を大幅に短縮。

パワー密度の新旧比較

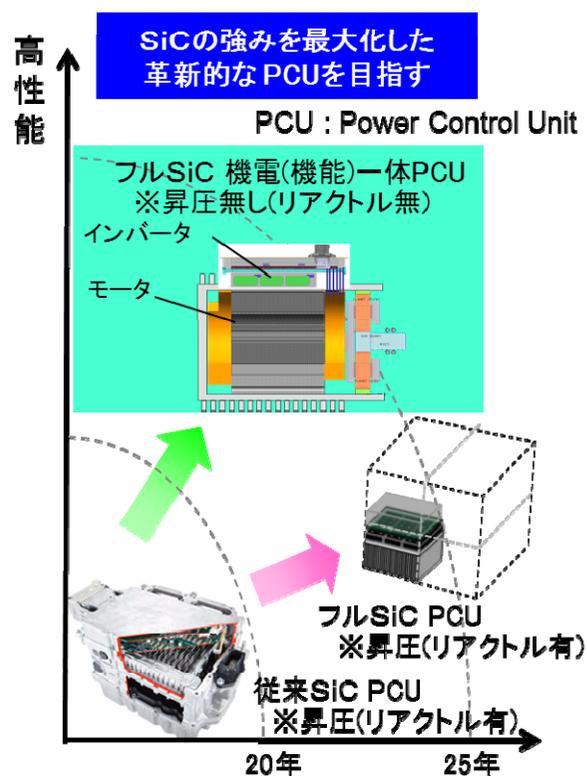
(環境対応自冷式INV向けSiCモジュール)



➤ SiCパワーデバイスを用いた超高効率車載電動システムの開発

(助成先:株式会社デンソー)

SiCパワーデバイスを用いたインバータを活用した昇圧コンバータ不要PCU (Power Control Unit) の開発を行い、車載電動システムの革新的な効率向上を実現する。

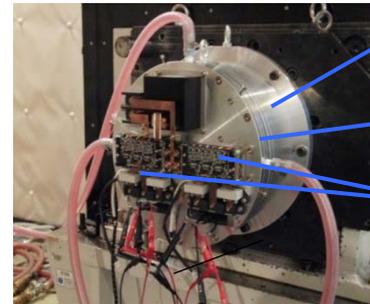


➤ SiCパワーデバイスを用いた超高効率車載電動システムの開発  
(助成先:株式会社デンソー)

主な成果

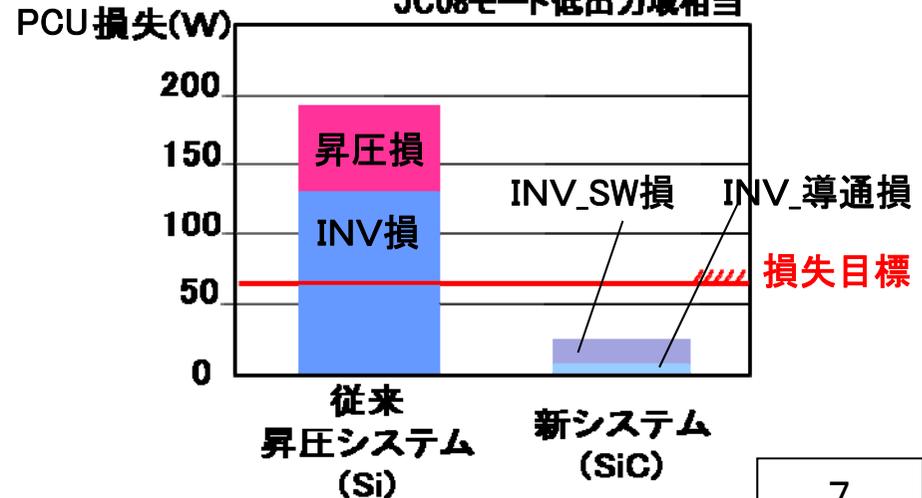
- ・昇圧コンバータを用いず、SiCパワーデバイスを搭載した2つのインバータを用いた新電動システムにおいて、Siパワーデバイス(IGBT)と昇圧コンバータ、インバータを用いた**従来の電動システムと同等の動作を実現**。
- ・PCU(パワーコントロールユニット)部(従来システム:インバータ1台・コンバータ1台、提案システム:インバータ2台分)の**損失1/3以下を実証**。

新電動システム動作実験



MG  
冷却器  
インバータモジュール×2

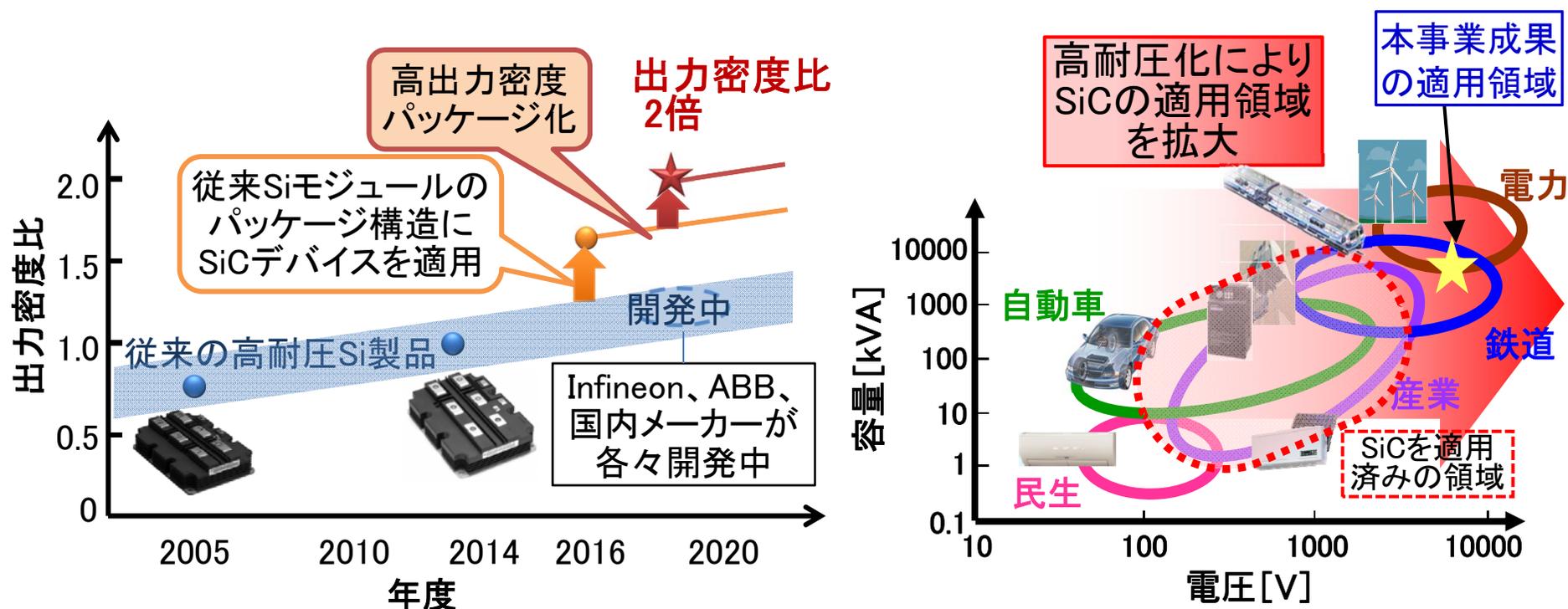
3000rpm 10Arms (3.1kW)  
JC08モード低出力域相当



## ➤ 高出力密度・高耐圧SiCパワーモジュールの開発

(助成先:三菱電機株式会社、三菱マテリアル株式会社、デンカ株式会社、日本ファインセラミックス株式会社、DOWAエレクトロニクス株式会社)

世界最高レベルの高出力密度・高耐圧SiCパワーモジュールを開発し、高電圧領域における電力変換器の小型化、軽量化を実現する。

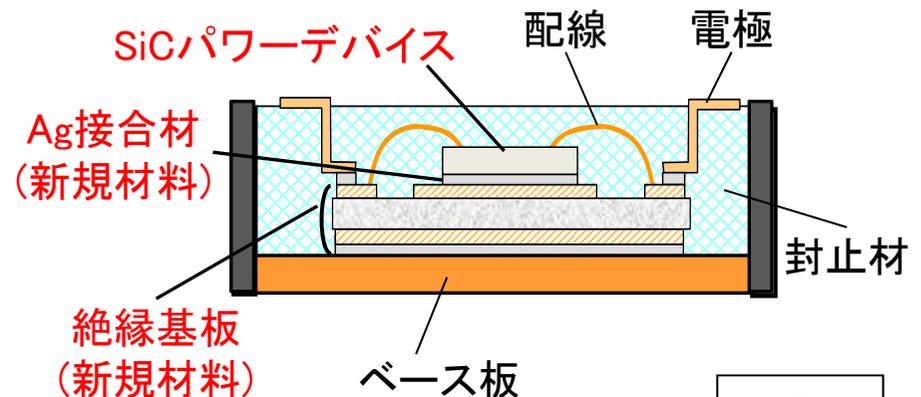
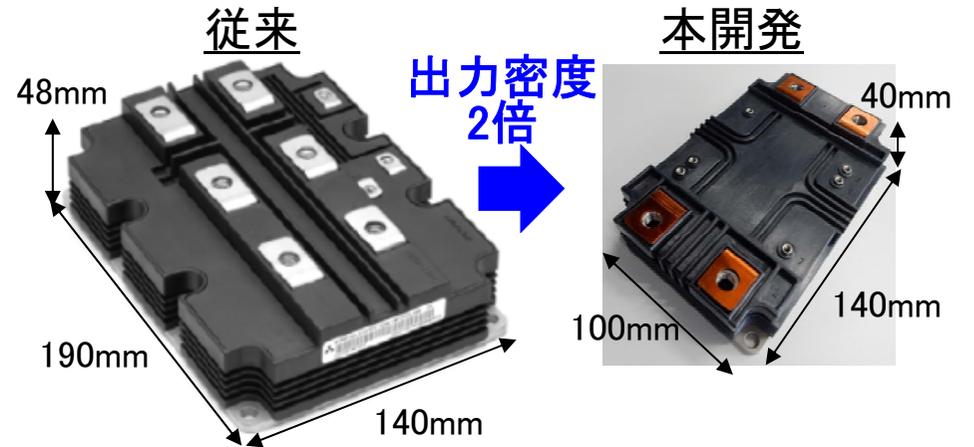


➤ **高出力密度・高耐圧SiCパワーモジュールの開発**

(助成先:三菱電機株式会社、三菱マテリアル株式会社、デンカ株式会社、日本ファインセラミックス株式会社、DOWAエレクトロニクス株式会社)

主な成果

1. 回路動作検証用6.5kVモジュールの評価および解析結果により、出力密度2倍(対Si比)が実現可能であることを確認
2. 高出力密度パッケージに必要となる高放熱絶縁基板や高信頼Ag接合材といった新規材料において、放熱性、信頼性の目標達成に目処
3. 高出力密度に適したSiCパワーデバイスを試作し、出力密度2倍を達成できる特性を確認



## 研究開発項目③応用システム開発(1)(革新アプリ)

---

### 事業名

- 低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト  
研究開発項目③次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発  
(1)次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の先導研究

### 事業の概要

- 本事業では、パワーエレクトロニクスの新たな産業創出につなげることを目的として、革新性及び独創性の高い新しい応用システムを考案し、その要求に応じるための先導研究を実施する。
- 具体的には、考案された応用システムのコンセプト実証を行う。実証を通じて、考案された応用システムの省エネ効果の有効性や、見込まれる競争力の優位性などを検証し、今後の技術的課題の抽出等を行う。

### 事業期間

2015年度～2016年度  
(平成27年度～平成28年度)

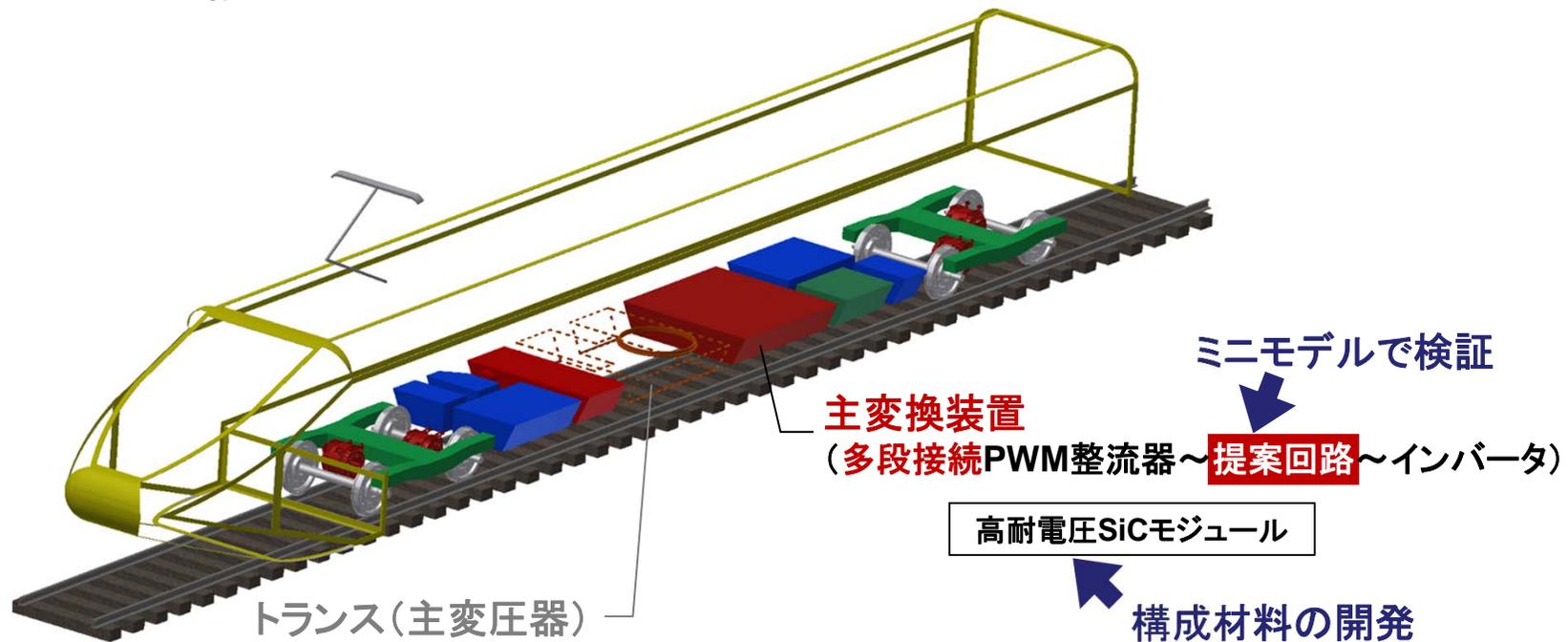
### 事業数

6件

## ➤ SiCモジュール特性を前提とした新車両主回路システムの基礎研究

(委託先:公益財団法人鉄道総合技術研究所)

交流電化区間の鉄道車両主回路システムの小型化を目指し、SiCモジュールの特長である高耐電圧に注目した新しい車両主回路システムの実現の可能性をミニモデルで検証する。また、長期間使用するために必要なモジュールの構成材料を開発する。



新(トランスレス)交流車主回路システム床下機器イメージ図  
パンタグラフ~主変換装置~主電動機⇒システムの小型軽量化  
省エネ車両・**主回路が変わる!**

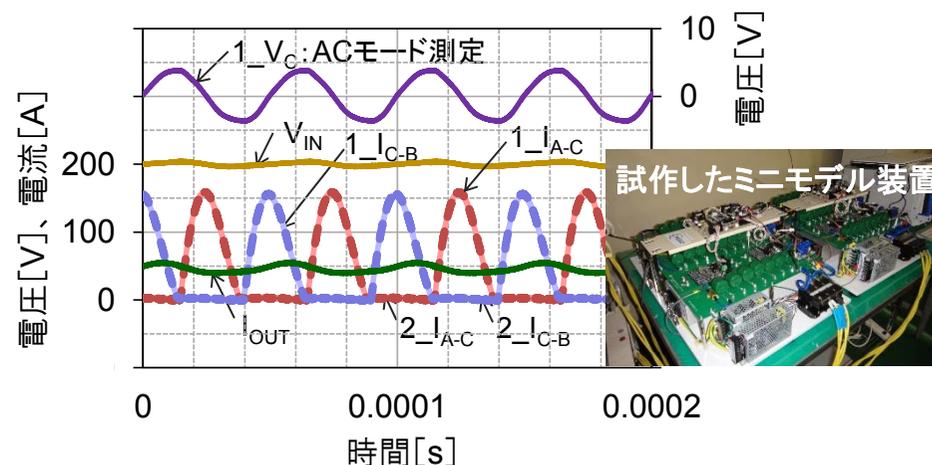
## ➤ SiCモジュール特性を前提とした新車両主回路システムの基礎研究

(委託先:公益財団法人鉄道総合技術研究所)

### 主な成果

#### ①新車両主回路システムの基礎研究

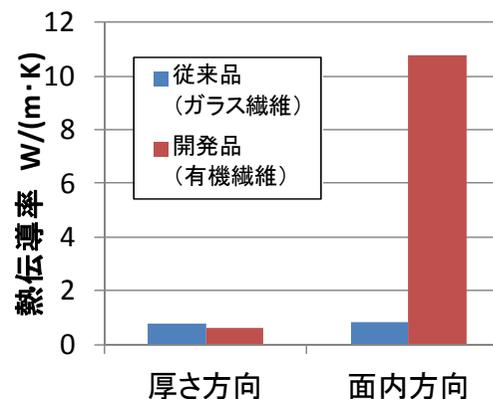
- ・トランスレスの2段接続ミニモデルを用いて、入力電圧 $V_{in}=200V$ 、コンデンサピーク電流 $i_{A-C}=i_{C-B}=150A$ 、スイッチング周波数 $f_s=20kHz$ まで、絶縁を保ちつつ電力伝送が可能であることを確認した。
- ・トランスレス新交流車主回路システムを提案した【特許申請済】。



提案回路のミニモデル実験結果

#### ②モジュールの構成材料の研究開発

- ・面内方向熱伝導率 $10W/(m \cdot K)$ 以上の高耐熱低熱膨張材料を開発した。
- ・加工性、形状自由度があるプリプレグ、アークラッド、銅張積層板を開発した。



試作した銅張積層板

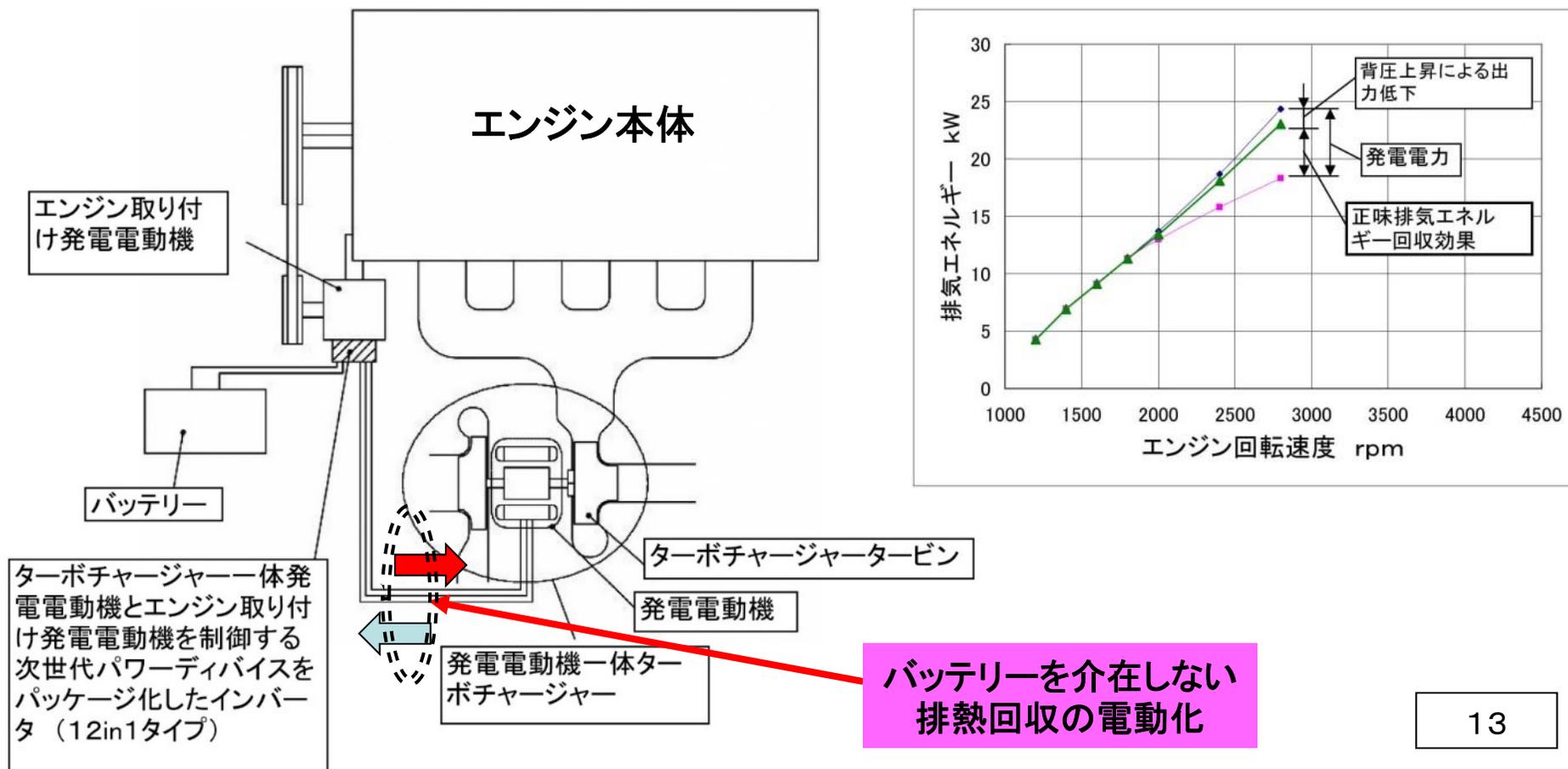


熱伝導特性(繊維基材+高耐熱エポキシ樹脂)

## 研究開発項目③応用システム開発(1)(革新アプリ)テーマ(2)

### ▶ 次世代パワーデバイスを用いた発電電動一体ターボチャージャによる排熱回収システムの研究開発 (委託先:株式会社ACR)

インバータで制御される発電電動機一体型ターボチャージャにより、低速トルクアップを行いエンジンのダウンサイジングによる低燃費化と、排気ガスエネルギーから得られた電気エネルギーによりエンジンに取り付けた発電電動機を駆動し大幅な省エネルギー化を図るシステムを開発する。



➤ 次世代パワーデバイスを用いた発電電動一体ターボチャージャによる排熱回収システムの研究開発 (委託先:株式会社ACR)

主な成果

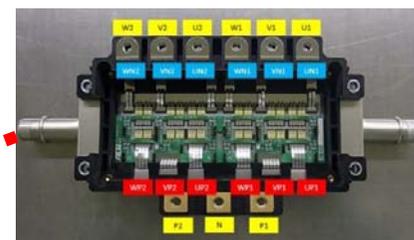
12in1フルSiCパワーモジュール・インバーター一体型発電電動機・発電電動機付ターボチャージャ等の主要構成要素の試作を完了した。

本システムをターボチャージャを装着する全ての車種に導入することによって、燃費を5%前後改善が可能になる。

長距離走行する普通トラックの場合、燃料費は人件費に次ぐ大きな支出であり、運送会社にとって燃費の改善は極めて重要。



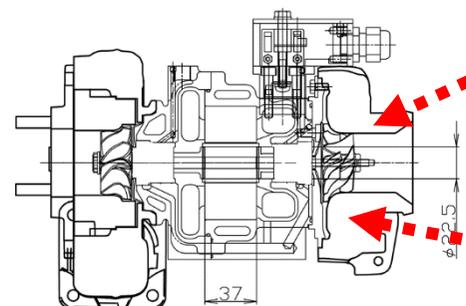
機電一体電動発電機  
(定格10KW/短時間20KW)



12in1フルSiC  
パワーモジュール



マグネット付  
タービンシャフト



電動発電機(12KW)付  
ターボチャージャ



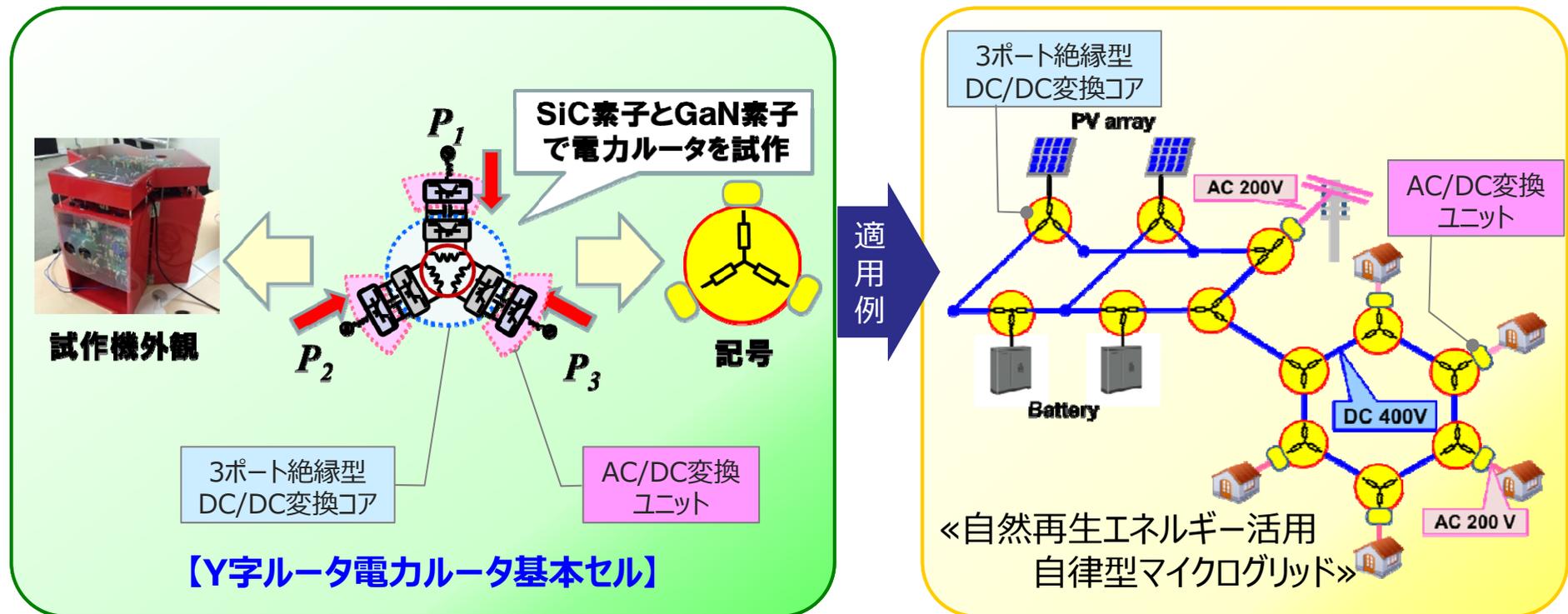
タービンシャフト組込み  
センターハウジング

構成要素の試作

➤ 多様な電力融通システムを実現するSiC・GaNパワーデバイスを用いたY字電カルータ基本セルの研究開発

(委託先: 国立大学法人京都工芸繊維大学、公立大学法人首都大学東京)

多様なニーズに応える電力融通システムを容易に構築できる高性能なSiCとGaNパワーデバイスを用いたY字電カルータ基本セルを設計・試作し、実用化課題を抽出する。



- 多様な電力融通システムを実現するSiC・GaNパワーデバイスを用いたY字電カルータ基本セルの研究開発  
(委託先: 国立大学法人京都工芸繊維大学、公立大学法人首都大学東京)

### 主な成果

◆Y字電カルータの3ポート絶縁型DC/DC変換器コアユニットをSiC及びGaNデバイスの各々で設計・試作、電力フロー制御の基本機能検証を完了。

研究開発を実施した必須要素技術は、  
ゲート駆動回路技術、3ポート間電力潮流制御方式、  
および、高精度・多機能変換器制御技術。

- ① **SiCパワー素子の適用** : 高電圧・大電力仕様DC/DC変換コアの実現  
→直流電圧:400V、電力容量:10kW、スイッチング周波数:20kHz
- ② **GaNパワー素子の適用** : 低電圧・小電力仕様DC/DC変換コアの実現  
→直流電圧:200V、電力容量:500W、スイッチング周波数:100 kHz

◆SiC素子適用のAC/DC変換器を、試作済の3ポート絶縁型DC/DC変換器コアに連結する「Y字電カルータ機能拡張の実証」、  
および、GaN素子適用Y字電カルータ3台間での「直流電力潮流制御連携動作の試験」を継続実施中

«Y字電カルータ 試作機»  
«全体の外観»



«上部制御ボード»

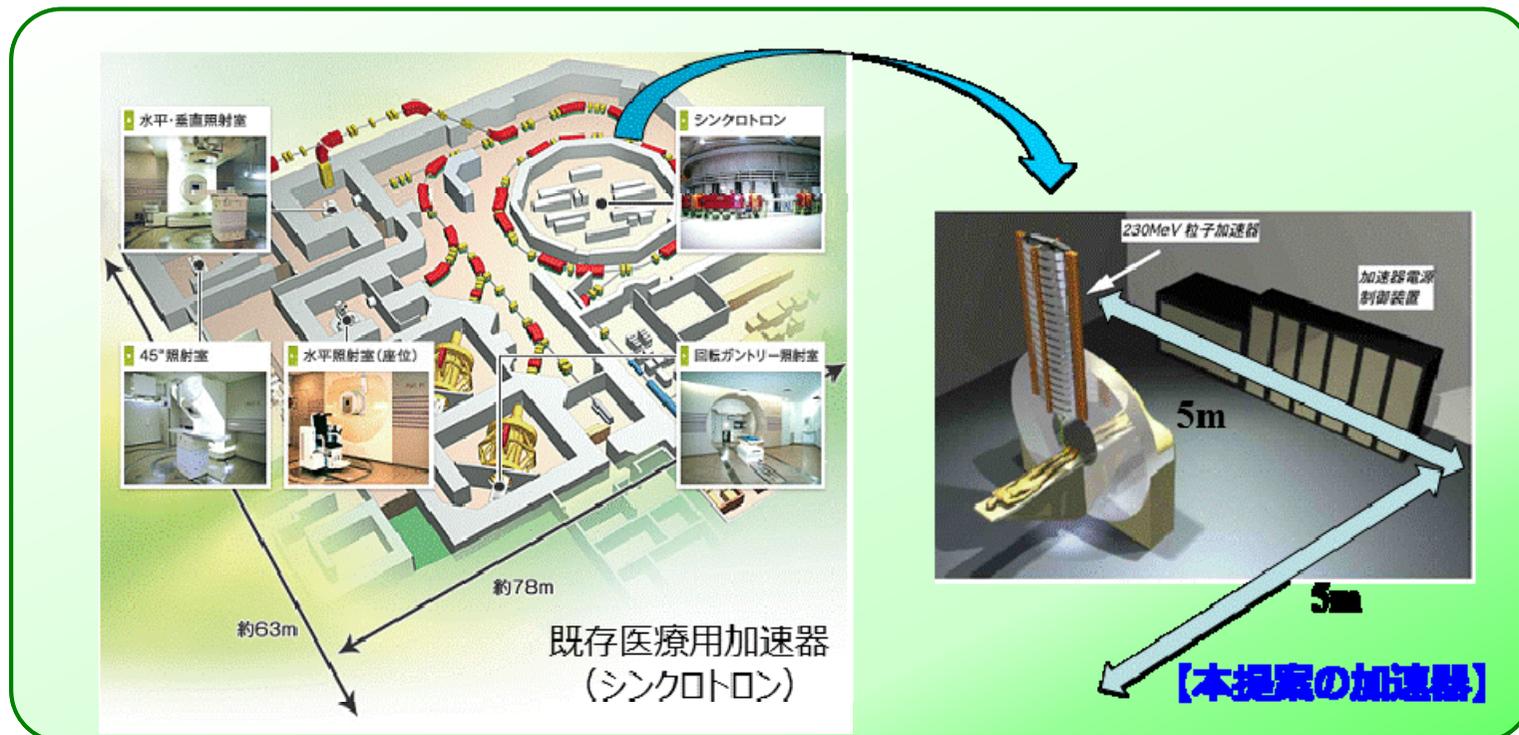


## 研究開発項目③応用システム開発(1)(革新アプリ)テーマ(4)

### ▶ コンパクト加速器を実現するための超高速・高電圧パルス電源の開発

(委託先: 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、株式会社パルスパワー技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人筑波大学)

先端医療にも使用できる加速器の大幅なコンパクト化を実現し、運用コストも大幅に低減できる装置の研究開発の先導研究として、高速・高電圧SiCパワー半導体技術によって超高速・高電圧パルス電源を開発する。



# 研究開発項目③応用システム開発(1)(革新アプリ)テーマ(4)

## ▶ コンパクト加速器を実現するための超高速・高電圧パルス電源の開発

(委託先: 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、株式会社パルスパワー技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人筑波大学)

### 主な成果

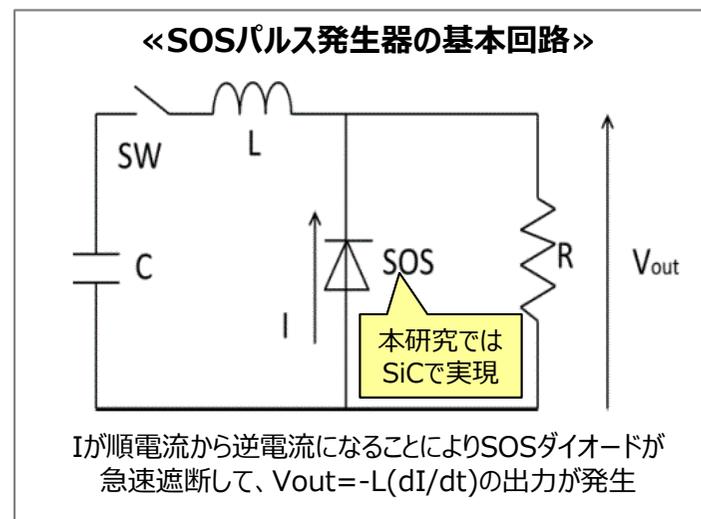
● **研究目的**：コンパクト加速器に必須な、従来にない10kV/立上り10ns以下の高電圧・超高速パルスを得るため、「半導体オープニングスイッチ(SOS)による誘導性エネルギー蓄積型パルス発生方式」を前提にこの方式のキー・デバイスであるSOSの高耐圧化・スイッチング特性高速化を、SiC半導体(SiC-DSRD)開発で実現すると共に、このSiC半導体を実装したパルス電源が加速器に適用できることを実証する。



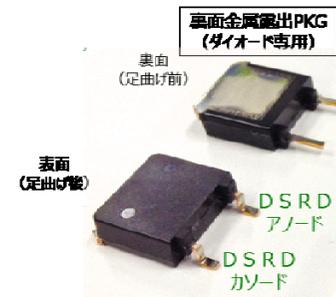
◆ **1stステップとして、新設計のSiC半導体(SiC-DSRD)を搭載したパルス電源を試作し、6kV/立上り5ns特性の高電圧・超高速パルスの1kHz繰り返し発生を実現**

✓ 10kV/立上り10ns以下への性能ステップアップと、パルス電源を用いた加速電界試験は継続実施中

◆ **研究開発による主な高速化・高耐圧化技術は、チップ面積縮小による静電容量低減効果での高速化、通常構造のp/n-/nをp/p-/nとすることによる高速化、新設計デバイス構造製造の要素プロセス開発、高耐圧SiC-DSRD用の表面実装パッケージ開発**



#### 「高耐圧SiC-DSRD用表面実装パッケージ」



#### 「p/p-/n構造」



## 研究開発項目③応用システム開発(1)(革新アプリ)テーマ(5)

### ▶ 小型高効率GaN発振器を用いたUV-C発生装置の研究開発

(委託先:東京計器株式会社、株式会社プラズマアプリケーションズ)

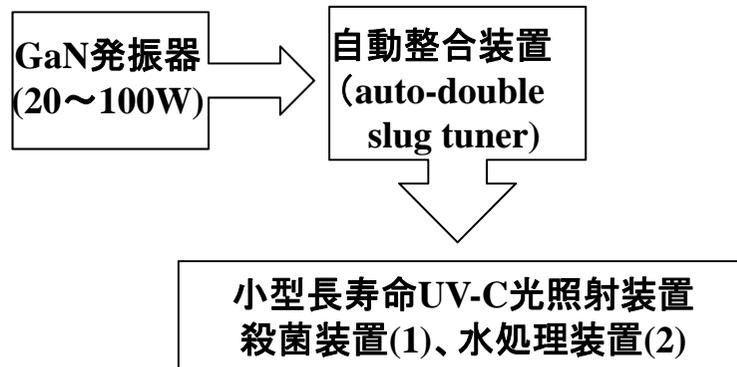
GaNを用いた小型で高効率な自励式マイクロ波発振器を開発し、マイクロ波によって点灯する小型高密度のUV-C発生装置を開発する。

技術的なポイント：

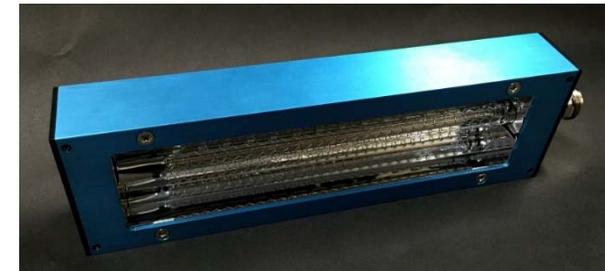
- ・GaN(窒化ガリウム)を用いた 2450 MHz 小型高効率発振器の開発
- ・マイクロ波で点灯する小型で強力な低圧水銀 UV-Cランプの開発
- ・上記2つの併用によりUV-C発生装置を実現する

特徴：小型、UV-C強度が高い、長寿命、メンテナンスフリー

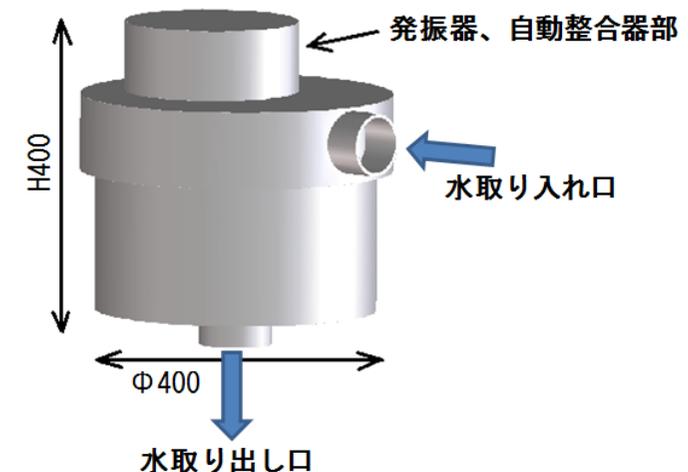
用途：水処理装置、空気殺菌装置



### 小型高効率GaN発振器を用いたUV-C光発生装置 コンセプト



(1) 殺菌装置用UV-Cランプ reflector



(2) マイクロ波放電UV-Cランプ使用  
400~1000m<sup>3</sup>/day水処理装置

# 研究開発項目③応用システム開発(1)(革新アプリ)テーマ(5)

## ▶ 小型高効率GaN発振器を用いたUV-C発生装置の研究開発 (委託先:東京計器株式会社、株式会社プラズマアプリケーションズ)

### 主な成果

#### ○GaN発振器・増幅器

・GaNベアチップを用いた2450MHz100W増幅器開発において、効率(DC/RF)70%、名刺大サイズを実現

#### ○石英二重管低圧水銀UV-Cランプ

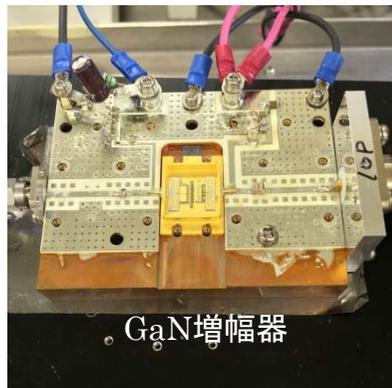
・マイクロ波放電により、AC放電UV-Cランプに比べ小型で短い(長さ1/2以下)UV-C光源を実現

・RF/UV-C変換効率25~30%を達成し、装置の小型化も実現

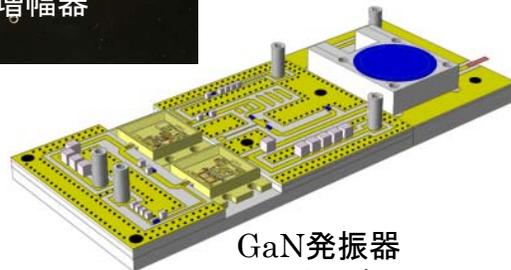
ランプ①ー外径10mm×長さ15cm、変換効率 30%

ランプ②ー外径30mm×長さ30cm、変換効率 25%

#### ○ GaN発振器・増幅器



GaN増幅器

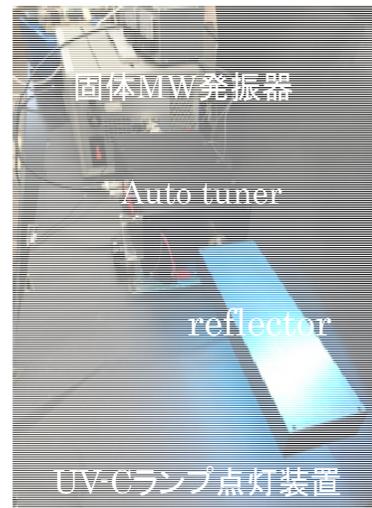


GaN発振器  
(イメージ)

#### ○ UV-C殺菌装置



UV-C用reflector

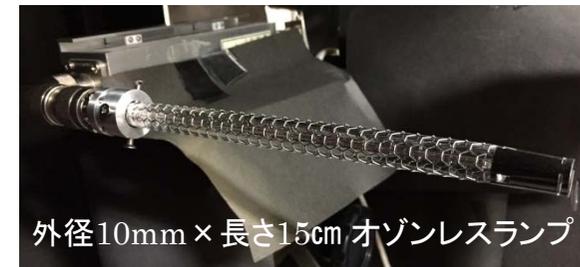


固体MW発振器

Auto tuner

reflector

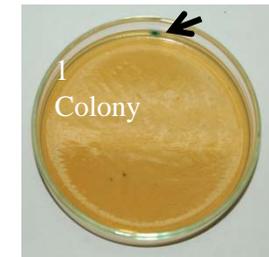
UV-Cランプ点灯装置



外径10mm×長さ15cm オゾンレスランプ



2696 colonies



1 Colony

UV照射なし      UV-C照射時間:5秒.  
Escherichia coliの殺菌試験  
UV-C 5秒の照射により99.9%を殺菌

## 研究開発項目③応用システム開発(1)(革新アプリ)テーマ(6)

### ➤ SiC/GaNパワーデバイスMHz帯スイッチングDC-DCコンバータの先導

研究 (委託先: 国立大学法人信州大学、国立大学法人大阪大学)

鉄損と銅損の小さい高周波低損失リアクトル・トランスを開発し、SiCやGaNパワーデバイスの特徴を活かした高効率・小型軽量DC-DCコンバータを開発する。



Siパワーデバイスでは実現が困難であったMHz帯スイッチングDC-DCコンバータ

SiC/GaNパワーデバイスと鉄系メタルコンポジット鉄心リアクトル・トランスで実現  
(DC-DCコンバータの小型軽量化と高効率化を両立)

鉄心材料/リアクトル・トランス開発とSiC/GaNパワーデバイスMHz帯スイッチングDC-DCコンバータの開発試作により、最終的に効率95%、電力密度10W/cm<sup>3</sup>の実現を目指す。



小型軽量・高効率電源装置の普及



サーバー電源、オンボードPOL電源、パワコンなどの据置電源装置の高効率化と省スペース化を両立  
自動車・鉄道・航空機などモバイル用途では小型軽量・高効率は大きな武器！！

➤ SiC/GaNパワーデバイスMHz帯スイッチングDC-DCコンバータの先導研究 (委託先: 国立大学法人信州大学、国立大学法人大阪大学)

主な成果

1. 高磁化金属系磁性微粒子/高耐熱樹脂コンポジット開発

- ・金属磁性微粒子高抵抗被膜形成技術
- ・低コストキャスト法による鉄心・リアクトルトランス作製
- ・240°C高温耐性樹脂材料

2. アモルファス粉/エポキシコンポジット鉄心の試作

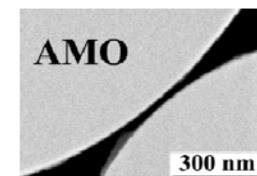
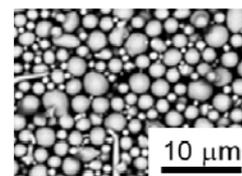
- ・飽和磁束密度; 0.82~0.86T (Ni-Znフェライトの約3倍)
- ・線形磁気特性 ( $\mu_r$ ; 10~12、 $\tan\delta$ ; 0.01以下 (~20MHz))
- ・MHz帯鉄損; Ni-Znフェライトの1/5以下

3. MHzスイッチングDC-DCコンバータ開発

- ・効率90%、5W/cm<sup>3</sup>達成(LLC共振型、フライバック型、同期整流降圧チョッパ型)

材料開発

キャスト法Fe系アモルファス/エポキシコンポジットバルク鉄心を開発



トロイダル鉄心の例 (巻線埋込リアクトル、トランスも作製可能)

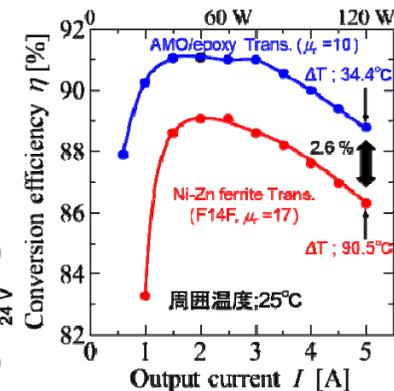
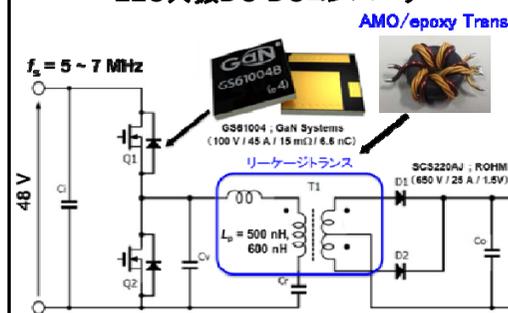
キャスト法により高耐熱シリコンコンポジット鉄心も作製

高抵抗被膜により渦電流を粒子内に閉じ込め

コンバータ開発

試作LLC共振型DC-DCコンバータ

GaNパワーデバイスハーフブリッジ LLC共振DC-DCコンバータ



試作トランスの温度上昇は既存材料の半分以下

## 実用化・事業化に向けた取り組み及び見通し

### 研究開発項目①（10）新世代Siパワーデバイス技術開発（委託事業）

テーマ	実施者	実用化・事業化見通し	分野
新世代Si-IGBTと応用基本技術の研究開発	東芝、三菱電機（共同実施先）	本PJ成果を元にした新世代IGBT製品検討を行い、2020年度に事業化判断を行う。	成果をもとに検討予定

### 研究開発項目③応用システム開発（2）（助成事業）

テーマ	実施者	実用化・事業化見通し	分野
世界のパワエレを牽引する次世代パワーモジュール研究開発と日本型エコシステムの構築	富士電機	顧客最適化による性能最大化を図った製品を目指し実用化検討中。右記分野を適用先候補とし、2020年度には売上1,000億円を目指す。	太陽光発電用PCS、誘導加熱システム、EV向けインバータ、電鉄用補助電源、ハイパープレミアムインバータ、大容量UPS、IP6Xインバータ
SiCパワーデバイスを用いた超高効率車載電動システムの開発	デンソー	本PJ終了後、搭載車両と具体的な仕様を詰めて信頼性確認を行い、2022年の実用化を目指す。	大出力EV、大出力PHV、FCV向け電動システム
高出力密度・高耐圧SiCパワーモジュールの開発	三菱電機等	本PJにより競争力強化したパワーモジュールで鉄道向けの事業化を図り、併せてパワーエレクトロニクス機器への展開を目指す。	鉄道等

## 成果の普及

### ◇知的財産権・成果の普及活動実績

	2014年度	2015年度	2016年度	計
特許出願	13	18	1	32
論文	0	3	1	4
研究発表・講演	0	13	6	19
受賞実績	0	0	1	1
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	1
展示会への出展	1	5	8	14