

～ 産学連携で加速する名大モビリティGX・DX ～

次世代電動車(xEV)に要求される電動アクスルの 要求技術とそこに求められる各要求技術

次世代自動車の電動化システム(e-Axle、インホイールモータ)の技術動向をSi/SiC/GaNパワー半導体実装技術、センサ応用技術、材料応用技術における各技術階層の視点から議論していきます。

山本 真義

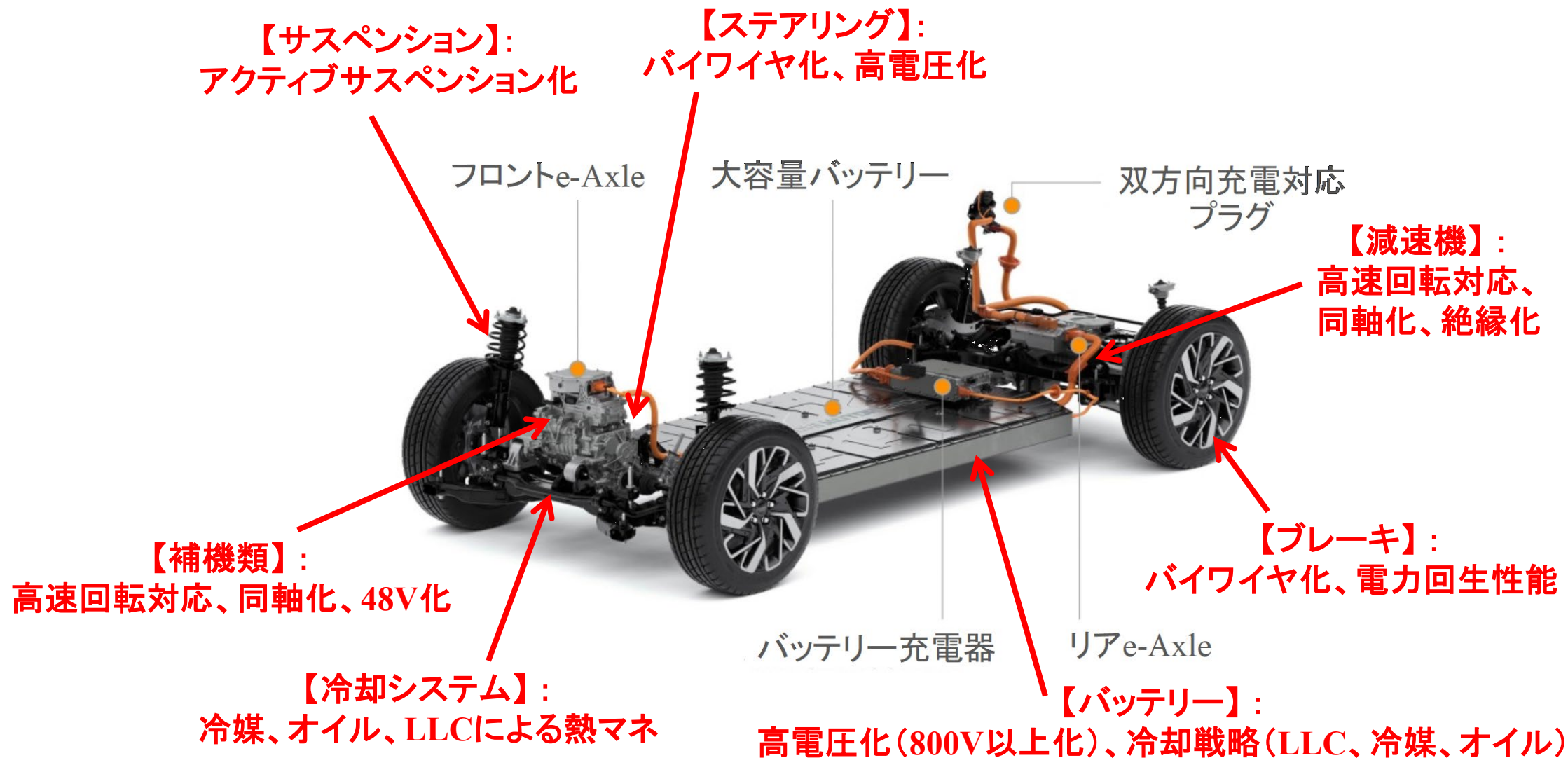
名古屋大学 未来材料・システム研究所
名古屋大学大学院 工学研究科 電気工学専攻



Power Electronics Lab.

Nagoya University





【パワー半導体実装】

- ・高放熱性能 → 銅フィン or アルミフィン構造改善
- ・高温対応 → チップ実装の銀焼結 or 銅焼結化
- ・高絶縁化 → セラミック基板 or 樹脂絶縁基板
- ・低背化 → 両面冷却構造 + 平置き配置化

【電流センサ】

- ・低背化 → コアレス電流センサ (MRセンサ等)
- ・実装面積低減 → シャント抵抗電流センサ

【回路方式】

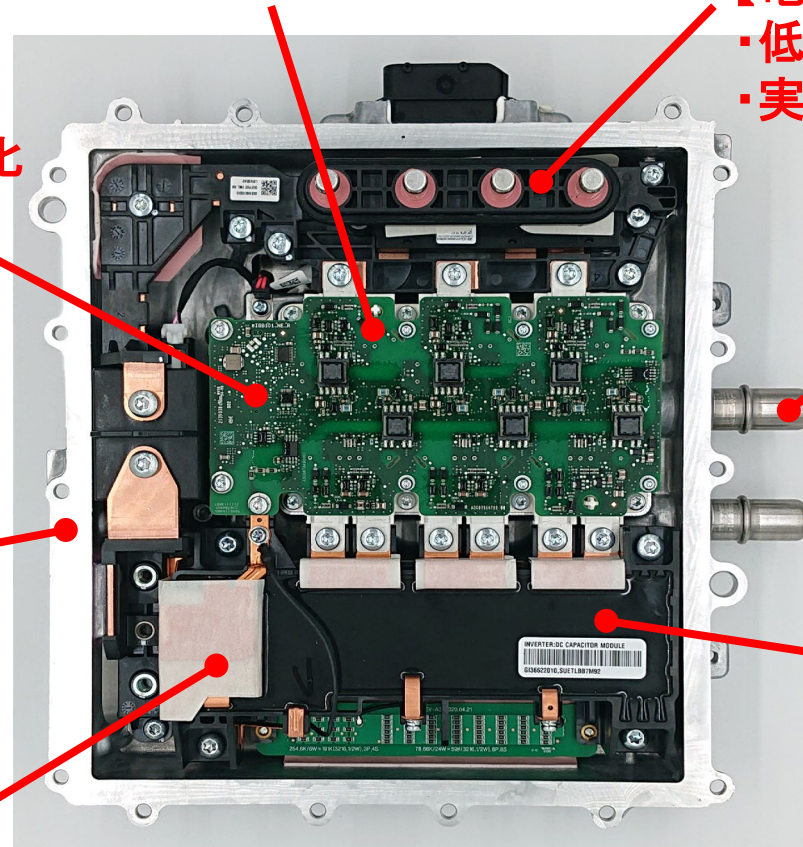
- ・高効率化 → インバータ多相化
- ・高電圧化 → SiC化 or マルチレベル化
- ・低ノイズ化 → マルチレベル化 or スナバPKG内蔵化
- ・低損失化 → 基板実装化 (低インダクタンス化)

【PCU筐体】

- ・軽量化 → 樹脂 (PPS等) 化
- ・軽量高性能化 → マグネシウム化

【フィルタ】

- ・小型軽量化 → アクティブフィルタ
- ・量産工程削減 → Yコン + 平滑キャパシター一括実装化

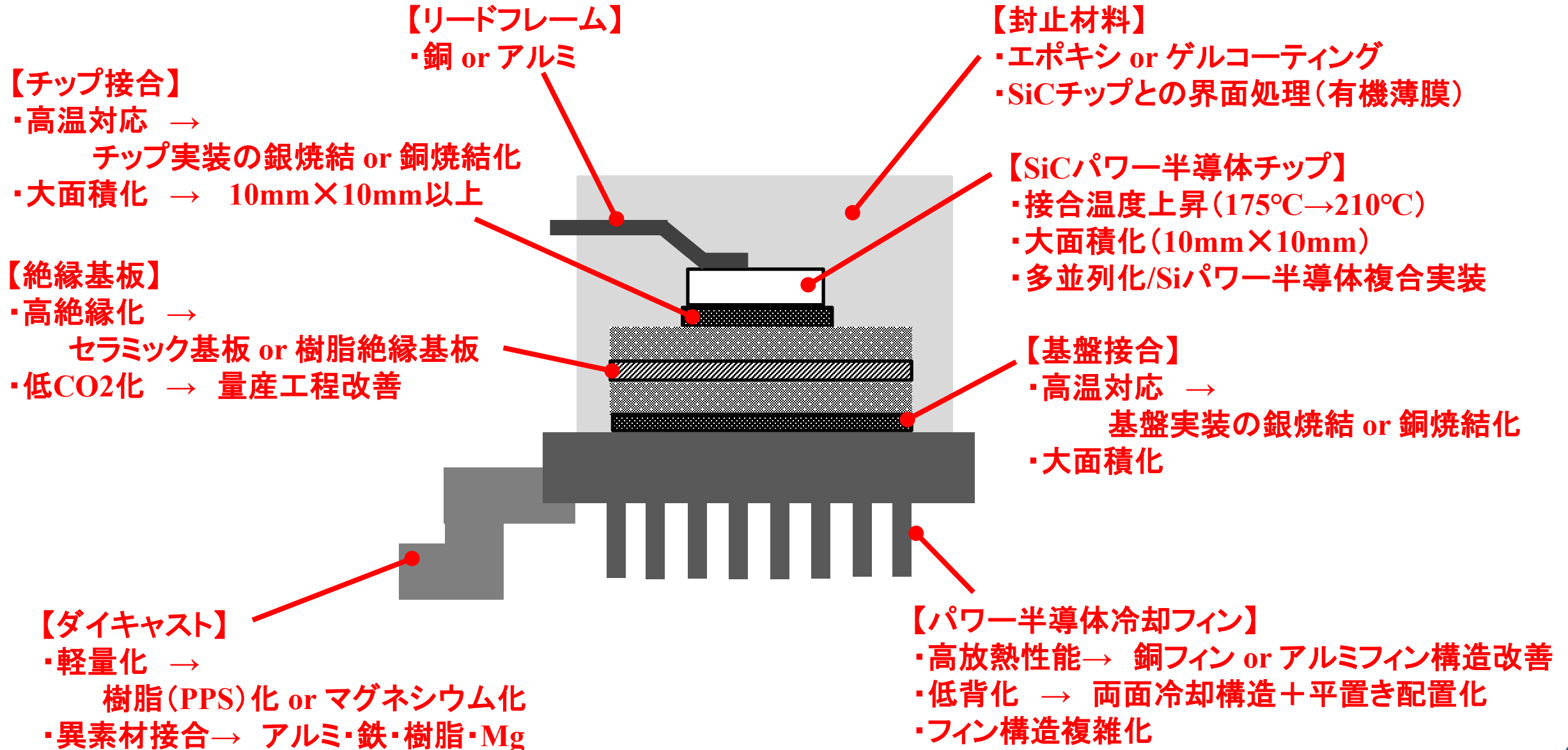


【冷却】

- ・冷却配管樹脂化 → 絶縁確保
- ・油冷化 → 高温対応化 (85°C以上)
- ・冷媒化 → シーリング等信頼性向上

【平滑キャパシタ】

- ・高温対応化 → 150°C対応化
- ・高電力密度化 → 誘電被膜1μm化
- ・小型軽量化 → MLCC化





Honda 0 Tech MTG 2024

EVの本格普及を目指し始動した
「Honda 0シリーズ」の具現化技術

Honda 0シリーズ Thin, Light プラットフォーム

Thin, Light

低全高スタイリング



BEVであっても低全高スタイリング
に対応できるプラットフォーム

ショートオーバーハング

▲10% (他社比)



Honda独自の衝突モードコントロール技術と
小型e-Axleによるショートオーバーハングと低HOOD化

低全高・室内MAX

全高1400 mm 以下



2.0Gpa級HOT材のプラットフォーム適用と
薄型バッテリーパックにより
低全高と広々した室内空間を両立

低重心・低慣性

▲100 Kg (自社EV比)



新型パワーユニットの軽量・薄型化と
衝突コントロールで大幅軽量化
空力技術と新操安剛性マネジメントで軽快な走りへ

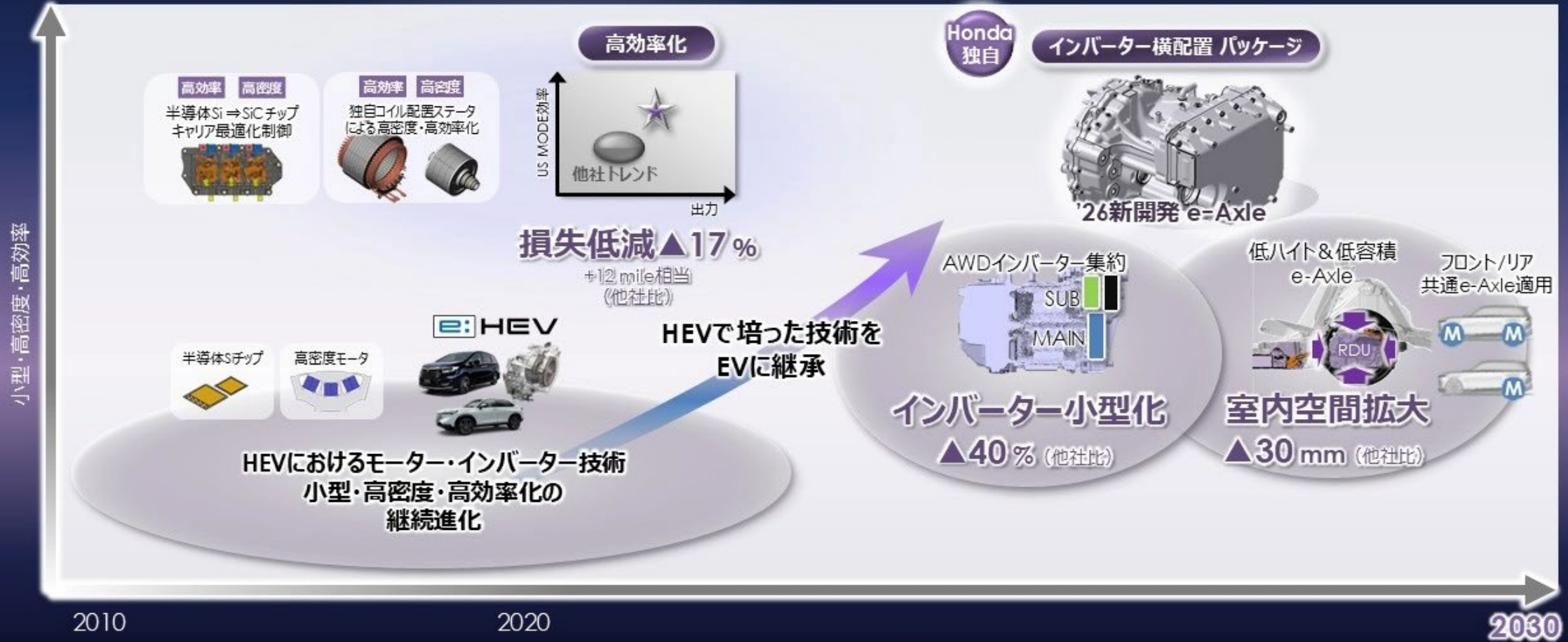
Honda 0 Tech MTG 2024

*FDU/RDU:Front Drive Unit/Rear Drive Unit

Honda 0シリーズ 低ハイト・小型e-Axle

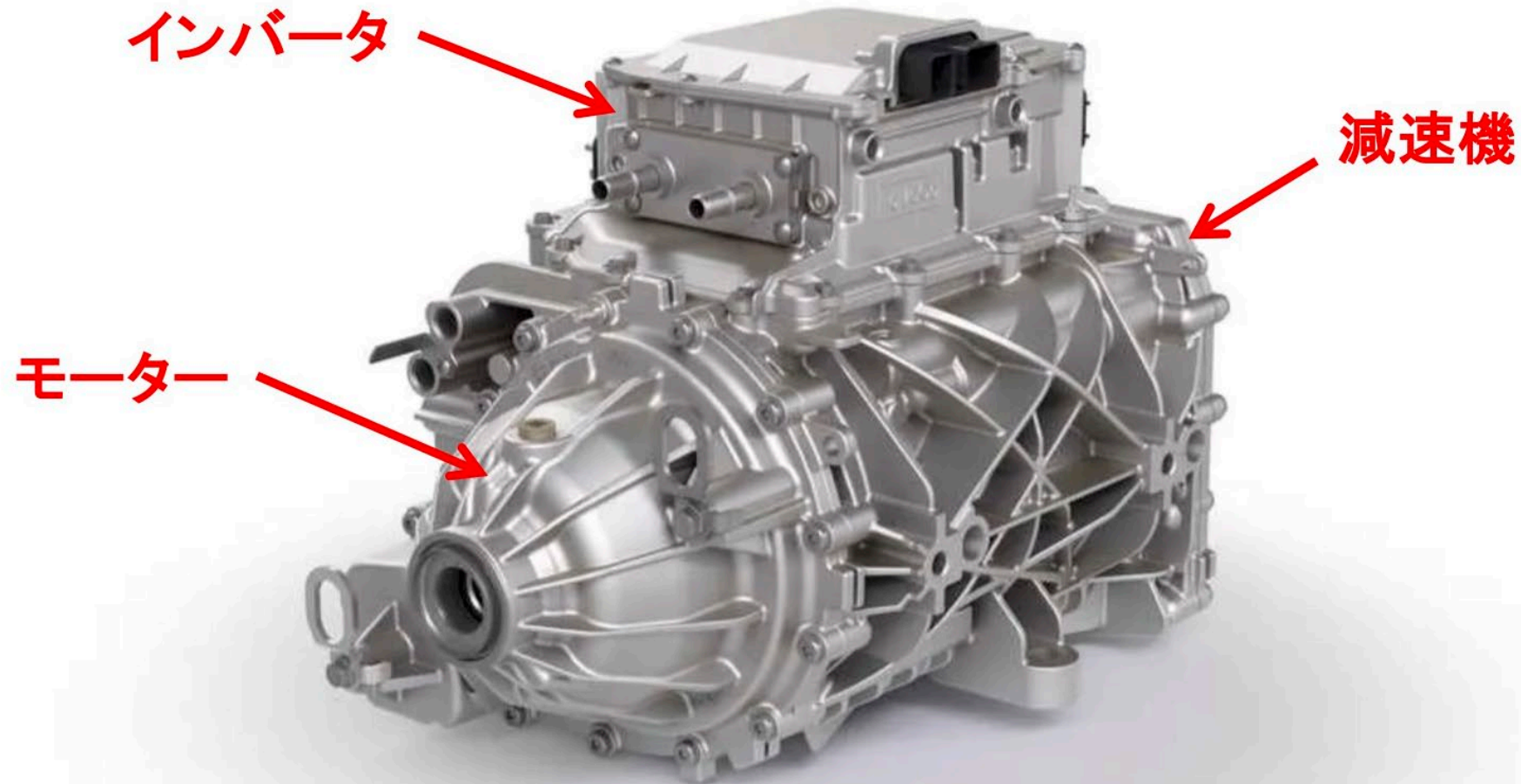
新開発e-AxleによるMM思想の具現化

HEVで作り上げたパワーユニット技術により高出力密度と低損失化を実現
インバーター小型化によるHonda独自の横配置パッケージで圧倒的低ハイト化を実現



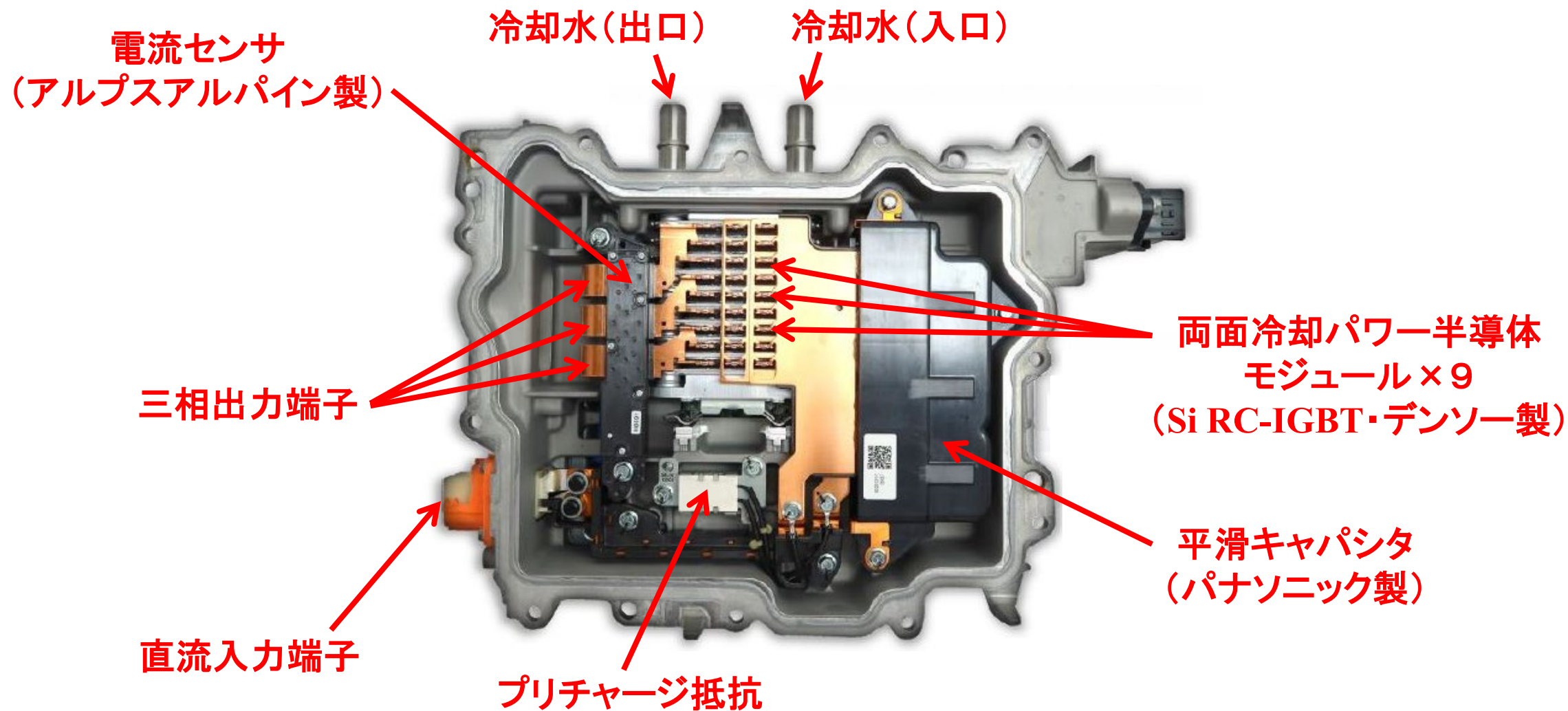
Honda Tech MTG 2024

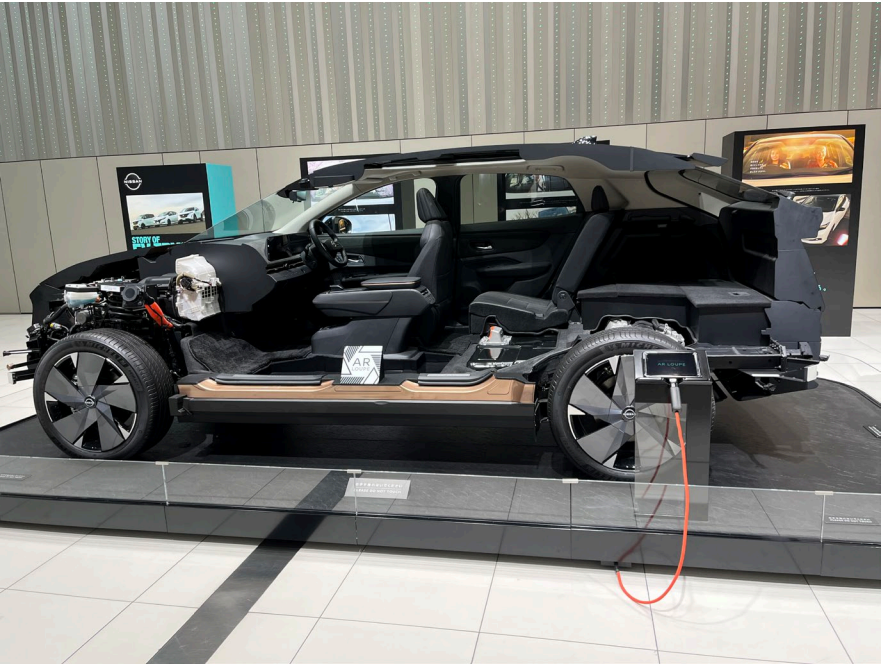
リア駆動用電動アクスル(マスタング・Mach-E)



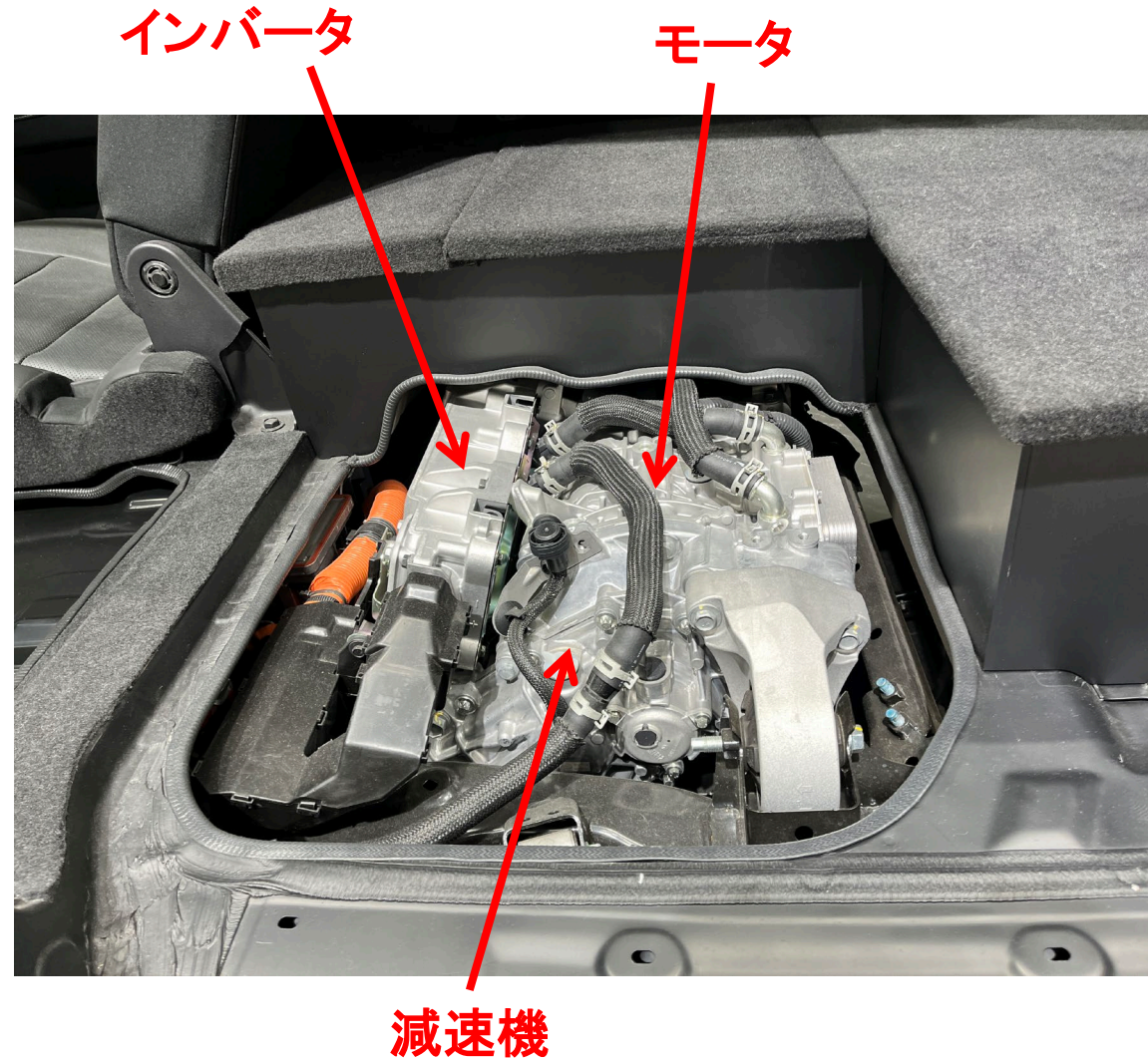
引用: BorgWarner Morse Systemsサイト, “<https://www.borgwarner.com/home>”

フォード F-150 Lightning用インバーター





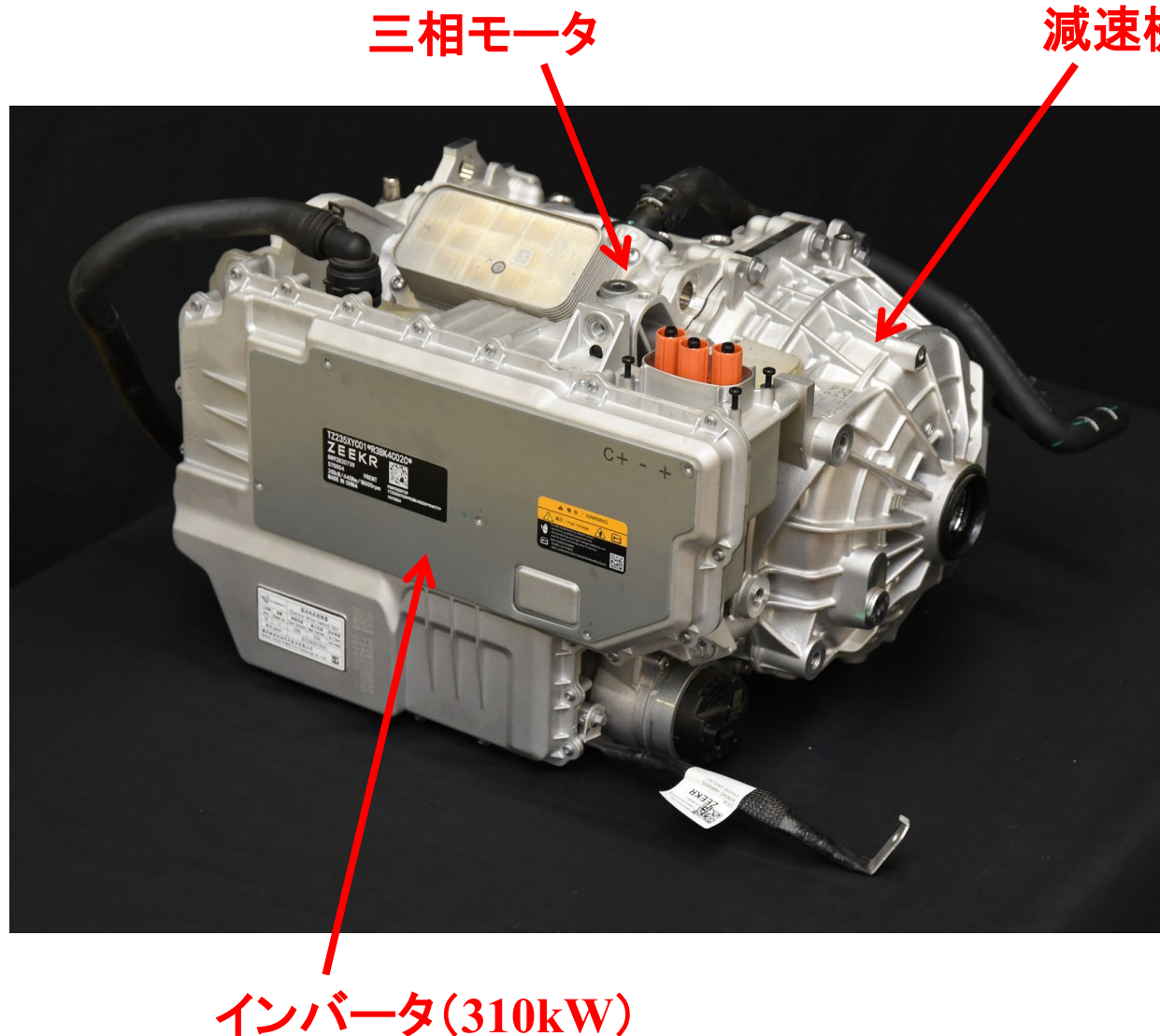
主要諸元（日本仕様）	Ariya (2WD)		Ariya e-4ORCE (AWD)	
	65kWh バッテリー搭載車	90kWh バッテリー搭載車	65kWh バッテリー搭載車	90kWh バッテリー搭載車
バッテリー総電力量 ()は使用可能電力量	65kWh (63kWh)	90kWh (87kWh)	65kWh (63kWh)	90kWh (87kWh)
最高出力	160kW	178kW	250kW	290kW
最大トルク	300Nm	300Nm	560Nm	600Nm
加速性能 (0-100 Km) (社内測定値)	7.5秒	7.6秒	5.4秒	5.1秒
最高速度	160 km/h	160 km/h	200 km/h	200 km/h
航続距離 (WLTCモードを前提とした社内測定値)	最大450km	最大610km	最大430km	最大580km
全長	4,595mm			
全幅	1,850mm			
全高	1,655mm			
重量	1900kg – 2200kg			
ホイールベース	2775mm (RAV4 = 2,690 mm)			
荷室寸法	466L (2WD) / 408L (AWD)			
タイヤ寸法 (フロント / リア)	235/55R19 255/45R20 (グレード別設定)			



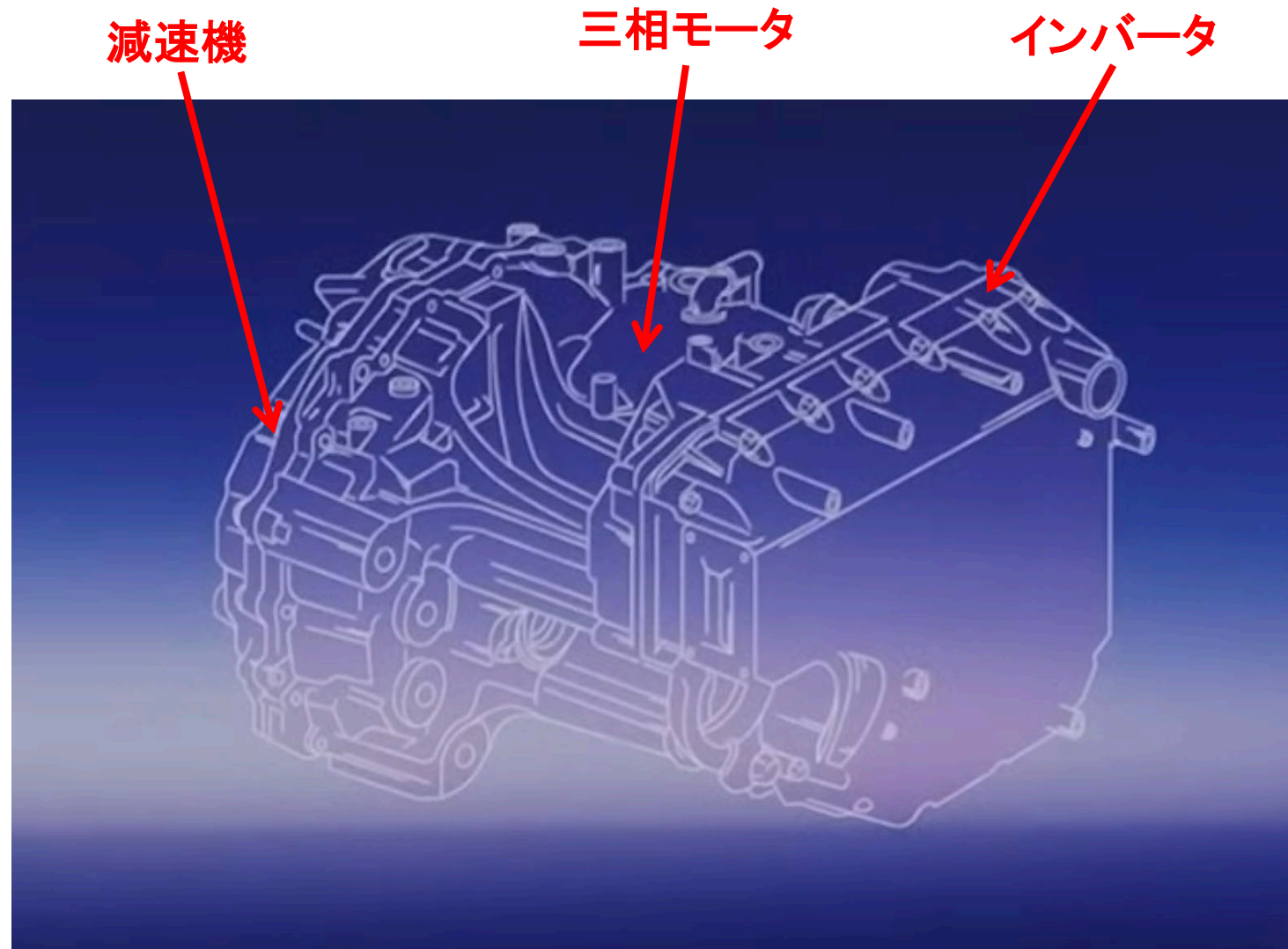
フロント・リア共に352V条件で160kW出力

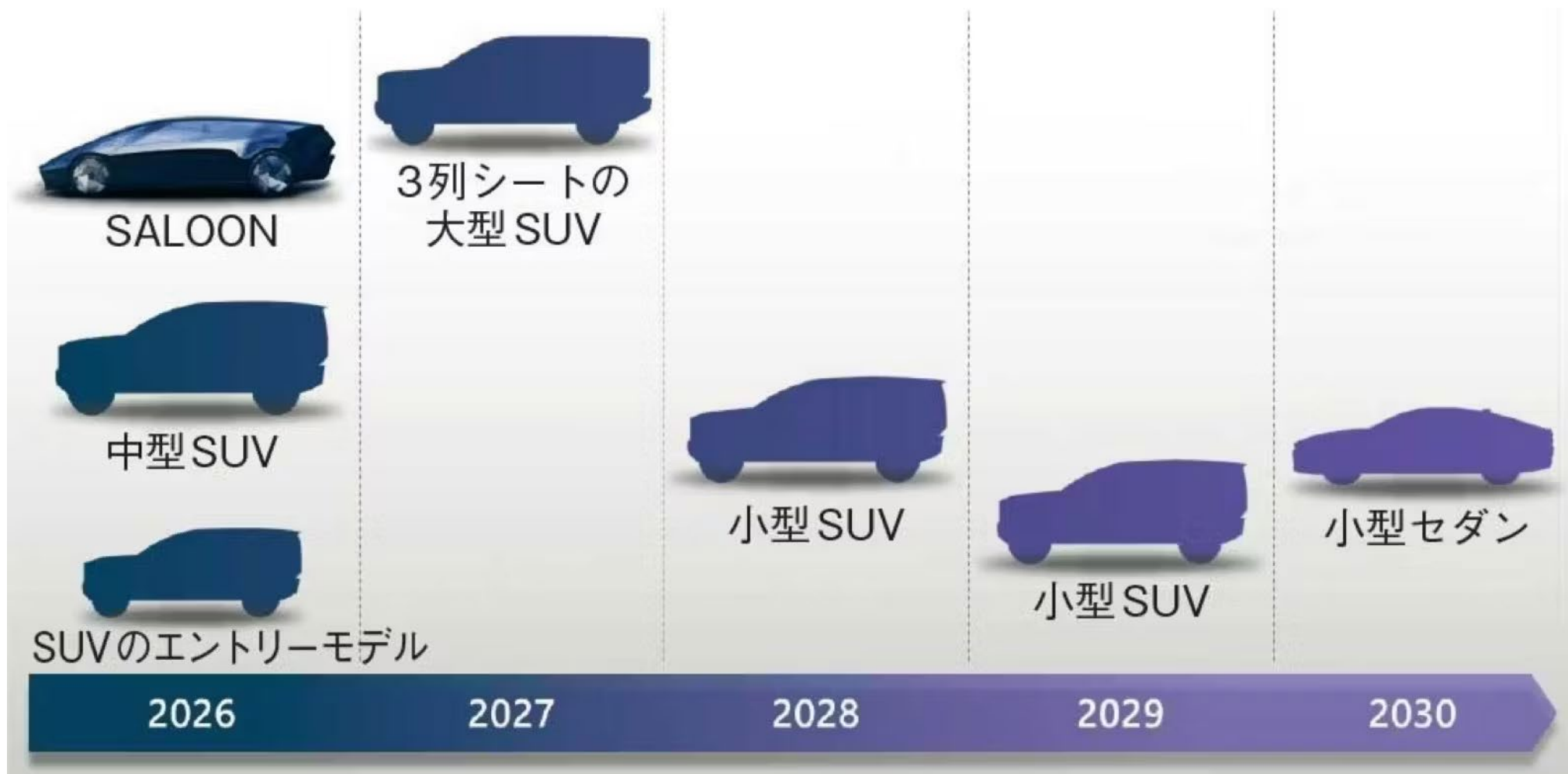
日産ギャラリー(横浜)にて

リア駆動用電動アクスル(ZEEKR 007)

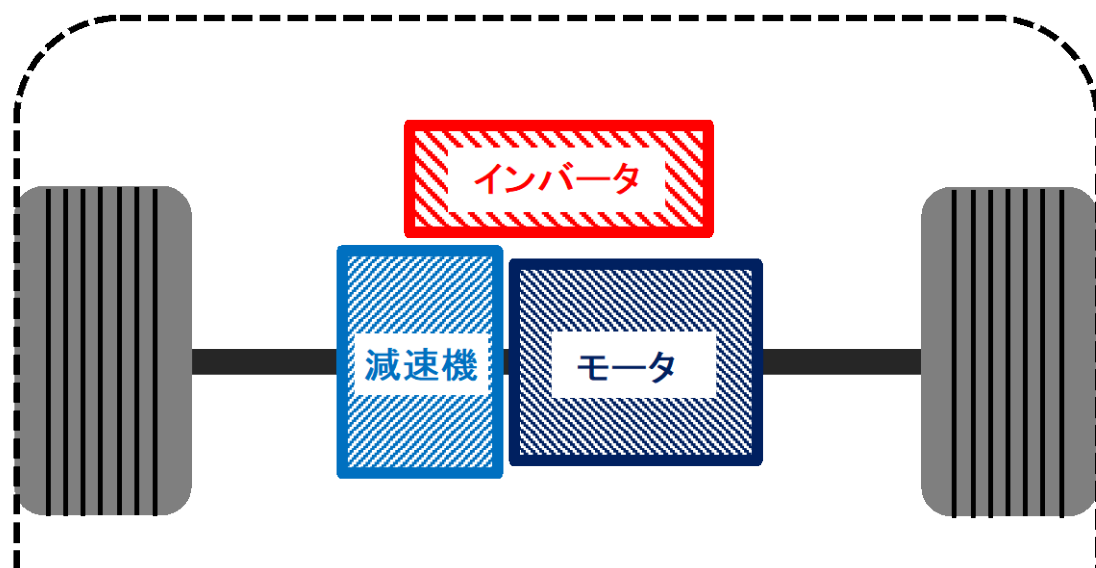


リア駆動用電動アクスル: 310kW/650V



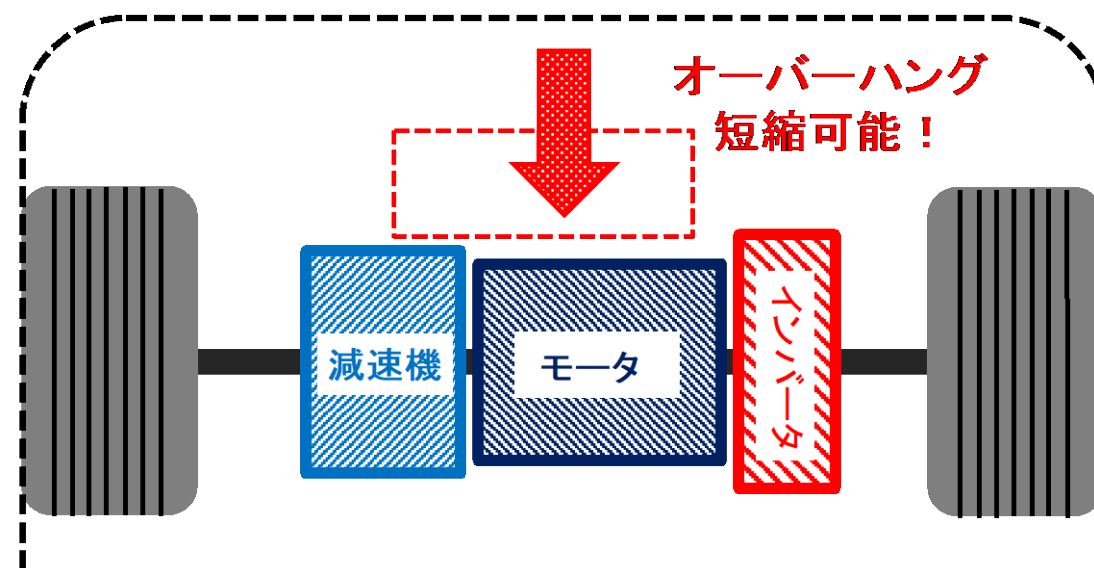


車両進行方向

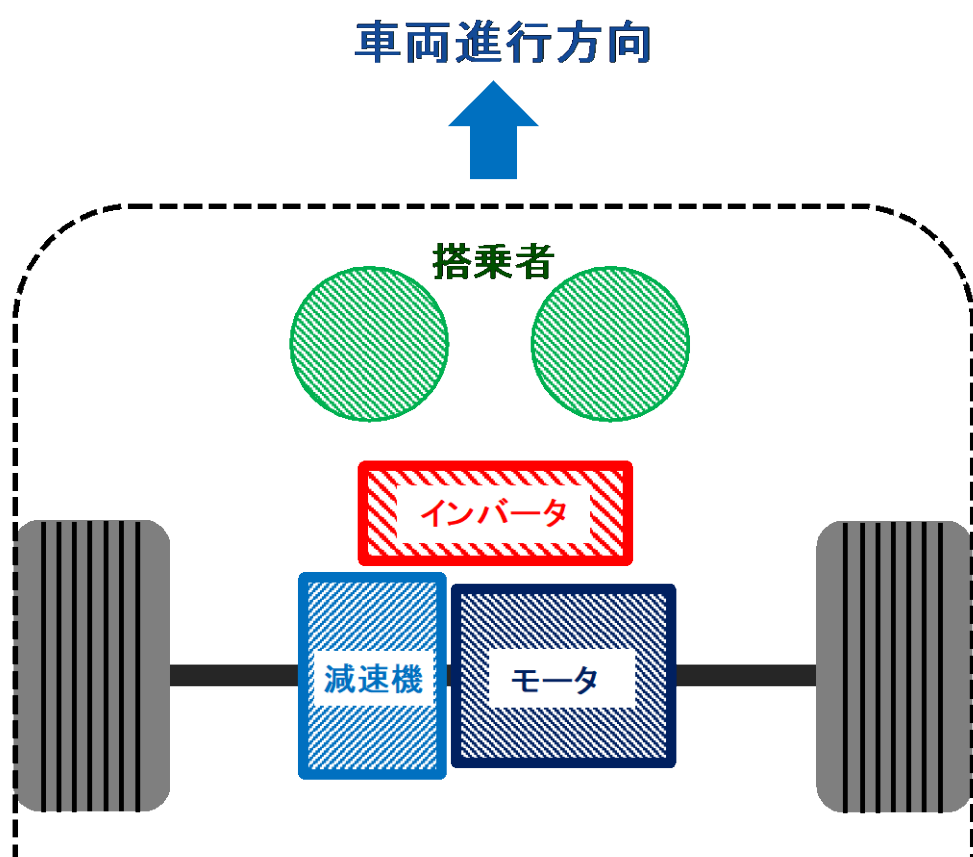


(a) 通常のインバータ横配置

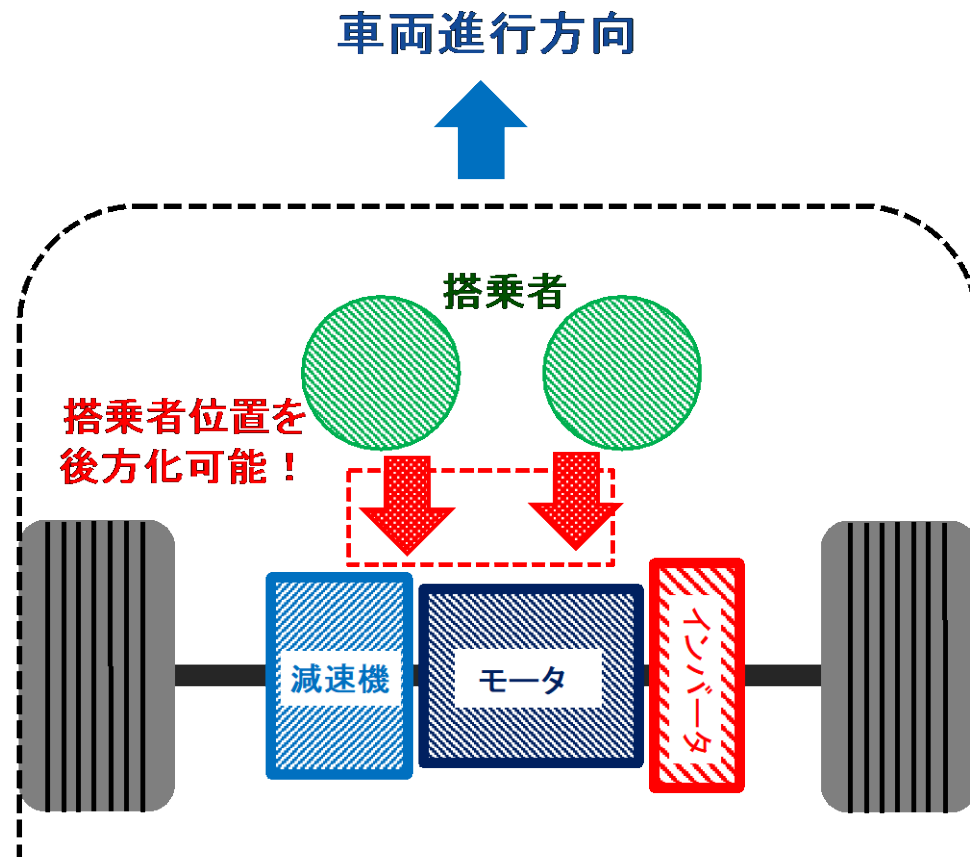
車両進行方向



(b) ホンダが提案するインバータ横配置



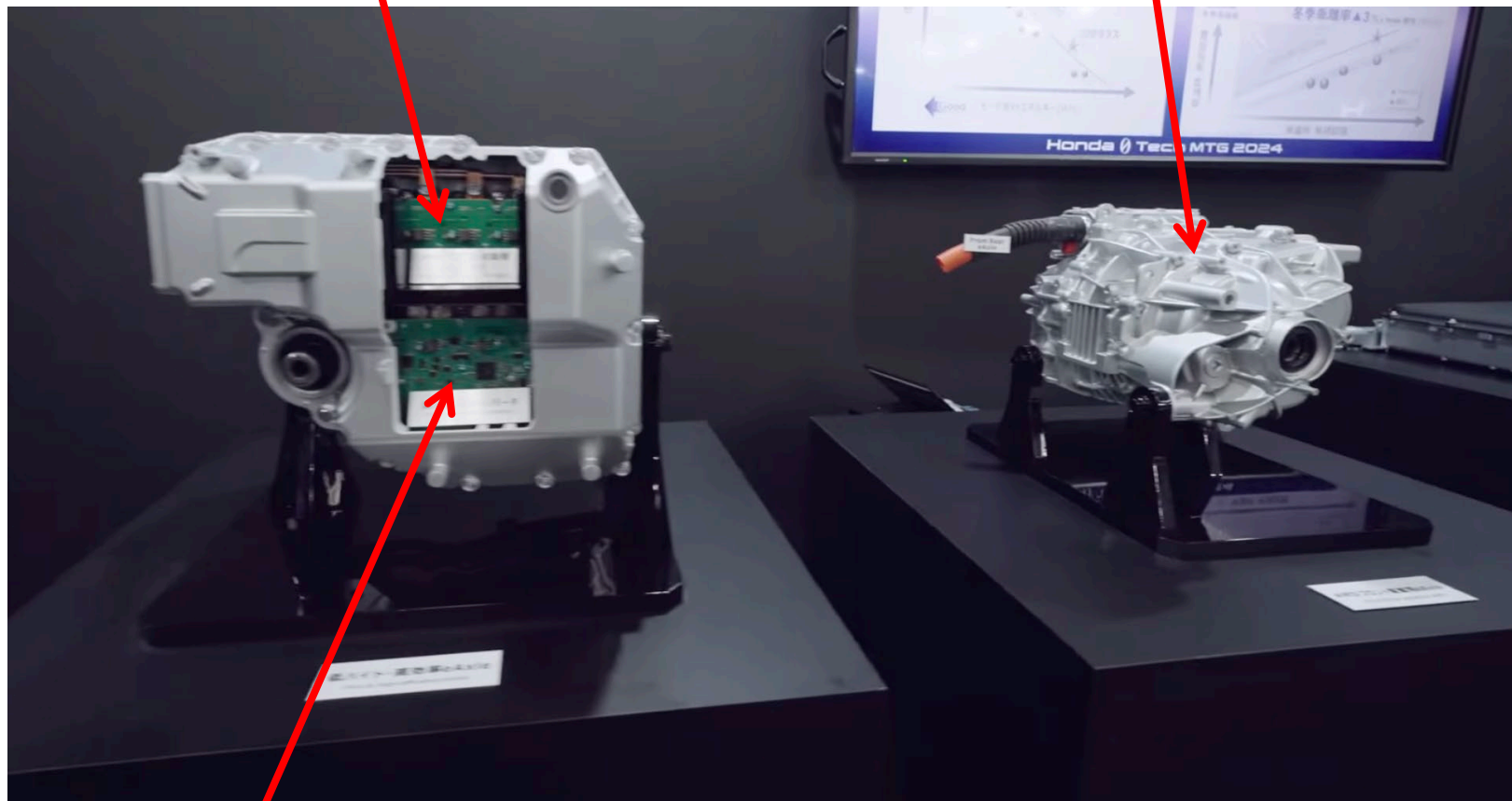
(a) 通常のインバータ横配置



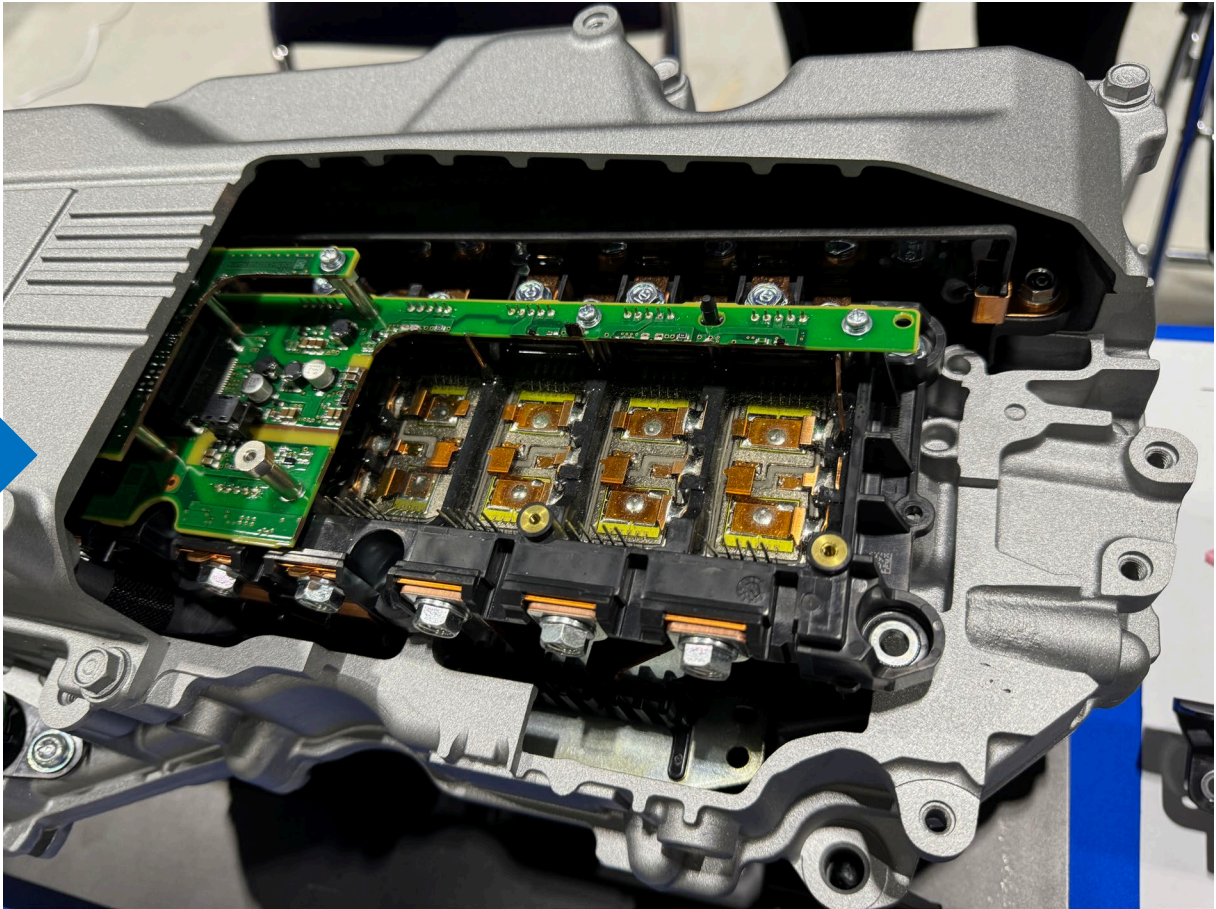
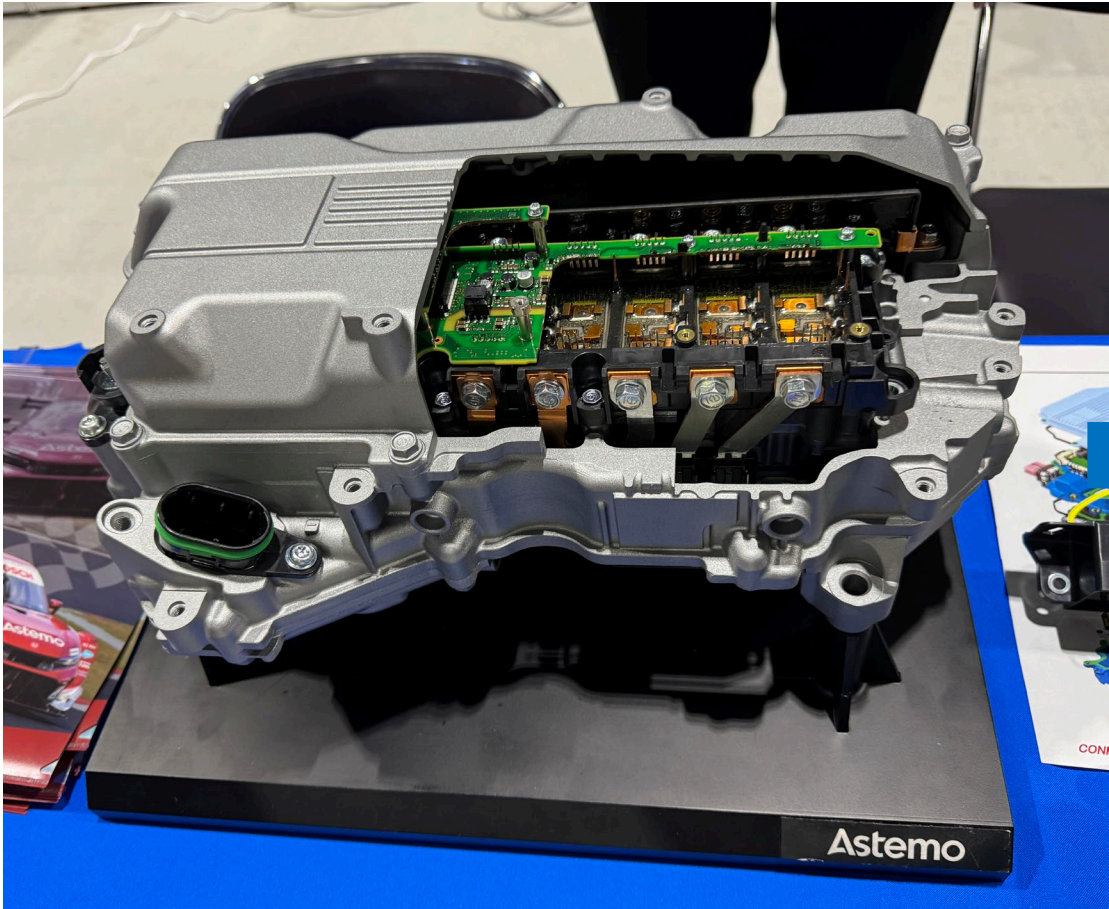
(b) ホンダが提案するインバータ横配置

フロント駆動用インバータ
(50kW or 180kW)

フロント駆動用モータ+減速機

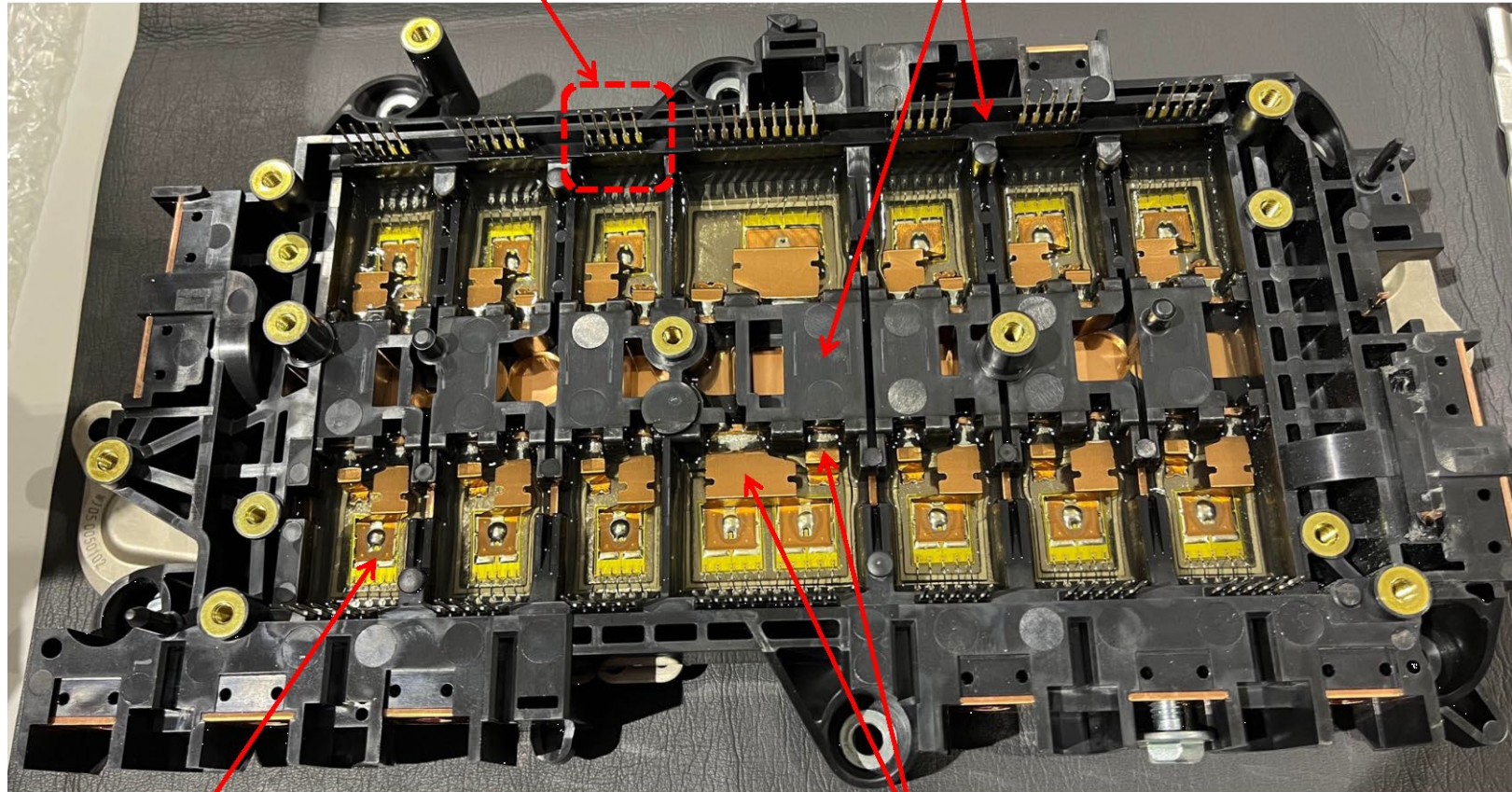


リア駆動用インバータ(180kW)



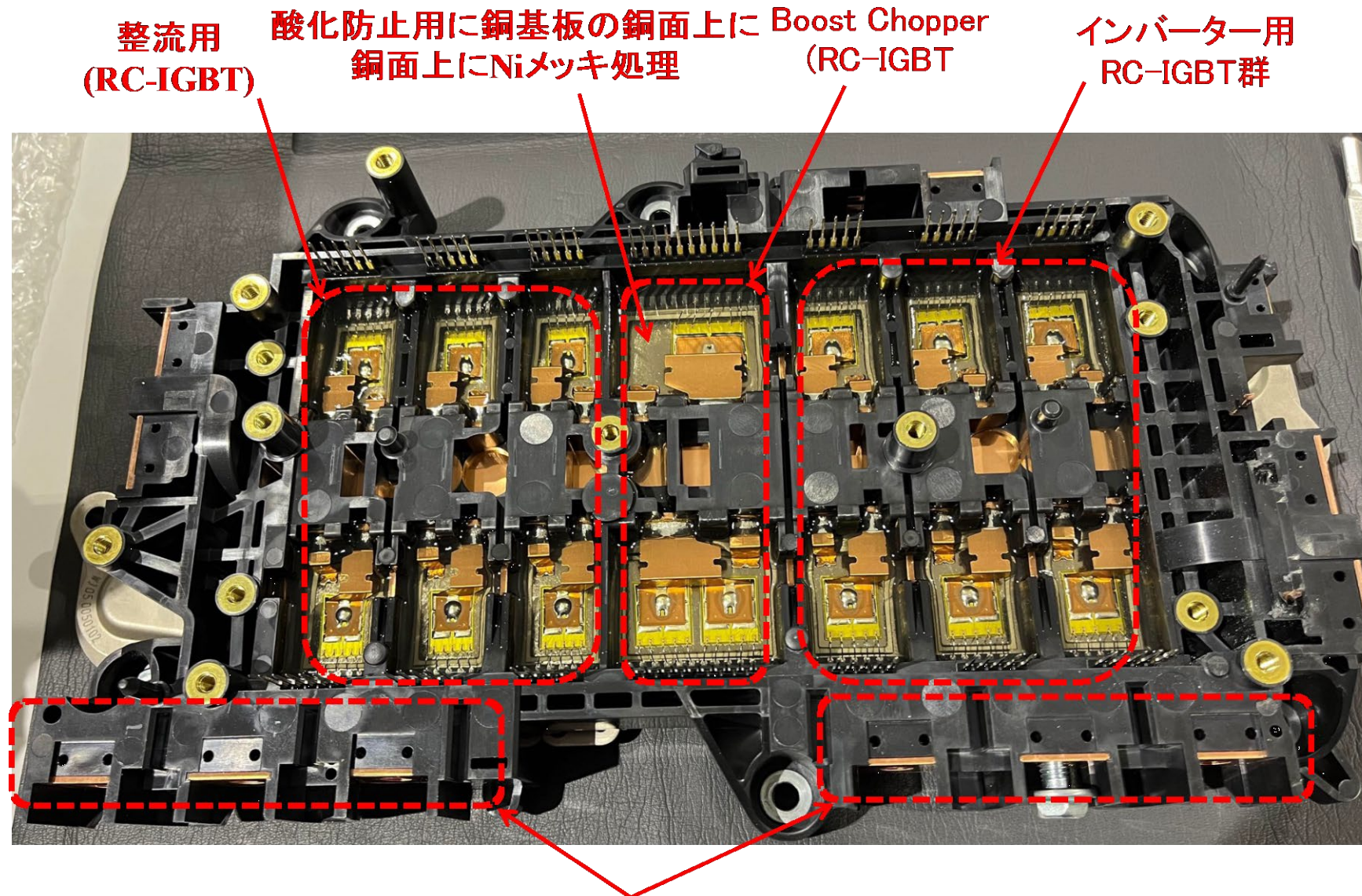


- A: ゲート端子
- B: エミッタケルビン端子
- C, D: 温度センサ端子
- E: カレントミラー電流センサ端子



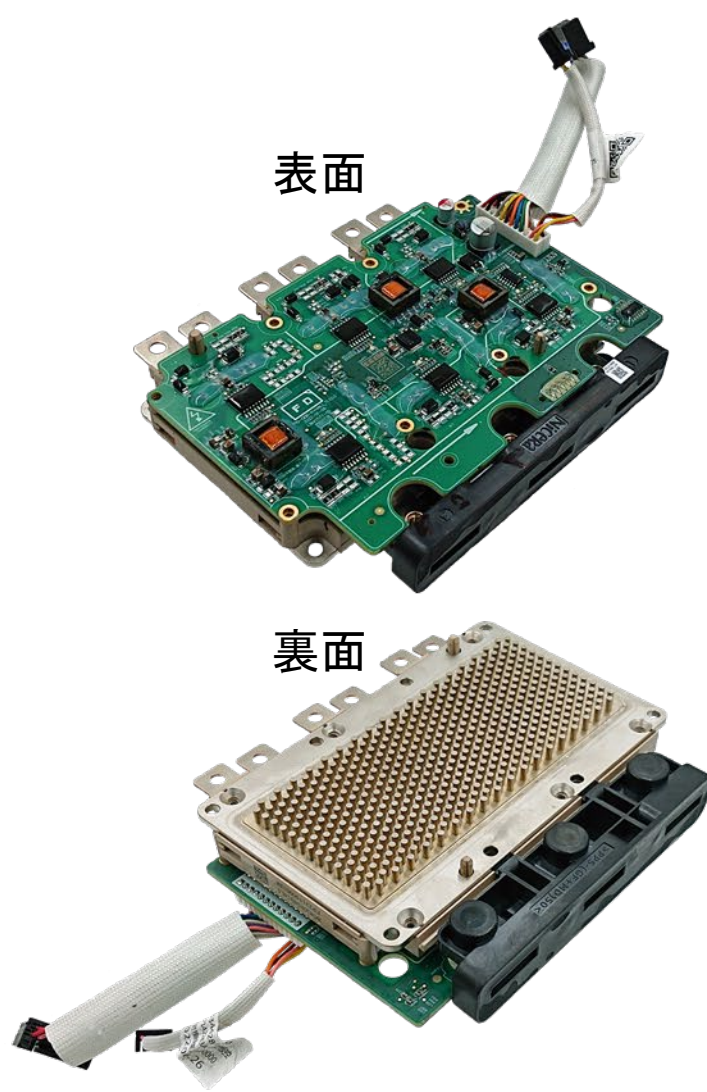
RC-IGBTのエミッタ側をリードフレームに
全面ハンダ付けしている

銅製リードフレームによりアルミワイヤ適用時と比較して
モジュールケースからチップ基板までの距離を20%削減

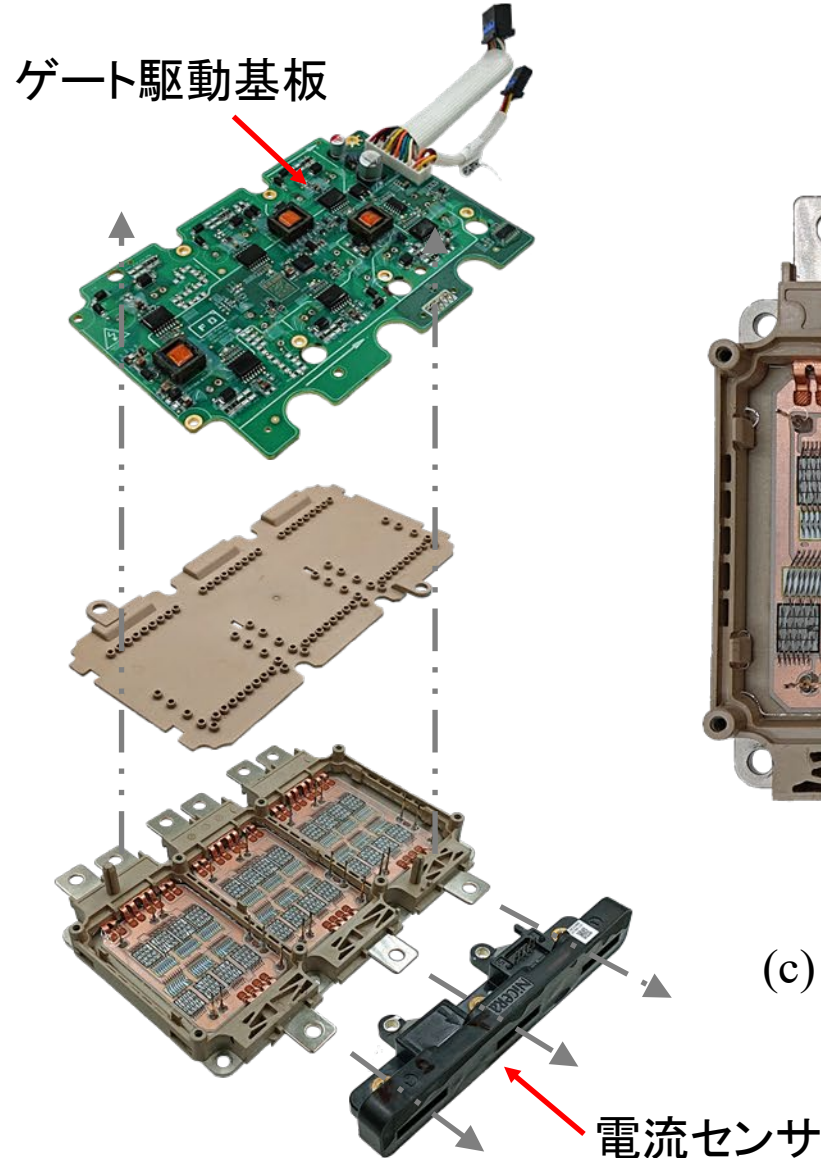


モジュールケース内蔵型電流センサ用ホールコア部

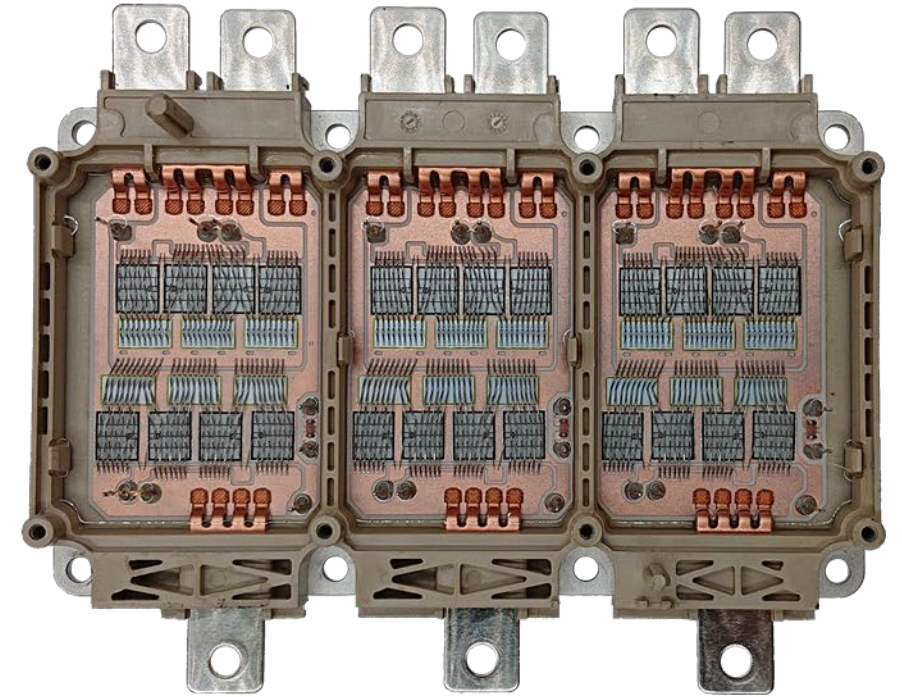
ATTO3 (BYD) 用パワー半導体モジュール



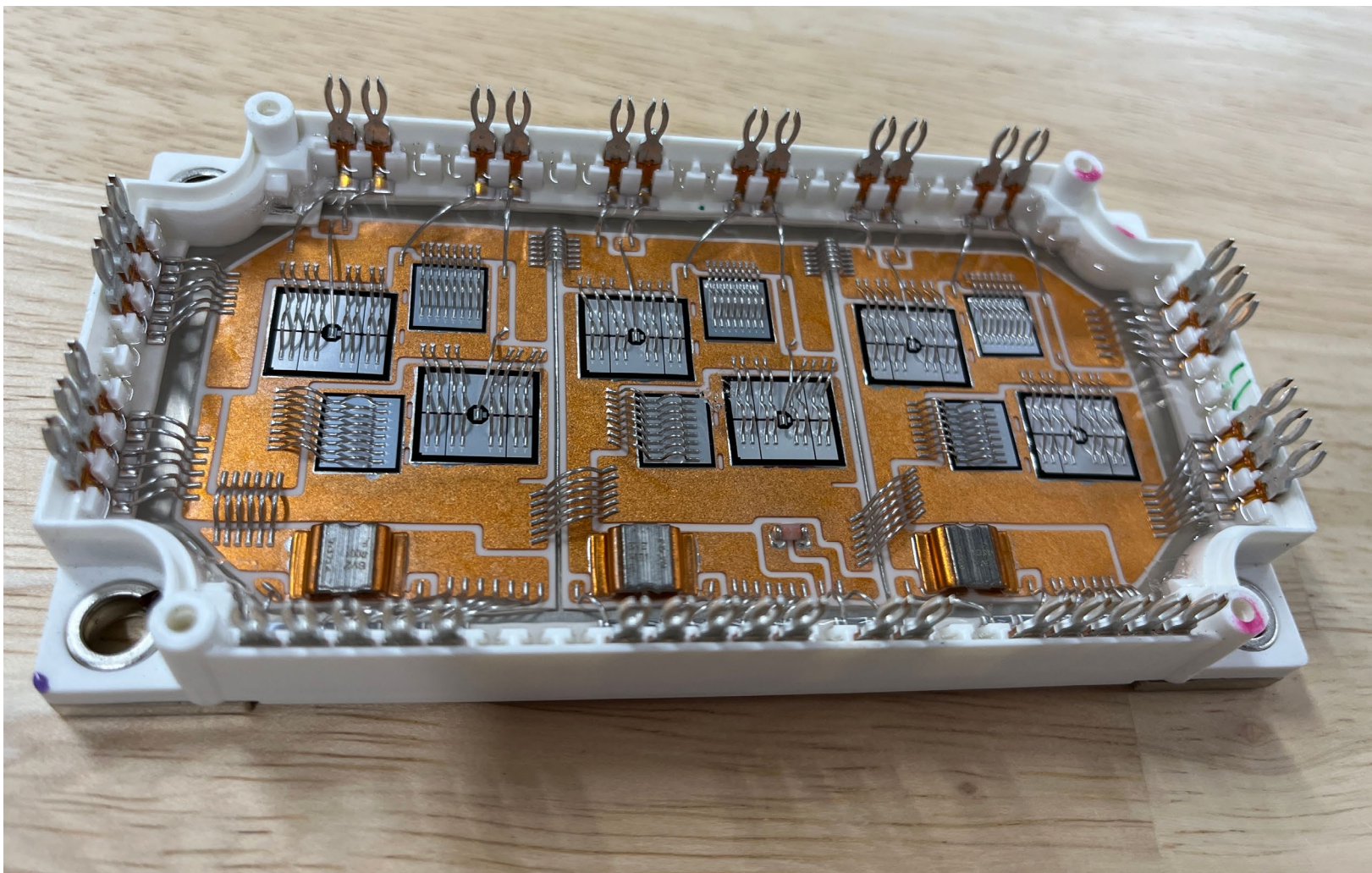
(a) システム鳥瞰図



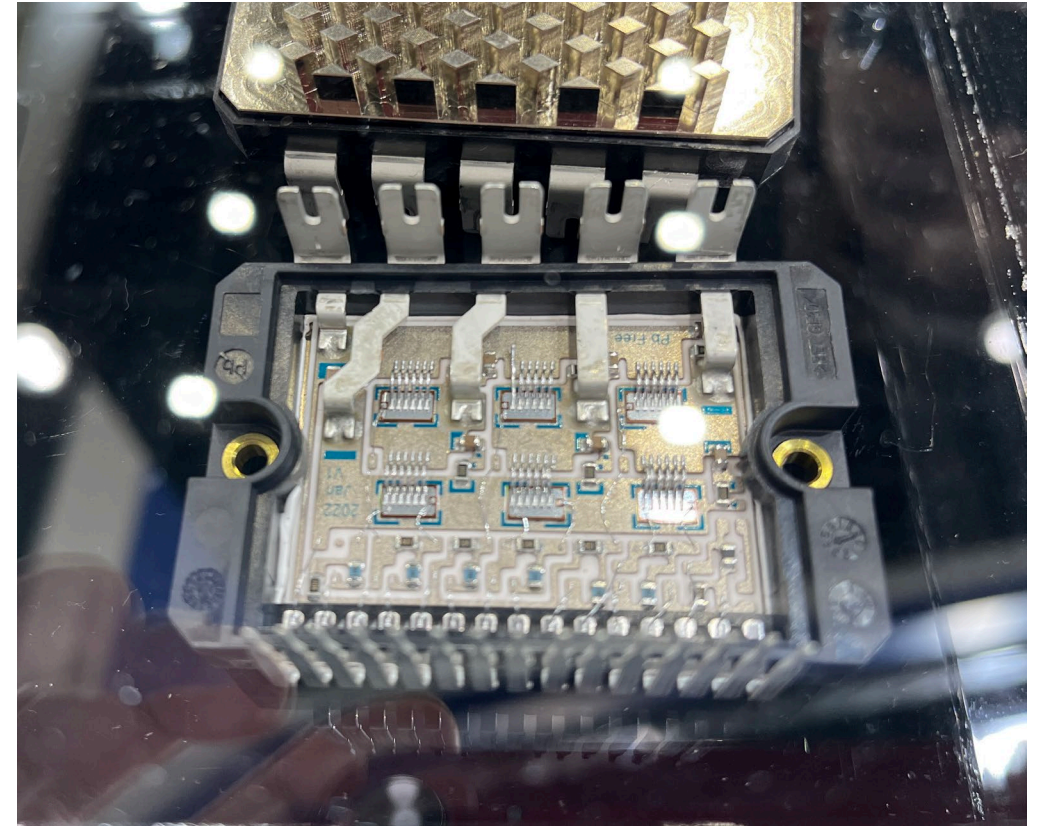
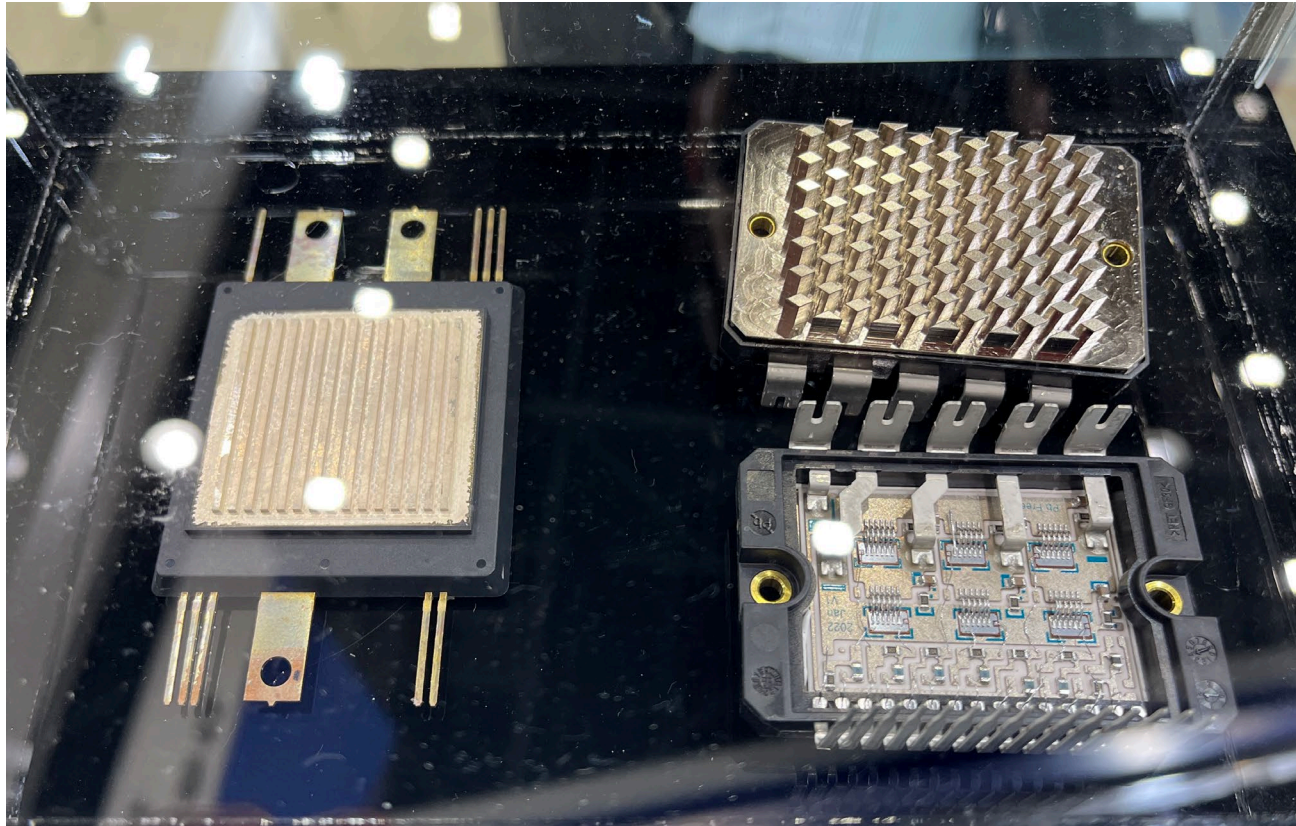
(b) 部品構成



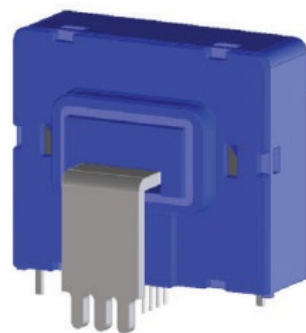
(c) パワー半導体モジュール内部構造



IONIQ 5 (現代自動車) 用 SiC インバータ



・ホール素子(コア)

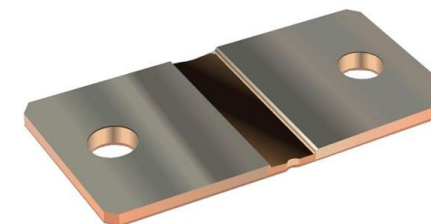


✓ センサー内部で絶縁

✗ 低背化が困難

✗ 非線形なB-H特性により精度低

・シャント抵抗

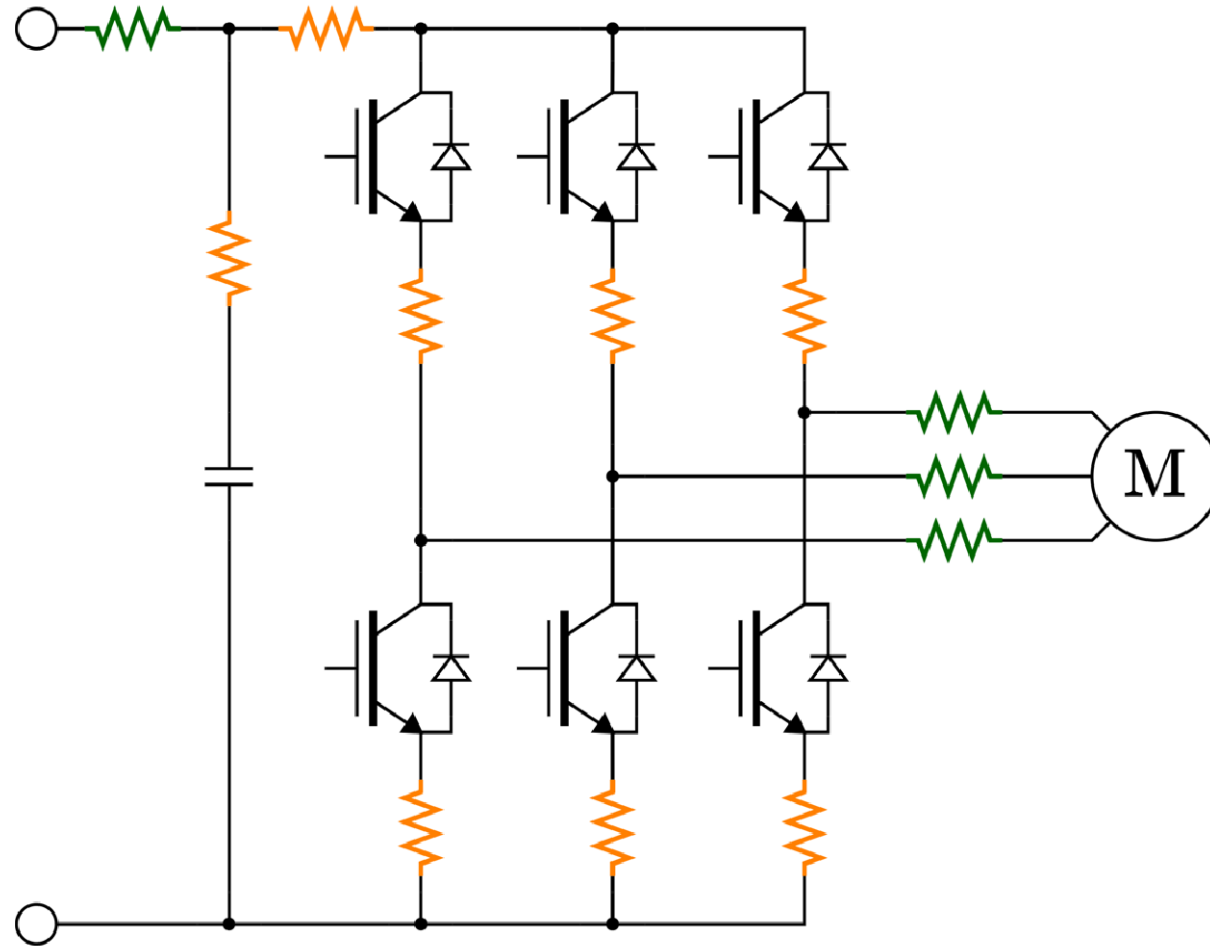


✓ 低背化が容易

✓ 精度が高く、温度特性も良い

✗ 発熱による損失

低抵抗では検出電圧が低く、ノイズの影響を受けやすい



シャント 抵抗を用いた電流検出

・ 過電流検出

短絡耐量以内に素子をオフ
→ アナログ処理

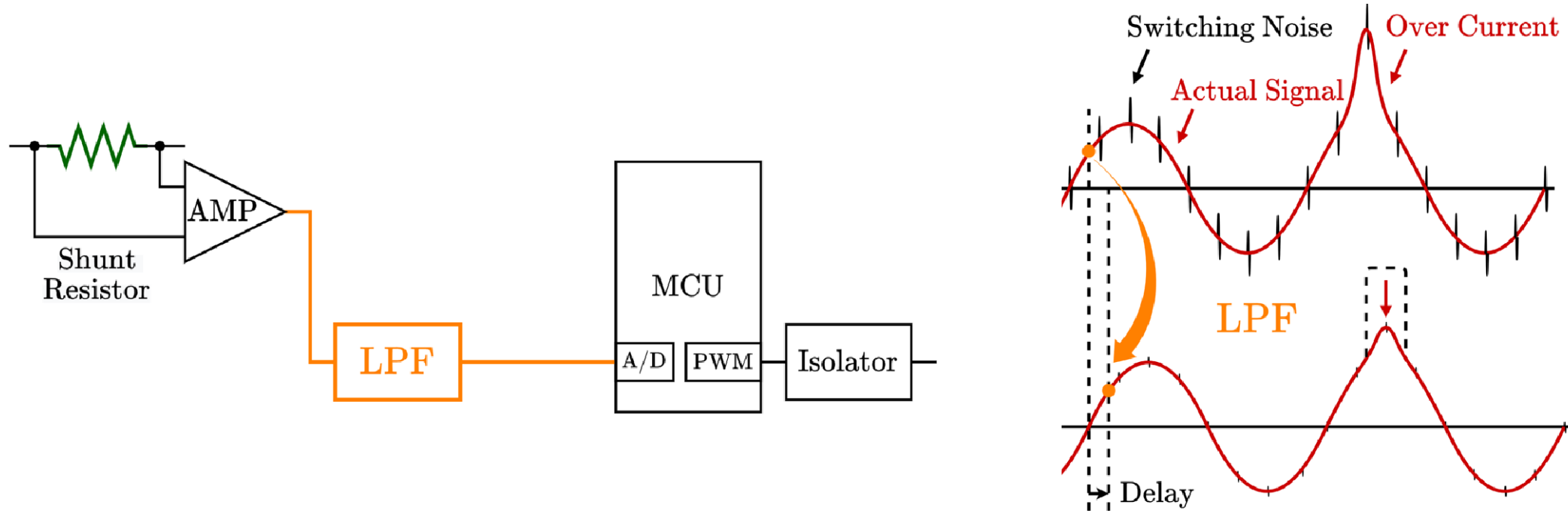
・ モーター制御、システムの保護

マイコンにてA/D変換、PWM生成
→ デジタル処理

不規則なスイッチングノイズ
+ 低抵抗シャントによるノイズ

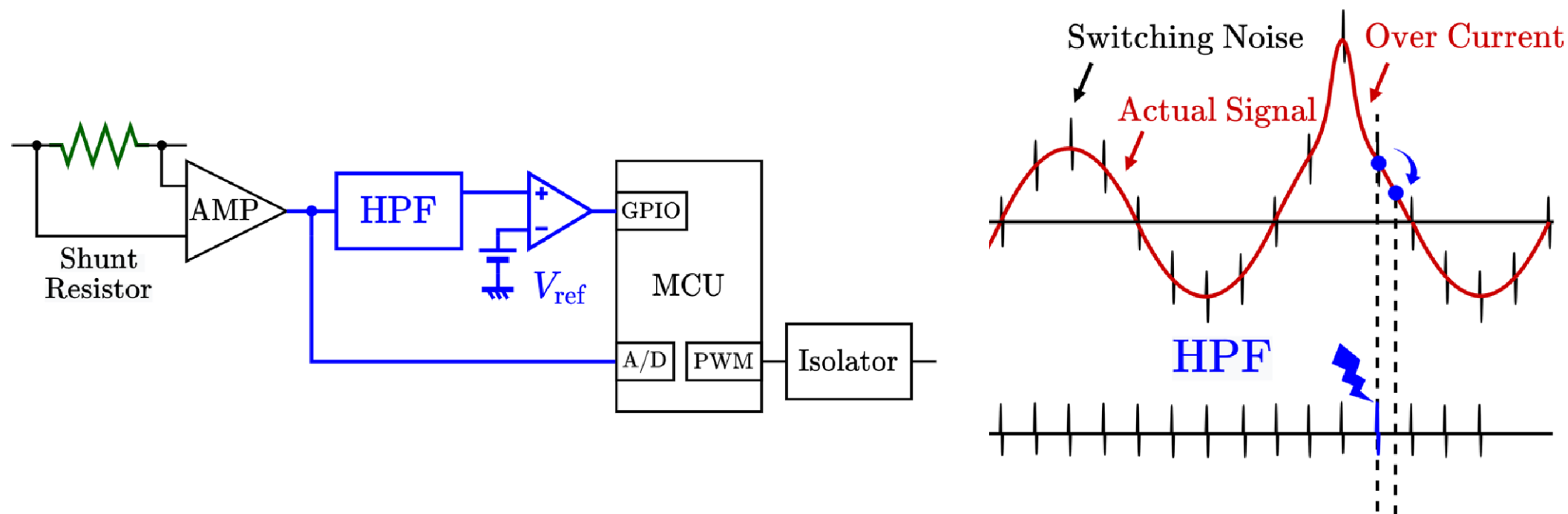


本研究にて報告



- 検出信号を強力なLPF（ f_c の低い）に接続、ノイズ成分を取り除く

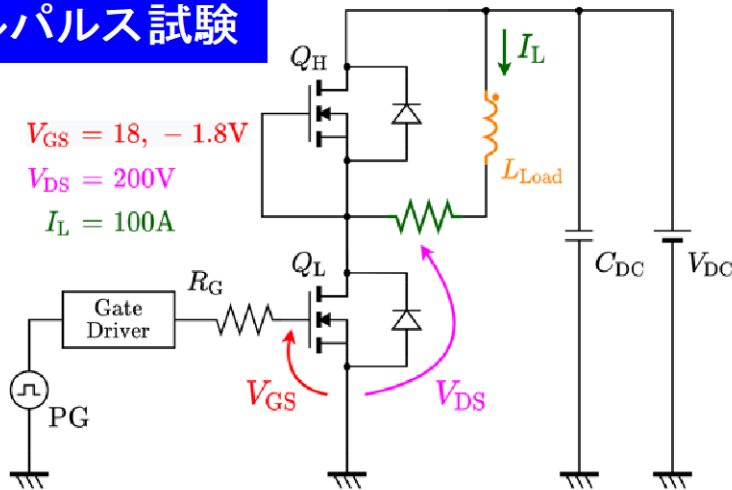
信号の遅延・減衰が生じ、急な負荷変動・過電流に対応できない



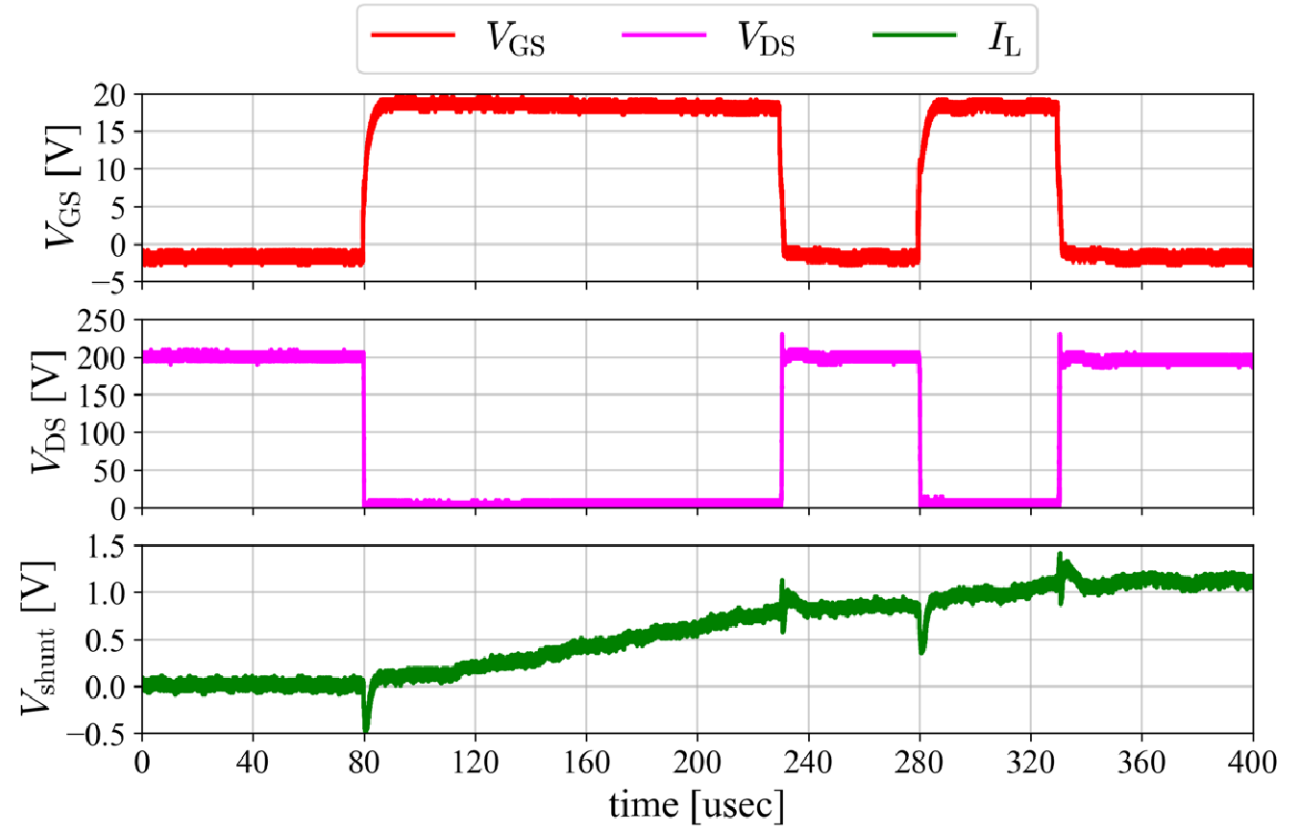
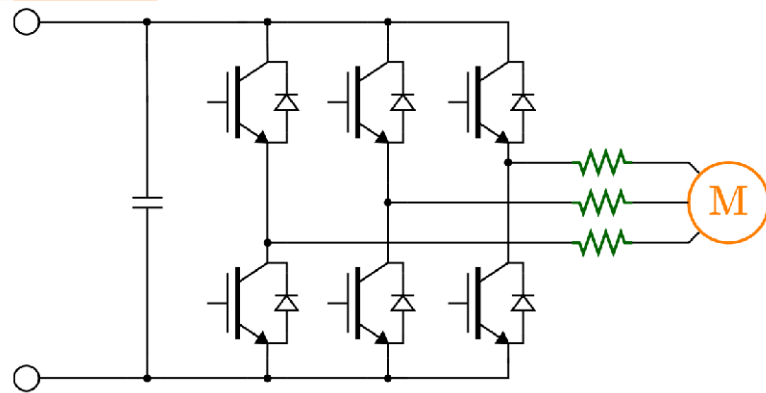
- HPFにてノイズ成分のみ抽出、MCUにて微少遅延を与えサンプリング

サンプリング周期をアクティブに変化させ、ノイズを回避

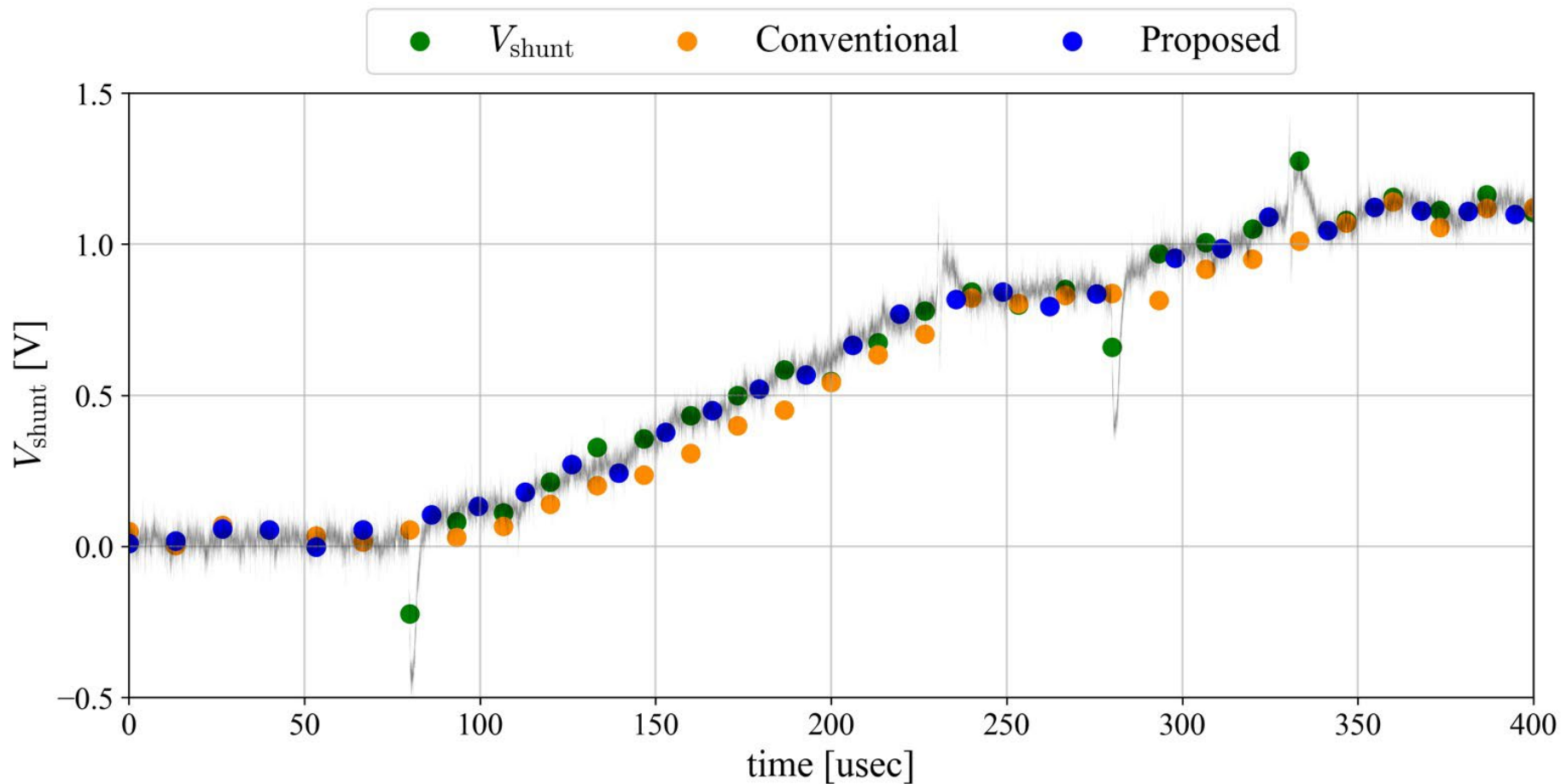
ダブルパルス試験



インバータ



インダクタ電流によりモーターの入力電流を模擬



遅延時間

15.5 μ sec

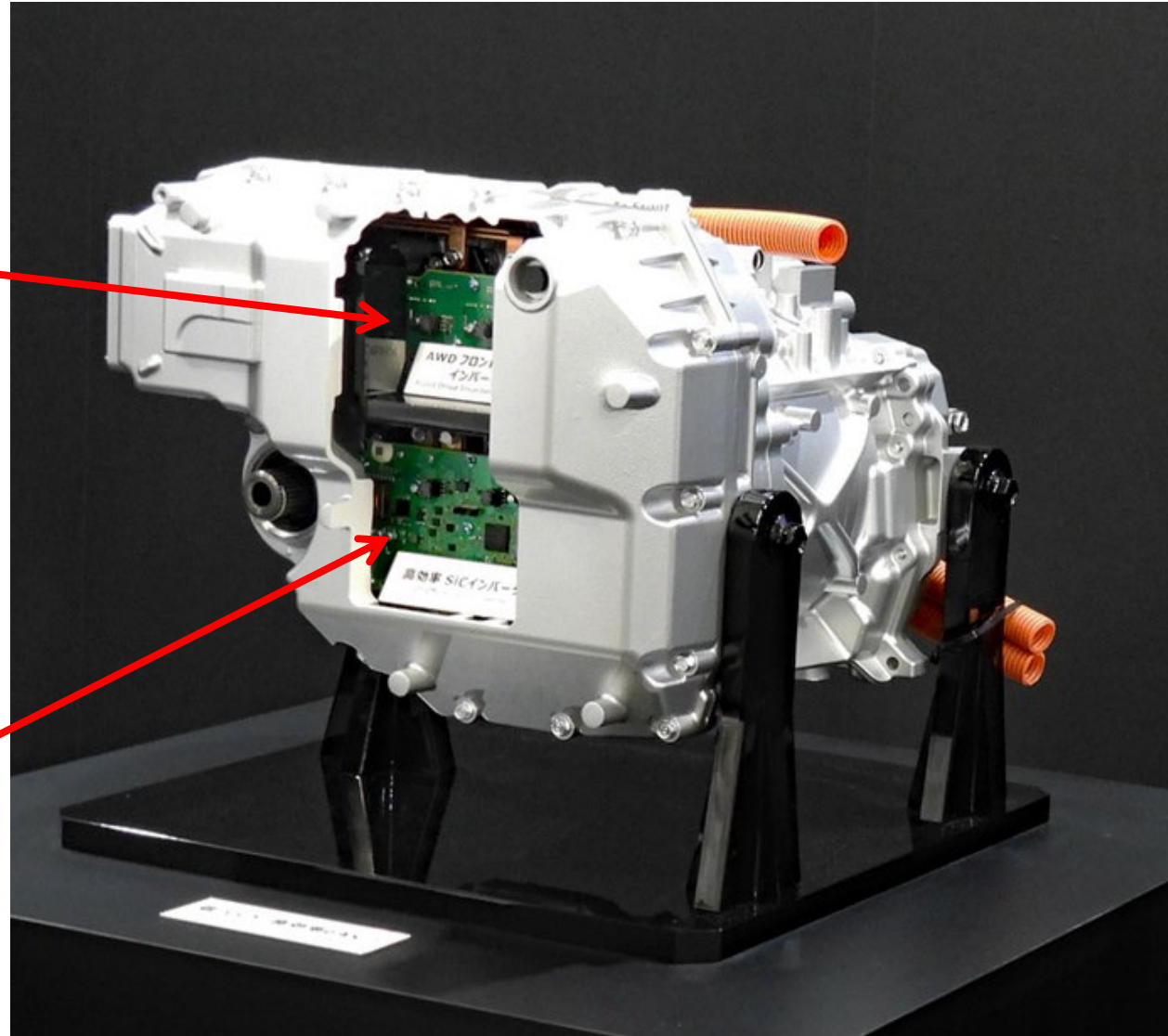


0.0 μ sec

アクティブサンプリング手法の有用性を確認

フロント駆動用インバータ
(50kW or 180kW)

リア駆動用インバータ
(180kW)



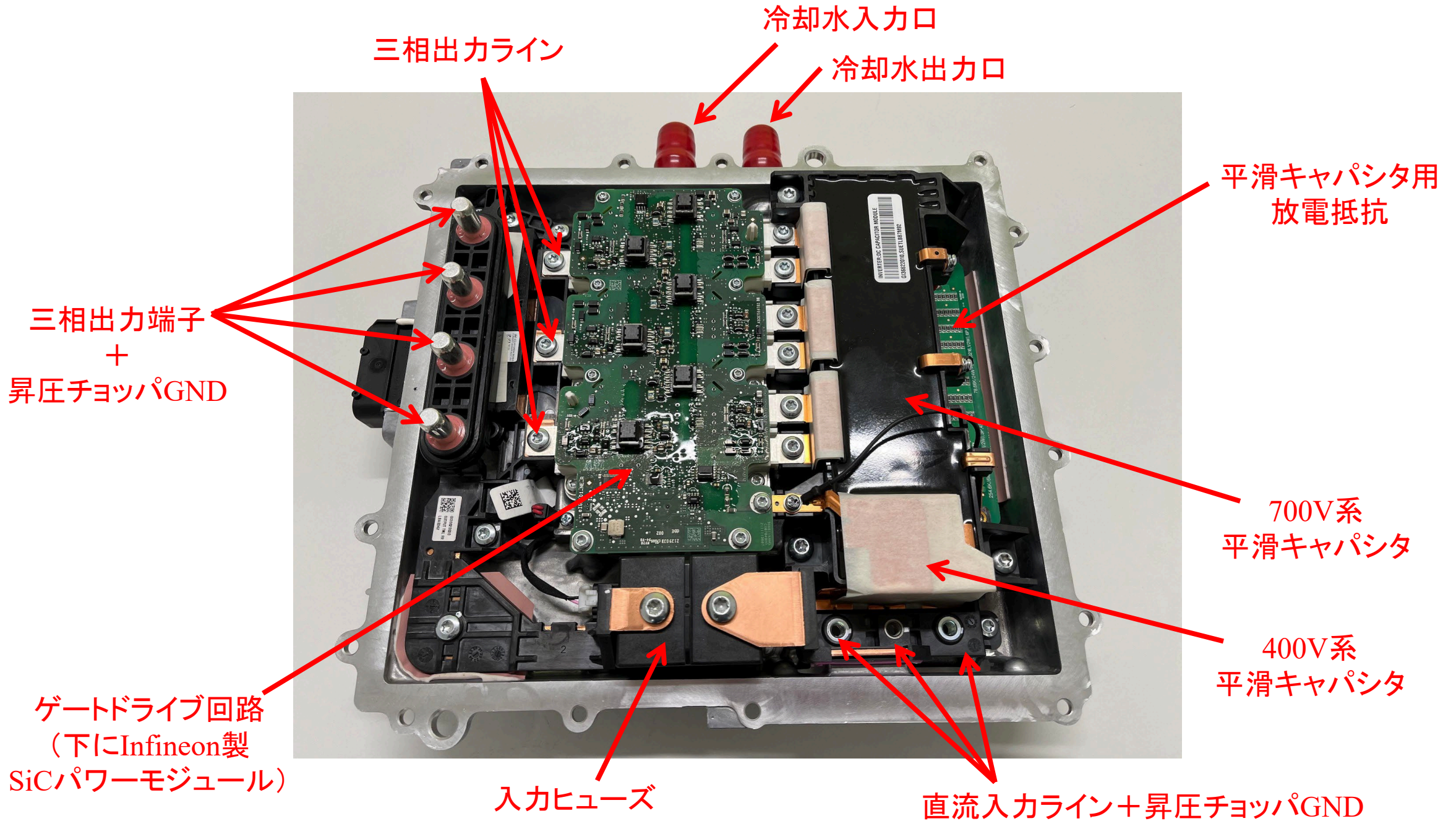
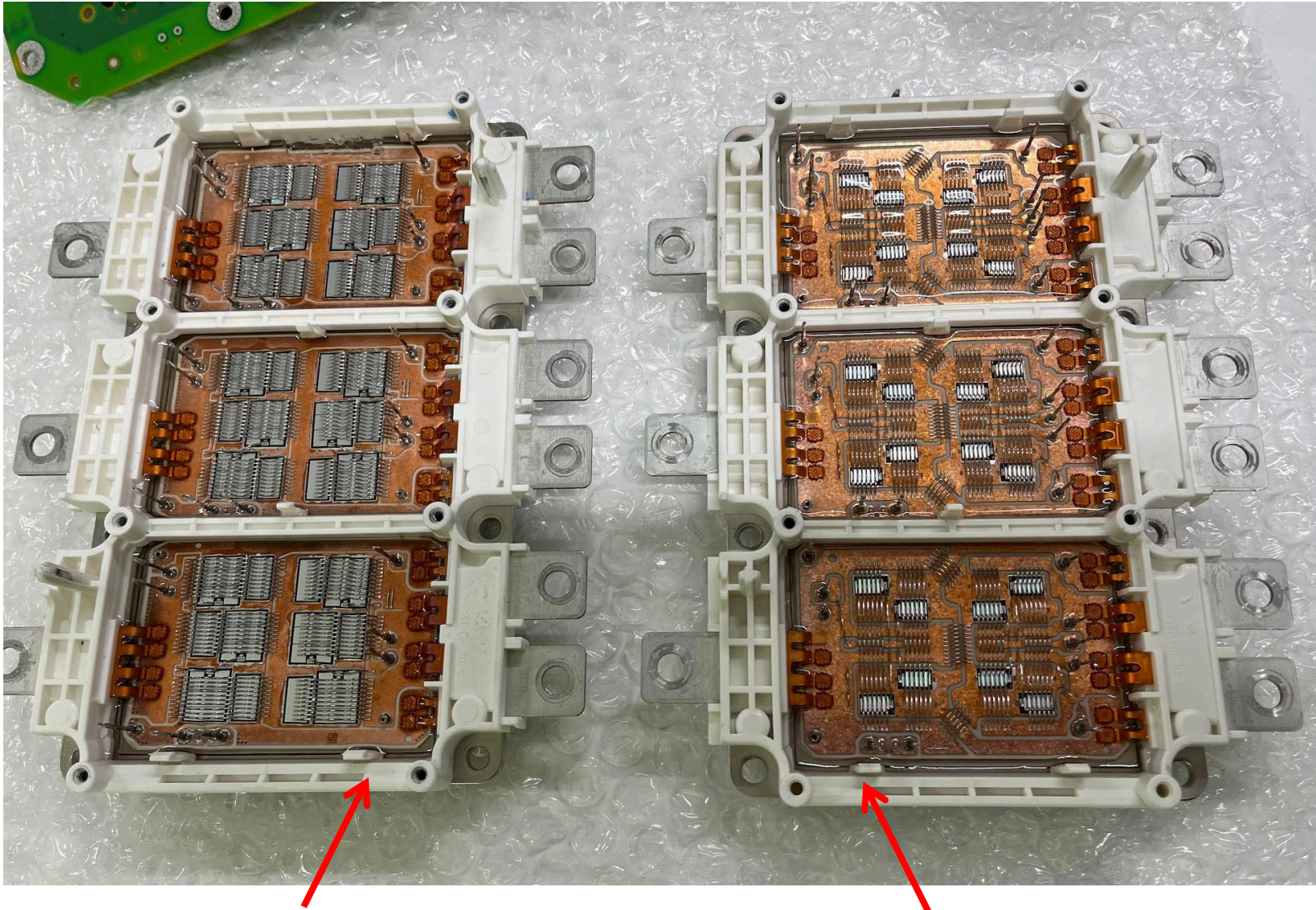


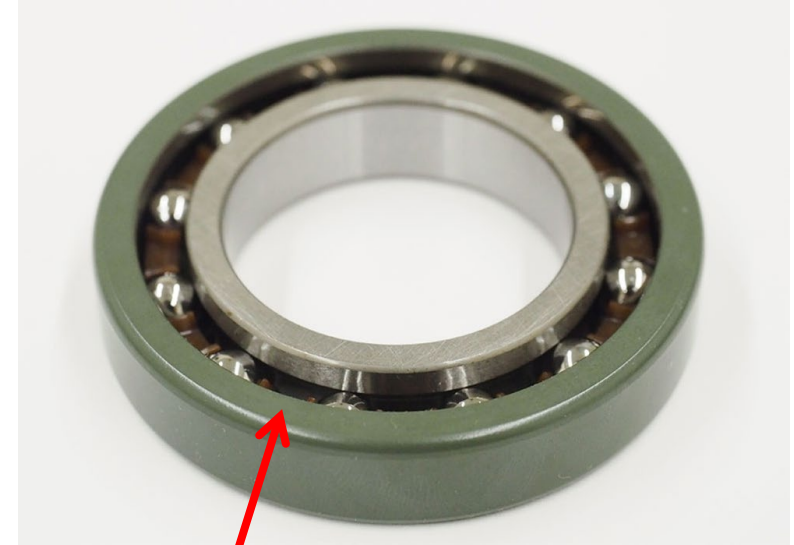
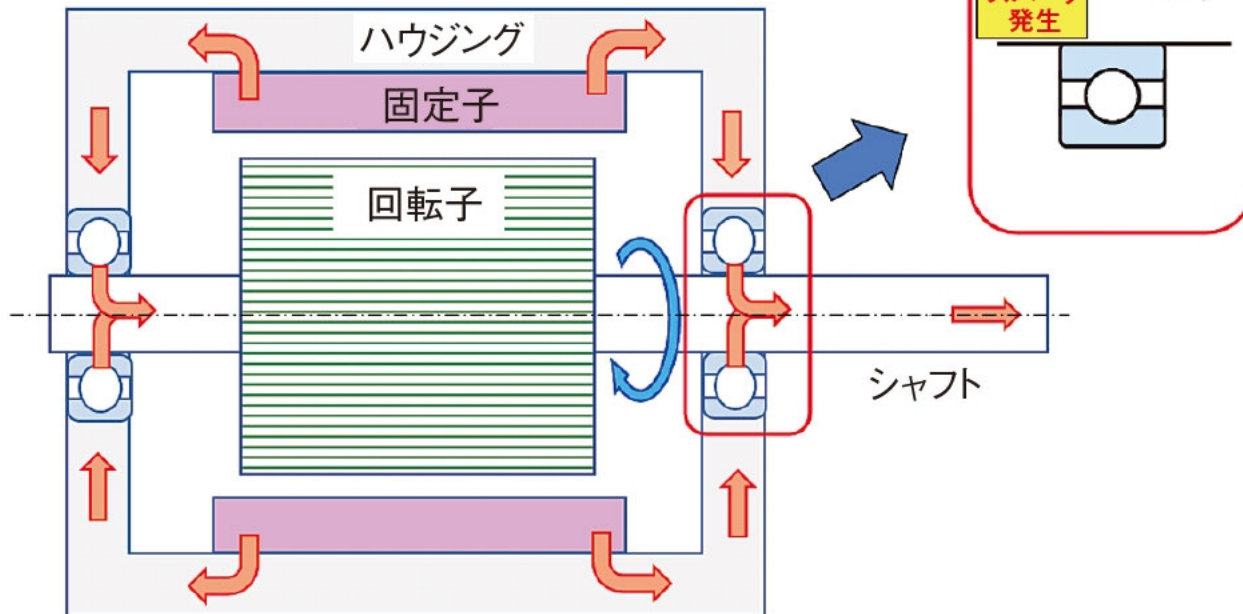
図6. IONIQ 5用SiCインバーターは昇圧チョッパとしての機能も備えている



ID.3 (Si IGBT パワー半導体・150kW 対応)

IONIQ 5 (SiC MOS-FET パワー半導体・150kW 対応)

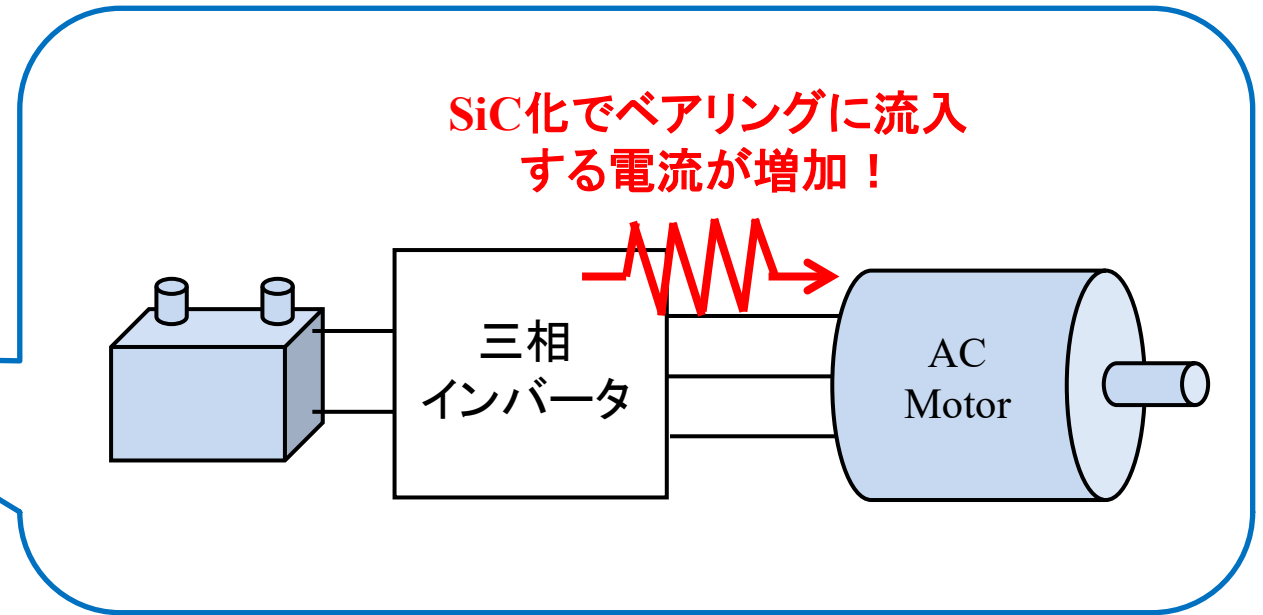
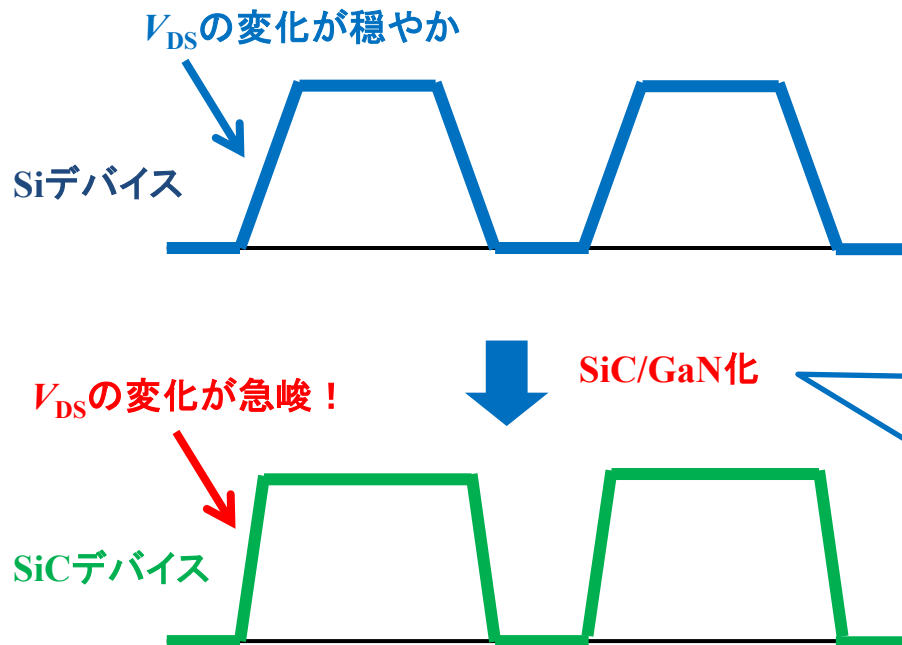
モーター周辺構造イメージ

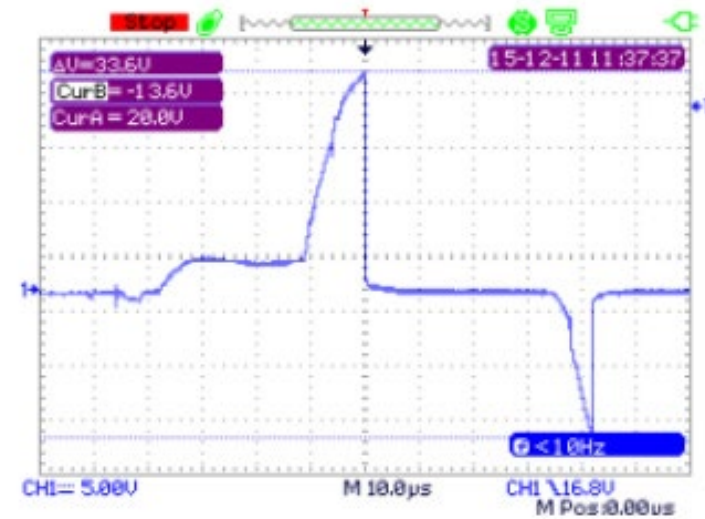
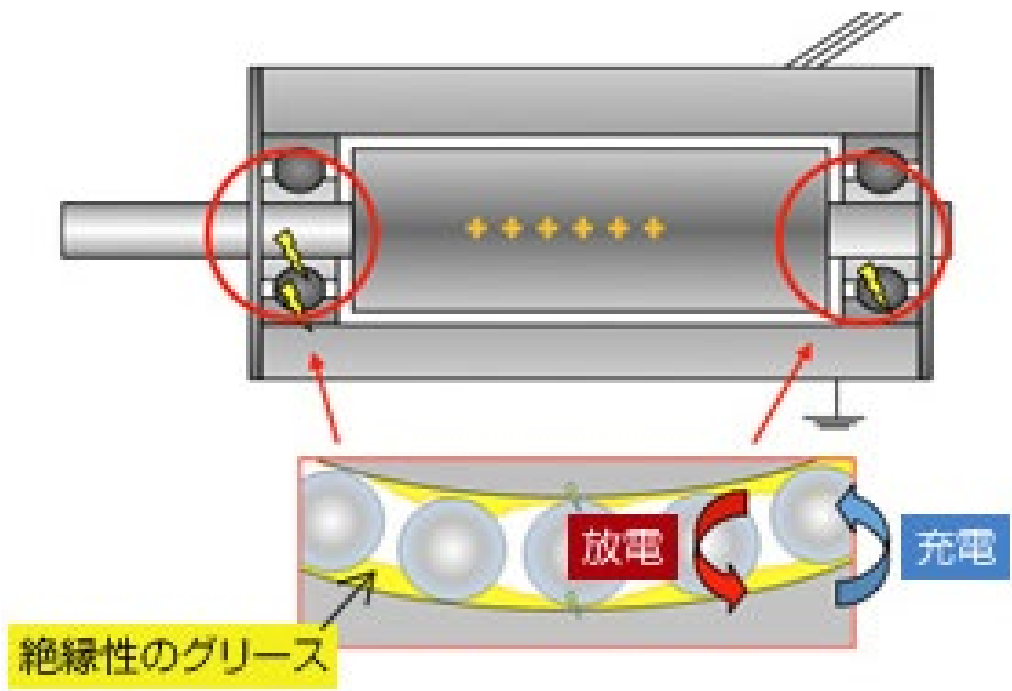


スイッチング遷移時間とベアリング電流との関係

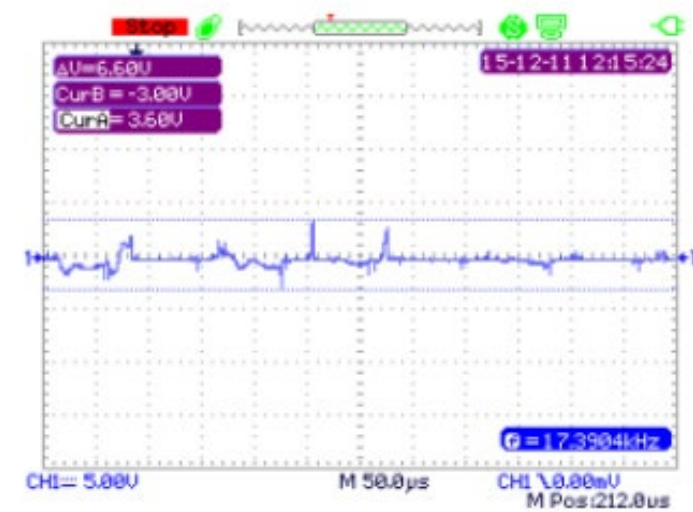
パワー素子のスイッチング速度 dv/dt によって流れる電流 (Capacitive bearing currents) : パワー素子のスイッチング速度 dv/dt は、IGBT・MOS-FET 等による 高速スイッチング素子では、 $3\text{kV}/\mu\text{sec} \sim 10\text{kV}/\mu\text{sec}$ と高速化されている。そのスイッチングによる電圧の変化にて、ベアリング内部に電流が流れる。ベアリングの静電容量を C_b とすると、ベアリング電流 i_b は次式で与えられる。

$$i_b = C_b \cdot \frac{dv}{dt}$$



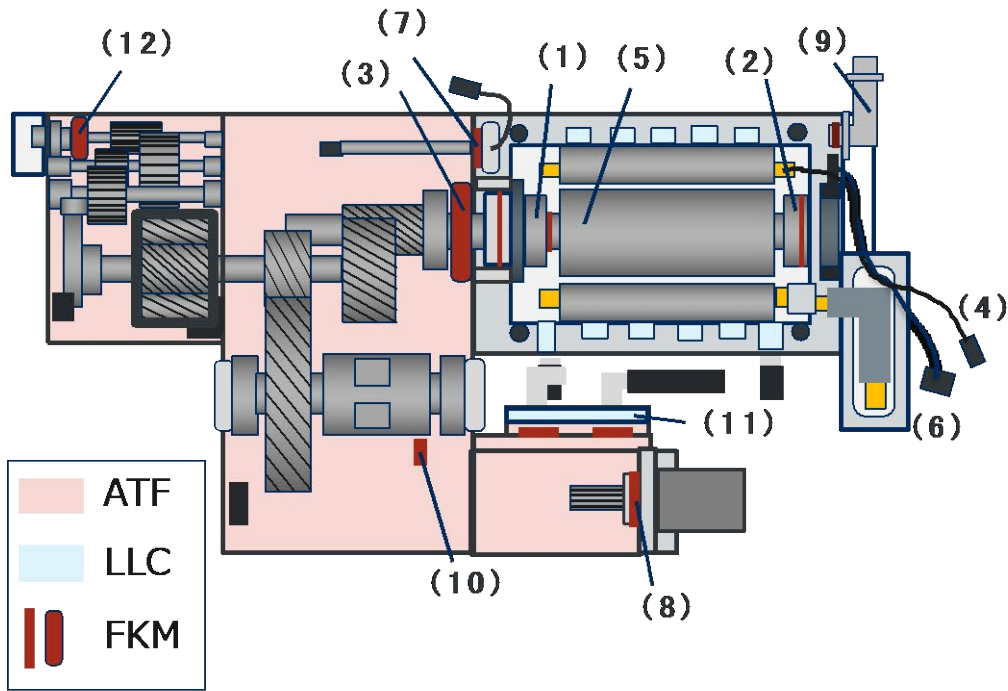


電蝕初期の軸電圧



電蝕中期・終期の軸電圧

スイッチング遷移時間とベアリング電流との関係



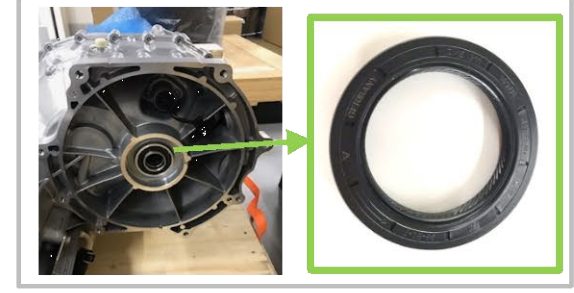
(1) ボールベアリング
(FKM/3元系)



(2) 絶縁ボールベアリング
(FKM/3元系)



(3), (12) ラジアルシャフトシール
(FKM/3元系)



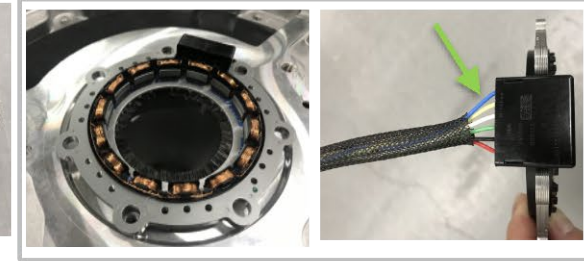
(4) 温度センサ
(内側: PTFE, 外側: XLPE)



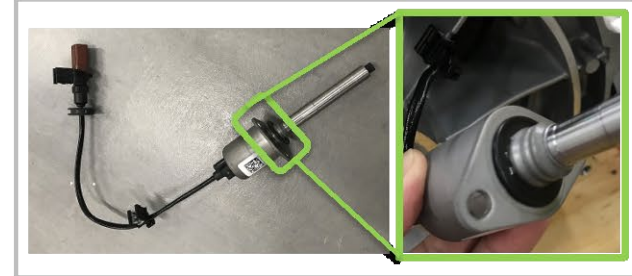
(5) ロータシャフト O-リング
(FKM/3元系)



(6) レゾルバーのケーブル絶縁被覆材料
(FEP)



(7) トランスミッションオイルセンサのシール
(低温フッ素ゴム)



(8) 電動オイルポンプ
O-リング
(FKM/3元系)



(9) ウォータージャケット
O-リング (FKM/3元系)



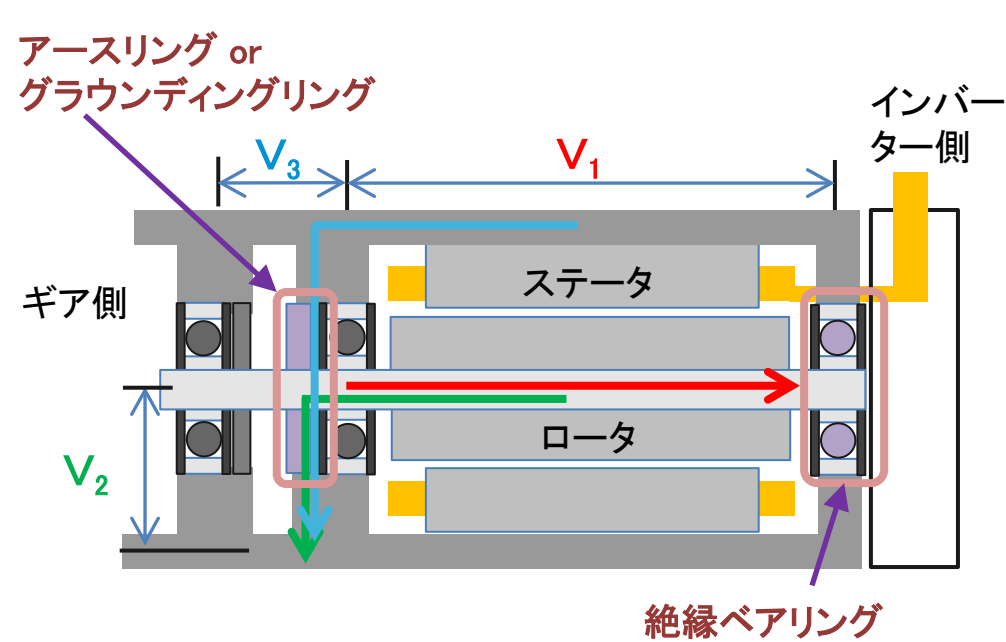
(10) オイルガイドチューブ
O-リング (FKM/3元系)



• E-Axleのモータとギア部品の多くにフッ素材料が使用されていることを確認。

※ ダイキン工業様分解解析結果

- ・モータには、2種類の絶縁ベアリングが使用されている。(a) 絶縁セラミックボールを使用したベアリングと(b) 絶縁セラミックコーティングしたベアリングで、両者はモータの軸に沿った循環電流を遮断するために使用される。
- ・(c) 導電性カーボンブラシを有するアースリング と (d) 導電性PTFEコンパウンドを用いたグラウンディングリングがあり、両者は筐体-軸間電位(V_2)と筐体間電位(V_3)を減少するために使用される。



V_1 : 軸端間電位
 V_2 : 筐体-軸間電位
 V_3 : 筐体間電位

標準的なベアリング
[ギア側]



(a) 絶縁ベアリング
(セラミックボール使用)



(b) 絶縁ベアリング
(セラミックコーティング)



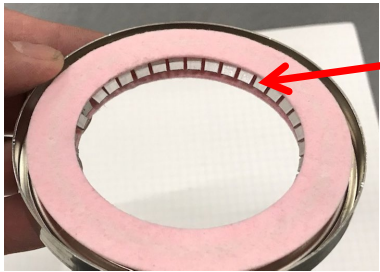
Schaeffler製
(参照: 福田交易ホームページ)

(c) アースリング
Porsche/Taycan



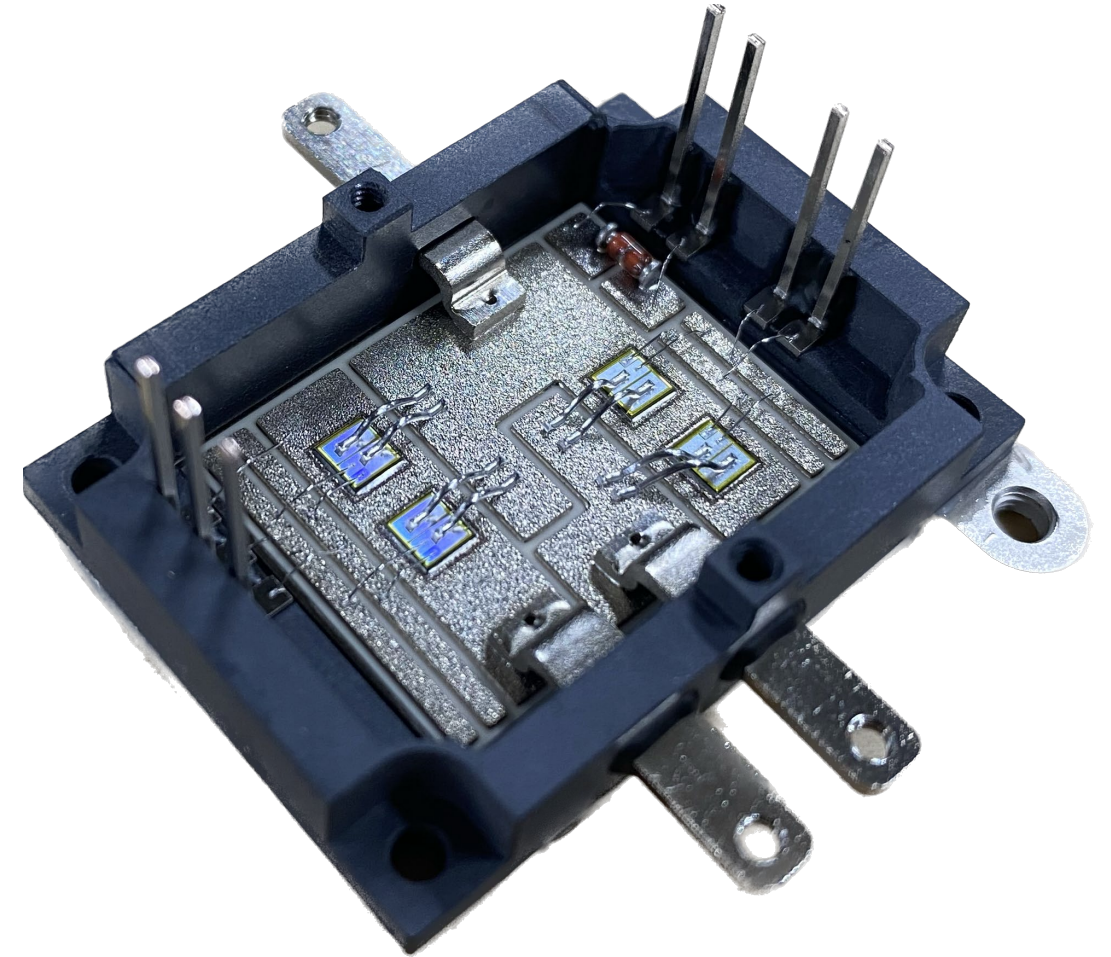
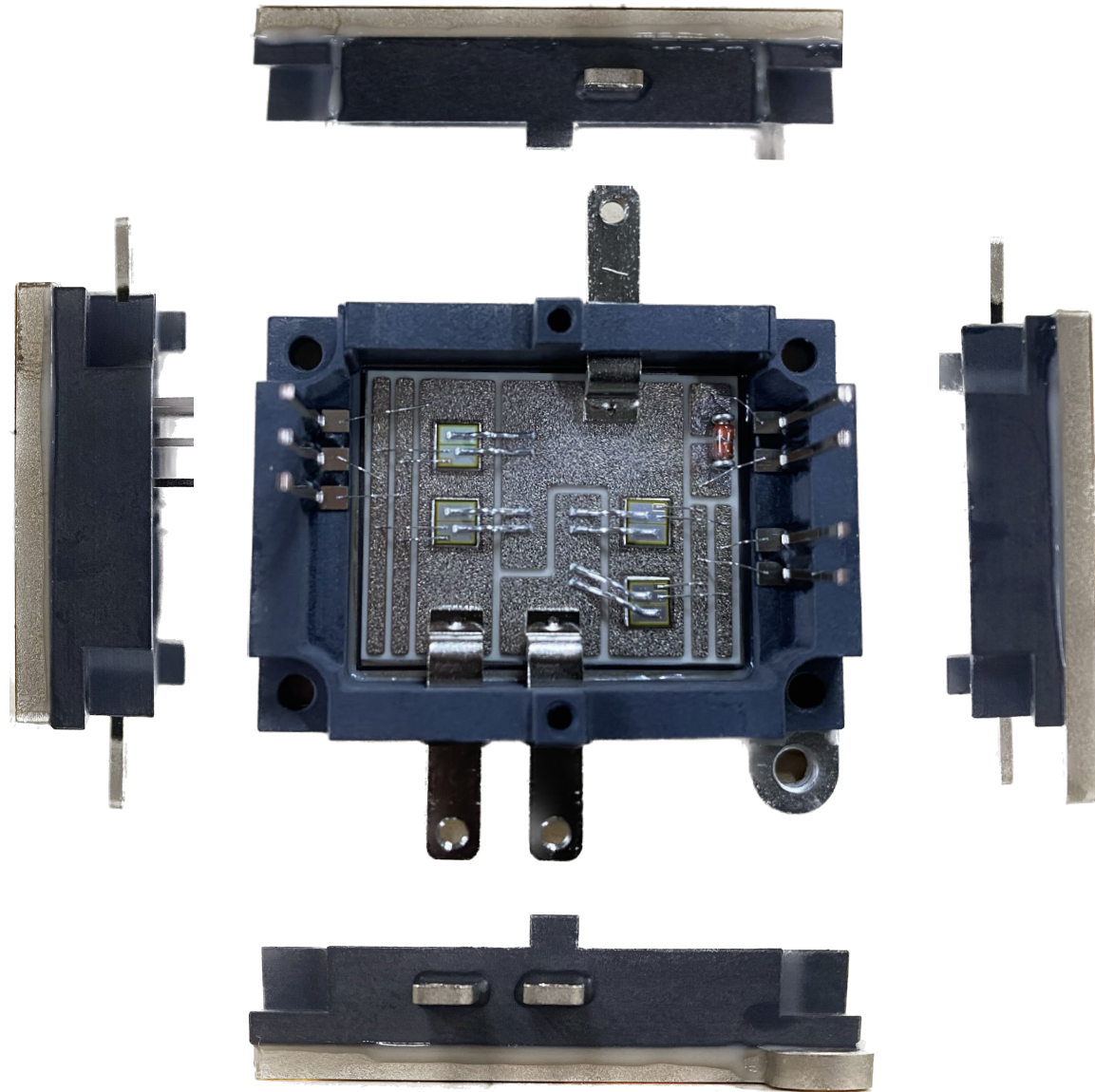
AEGIS製

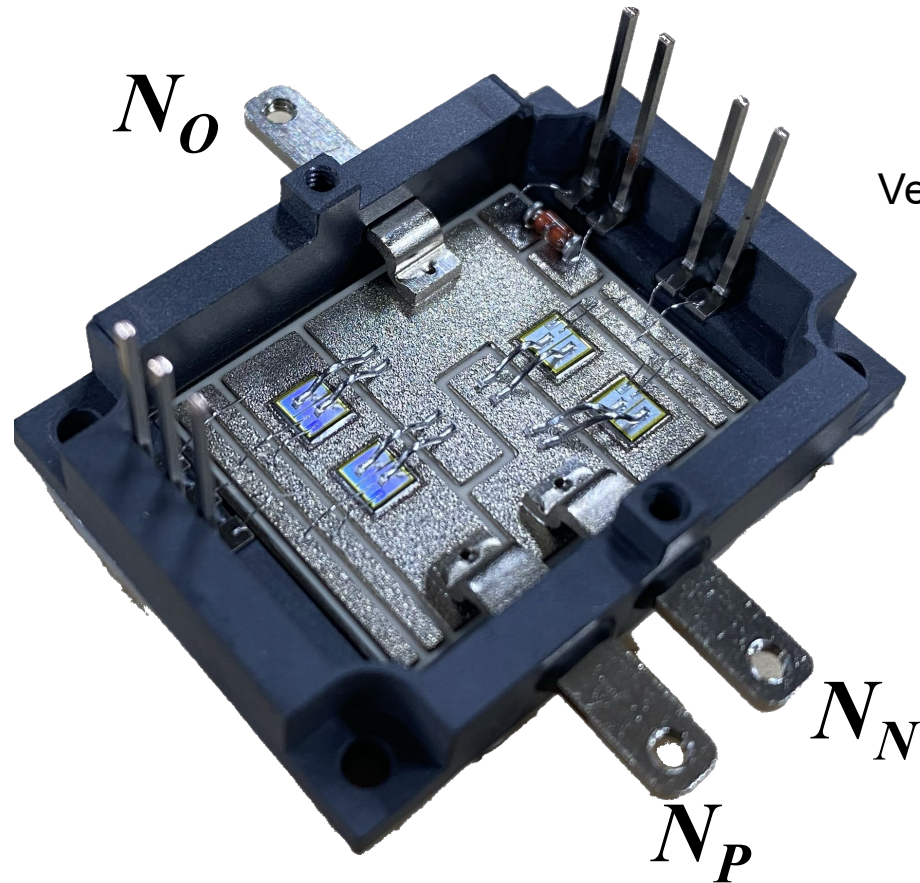
(d) グラウンディングリング
Audi/e-tron



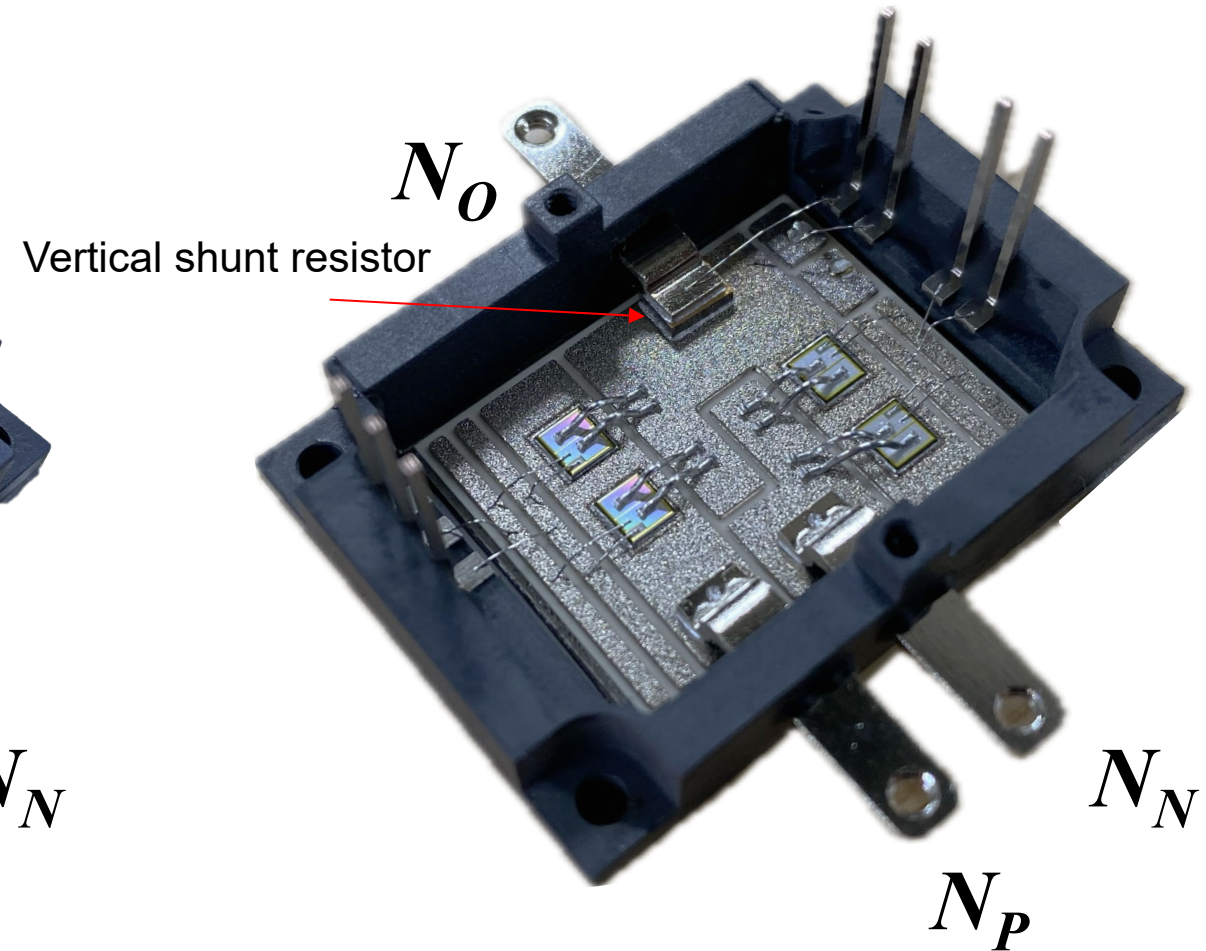
KACO製

銀コーティングされた
PTFEコンパウンド





Conventional Power Module



Power Module with Vertical Shunt Resistor



S4503

N-channel SiC power MOSFET bare die

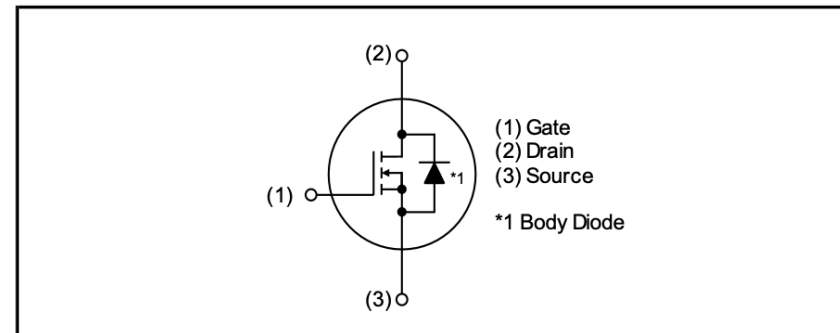
Datasheet

V_{DSS}	750V
$R_{DS(on)}$ (Typ.)	26m Ω
I_D^{*1}	56A

● Features

- 1) Low on-resistance
- 2) Fast switching speed
- 3) Fast reverse recovery
- 4) Easy to parallel
- 5) Simple to drive

● Inner circuit



1. Wide-Bandgap-Devices (WBG)

- Conventional Si IGBT* → SiC MOSFETs**
- High dv/dt is expected → High CM noise

2. High DC Input Voltage (High Battery Voltage)

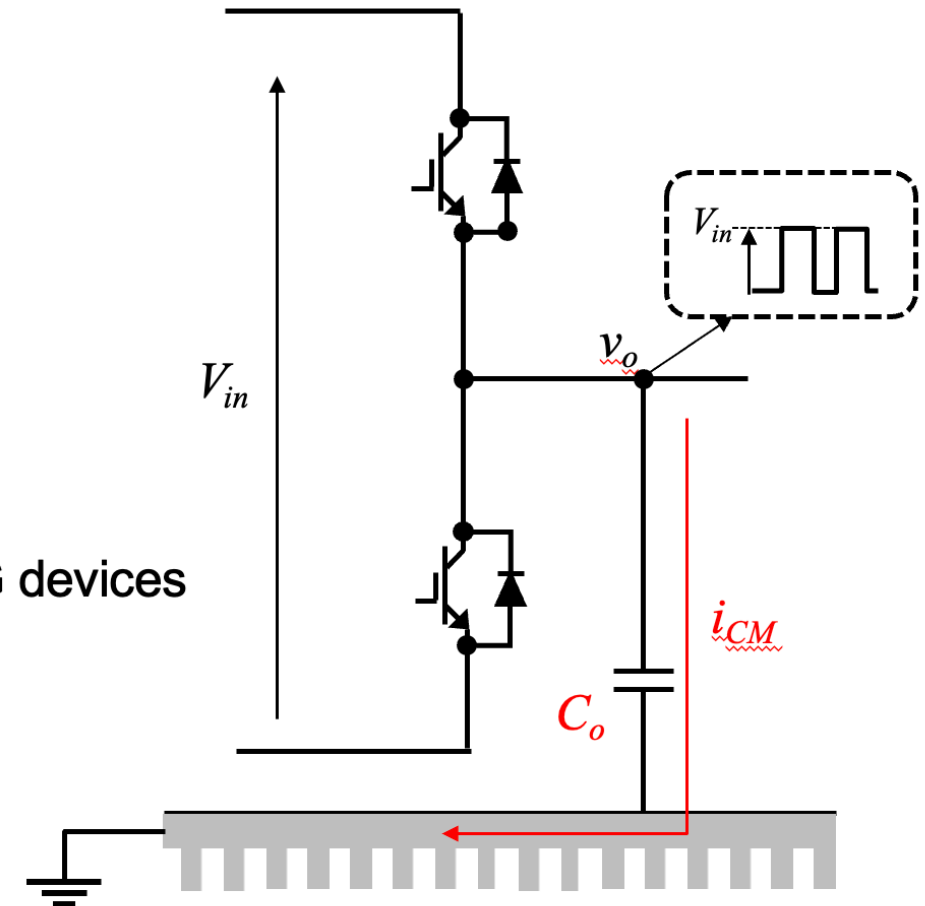
- High V_{in} increases system efficiency
- Conventional 400 V system → 800 V system

3. High Switching Frequency

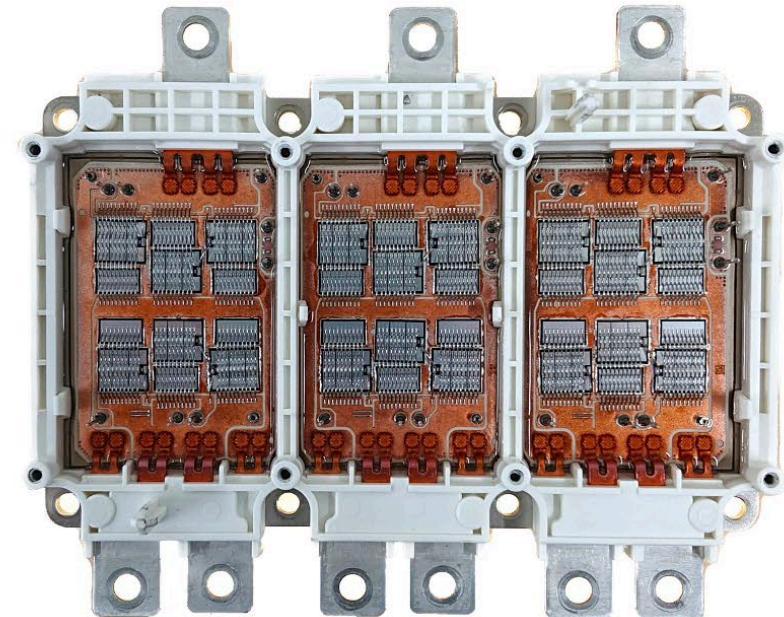
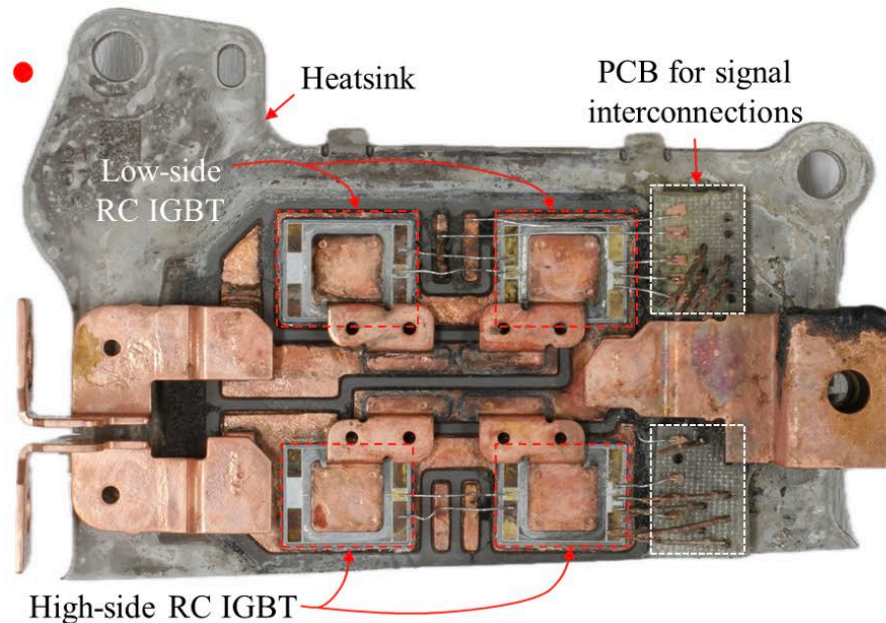
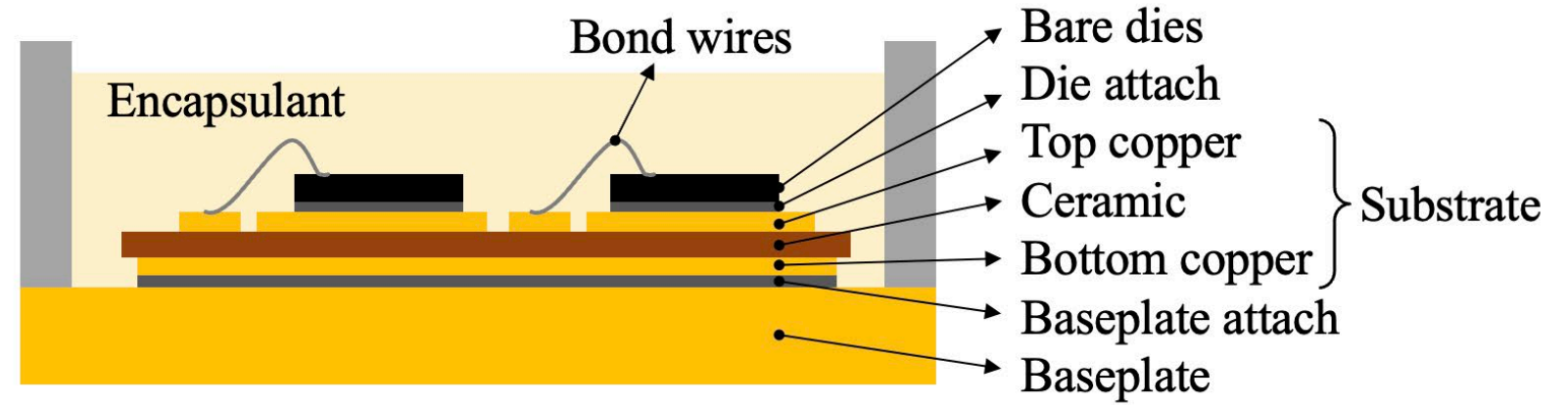
- Switching frequency is expected to be increased with WBG devices
(~5kHz Si IGBTs → 20~30kHz with SiC devices)

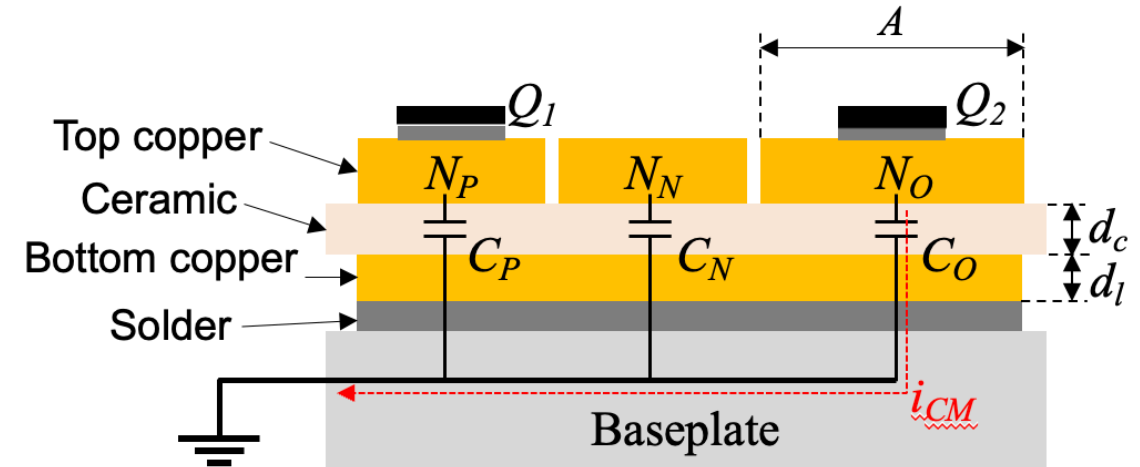
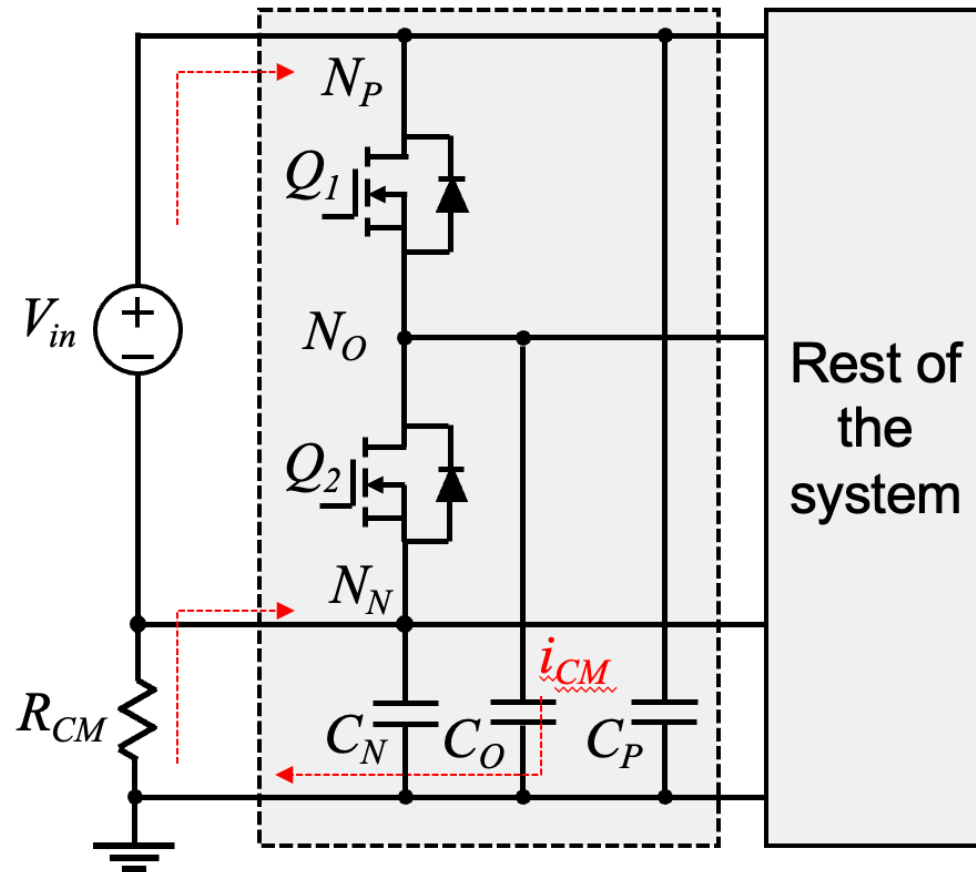
4. Double-Sided Cooling

- Larger CM Capacitance



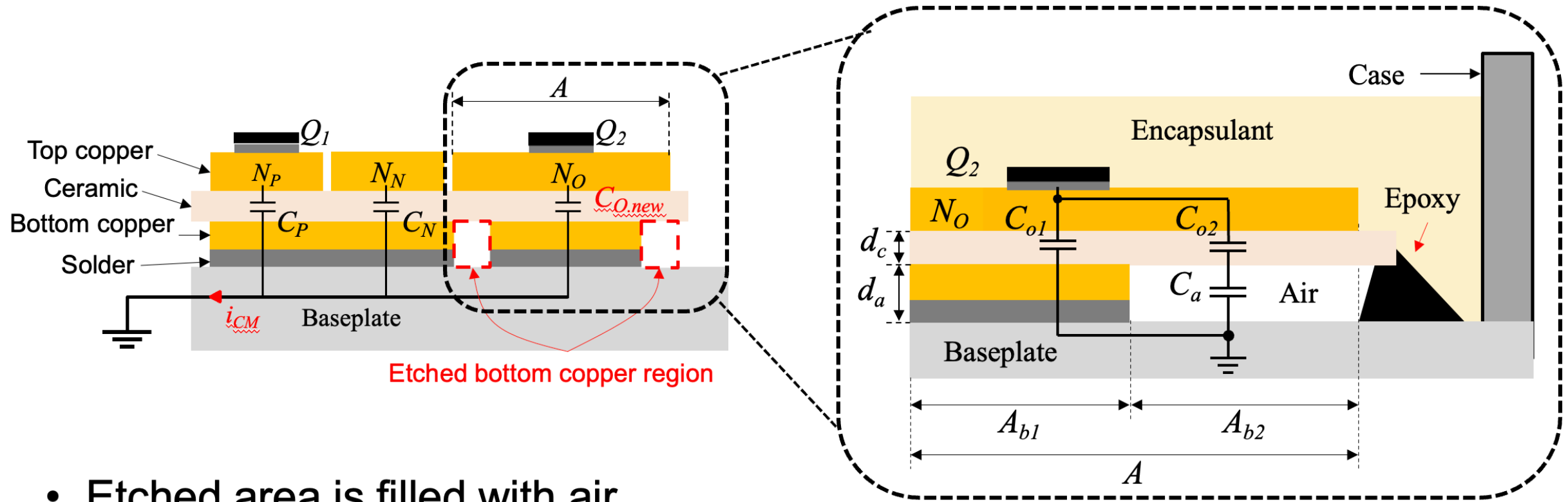
Power modules in automotive traction inverters



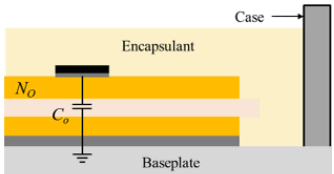
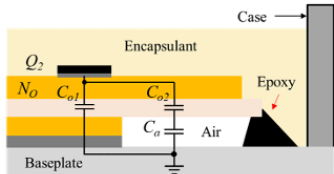
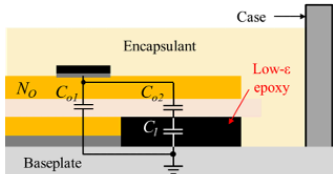
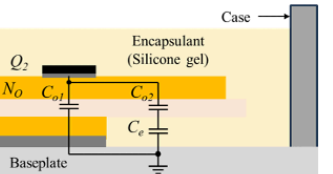


$$C_O = \epsilon_0 \epsilon_c \frac{A}{d_c}$$

- Pulsating voltage occur at N_O .
- C_O contributes to the CM noise.



- Etched area is filled with air.
- Epoxy is applied to support the substrate

Module	Full-copper	Air	Low-ε	Silicone gel
d_c	0.38 mm			
d_e	0.45 mm assuming 0.15-mm thickness of solder layer			
Bottom copper design				
A_{b1}	50 mm ²			
A_{b2}	106.4 mm ²			
C_{O1}	Not applicable	11.39 pF		
C_{O2}		24.26 pF		
$C_a, C_l, \text{ or } C_e$		2.09 pF (= C_a)	7.32 pF (= C_l)	6.35 pF (= C_e)
C_o	35.71 pF	13.31 pF (= C_{O_a})	17.01 pF (= C_{O_l})	16.38 pF (= C_{O_e})

- Proposed three power modules achieves high CM capacitance reduction.

- The conventional and proposed flip chip module were manufactured.

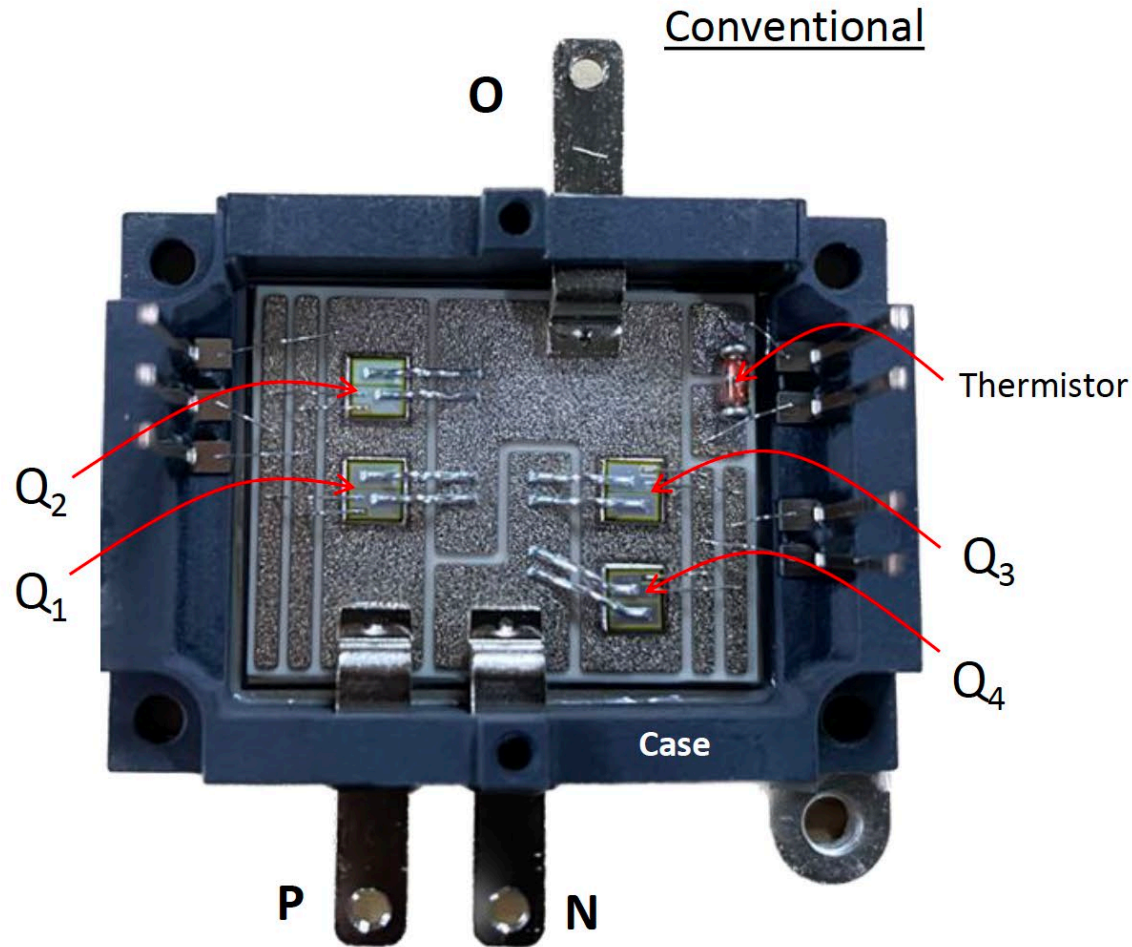


Fig 23. Manufactured conventional module

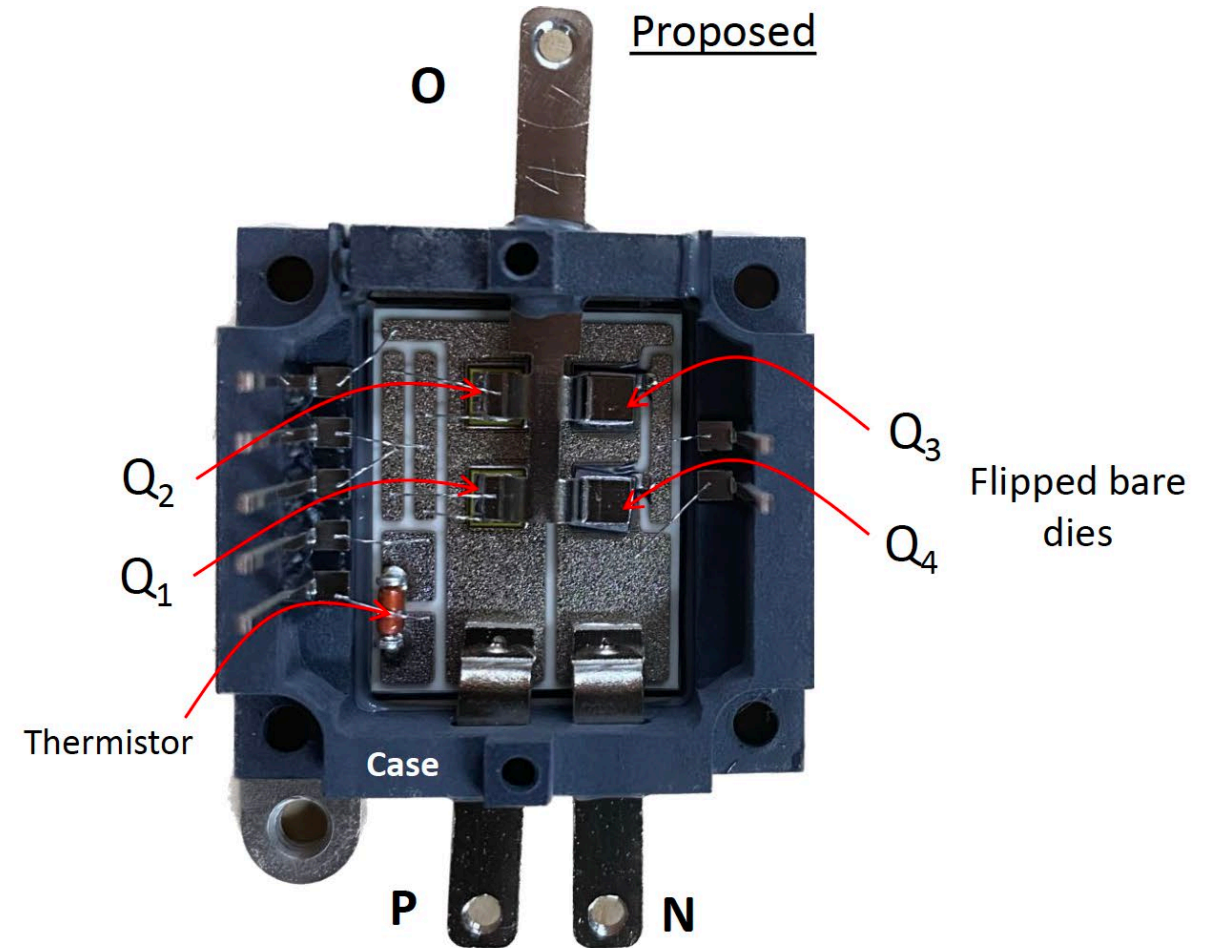


Fig 24. Manufactured proposed module

- Double pulse testing was conducted on the power modules

Specifications	
V_{in}	200 V
Pulse Width	50 μ s
Gap	20 μ s
Load Inductor L	1 mH / 30 ADC / Air core
DC Capacitor C	1650 μ F / 1000 VDC

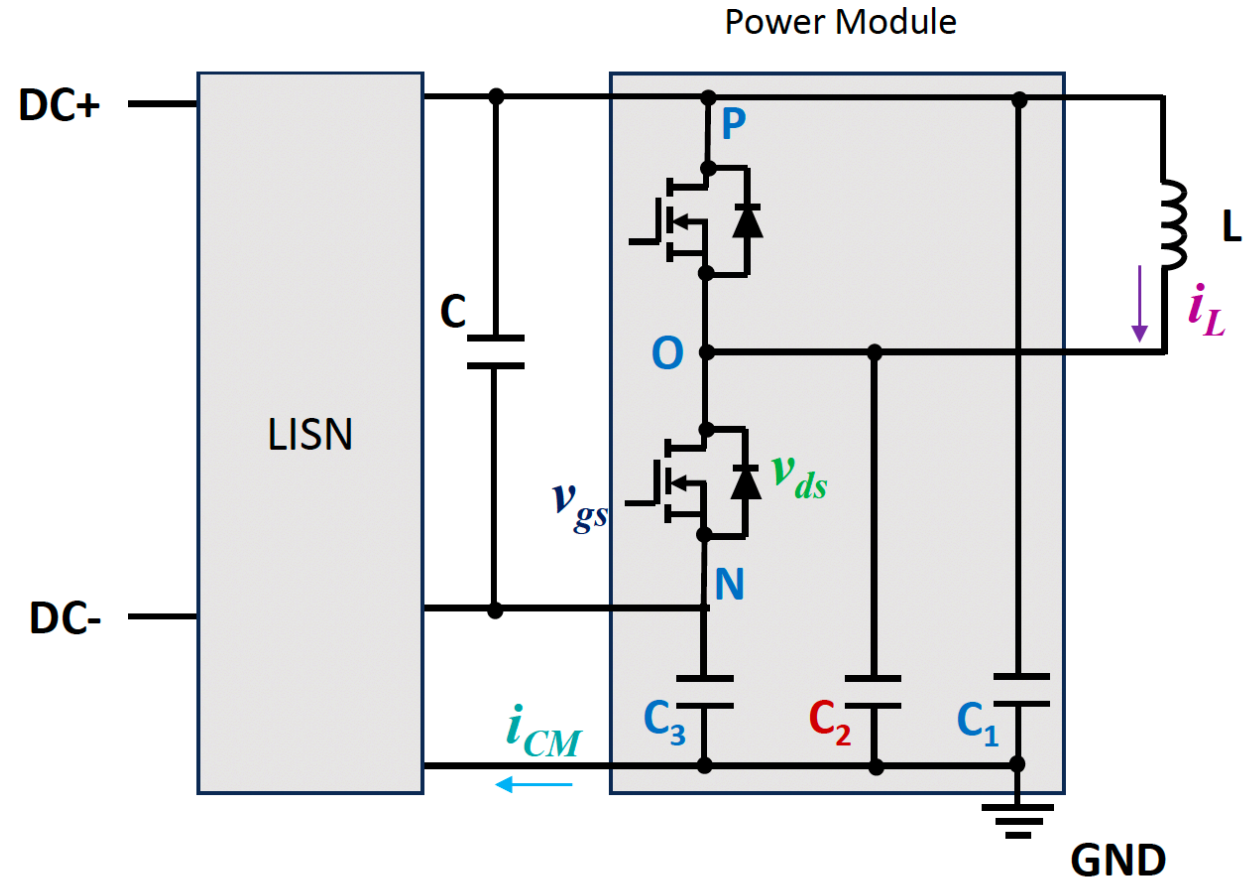
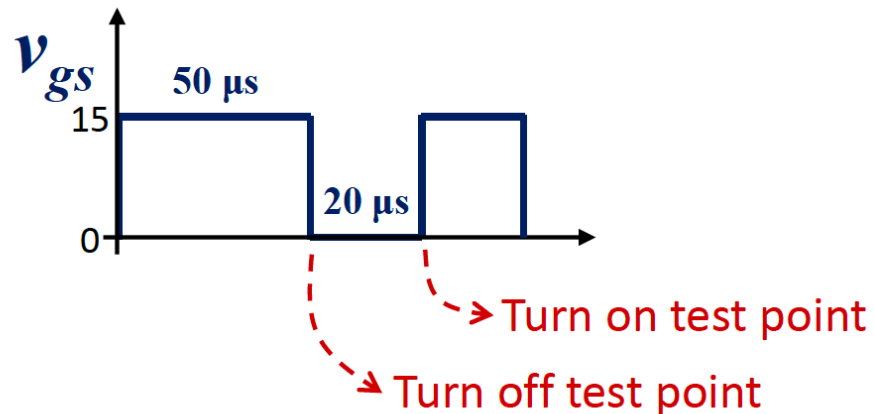
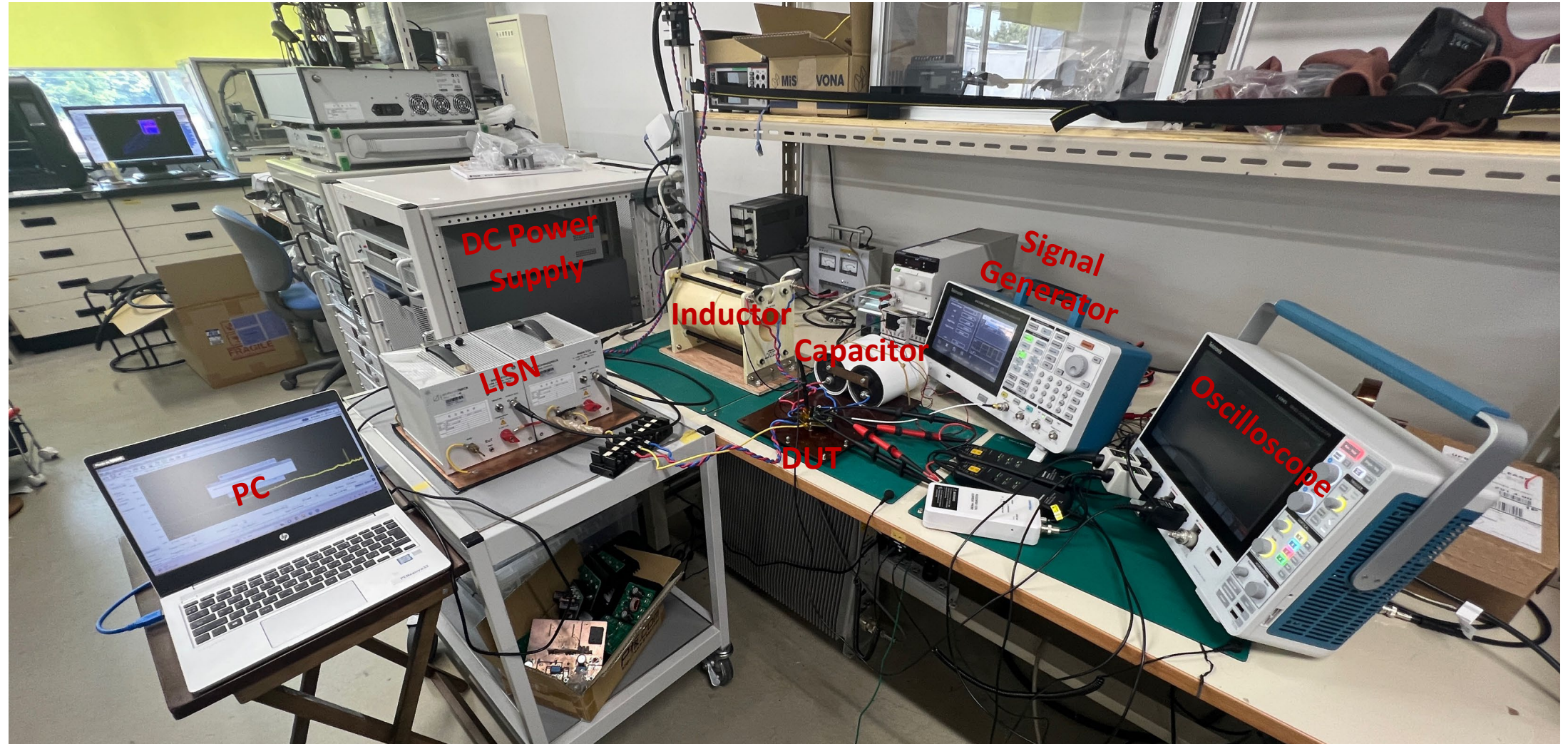
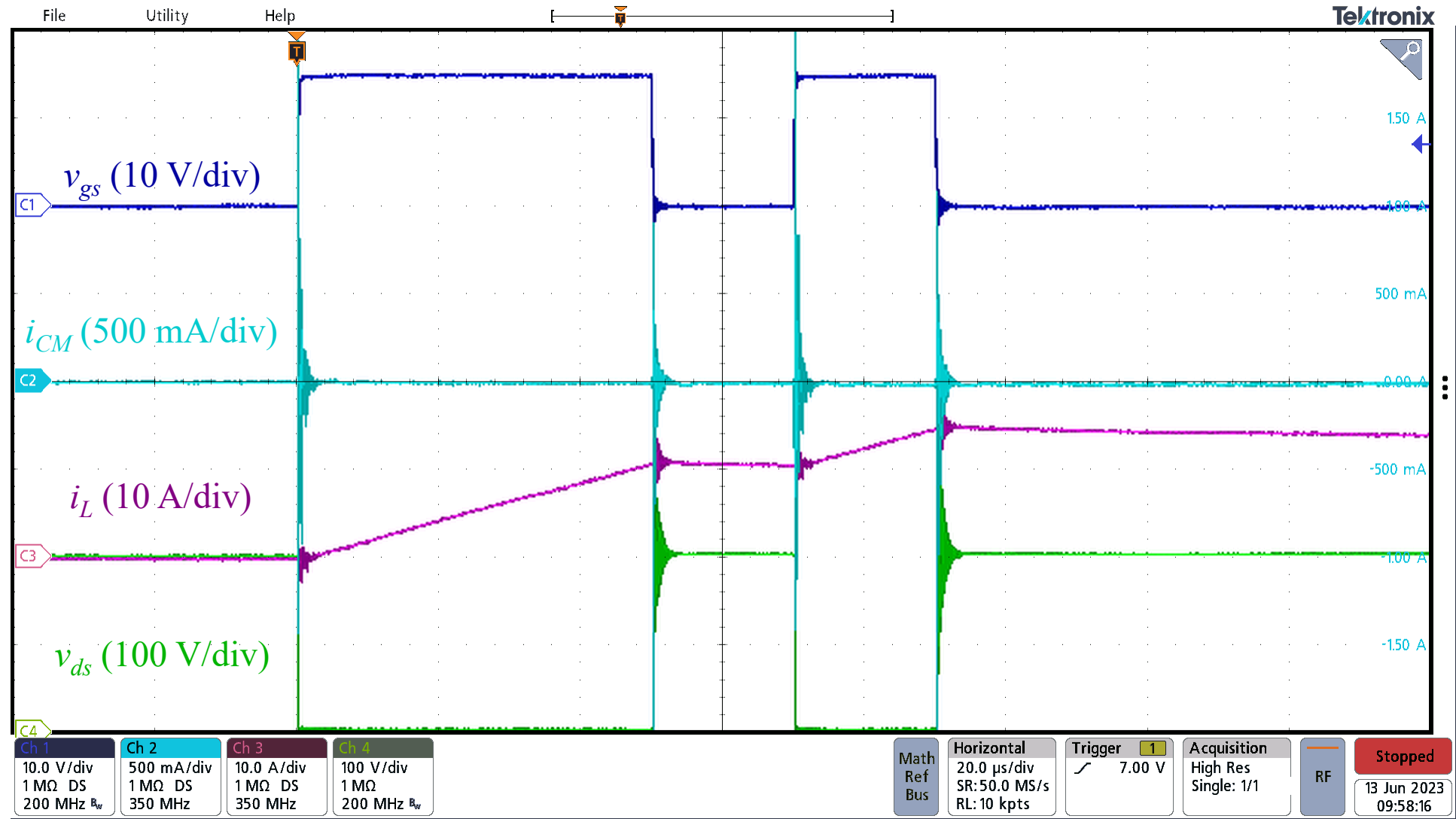


Fig 25. Double Pulse Testing Setup

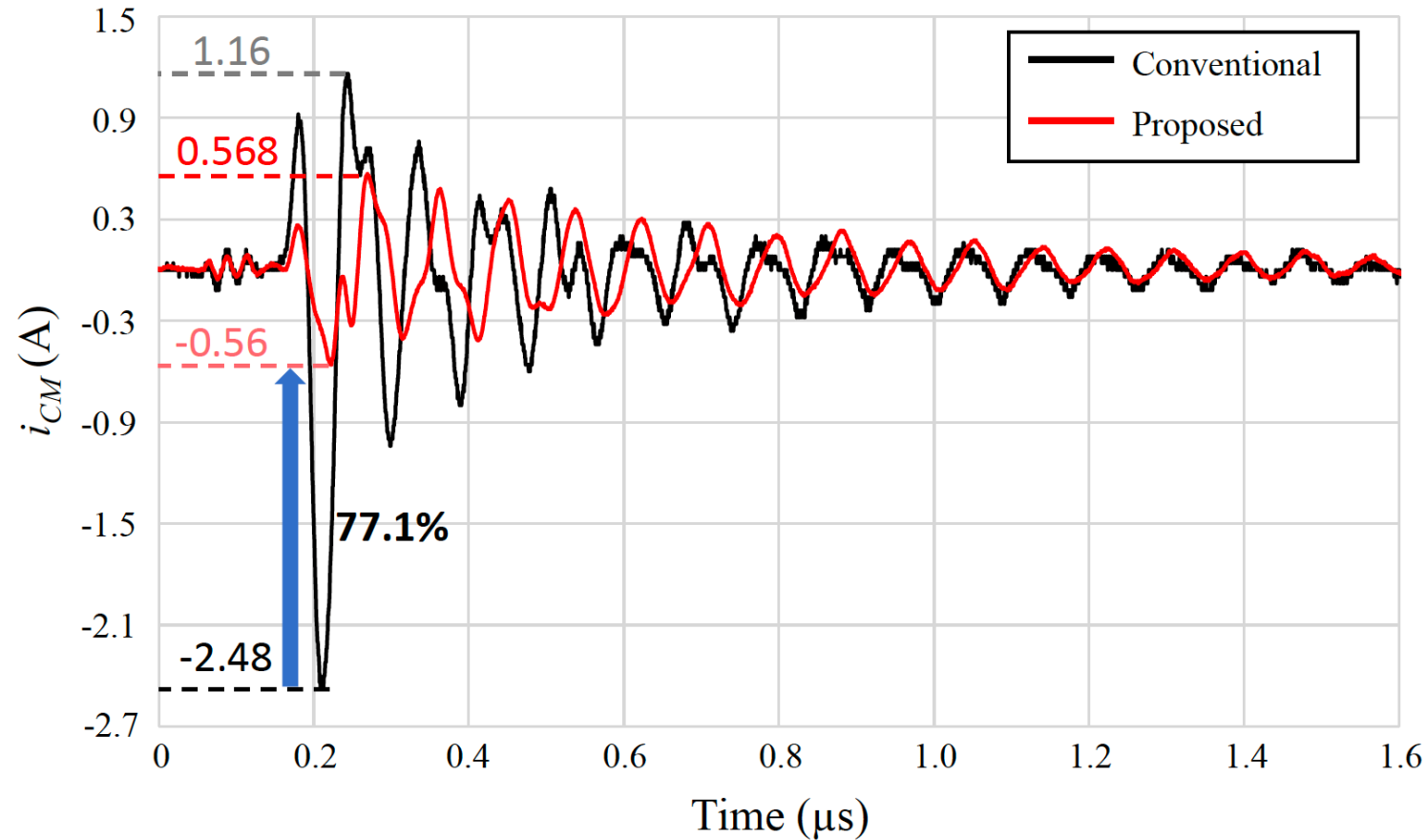




Conventional (Module1)

v_{gs} (Ch1, blue), i_{CM} (Ch2, sky-blue), i_L (Ch3, pink), and v_{ds} (Ch4, green)

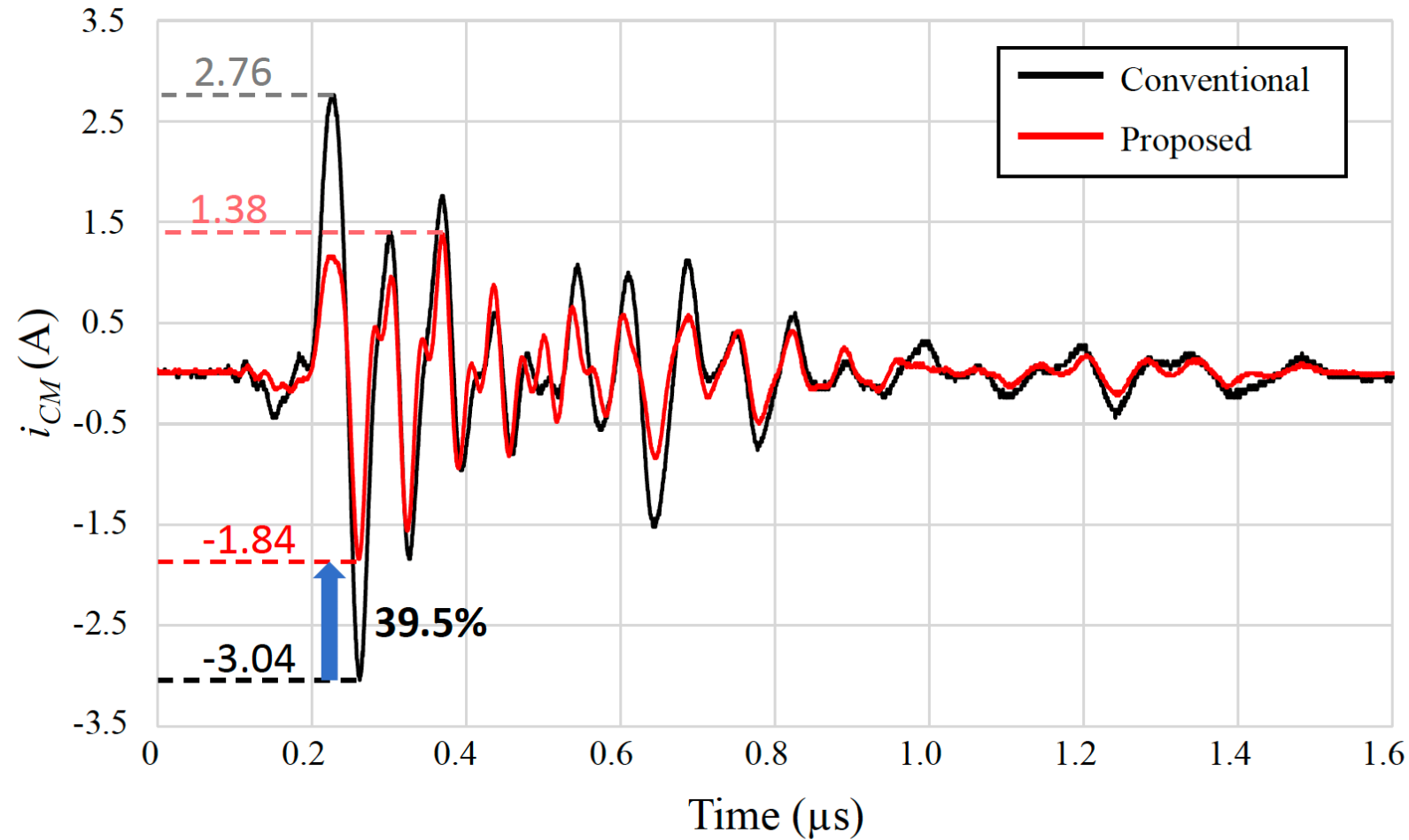
- During Turn OFF:



Proposed Module:
77.1% reduction in
 max i_{CM} at turn off

Fig 28. Double Pulse Testing Results during turn off for conventional and proposed modules

- During Turn ON:



Proposed Module:
39.5% reduction in
 max i_{CM} at turn on

Fig 29. Double Pulse Testing Results during turn on for conventional and proposed modules

- | Specifications | |
|---------------------|---------------|
| V_{in} | 400 V |
| Duty | 0.5 |
| Switching Frequency | 50 kHz |
| V_{out} | 200 V |
| C_{in} | 133.8 μ F |
| C_{out} | 401.8 μ F |
| Inductor | 7.1 mH |
| Electronic Load | 40 Ω |

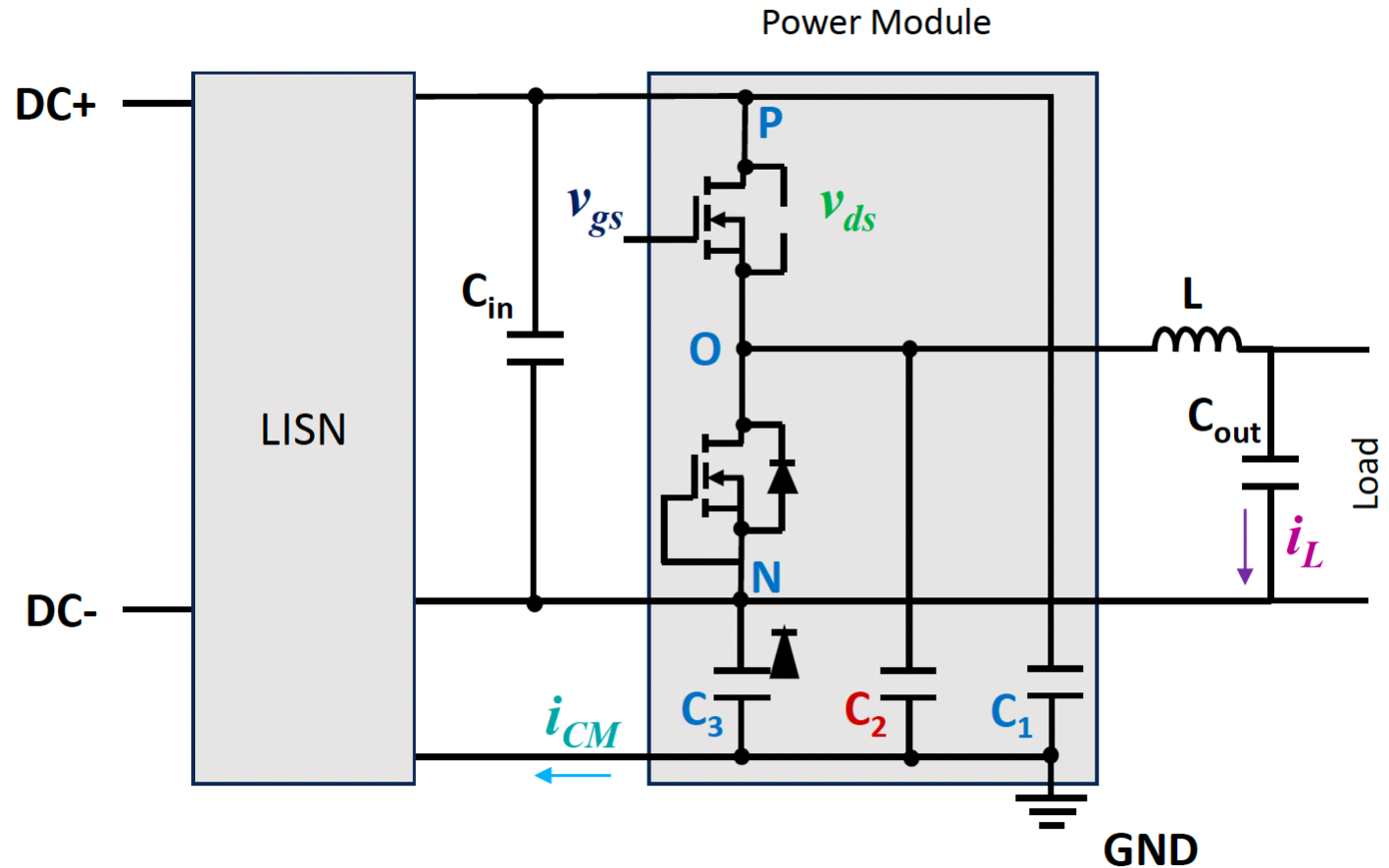
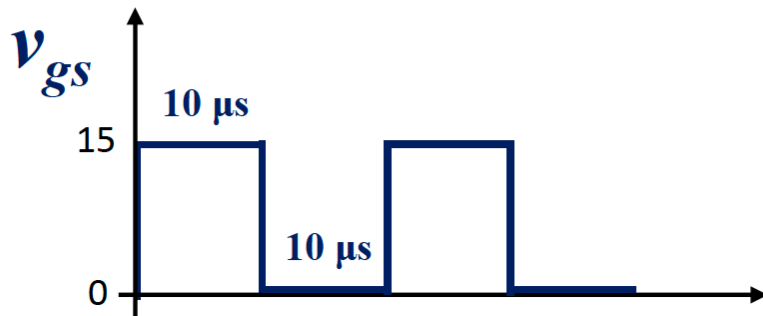


Fig 30. Testing Setup for noise spectrum analysis

- Proposed Module:

- 12 dB μ V reduction at low frequency
- 3-4 dB μ V reduction at high frequency

- At around 2 MHz, both modules have similar magnitude

→ Could be due to external noise form auxiliary power supply

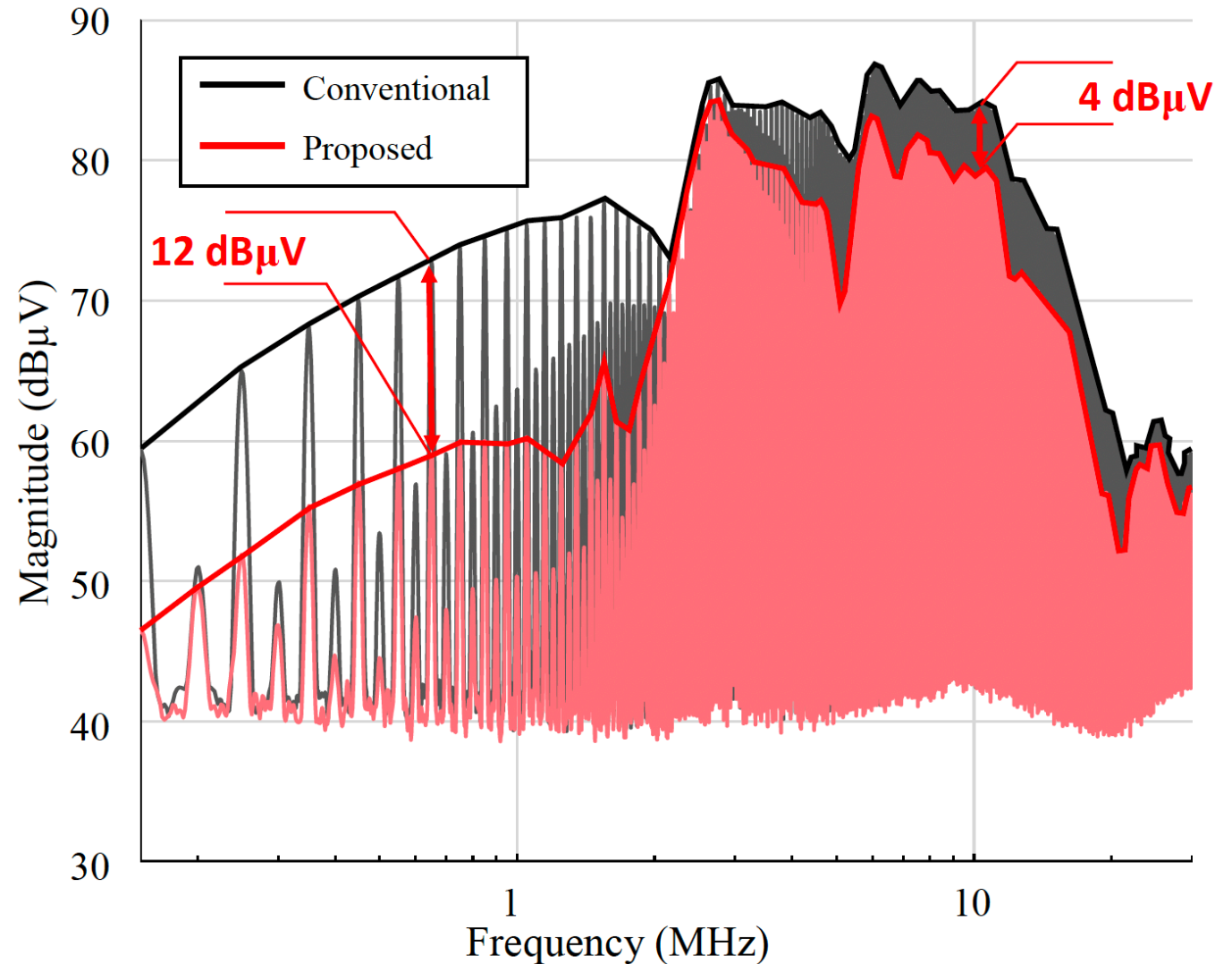
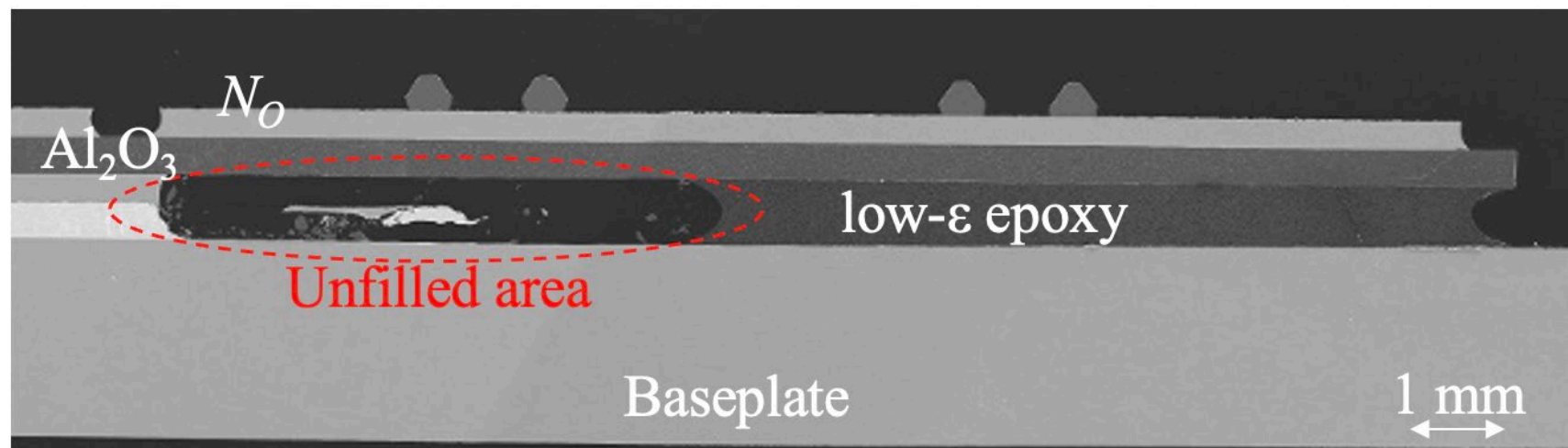
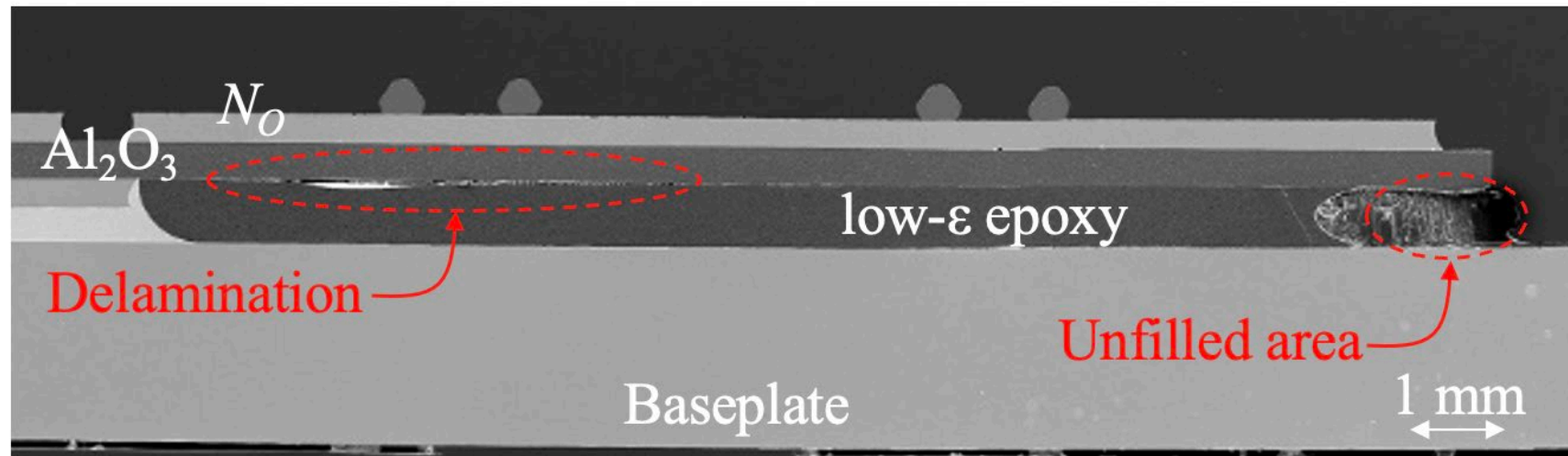
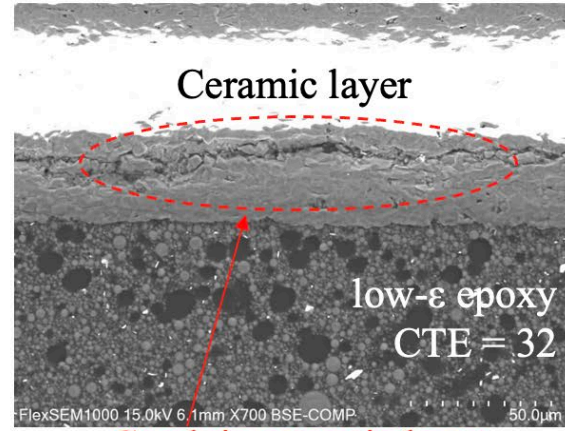
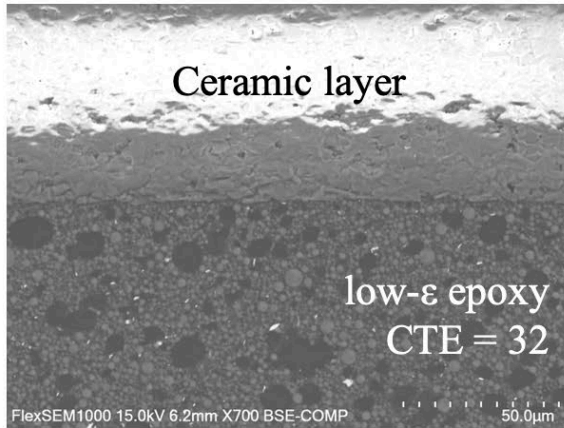
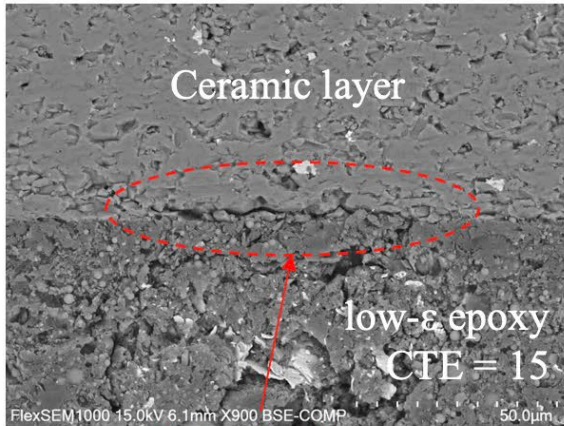


Fig 31. Noise spectrum analysis





Crack in ceramic layer



Delamination

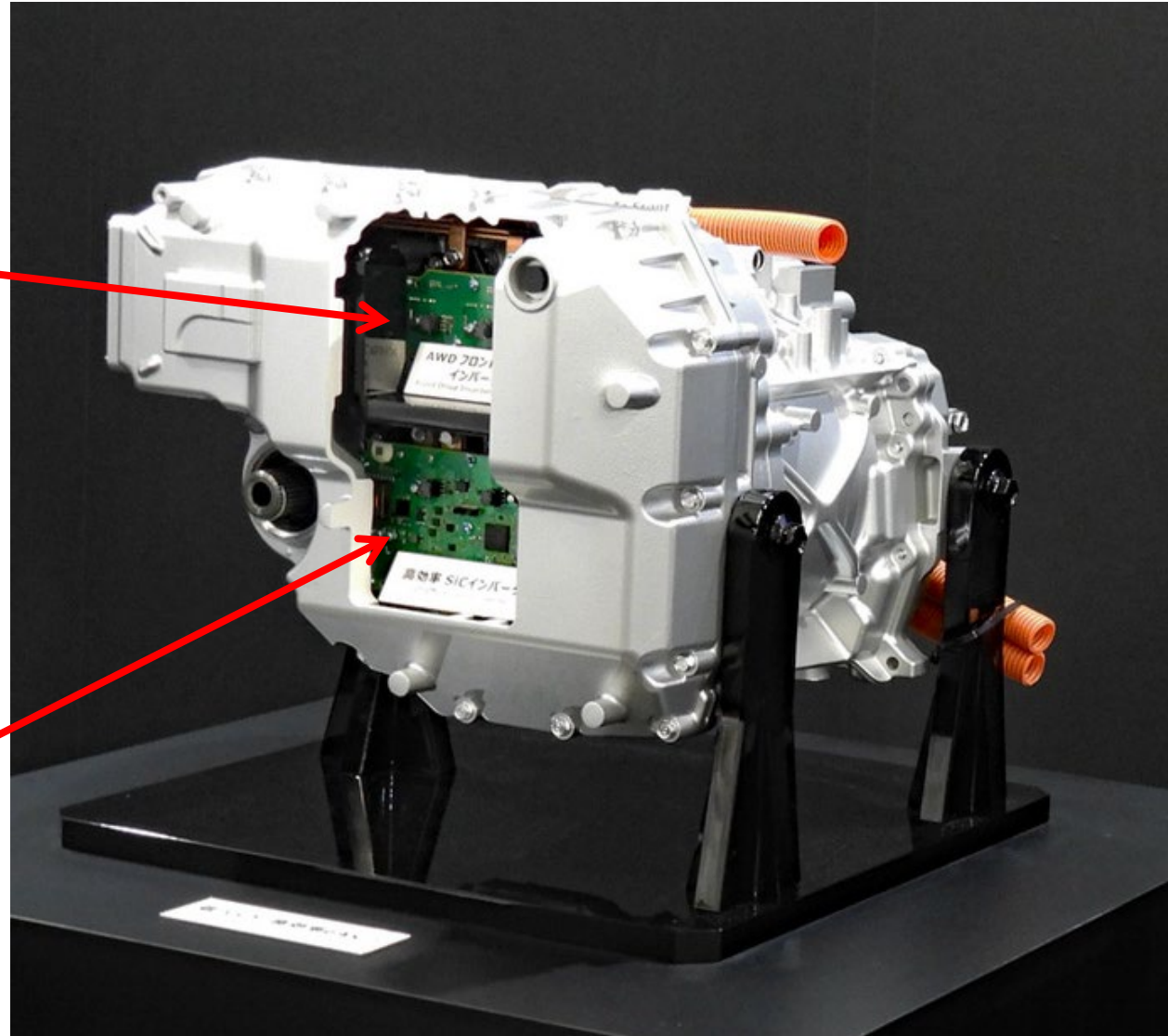


No crack in ceramic layer

- Low- ϵ modules sometimes damages the ceramic layer and experiences delamination.
 - Silicone gel is soft material and has high surface tackiness and low viscosity.
- Hardly cause delamination and damages to ceramic layers.

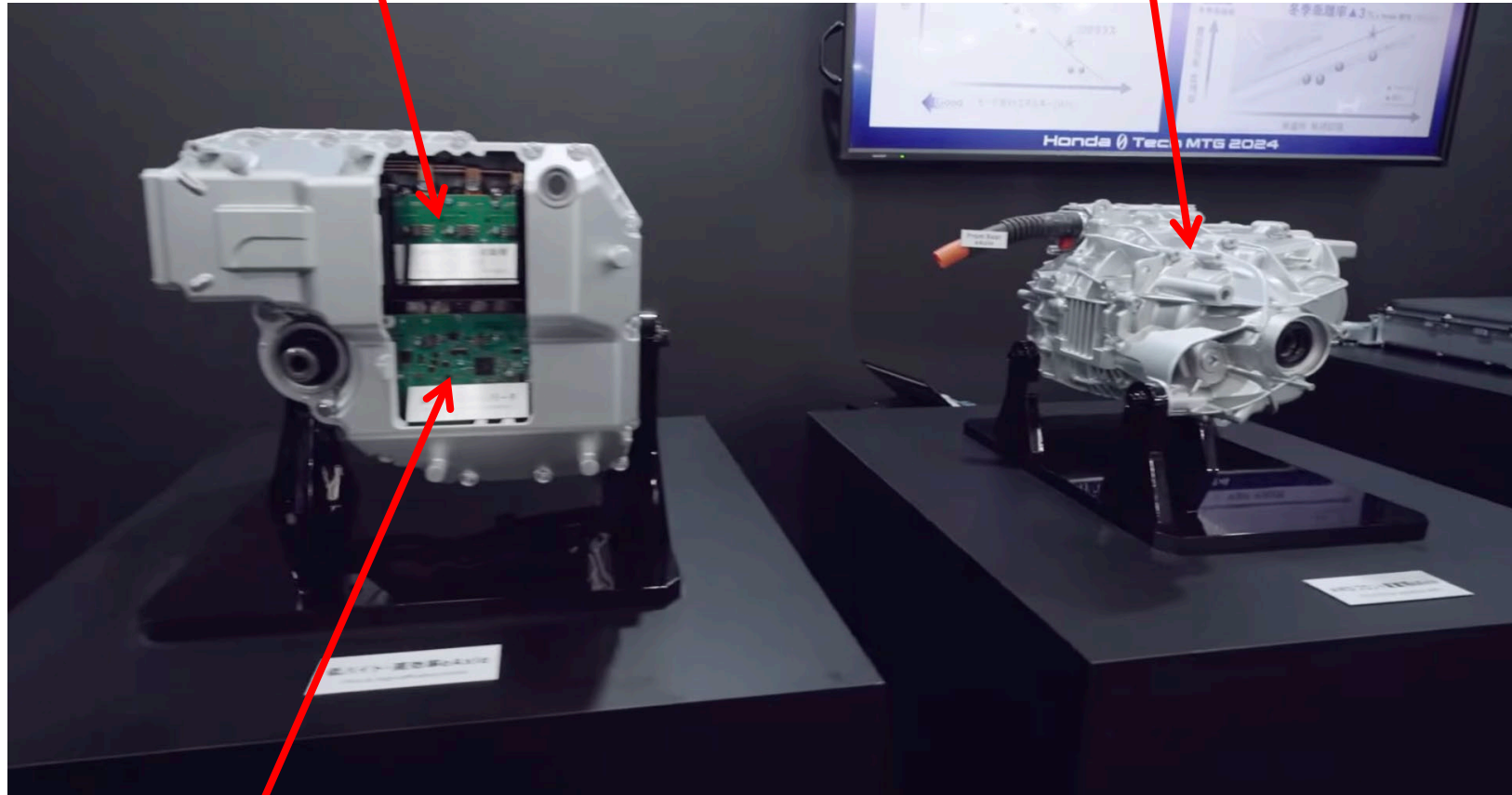
フロント駆動用インバータ
(50kW or 180kW)

リア駆動用インバータ
(180kW)



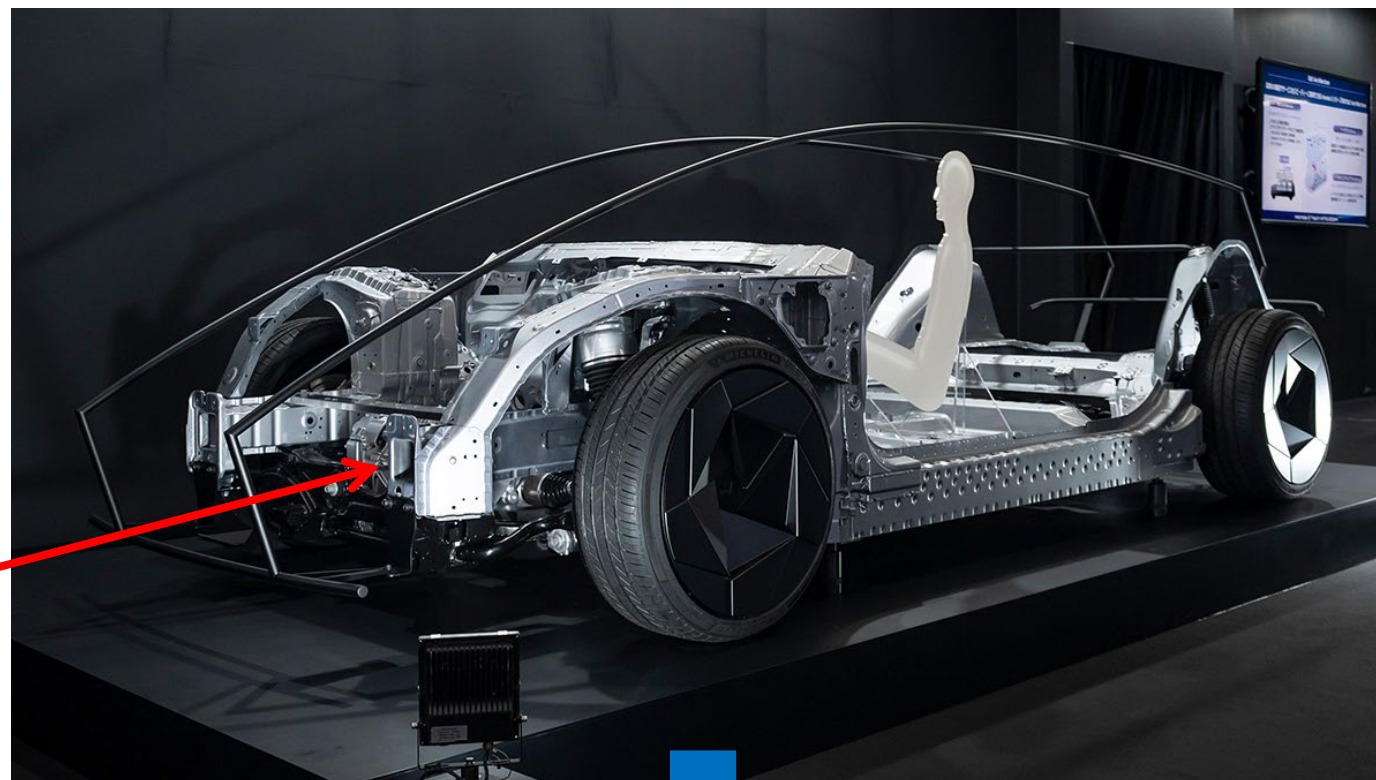
フロント駆動用インバータ
(50kW or 180kW)

フロント駆動用モータ+減速機



リア駆動用インバータ(180kW)

フロント駆動システム
(ギア+モータ)



引用: Honda 0 Tech Meeting 2024特設サイト, “<https://global.honda.jp/news/2024/c241009.html>”

