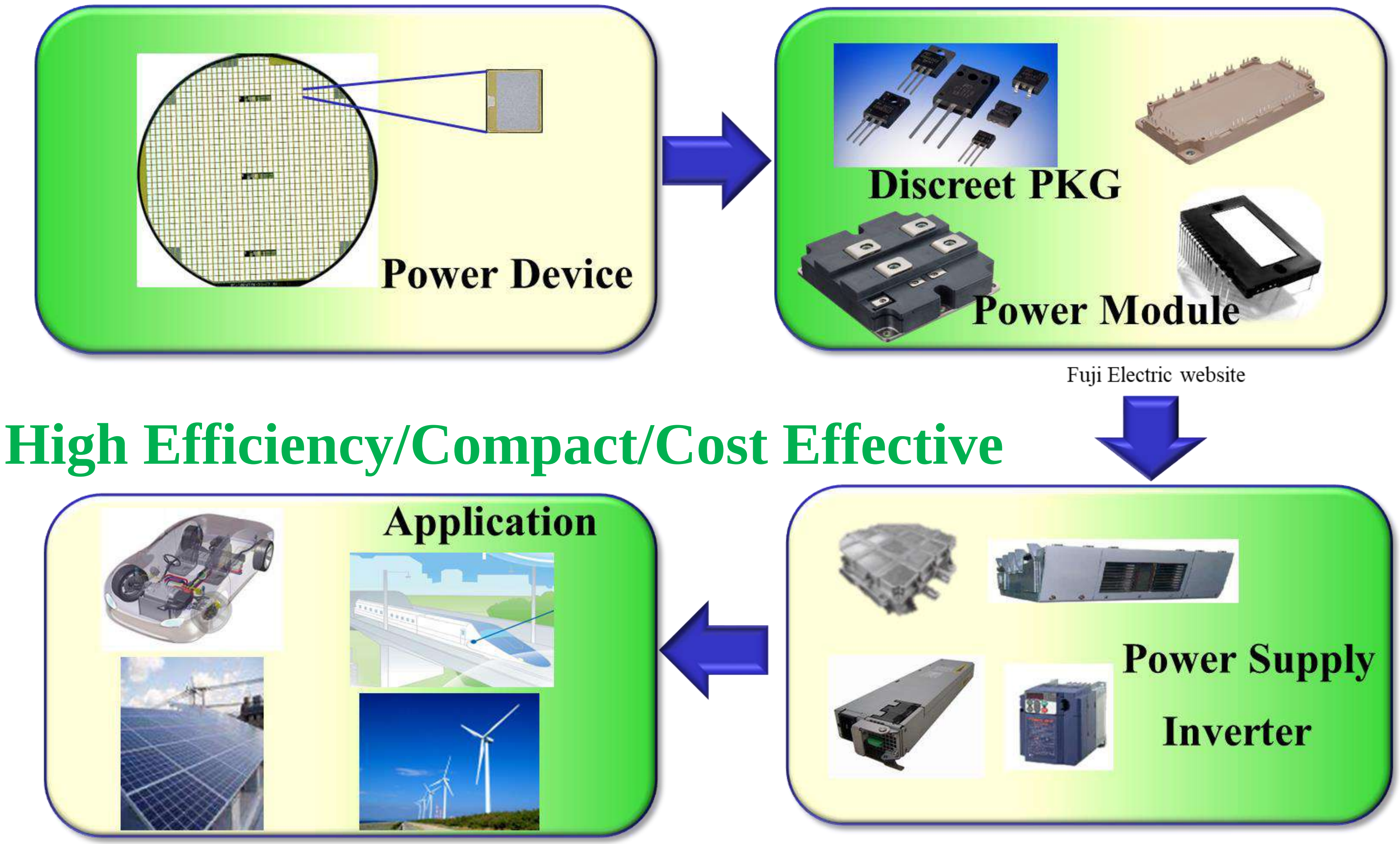
「車載用パワーモジュールの進展」

担当教員　高橋良和

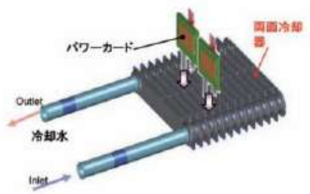
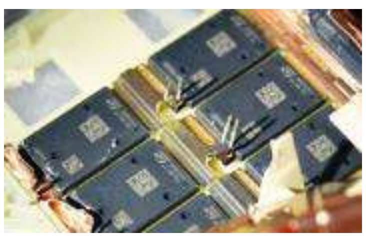
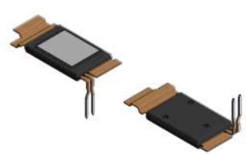
サマリー パワーデバイスからパワーモジュール、応用製品まで



最新EV/HEV用パワーモジュール

TOHOKU UNIVERSITY

Cooling method of power module for EV

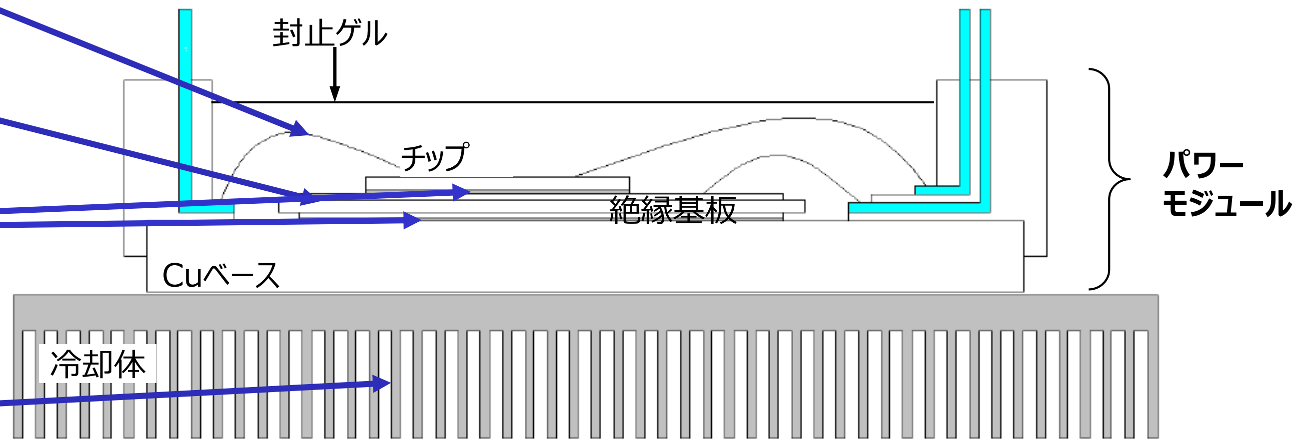
	Indirect	Direct
Double side	 ※DENSO Technical Review  ※DENSO Web page **Double Side Indirect Cooling Power module**	 ※Hitachi Web page **Double Side Direct Cooling Power module**
Single side	 ※xtech.nikkei.com  ※STmicro Datasheet **Single Side Indirect Cooling Power module**	 ※Infineon Datasheet **Single Side Direct Cooling Power module**

サマリー

パワーモジュールの重要要素技術

パワーモジュール構造の重要技術

- 接続技術
- 絶縁基板技術
- 接合技術
- 冷却技術



講義内容

1. はじめに
2. パワーデバイスの最新状況
3. EV/HV用インバータ/パワーモジュールの最新状況
4. パワーモジュール技術概要
5. 将来予想とまとめ

講義内容

1. はじめに
2. パワーデバイスの最新状況
3. EV/HV用インバータ/パワーモジュールの最新状況
4. パワーモジュール技術概要
5. 将来予想とまとめ

脱炭素化社会に向け、パワーエレクトロニクスの役割は益々重要になる

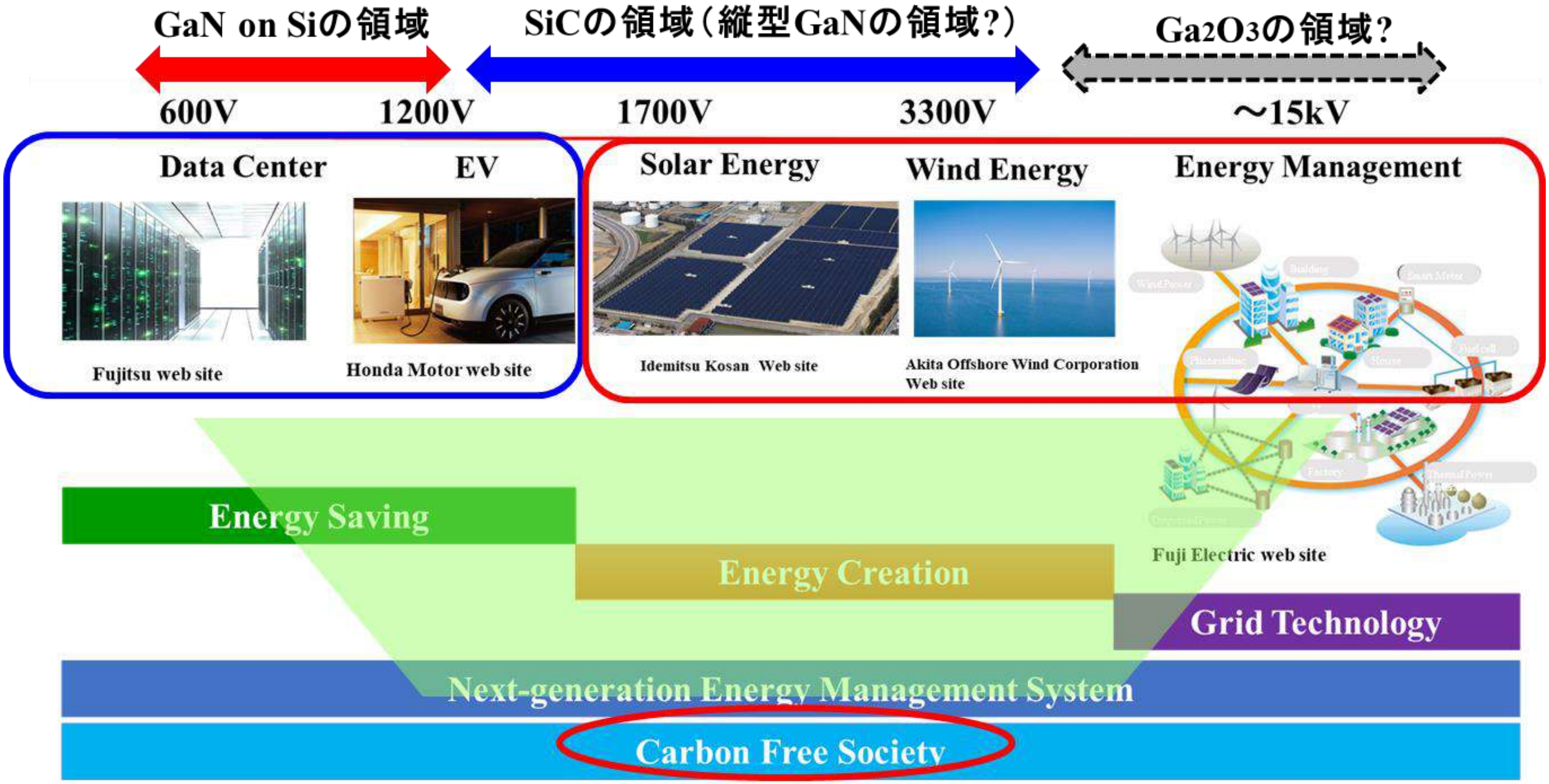
COP27

Egypt, 6 November 2022

クリーンエネルギーによる発電やエネルギー効率化を促進し、石炭火力発電の段階的削減、化石燃料補助金の段階的廃止に向けた取組みを加速

Credit: UN Climate Change

新規デバイスと共に益々拡大するパワーエレクトロニクス分野



Y.Takahashi and T.Endoh : Latest Power Devices and Power Electronics Integration Technology ,
Journal of Japan Institute of Electronics Packaging 2021 Vol. 24, No. 3, 215-225

EVがモビィリィティーの主力になりつつある

TOHOKU UNIVERSITY

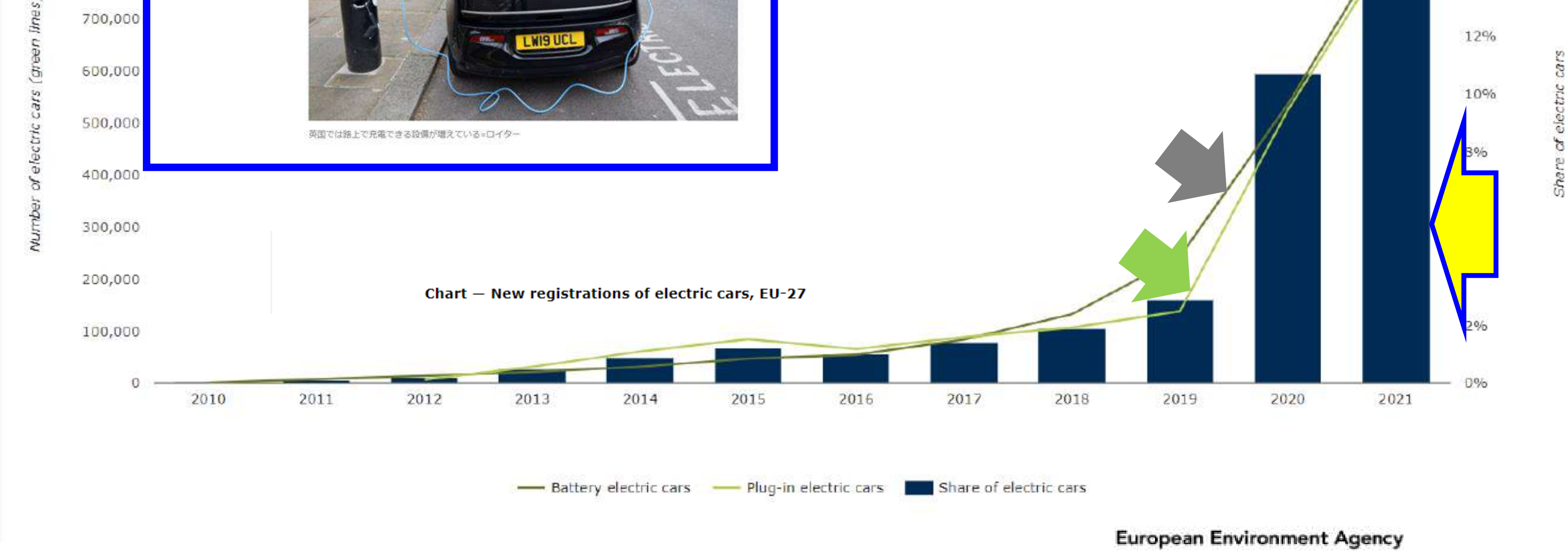

日本経済新聞

トップ 速報 マネー 経済・金融 政治 ビジネス マーケット テクノロジー 国際 オピニオン スポーツ 社会

英国、ガソリン車を30年に禁止　EVの普及加速も

2020年11月18日 7:40

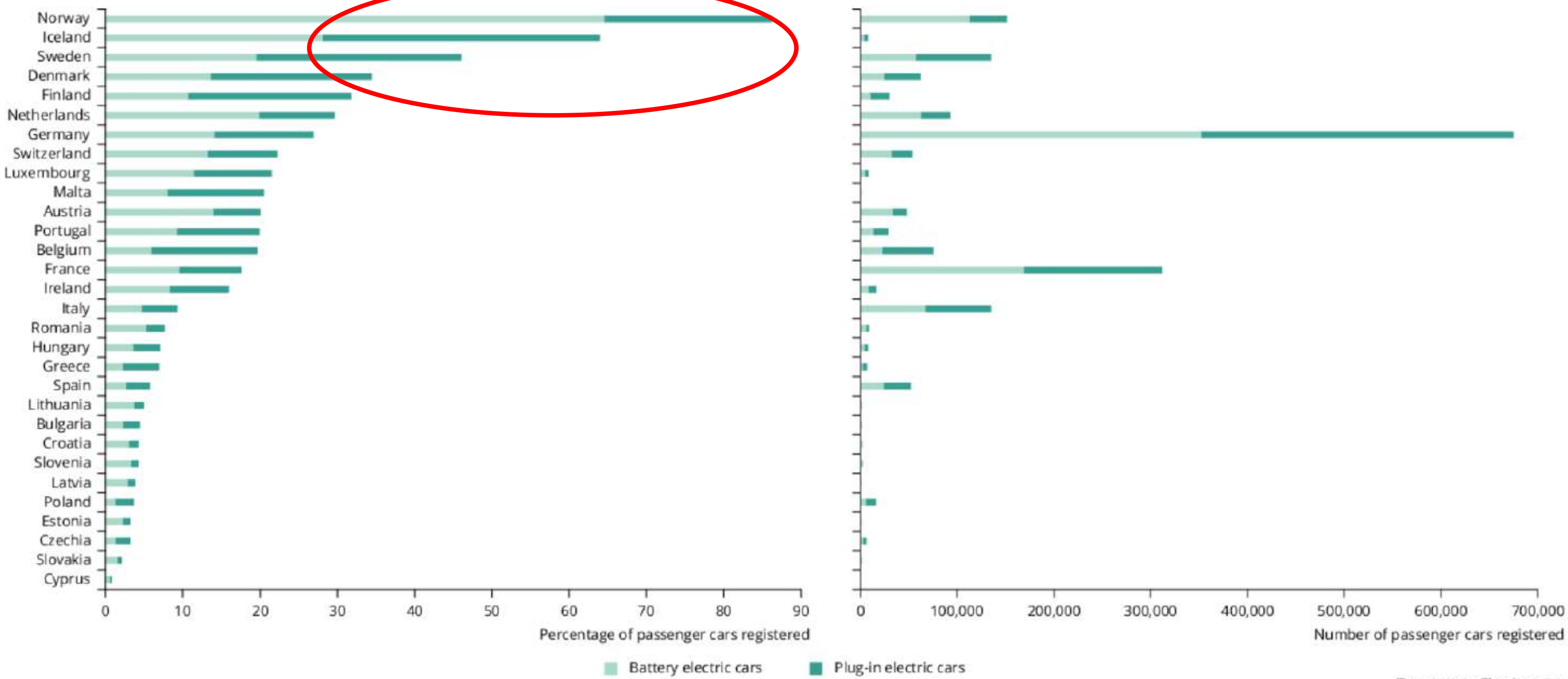
英国では路上で充電できる設備が増えている=ロイター



EVと再生可能エネルギーの拡大は両輪

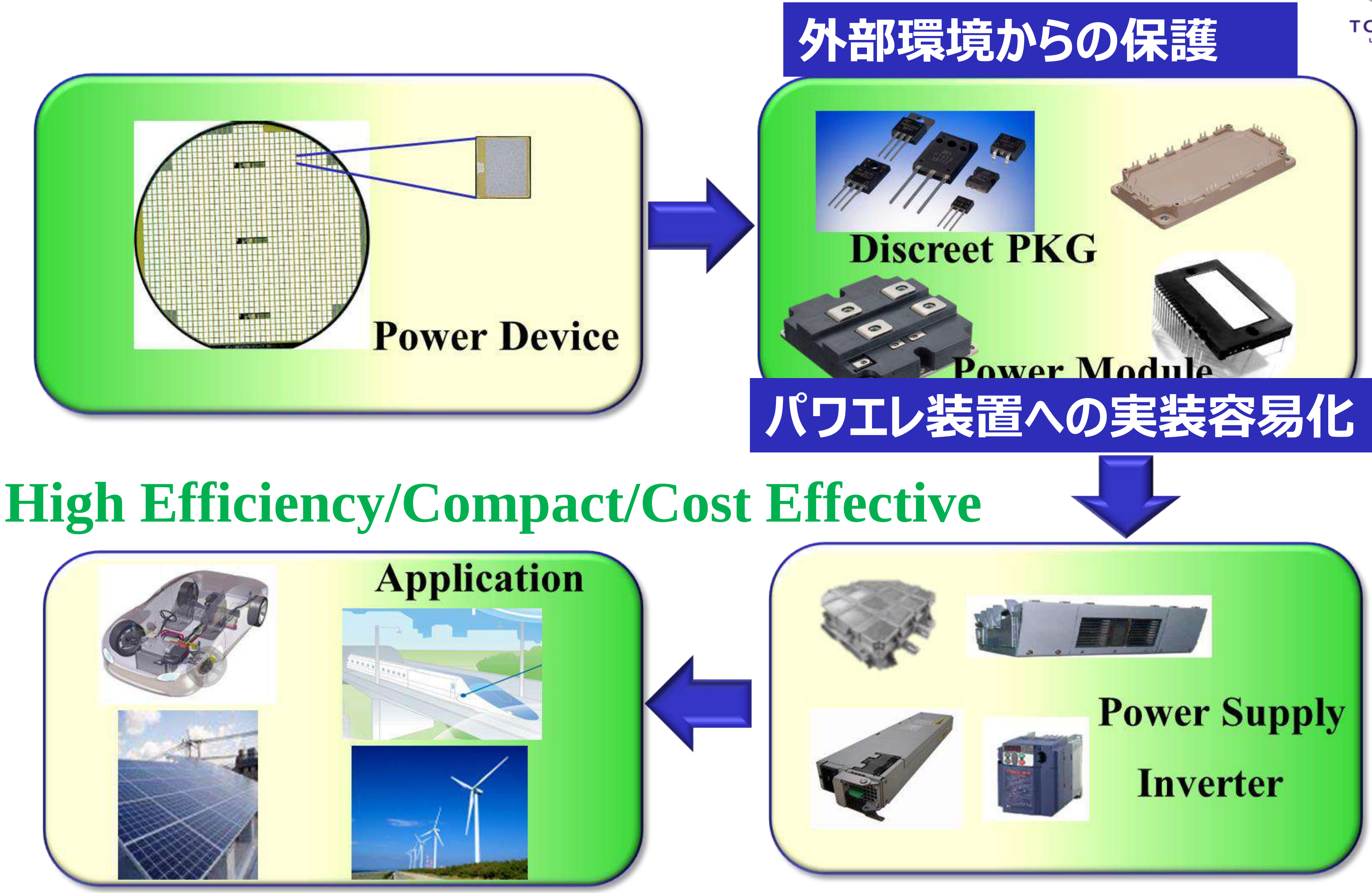
TOHOKU UNIVERSITY

Figure 2. Newly registered electric cars by country



European Environment Agency

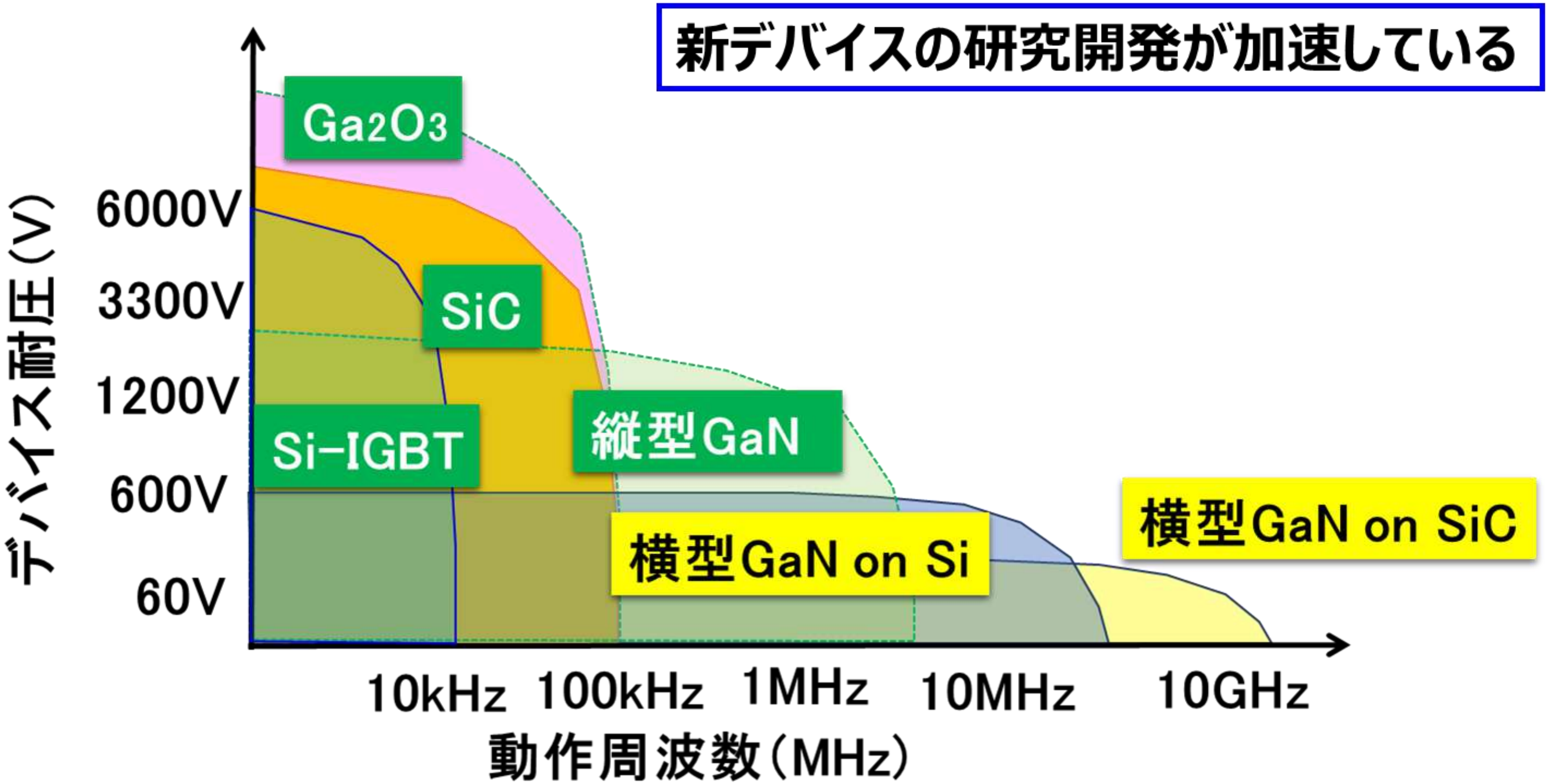
パワーデバイスからパワーモジュール、応用製品まで



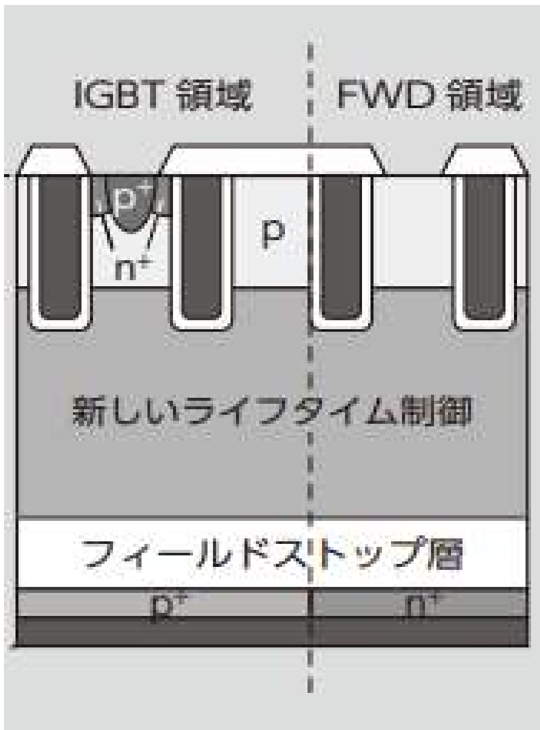
講義内容

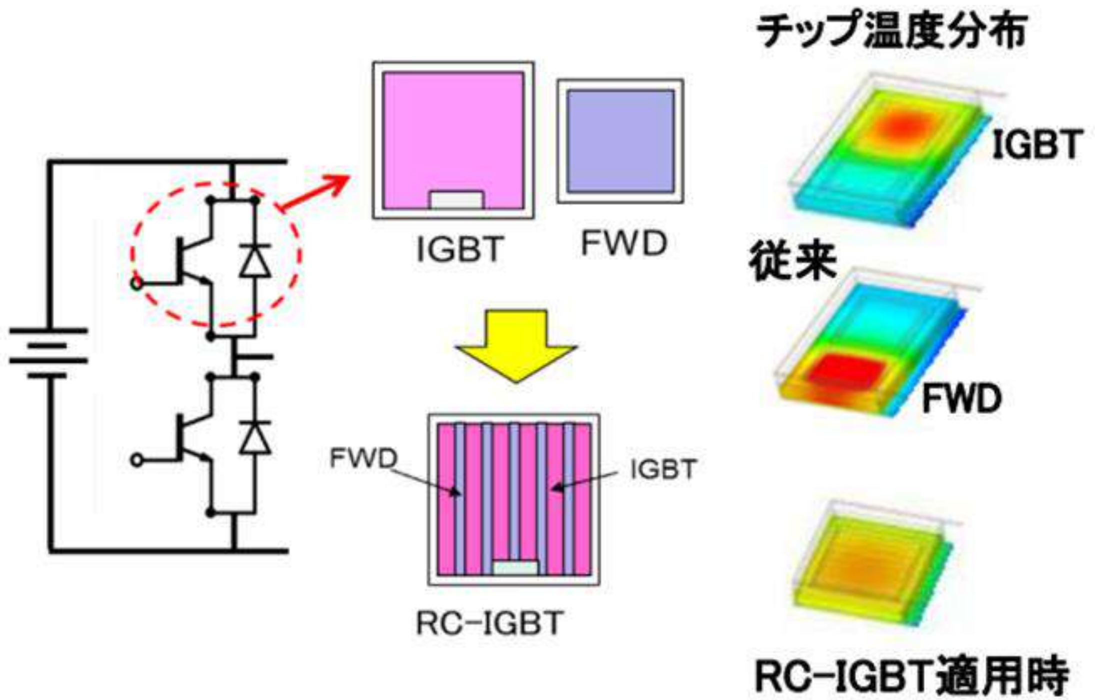
1. はじめに
2. **パワーデバイスの最新状況**
3. EV/HV用インバータ/パワーモジュールの最新状況
4. パワーモジュール技術概要
5. 将来予想とまとめ

各種パワーデバイスの動作周波数と耐圧の関係（概念図）



RC-IGBT（最新Siデバイス）

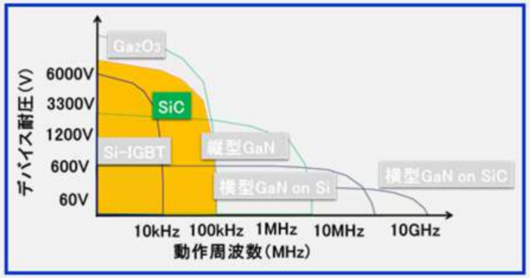


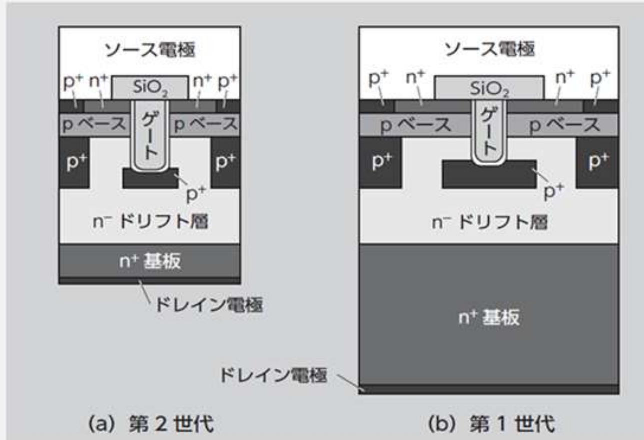


出典 富士電機技報

SiC-MOSFETの特性改善が加速

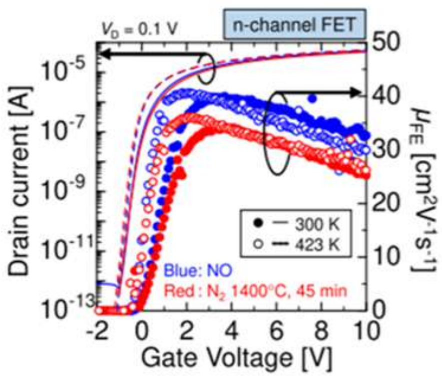
セルピッチの微細化や,基板の薄化,ゲート酸化膜の改善などを進め,20%以上のオン抵抗低減を達成



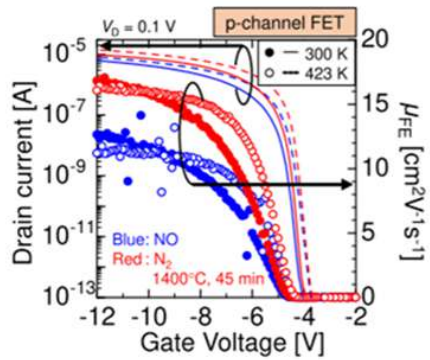


出典：富士電機技報

第2世代（a)と第1世代（b）のSiCトレンチゲートMOSFETの構造



Subthreshold characteristics and field-effect mobility as a function of the gate voltage of fabricated NO- and N_2-annealed n-channel MOSFETs at 300 K and 423 K.



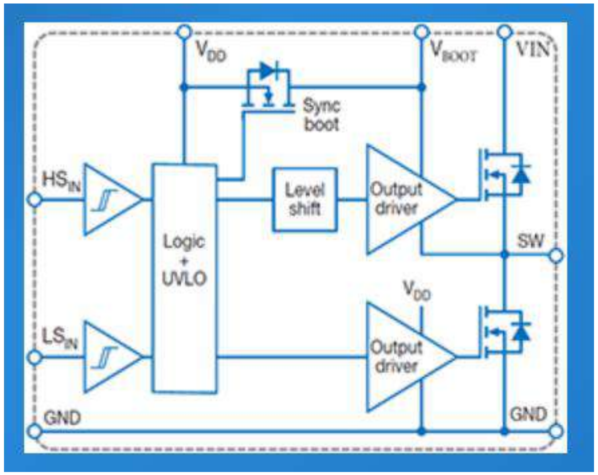
Subthreshold characteristics and field-effect mobility as a function of the gate voltage of fabricated NO- and N_2-annealed p-channel MOSFETs at 300 K and 423 K.

高温N2アニーリングによる
nチャネル、pチャネルの移動度が
大幅に向上

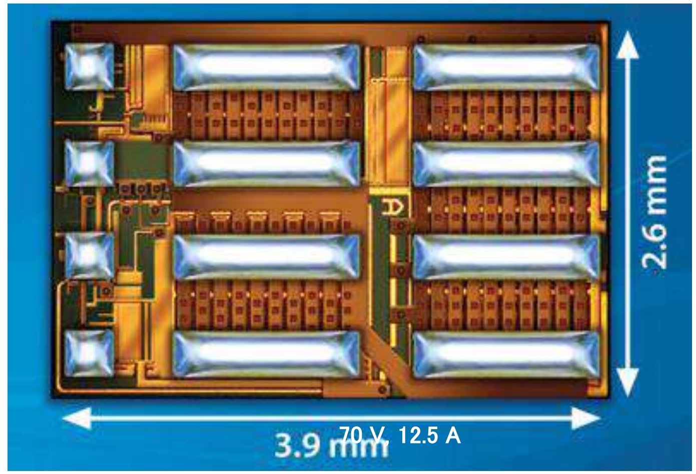
IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 68, NO. 2, FEBRUARY 2021
Improvement of Both n- and p-Channel Mobilities in 4H-SiC MOSFETs by High-Temperature N2 Annealing
Keita Tachiki and Tsunenobu Kimoto

横型GaN FETとGaNドライバICの集積化チップ例

超高速の横型GaNデバイスとゲートドライブICの集積化により
小型かつ高周波駆動を可能にしている。



Functional Block Diagram

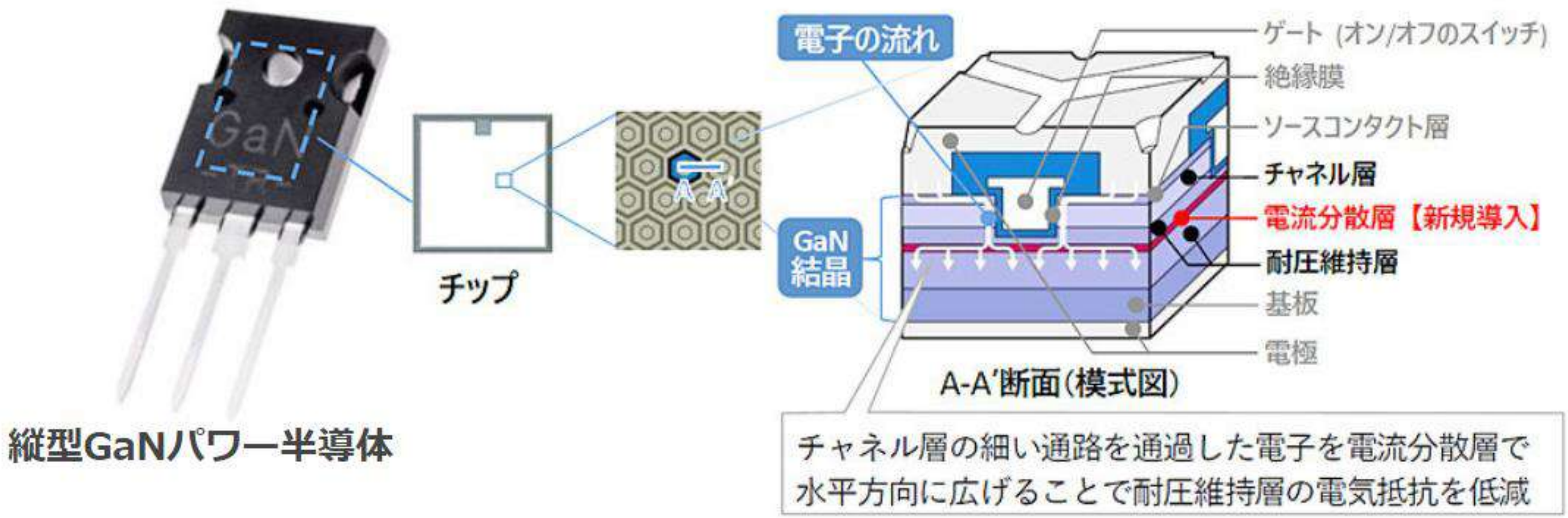


チップ外観

80 V, 12.5 A

出典：EPC HP

縦型GaNの研究開発も大きく進展

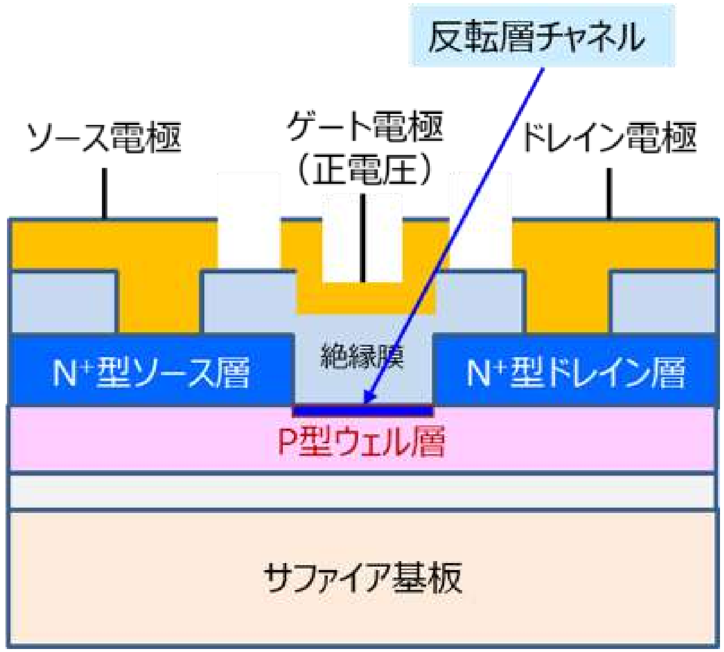


出典：豊田合成HP

チャネル層の細い通路を通過した電子を電流分散層で水平に広げることで耐圧維持層の電気抵抗を低減

p層による反転層チャネルを用いたαGa_2O_3ノーマリオフ型MOSFETの例

TOHOKU UNIVERSITY



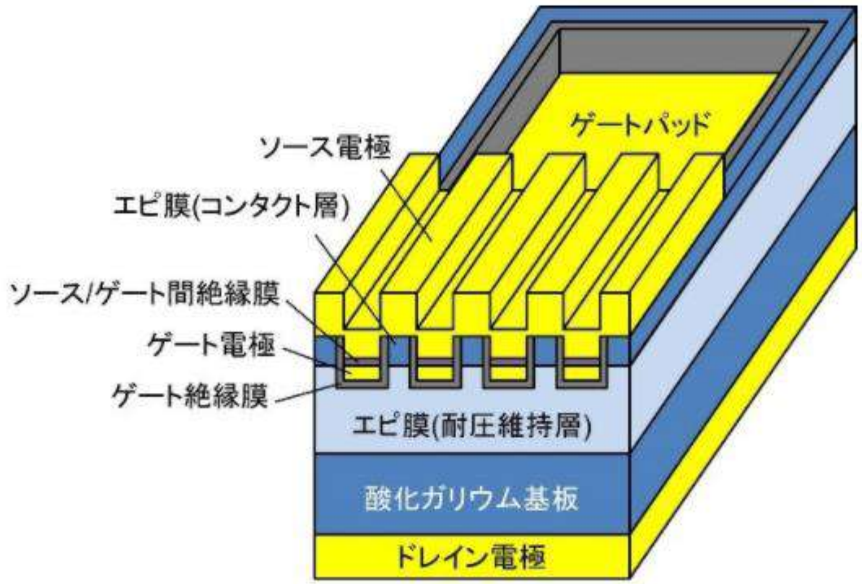
出典：Flosfia HP

αGa_2O_3ノーマリーオフ型MOSFETの断面図

2019年にノーマリオフ動作するパワートランジスタ（MOSFET）において,チャネル移動度72cm2/Vsを実現したことが報告されている（内閣府SIP成果）

βGa_2O_3トレンチMOSFETの例

TOHOKU UNIVERSITY



β Ga_2O_3トレンチMOSFETの断面図

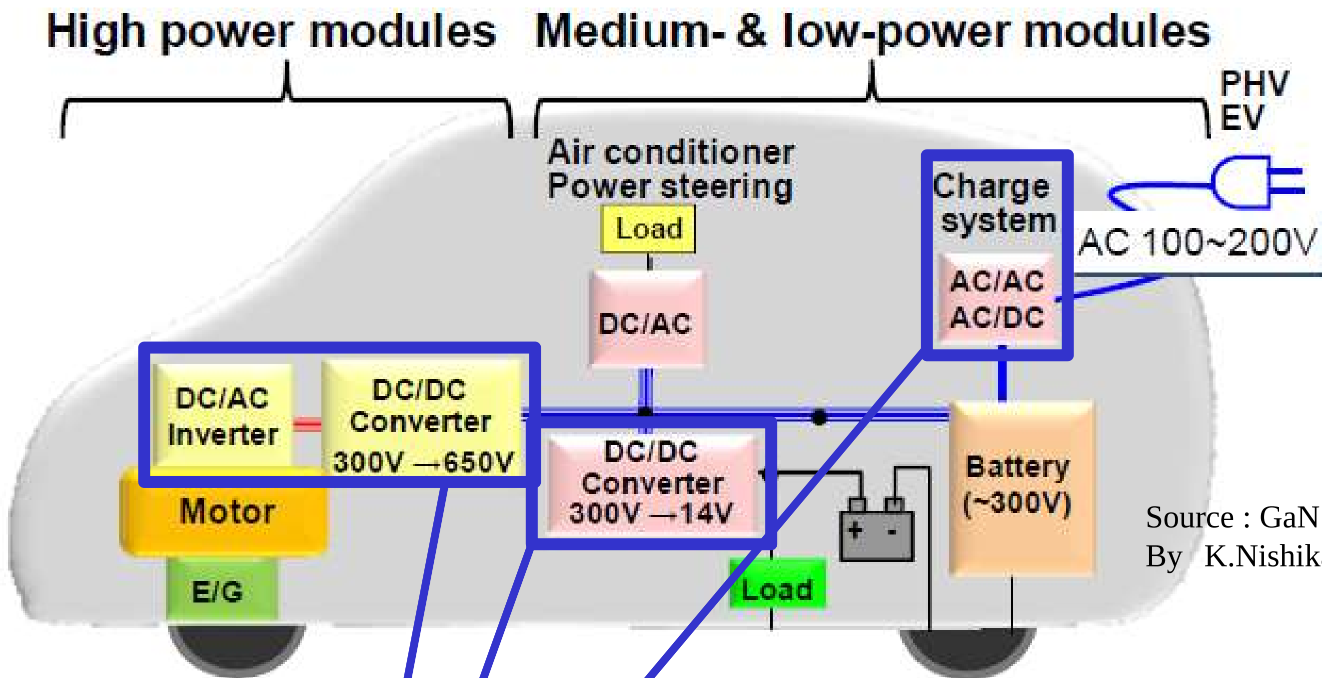
SiCやGaN,α-Ga_2O_3,ダイヤモンドなどの他のワイドバンドギャップ半導体との違いとして,SiやGaAsと同様に融液成長法により製造できる

出典：ノベルクリスタルテクノロジー HP

講義内容

1. はじめに
2. パワーデバイスの最新状況
3. EV/HV用インバータ/パワーモジュールの最新状況
4. パワーモジュール技術概要
5. 将来予想とまとめ

EVのエネルギーフローダイアグラム



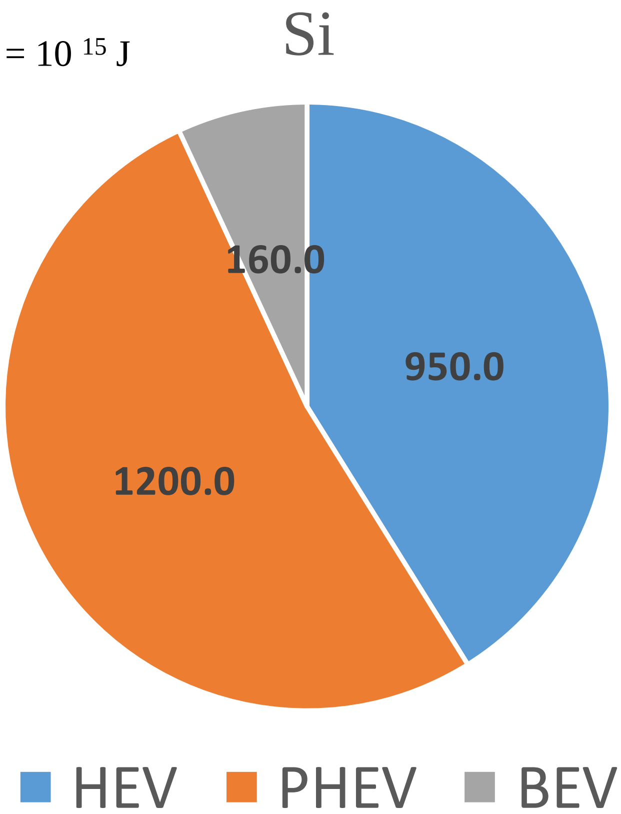
Source : GaN for Automotive Application
By K.Nishikawa

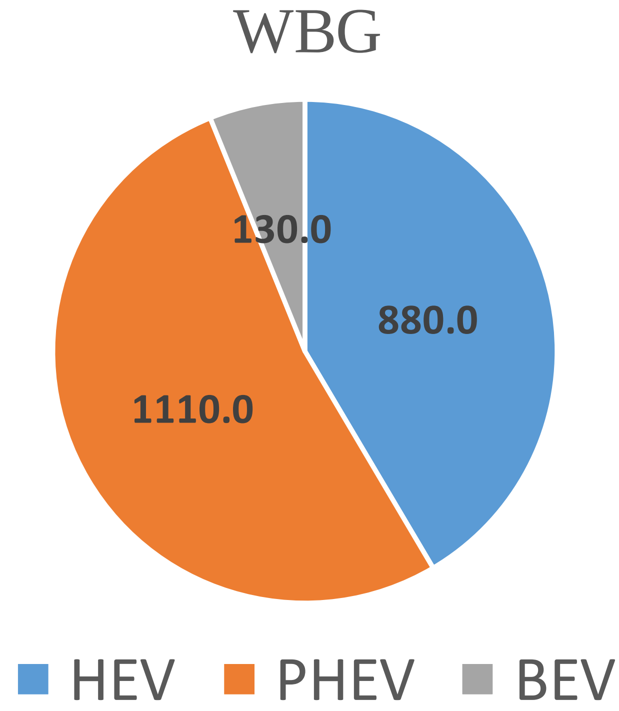
	Si	WBG(Lateral GaN、SiC)
On Board Charger	η : 85 - 93%	η : 94 - 99%
DC-DC Converter	η : 85 - 90%	η : 95 - 96%
Boost Converter, Inverter	η : 83 - 95%	η : 96 - 97%

Based on: K.Armstrong et al.
Wide Bandgap Semiconductor Opportunities in Power Electronics

2025年時点でのエネルギー消費量比較推定（Si, WBG）

1 PJ (petajoule) = 10^{15} J





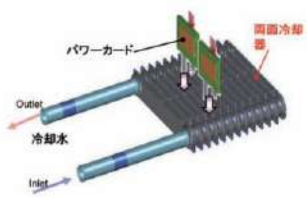
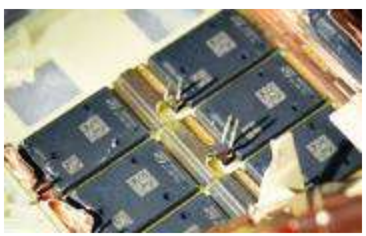
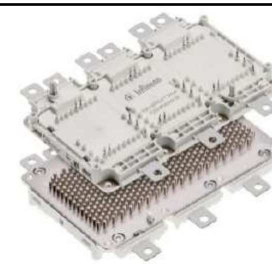
Total 2310(PJ/year) → Total 2120(PJ/year)

Based on: K.Armstrong et al.
Wide Bandgap Semiconductor Opportunities
in Power Electronics

Reduction 190(PJ/year)

EV/HEV用パワーモジュールの各種形態（冷却方式別）

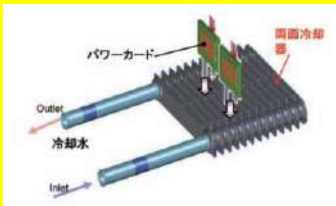
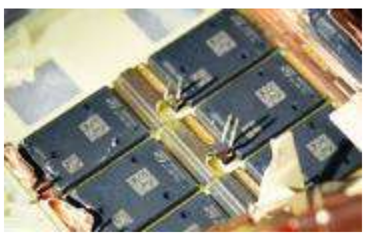
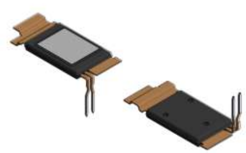
Cooling method of power module for EV

	Indirect	Direct
Double side	 ※DENSO Technical Review  ※DENSO Web page **Double Side Indirect Cooling Power module**	 ※Hitachi Web page **Double Side Direct Cooling Power module**
Single side	 ※xtech.nikkei.com  ※STmicro Datasheet **Single Side Indirect Cooling Power module**	 ※Infineon Datasheet **Single Side Direct Cooling Power module**

EV/HEV用パワーモジュールの各種形態（冷却方式別）

TOHOKU UNIVERSITY

Cooling method of power module for EV

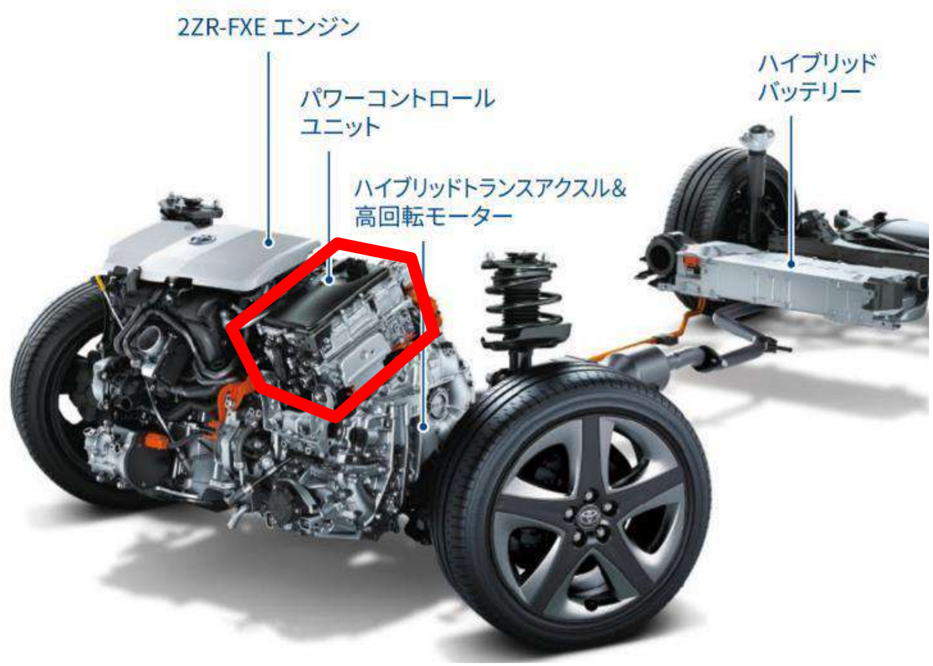
	Indirect	Direct
Double side	 ※DENSO Technical Review  ※DENSO Web page **Double Side Indirect Cooling Power module**	 ※Hitachi Web page **Double Side Direct Cooling Power module**
Single side	 ※xtech.nikkei.com  ※STmicro Datasheet **Single Side Indirect Cooling Power module**	 ※Infineon Datasheet **Single Side Direct Cooling Power module**

EV/HEV インバータ

駆動用バッテリー
種類：リチウムイオン電池
総電圧:207.2V
容量:3.6Ah

フロントモータ
型式:1NM
種類:交流同期電動機
最高出力:53kW(72PS)
最高トルク:163N·m(16.6kgf·m)

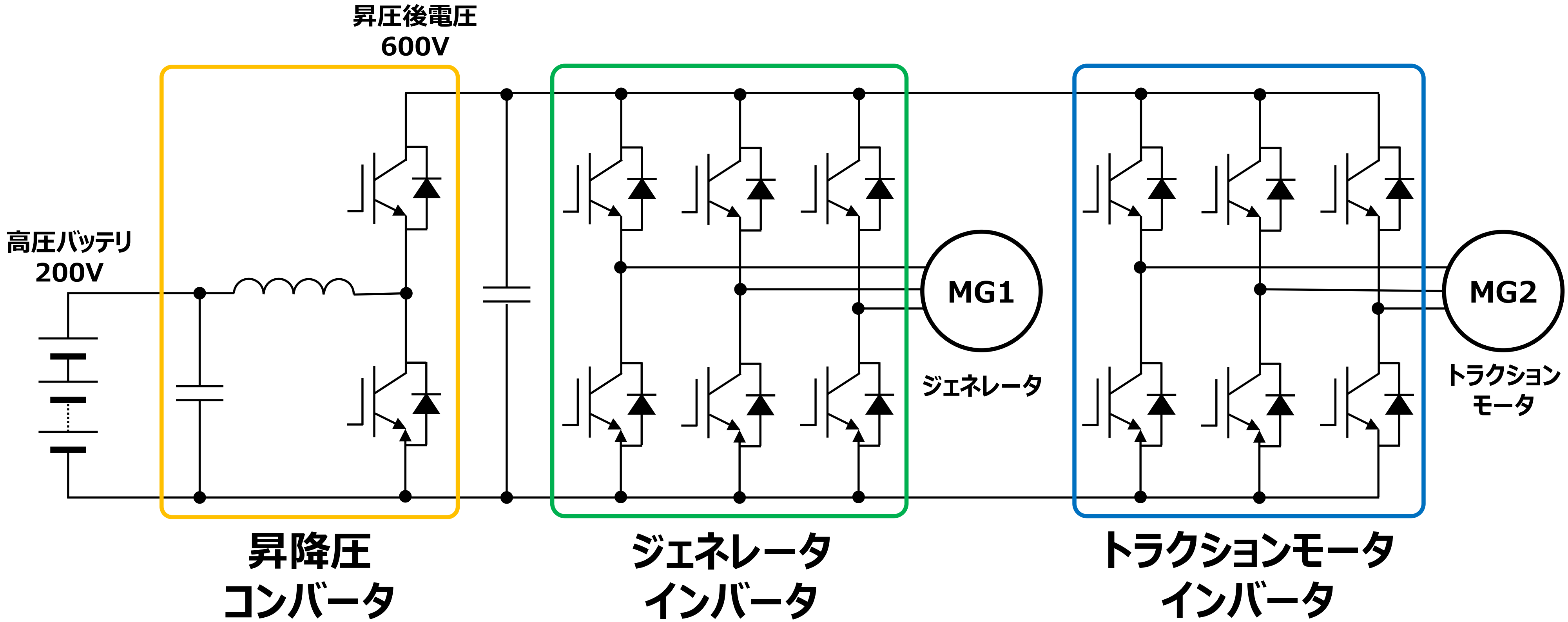
エンジン
型式:2ZR-FXE
総排気量:1.797L
最高出力:72kW(98PS)/5200rpm
最大トルク:142N·m(14.5kgf·m)/3600rpm



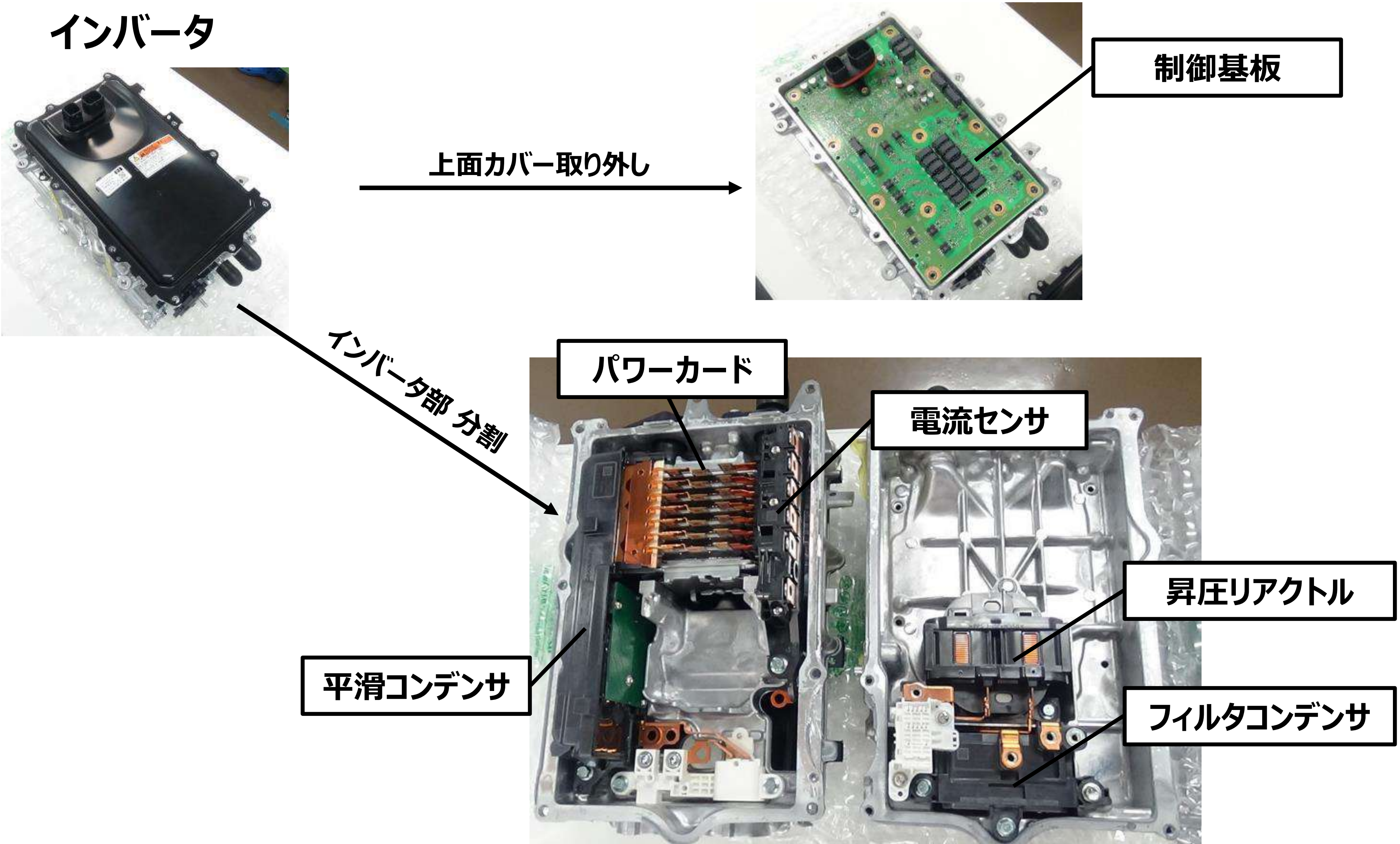
出典:トヨタ自動車 Webカタログ

EV/HEV インバータ

インバータ主回路 回路図



EV/HEV インバータ

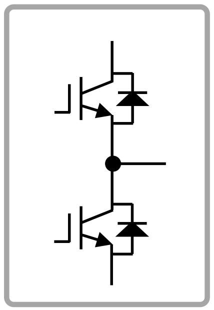


インバータ
上面カバー取り外し
制御基板
インバータ部 分割
パワーカード
電流センサ
昇圧リアクトル
平滑コンデンサ
フィルタコンデンサ

EV/HEV インバータ

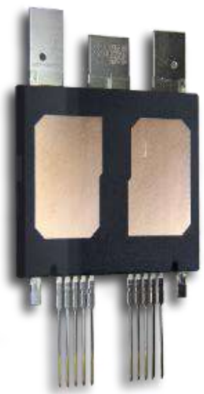
IGBT

両面冷却が可能なパワーカードを採用している



ハーフブリッジ回路

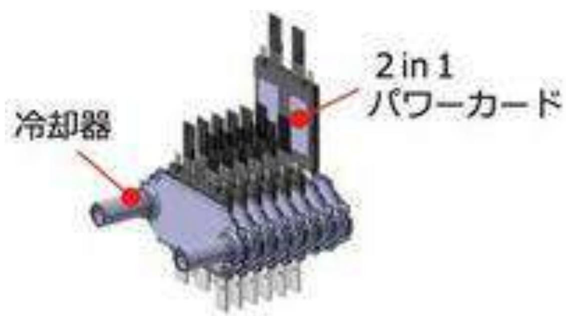
・2in1パワーカード化
・エミッタセンス付加
・測温ダイオード付加

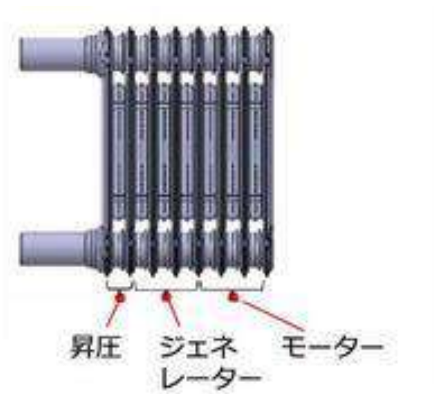


パワーカード

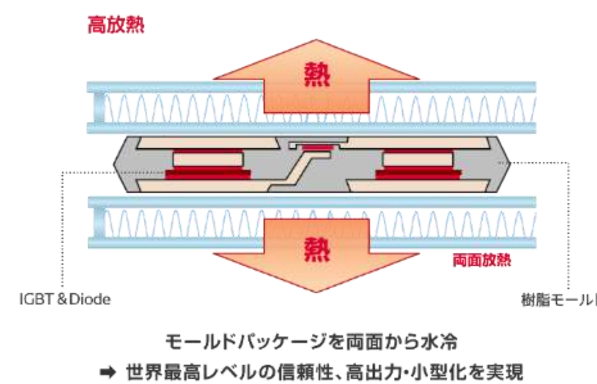
パワーカードと冷却器を積層
昇圧コンバータ ×1枚
ジェネレータ ×3枚
トラクション ×3枚
合計:7枚

インバータ





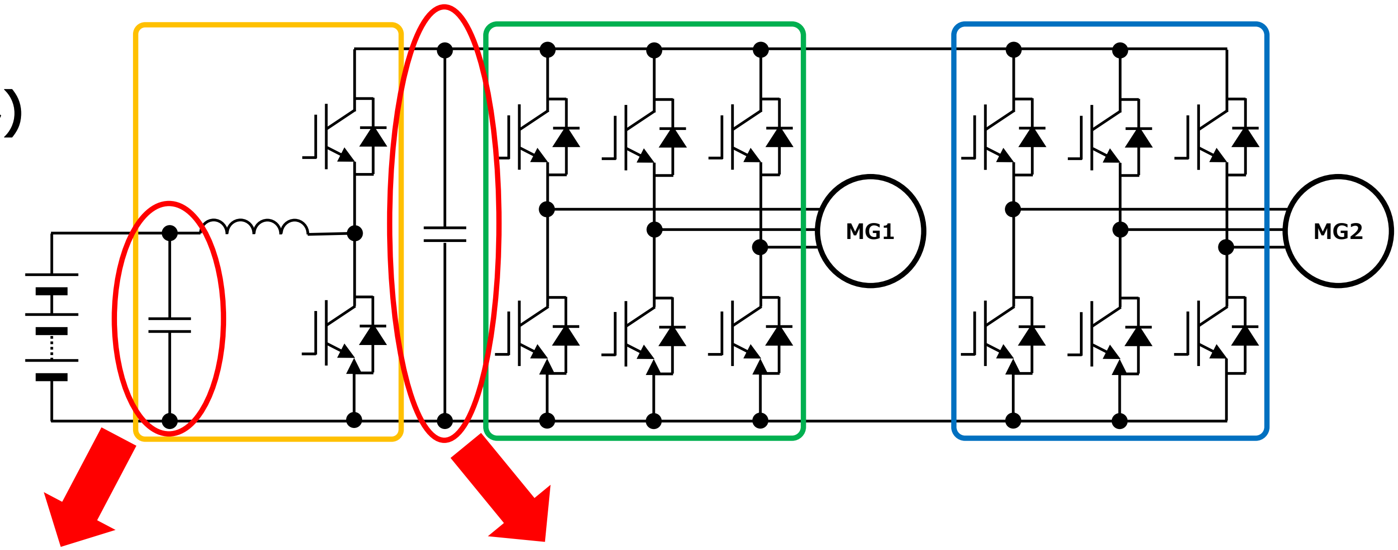
トヨタ広報資料



デンソー岩手Webページ

EV/HEV インバータ

受動部品（平滑コンデンサ
昇圧リアクトル）



Film Capacitor

定格電圧:450V(推定)
容量:312uF(実測値)

サイズ:80×70×45mm
※突起部,バスバー,取り付け穴含まず
体積:0.25L

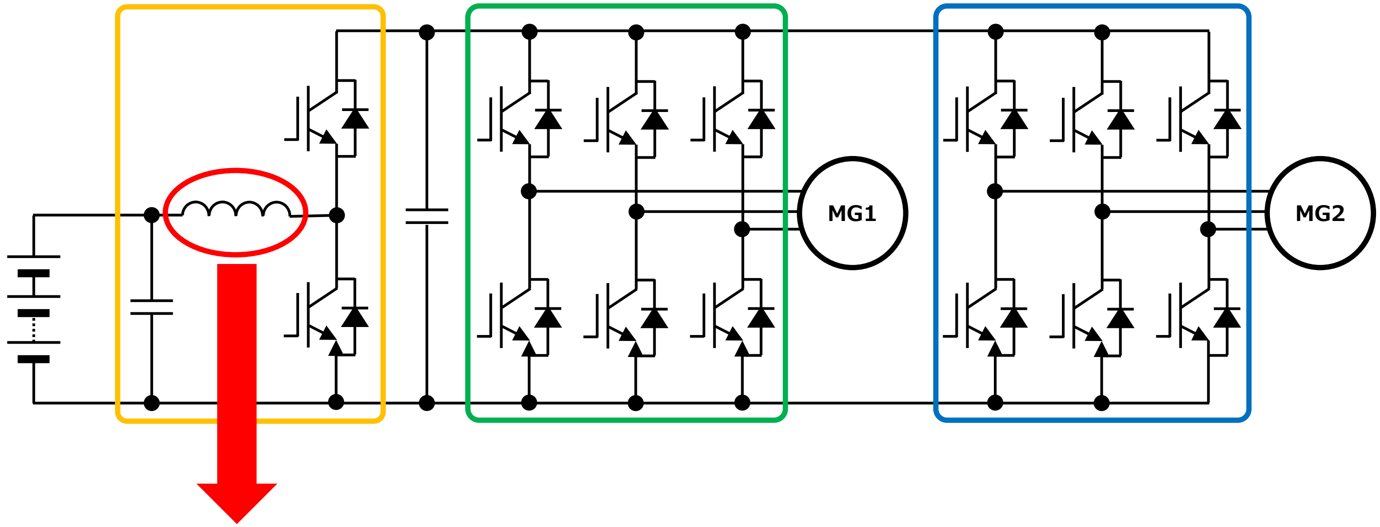
Film Capacitor

定格電圧:750V(推定)
容量:470uF(実測値)

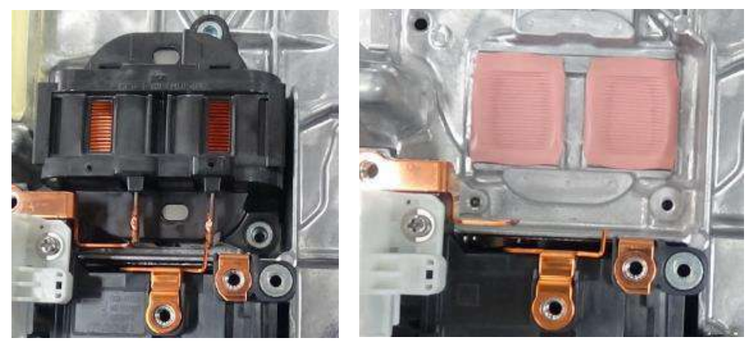
サイズ:205×70×30mm
※突起部,バスバー,取り付け穴含まず
体積:0.43L

EV/HEV インバータ

昇圧リアクトル



サイズ:90×80×60mm
※突起部,バスバー,取り付け穴含まず
体積:0.43L

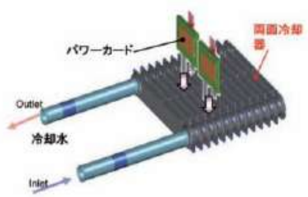
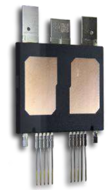
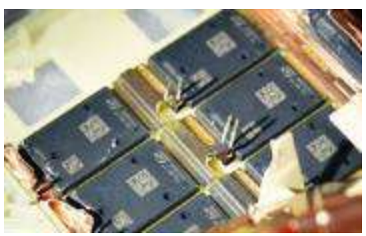


筐体接触部にTIM配置

EV/HEV用パワーモジュールの各種形態（冷却方式別）

TOHOKU UNIVERSITY

Cooling method of power module for EV

	Indirect	Direct
Double side	  ※DENSO Technical Review ※DENSO Web page **Double Side Indirect Cooling Power module**	 ※Hitachi Web page **Double Side Direct Cooling Power module**
Single side	  ※xtech.nikkei.com ※STmicro Datasheet **Single Side Indirect Cooling Power module**	 ※Infineon Datasheet **Single Side Direct Cooling Power module**

EV/HEV インバータ

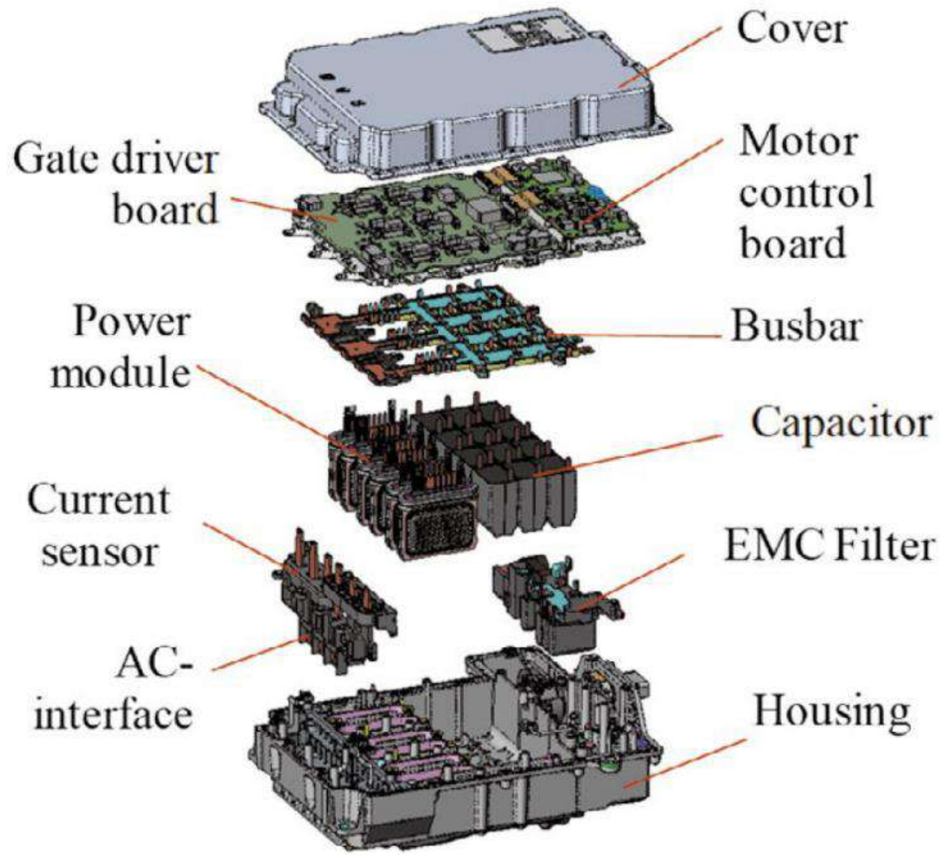
■外観

インバータスペック

■主要諸元

相電流	短時間(2秒間):670Arms 連続:380Arms
体積	7.4L
重量	10.5kg
システム電圧	450 ~ 850V
出力密度	94.3kVA/L

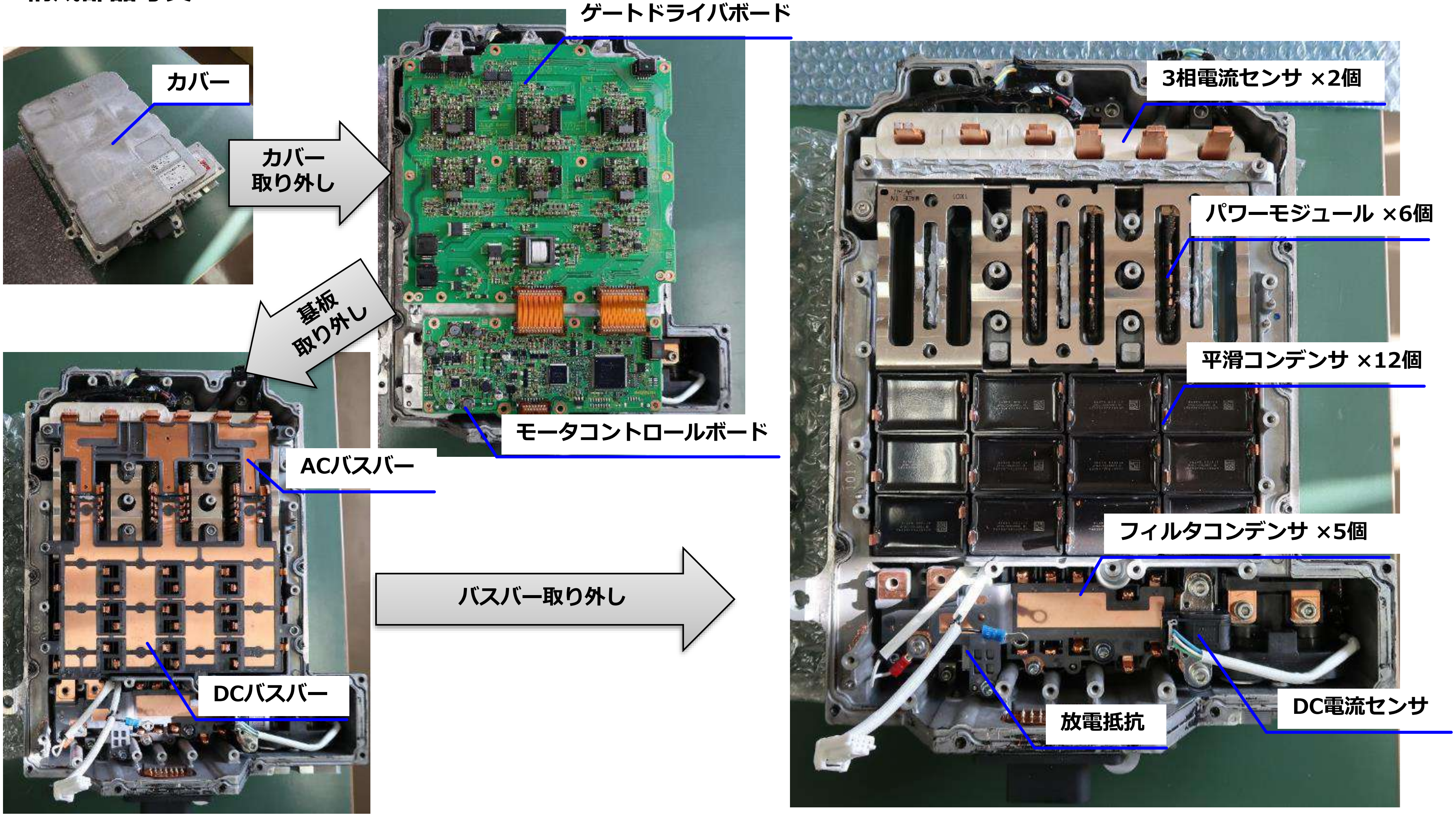
■構成部品



※自動車技術会論文 Vol.51,No.6,Novemver 2020. より抜粋

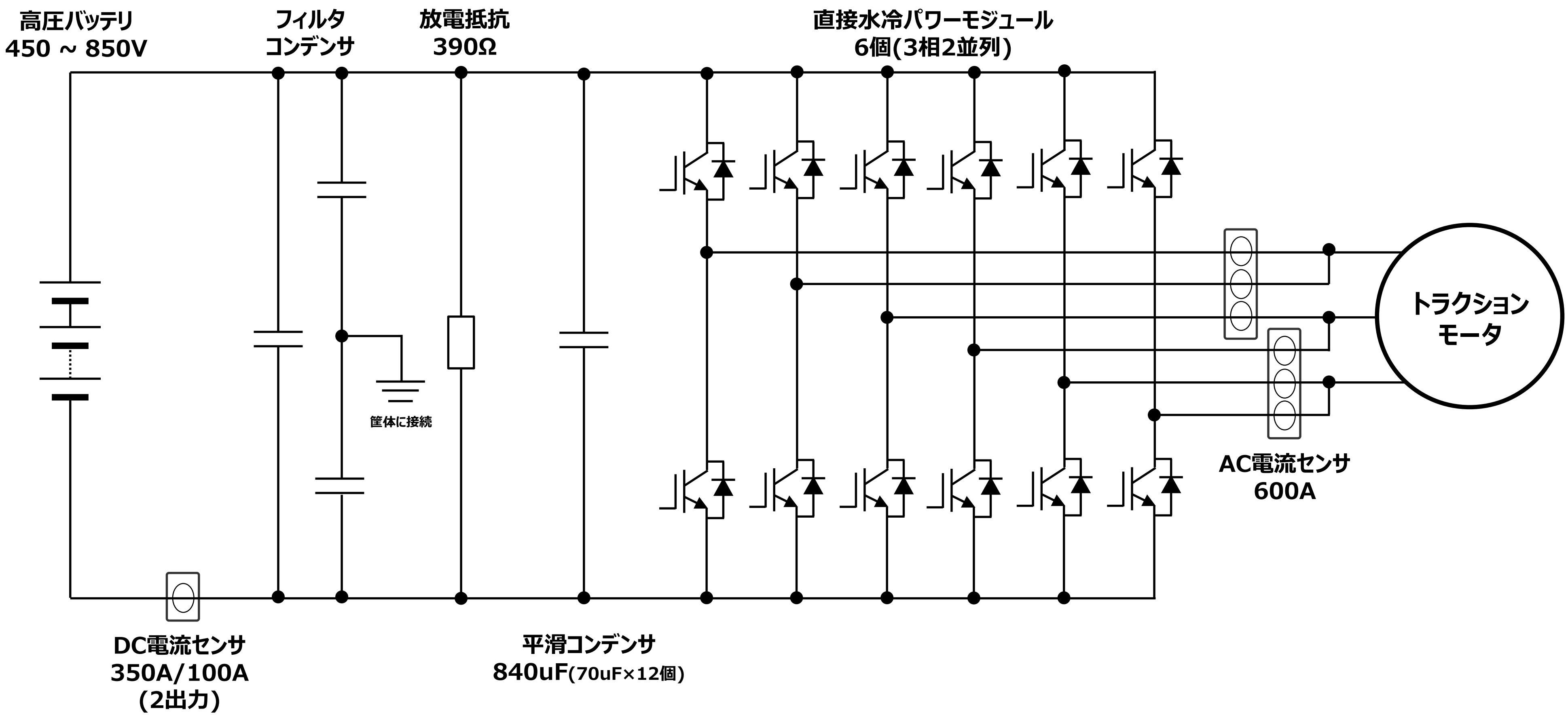
EV/HEV インバータ

■構成部品写真



EV/HEV インバータ

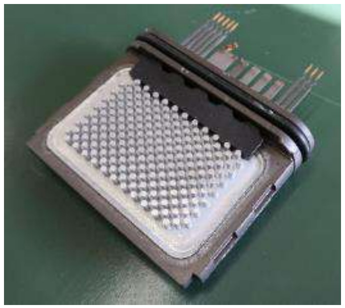
■主回路図



EV/HEV インバータ

■パワーモジュール概要

両面直接水冷パワーモジュールを採用
モジュラーコンセプトにより共通部品の組み合わせで２種類の出力のインバータを構築可能としている。



パワーモジュール外観

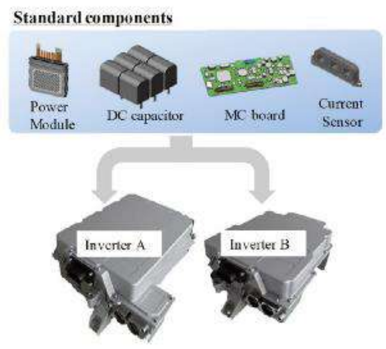
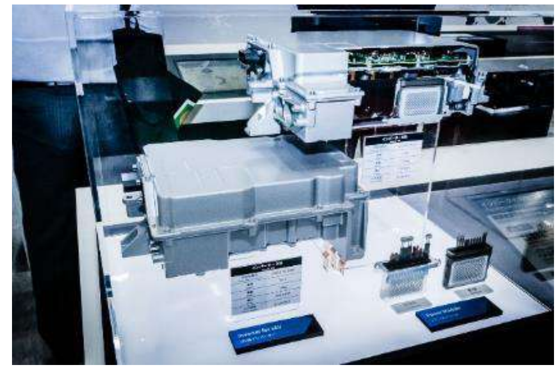


Fig. 2 Standard components and modular concept



※clicccar.com Webニュース

両面直接水冷とすることで、片面間接水冷モジュールに対して熱抵抗の50%減を達成(Table1)
絶縁部に中間導体を設けることで熱抵抗を増加させることなく、高耐圧化を実現している(Table2)

Table 1. Comparison table of cooling method in power module

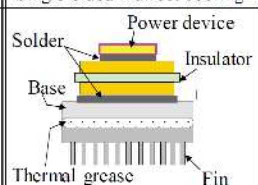
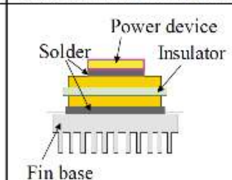
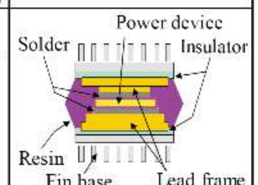
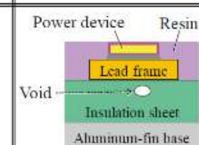
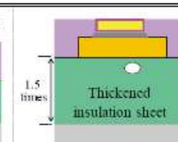
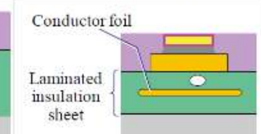
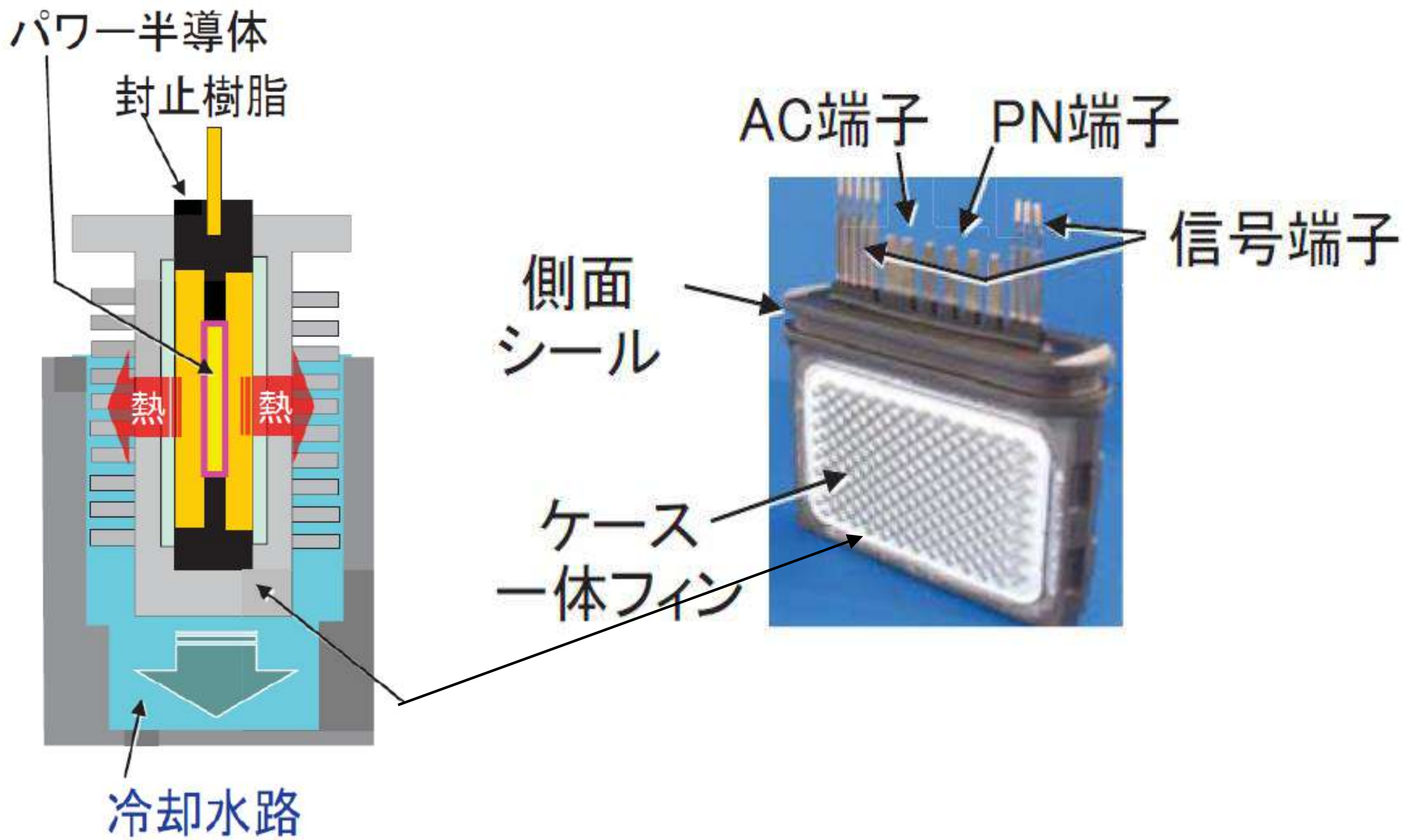
	Conventional		Double sided direct cooling
	Single-sided indirect cooling	Single sided direct cooling	
Sectional images of power module			
Thermal resistance	100%	75%	50%

Table 2. Comparison table of insulation sheets for power module

	Conventional insulation sheet		Conductor laminated insulation sheet
Structure			
Partial discharge voltage (a.u.)	×：(0.8)	○：(1.0)	○：(1.2)
Thermal resistance (a.u.)	○：(1.0)	×：(1.2)	○：(1.0)
Remarks	Battery voltage：400V Device voltage：700V	Battery voltage：800V Device voltage：1200V	

※自動車技術会論文 Vol.51,No.6,Novemver 2020. より抜粋

Si-IGBTによる両面直接水冷モジュールの例



出典：日立製作所,
カーエレクトロニクス研究会　2020年度第１回公開研究会資料集

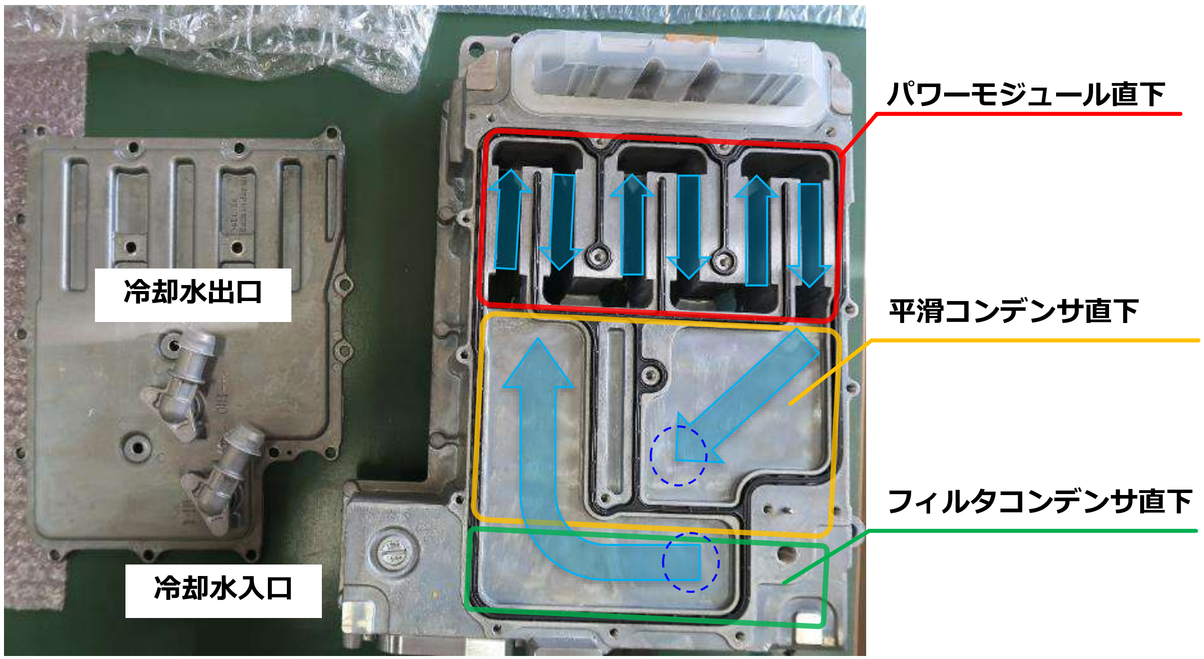
EV/HEV インバータ

水冷系統

■冷却系統概要

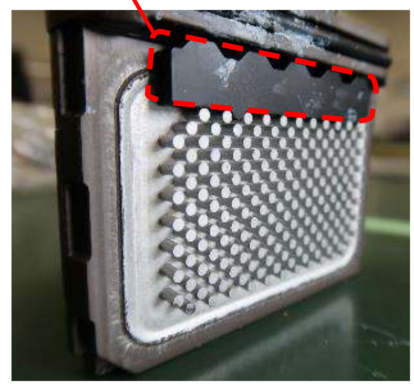
筐体下面から流入した冷却水は ①フィルタコンデンサ直下 → ②平滑コンデンサ左半分直下 →
③パワーモジュール(すべて直列) → ④平滑コンデンサ右半分直下を通り筐体下面から流出する構造となっている。

通常、冷却水要件は流量:10L/min、許容圧力損失:10kPaを求められることが多いが、本インバータはピンフィン部や水路曲げ部の多さから通常より流量を多く設定している、または許容圧力損失を高く設定している可能性がある。



冷却系統概要図

パワーモジュール上部空間への水の流入を阻止し、ピンフィン部のみに冷却水が当たるように追加部品を取り付けている。

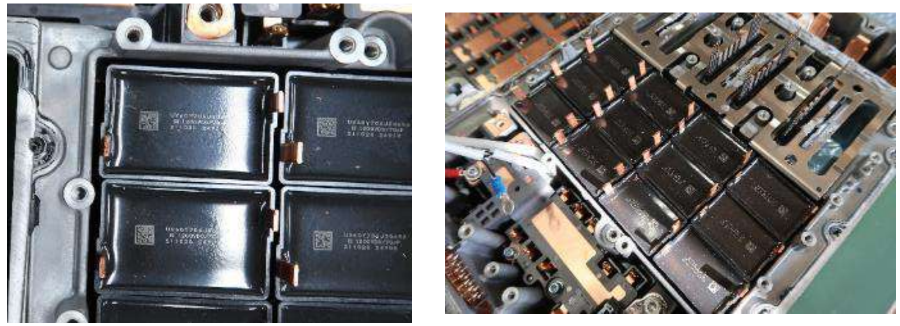


パワーモジュール外観

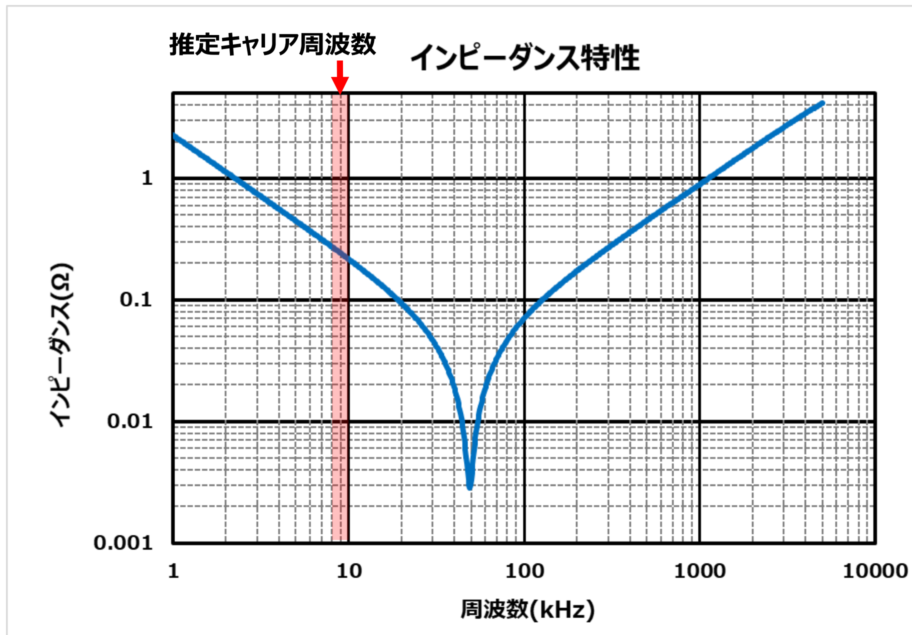
EV/HEV インバータ

コンデンサ詳細

種類	フィルムコンデンサ
定格電圧	1200V
静電容量	70uF
ESR	2.17mΩ @10kHz
サイズ	46×47×30mm
体積	0.06L
エネルギー密度	1.21Wh/L ※



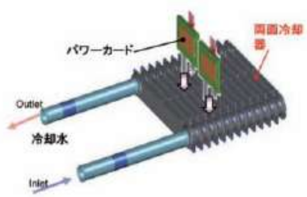
平滑コンデンサ外観



※エネルギー密度はバスバーなども含んだ体積を基にしているため、参考値となります

EV/HEV用パワーモジュールの各種形態（冷却方式別）

Cooling method of power module for EV

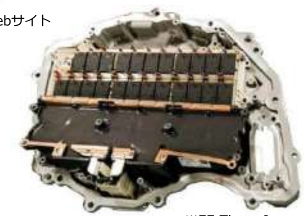
	Indirect	Direct
Double side	  ※DENSO Technical Review ※DENSO Web page **Double Side Indirect Cooling Power module**	 ※Hitachi Web page **Double Side Direct Cooling Power module**
Single side	  ※xtech.nikkei.com ※STmicro Datasheet **Single Side Indirect Cooling Power module**	 ※Infineon Datasheet **Single Side Direct Cooling Power module**

片面間接水冷モジュールの例

※STmicro Datasheet

最大ドレイン-ソース電圧:750V
最大ドレイン電流(連続):300A
最大オン抵抗:8.8mΩ

※Tesla Webサイト



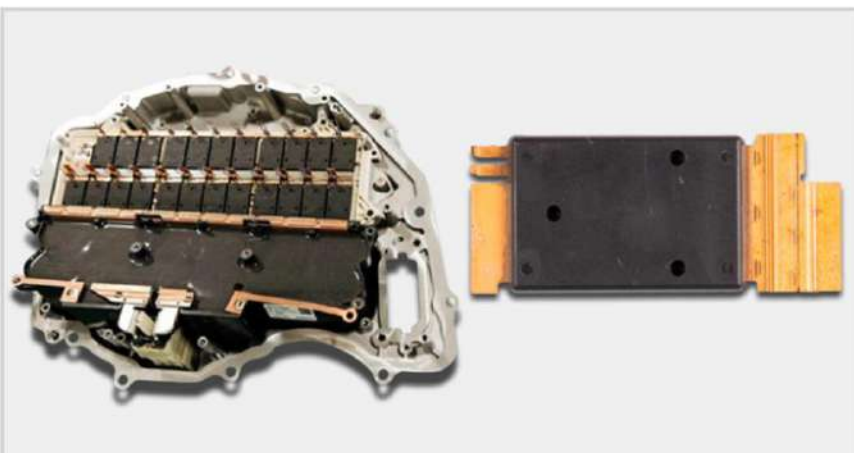
※EE Times Japan

駆動用インバータに搭載

※Tuwitter @YamamotoPENU

※日経クロステック

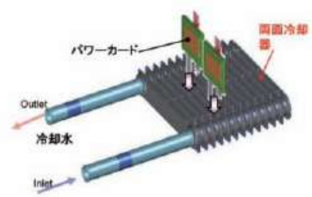
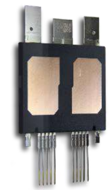
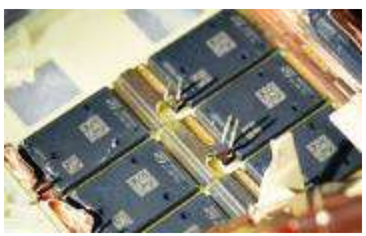
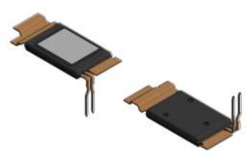
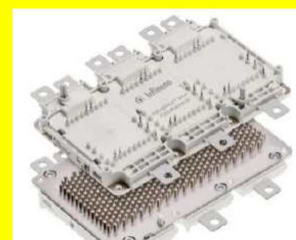
熱伝導材を介して筐体に伝熱



出典：https://www.pntpower.com

EV/HEV用パワーモジュールの各種形態（冷却方式別）

Cooling method of power module for EV

	Indirect	Direct
Double side	  ※DENSO Technical Review ※DENSO Web page **Double Side Indirect Cooling Power module**	 ※Hitachi Web page **Double Side Direct Cooling Power module**
Single side	  ※xtech.nikkei.com ※STmicro Datasheet **Single Side Indirect Cooling Power module**	 ※Infineon Datasheet **Single Side Direct Cooling Power module**

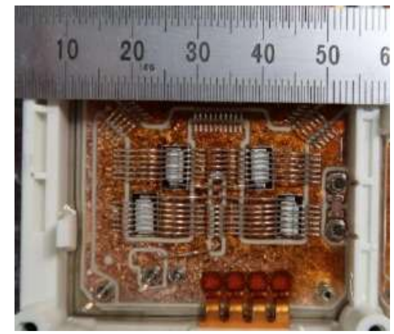
片面直接水冷モジュールの例

※Infineon Datasheet

最大ドレイン-ソース電圧:1200V
最大ドレイン電流(連続):200A
最大オン抵抗(125℃):8.00mΩ

※Hyundai Webサイト

駆動用インバータに搭載



SiC-MOSFETを使用し低オン抵抗、
高速スイッチングを実現している。

(冷却フィン側より)

※三菱電機

最大ドレイン-ソース電圧:650V
最大ドレイン電流:700A
Vce飽和電圧:1.4V

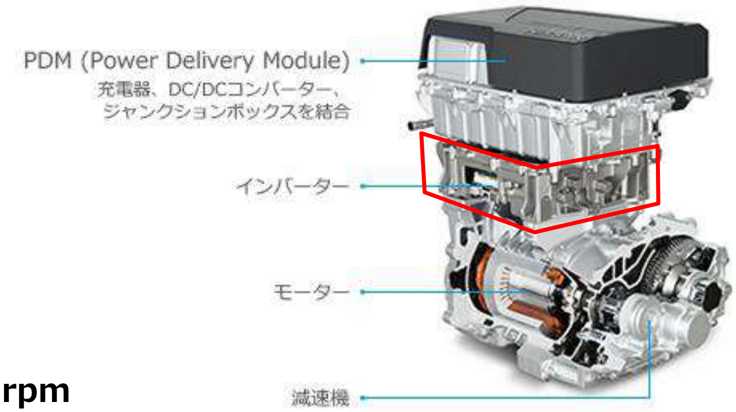
※Nissan Webサイト

駆動用インバータに搭載

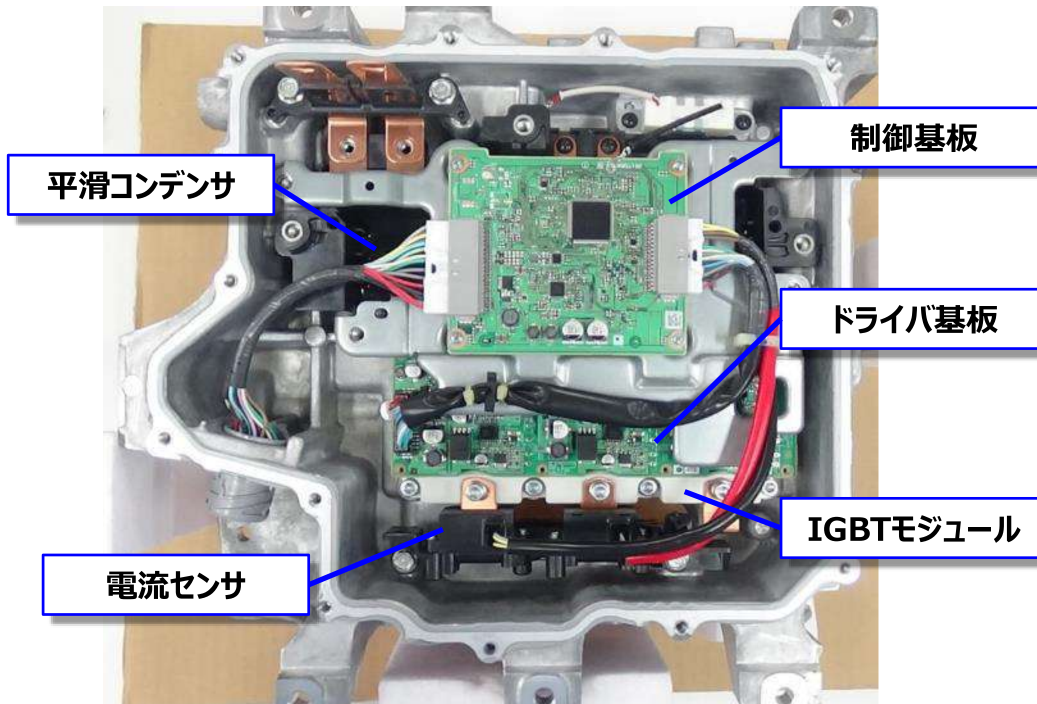
EV/HEV インバータ

駆動用バッテリー
- **種類:リチウムイオン電池**
- **総電圧:350V**
- **総電力量:40kWh**

原動機
- **型式:EM57**
- **種類:交流同期電動機**
- **定格出力:85kW**
- **最高出力:110kW(150PS)/3283~9795rpm**
- **最高トルク:320N·m(32.6kgf·m)/0~3283rpm**



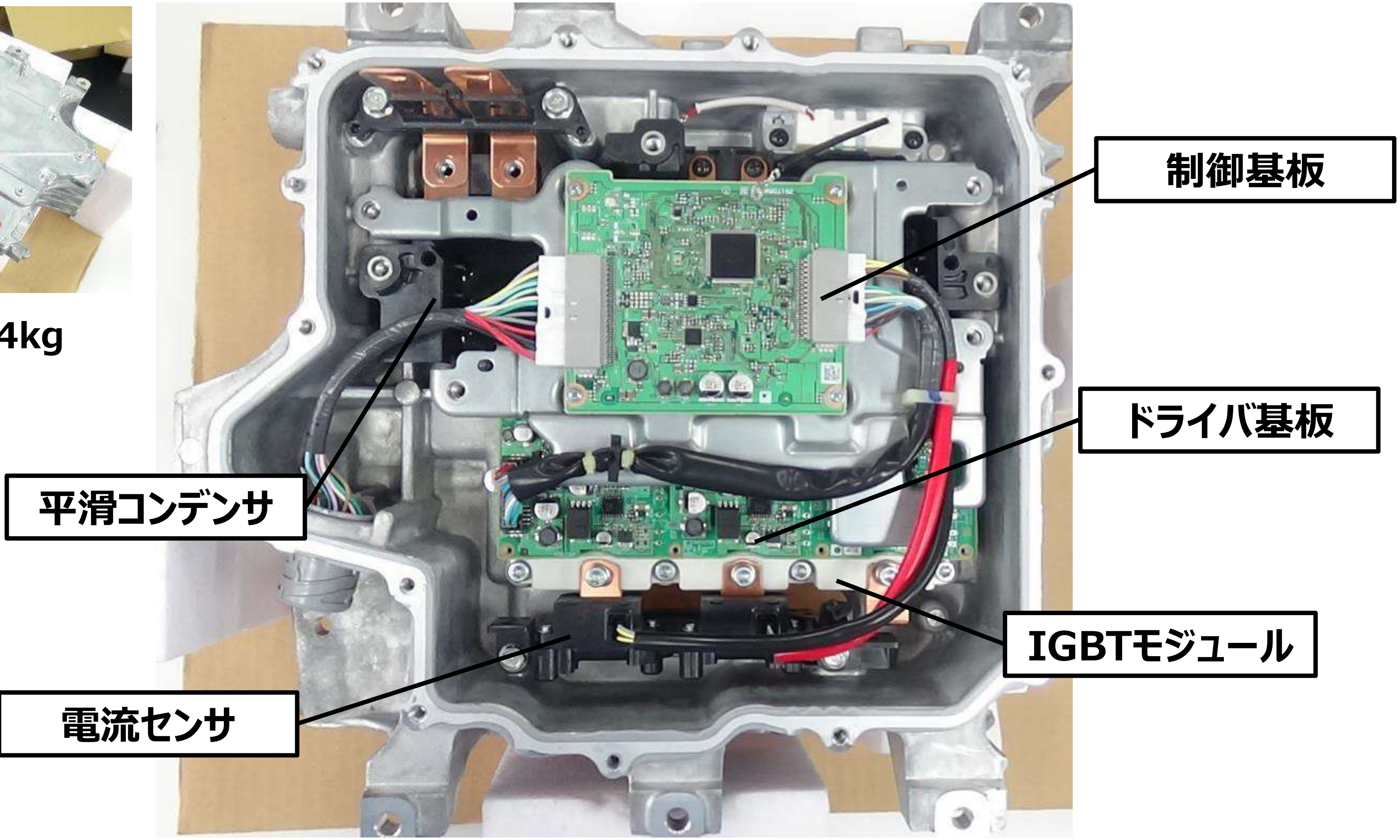
インバータ外観写真



インバータ内部写真

EV/HEV インバータ

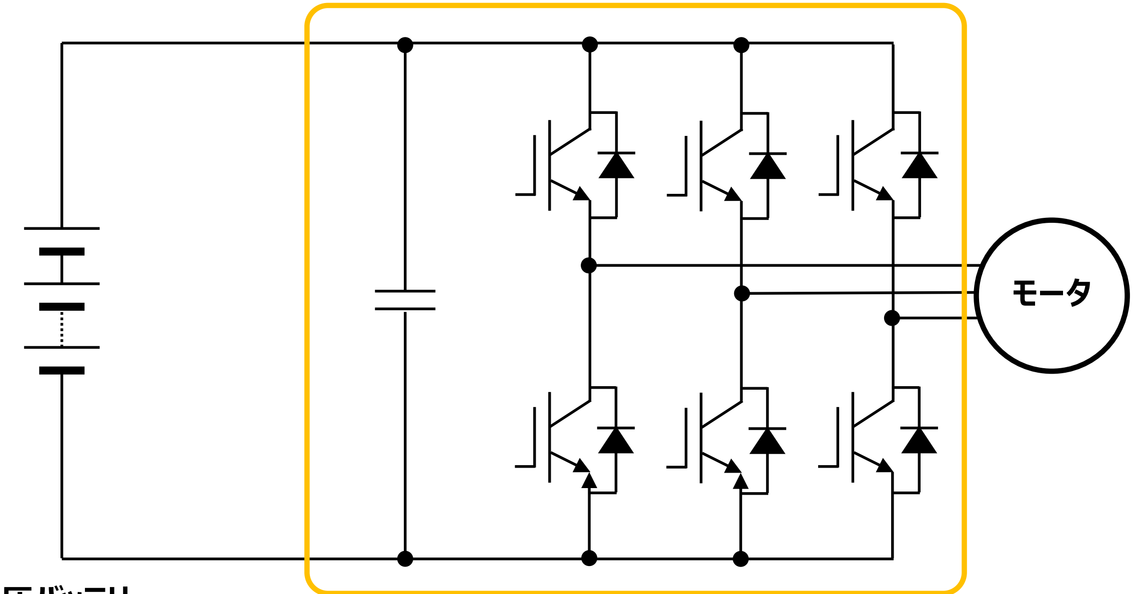
重量:11.4kg
体積:9L



ケースカバー取り外し後

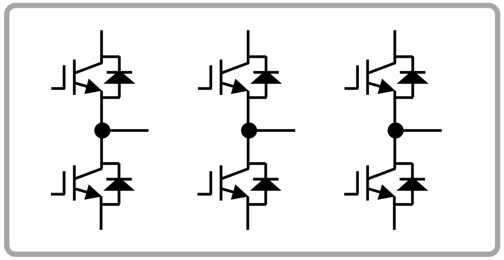
EV/HEV インバータ

インバータ主回路 回路図



高圧バッテリ
350V

トラクションモータインバータ



3相ブリッジ回路

・6in1モジュール化
・サーミスタ付加

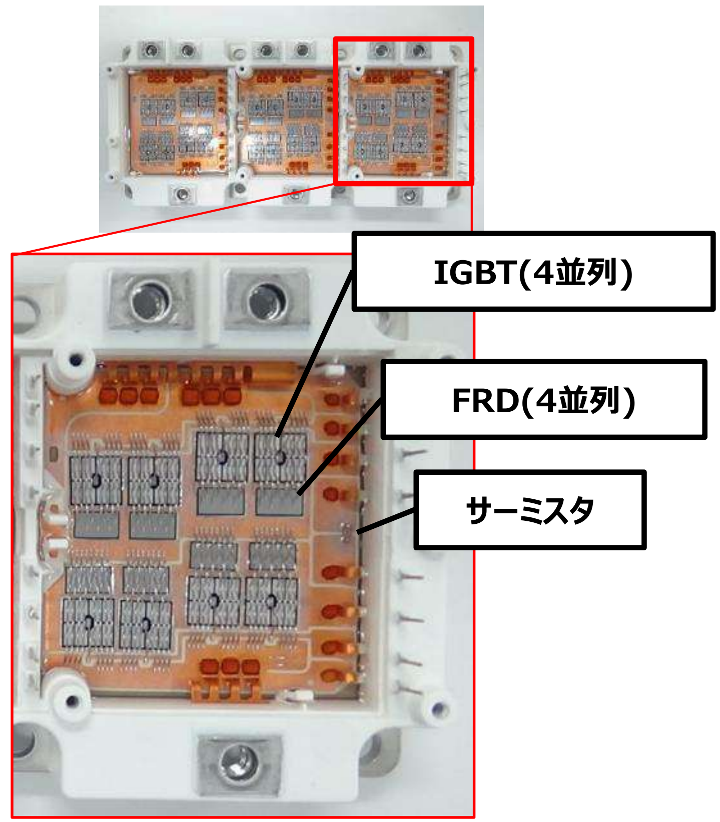
6in1モジュール

EV/HEV インバータ

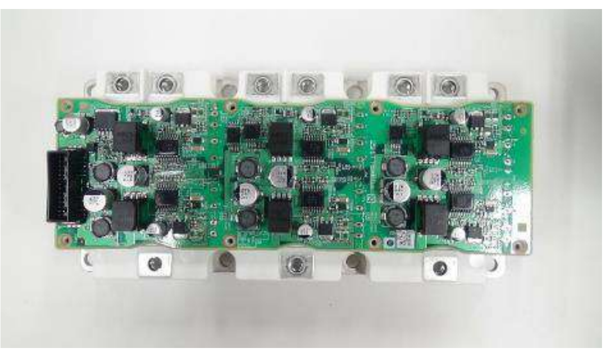
IGBTモジュール

VCE:650V
IC nom:550A (TF=75℃,Tvj max=175℃)
IC:700A

サイズ:216×100×17mm ※突起部含まず
重量:1340g



モジュール内部写真



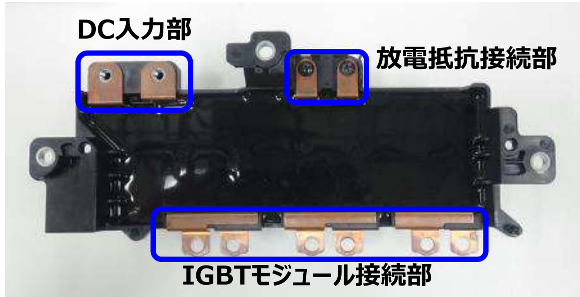
専用ドライバ基板

裏面ピンフィン
(直接水冷)

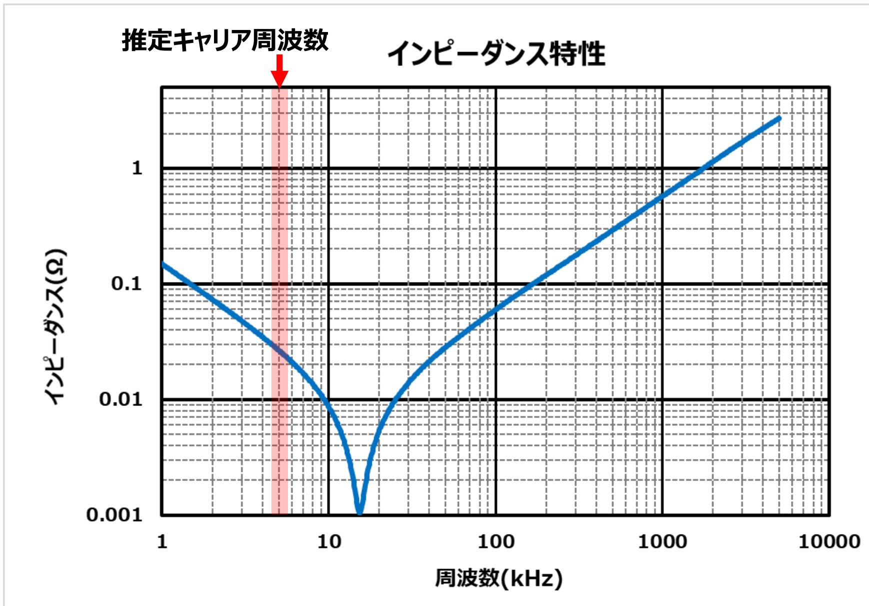
EV/HEV インバータ

種類	フィルムコンデンサ
定格電圧	450V
静電容量	1074uF
ESR	0.95mΩ @10kHz
サイズ	210×70×55mm
体積	0.84L
重量	1.33kg
エネルギー密度	0.36Wh/L ※

平滑コンデンサ外観



平滑コンデンサ端子部
(バスバー一体封止)

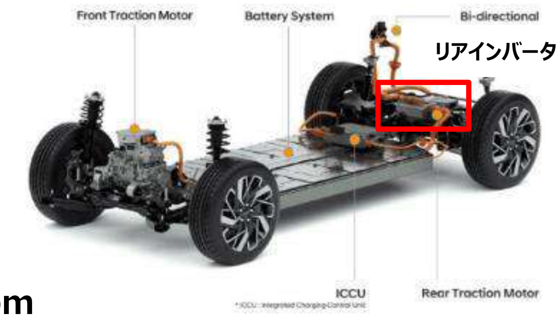


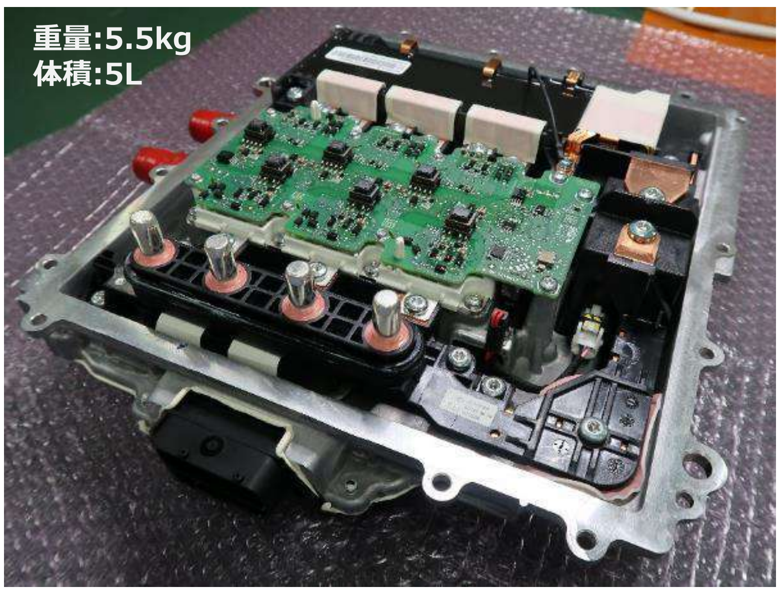
※エネルギー密度はバスバーなども含んだ体積を基にしているため、参考値となります

EV/HEV インバータ

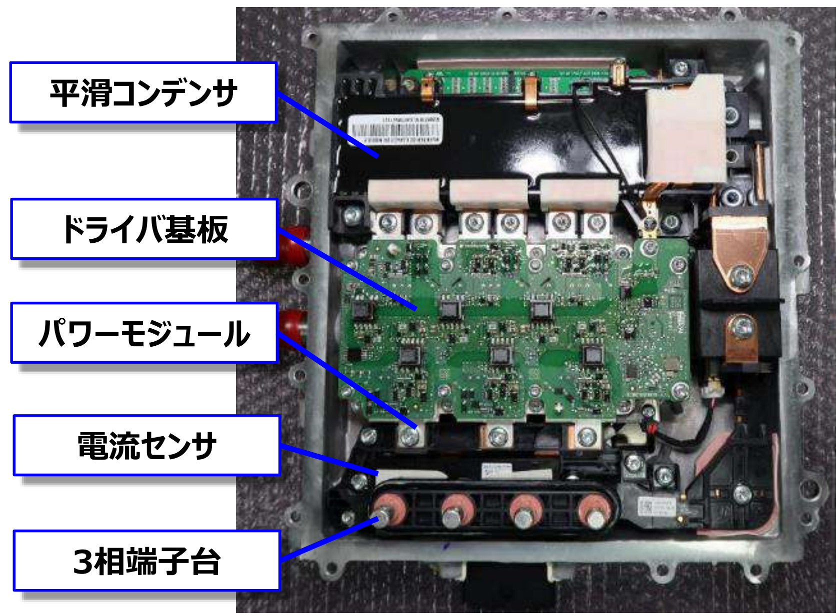
駆動用バッテリー
  種類:リチウムイオン電池
  総電圧:653V
  総電力量:72.6kWh

原動機
  種類:交流同期電動機
  最高出力:160kW(217PS)/4400~9000rpm
  最高トルク:350N･m(35.7kgf･m)/0~4200rpm





インバータ外観



インバータ内部写真

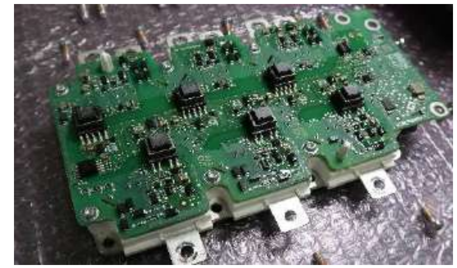
EV/HEV インバータ

SiCパワーモジュール

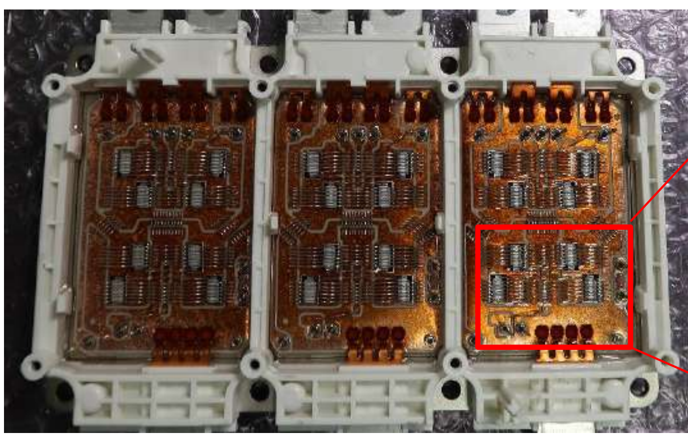
VCE:1200V
IC nom:200A (TF=60℃,Tvj max=175℃)
IC:400A

サイズ:154.50×95.75×12.80mm ※突起部含まず
重量:720g

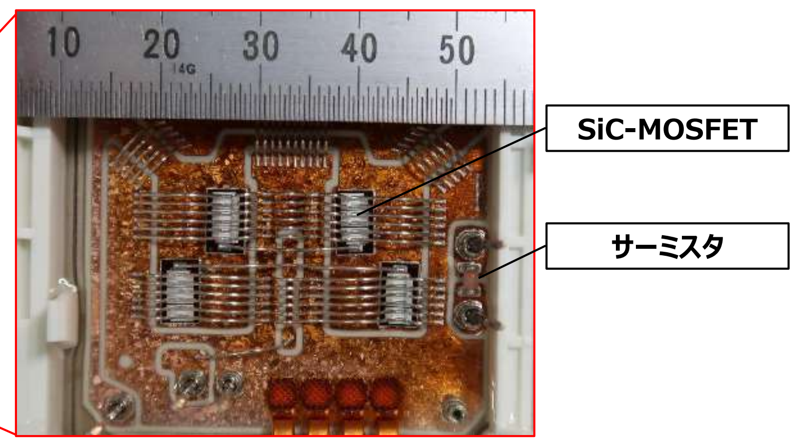
モジュール概観



ドライバ基板



モジュール内部(6in1構成)



SiC-MOSFETチップを
４並列搭載

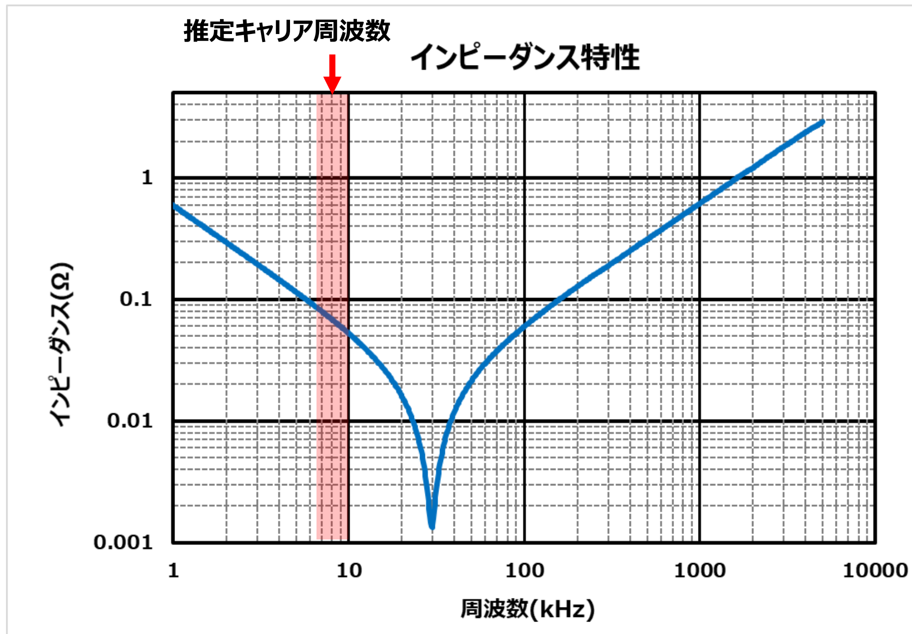
EV/HEV インバータ

種類	フィルムコンデンサ
静電容量	276.6uF
ESR	0.99mΩ @10kHz
サイズ	250×50×55mm
体積	0.69L
重量	1.24kg
エネルギー密度	0.35Wh/L ※

※エネルギー密度はバスバーなども含んだ体積を基にしているため、参考値となります

平滑コンデンサ外観

平滑コンデンサ端子部
(バスバー,Yコンデンサ,放電抵抗一体構造)



このインバータは充電時に昇圧コンバータとして機能するため
走行時と充電時のキャリア周波数が異なる可能性がある。

講義内容

1. はじめに
2. パワーデバイスの最新状況
3. EV/HV用インバータ/パワーモジュールの最新状況
4. **パワーモジュール技術概要**
5. 将来予想とまとめ

パワーモジュールの重要要素技術

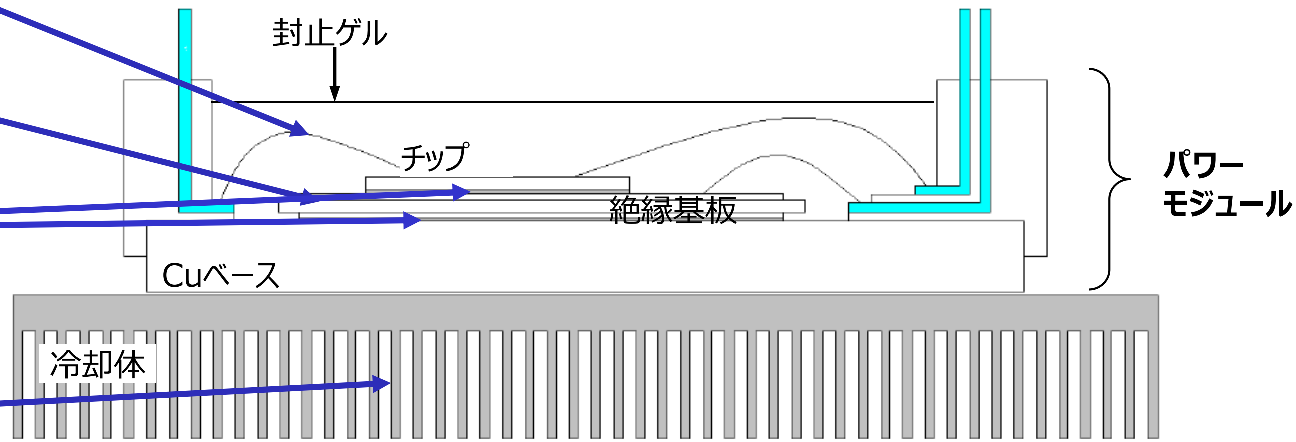
パワーモジュール構造の重要技術

接続技術

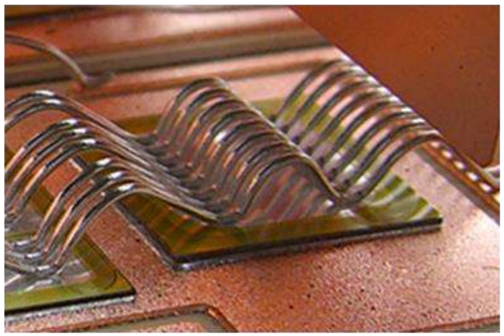
絶縁基板技術

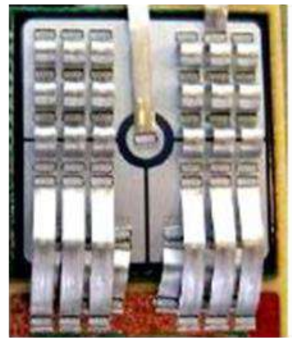
接合技術

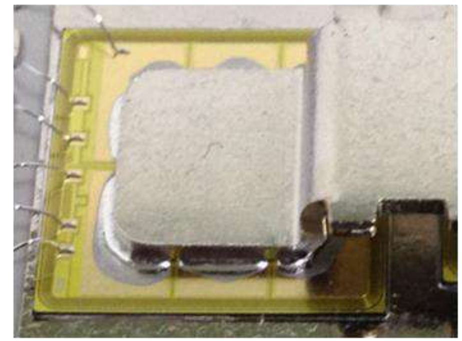
冷却技術



接続技術

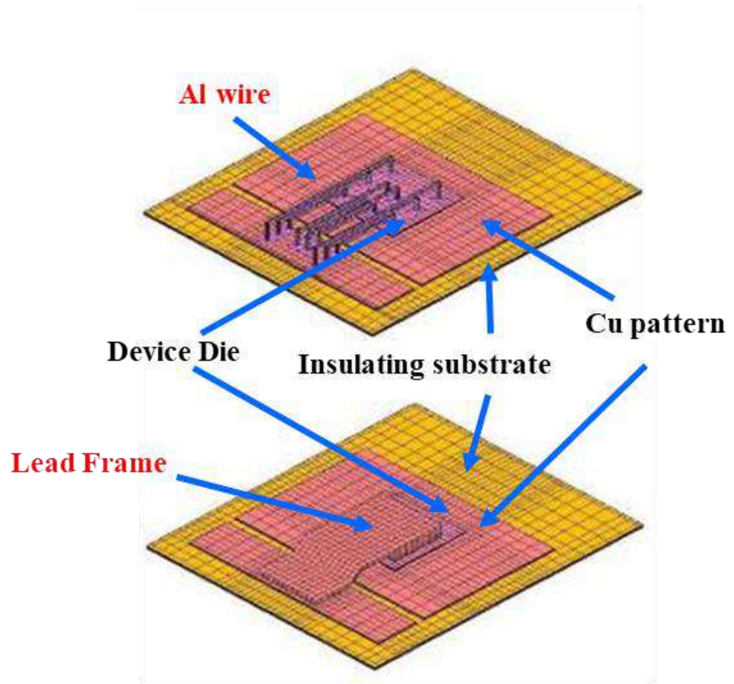

Al or Cu wire bonding

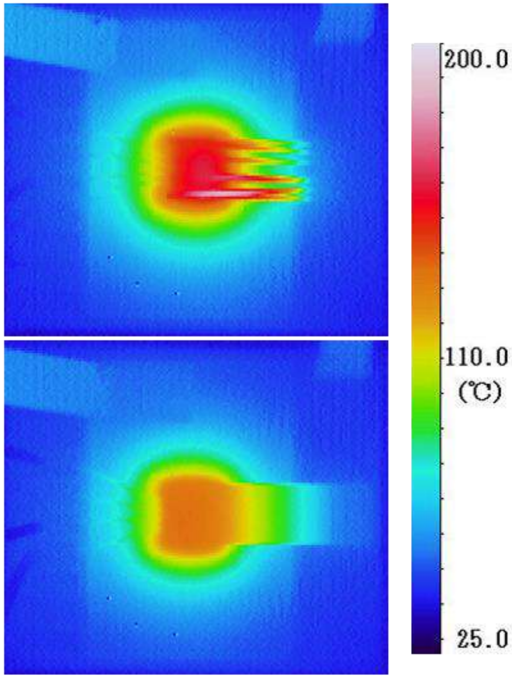

Ribbon bonding

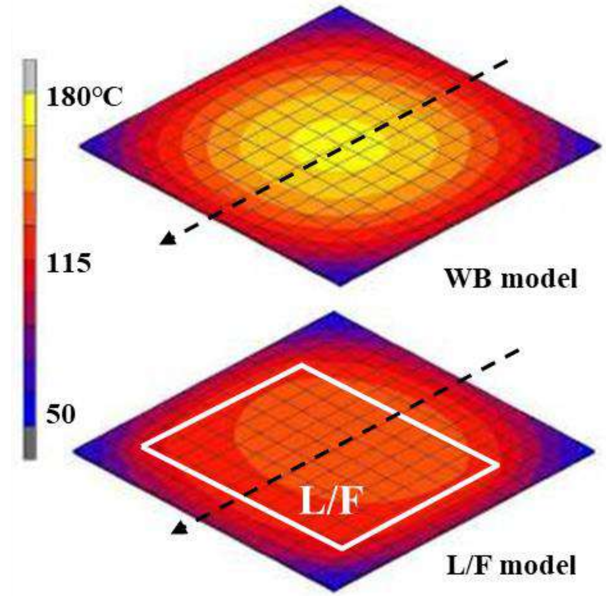

Cu Lead frame

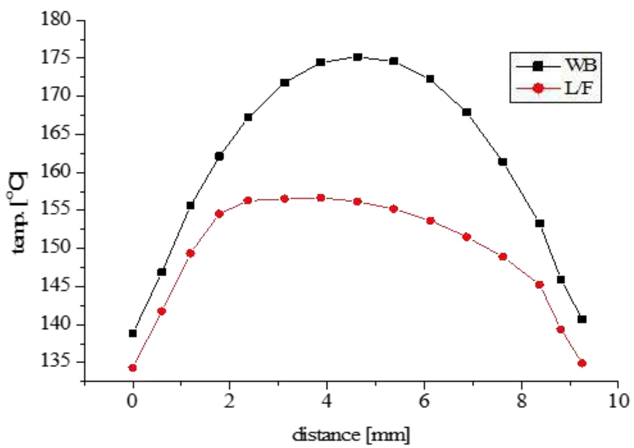
Small　パワー密度の向上に対応し易さ　Large

ワイヤボンディングとリードフレーム構造での温度観察例





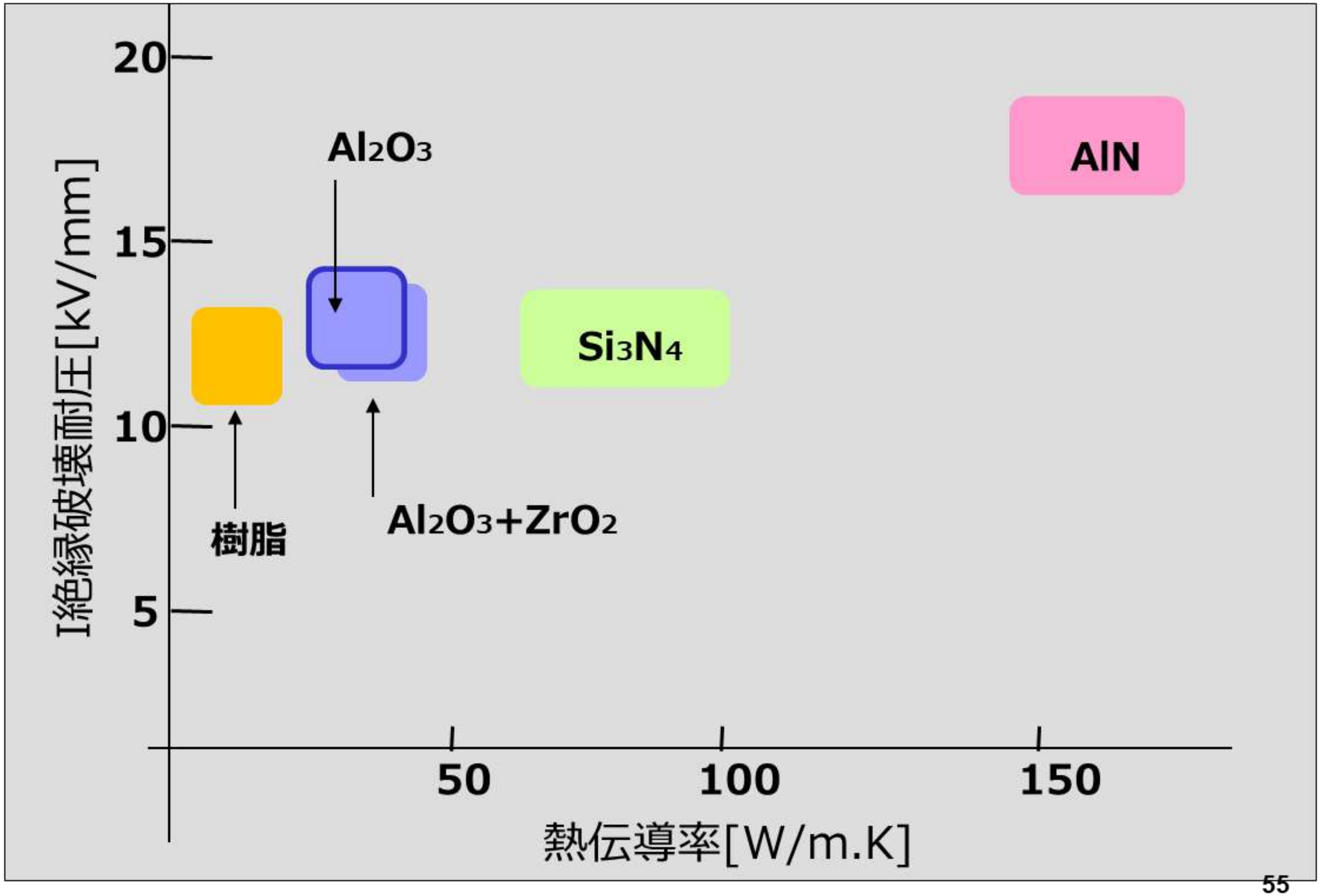




Test device : IGBT
50A DC
@10mm × 10mm Die Size

Temperature distribution of the chip surfaces

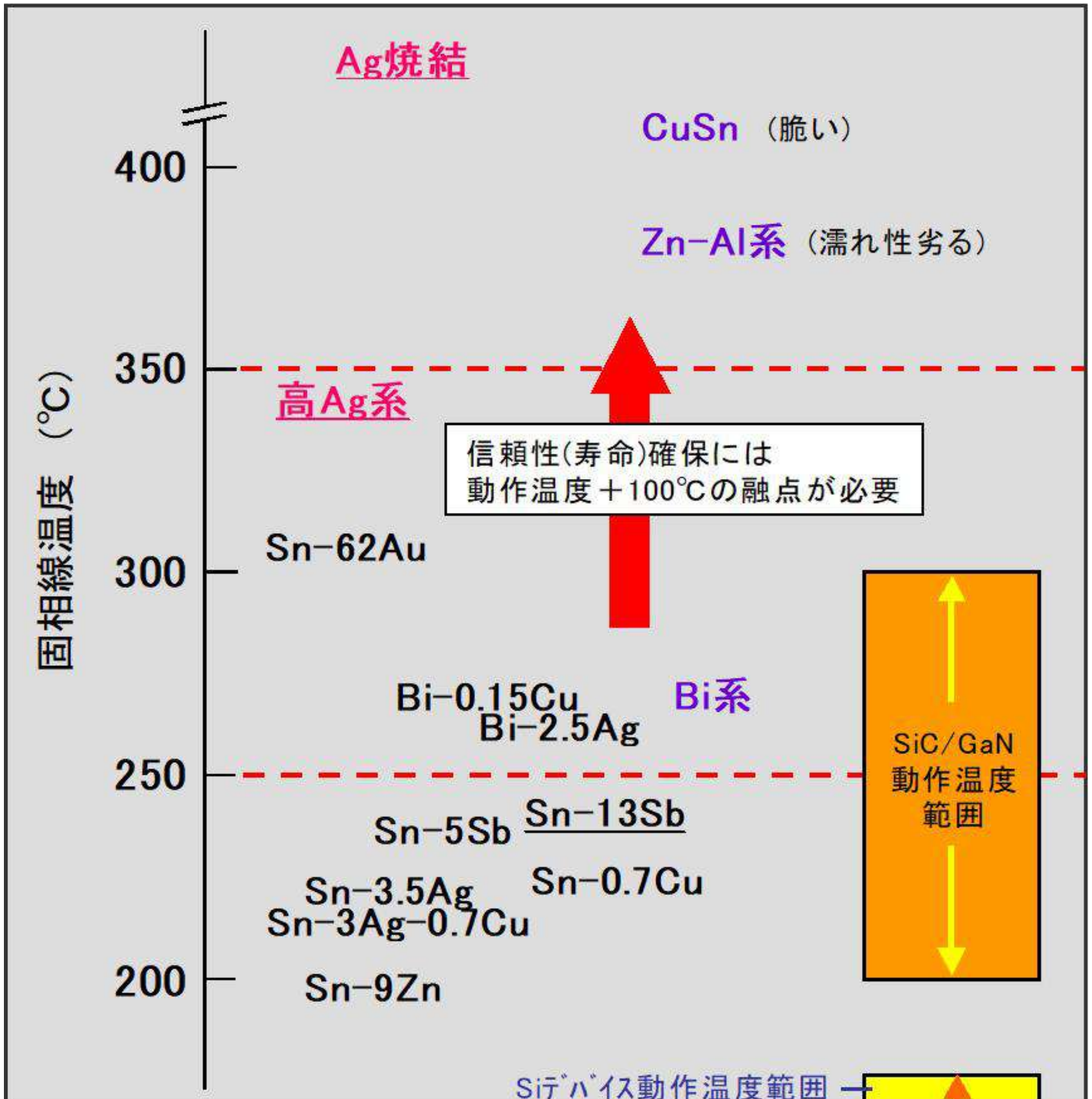
絶縁基板技術



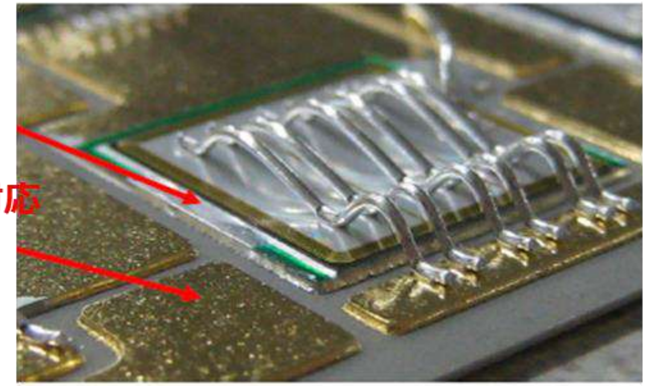
主な絶縁基板材料の熱伝導率と絶縁耐圧の関係

接合技術

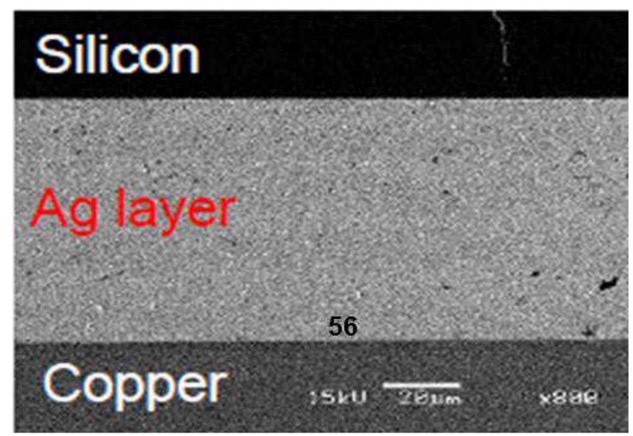
高耐熱化技術：接合部の高耐熱化



【 Ag焼結技術による高耐熱化 】

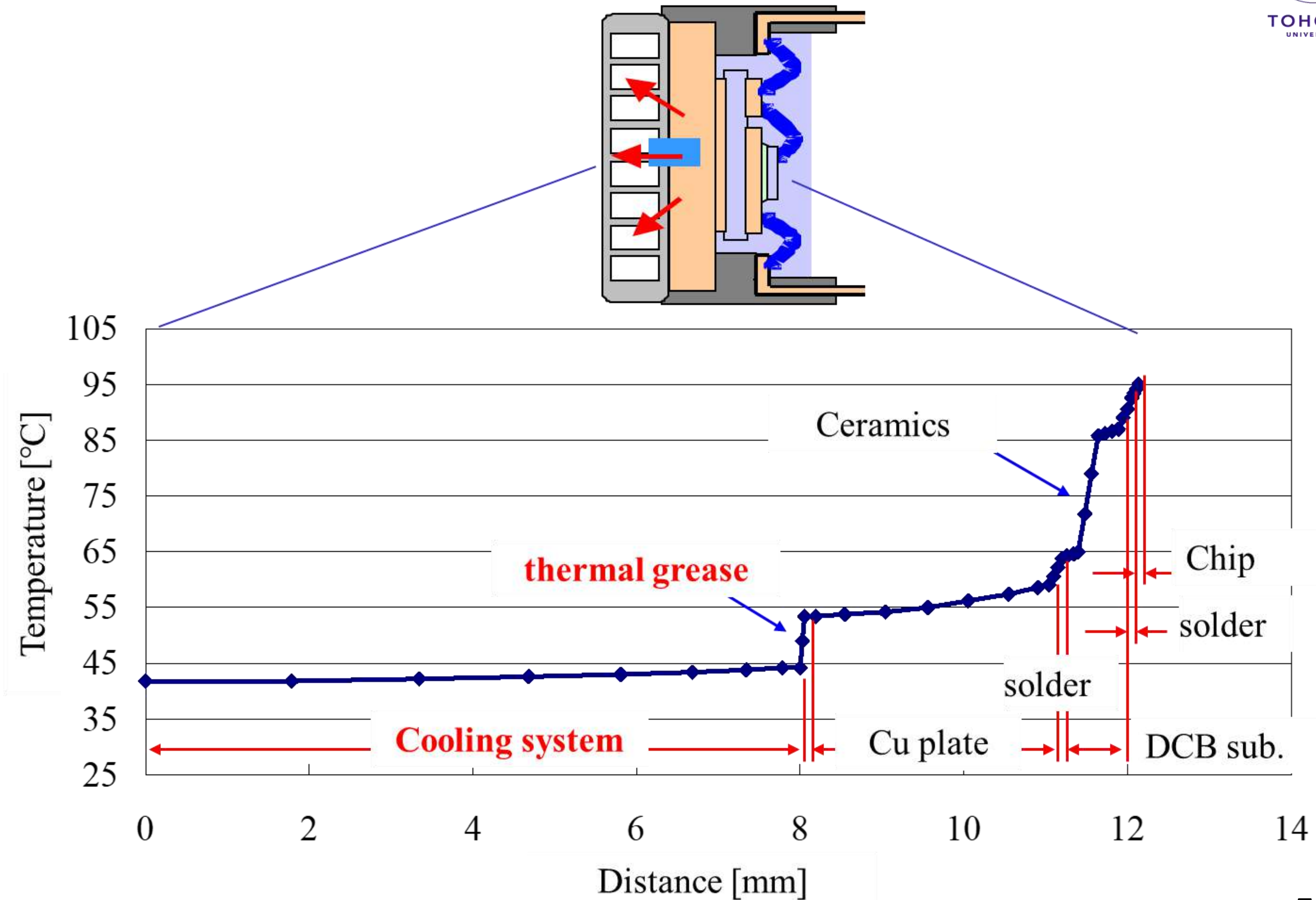


IGBTﾁｯﾌﾟ接合外観



IGBTﾁｯﾌﾟ接合断面

冷却技術

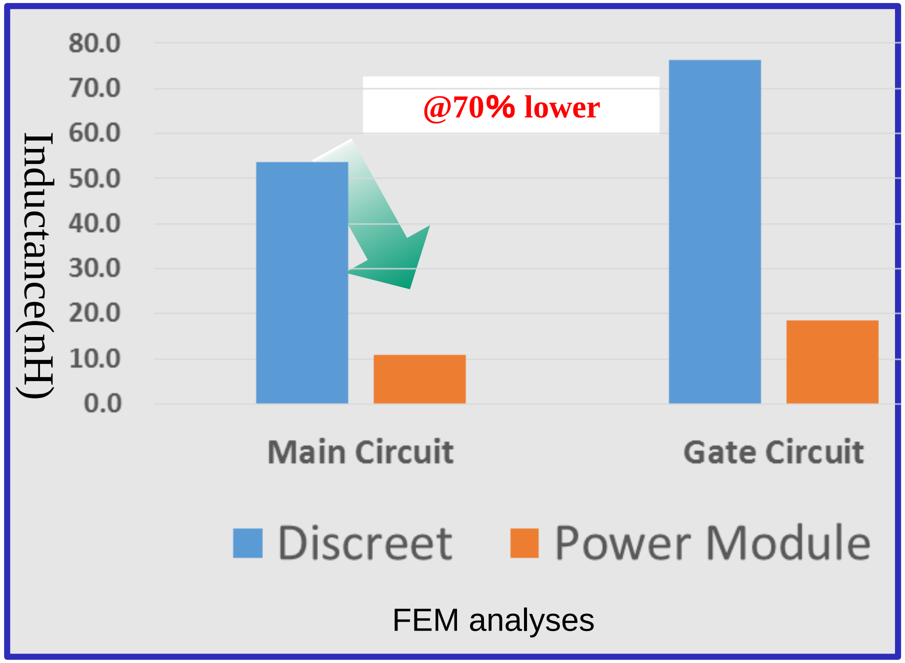

105
95
85
75
65
55
45
35
25
Temperature [°C]
0
2
4
6
8
10
12
14
Distance [mm]
Ceramics
thermal grease
Chip
solder
solder
Cooling system
Cu plate
DCB sub.

高速スイッチングに伴う急峻なdi/dtへの対応（低インダクタンス化）

Low inductance design

Conventional Discreet

Photo is the image of Conventional Discreet

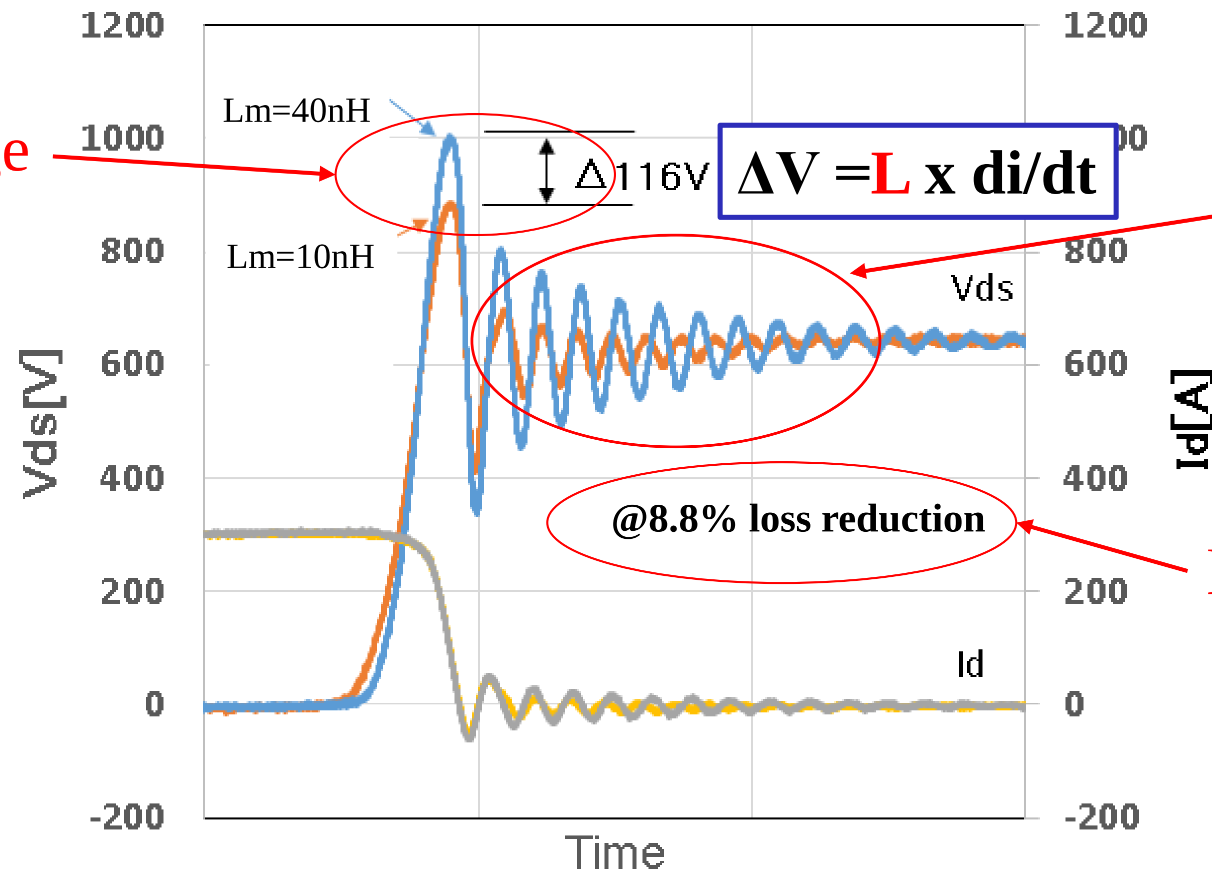


Power Module with very small internal inductance

Photo is the image of Power Module

高速スイッチングに伴う急峻なdi/dtへの対応（低インダクタンス化）

Spike voltage reduction



Noise reduction

loss reduction

Test device : SiC MOS

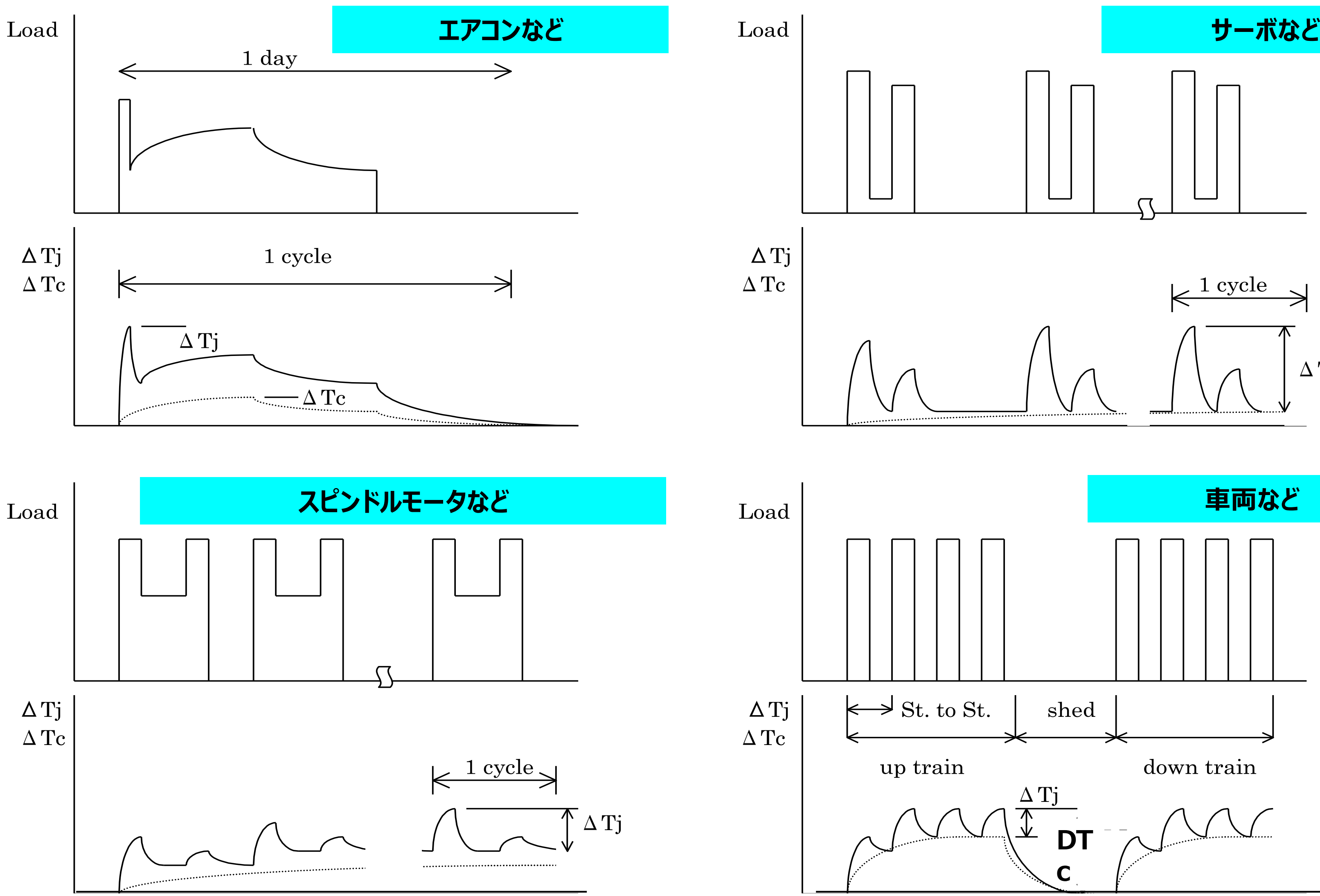
パワーモジュールパッケージの信頼性の考え方

パワーモジュールの目標信頼性例

	使用環境の比較		耐久性への影響
	自動車環境	産業機器環境	
冷却	水冷	空冷	パワーサイクル性
パワー密度	200	100	パワーサイクル性
使用環境	屋外 -40～130℃	屋内 0～50℃	温度サイクル性

	目標信頼性水準の比較	
	自動車目標	産業機器目標
温度サイクル試験	>1,000サイクル ΔTc = -40~125deg	100サイクル ΔTc = -40~125deg
パワーサイクル試験	30,000サイクル ΔTj = 100deg	15,000サイクル ΔTj = 100deg
ケース温度変化 パワーサイクル試験	10,000サイクル ΔTc = 80deg	—
振動試験	加速度 20G 10H：各X, Y, Z軸方向	加速度 10G 2H：各X, Y, Z軸方向

実装置における負荷パターンと ΔTj, ΔTc

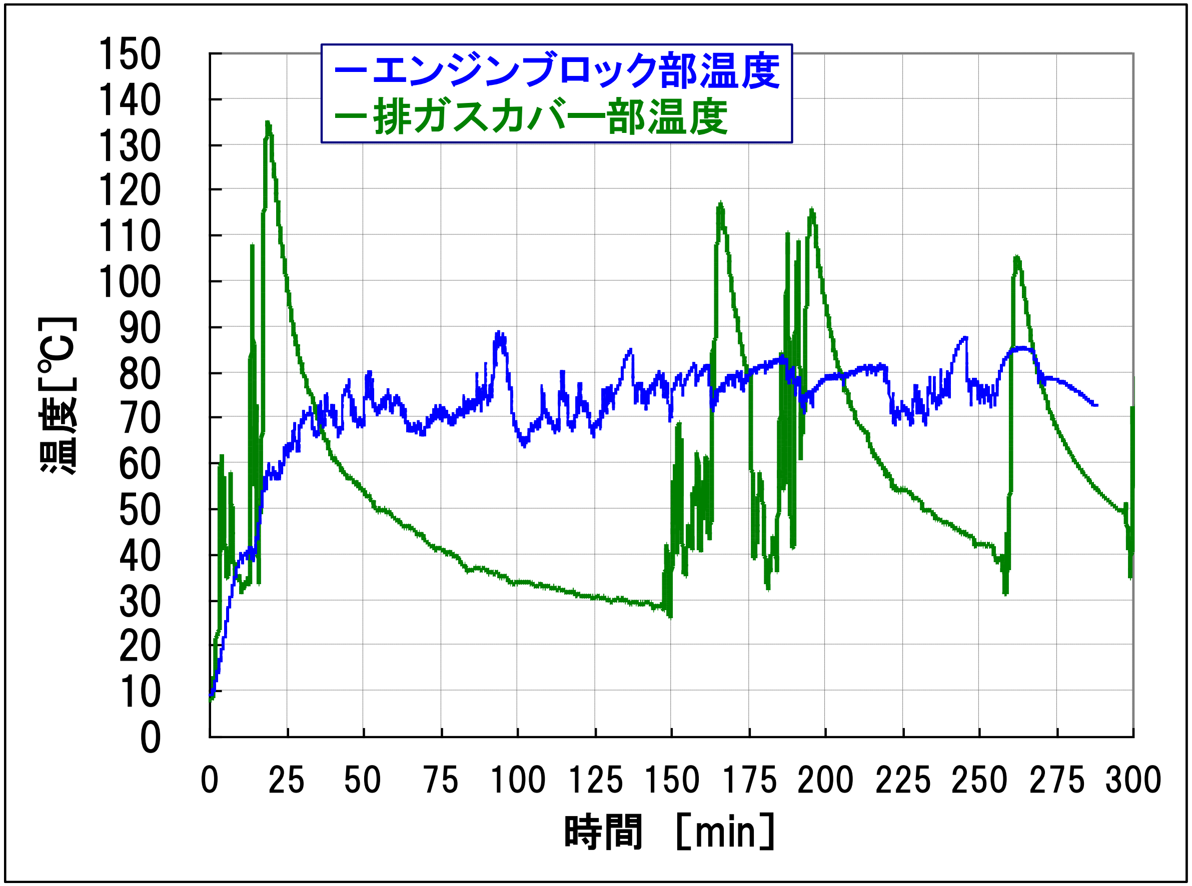


長期信頼性を考察するためには実装置における負荷パターンを把握することが重要

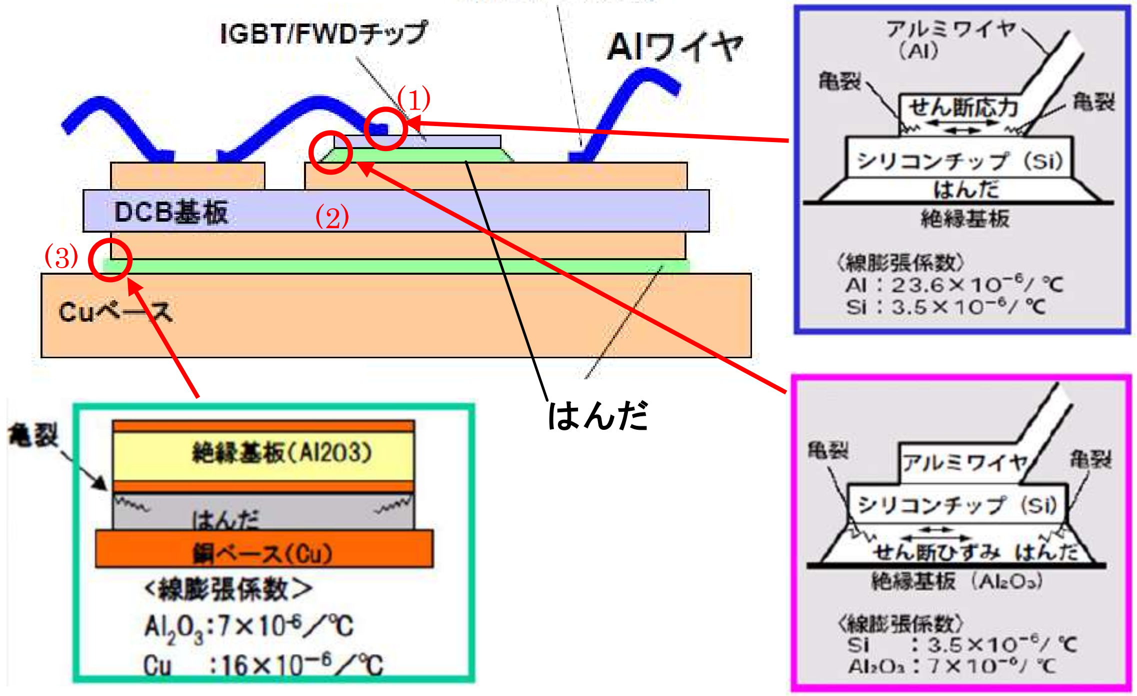
車載用半導体に要求される品質性能

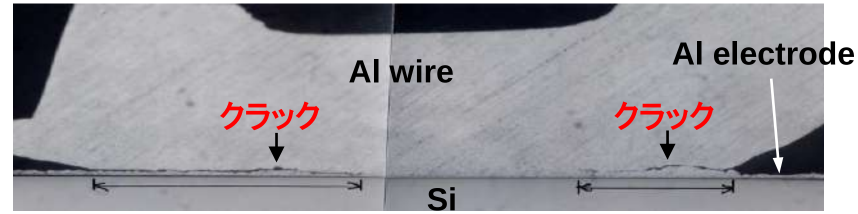
車載用半導体の使われる環境・・・熱

同じエンジンルームでも搭載位置によって温度・ヒートサイクルが異なる

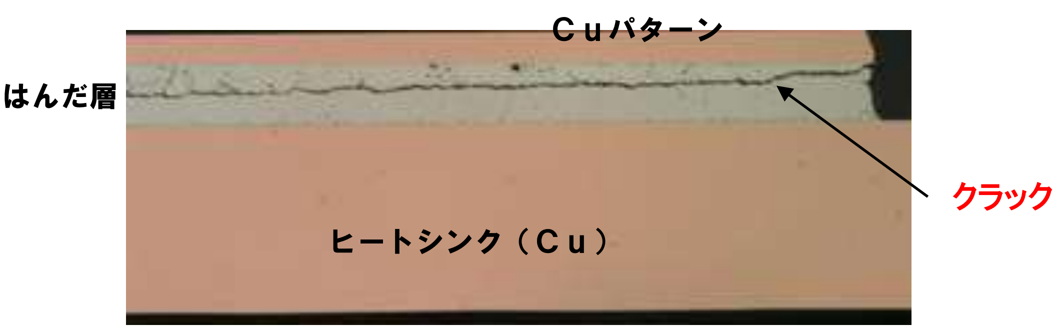


パワーサイクル試験での故障モード





AlとSiの線膨張係数の違いにより、
AlとSiの界面からクラックが伸張
ΔTjパワーサイクルでの故障モードが多い



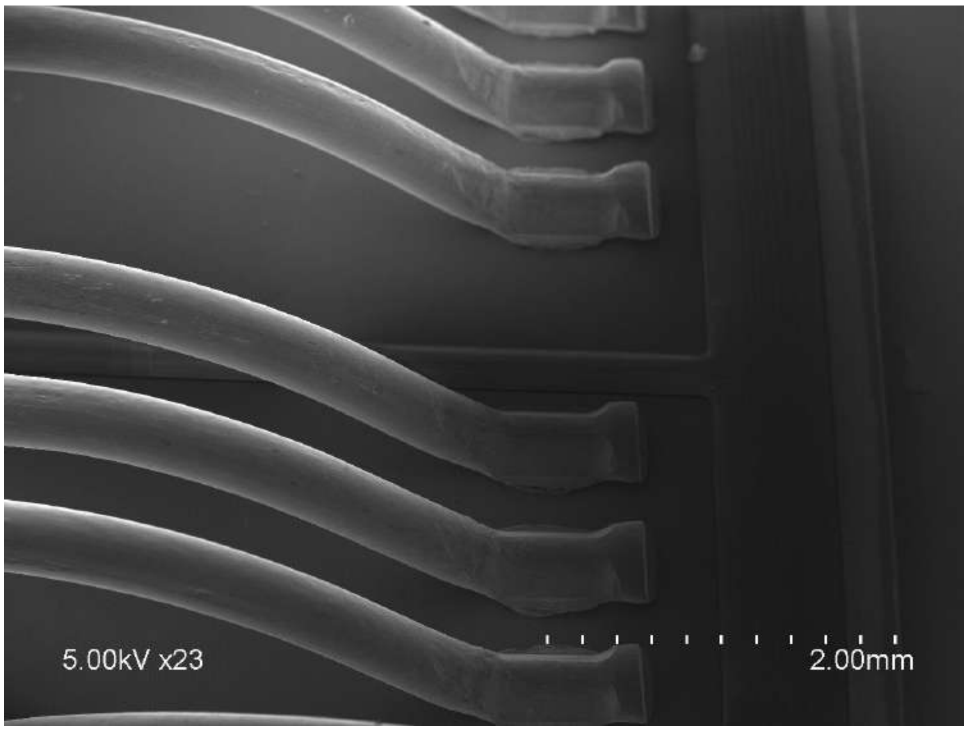
Cuとはんだの線膨張係数の違いにより、
はんだにクラックが伸張
ΔTcパワーサイクルでの故障モードが多い

ΔTj パワーサイクルによるAlワイヤリフトオフの例

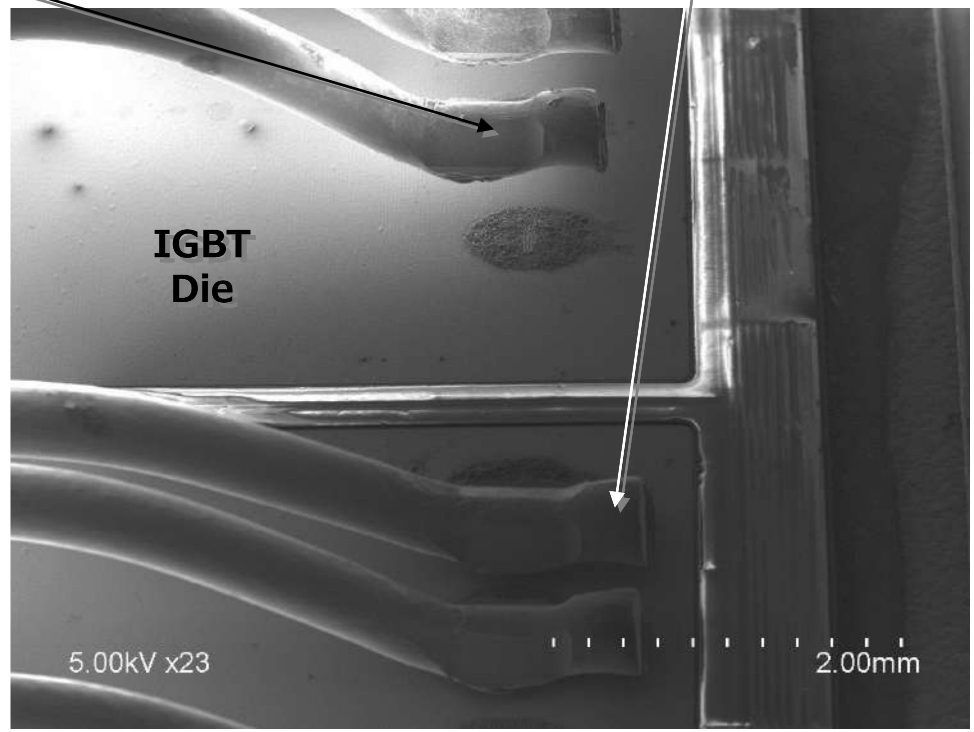
TOHOKU UNIVERSITY

Lift-off of the bond wire

Al Electrode



Initial



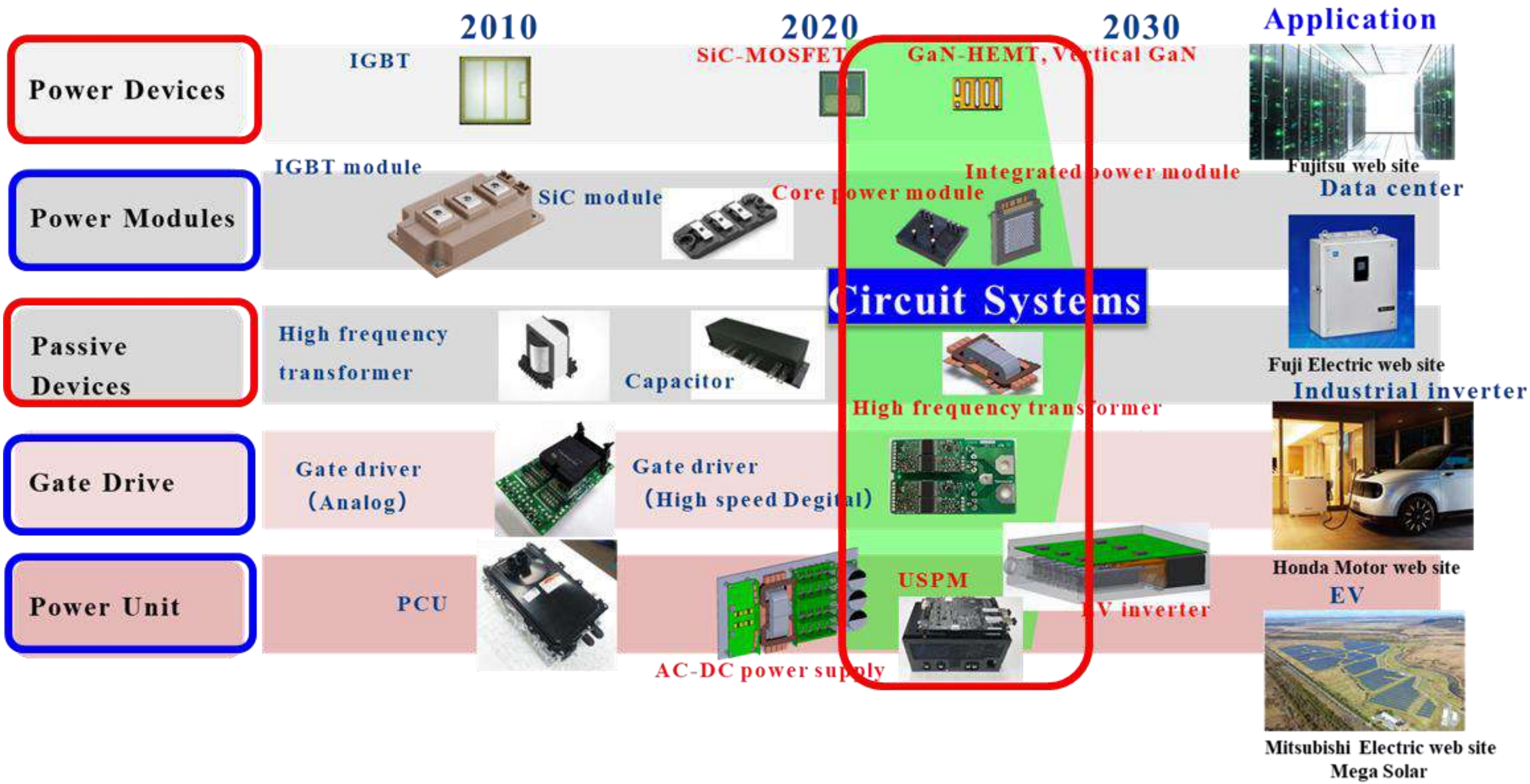
After power cycling test

講義内容

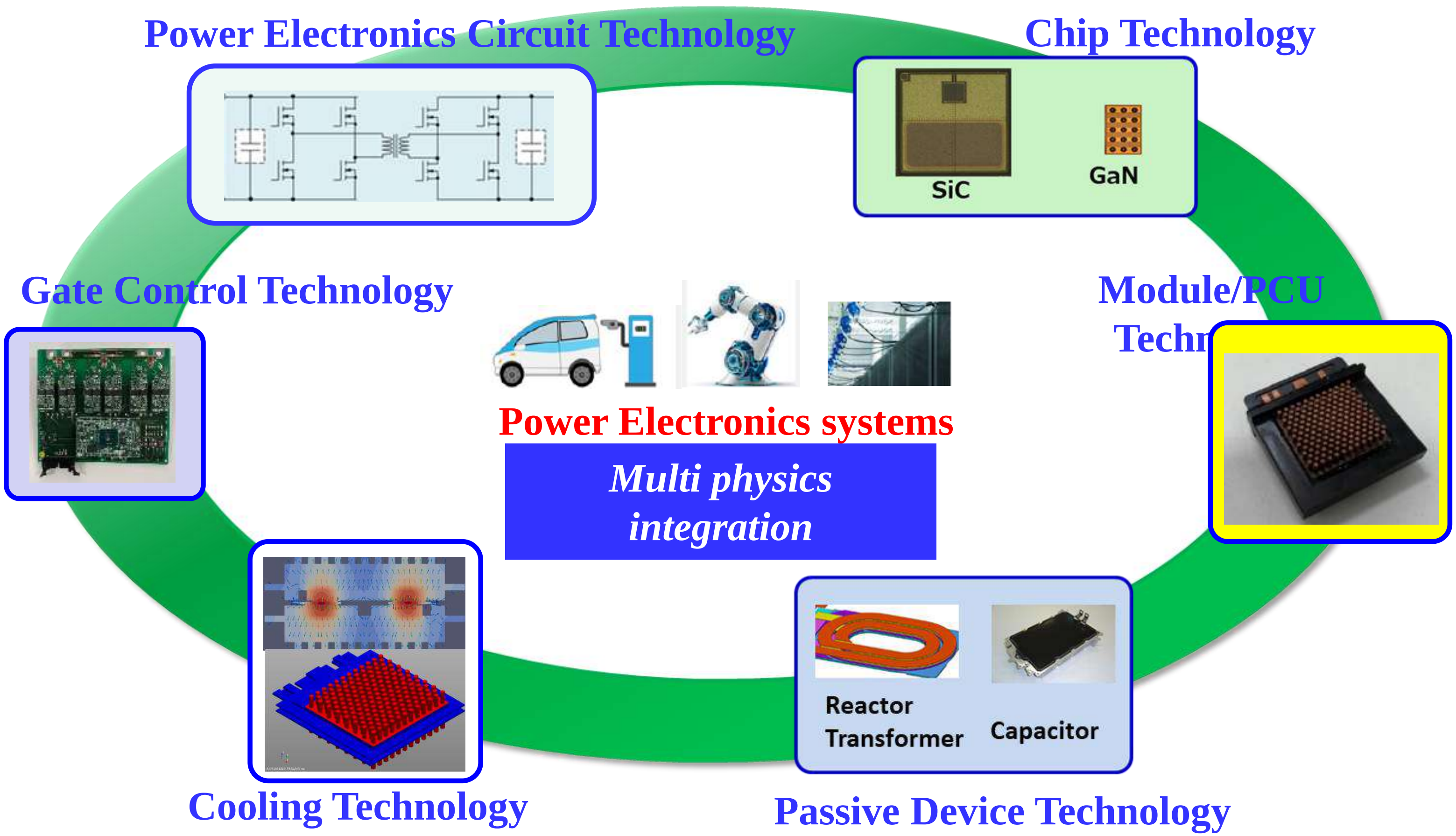
TOHOKU UNIVERSITY

1. はじめに
2. パワーデバイスの最新状況
3. EV/HV用インバータ/パワーモジュールの最新状況
4. パワーモジュール技術概要
5. 将来予想とまとめ

パワーモジュールとPCSの境界がなくなり集積化に向かうと予想



パワーエレクトロニクスには総合的な技術開発が重要



パワエレ技術の発展のために共にがんばりましょう!!

東北大学　新青葉山キャンパス

仙台　たなばた

Photo by Y.Takahashi