

先端パワーエレクトロニクス技術体系教育講座 Advanced Course

---

# パワーモジュール用実装材料の進展-2(封止)

2023

日立Astemo (株)

石井 利昭

横浜国立大学

高橋 昭雄、大山 俊幸

# Contents

---

## 1章 CECN動向とEV市場\*

各地域のCNへの取り組み・戦略・市場、EV導入戦略・市場・OEM部品メーカーの開発動向

## 2章 パワーモジュール実装の動向

EVインバータの構成、パワーモジュール構造・市場、構造比較、課題と改善方法

## 3章 パワーモジュール封止構造の高性能化

封止材料の機能、高耐熱化（高Tg化）、機械特性と接着性の長期安定化技術

## 4章 トピックス：高機能材料による高耐圧化技術






EVシステムの高電圧化のメリット、絶縁層に中間導体を埋設した高耐圧化技術

\*CECN : Circular Economy Carbon Neutral, EV: Electric Vehicle

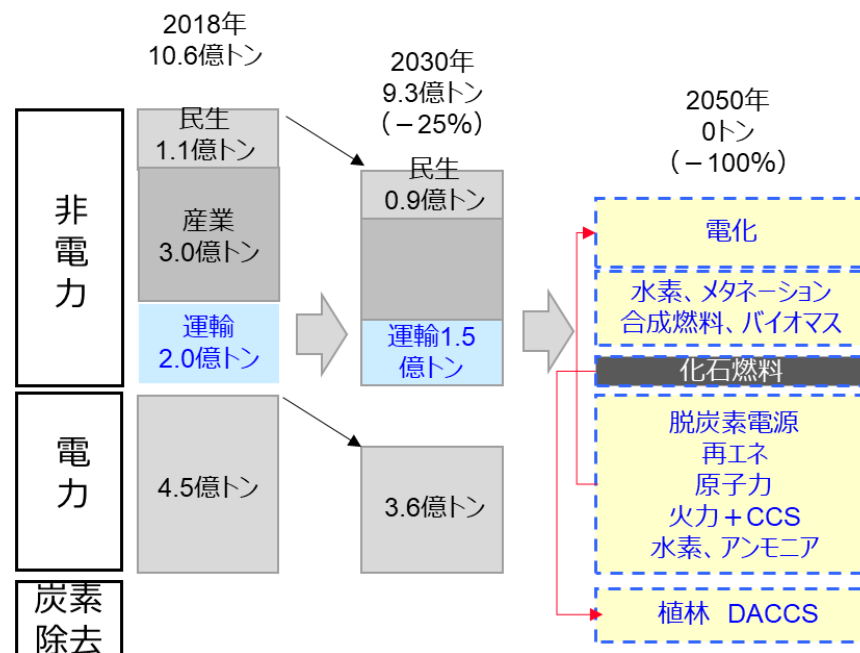
## 2 カーボンニュートラルへの取り組み

### 各国ともマイルストーンを定め2050にカーボンニュートラル達成目標を宣言

#### 日本及び諸外国の目標等の表明状況

	日本	EU	英国	米国	中国
					
2020	↓	↓	↓	↓	↓
2030	2013年比46%減 (気候サミットにて総理表明)	1990年比55%減 (NDC)	1990年比68%減 (NDC)	2005年比52%減 (NDC)	2030年までに減少に転換 (国連演説)
2040	↓	↓	↓	↓	↓
2050	カーボンニュートラル (法定化)	カーボンニュートラル (長期戦略)	カーボンニュートラル (法定化)	カーボンニュートラル (表明)	↓
2060					カーボンニュートラル (国連演説)

#### カーボンニュートラルへの転換イメージ

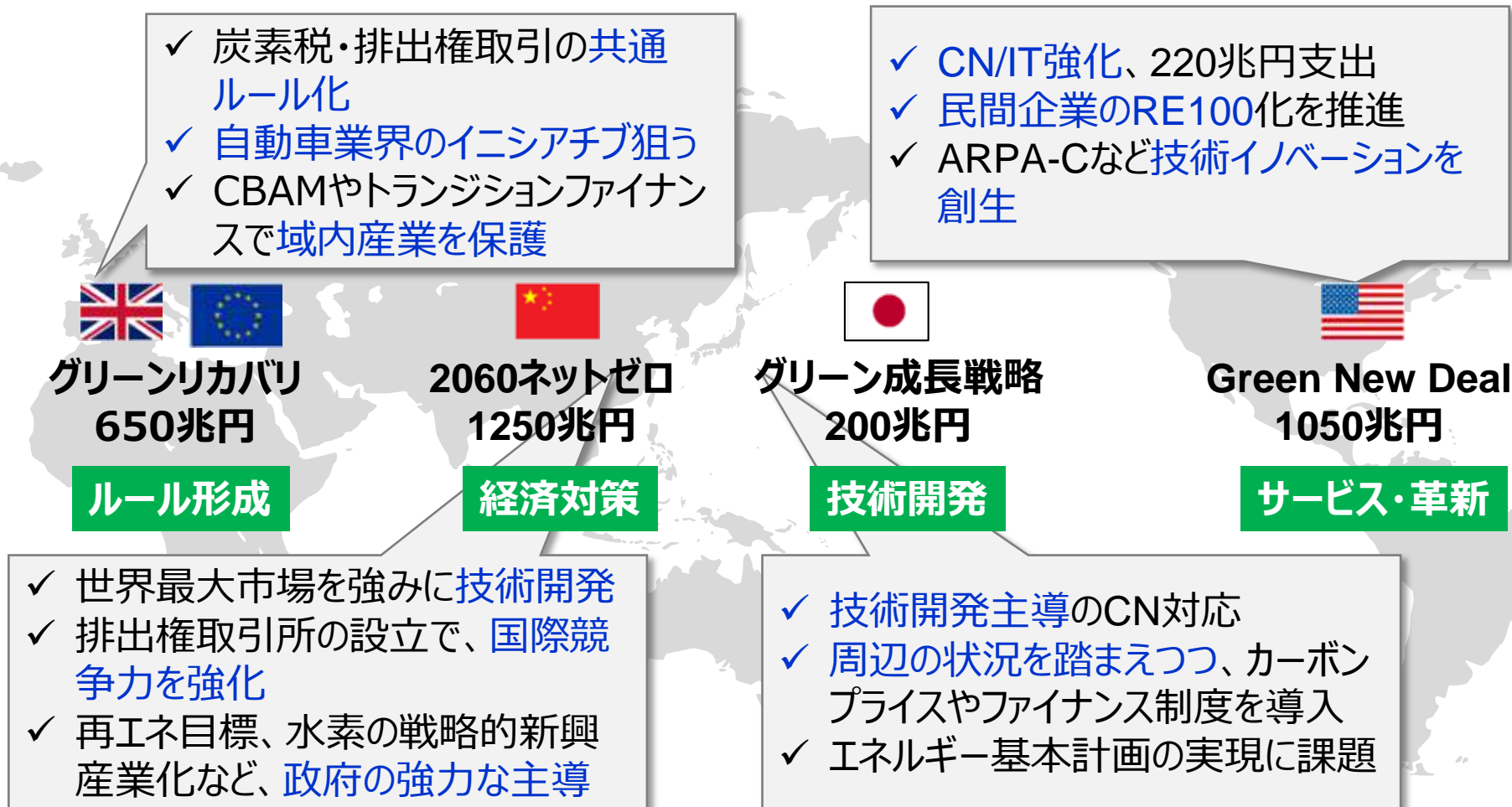


\*CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage  
DACCS: Direct Air Capture Carbon Dioxide Storage

Data source: 令和2年11月17日総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第33回会合) 「2050カーボンニュートラルの実現に向けた検討」資源エネルギー庁

Data Source: 経済産業省作成資料, NDC: Nationally Determined Contribution

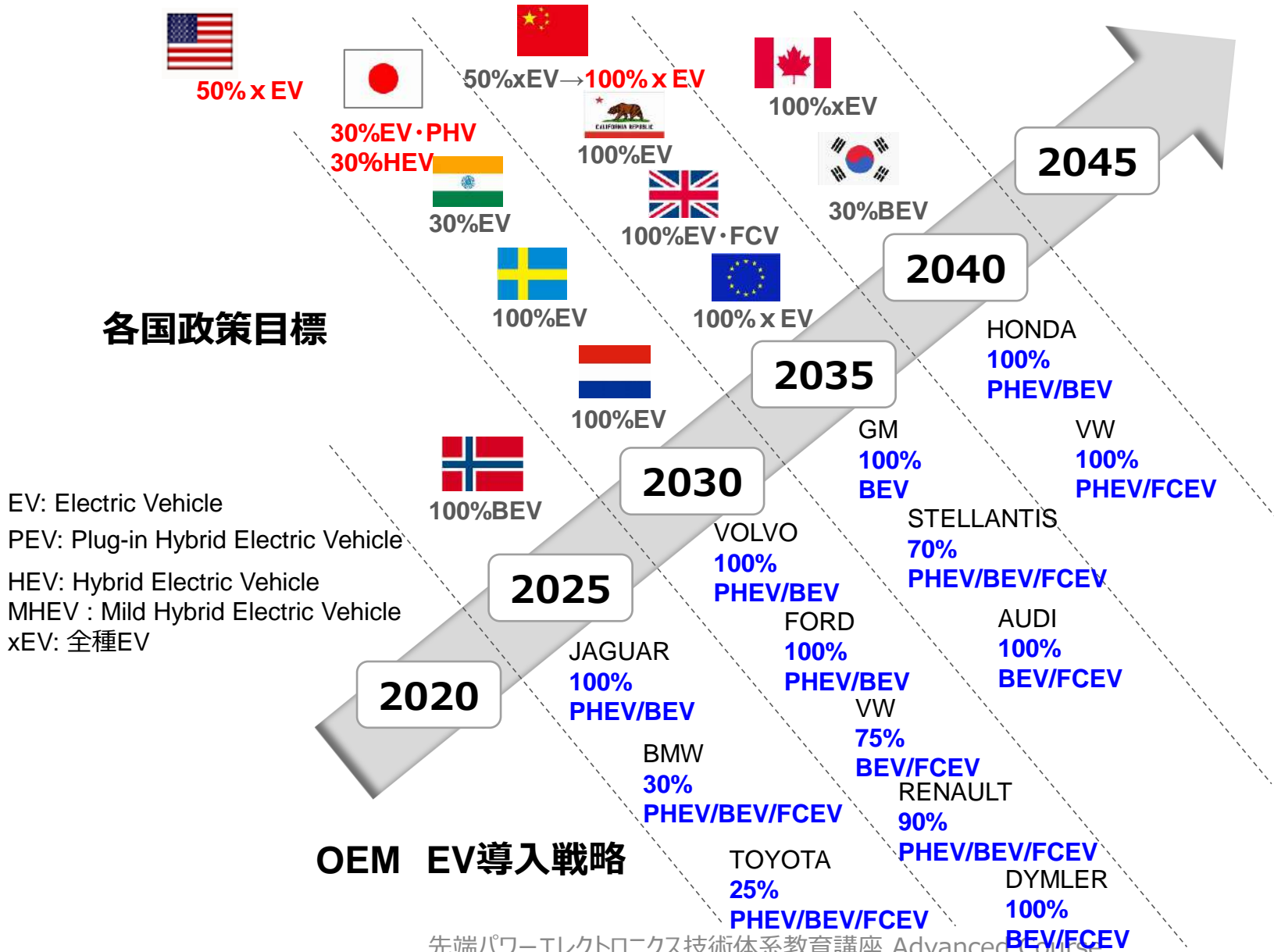
## CN市場の成長は著しい、EV導入は各地域のCN政策の中核

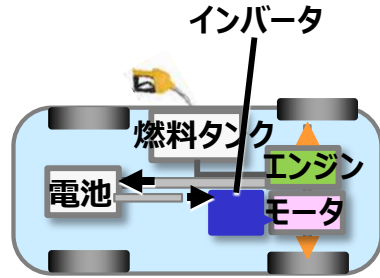
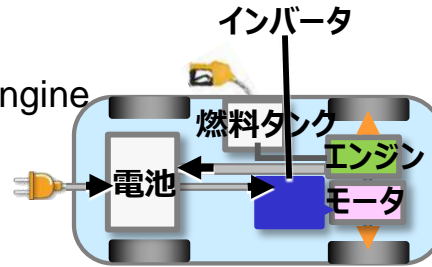
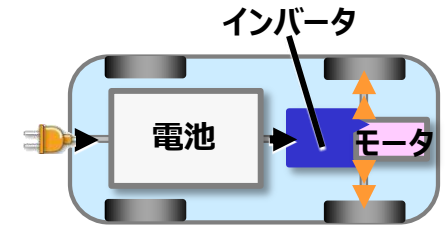
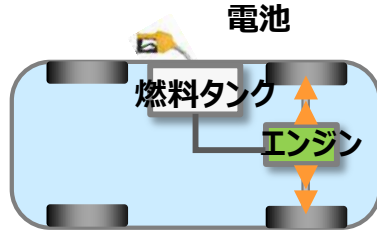


Data Source: 日経BPセミナ、みずほ産業調査67号より抜粋

ICE: Internal Combustion Engine, CBAM: Carbon Border Adjustment Mechanism, RE: Renewable Energy, ARPA-C: Advanced Research Projects Agency-Climate

# 4 EVに関する各国政策目標とOEMの導入戦略





(万台) ICE車 : Internal Combustion Engine

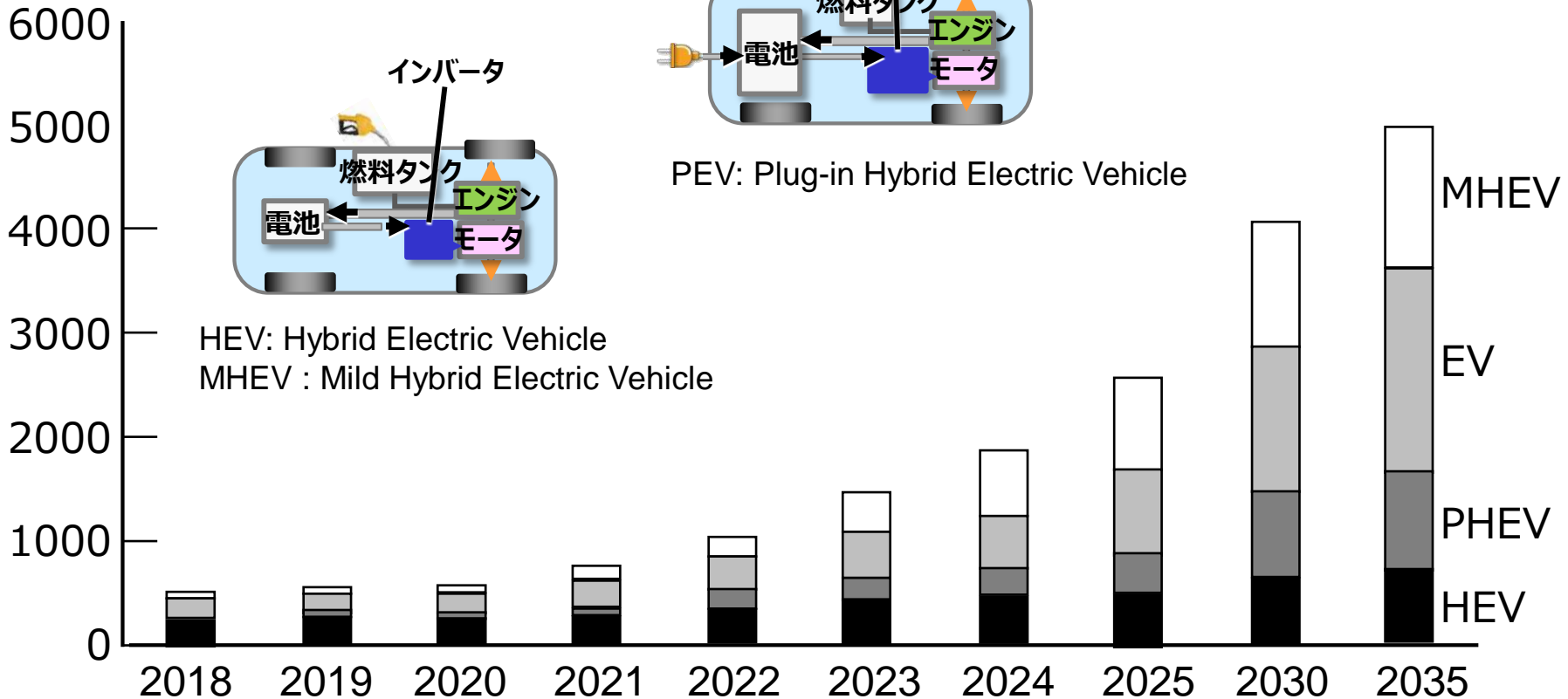
EV: Electric Vehicle

PEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle

HEV: Hybrid Electric Vehicle

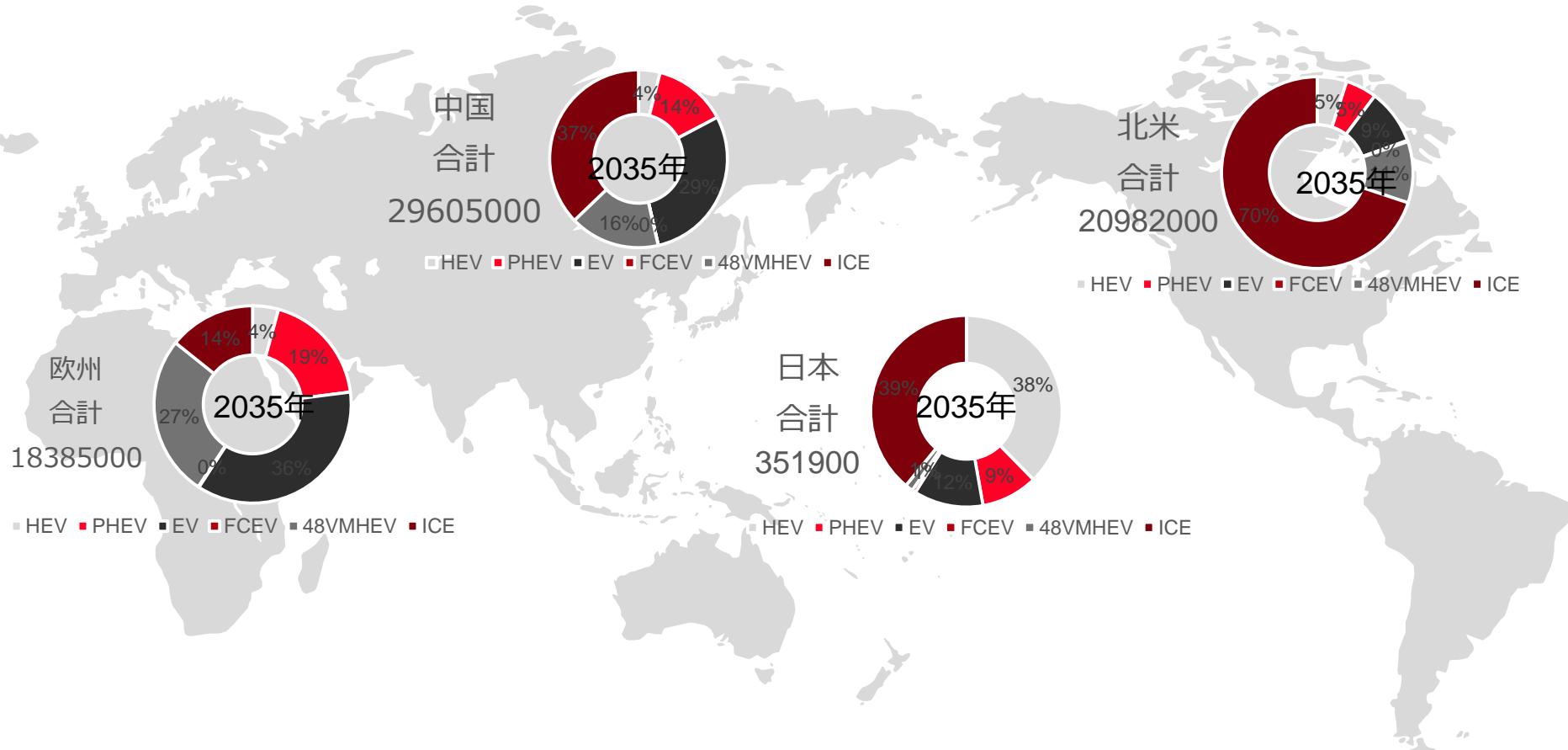
MHEV : Mild Hybrid Electric Vehicle

販売台数

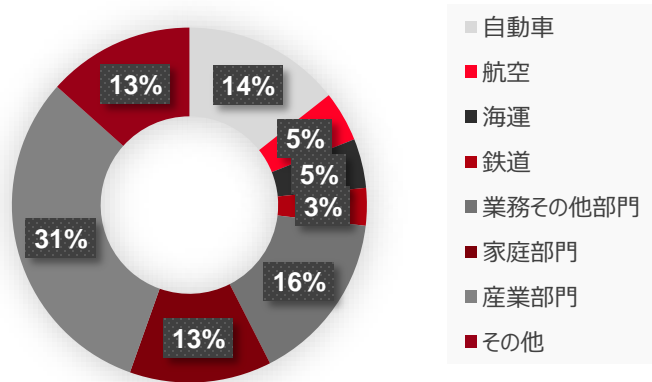


Data Sources: 富士経済調べ (2020年)

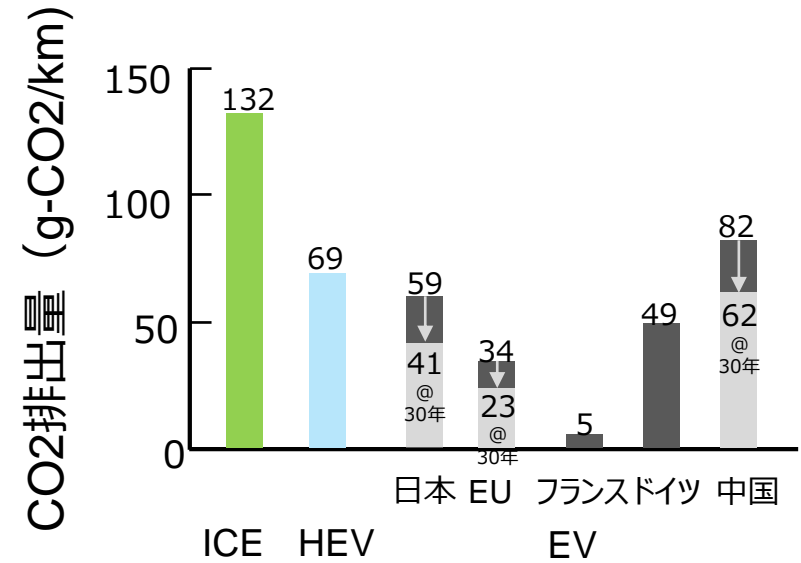
## 中国・EUでEV販売比率が伸長



Data Sources: 富士経済調べ (2020年)



日本の各部門のCO<sub>2</sub>排出量



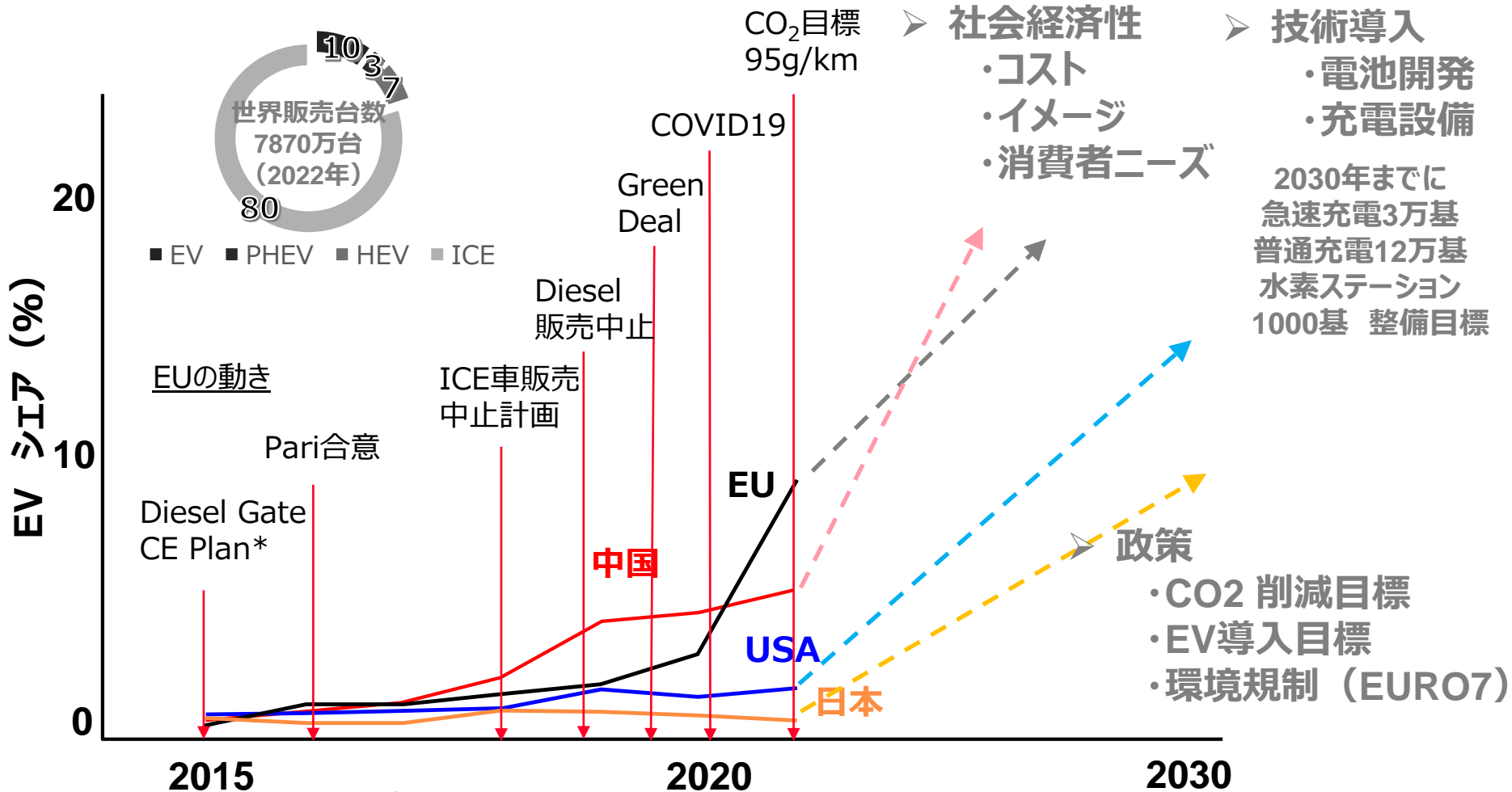
Well to Wheel CO<sub>2</sub>排出量 (2015年)

Data Sources:

- International Energy Agency
- 国土交通省資料 [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)
- 経産省資料「自動車新時代戦略会議」平成30年4月18日 第二回エネルギー情勢懇談会



# 8 EVシェア推移と普及への影響因子



Data Sources:

- ・International Energy Agency
- ・国土交通省資料 [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)
- ・経産省資料 「自動車新時代戦略会議」平成30年4月18日 第二回エネルギー情勢懇談会

「自動車分野のカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について」 2023年4月5日

「モビリティの構造変化と2030年以降に向けた自動車政策の方向性に関する検討会」 2022年4月25日

ICE : Internal Combustion Engine

CE: Circular Economy

## EV本格普及に向けた動きが活発化、一体化コンポeAxleの開発が加速

企業	技術動向
テスラ	低コスト化推進、リアアースフリーモータ開発、SiCパワー半導体を従来システムから75%減、汎用MPU 4コから、カスタムPPU 1コへ
VW	熱管理システムの開発を推進、効率を最大20%以上向上
ボッシュ	「eアクスル」内製化
ZF	新しいeアクスル開発、駆動部品のコンパクト設計、パワーエレクトロニクスの効率化、省資源型材料仕様
ホンファイ	EV製造請負プラットフォーム「MIH」を展開
ファーウェイ	eアクスル「DriveOne」、ファーウェイ・スマートセレクション連携強化

Data Source :

経産省資料：「モビリティの構造変化と2030年以降に向けた自動車政策の方向性に関する検討会」2022年4月25日

日立Astemoニュースリリース「Hondaの電気自動車向け電動アクスルを受注し、電動化事業をさらに拡大」2022年9月26日



# Contents

---

1章 CECN動向とEV市場\*

2章 パワーモジュール実装の動向

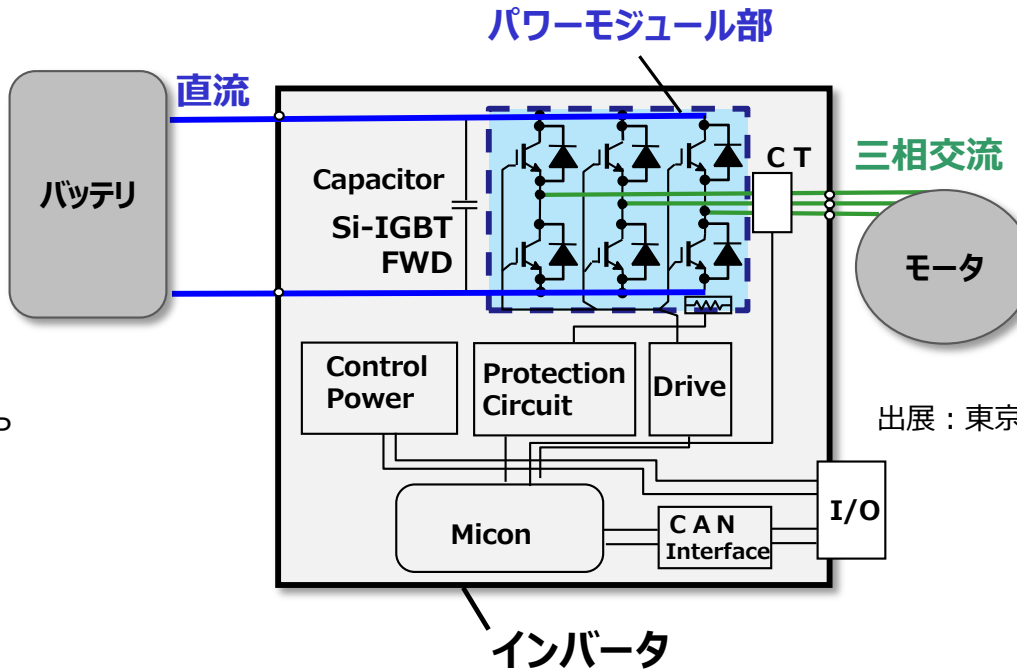
3章 パワーモジュール封止構造の高性能化

4章 トピックス：高機能材料による高耐圧化技術

\*CECN : Circular Economy Carbon Neutral, EV: Electric Vehicle



出展：日立製作所HP



出展：東京モータショー2019 日立AMSブース

バッテリー

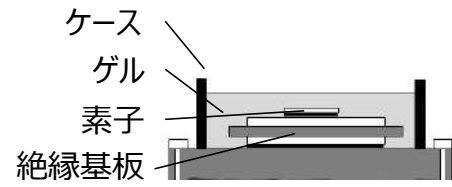
インバータ

モーター

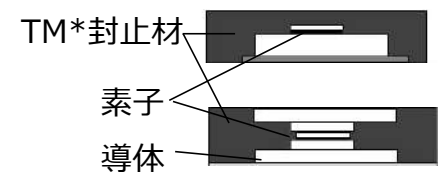
## EVのキーコンポーネントとインバータの構成



インバータとパワーモジュール外観



Case型

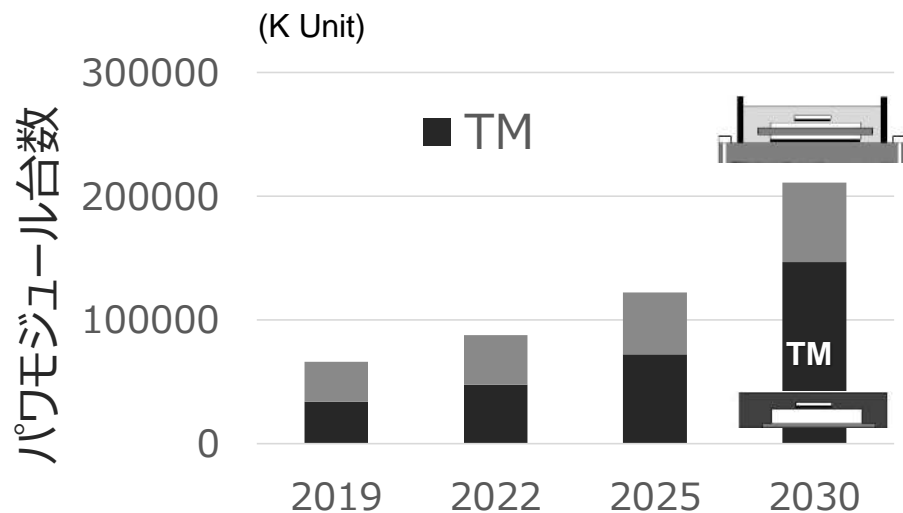
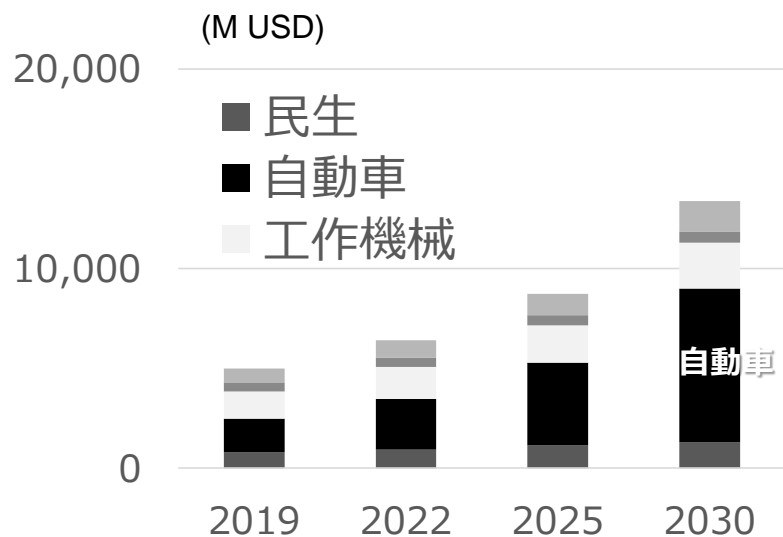


TM型 \* Transfer Mold

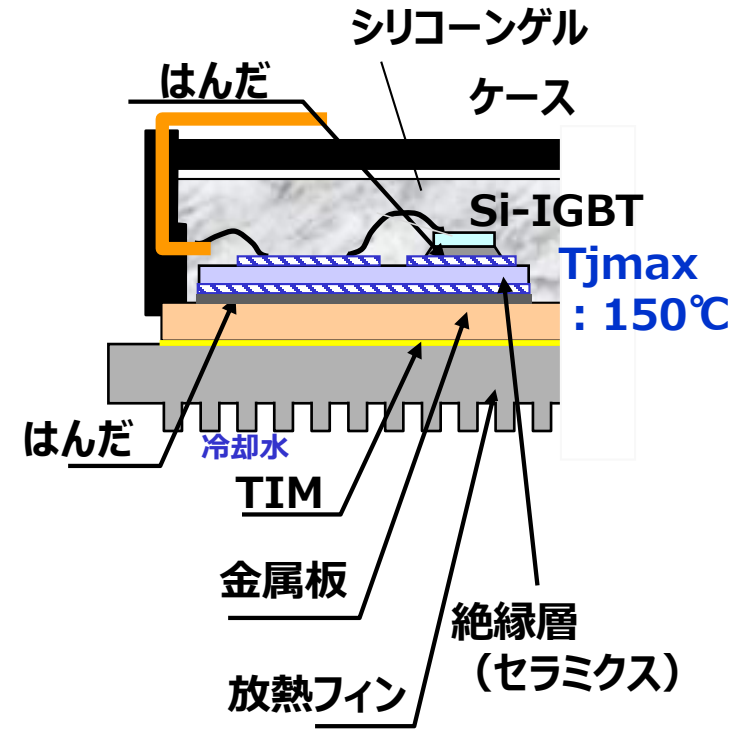
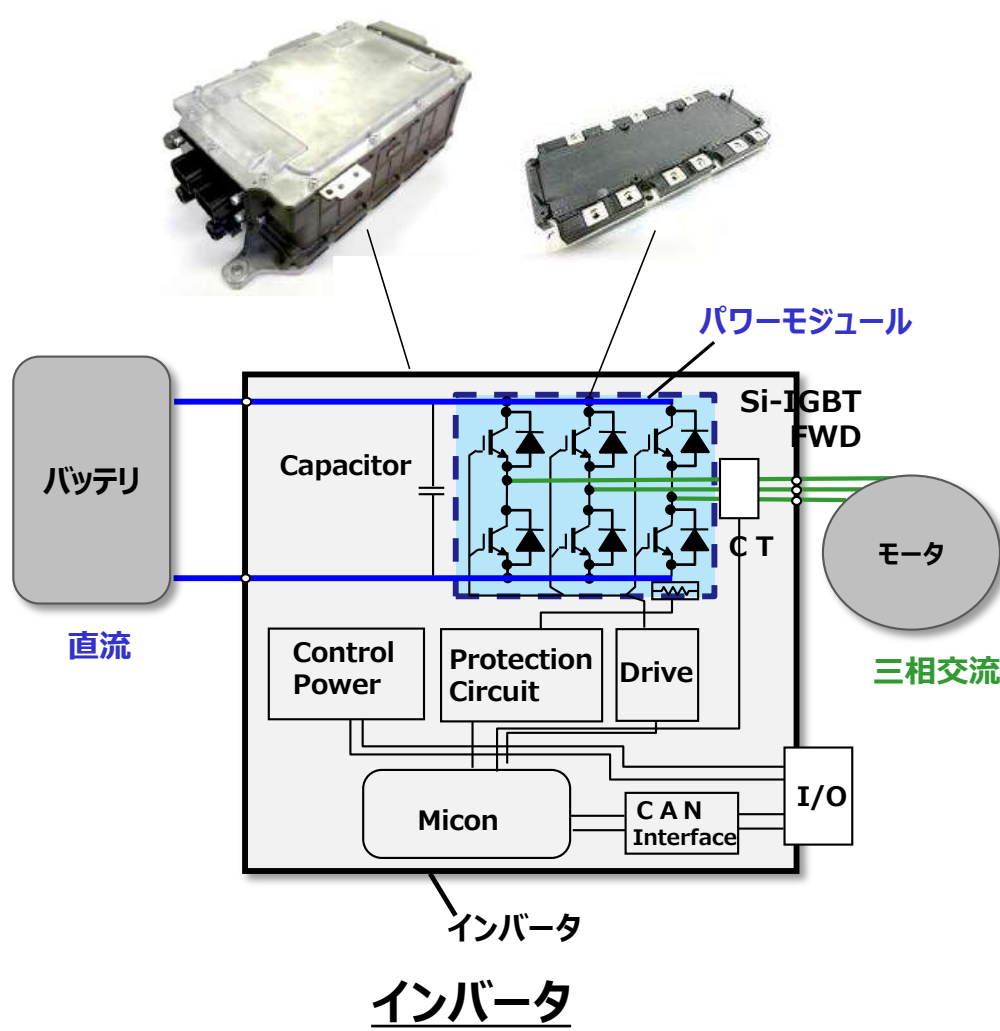
## インバータ外観とパワーモジュールタイプ

## 産業別市場では自動車用とがけん引、モジュール形態はTM型の伸びが大きい

産業別パワーモジュール市場



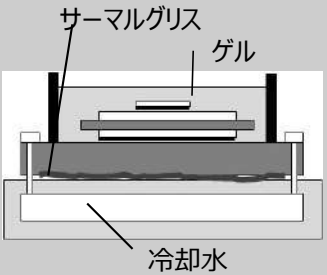
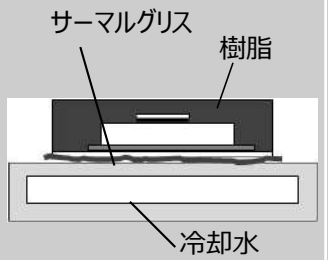
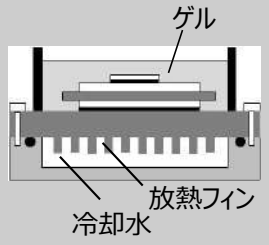
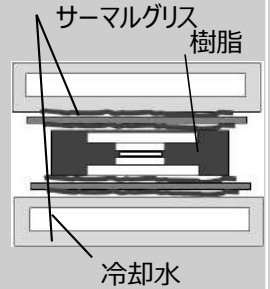
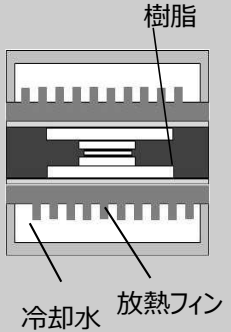
バッテリーの直流を3相交流に変換、デバイスの発熱を150℃に抑える冷却構造が重要



Si-IGBT: Silicon - Insulated Gate Bipolar Transistor  
TIM: Thermal Interface Material

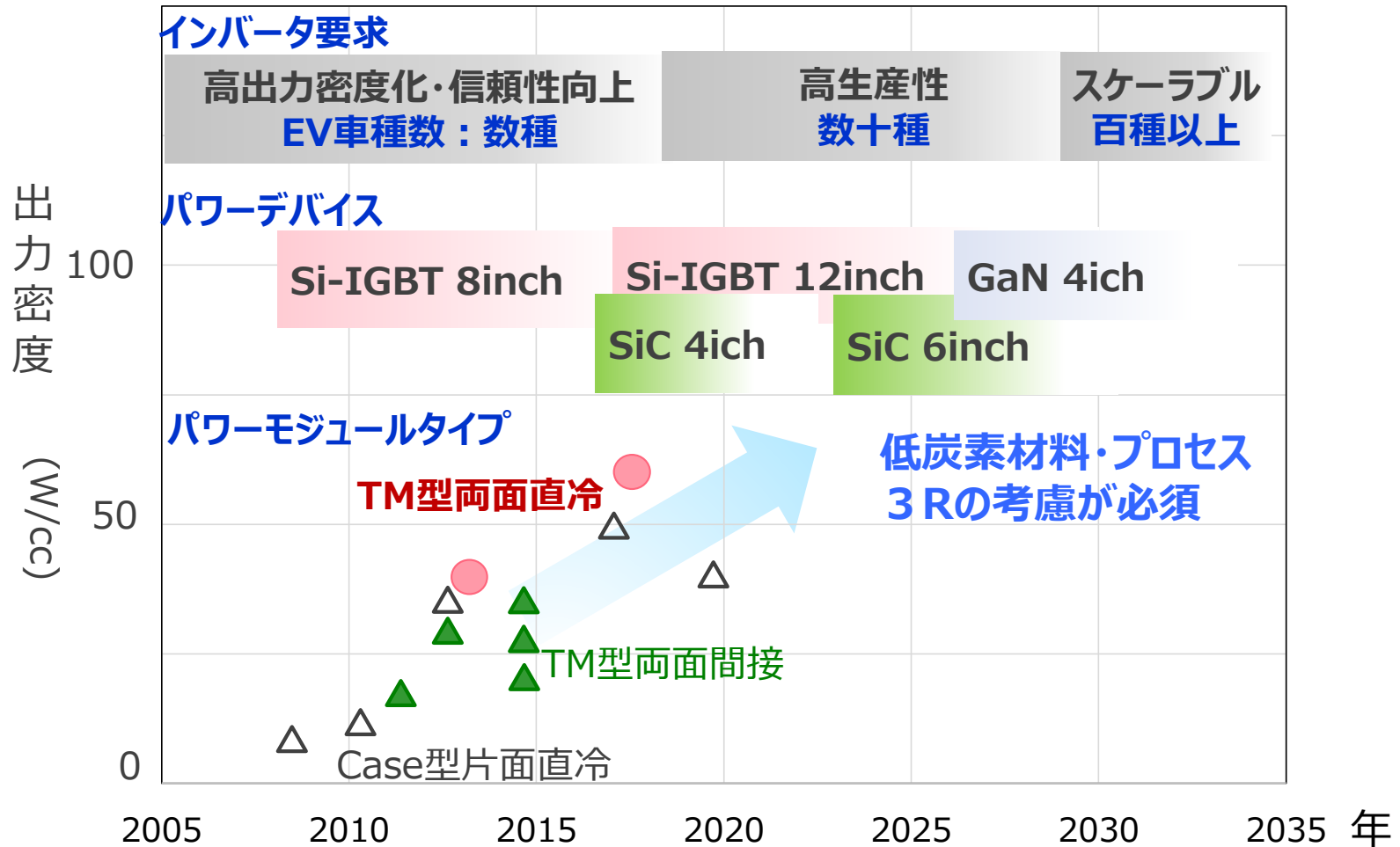
## パワーモジュールの断面構造

冷却方式：片面 or 両面、封止方式：低弾性ゲル or 高弾性TM  
伝熱部材：低応力サーマルグリス (TIM) or 高熱伝導部材

モジュールタイプ	片面間接冷却 ゲル封止構造	片面間接冷却 樹脂封止構造	片面直接冷却 ゲル封止構造	両面間接冷却 樹脂封止構造	両面直接冷却 樹脂封止構造
断面構造					
信頼性	△	○	△	◎	◎
熱抵抗	100%	100%	75%	75%	50%

# 15 インバータの出力密度と開発動向

多様なEV車種への対応が必要、出力密度化のため小型・高出力のパワーモジュール  
開発が活発、システムの高効率化のためSiCデバイスの採用が加速

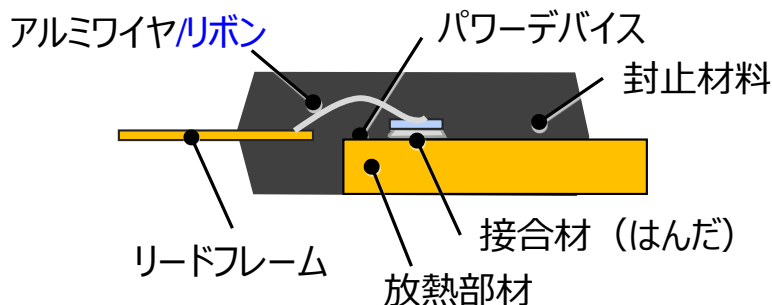


Data Sources: 各調査会社報告から筆者まとめ

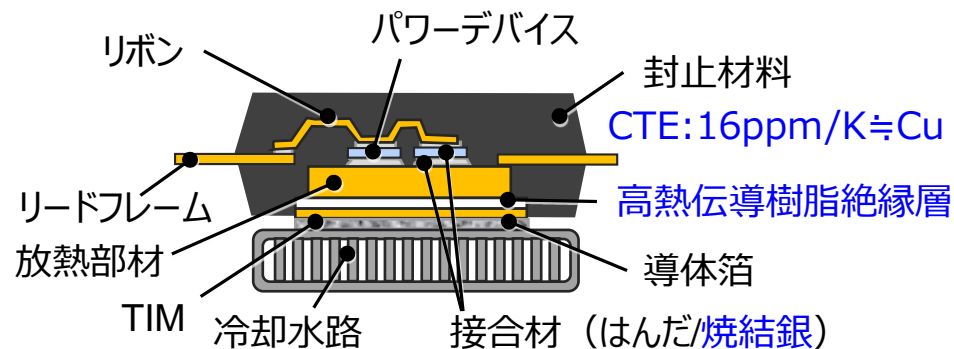


## A. TO型パッケージ

TO : Transistor Outline

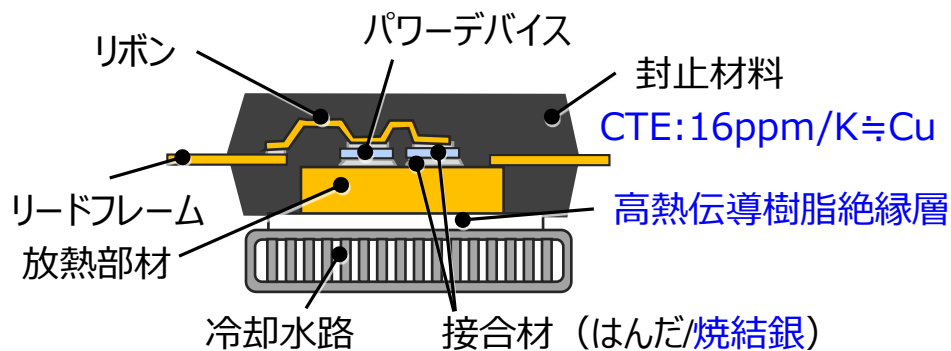


## B. 片面冷却・間接冷却・樹脂絶縁

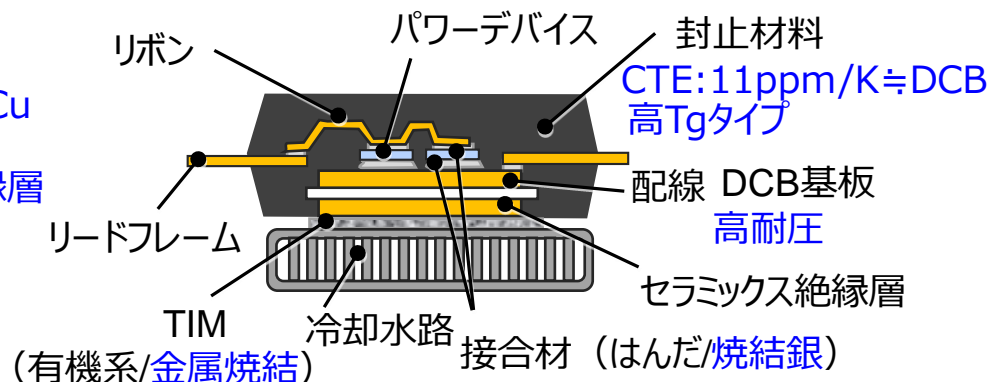


TIM : Thermal Interface Material

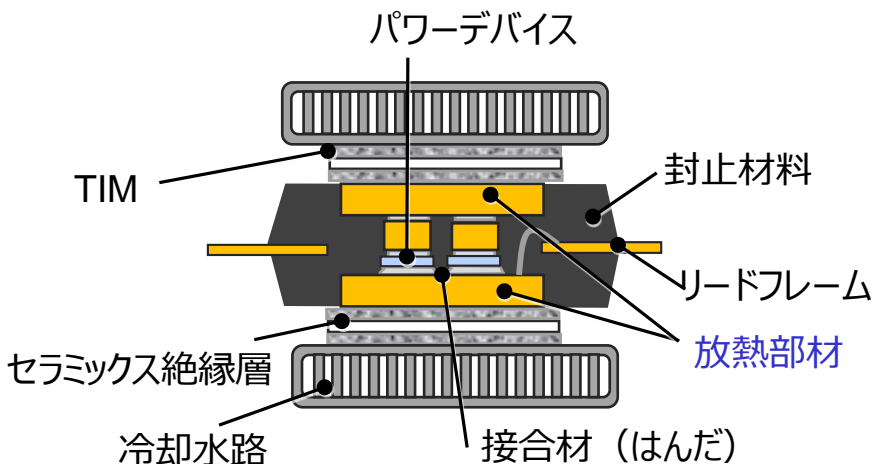
## C. 片面冷却・直接冷却・樹脂絶縁



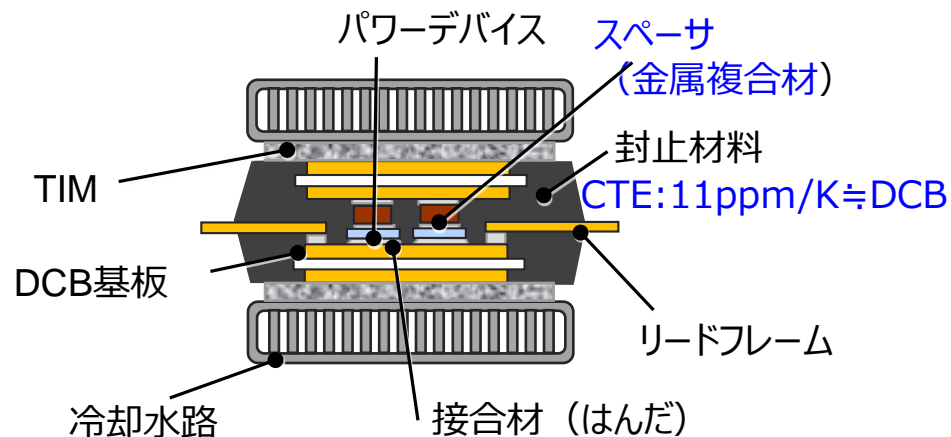
## D. 片面冷却・間接冷却・セラ絶縁



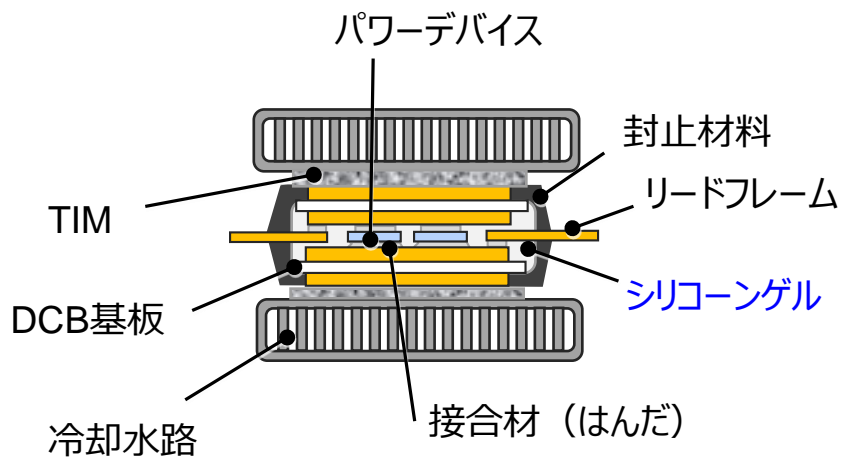
## E. 両面冷却・間接冷却・セラ絶縁



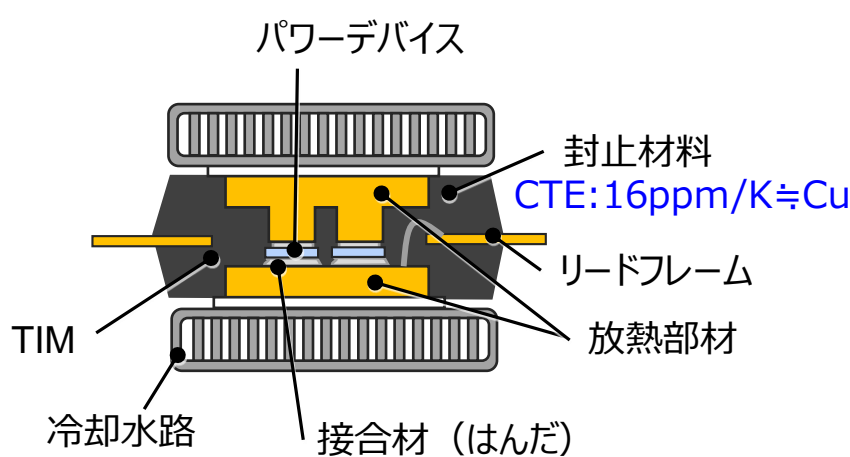
## F. 両面冷却・間接冷却・セラ絶縁



## G. 両面冷却・直冷・セラ絶縁・ゲル封止



## H. 両面冷却・直接冷却・樹脂絶縁



背景	課題	実装技術
<p>高信頼・長寿命化</p> <p>小型高出力化</p> <p>高Tj化 (SiCデバイス)</p> <p>高電圧化 (急速充電)</p>	高信頼性化	A. 接続部の熱歪を抑える <b>樹脂封止構造</b> <sup>1)2)</sup>
	高放熱化	B. 片面冷却よりも冷却効率が高い <b>両面冷却構造</b> <sup>1)2)</sup> C. 樹脂複合材のボトルネックを解消する <b>高熱伝導樹脂</b> <sup>3)</sup> D. 高機能性材料を活用した <b>熱放散コーティング</b> <sup>4)</sup>
	高耐熱化	E. 高温動作を実現する <b>高耐熱封止材料</b> F. 高温での信頼性が高い <b>焼結金属接続</b> <sup>5)-9)</sup>
	高耐圧化	G. システム電圧を高くできる <b>中間導体埋設絶縁技術</b> <sup>10)11)</sup> → <b>トピックステーマ</b>

Al ワイヤ

断線

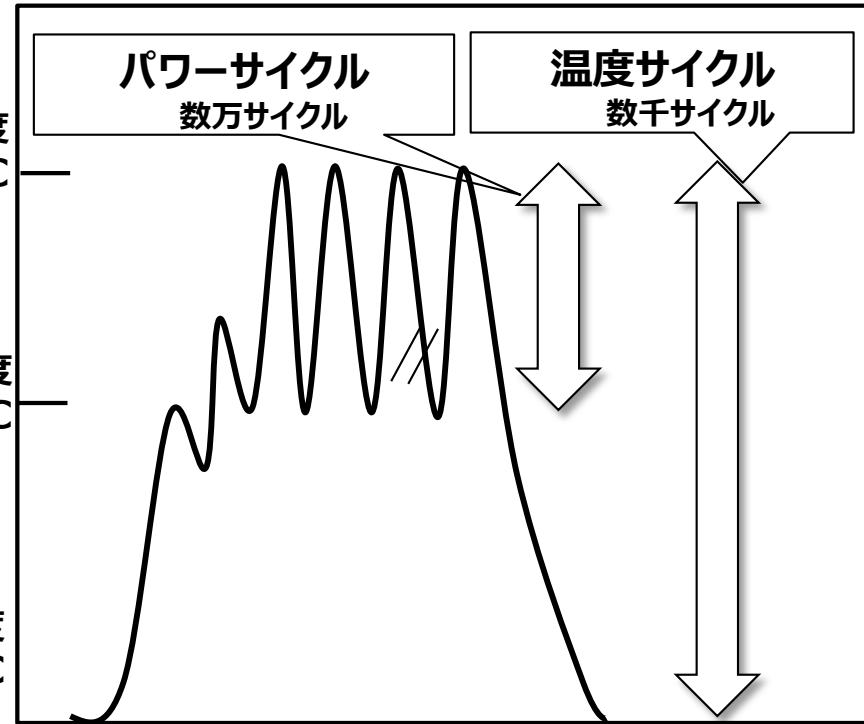
CTE (p pm/K)

Al:	24
Si :	4
Cu :	16
Solder :	40
SiN :	3
AlSiC:	7.5

デバイス温度  
150°C

ケース温度  
~100°C

最低保存温度  
-40°C



動作時のデバイス温度

絶縁層(SiN, AlN)

Cu

ベース金属

クラック進展

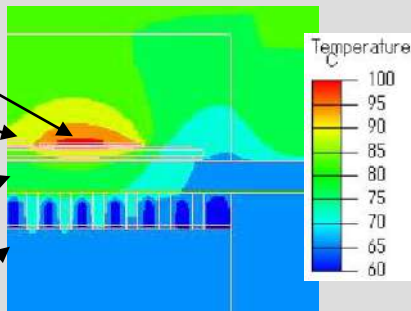
パワーモジュールの断面構造

Si IGBT

絶縁層

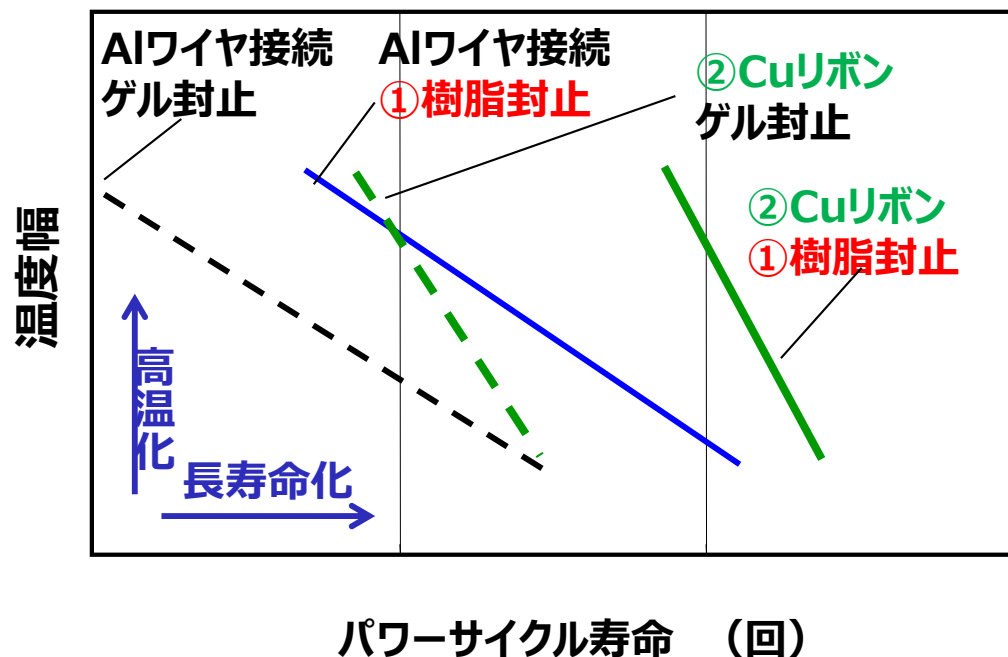
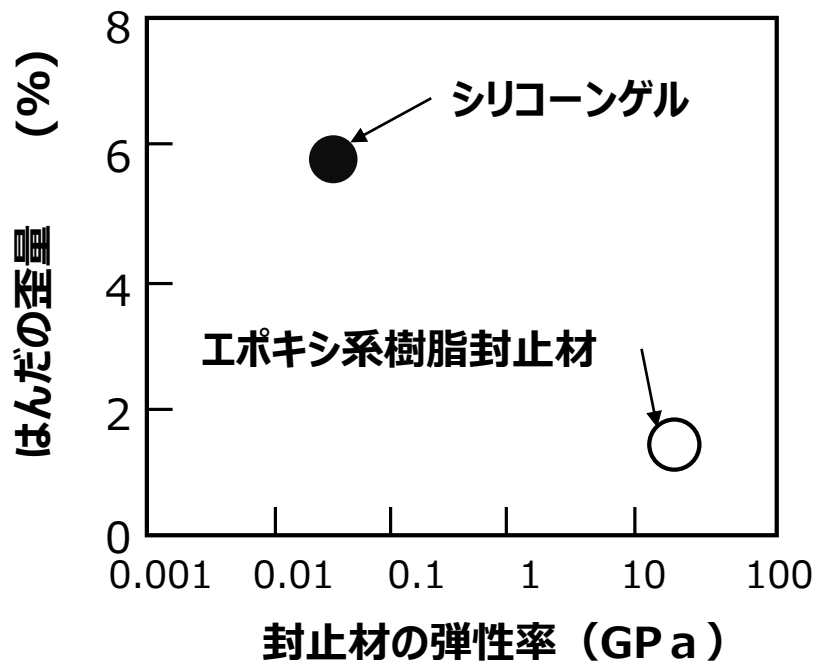
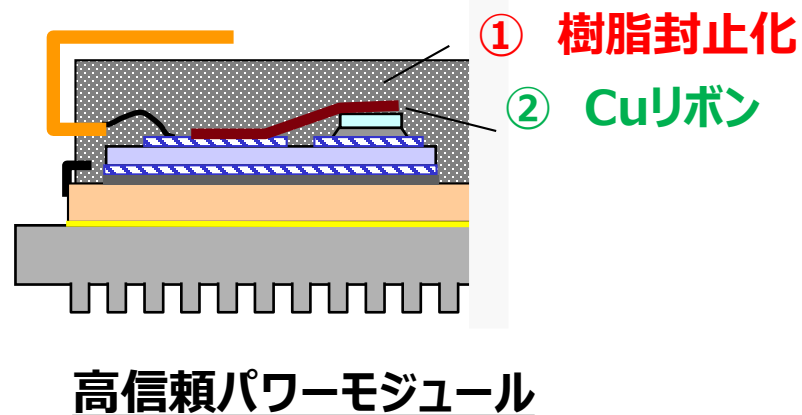
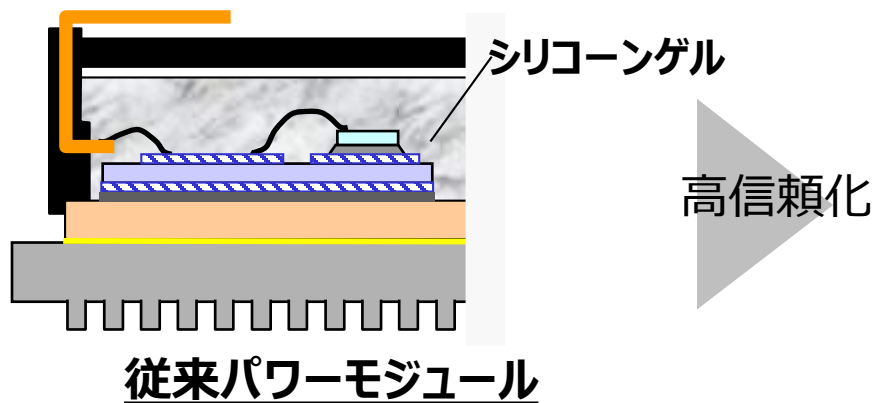
放熱フィン

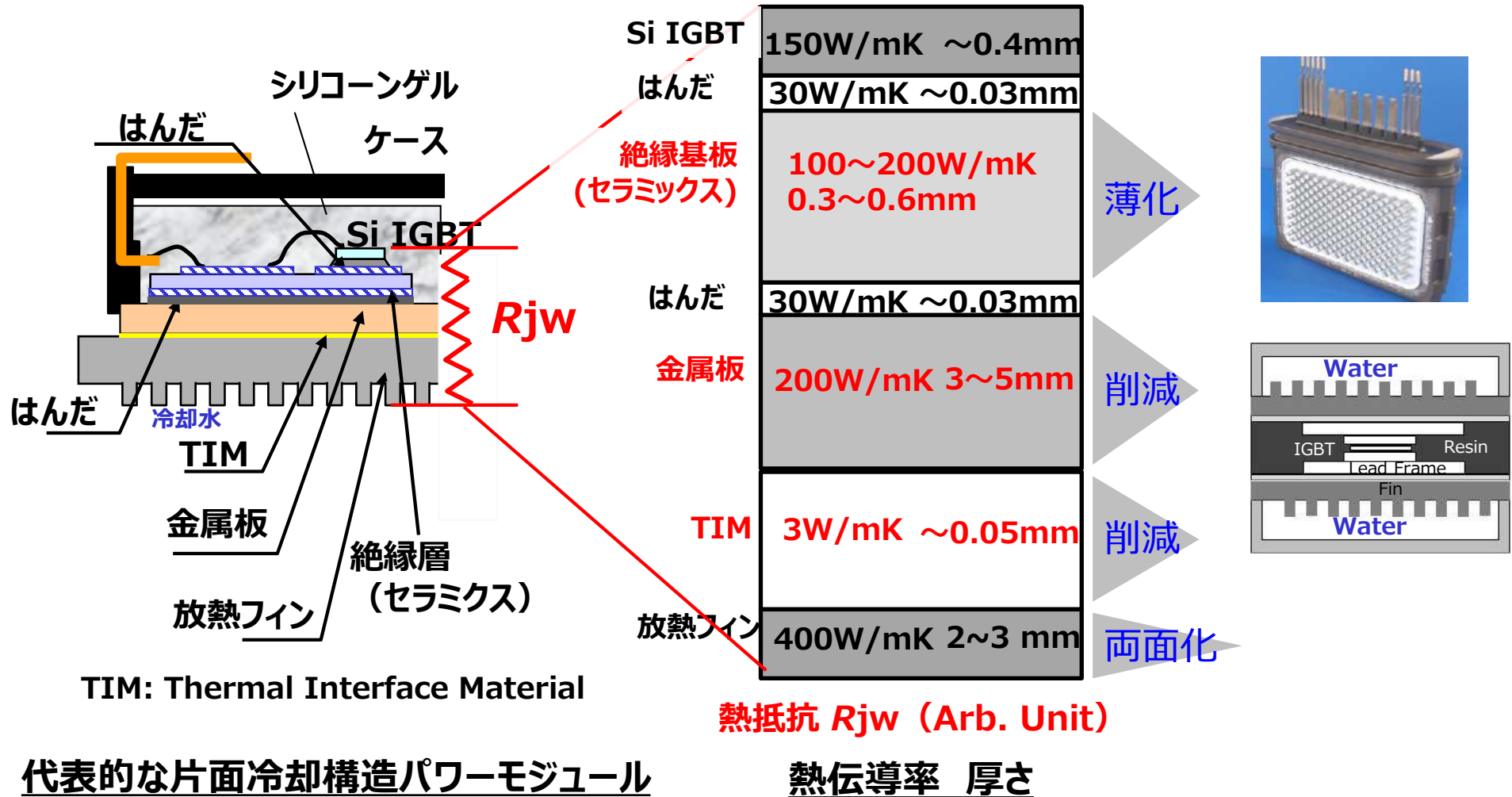
冷却水



動作時の熱分布

CTE: Coefficient of Thermal Expansion





# Contents

---

1章 CECN動向とEV市場\*

2章 パワーモジュール実装の動向

3章 パワーモジュール封止構造の高性能化

4章 トピックス：高機能材料による高耐圧化技術

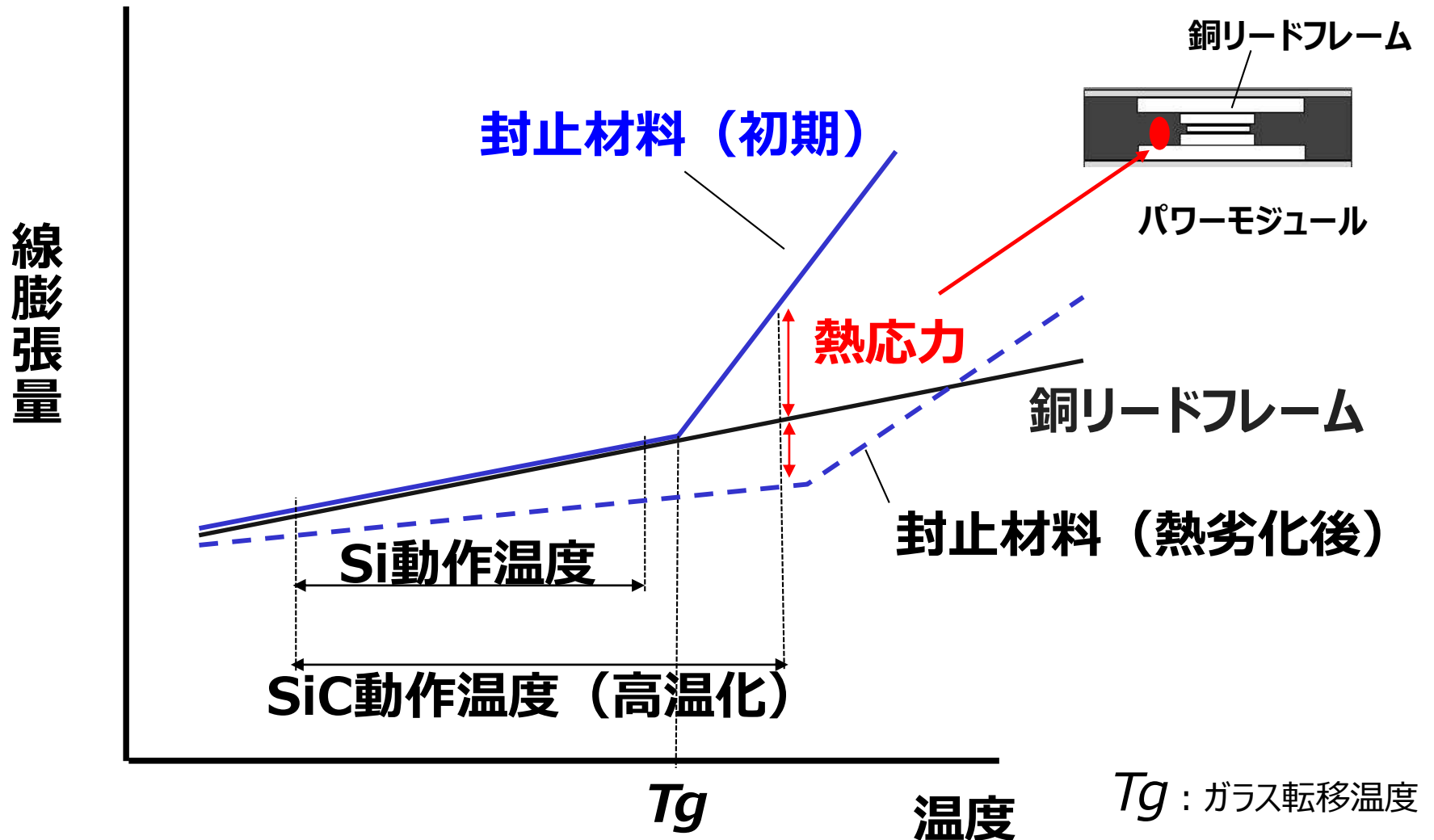
\*CECN : Circular Economy Carbon Neutral, EV: Electric Vehicle

#	項目	機能の内容	実装材料
1	電氣的インターコネクト ディスインターコネクト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・信号の伝播</li> <li>・電源の供給</li> <li>・テスト用プローブ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・配線基板、バスバ</li> <li>・端子、接続材 (金バンプ、はんだ、 銀ペースト)</li> <li>・ボンディングワイヤ</li> <li>・絶縁 (封止材料, セラミクス)</li> </ul>
2	熱的インターコネクト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放熱路の形成</li> <li>・冷却性能の向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放熱基板</li> <li>・放熱フィン</li> <li>・パッケージ材 (封止材料)</li> </ul>
3	機械的ディスインターコネクト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐ハンドリングストレス</li> <li>・外部応力からの保護</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パッケージ材 (封止材料)</li> <li>・筐体</li> </ul>
4	化学的ディスインターコネクト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外部雰囲気からの腐食防止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パッケージ材 (封止材料)</li> <li>・コーティング剤</li> </ul>

西原幹雄, エレクトロニクス実装学会誌, 1(4), 312(1998) 戒能俊邦, 応用物理, 49, 175-181(1980)

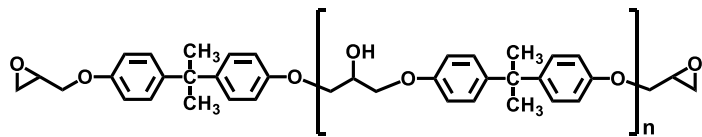
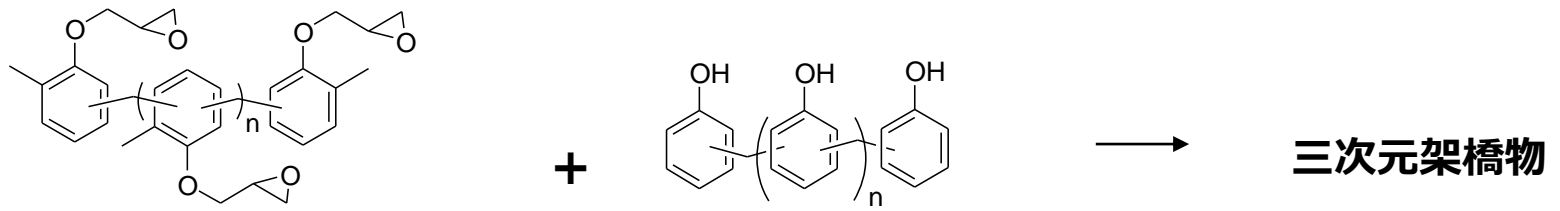


動作温度の高温化に対して、熱応力を低減する ①高耐熱化（高Tg化）  
高温下での②機械特性や、③各部材との密着性の長期安定性が重要



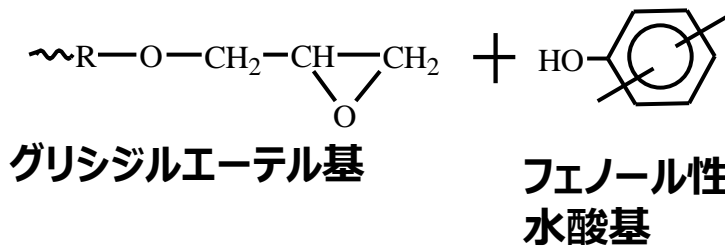
素材	化合物	配合比	使用目的
ベース樹脂	エポキシ樹脂 クレゾールノボラック型 ビフェニル型 臭素化ビスフェノール型	5-20	マトリックス樹脂 成形性、電気特性、機械特性付与、難燃性付与
硬化剤	フェノールノボラック アミン化合物 無水酸化合物	5-20	↑
硬化促進剤	窒素化合物 ホスフィン類	< 1	硬化促進
可とう剤	シリコーンゴム ポリオレフィンエラストマ	< 5	低応力化
カップリング剤	エポキシシラン	< 1	充填材／マトリックス樹脂の接着向上
難燃助剤	三酸化アンチモン	< 1	難燃性付与
離型剤	ポリエチレンワックス類	< 1	金型離型性
着色剤	カーボンブラック	< 1	着色
イオン捕捉剤	無機イオン交換体	< 1	腐食性イオンの捕捉
無機フィラ	熔融シリカ、結晶シリカ、アルミナ	55-90	線膨張係数、弾性率、機械強度、熱伝導

フェノール硬化エポキシ樹脂は室温で固形、長期信頼性に優れる、特性バランスが良好

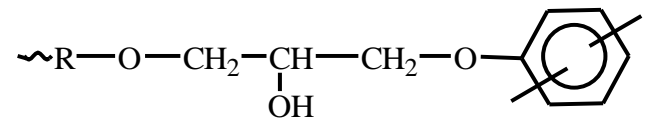


エポキシ樹脂

硬化剤



硬化促進剤

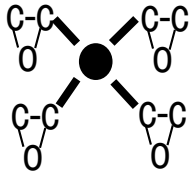


エポキシ樹脂とフェノール硬化剤の反応

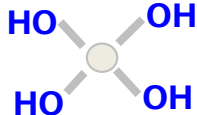
① 高耐熱化 (高T<sub>g</sub>化)

エポキシ基

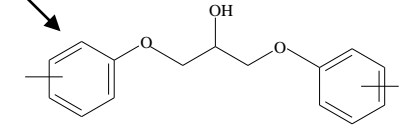
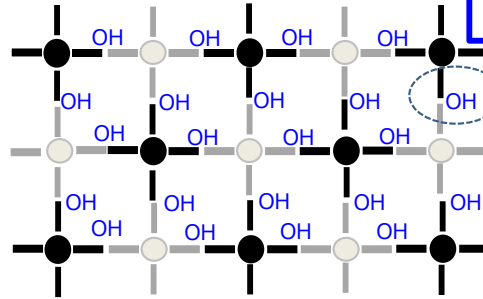
水酸基



+



硬化反応

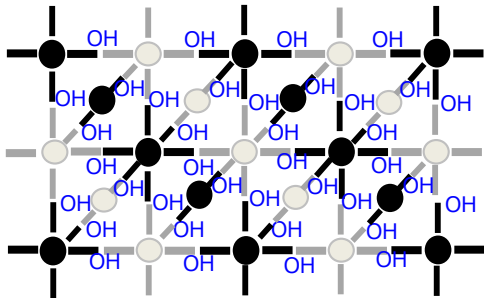


エポキシ樹脂

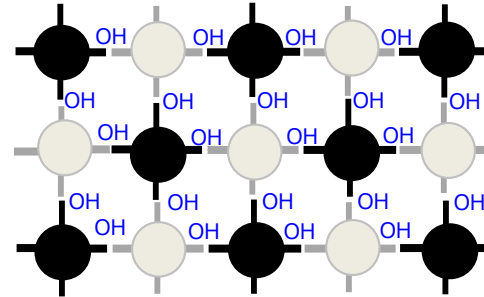
フェノール硬化剤

架橋構造

グリセリンエーテル基



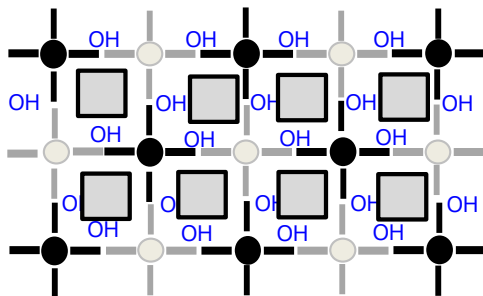
・多官能エポキシ



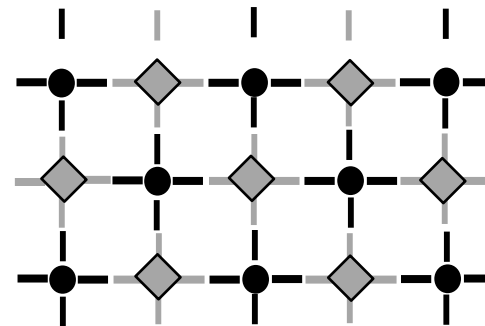
・メソゲン含有  
・多環系樹脂

(a) 多官能樹脂による高架橋密度化

(b) 嵩高い・相互作用性の分子構造の導入



・シリカゾルゲル  
粒子

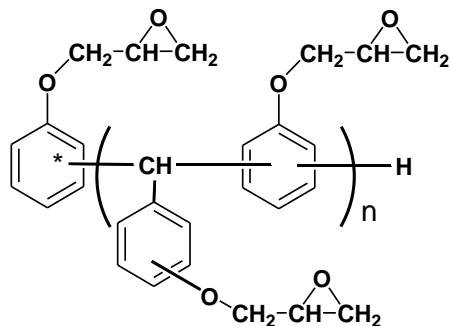


・ビスマレイミド  
・ベンゾオキサジン  
・シアネートエステル

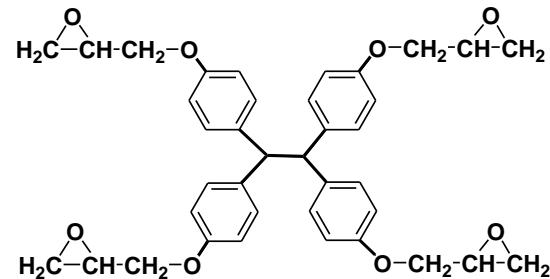
(c) ナノサイズフィラによる架橋分子鎖の拘束

(d) 高耐熱架橋構造の導入

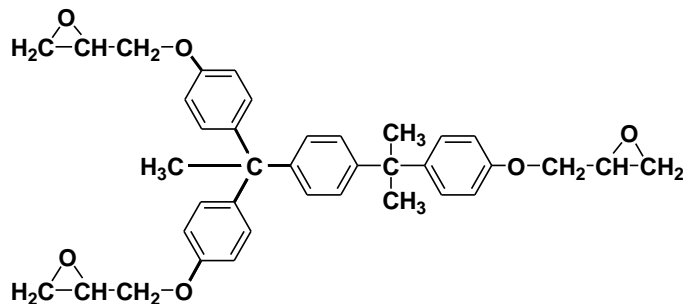
## ① 高耐熱化 (高T<sub>g</sub>化)



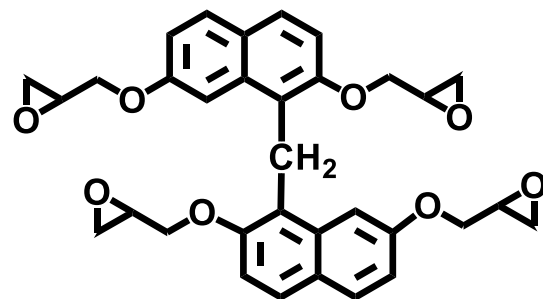
トリスフェノールメタン型エポキシ樹脂



テトラフェノールエタン型エポキシ樹脂

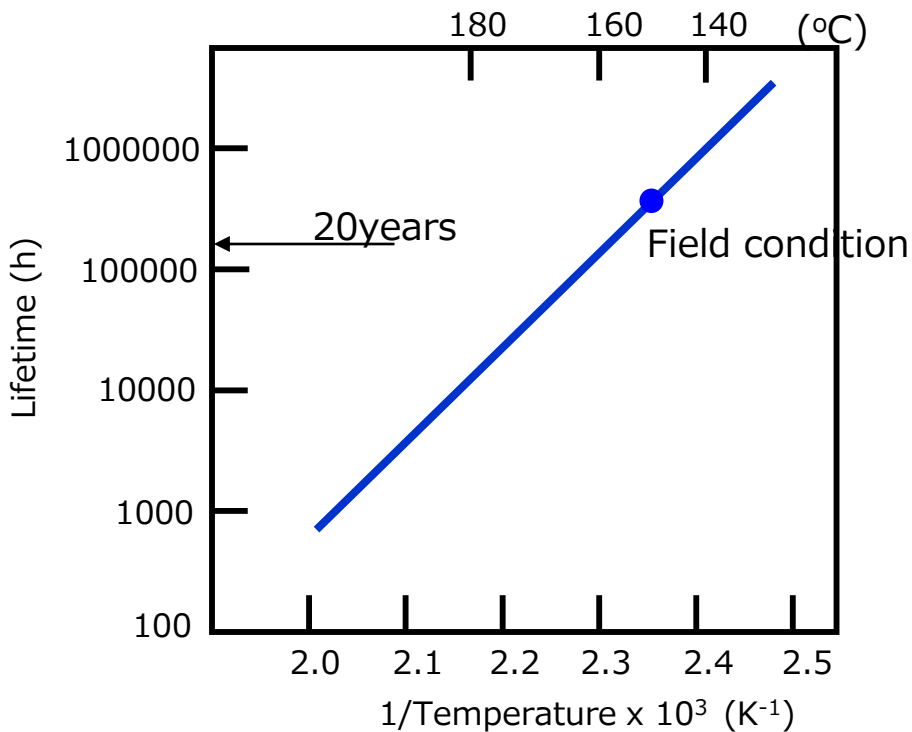


特殊 3 官能エポキシ樹脂

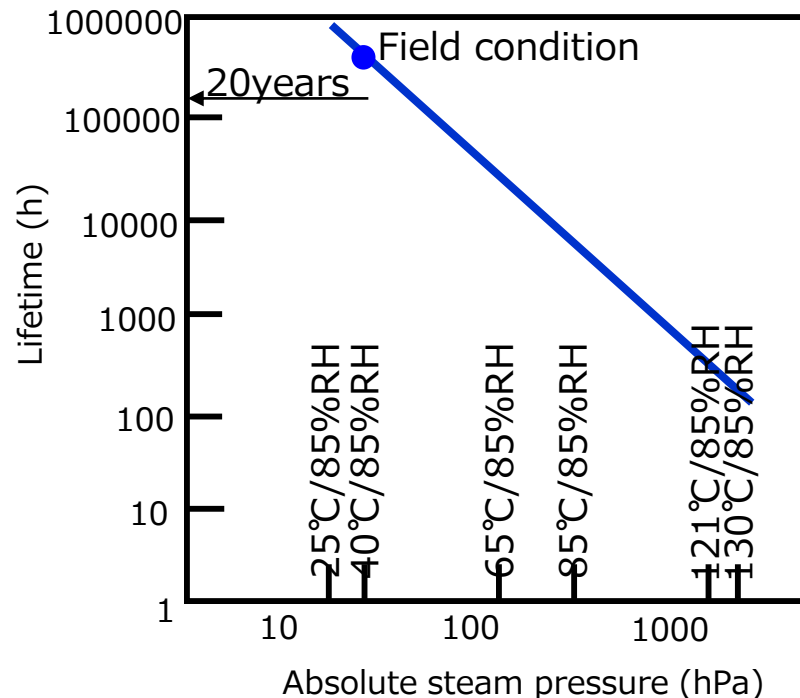


ナフタレン型エポキシ樹脂

② 機械特性の長期安定性



\* Life time: time of 1% weight loss



Bias test results for EMC encapsulated LSIs under several humidity conditions

② 機械特性の長期安定性

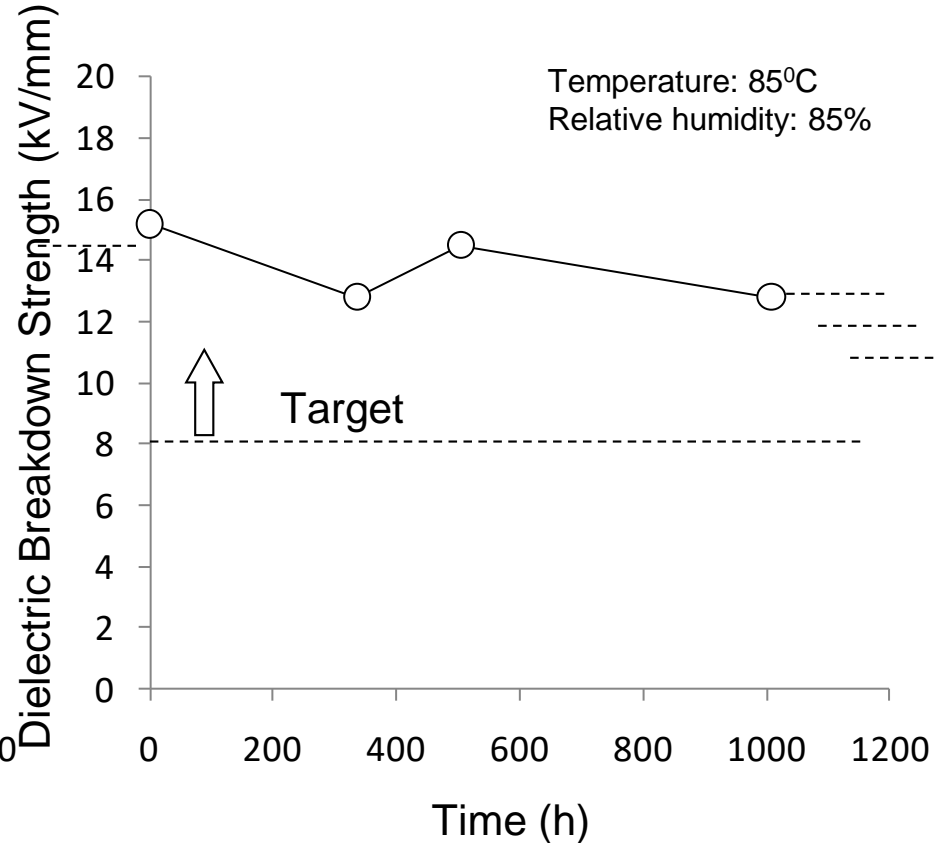
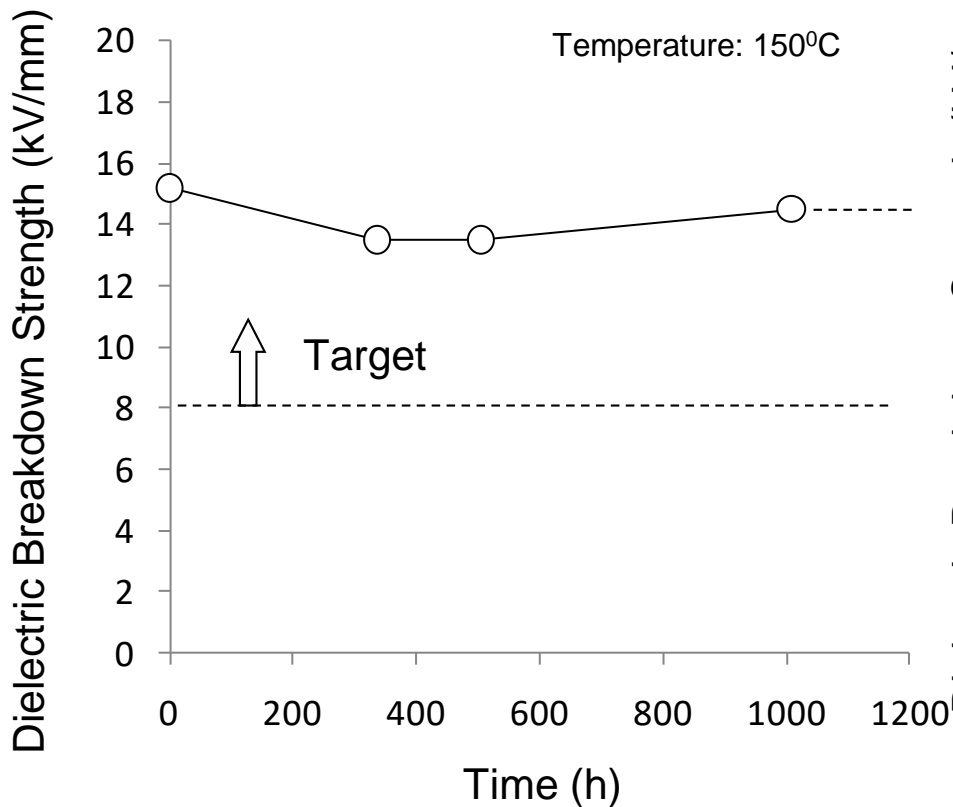
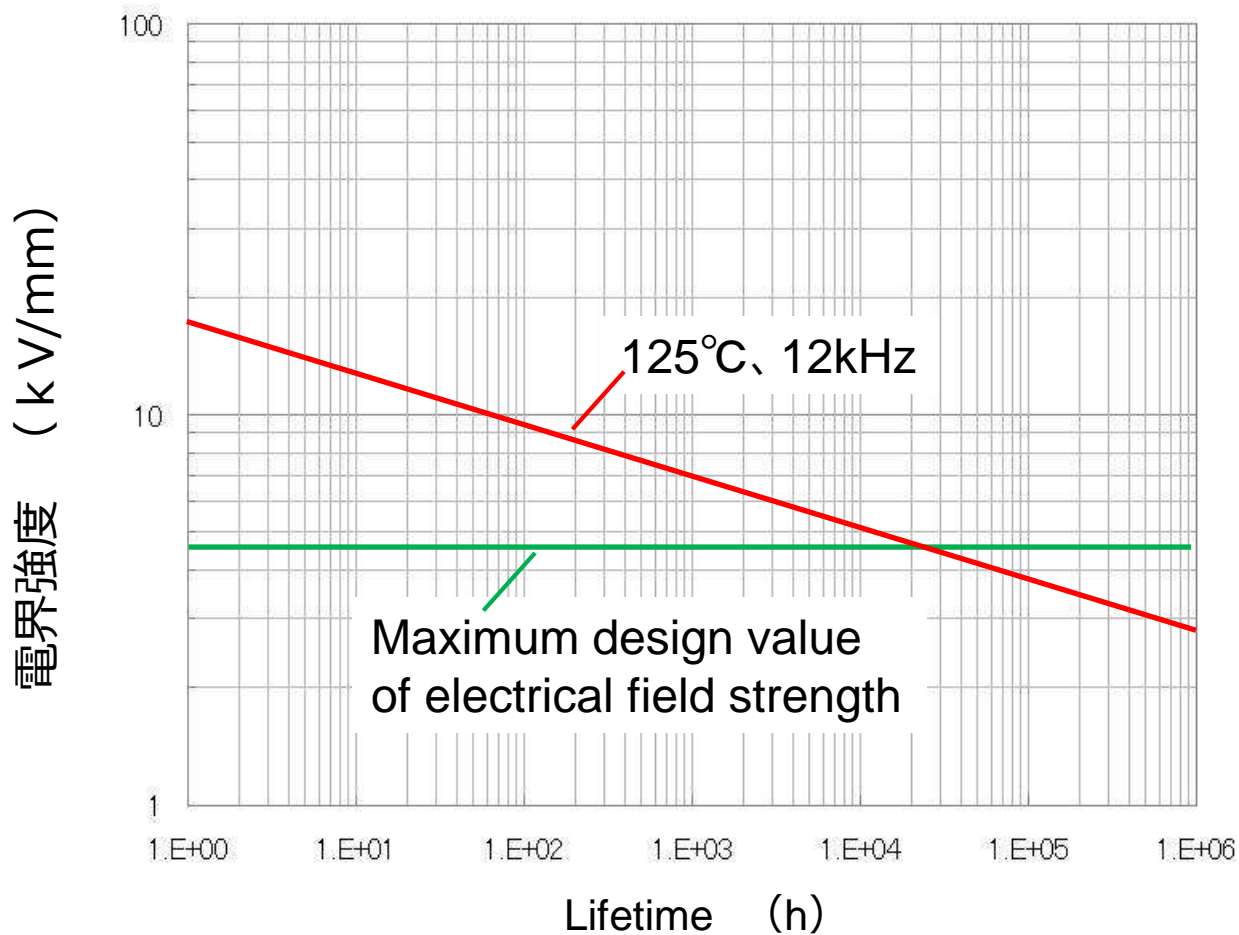


Fig.1 Change of dielectric breakdown strength of EMC in high temperature (150°C) atmosphere

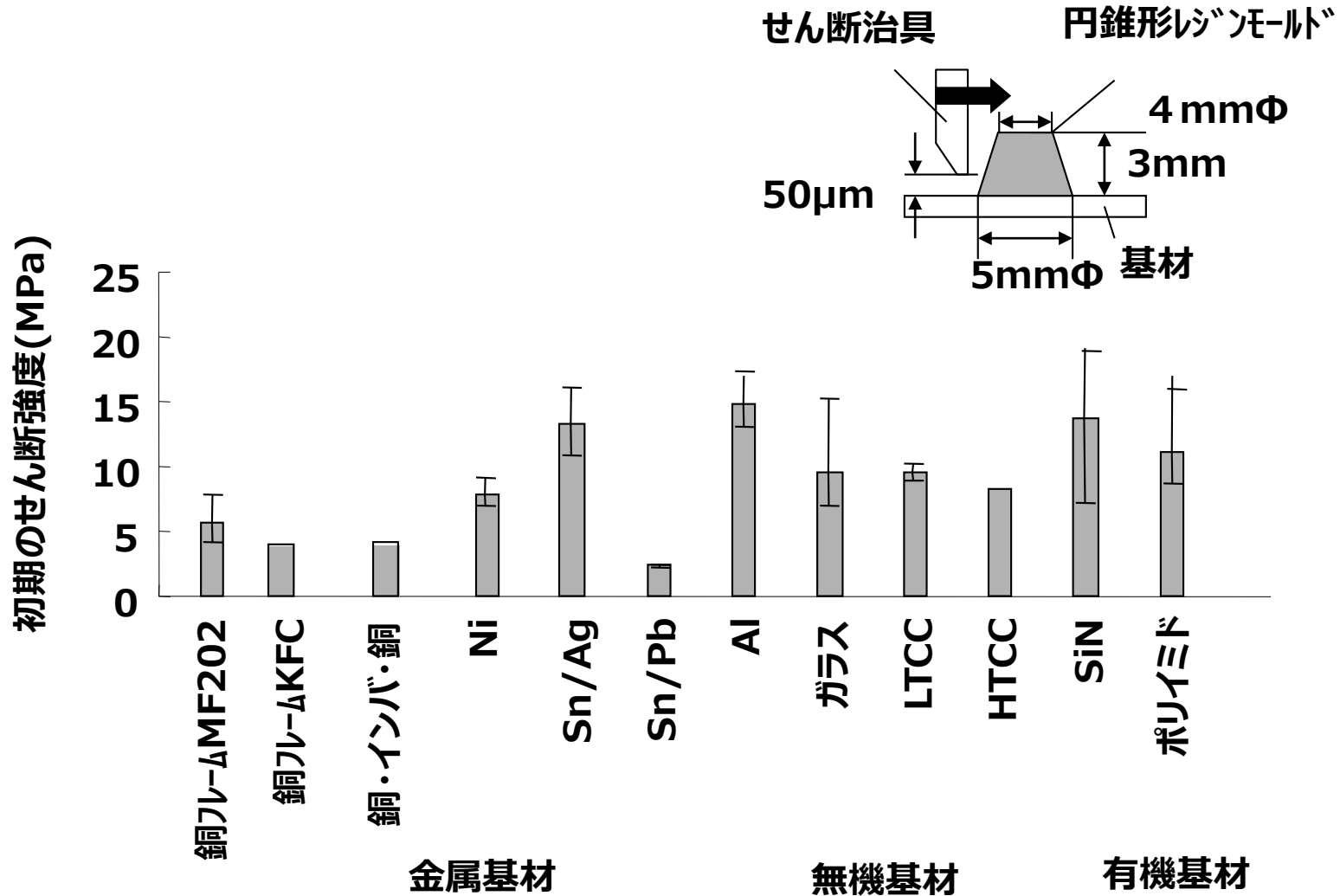
Fig.2 Change of dielectric breakdown strength of EMC in high humidity (85°C/85%RH) atmosphere

② 機械特性の長期安定性





③ 接着性の長期安定性



③ 接着性の長期安定性

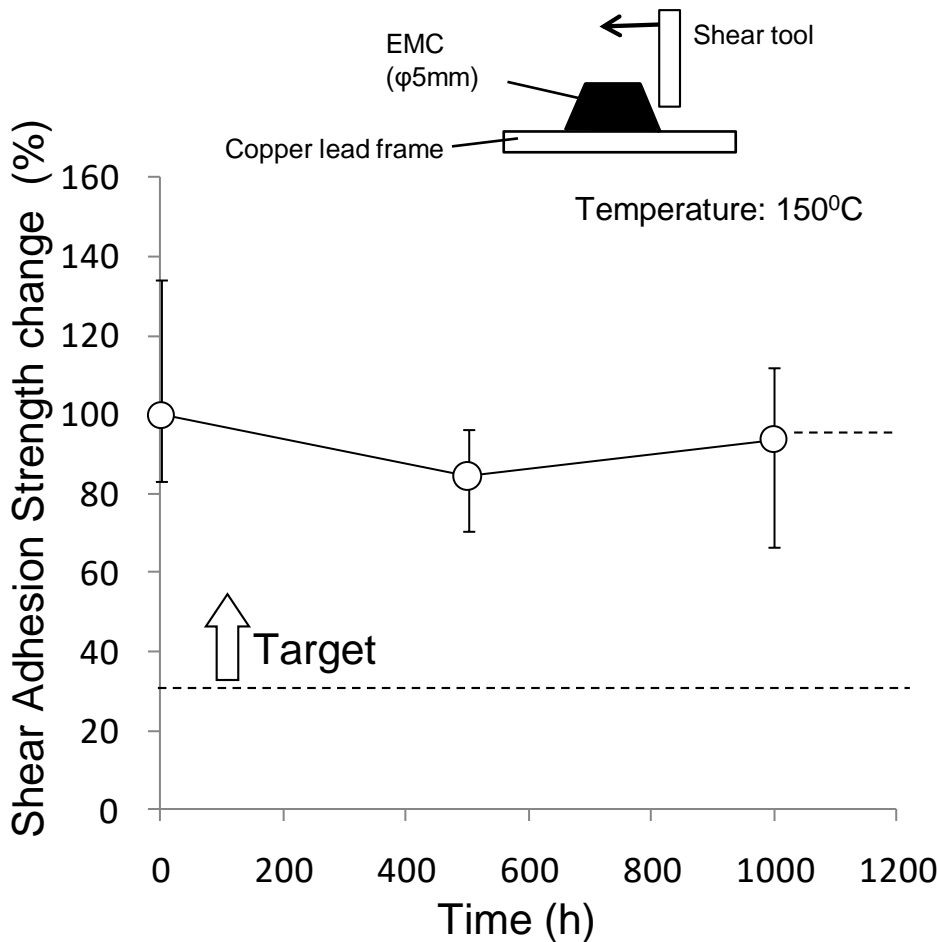


Fig.1 Change of shear adhesion strength between EMC and copper lead frame (roughening treatment) in high temperature (150°C) atmosphere

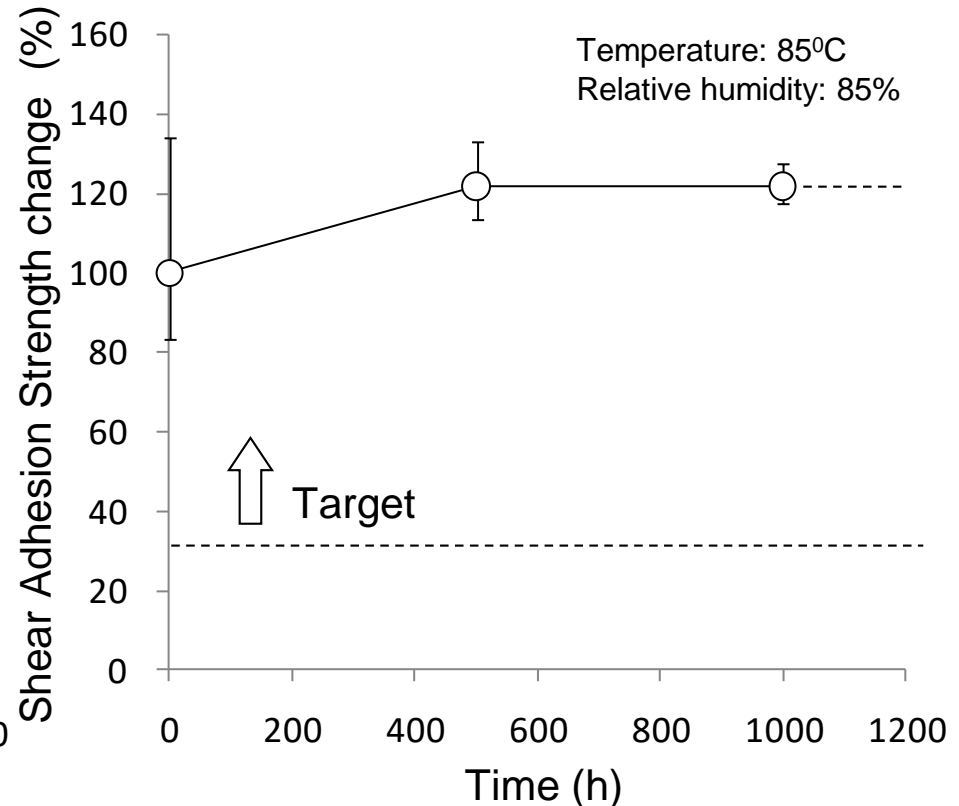
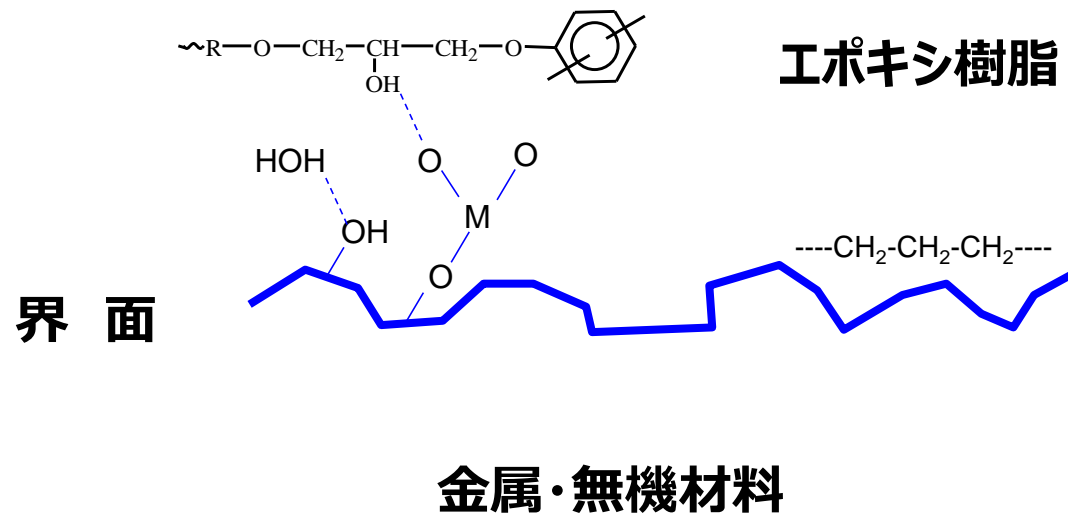


Fig.2 Change of shear adhesion strength between EMC and copper lead frame (roughening treatment) in high humidity (85°C/85%RH) atmosphere

## ③ 接着性の長期安定性

- ・界面の化学的相互作用  
共有結合、水素結合、分子間力（ファンデルワールス力等）
- ・機械的な投錨効果
- ・界面に働く応力
- ・汚染物など



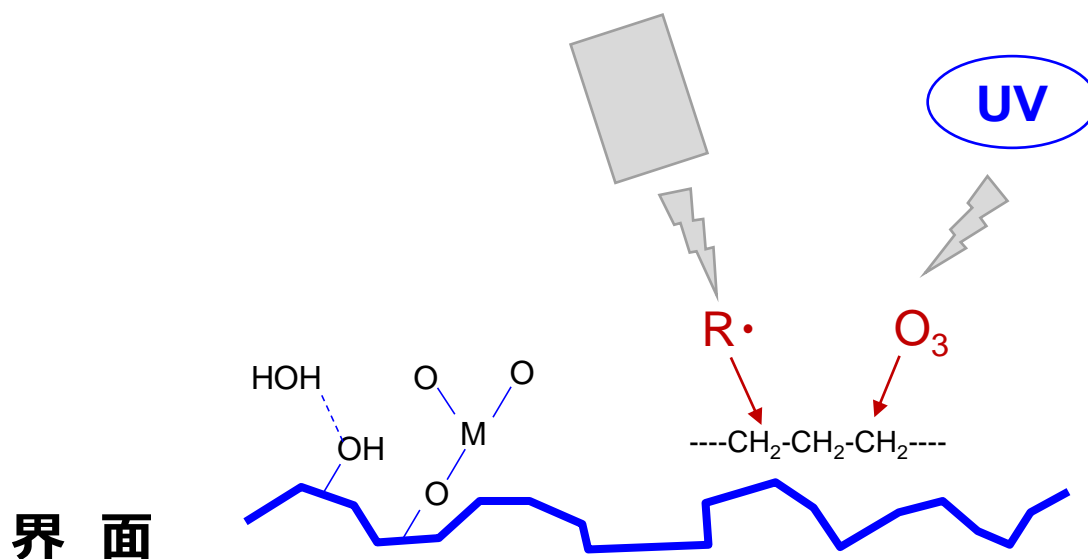
## ③ 接着性の長期安定性

・洗浄：界面相互作用を阻害する汚染物を除外

・脱脂洗浄（界面活性剤、有機溶剤、酸アルカリ）

・UVオゾン洗浄（オゾンによる有機物分解、酸化）

・プラズマ照射

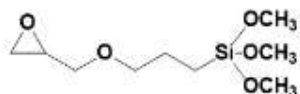


## ・表面処理

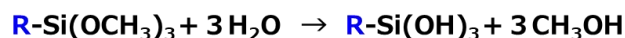
### ③ 接着性の長期安定性

## ・有機プライマー処理で親和性の高い化学構造に変える

### シランカップリング処理

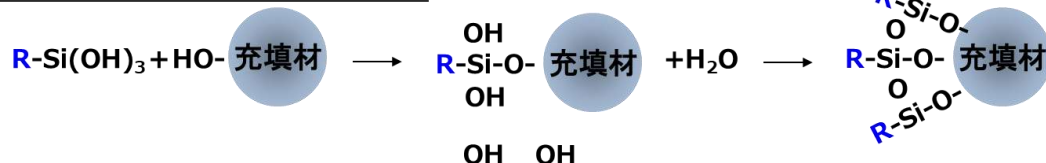


加水分解によるシラノール基の生成



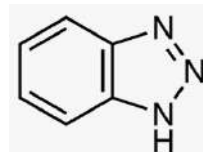
R-:樹脂と反応する官能基

シリカ表面によるシラノール基の生成

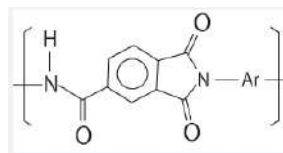


### アクリルコポリマー

### アゾール処理、トリアジン処理



### ポリアミドイミドコート



### プラズマガラスコーティング

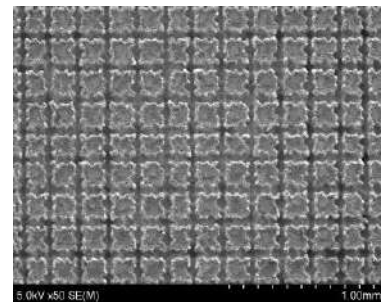
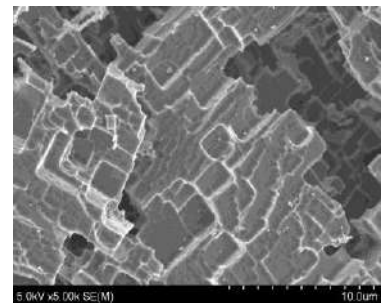
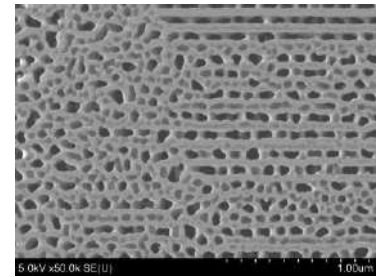
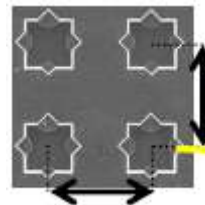
## ③ 接着性の長期安定性

### ・粗化处理

- ・銅：塩化鉄（ブラウンオキサイド、黒化還元）
- ・アルミ：陽極酸化（硫酸、シュウ酸、リン酸アルマイト）  
エッチング（水酸化ナトリウム、ヒドラジン）

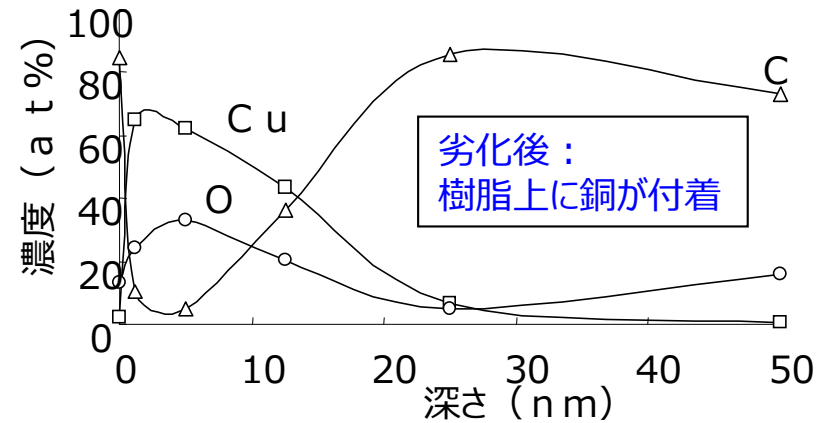
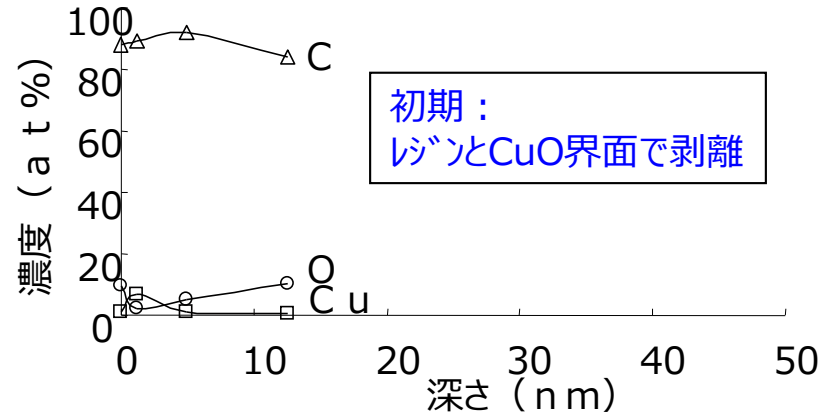
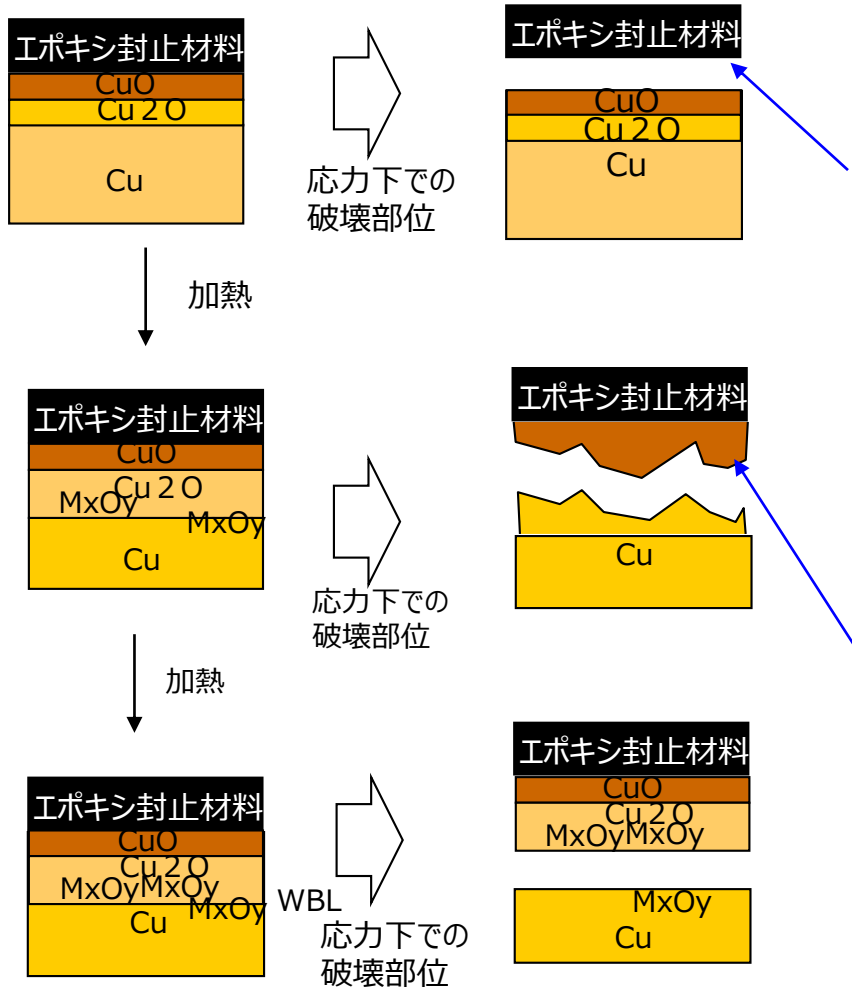
### ・機械加工：

- ・サンドブラスト、ウエットブラスト
- ・プレスディンプル加工
- ・レーザーエッチング



### ・フレーム処理

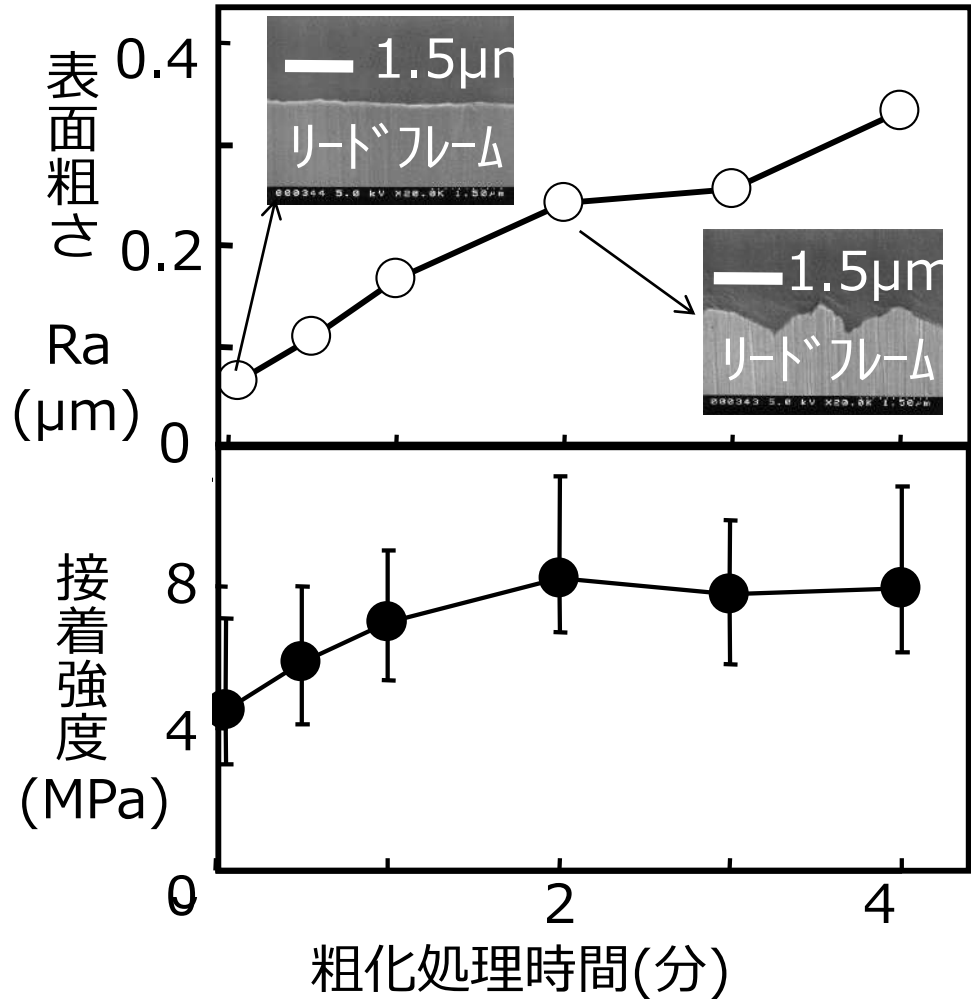
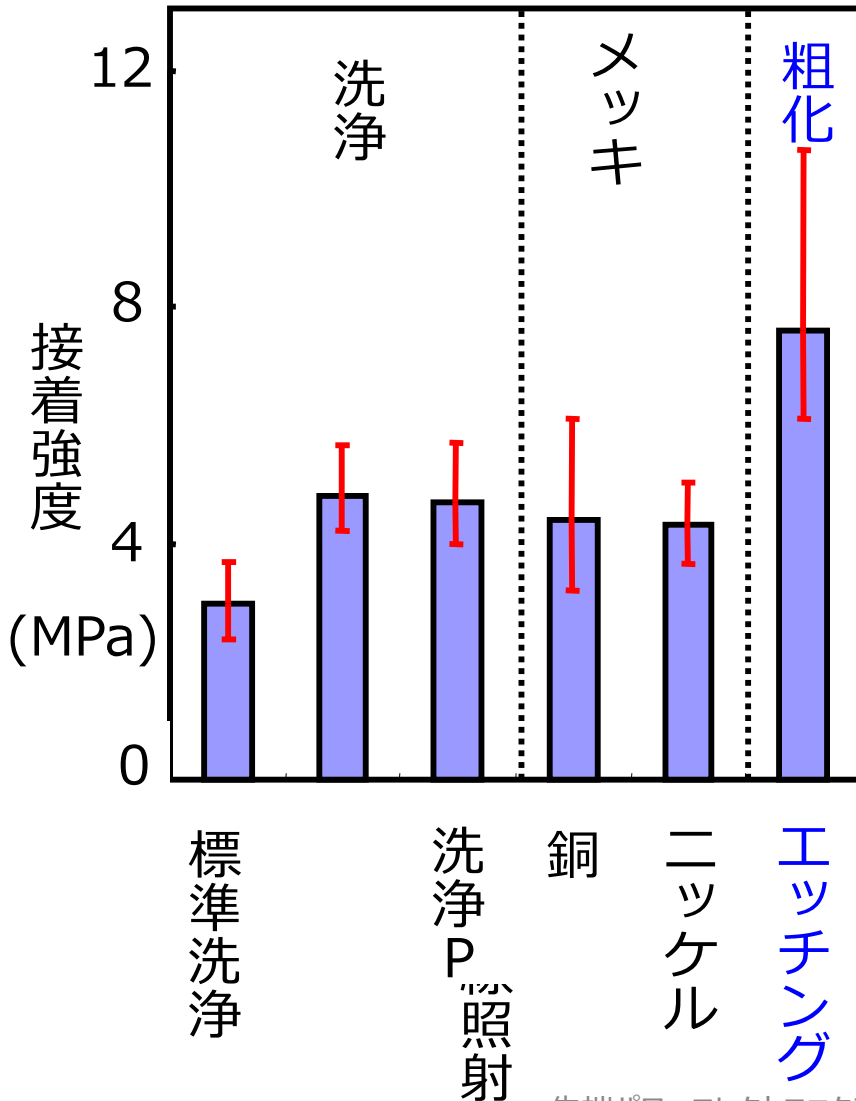
## ③ 接着性の長期安定性



強度の更なる低下

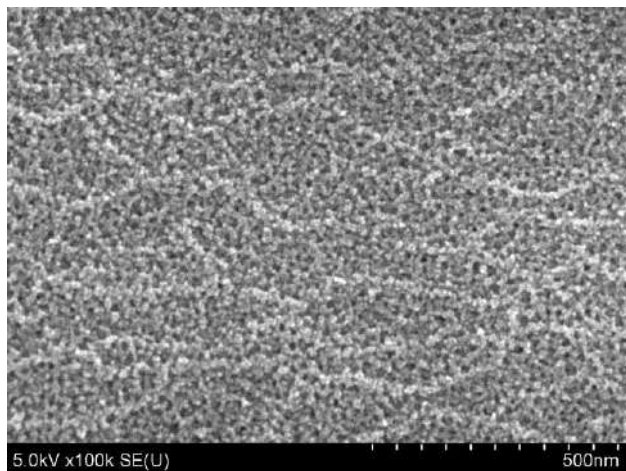
### 樹脂／銅のせん断試験後の樹脂側のXPS元素分析結果

③ 接着性の長期安定性

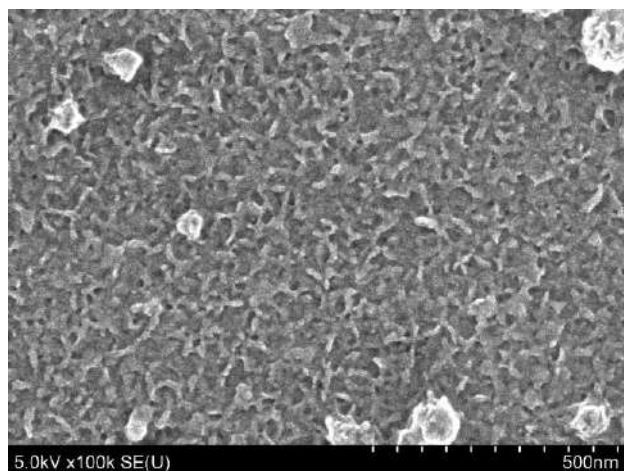




③ 接着性の長期安定性



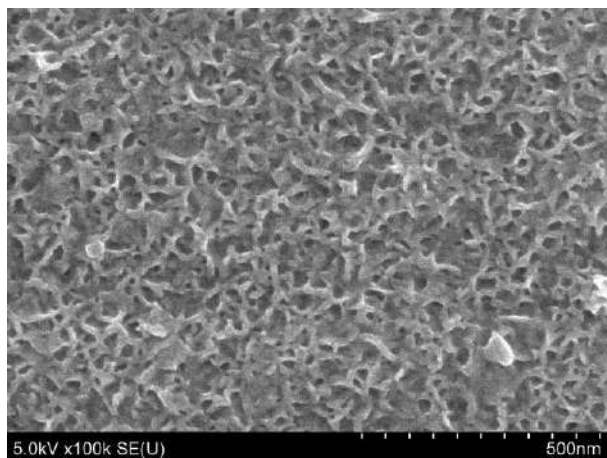
(a) 硫酸アルマイト①



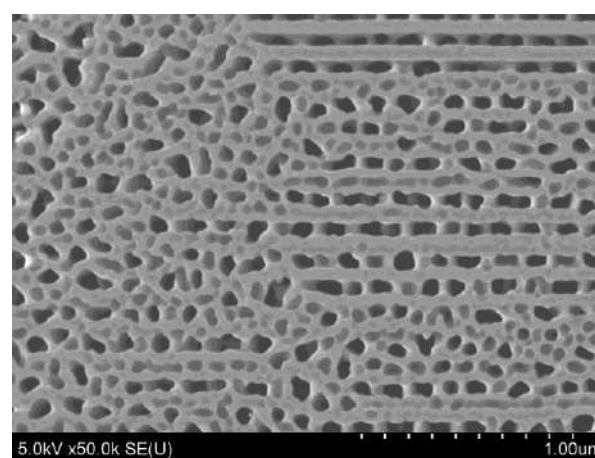
(b) 硫酸アルマイト②



(c) 硫酸アルマイト③

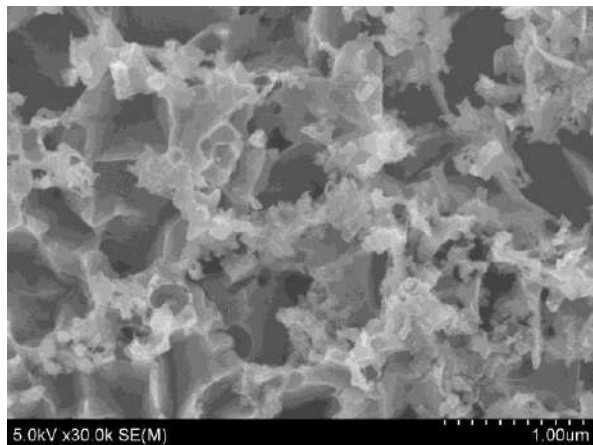


(d) シュウ酸アルマイト

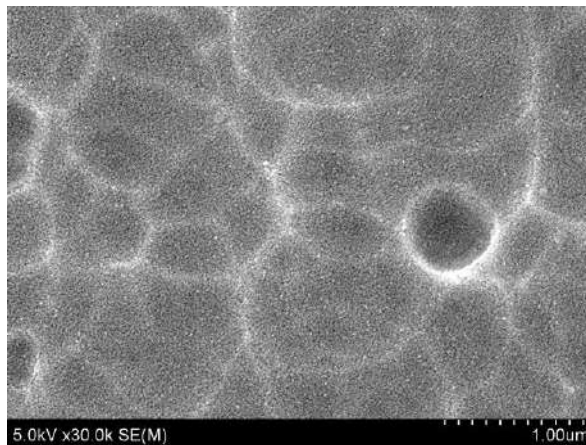


(e) シュウ酸+リン酸アルマイト

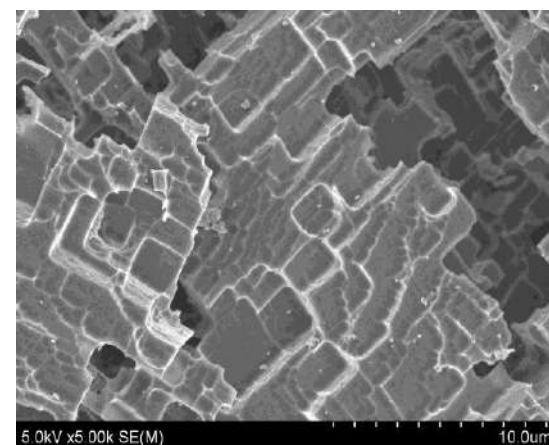
③ 接着性の長期安定性



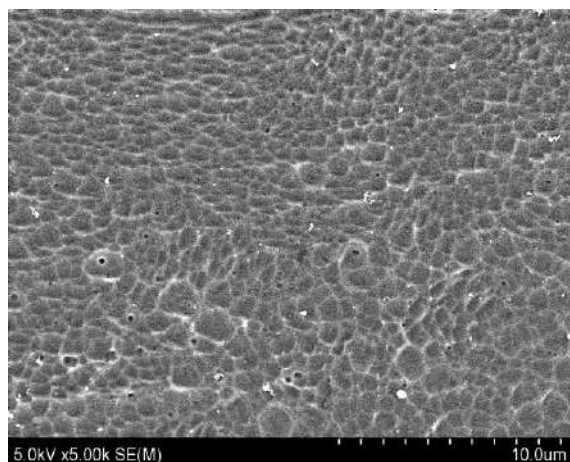
(a) Alエッチング処理①



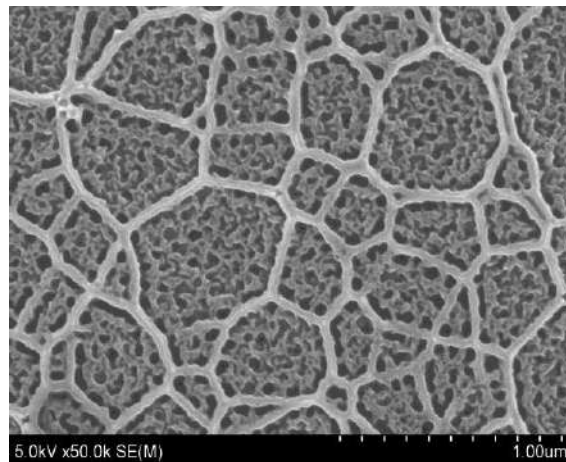
(b) Alエッチング処理②



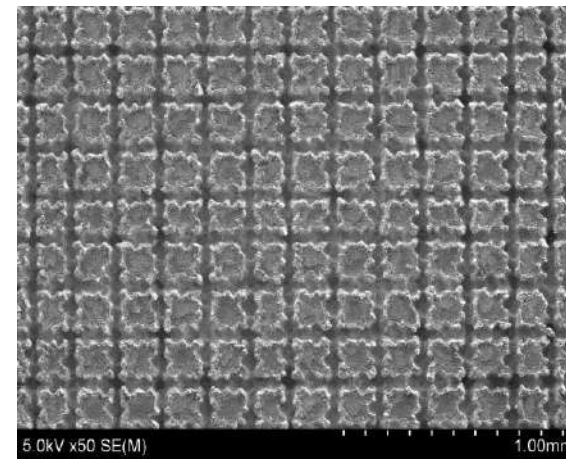
(c) Alエッチング処理③



(d) Alエッチング処理④

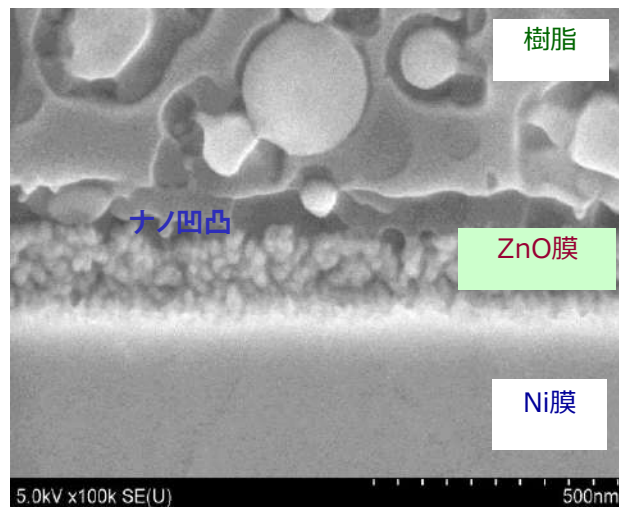
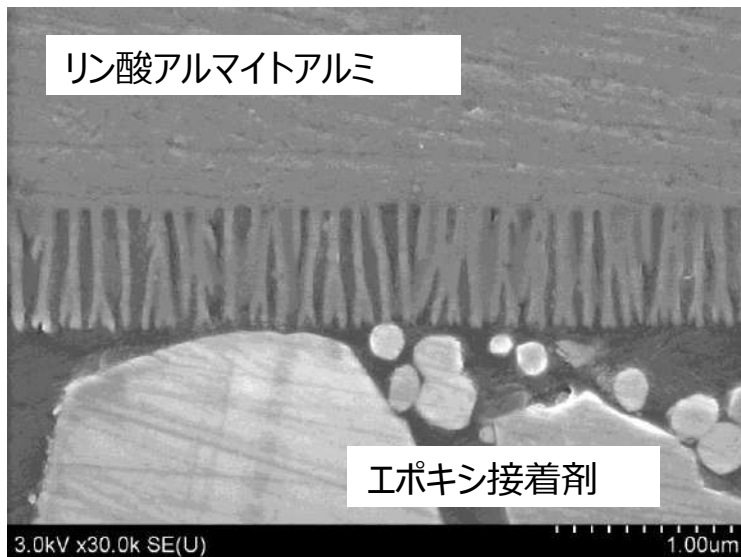


(e) Al陽極酸化処理



(f) レーザーエッチング

## ③ 接着性の長期安定性



# Contents

---

1章 CECN動向とEV市場\*

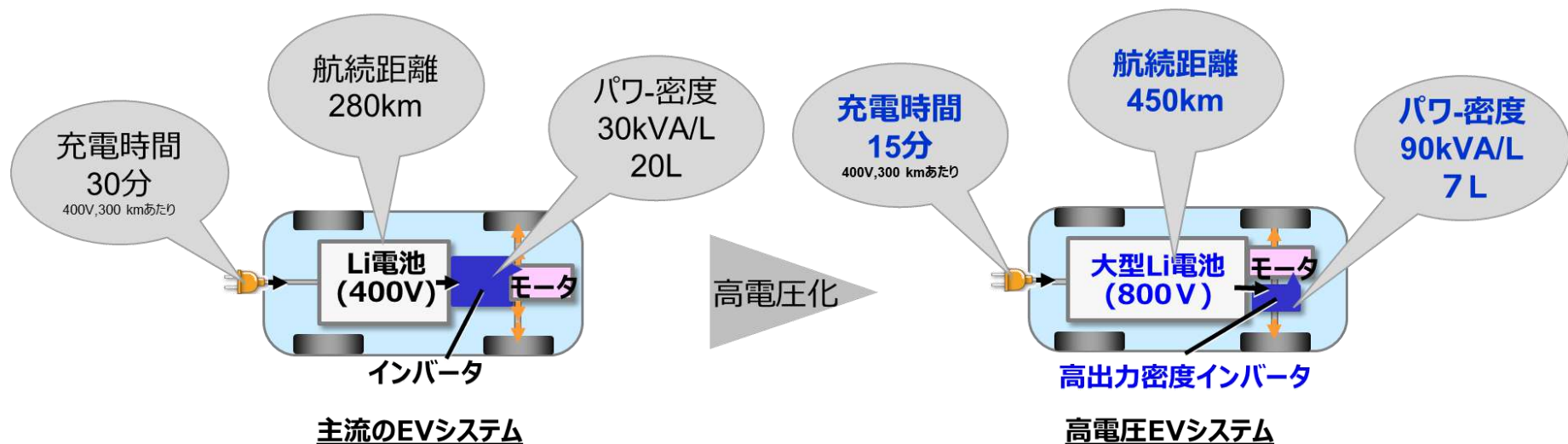
2章 パワーモジュール実装の動向

3章 パワーモジュール封止構造の高性能化

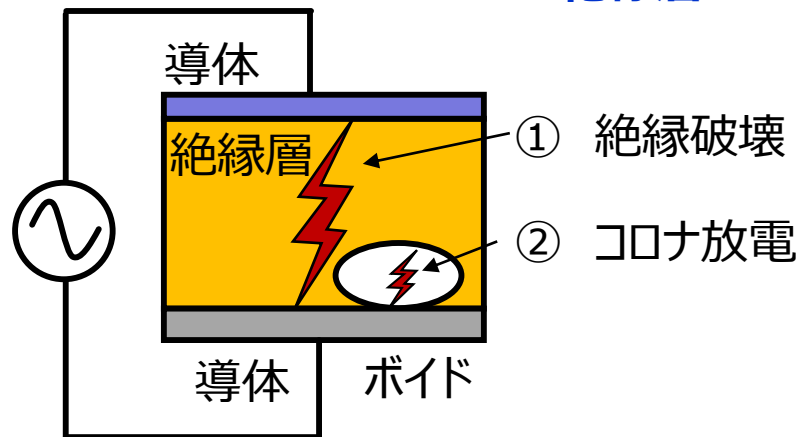
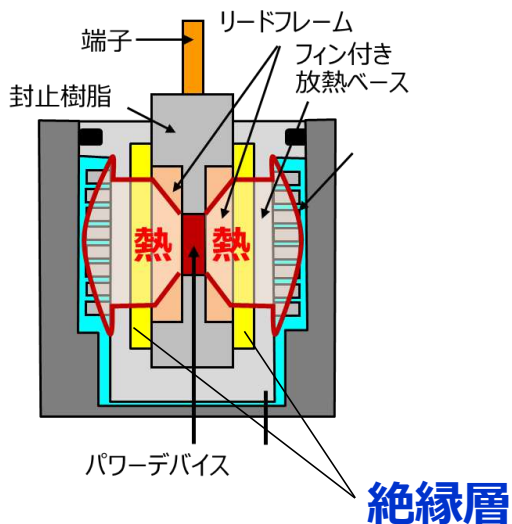
4章 トピックス：高機能材料による高耐圧化技術

\*CECN : Circular Economy Carbon Neutral, EV: Electric Vehicle

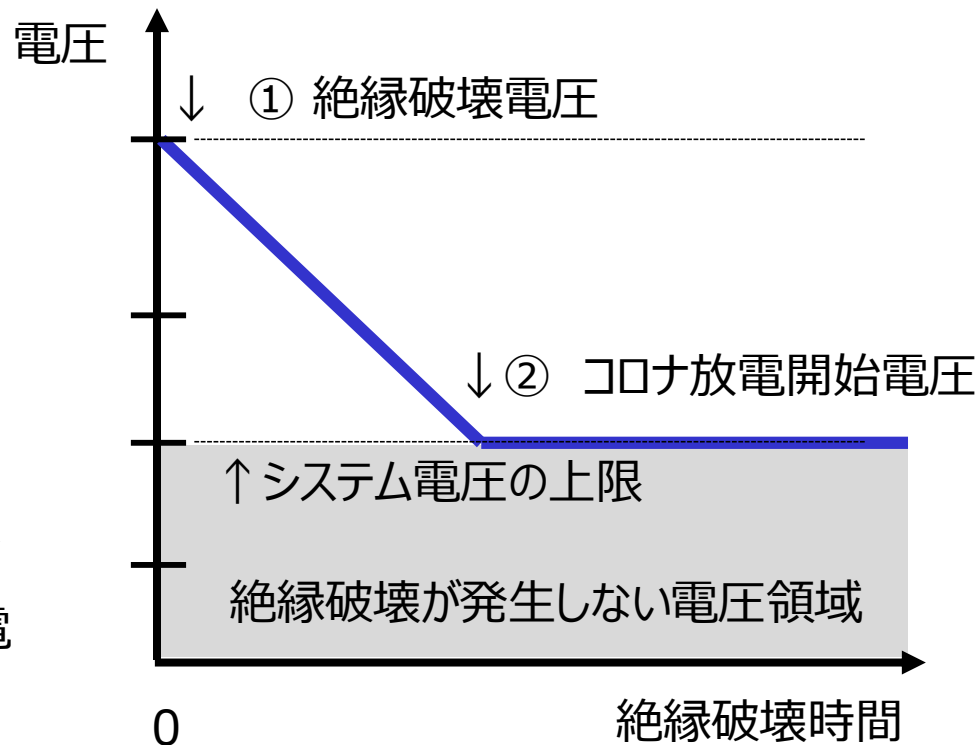
顧客価値	カーメーカーの要求	技術課題
充電不安からの解放	急速充電への対応	短時間充電のための高電圧化
航続距離の拡大	大型電池の搭載	設置スペース確保インバータ小型化による
走行性能向上	高出力化	インバータの高出力密度化



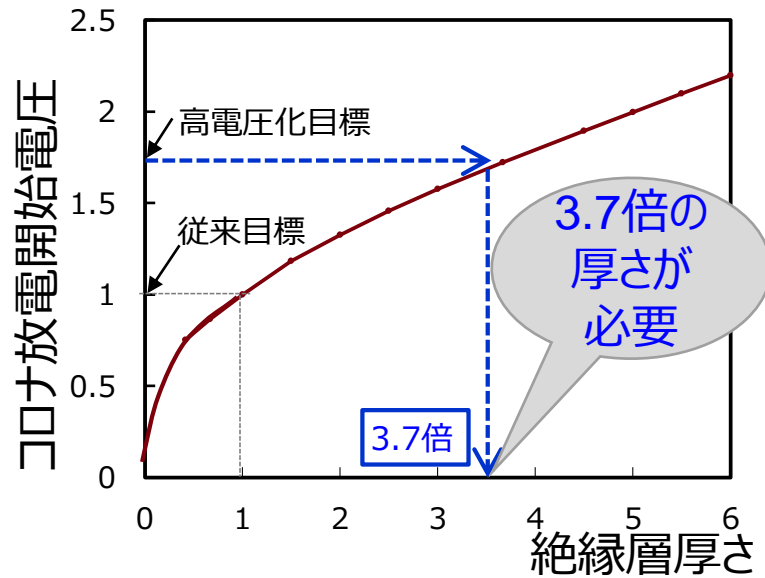
- 1) 露野円丈, 楠川順平, 徳山健, 松下晃, 中津欣也, 石井利昭, "1200V級耐電圧車載用両面直接冷却型パワーモジュール向け樹脂絶縁構造の開発, 第30回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, p37(2020)
- 2) 楠川順平, 露野円丈, 徳山健, 松下晃, 中津欣也, 石井利昭, "高耐圧両面直接冷却型パワーモジュール向け導体積層シートの部分放電特性", 30回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, p37(2021)



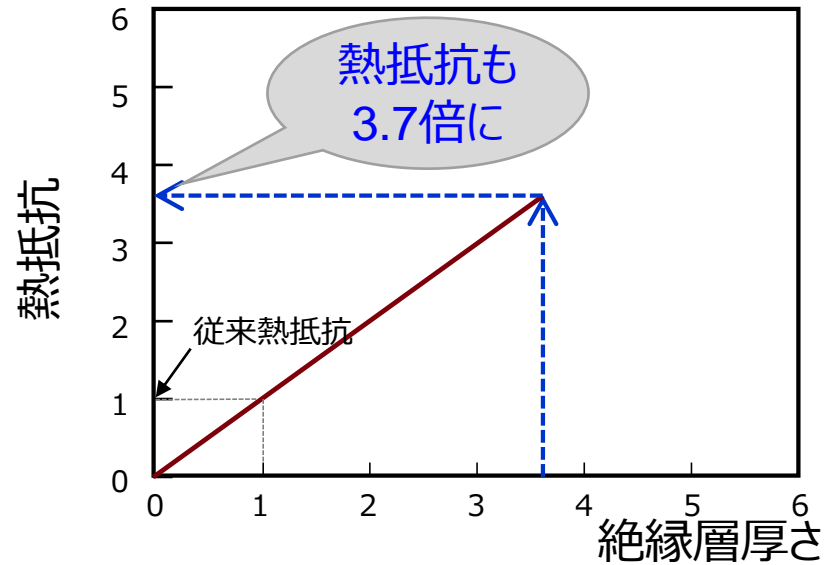
**絶縁層の二つの絶縁破壊モード**



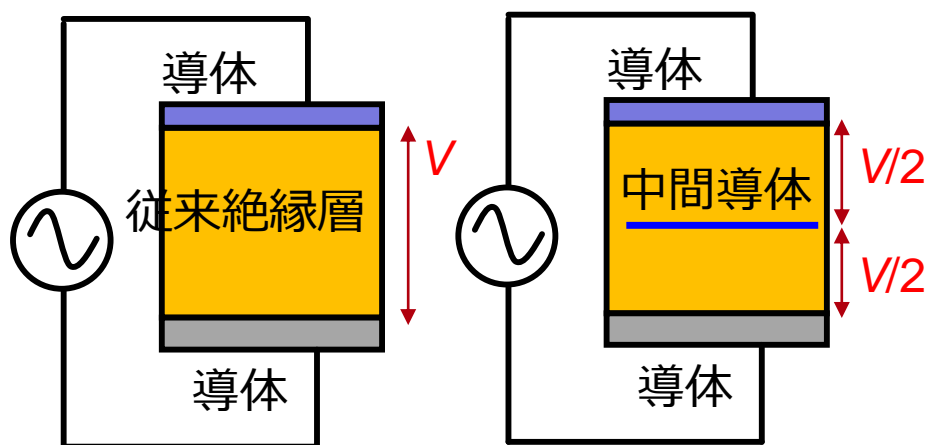
**絶縁破壊時間とシステム電圧の設定**



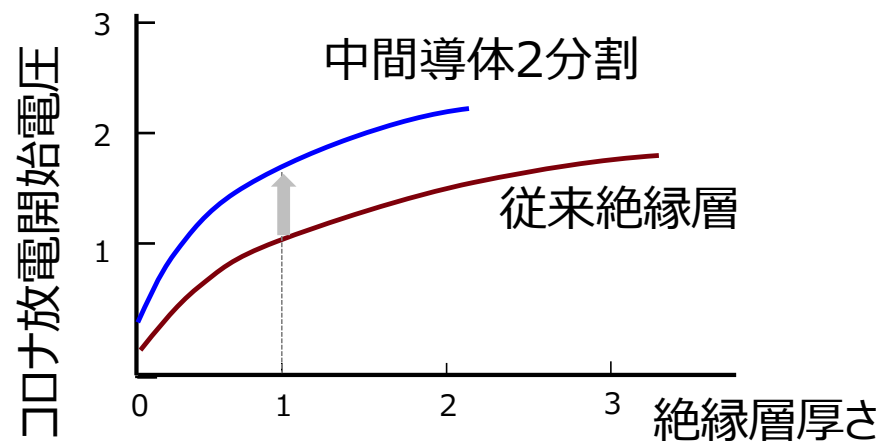
**絶縁層の厚さとコロナ放電電圧の関係**



**絶縁層の厚さと熱抵抗の関係**

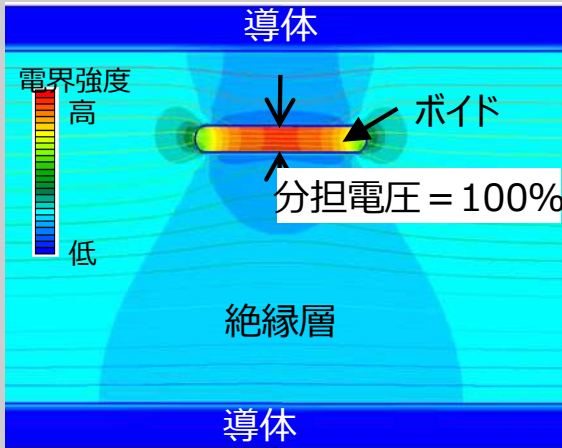
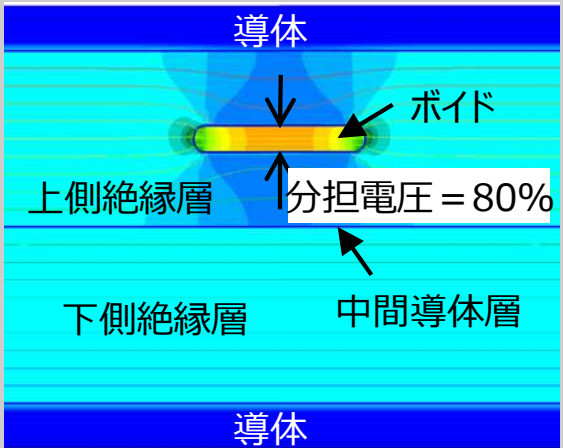
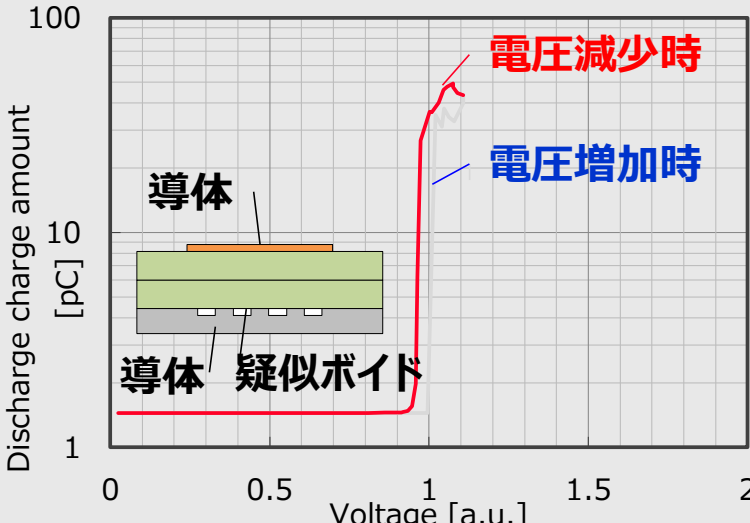
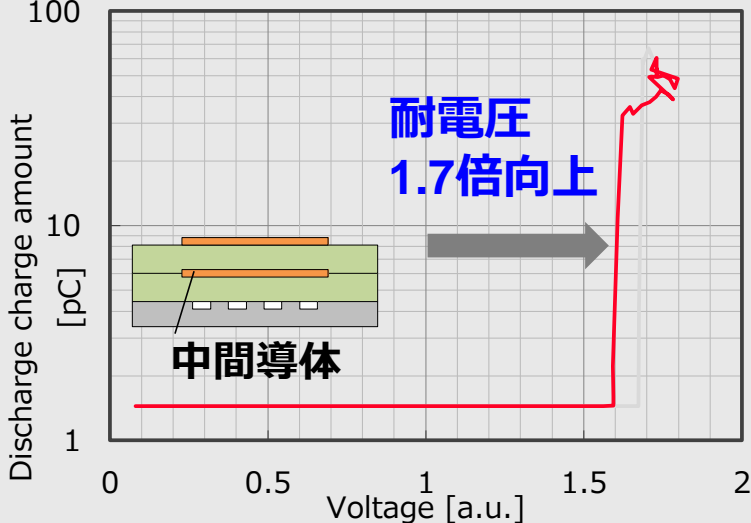


中間導体の導入により分圧



分圧による絶縁性の改善



	従来絶縁層	中間導体埋設絶縁層
電界解析		
検証実験結果		

- ✓ 世界各地域でのCN施策の中、EVの市場拡大の状況、およびインバータの開発動向を概説した
- ✓ パワーモジュールの実装動向と課題・実装技術をまとめた
- ✓ 小型高出力・高信頼なパワーモジュールを実現する封止材料の接着性改善技術を紹介した
- ✓ EVの高速充電を可能とするパワーモジュールの高耐圧化技術を紹介した。

- 1) 中津欣也, 徳山健, 樋熊真人, 佐川俊文, 棕野秀樹, “直接水冷型両面冷却パワーモジュールの高信頼実装技術”, *エレクトロニクス実装学会誌*, **24** (1), 107(2021)
- 2) 中津 欣也, 榎本 裕治, 石井 利昭, 西原 淳夫, 叶田 玲彦, “2050年カーボンニュートラルに向けた電動化に関する研究開発”, *日立評論*, **103**(2), 84(2021)
- 3) K. Fukushima, H. Takahashi, Y. Takezawa, M. Hattori, M. Itoh, and M. Yonekura, SAE Technical Paper Series, 2005-01-1673, (2005). [2005 SAE World Congress, Detroit, Michigan, April(2005)]
- 4) Maki Ito, Takashi Ando, Naoki Maruyama, Takanobu Kobayashi, Yoshitaka Takezawa, “Design and Heat-dissipation Characteristics of a Novel Spectrally Selective Thermal-radiation Material”, *Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol. 14, pp. E20-006-1-E20-006-4(2021)
- 5) Toshiaki Morita, Yusuke Yasuda, Eiichi Ide, Yusuke Akada and Akio Hirose : “Bonding Technique Using Micro-Scaled Silver-Oxide Particles for In-Situ Formation of Silver Nanoparticles”, *Materials Transactions*, **Vol.49, No.12** , pp.2875-2880(2008).
- 6) Toshiaki MORITA, Eiichi IDE, Yusuke YASUDA, Akio HIROSE, and Kojiro KOBAYASHI, “Study of Bonding Technology Using Silver Nanoparticles”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **Vol.47, No.8** , pp.6615-6622(2008).
- 7) Yusuke Yasuda\*, Naoya Tokoo, Toshiaki Morita, and Kazuhiro Suzuki “Reliability of sintered silver layer obtained using silver-oxide paste in power cycling test” *Japanese Journal of Applied Physics*, **54**, 010302 (2015)
- 8) Akitoyo Konno, Takaaki Miyazaki, Yusuke Yasuda, Osamu Ikeda, Hiroshi Nakano, Toshiaki Morita, Hiroshi Houzouji, and Mutsuhiro Mori, “Highly Reliable and Lead-Free High Power IGBT Modules Usin Novel Copper Sintering Die Attachment” *Proc. of PCIM Europe 2016*, 10-12 May 2016
- 9) Akitoyo Konno, Takaaki Miyazaki, Yusuke Yasuda, Osamu Ikeda, Hiroshi Nakano, Toshiaki Morita, Hiroshi Houzouji, and Mutsuhiro Mori, , *Proc. of PCIM Europe 2016*, 10-12 May (2016).
- 10) 露野円丈, 楠川順平, 徳山健, 松下晃, 中津欣也, 石井利昭, “1200V級耐電圧車載用両面直接冷却型パワーモジュール向け樹脂絶縁構造の開発”, 第30回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, p37(2020)
- 11) 楠川順平, 露野円丈, 徳山健, 松下晃, 中津欣也, 石井利昭, “高耐圧両面直接冷却型パワーモジュール向け導体積層シートの部分放電特性”, 30回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, p37(2021)