



# 次世代パワーエレクトロニクス

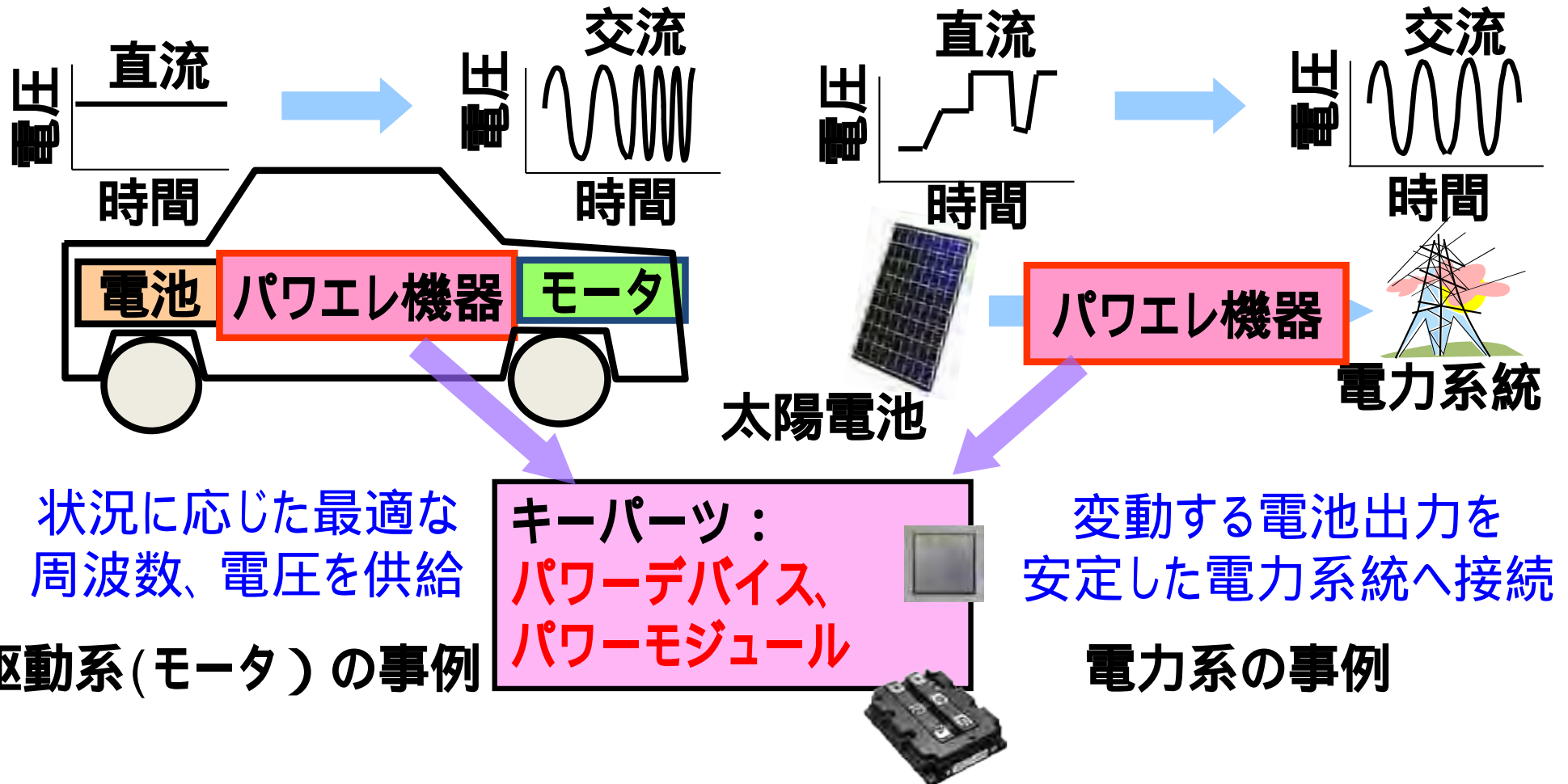
プログラムディレクター

大森 達夫

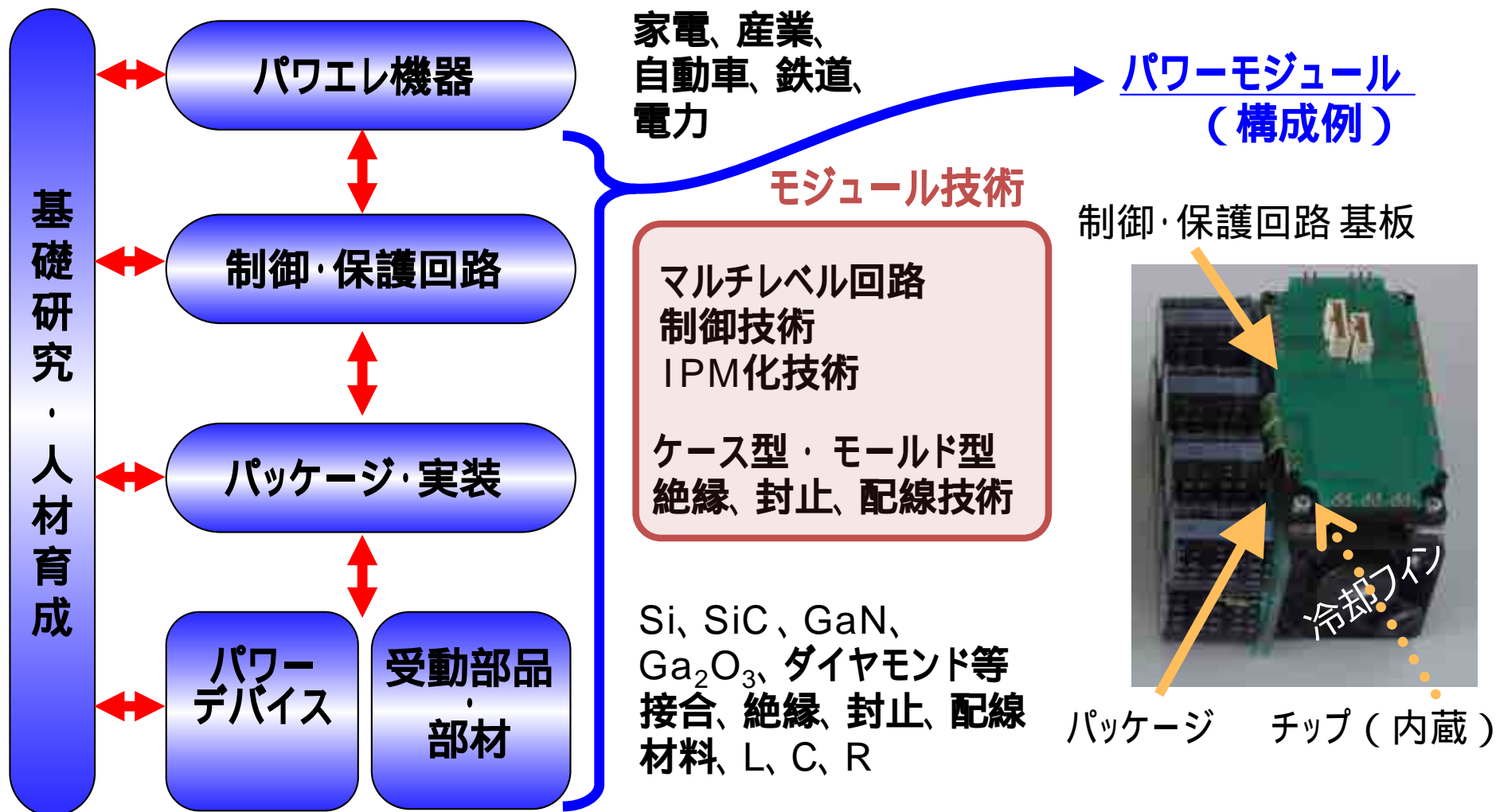
1. パワーエレクトロニクスとは
2. 研究開発の全体像と出口戦略
3. 自動車用SiCパワエレ技術の背景および課題・目標と成果
4. 電力機器用SiCパワエレ技術の背景および課題・目標と成果
5. GaN共通基盤技術の主な開発項目の目標と成果
6. 将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発の成果
7. まとめ

# 1. パワーエレクトロニクスとは？

電力を直流から交流もしくは交流から直流へ、きめ細かく制御することで、モータの最適駆動や、安定な電源を実現する技術

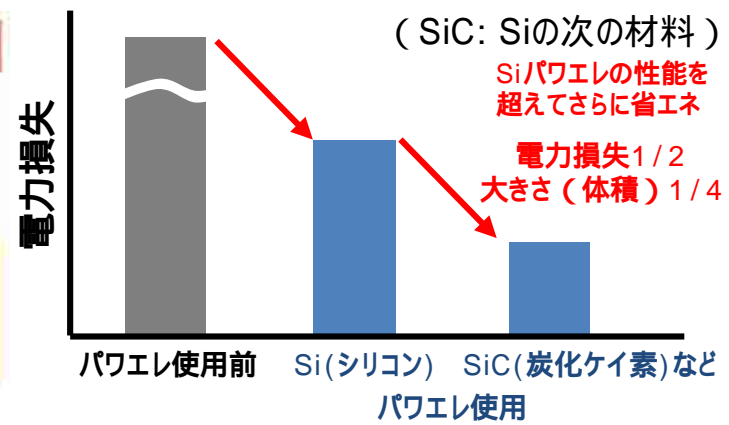


パワーデバイスの性能を十二分に引き出すには、デバイスだけでなく  
モジュール技術、回路・制御技術等の高性能化も必要

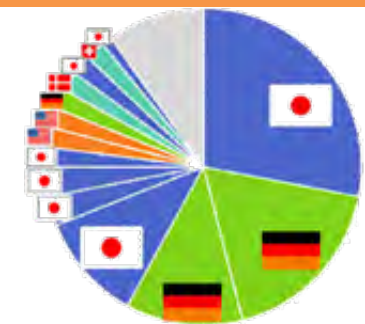


## パワーエレクトロニクスとは：省エネ化の重要コア技術

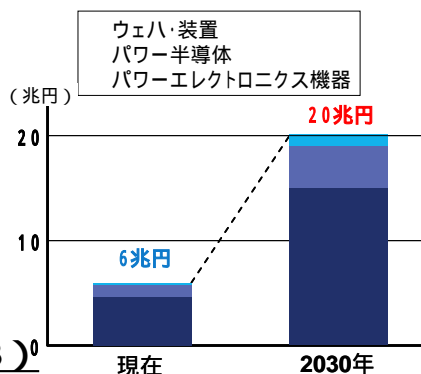
- 電力の発生・輸送・消費を効率的・高精度に行う
- モーターを効率よく回したり、機器をきめ細かく調整する



### 日本の強い分野 = 市場成長性も高い



IGBTの市場動向 (日本1/3)

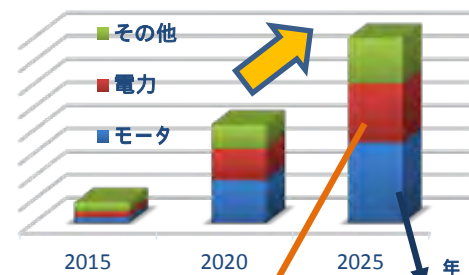


将来的に大きな成長が見込まれ、技術課題の大きな

### 自動車分野 電力機器分野

のSiCパワエレ技術 (ウエハ、エピ、デバイス、モジュール、機器) 革新が重要

### SiCパワーデバイスのアプリケーション動向



**電力機器**  
系統・配電・PVなど  
インフラ

**自動車**  
将来の市場性  
大きな技術課題

(株)富士経済2016年版 次世代パワーデバイス & パワエレ関連機器市場の現状と将来展望より

## 2. 研究開発像の全体像と出口戦略

大きな成長が見込まれ、技術課題の大きな自動車分野、電力機器分野のSiCパワエレ技術（ウエハ、エピ、デバイス、モジュール、機器）の革新を行い、**更なる適用分野拡大**や**普及拡大**を図り、**一層の省エネ化の促進**と**産業競争力の強化**を進める。

### < 研究開発項目と主要目標 >

#### 次世代パワーモジュールの応用

- 次世代パワーモジュール使いこなし技術
- 応用製品のプロト試作および動作実証
- 直流送電（HVDC）用マルチレベル変換器、6.6kV連系用トランスレス変換器
- EV用機電一体インホイールモータ
- 自動車向け耐熱モジュール（ $T_{jmax} 250$ ）

新回路、ソフトウェア  
パワープロセッシング技術

#### 次世代SiCモジュール

- 高電流密度モジュール技術
- 高温・高電流密度・高耐圧用材料、部品開発
- 低コスト化・信頼性技術（ $1kA/cm^2$ ）

SiC: 炭化ケイ素  
GaN: 窒化ガリウム  
Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 酸化ガリウム

#### 次世代SiCデバイス

- 20kV IGBT, PiN
- 6.5kV SJ-MOSFET

#### 次世代SiCウエハ

- 高耐圧用厚膜エピウエハ（欠陥密度(BPD)  $0.1/cm^2$ 以下）
- 低抵抗ウエハ（n型  $5m\text{-}cm$ ）

#### 次世代GaNデバイス

- 縦型パワーデバイス（ $1m\text{-}cm^2$ 以下、数A級）

#### 次世代GaNウエハ

- 低欠陥高品質ウエハ（貫通転移  $< 1000/cm^2$ ）

新材料基盤技術  
Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ダイヤモンド

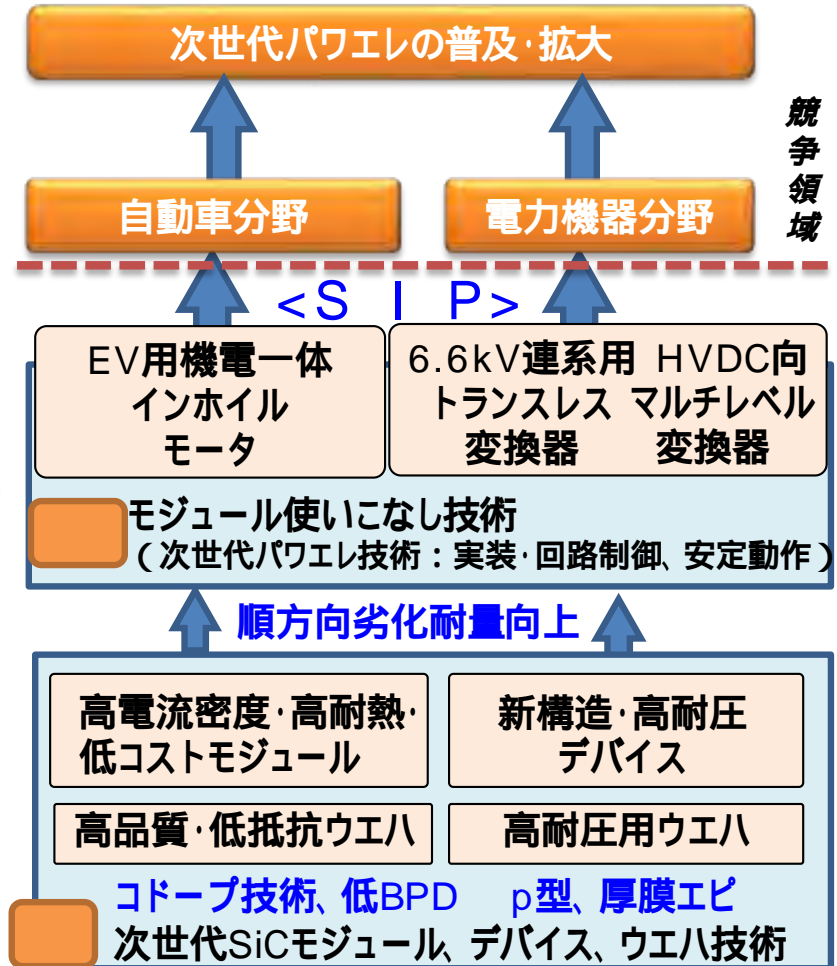
SIP 次世代パワーエレクトロニクス：内閣府 H26～H30

SiC

GaN

将来技術

### < SiCの適用分野拡大への出口戦略 >



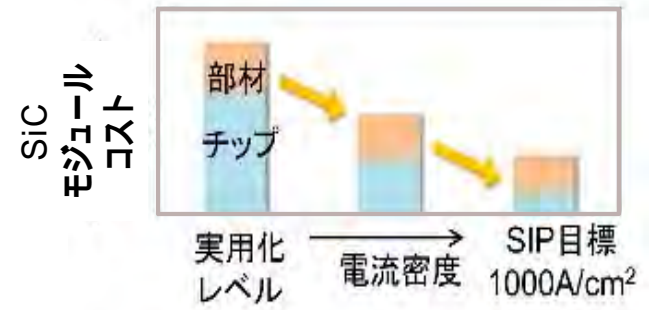
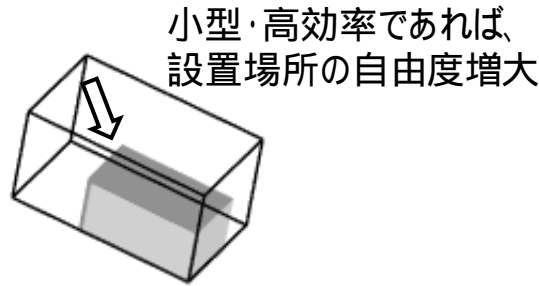
青字がSIP開発項目

# 3. 自動車用SiCパワーエレクトロニクス技術の背景と出口戦略および課題・目標

自動車向けSiCモジュールの高電流密度化を達成、小型化・低コスト・高付加価値を実現へ

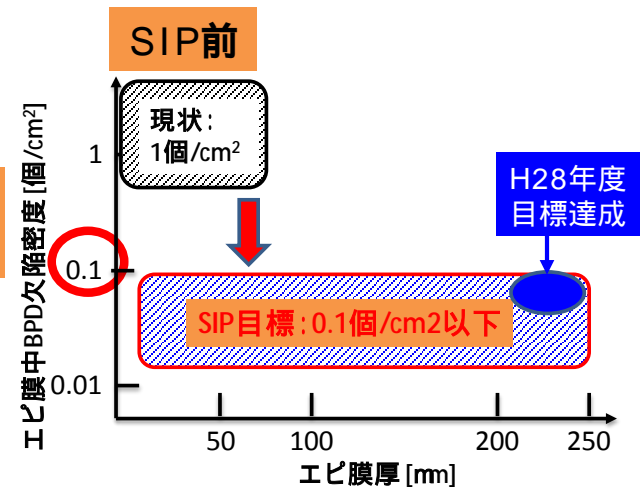
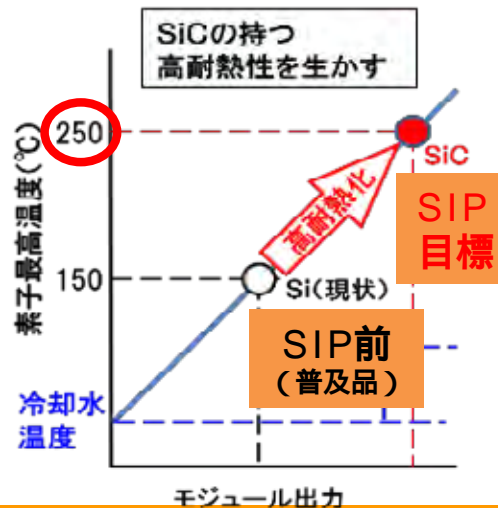
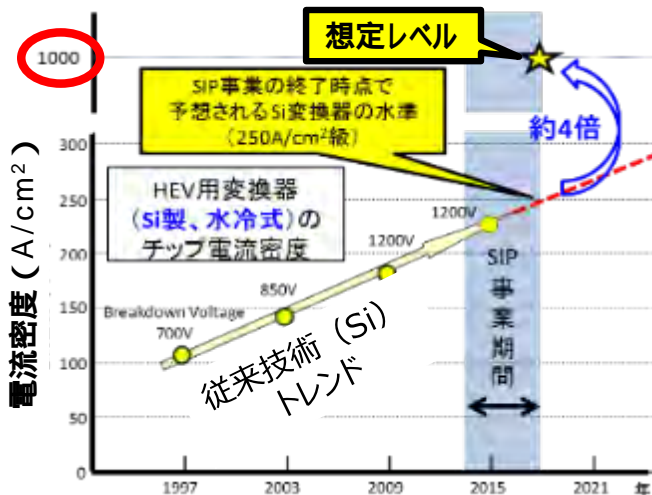
## 目的：出口戦略

- ✓ 車用インバータシステムの
  - 高効率化（現状損失を1/2以下）
  - 超小型化（現状体積の1/4以下）
  - 低コスト化
- ✓ 車の電動化を拡大



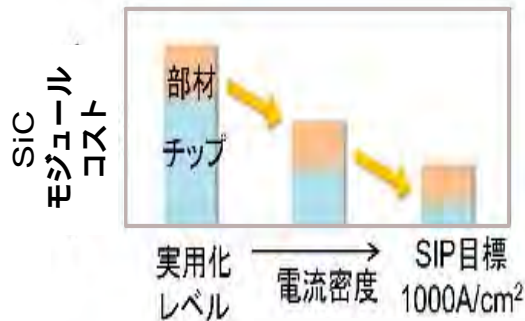
## 課題と目標：

- (1) デバイス、モジュールの高電流密度（1000A/cm<sup>2</sup>以上）動作を通電劣化無しで実現し、モジュールの小型化（現状の1/4以下）、低コスト化
- (2) デバイスに加え受動部品・部材の高温化で、耐熱モジュール実現（250℃対応）
- (3) 高品質、低抵抗SiCウエハ（現状の1/4以下：20×5mm以下）実現と通電劣化無しの高品質エピ構造実現
  - ✓ エピ膜中の結晶欠陥（BPD）低減（0.1個/cm<sup>2</sup>以下）
  - ✓ 通電劣化（順方向劣化）機構解明による新規エピ構造（エピ構造の革新：再結合促進層技術の開発）

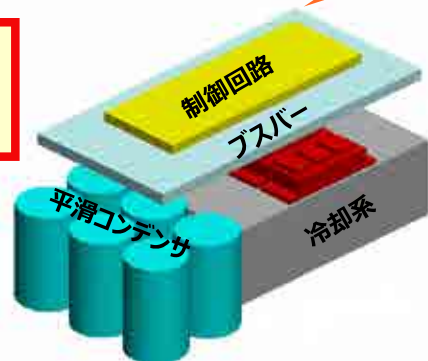


インバータの、高効率化（現状損失を1/2以下）、超小型化（現状体積の1/4以下）、低コスト化および次世代使いこなし技術（回路・制御・高性能受動部品）による高付加価値化を実現するため、モジュールの高電流密度化・高温化による小型化・低コスト・高付加価値を実現するデバイス・ウエハの低抵抗化・高信頼化・新デバイスによる高効率・高耐圧化を達成する

## SiC適用インバータ

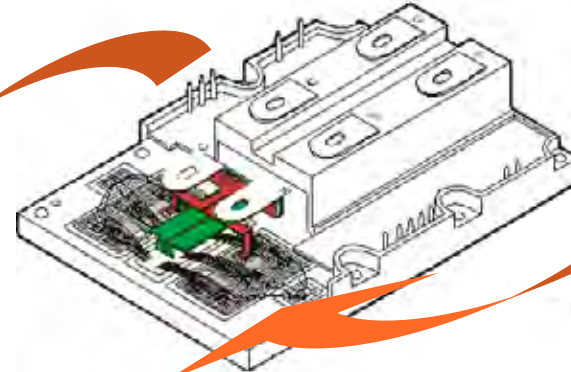


モジュール使いこなし技術



- ・損失1/2以下・体積1/4以下
- ・ゲート制御回路駆動方式
- ・高周波低損失小型受動部品

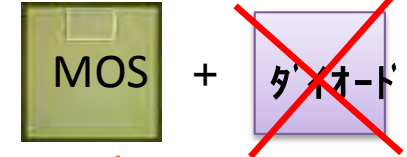
## SiCパワーモジュール



高電流密度モジュール技術  
高温・高電流密度・高耐圧  
受動部品・材料技術  
低コスト化・信頼性技術

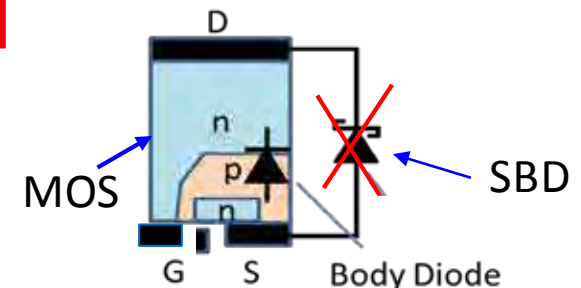
- ・1000A/cm<sup>2</sup>以上
- ・250 対応
- ・メッキ高耐熱接合技術

## SiCデバイス、ウエハ



オン抵抗低減  
高信頼化、新デバイス

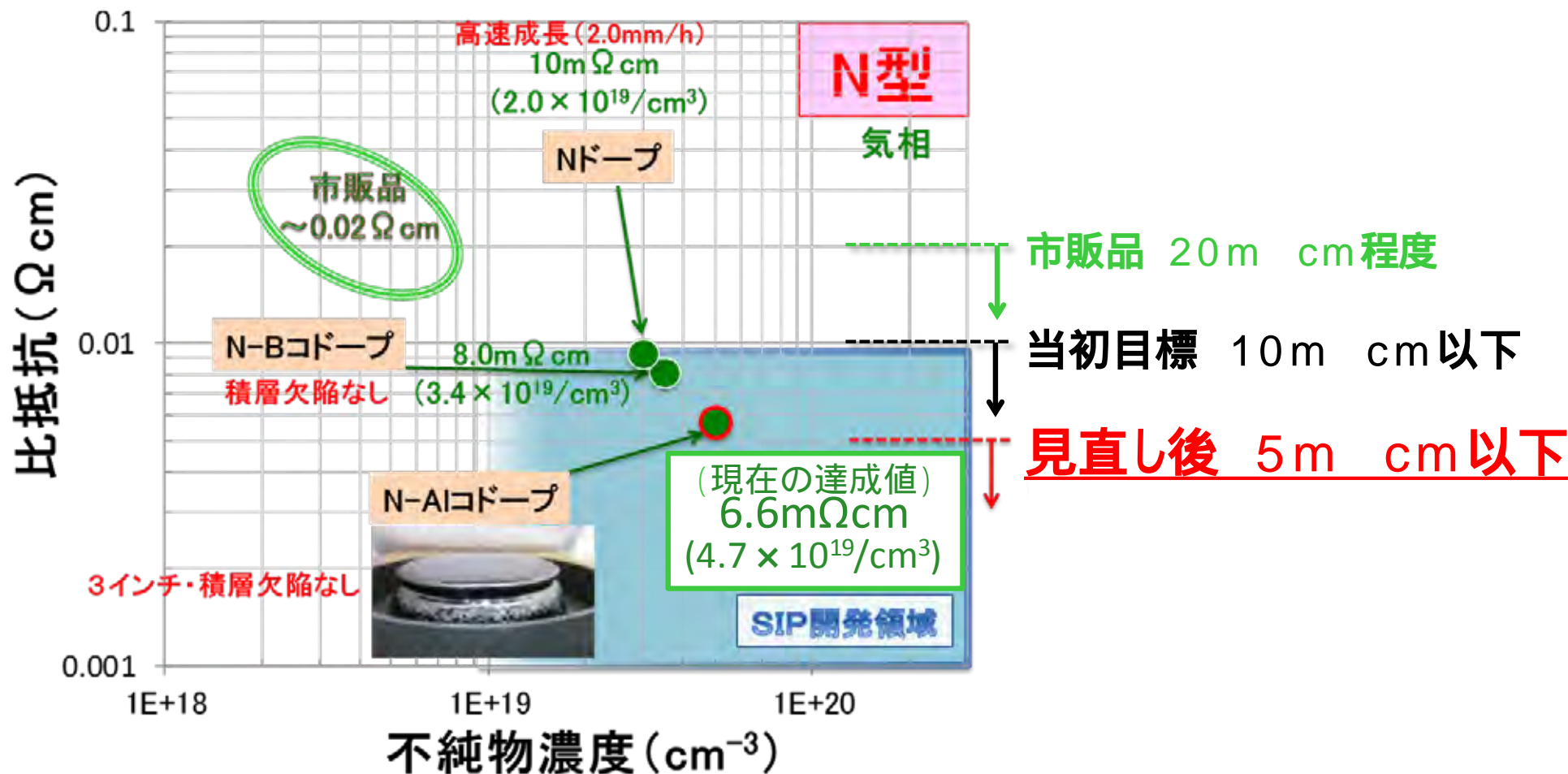
- ・低抵抗・低欠陥ウエハ (BPD欠陥：0.1/cm<sup>2</sup>以下)
- ・1000A/cm<sup>2</sup>信頼性
- ・ダイオード(SBD)無し実現 (デバイスコスト約1/2)





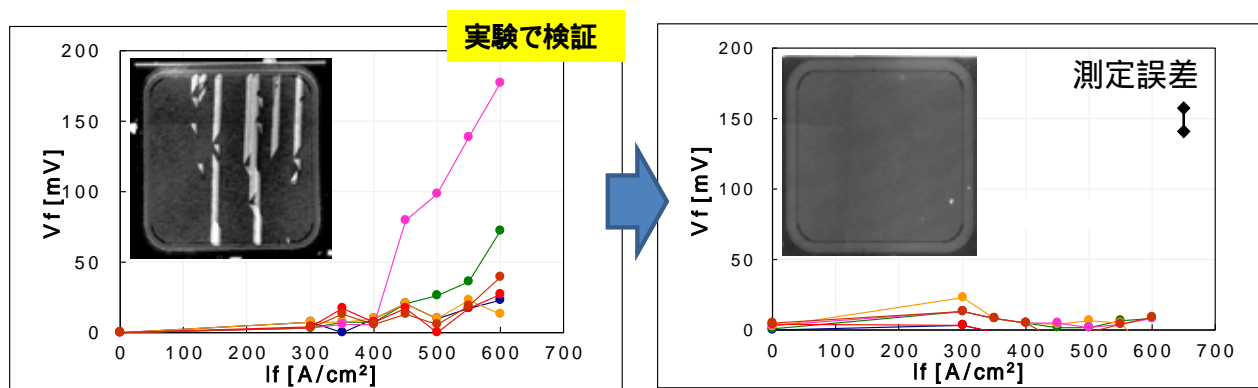
# 主な開発項目の目標と成果 (SiCウエハ)

項目	SIP前	SIP目標	達成度	ブレークスルー技術
ウエハ	20m cm限界	10m cm以下 (当初目標) 5m cm以下 (見直し後)	6.6m cm	・ <b>コドープ技術</b> : (例: AIとNの添加)

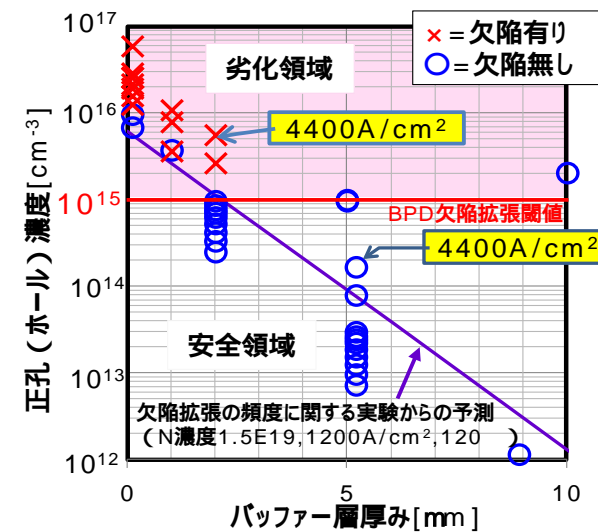


項目	SIP前	SIP目標	達成度	ブレークスルー技術
エピ	・BPDが1個/cm <sup>2</sup> 以上	・BPDが0.1個/cm <sup>2</sup> 以下	・BPDが0.1個/cm <sup>2</sup> 以下 ([N] < 1 × 10 <sup>15</sup> 個/cm <sup>3</sup> )	・低BPDエピ技術、 ・基板からのBPD変換エピ構造
デバイス	・トレンチMOS構造 ・外付けダイオードが必要	・順方向劣化無し構造 (1kA/cm <sup>2</sup> ) ・BD(寄生ダイオード)の活用	・ <b>順方向劣化無しを実証</b> ・限界評価中 (4400A/cm <sup>2</sup> ) ・劣化モデル構築	・ <b>再結合促進層技術</b> ・低BPDエピ技術

BPD：結晶欠陥の種類

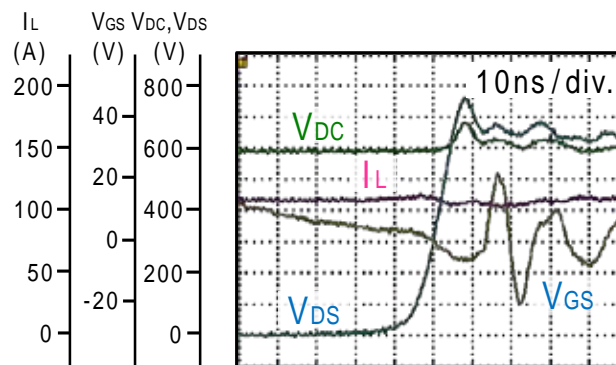
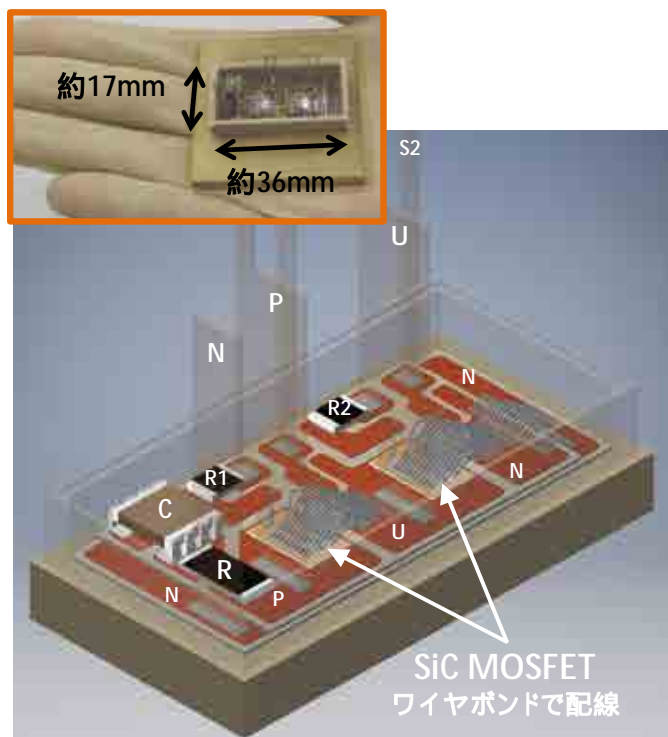


高電流密度動作時の**通電劣化メカニズムを解明**。同期整流を含む高電流密度安定動作技術（再結合促進層技術）を開発し、劣化加速試験のための劣化メカニズム解明を進め、信頼性データを蓄積中。

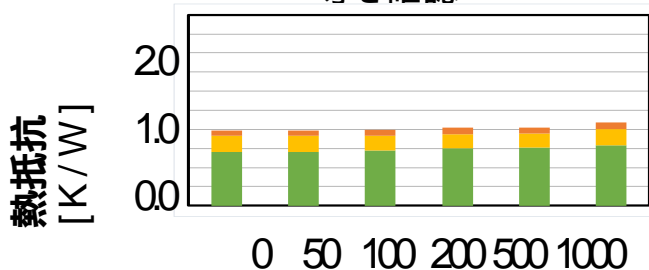


SiCパワーモジュールでは、250 耐熱性等の性能評価を部品レベルで完了。  
高温動作時のモジュール劣化機構解明中。加速試験条件の明確化に繋げる。  
項目 -2のテーマにパワーモジュールを供給してのモータ駆動実証に取り組み中

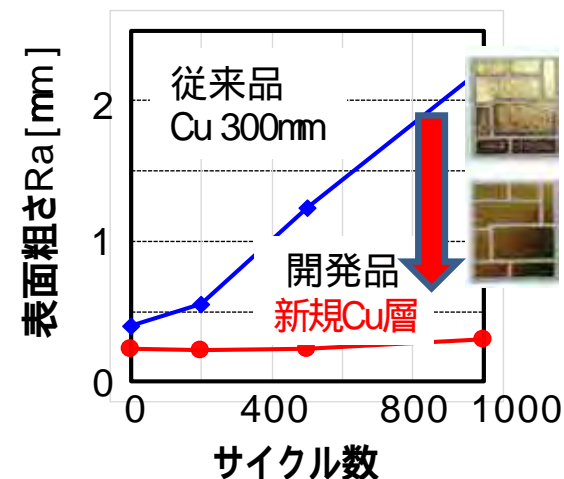
## 性能比較からモジュール構造決定



600V-105A/20ns以下の高速動作  
等を確認



熱抵抗 [K/W]  
サイクル数  
温度サイクル試験での熱抵抗信頼  
性試験  
(目標信頼性に目処)



温度サイクル後の絶縁回路基板の  
Cu層の表面粗さ変化



受動部品サンプル  
(Si-N基板)

## 回路基板

### メタライズ放熱基板

- ・薄板高熱伝導SN基板  
（耐ヒートサイクル性）
- ・耐熱導体層
- ・多層構造化（対向回路）

### 配線基板

- ・小型化、分割構造  
（低応力、低インダクタンス）
- ・裏面にSiC素子接合

## 受動部品

### 高耐熱抵抗器（R）

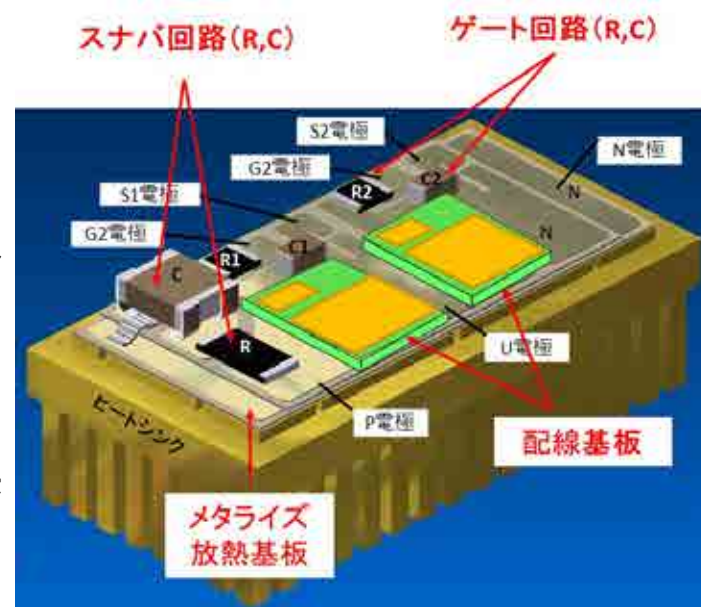
- ・f特20MHz以上
- ・高耐熱化（～300℃）
- ・高耐熱電極構造
- ・応力緩和端子

### 高耐熱コンデンサ（C）

- ・f特20MHz以上
- ・低背化（コンデンサ+端子）
- ・低インピーダンス化
- ・応力緩和端子

部品供給

評価結果



評価結果の設計への反映

## 部品単体としての共通的評価試験

- 高温保持（250℃ - 1,000h）
- 抵抗は+300, +350℃も実施
- 温度サイクル（-40～+250℃ 1,000回）
- 劣化機構解明（部品設計に反映）、
- 加速劣化試験法を検討



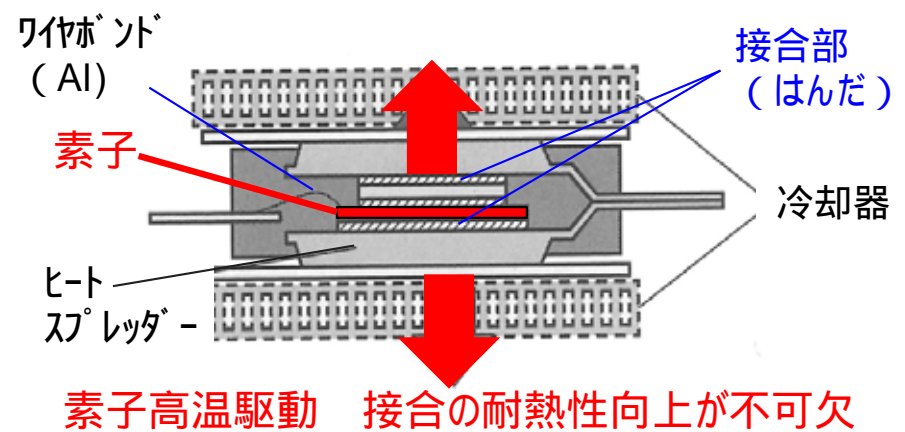
評価結果の設計への反映

## モジュールとしての評価

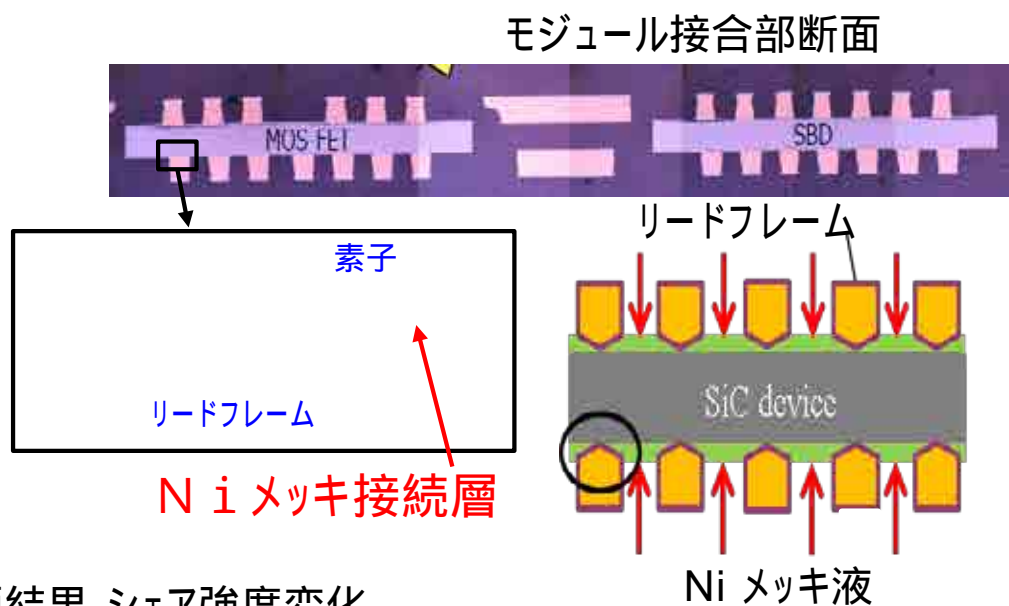
- 高温保持（250℃ - 1,000h）
- 温度サイクル試験  
（-40～+250℃ 1,000回）
- パワーサイクル試験

# 主な開発項目の目標と成果 (自動車向け耐熱実装技術)

## ① 高耐熱接続技術 (NMPB : Nickel Micro Plating Bonding)

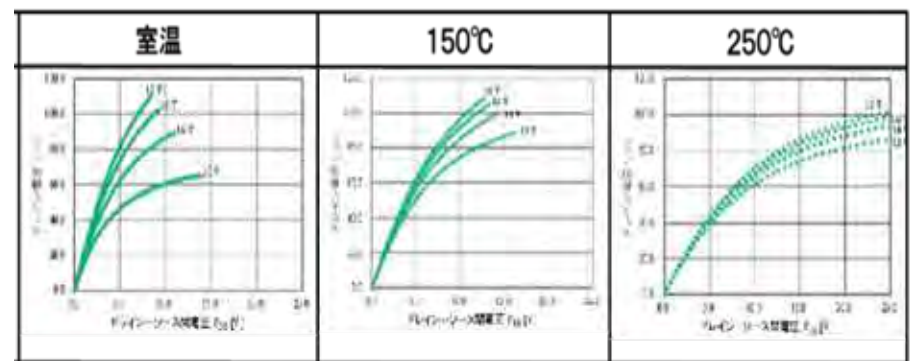
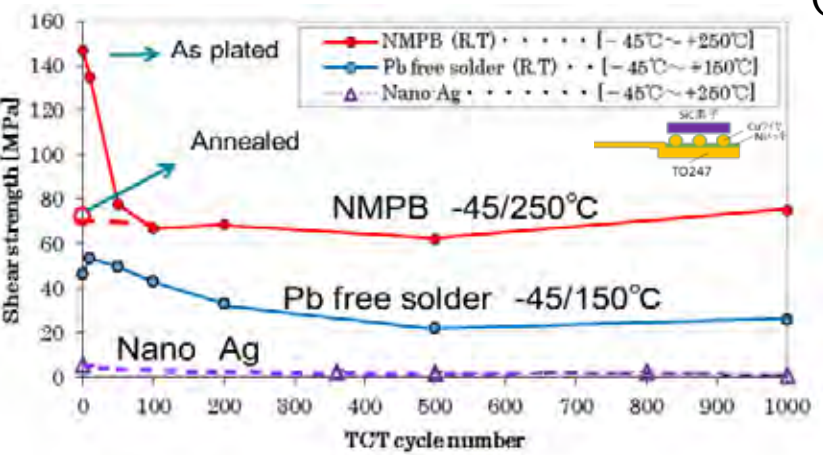


**世界初 Niメッキによる高耐熱接合技術開発**



## ② モジュール開発, 高温動作実証

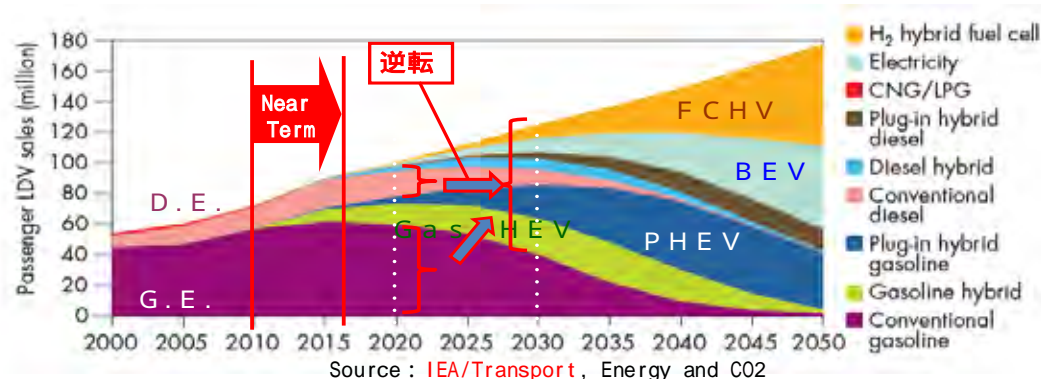
冷熱サイクル評価結果 シェア強度変化  
(気層 - 45 + 250 )



高温動作 I-V 特性評価 (R.T, 150 , 250 評価)

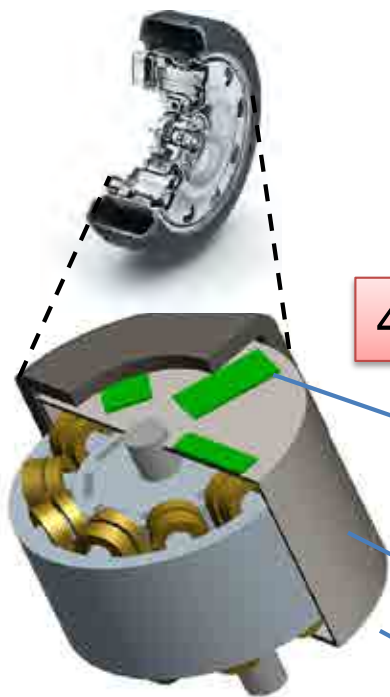
# 主な開発項目の目標と成果 (EV用機電一体インホイールモータ開発の背景)

●EV/FCVの需要増大 (2030)



Source: IEA/Transport, Energy and CO2  
<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/transport2009.pdf> 128 / 418

電動車両は2020年代に内燃機関自動車を逆転する



## 40kW16インチEV用インホイールモータの最適化設計

- インバータの発熱を抑える
- 発熱しても壊れないようにする
- 発熱源を分散させる
- 発熱を効率よく冷却する
- モータの発熱を抑える

SiCデバイス!

インバータ  
モジュール構造  
ケース設計

リップル電流抑制  
多相配置  
小型モジュール



ギア内蔵  
ユニット開発

### 提案手法 (ブレークスルー技術)

- 5相二重巻き線モータ
- 超小型低インダクタンス  
パワーモジュール

# 主な開発項目の目標と成果 (EV用機電一体インホイールモータ)

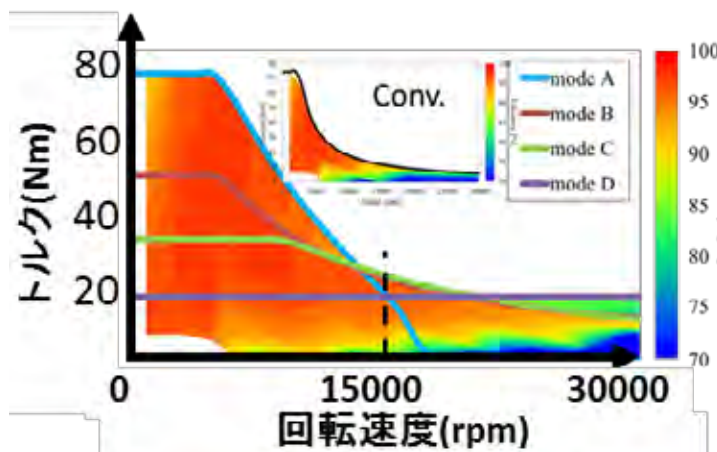
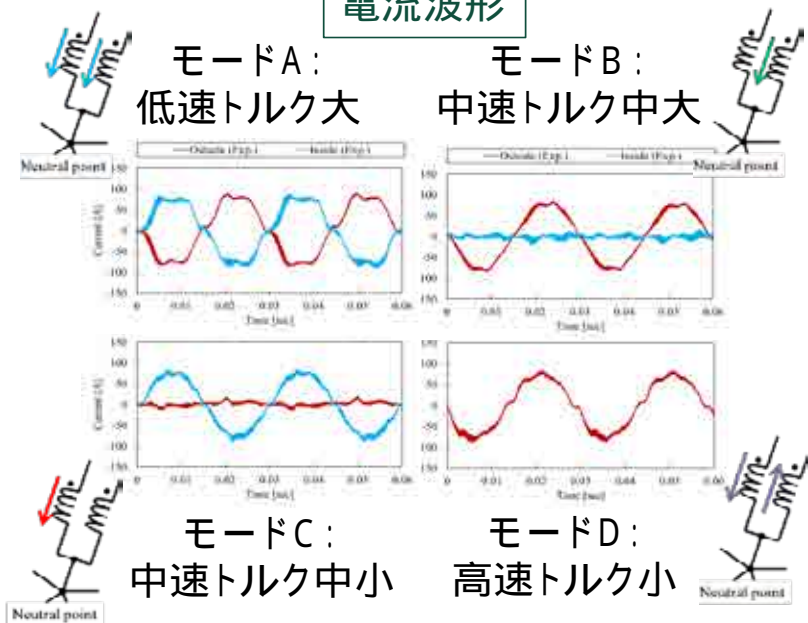
EV用機電一体空冷5相インホイールモータのベンチ試験で40kW動作の性能確認し、  
モータの巻き線切り替え動作の安定性を実証。  
機器適用を加速するためギア内蔵のインホイールモータユニット開発に取り組み中。

## 40kW機電一体空冷インホイールモータのベンチ試験 (16インチインホイール適用可能確認)

### 5相巻線切換え動作の安定性実証

(条件: 200V, 500rpm, 55Arms, 10kW相当)

#### 電流波形



従来の2倍以上の  
高トル出力  
@15,000rpm

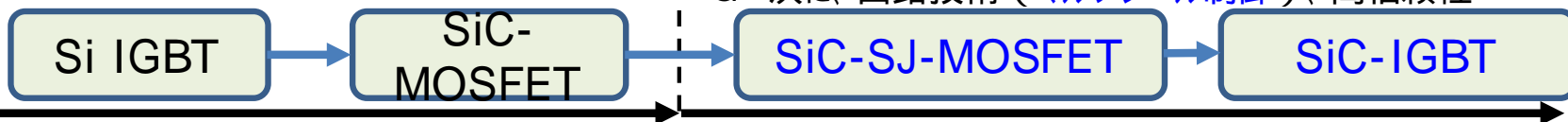
# 4 . 電力機器用SiCパワエレ技術の背景と出口戦略および課題・目標

デバイスの高効率・高耐圧化を達成し、高効率・高性能電力機器の実現へ

6.5kV耐圧未満のデバイス開発現状

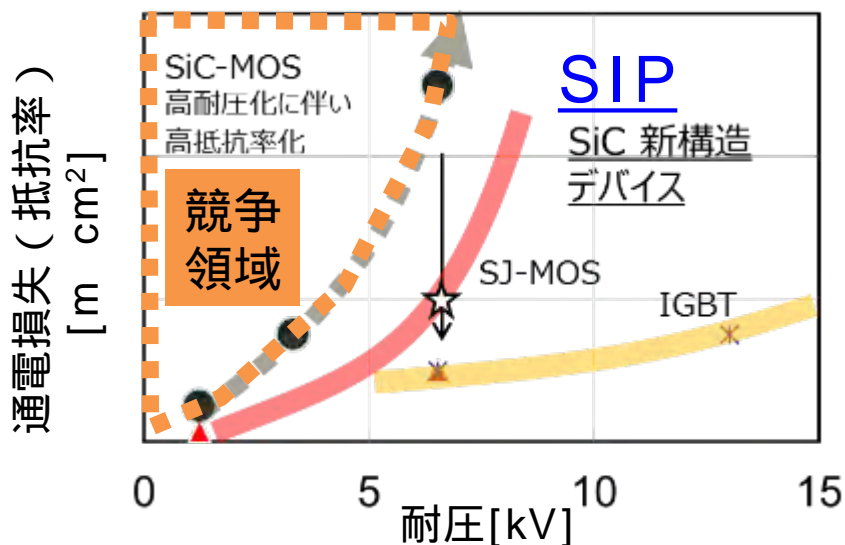
- 6.5kV以上の新構造・高耐圧デバイス実現 (Siのブレークスルー技術SJ-MOSFET、IGBTを適用へ)
- 次に、回路技術(マルチレベル制御)、高信頼性

高耐圧化



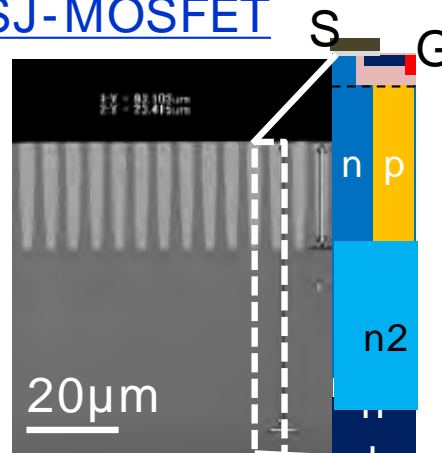
製品化レベル (競争領域)

SIP (協調領域)



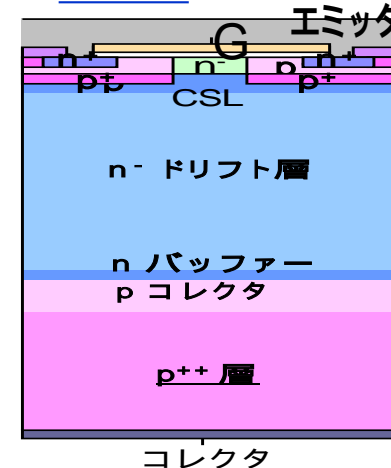
SIP目標

SJ-MOSFET



SIP目標

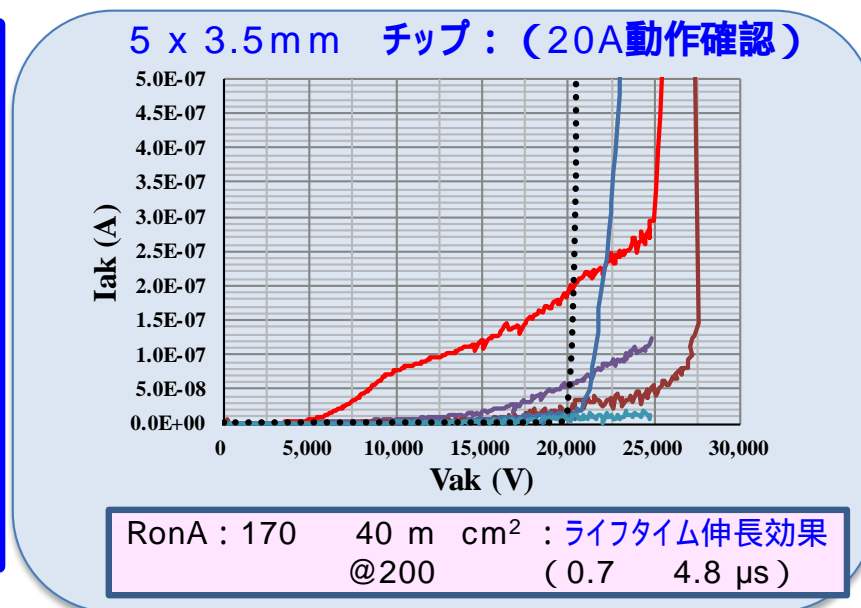
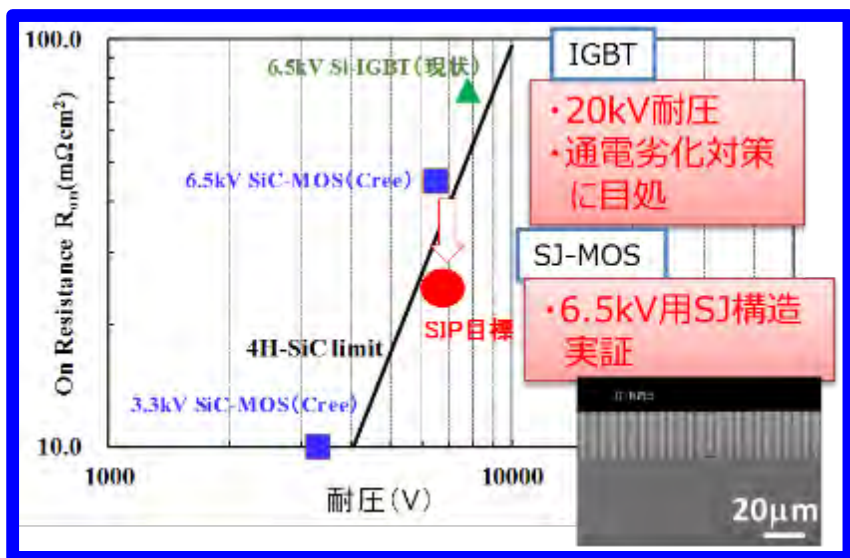
IGBT



- ✓耐圧を保ちながら低抵抗化できるSJ (Super Junction) 構造のSiC-MOSFET開発 (オン抵抗1/2以下: 45 22m cm<sup>2</sup>以下、6.5kV耐圧、信頼性は担保、SiC対応プロセス秘術)
- ✓さらに高耐圧領域では、さらなる低抵抗化できるIGBT構造デバイス開発 (損失をSiC-MOSFETの1/2以下、20kV耐圧、信頼性は担保)



項目	SIP前	SIP目標	達成度	ブレークスルー技術
耐圧 6.5kV 以上の 高耐圧 デバイス	耐圧6.5kV以下のSiC-MOSFET（プレーナ構造、トレンチ構造）	・現状のSiC-MOSFETに比べ抵抗1/2以下の6.5kV耐圧のSiC-SJ - MOSFET)	・6.5kV耐圧設計 SJ構造実証	・20 $\mu$ m以上深溝埋込エピ技術 < SJ >
		・20kV耐圧のSiC新規デバイス(PiN、IGBT) ・生産性、信頼性を満足したIGBT	・高耐圧実証（20kV以上） ・通電劣化メカニズム解明	・低BPD厚膜エピ技術（0.1個/cm <sup>2</sup> 以下 @250 $\mu$ m） ・ライフタイムコントロール

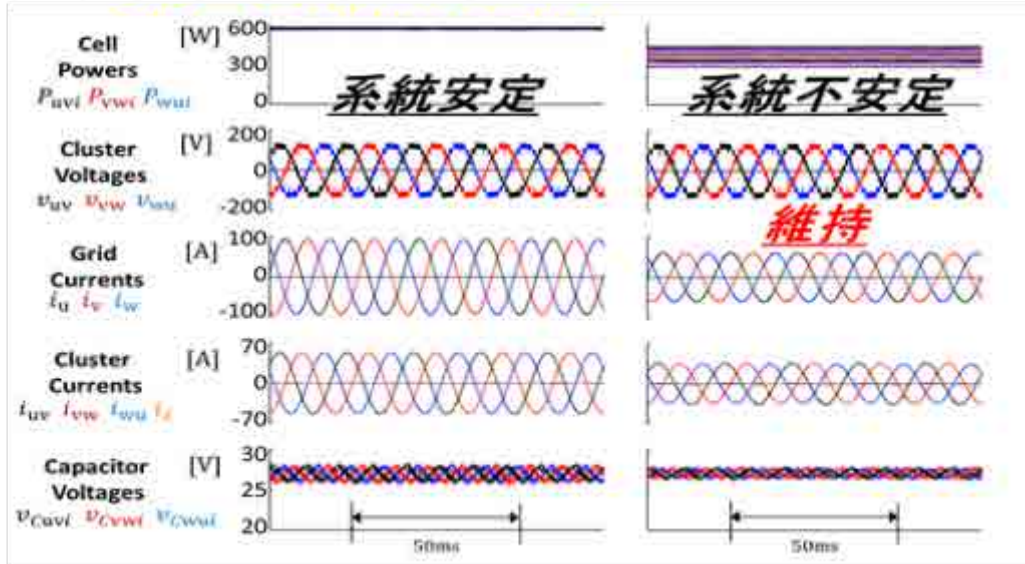


# 主な開発項目の目標と成果 ( 6.6kVトランスレス電力変換器 )

項目	SIP前	SIP目標	達成度	ブレイクスルー技術
6.6kV連系用トランスレス電力変換器	<ul style="list-style-type: none"> <li>電力変換効率 96%</li> <li>多重トランスが必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電力変換効率 98.5%以上</li> <li>多重トランスレス回路</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機詳細設計完、パワーユニット製作</li> <li>特性実証 ( 効率 98.5%以上、5kHz )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MMC * 変換器技術</li> <li>トランスレス連系制御方法</li> <li>SiCモジュール適用時の制御、動作安定化技術</li> </ul>

\* 同じセルを直列に多数接続するブレイクスルー技術。高耐圧化が容易でノイズが少ないが、制御が複雑 ( MMC: Modular Multilevel Converter )

- ・制御機能検証ミニモデル実施中
- ・三相バランスが崩れても安定動作する制御技術を開発

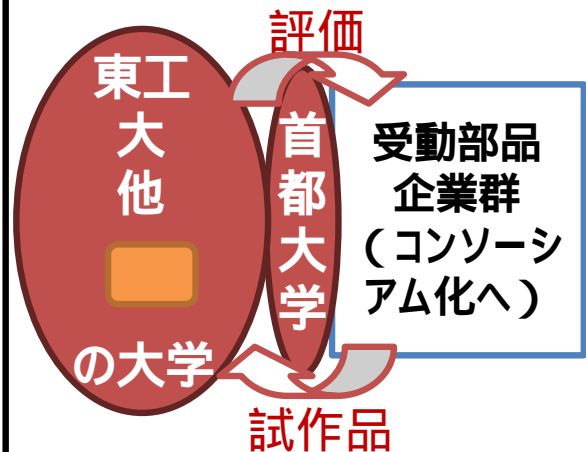


ミニモデル  
検証装置  
外観

ウエハ・部品から機器（上流から下流）まで一気通貫した開発の推進、および普及・拡大のため標準化戦略を踏まえて研究テーマ間連携を積極的に推進

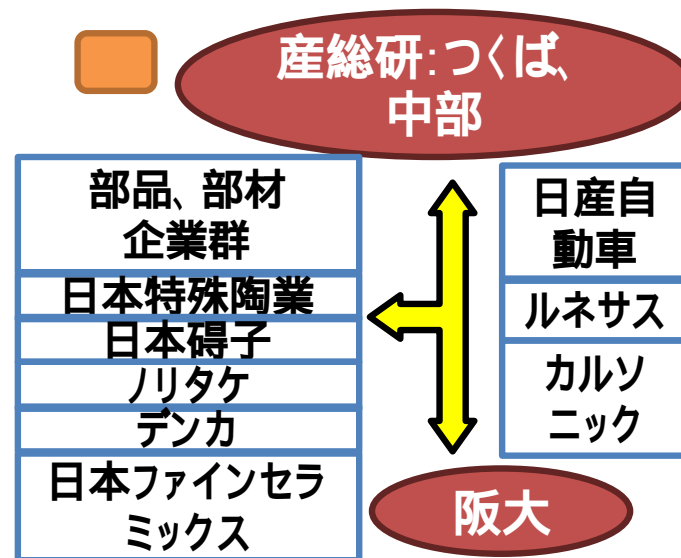
## パワエレ評価・受動部品連携

目的：高速動作時の損失評価技術の普及、高性能受動部品開発



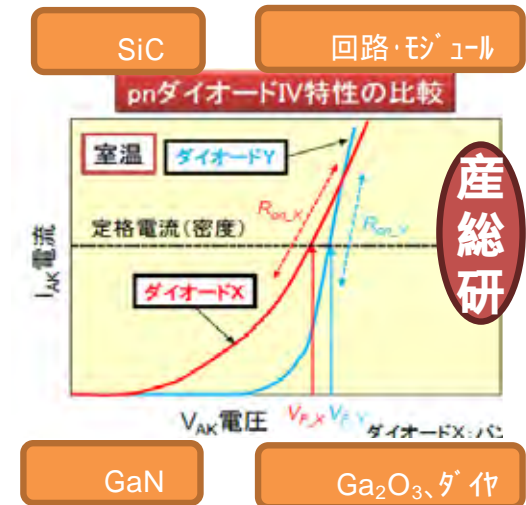
## 高温対応部品・モジュール連携

目的：高温モジュールによる高温部品、部材評価と高温部品、部材開発



## ウエハ、デバイス共通評価連携

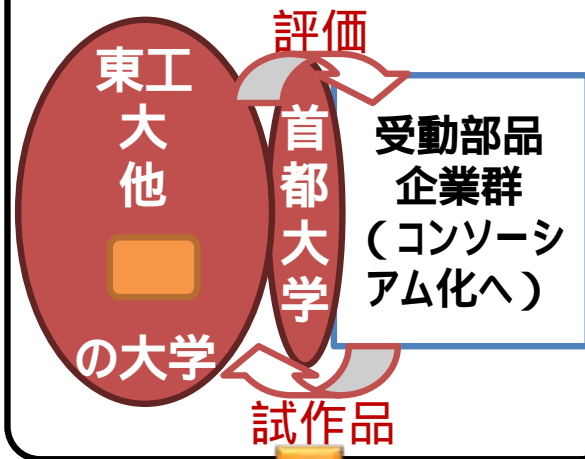
目的：共通の評価方法で異なる半導体材料、モジュールの性能比較を行う



(例) 受動部品コンソーシアムと大学で開発された高速動作対応の受動部品を機器に適用し、**高効率化** (定格効率96.9 **98.3%**)、小型化を実証。

## パワエレ評価・受動部品連携

目的：高速動作時の損失評価  
技術の普及、高性能受  
動部品開発



企業がサン  
プル出荷・  
事業化へ



低損失  
三相インダクタ  
(従来品より  
損失47%減)

試作受動部品を大容量絶縁型DC-DC変換器に適用

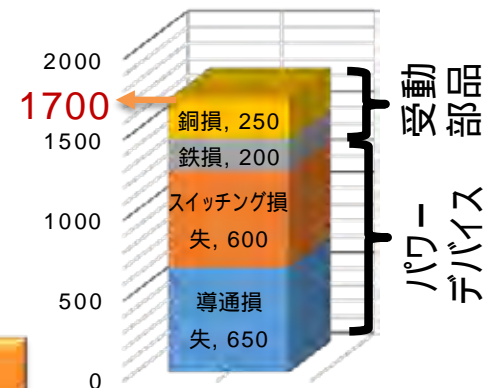
絶縁トランス

旧型(19.5 kg)



新型(11 kg)

\* 1.7% (1700W) 損失内訳



	(外付けSBD無し) SiC- MOSFET	Si-IGBT/PND
電力定格	100 kW	60 kW
DC定格入/出力電圧	750 V/750 V	750 V/750 V
動作周波数	20 kHz	4 kHz
パワーデバイス定格容量	1.2 kV/400A	1.2kV/300A
最高効率	99.4%	97.8%
電力定格効率	* 98.3%	96.9%

## 高品質GaNウエハ開発による縦型GaNパワーデバイスの実証

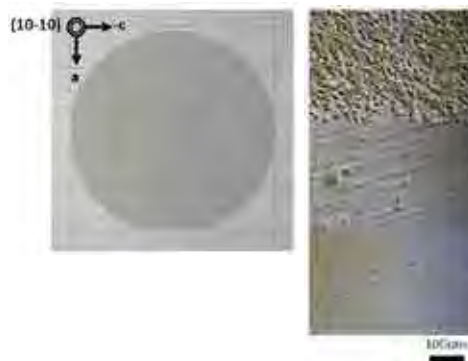
	項目	SIP前 (競争領域)	SIP目標 (協調領域)	達成度	ブレークスルー技術
GaN 縦型 パワー デバイス	ウエハ	・貫通転位欠陥密度が50万個/cm <sup>2</sup> 以上	・貫通転位欠陥密度が1000個/cm <sup>2</sup> 以下@4インチ	・貫通転位欠陥密度が1000個/cm <sup>2</sup> 以下@2インチ	・アモノサーマル法
	デバイス	・理論に合わないI-V特性、ヒステリシス	・p形イオン注入技術 ・耐圧1.2kV以上、1m cm <sup>2</sup> 以下、アンペア級	・コドーブ注入でp形を確認 ・理論に合うI-V特性、移動度30-100cm <sup>2</sup> /Vs	・MgとHとのコドーブイオン注入をN極性(000-1)面に応用 ・表面・界面制御技術

### ウエハ技術

### デバイス技術

高品質・大面積・  
低価格GaNウエハ開発

高品質2インチGaNウエハ



欠陥密度の変遷

6.9 x 10<sup>5</sup> 個/cm<sup>2</sup>  
@SIP開始時

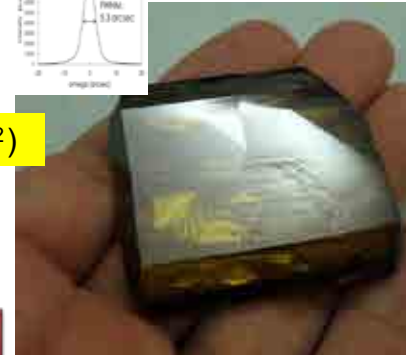
3.1 x 10<sup>4</sup> 個/cm<sup>2</sup>  
@2015.5

6.0 x 10<sup>3</sup> 個/cm<sup>2</sup>  
@2015.11

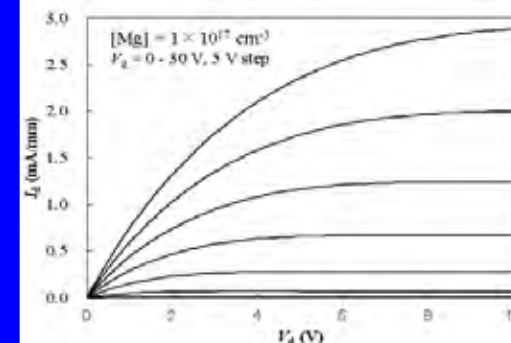
一部領域(0個/cm<sup>2</sup>)

2.5 x 10<sup>2</sup> 個/cm<sup>2</sup>  
@2016.12

FWHM: 5.3 arcsec



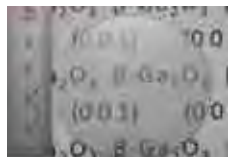
横型MOSFETで、理論とあった  
電圧・電流特性  
チャネル移動度30 ~ 100  
cm<sup>2</sup>/Vs) を世界で初めて実証



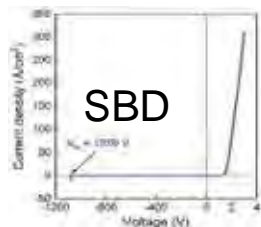
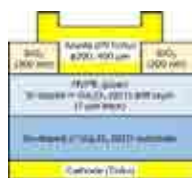
# 6. 将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発(新材料、新構造等)

## 【酸化ガリウム(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)パワーデバイス基盤技術開発】

- 単結晶Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>バルク・基板
- 貼り合わせ技術
- HVPE薄膜成長技術
- Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>フィールドプレートショットキーバリアダイオード (SBD)

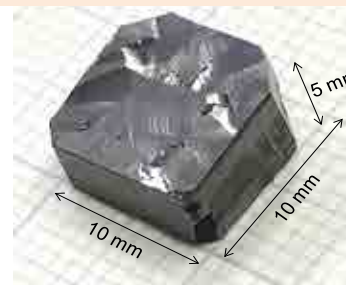


2インチ径単結晶  
Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(001)ウェハー



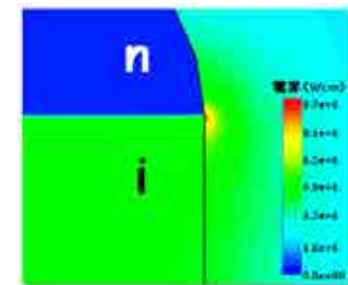
## 【ダイヤモンドのパワーエレクトロニクス】

縦方向に長尺成長中の  
ダイヤモンド単結晶



黒色は結晶  
側面につく  
多結晶のため

破壊時の局所集中電界  
8~9MV/cm



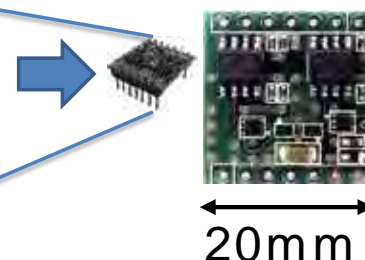
## 【低容量小型パワー集積回路の開発とパワープロセッシング】

期待される機能

- 小型軽量
- 自由な加除
- 限られた電力の融通
- 制御とパワーの同時性



SiC + GaN



小型高速大電力  
ドライバ開発  
( > 10MHz,  
1kW駆動 )



産業機器レベル  
小型ロボット駆動実証

高周波絶縁ゲートドライバーの開発  
パワー集積回路設計  
パワーユニットセル化技術  
パワー/情報の統合制御技術開発

# 小型で高性能な“どこでもパワーエレ機器” 豊かな省エネ社会の実現のために

- いっそうの省エネルギー化の推進
- 日本の産業競争力の強化



次世代材料を中心に共通基盤技術を開発し、用途と普及を拡大していくことを目指し実施

## 共通基盤技術

### SiC

- 基板技術・プロセス技術の高度化による、デバイスの高度化
- 高耐熱受動素子の開発による、モジュールの小型化・高信頼化

### GaN

- コドープp形イオン注入技術の開発
- 縦型パワーデバイスの可能性検証を達成し高性能化に目標を引き上げ

## 用途と普及

### 自動車分野

- 高温・高電流密度動作・受動素子内蔵・小型パワーモジュール
- EV用機電一体インホイールモータ

### 電力機器分野

- 6.6kV連系用多重トランスレス電力変換器
- HVDC向けMMC電力変換器