



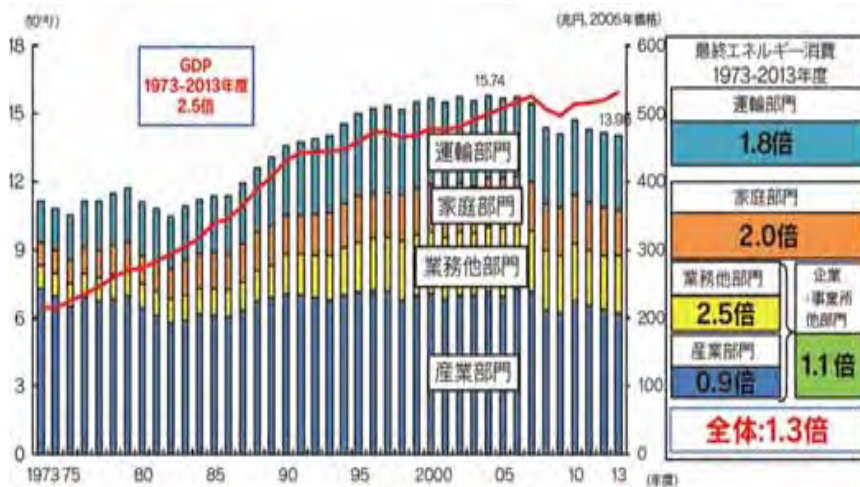
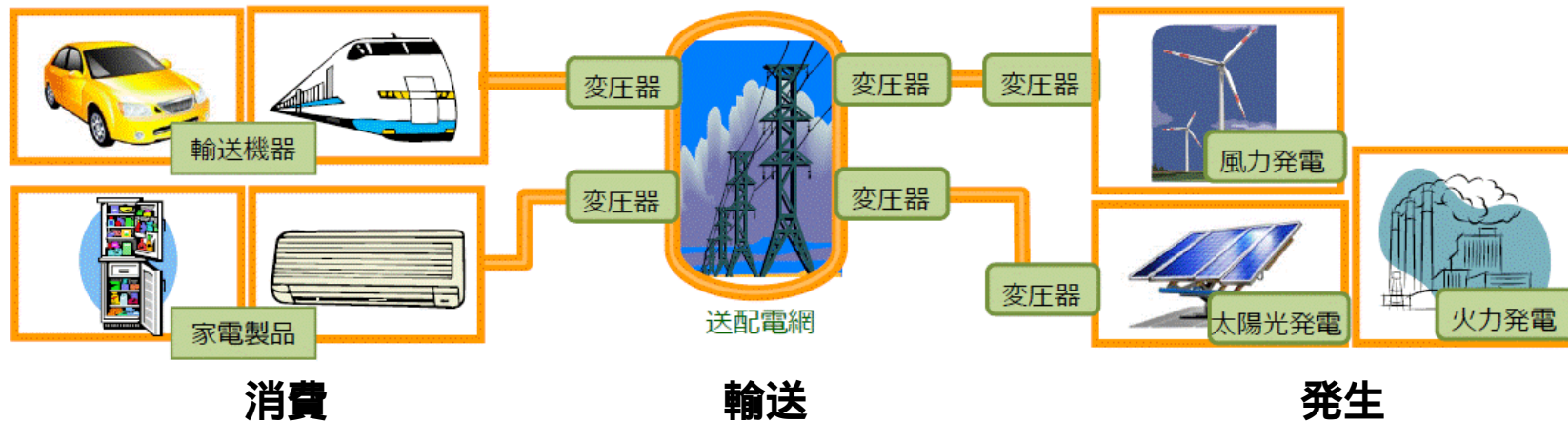
『次世代パワーエレクトロニクス』

～どこでもパワエレ機器で豊かな省エネ社会～

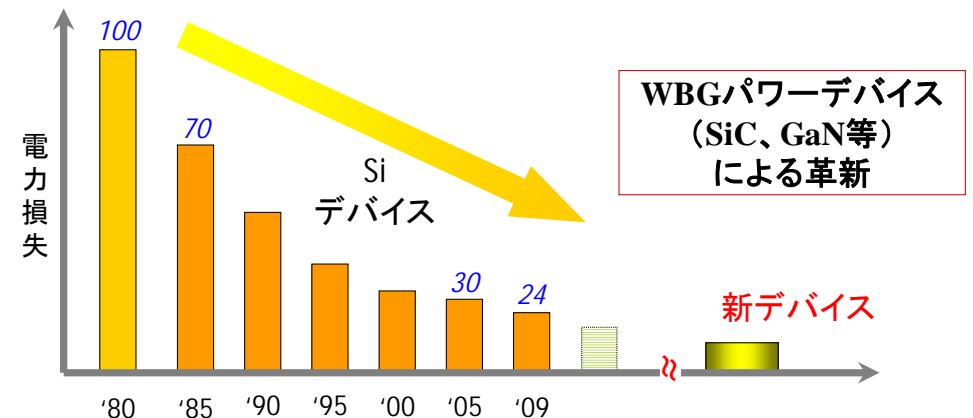
プログラムディレクター
大森 達夫

パワーエレクトロニクス技術と開発の背景・課題

パワーエレクトロニクスは電気エネルギーの**発生・輸送・消費**を効率的に行うためのキーテクノロジー



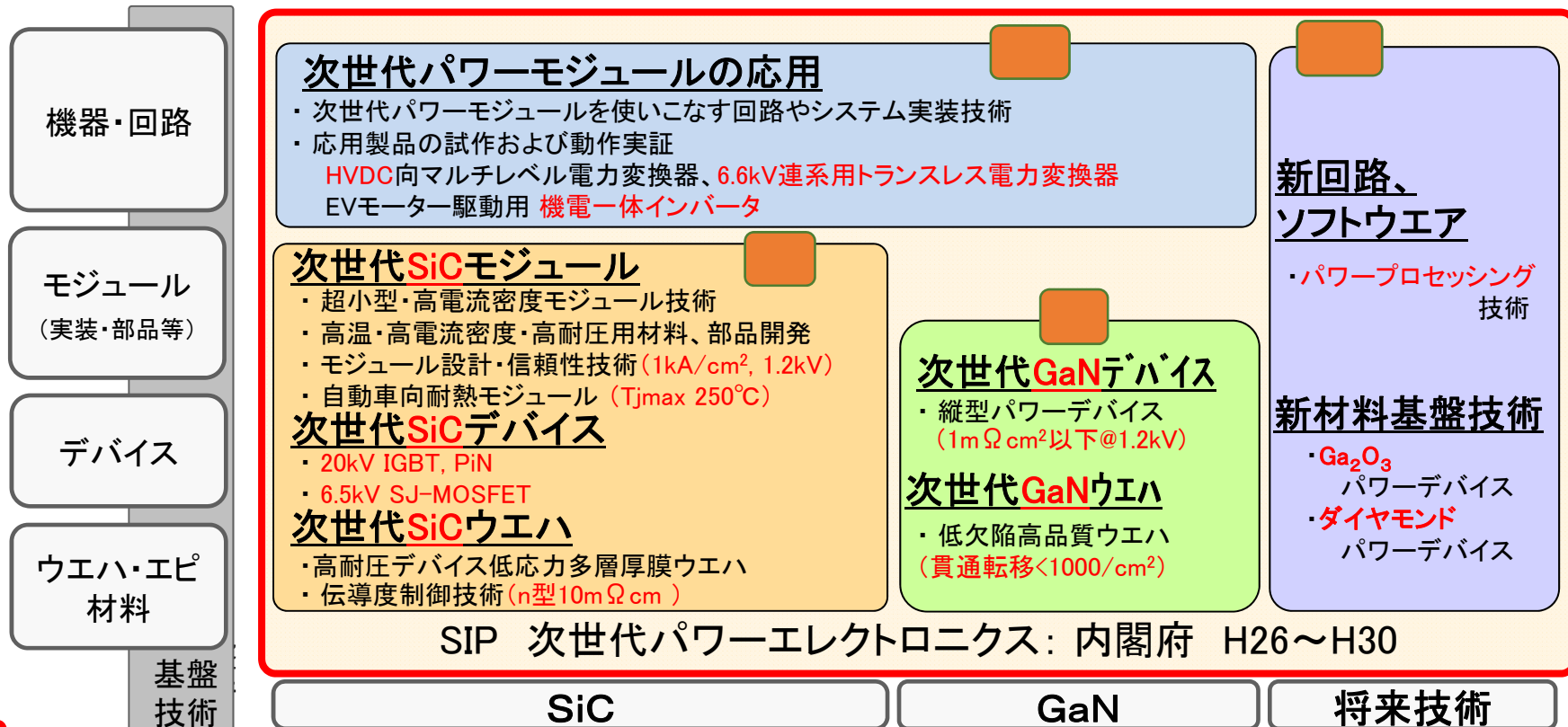
最終エネルギー消費動向



パワーデバイスの性能変遷

研究開発の全体像

ウエハから機器・回路までの基盤技術開発を行い、**次世代パワーエレクトロニクスの適用用途の拡大や普及拡大、性能向上**を図り、我が国の**産業競争力の強化と省エネルギー**を加速させる。

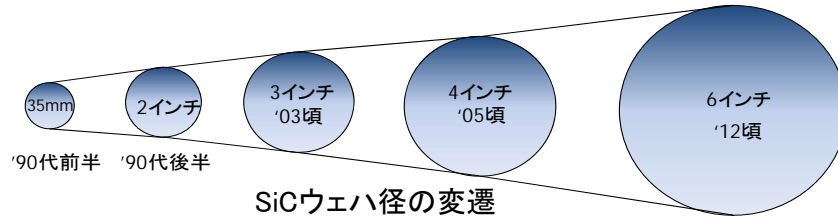


研究開発項目

- I SiCに関する拠点型共通基盤技術開発 (高耐圧化、小型化、低損失化、信頼性向上)
- II GaNに関する拠点型共通基盤技術開発 (ウエハ高品質化及び縦型パワーデバイス技術)
- III 次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発 (実装、回路制御・基盤、使いこなし技術)
- IV 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、新回路、ソフトウェア等)

SiCに関する基盤技術開発(研究開発項目 I)

(SiCパワエレ機器の高耐圧化、小型化、低損失化、信頼性向上に向けた技術開発)



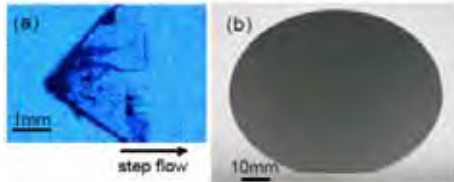
- SiC-MOSFET(耐圧1.2kV)は既に市販
- SiCモジュールも市販開始

更なる高性能化(高耐圧化、小型化、低損失化、信頼性向上)に向けた取り組みが必要



Ref: T. Kato et al.,
Mat. Sci. Forum, 778-780(2014)pp.47.

高品質厚膜エピ



低抵抗ウェハ
高品質厚膜エピ開発

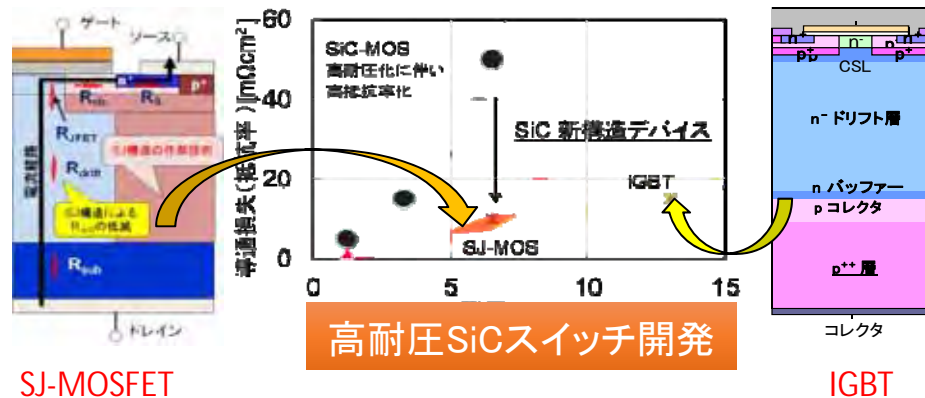
- SiCウェハ
低抵抗ウェハ、高品質厚膜エピ
- SiCデバイス(>6.5 kV)
高耐圧SiCスイッチ開発(IGBT、SJ-MOSFET)
- SiCモジュール(1 kA/cm², 250 °C)
高温・高周波動作、大電流密度



Ref: N. Kato et al.,
Mat. Sci. Forum, 778-780(2014)pp.1110.

ゼロストレス接合

大電流密度、
耐熱モジュール開発



高電流密度・高耐熱・超小型モジュール開発



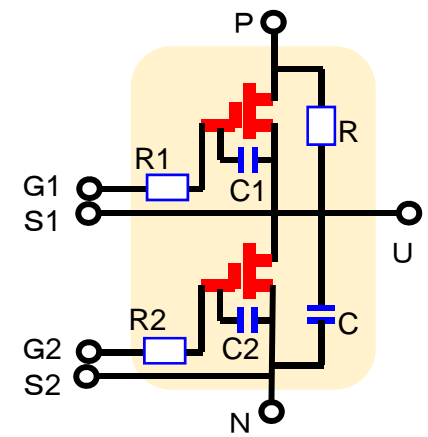
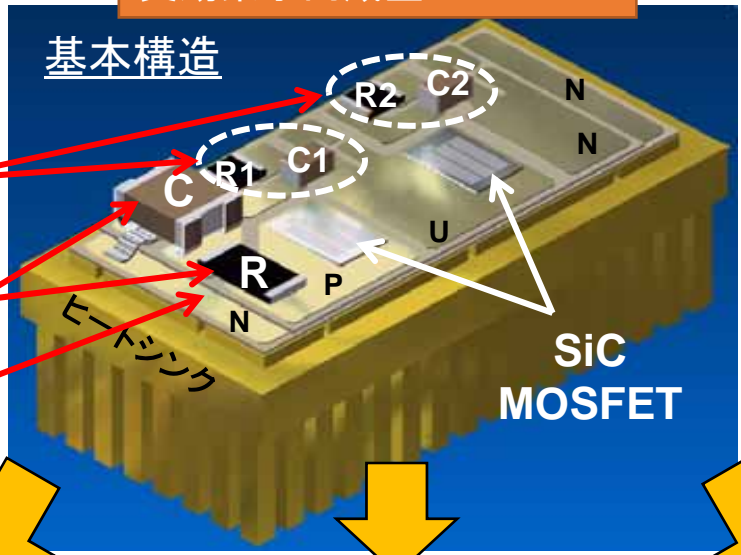
受動素子内蔵型モジュール

プロジェクトで開発している部品:

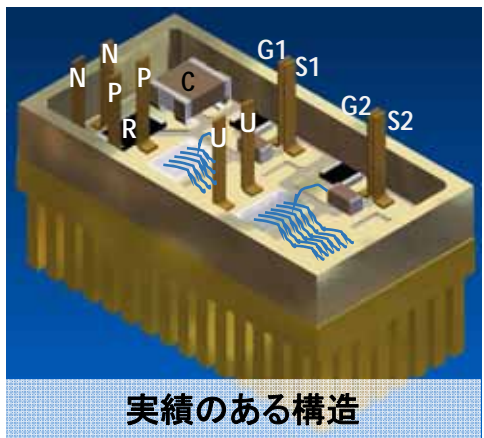
ゲート回路: R, C
(仕様: 高速)

スナバ回路: R, C
(仕様: 高電圧)

高熱伝導率
窒化シリコン基板

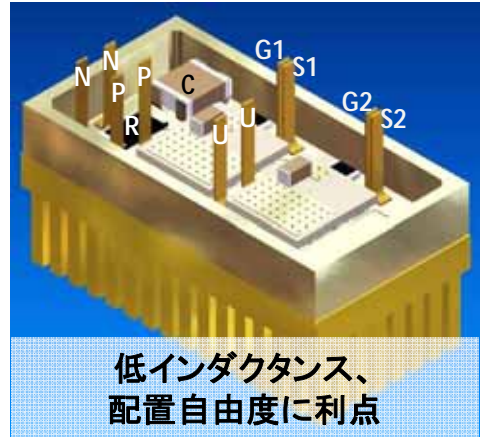


ワイヤボンダ形



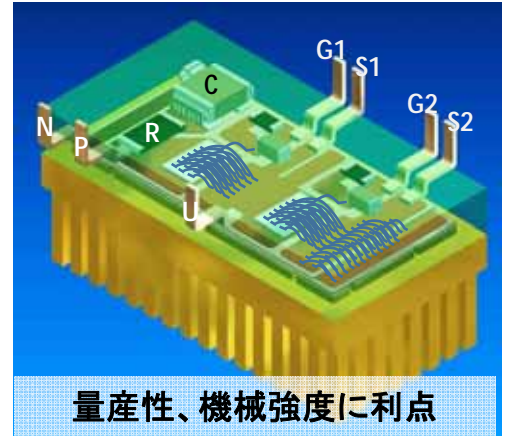
実績のある構造

配線基板形



低インダクタンス、
配置自由度に利点

樹脂封止形



量産性、機械強度に利点

高電流密度・高耐熱・超小型モジュール開発



受動素子内蔵型モジュール

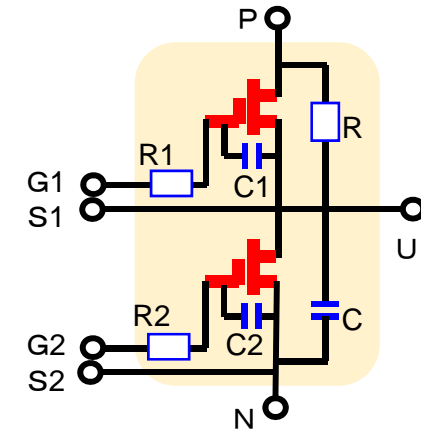
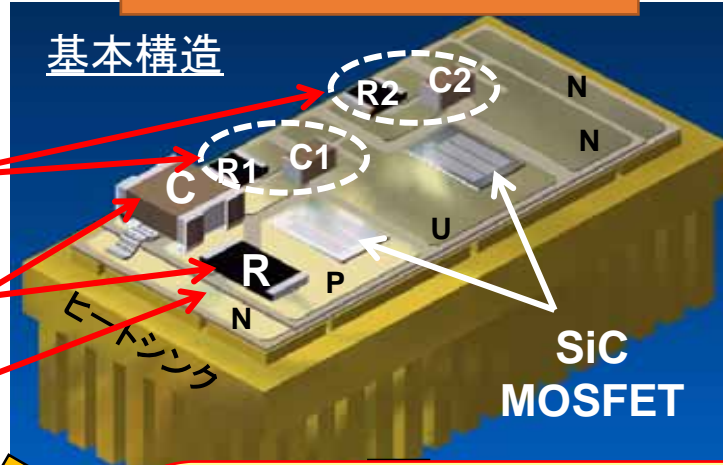
プロジェクトで開発している部品:

ゲート回路: **R, C**
(仕様: 高速)

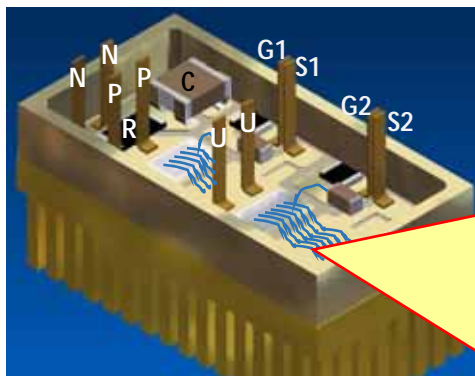
スナバ回路: **R, C**
(仕様: 高電圧)

高熱伝導率
窒化シリコン基板

基本構造

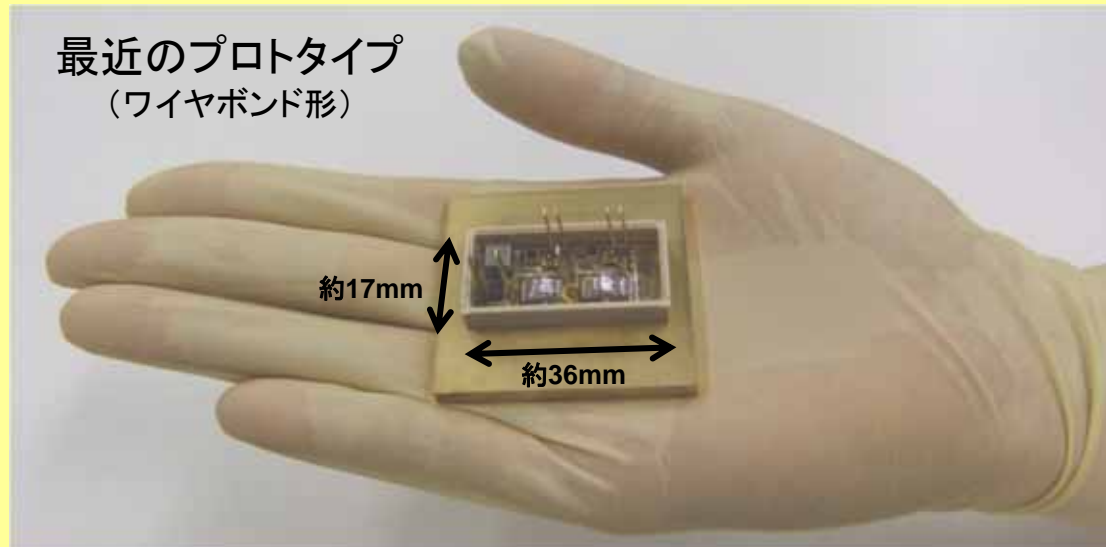


ワイヤボンダ形



実績のある構造

最近のプロトタイプ
(ワイヤボンダ形)



GaNに関する基盤技術開発(研究開発項目Ⅱ)

(縦型GaNパワーデバイス実現に向けたウェハ、デバイス技術開発)

GaNの発光デバイスとしての物理現象解明、
技術開発は大きく進展

発光デバイス	要求仕様	パワーデバイス
$10^7 / \text{cm}^2$ 以下	貫通転位欠陥密度	$10^3 / \text{cm}^2$ 以下
$10^{18} \sim 10^{20} / \text{cm}^3$	不純物濃度制御技術	$10^{14} \sim 10^{20} / \text{cm}^3$
不要	選択的ドーピング技術	必須
不要	表面・界面制御技術	必須

上記課題が解決されれば、SiCを超える高性能、
高コストパフォーマンスパワエレ技術が実現可能

SIP「次世代パワーエレクトロニクス」

高品質・大面積・
低価格GaNウェハ開発

- アモノサーマル法
- 改良HVPE法

GaN縦型デバイスプロセス
技術開発

- 選択的ドーピング(イオン注入)
- MOS界面形成技術
- ...

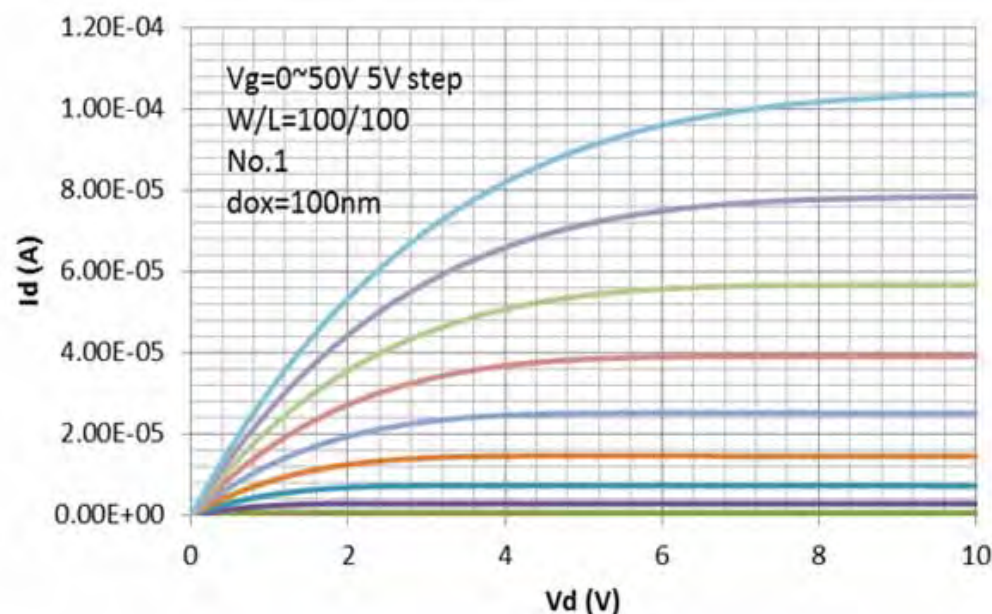
GaN物性解明
物性値精密測定

- 絶縁破壊電界強度、飽和電子速度
- ...

GaN縦型パワーデバイス作製技術開発



高品質2インチGaNウェハ、GaN-MOSFETを実証



世界初実証

- チャンネル移動度:
• **30 cm²/Vs**
- 閾値電圧: **15 V**

- アモノサーマル法の結晶成長条件最適化により、平均欠陥密度 6.0×10^3 個 / cm² という、高品質GaN 2インチウェハを実現。
- SIPで開発したウェハの高品質化を反映して、横型MOSFETで、バックゲート電圧依存性も確認でき、理論とあった電圧・電流特性 (チャンネル移動度30cm²/Vs)を世界で初めて実証。

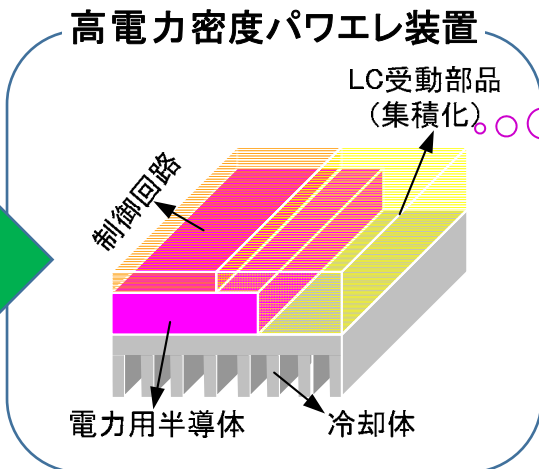
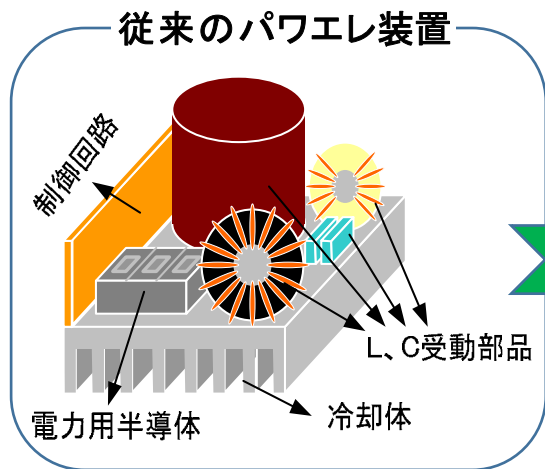
次世代パワーモジュールの応用に関する研究(研究開発項目Ⅲ)

(次世代パワエレ技術:実装・回路制御・基盤技術開発)

次世代パワーデバイス・モジュールの性能を最大限に引き出すためのシステム実装技術・回路や制御、保護技術などの**使いこなし技術**開発、次世代パワーモジュールを新たな応用分野に展開するための**実用化技術開発**を推進

実用化技術		6.6 kV連系用 トランスレス電力 変換システム	高圧直流 送電向け電力 変換システム	EV用機電一体 インホイール モータ
使いこなし技術	応用技術	高周波加熱		ハイブリッド直流遮断器
		絶縁形DC-DCコンバータ		高密度電力変換器
	実装・回路制御技術	超高速モータ用インバータ		モータ駆動回路システム
		チョツパ回路	AC/DC変換器	マルチレベル変換器
	基盤要素技術	電磁気学的EMC設計法		受動デバイスの高性能化

パワエレ駆動時の条件下での受動デバイス評価技術



受動デバイスの高電力密度化対応の研究が遅れている

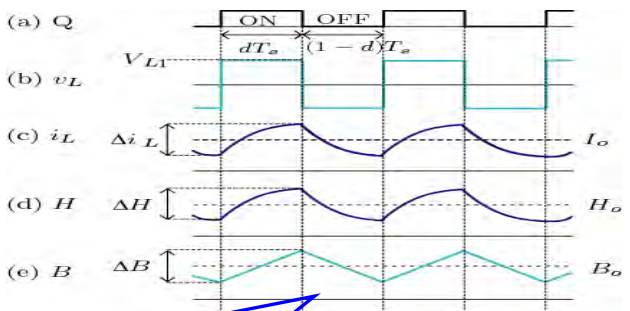
パワエレ用受動デバイスの研究課題と成果(現時点)

→パワエレ特有の**大きな矩形波**電圧・電流、**バイアス**電圧・電流の条件下での受動デバイス評価手法、装置設計技術が不十分
→**パワエレ用磁性デバイスの損失評価手法とデバイス最適設計手法の開発**

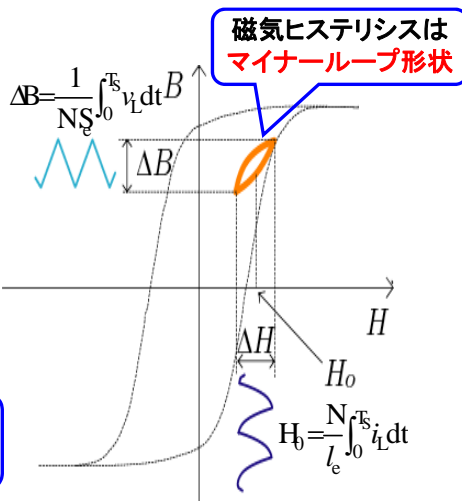
構成要素の小型化・集積化

パワーデバイスの低損失化・高周波化
+
受動デバイスの高電力密度対応技術

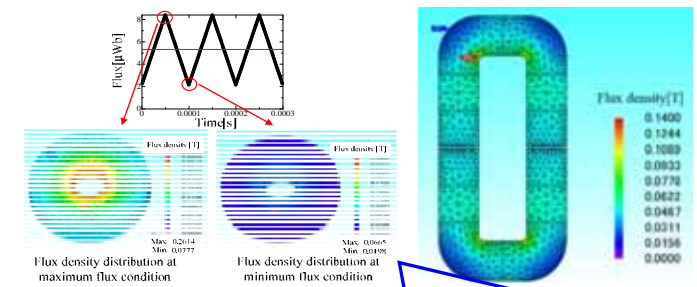
■ 矩形波電圧励磁＋磁界バイアス条件下での鉄損計測手法の開発



励磁磁界強度・磁束密度波形は**非正弦波**
磁界強度・磁束密度には**バイアス成分重畳**



■ 磁性体の形状を踏まえた鉄損計算手法の開発

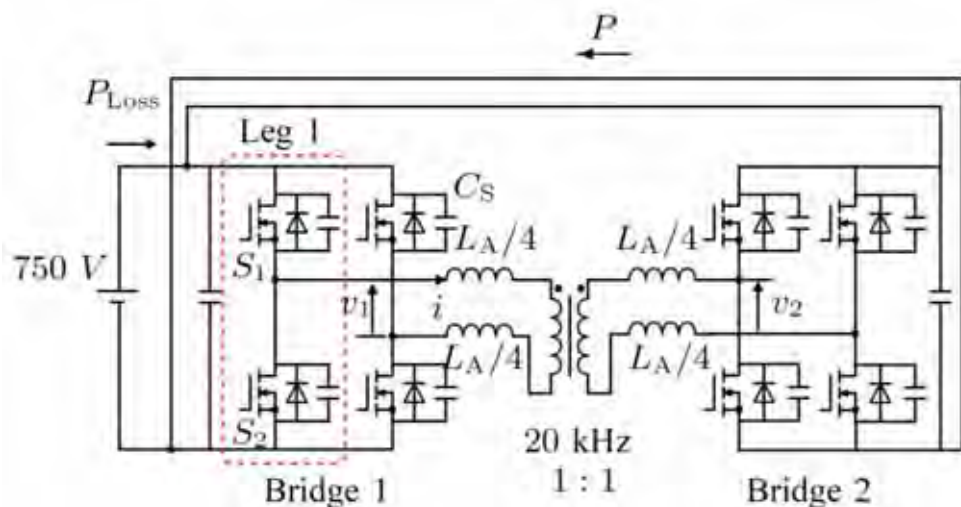


磁性体内部の磁束密度が**不均一状態**を踏まえた、高精度鉄損計算手法を開発(オリジナル技術)

双方向絶縁型DC-DCコンバータ開発



	SiC- MOSFET/SBD無し 双方向コンバータ ⁽¹⁾	Si-IGBT/PND 双方向コンバータ ⁽²⁾
定格電力	100 kW	60 kW
参照電圧	750 V	750 V
周波数	20 kHz	4 kHz
パワーデバイス	1.2 kV and 400 A	1.2 kV and 300 A
最大効率	*99.4%	97.8%
定格電力効率	*98.1%	96.9%



DCからDCまで全体のコンバータ効率
(許容誤差 0.03%)

$$\eta = \frac{P}{P + P_{Loss}}$$

(1) Yamagishi, Akagi et al. *IEEJ Trans. Industry Applications*, May 2014, pp.544-553.

(2) T. Chocktaweechock, K. Hasegawa, and H. Akagi, *IEEJ IAS Annual Meeting*, Aug. 2012.

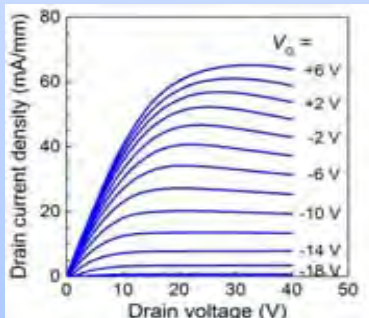
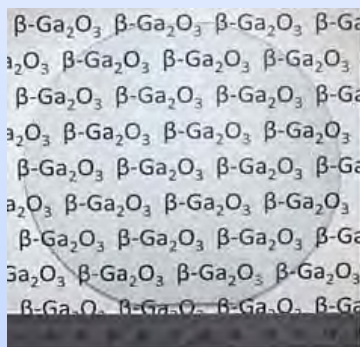
* SiCモジュールと受動部品 of 改善により最大変換効率99.4%達成

新材料、新回路・ソフトウェア技術(研究開発項目IV)

新材料

酸化ガリウム (Ga₂O₃)

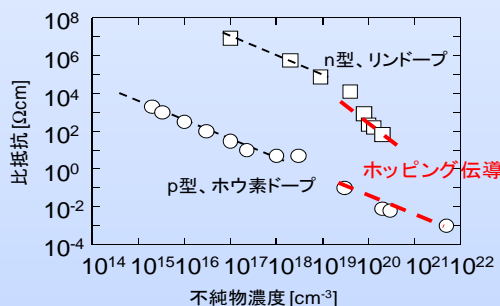
4インチ単結晶ウエハ



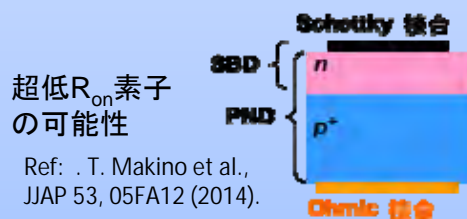
Ref: M. Higashiwaki et al., IEDM Tech. Dig., 707-710 (2013).

ダイヤモンド

低抵抗基板の可能性



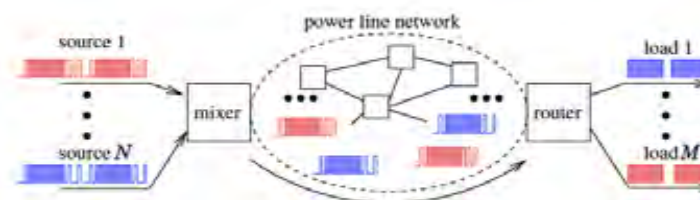
	Si	SiC	GaN	Diamond
κ [W/cmK]	1.5	3.3 ~ 4.9	2.1	22



超低R_{on}素子の可能性
Ref: T. Makino et al., JJAP 53, 05FA12 (2014).

新回路技術

パワープロセッシング技術



従来:

大型 & 重量!



パワープロセッシング:

コンパクト & 軽量!

- 制御信号を付加した電力パケット伝送
- オンデマンドに対応し、限られた電力を最適化して配電
- 自由な着脱(ホットスワップ)が可能



小型ロボットを用いたパワープロセッシングのデモに成功

- Ga₂O₃ は大型単結晶ウエハ技術から、ダイヤモンドは圧倒的な熱伝導率から新材料として期待。
- パワープロセッシングは全く新しい将来のパワエレ技術を開拓する可能性に期待。

社会実装への布石

1. 標準化戦略

- ウエハ品質評価共通プラットフォーム。
- Si, SiC, GaN, Ga₂O₃各デバイスを同じ土俵で比較するための、デバイス共通評価連携。
- 次世代パワーエレクトロニクス技術における電力損失評価技術。

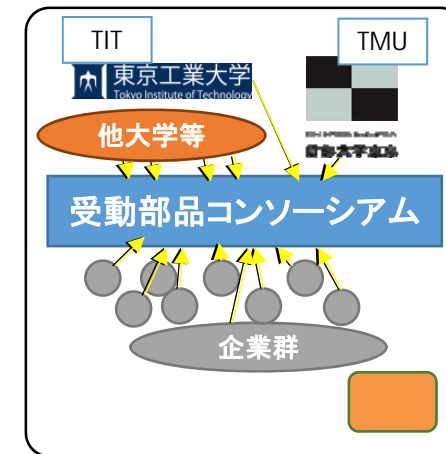
2. コンソーシアム

- 高周波動作時における、モジュールの電力損失評価を通じた、受動部品開発。
- 高温動作時における、モジュールの信頼性評価を通じた、受動部品開発。

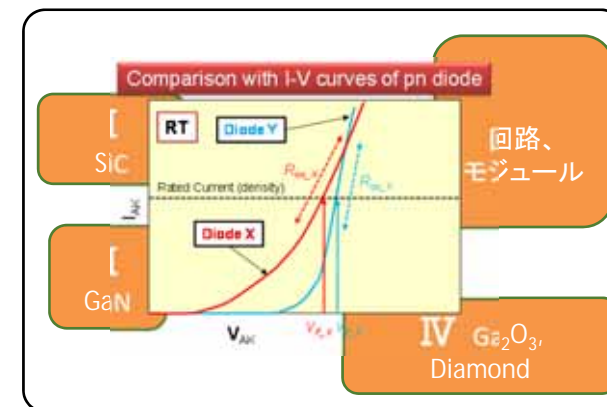
3. ロードマップ・戦略の俯瞰・刷新

- NEDOと協力して実施

パワエレ評価・受動部品連携



デバイス共通評価連携



まとめ

- 持続可能な経済成長へのキーテクノロジーとして、クリーンな再生可能エネルギーと省エネルギーの技術開発は重要。
- 以下、進捗状況：
 - ✓ SiCモジュール: 受動部品内蔵型小型モジュールを試作し、設計通りの低インダクタンスによる高速動作を確認。
 - ✓ 自動車向けモジュール: リードフレームの形でめっき技術を基本とした2D/3D実装技術を開発。
 - ✓ GaN: ウエハ高品質化により、理論と合うMOSFET動作を確認。
 - ✓ 使いこなし: SiC性能をフルに生かした高効率双方向絶縁DC-DCコンバータを開発。
- SIPで社会実装を促進するためには、以下が必要。
 - ✓ SiC: モジュールやシステムにおいて、部品の信頼性を担保しながら性能を最大限に引き出す研究。
 - ✓ GaN: 共通基盤技術開発の高度化研究。
 - ✓ 新技術: 将来のイノベーションに向けたさらなる理解のための研究