

第2回ECLAIRコンソーシアムオープンフォーラム  
2019年11月28日（木）

# 航空機電動化向け電力変換・配電技術

Electric Power Conversion and Distribution Technology  
for Electrification of Aircraft

三菱電機株式会社  
先端技術総合研究所

# 1. 背景：航空機電機システムの大容量化、高電圧化

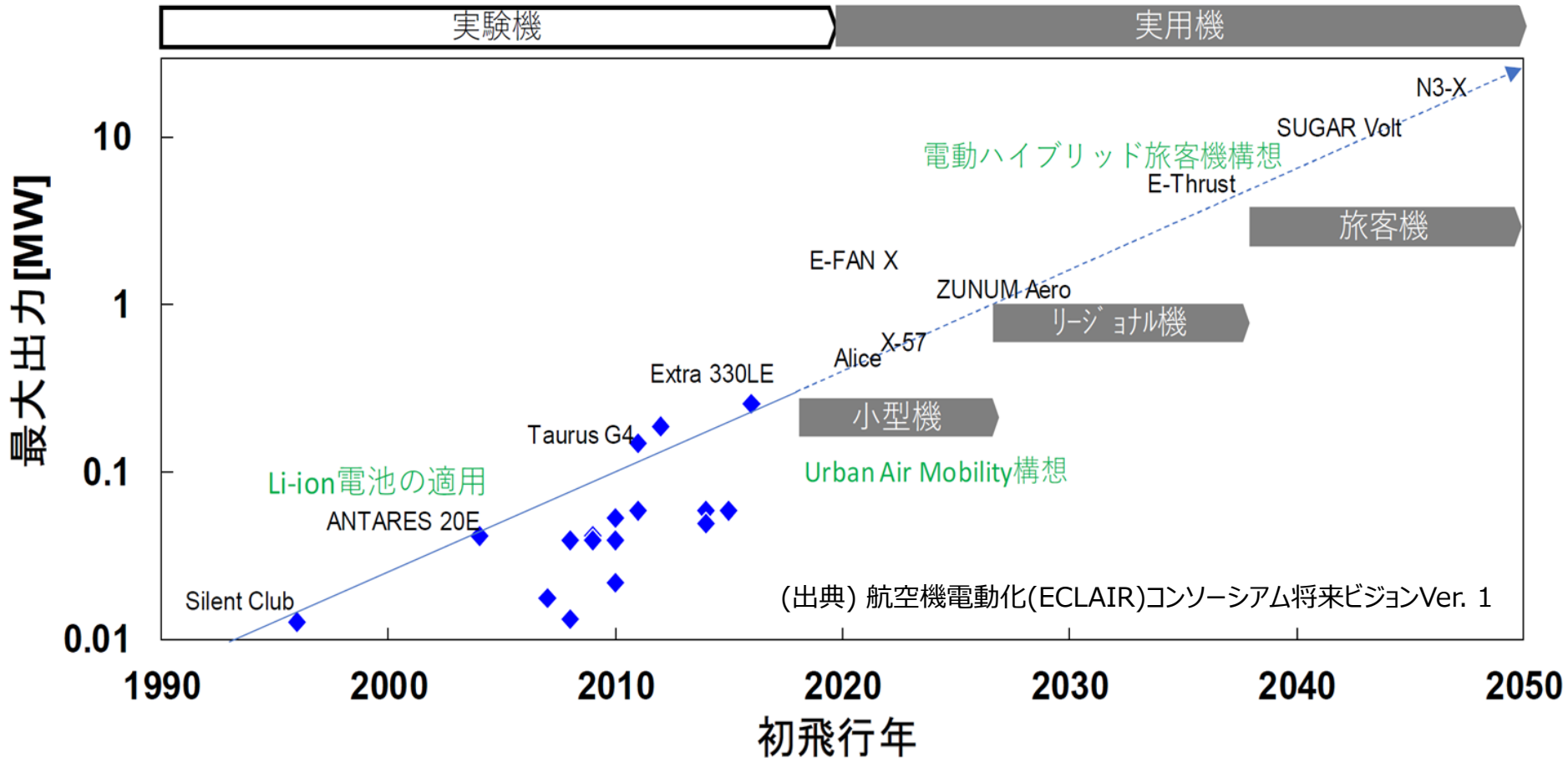
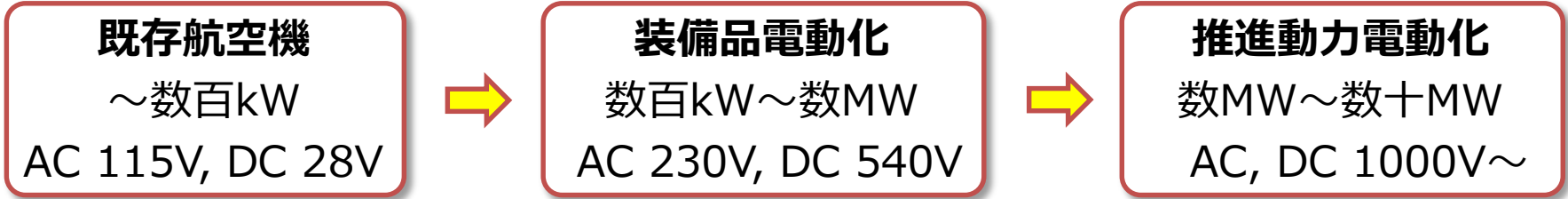


図 推進動力を電動化する航空機の電力容量

## 2. 直流DC と 交流AC の比較

	項目	直流	交流	比較
1	ケーブル本数	◎	×	直流DCは2本、交流ACは三相で3本。
2	接続・切替	◎	×	DCは電圧制御だけで接続、切替容易。ACは同期制御が必要。
3	最大電圧(絶縁)	◎	×	DCの方が最大電圧値(波高値)が低く、絶縁に有利。
4	電池、FC接続	○	×	二次電池、燃料電池(FC)との接続がDCの方が容易。
5	負荷接続	○	×	ACで駆動する負荷が少。AC負荷はAC/DC変換後、DC/DCまたはDC/AC(周波数可変)変換要。DCの場合は1段変換で可。
6	EMCノイズ対策	○	×	DCはリアクタンスL、キャパシタンスCの影響少なく、ノイズ対策が容易。電源高調波の考慮不要。
7	L、Cの影響	○	×	ACはL、Cの影響大。無効電力、力率の考慮要。
8	高周波損失	○	×	DCは表皮効果、近接効果による損失なし。
9	電食作用	×	○	DCは極性が変わらないため、電食し易い。
10	遮断器	×	○	ACはゼロクロスが有り、遮断が容易。(400Hzは50/60Hzよりやや難)
11	アーク	×	○	アーク発生時にDCは継続し損傷が大きくなる。ACの場合はゼロ点で切れる。
12	帯電	×	○	DCは帯電し易い。
13	漏電検出	×	○	DCは高精度での漏電検出に難あり。ACは1線地絡時に誤検知し易いため方向性をみる必要有。
14	電流検出	×	○	電流検出用のCTが作り易い。

## 2. 直流DC と 交流AC の比較

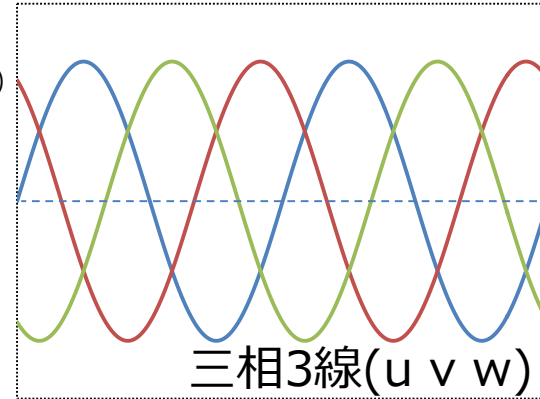
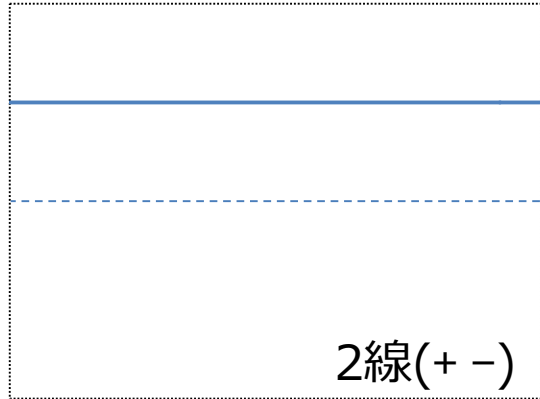
### 直流の利点

### 交流の利点

③最大電圧(絶縁)

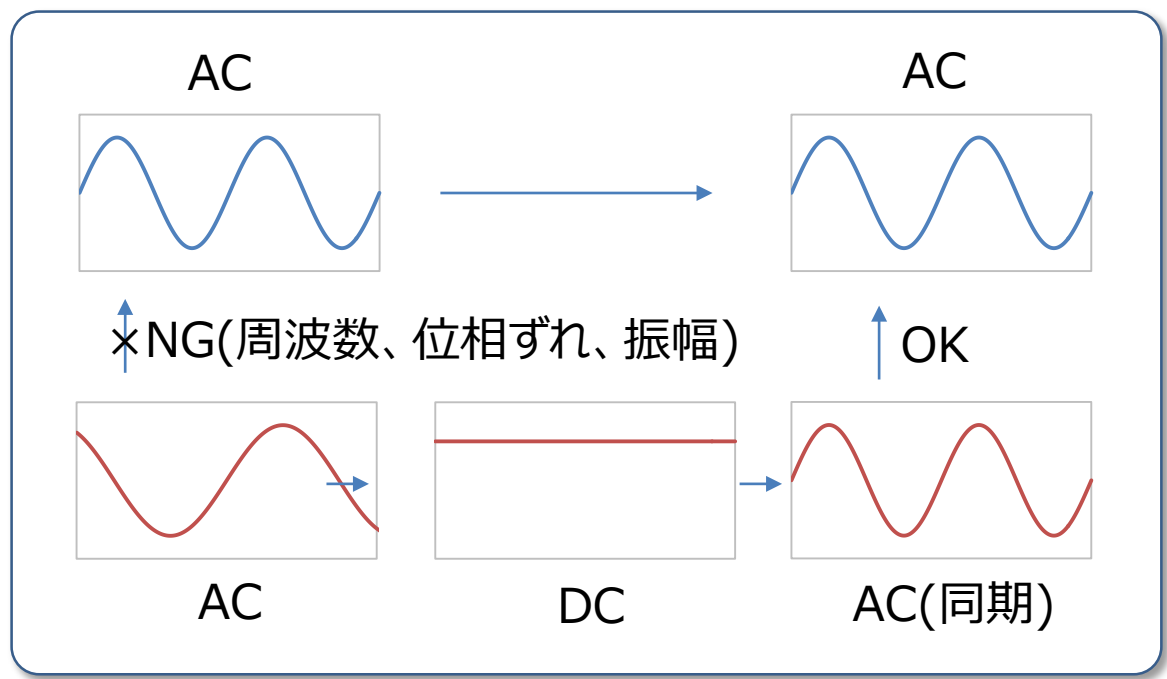
①ケーブル本数

②接続・切替



⑩遮断

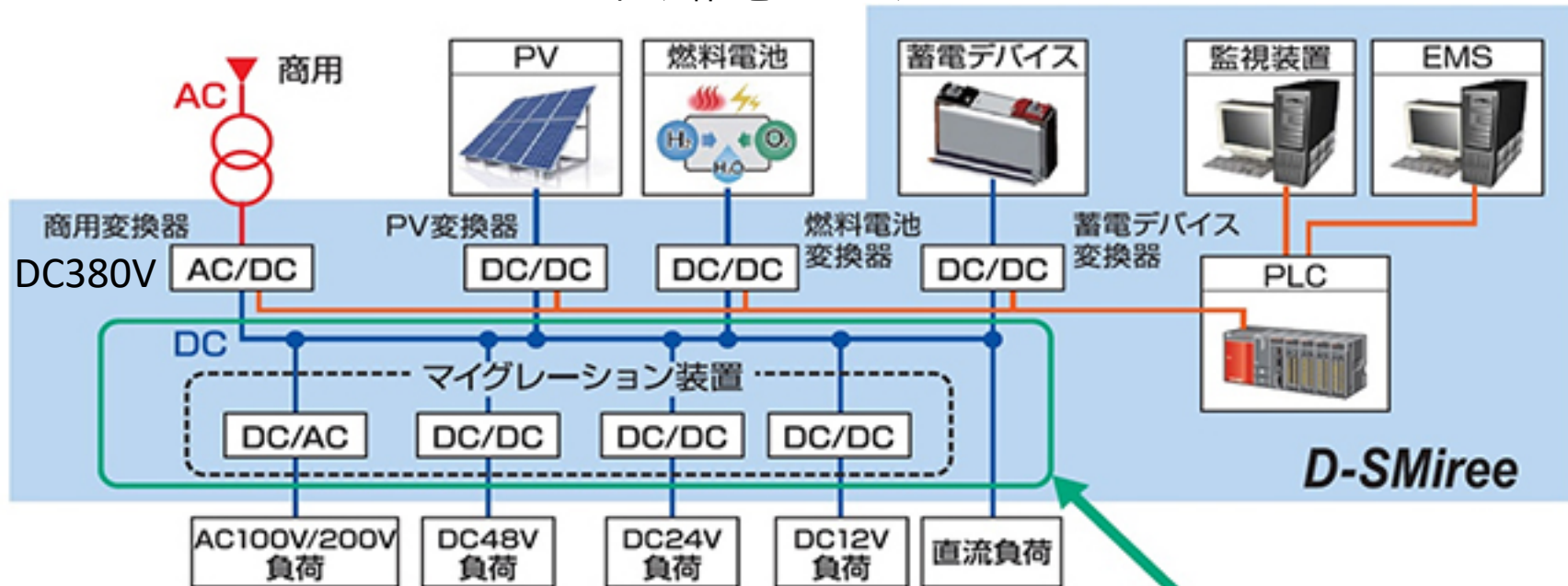
← ゼロクロス



# 3. 直流システムの紹介

## ビル用直流配電システム D-SMiree

蓄電池の利用拡大やビルのZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）化などを背景に、直流配電システムが注目



高機能型直流分電盤	高収納型直流分電盤
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 分岐MCCB 収納ユニット</li> <li>● マルチDC計測装置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 分岐MCCB 収納ユニット</li> <li>● マイグレーション装置</li> </ul>

図 ビル内直流配電システムの構成例

### 3.直流システムの紹介

# 鉄道向けフルSiCモジュール採用インバータ

3.3 kVフルSiCモジュールを用いたDC1500V架線車両推進装置  
SiCの適用、回路方式の最適化により省エネ、小型軽量化を実現

SiC：シリコンカーバイド（炭化ケイ素）

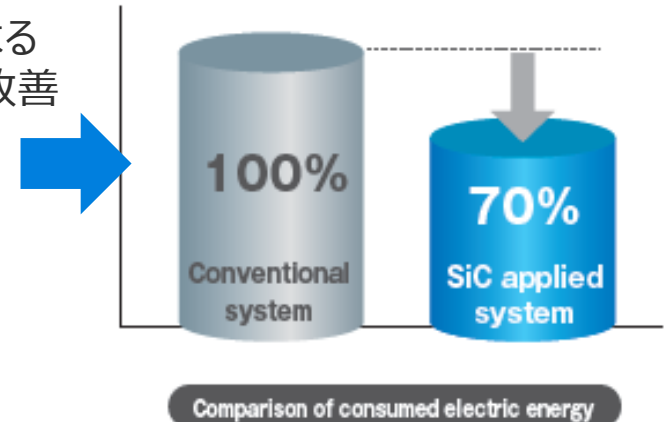
Energy Saving  
**30%**  
realization



回路方式の最適化による  
高速時の電力回生の改善

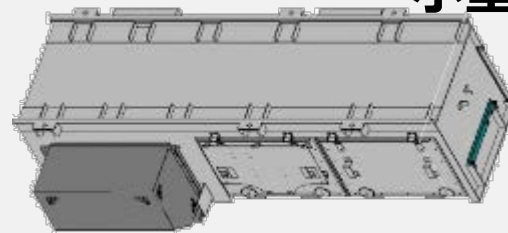


電流ひずみ改善による  
エネルギー損失低減

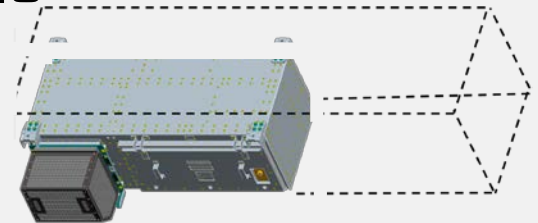


Size and Weight  
**65%**  
reduction

小型軽量化



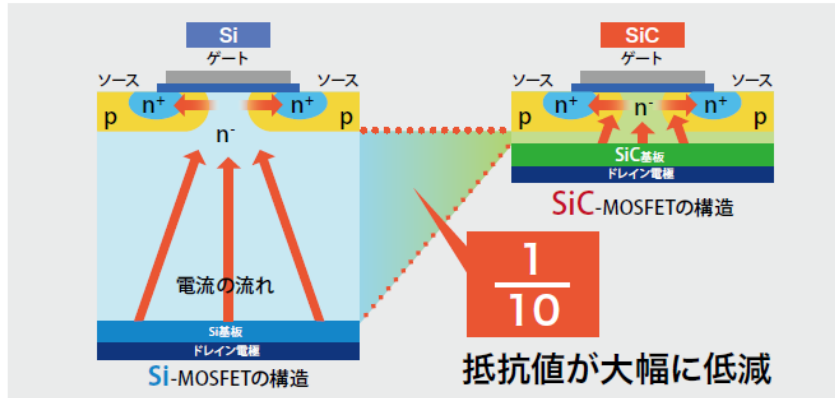
従来のIGBTパワーモジュール  
を用いたインバータ



フルSiCパワーモジュール  
を用いた新インバータ



# 4. SiC半導体デバイスの特長



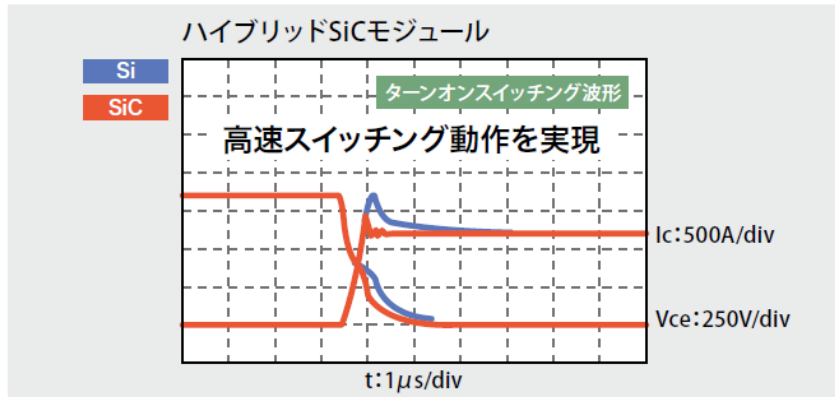
## 電力損失の低減

SiCはシリコンに比べて絶縁破壊電界強度が約10倍高いことから、電気抵抗の主要因となるドリフト層が10分の1に薄くなることで抵抗値が大幅に低減され、電力損失を大きく減らすことが可能となります。このことにより、パワーデバイスの導通損失およびスイッチング損失が大幅に低減します。



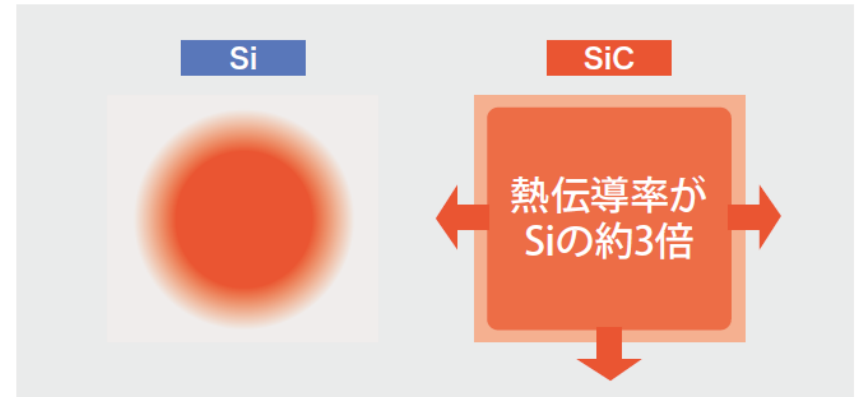
## 高温度動作

従来では温度が高高温になると、電子が伝導帯に移動し、リーク電流が増加し、正常に動作しないことがありました。SiCはバンドギャップ幅がシリコンの約3倍となるため、高温時でもリーク電流の増加が少なく、高温動作が可能になります。



## 高速スイッチング動作

SiCは高い絶縁破壊電界強度で電力損失が低減するとともに、高耐圧化が容易となるため、Siでは使用できなかったSBD (Schottky Barrier Diode) を使用することが可能になります。SBDは蓄積キャリアがないため、高速スイッチング動作が実現できます。



## 高い放熱効果

SiCは熱伝導率がシリコンに比べて約3倍となるため、放熱性が向上します。

## 5. 航空機適用に向けた課題と対応策 直流遮断器

高電圧になると（気中）遮断器が大型化。  
外部環境に左右されずに安定した電流遮断が必要。→ 密閉式、半導体式遮断器  
半導体遮断器 オン抵抗の低減が課題。 → SiCなどの高性能素子の適用など

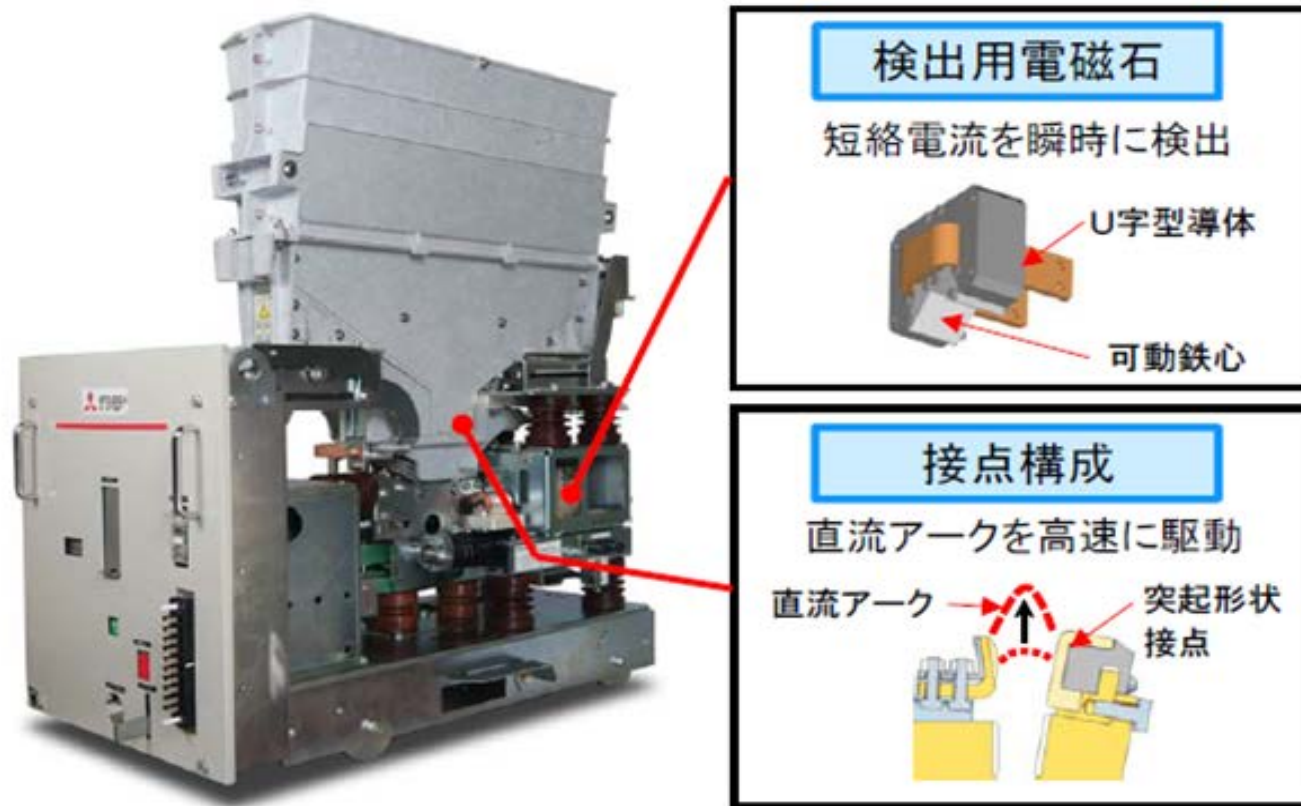


図 鉄道向け電力供給システムを保護する直流高速度遮断器



## 5. 航空機適用に向けた課題と対応策

# 低気圧環境での放電

低気圧ほど放電が発生しやすいため、絶縁距離の拡大が必要 → 機器の大型化  
 気圧に左右されない絶縁 → 固体材料による絶縁が重要

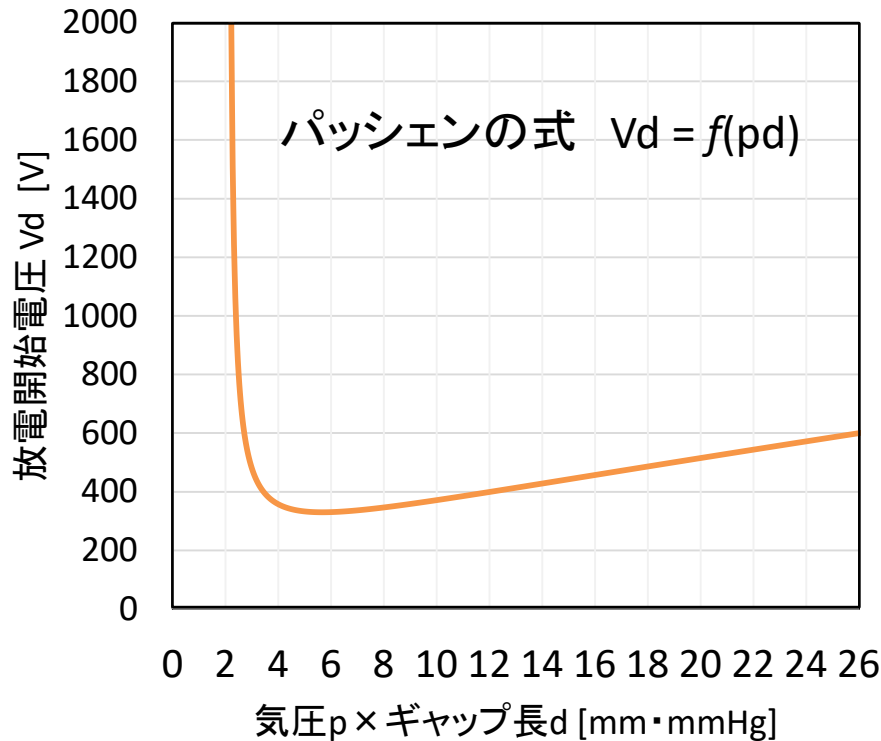


図 パッシェン曲線（空气中）

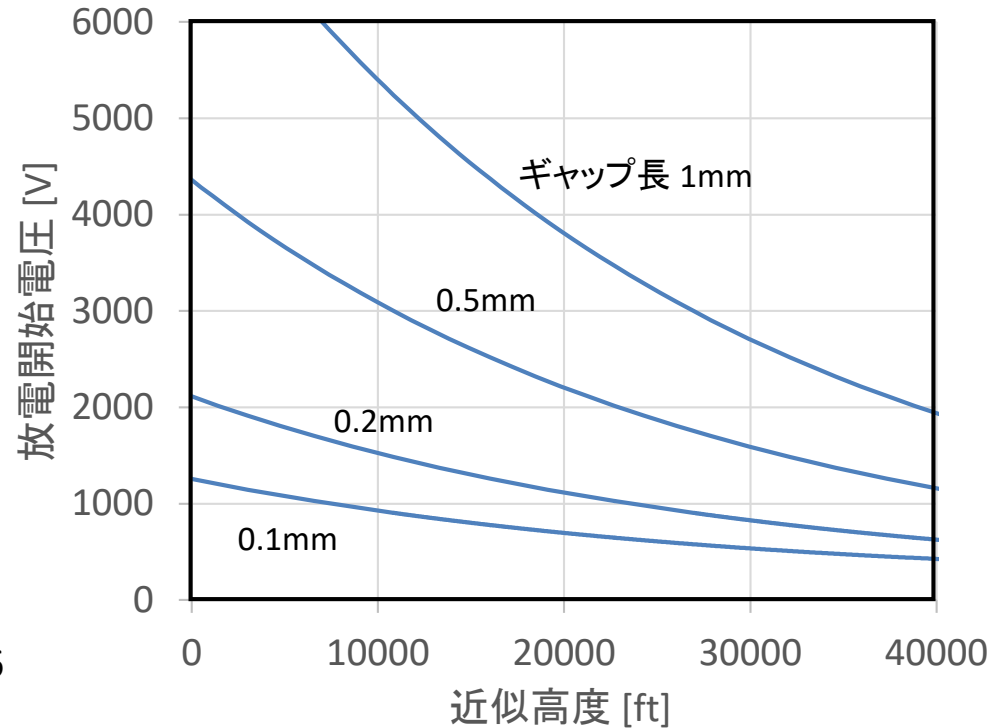
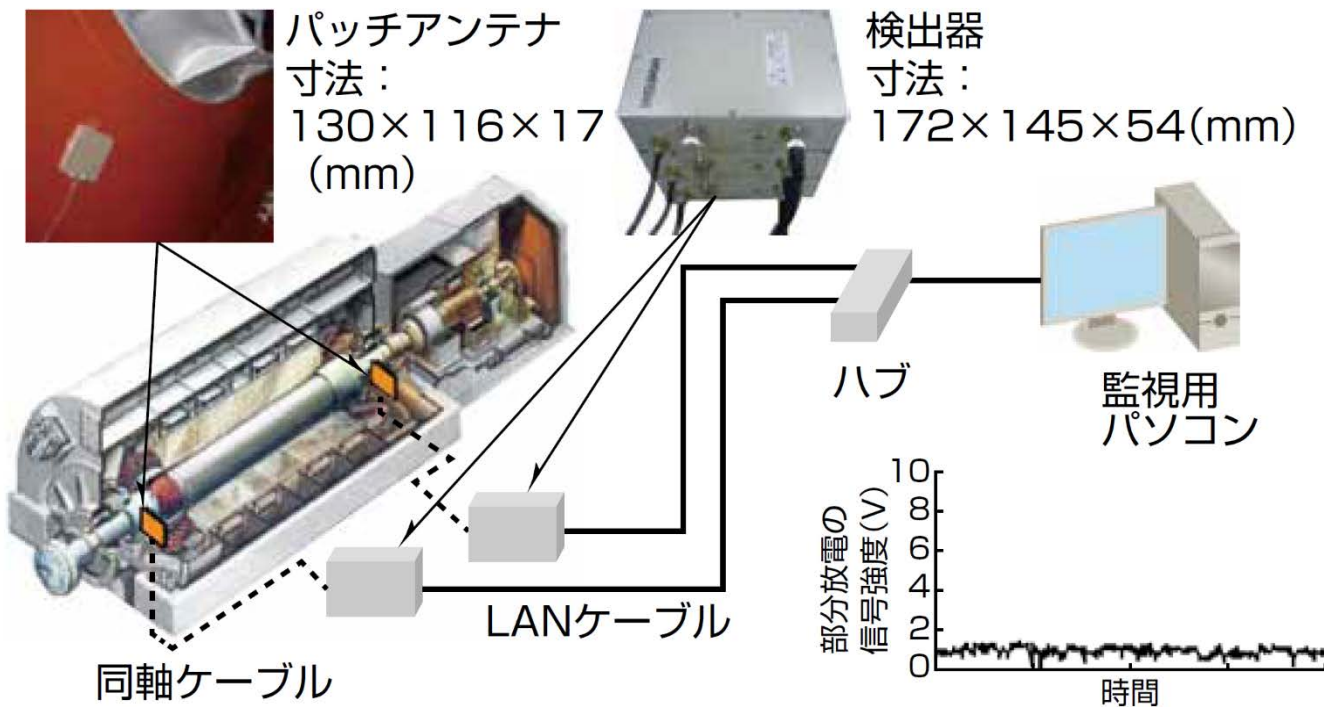


図 高度と放電電圧の関係  
 （空气中、高度は標準気圧から換算）

## 5. 航空機適用に向けた課題と対応策 部分放電計測用マイクロ波センサ

GHz帯の電磁波を検出して部分放電を連続的に計測するマイクロ波センサ(MWS)



タービン発電機での使用例



パッチアンテナ  
 概略寸法：  
 50×30×11 (mm)



検出器  
 概略寸法：  
 116×54×28(mm)

## 5. 航空機適用に向けた課題と対応策

# 宇宙線によるシングルイベント効果(SEE)

シングルイベント効果：単発の中性子などの宇宙線が半導体素子に入射することで起こるエラー

旅客機の飛行高度の宇宙線（中性子線）強度は、地上の100倍以上

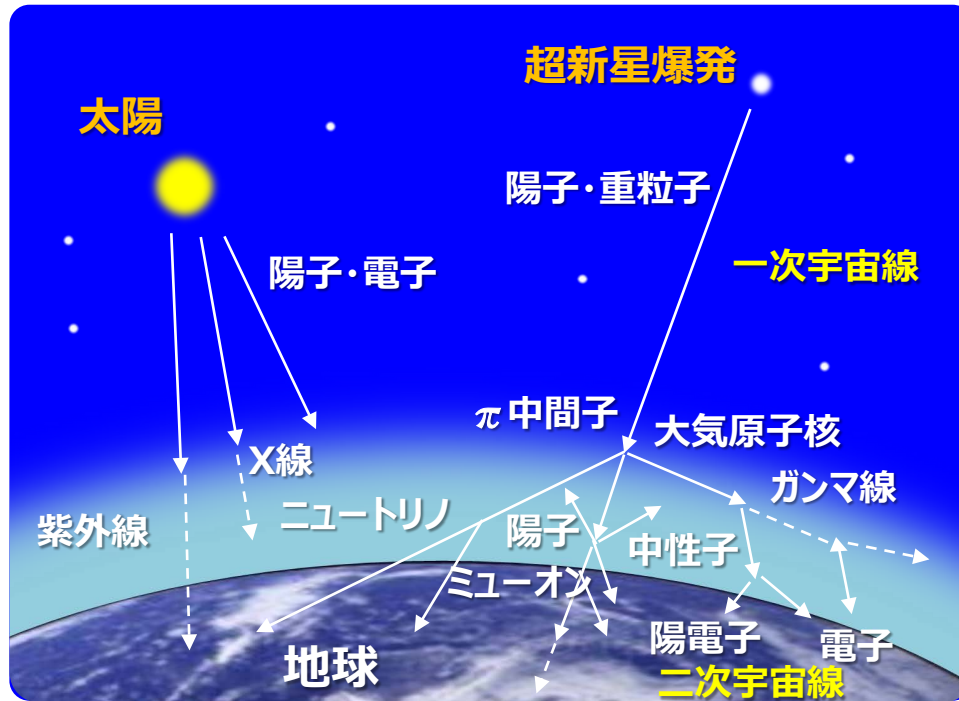


図 宇宙からの放射線（宇宙線）

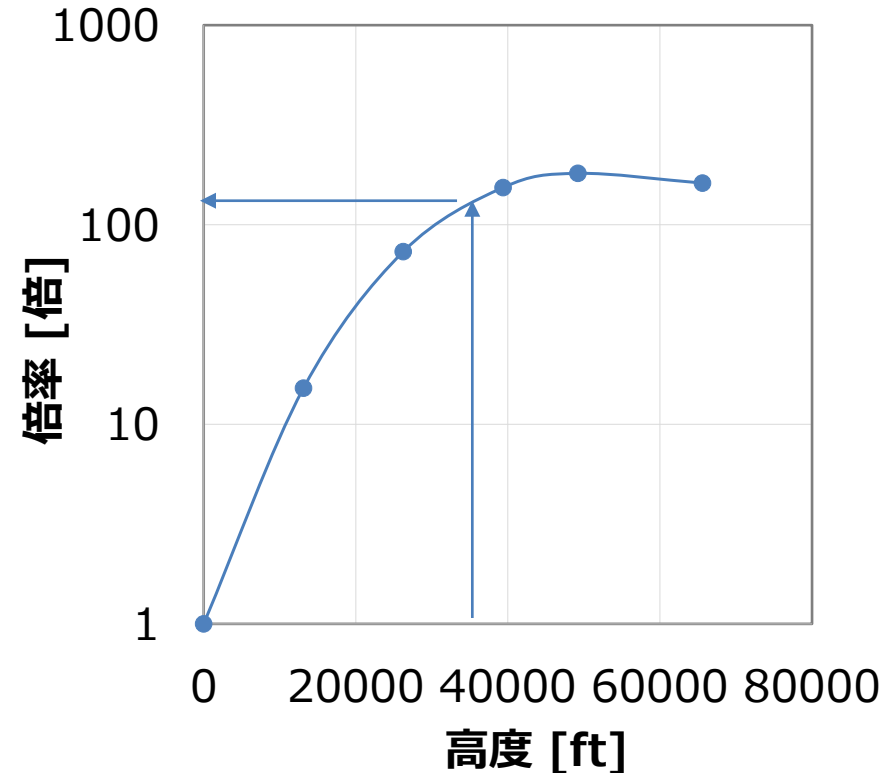


図 中性子線量と高度の関係

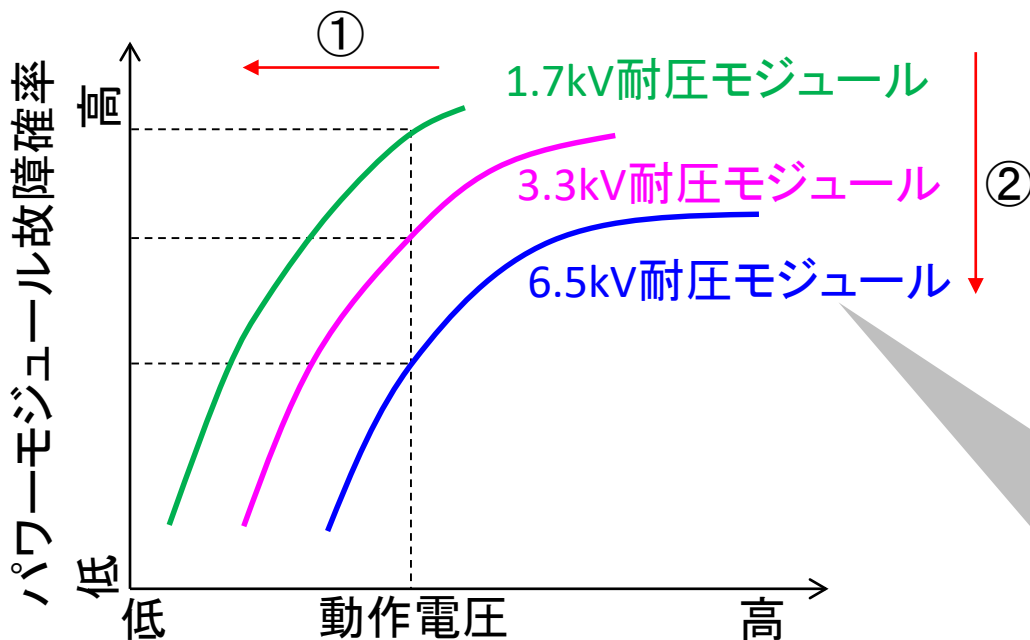
## 5. 航空機適用に向けた課題と対応策

# 宇宙線によるパワーモジュールの故障確率

高度が高い  
 温度が低い  
 電圧が高い

➡ パワーモジュールの故障確率が増加 (LTDS\*が低下)

\*LTDS : Long Term DC Stability



ディレーティングを考慮した設計が重要

- ①可能な限り**低い電圧で使用**  
または、
- ②使用電圧に対し、十分に**耐圧の高いパワーモジュールを使用**

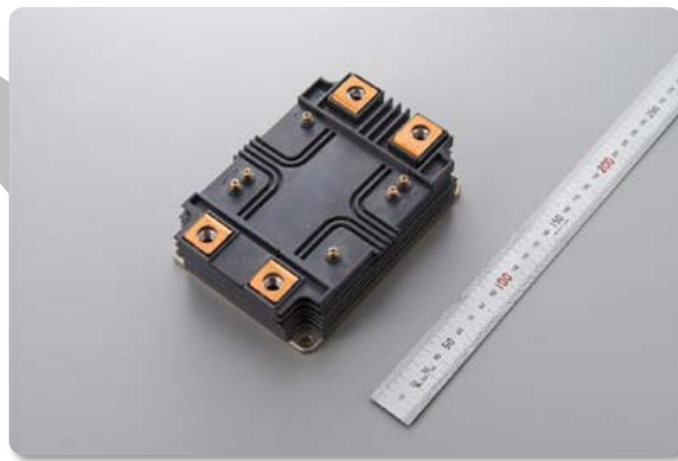
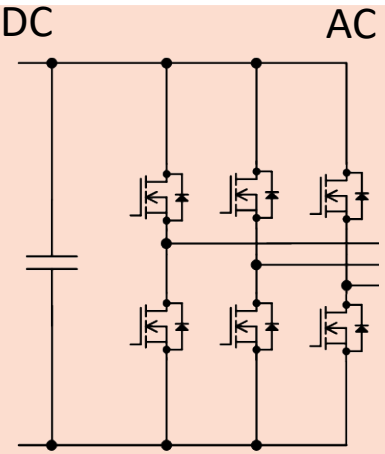
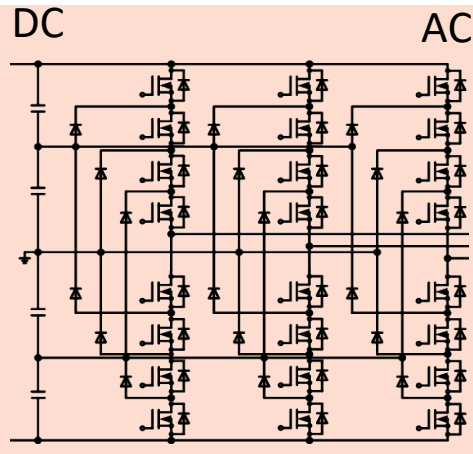
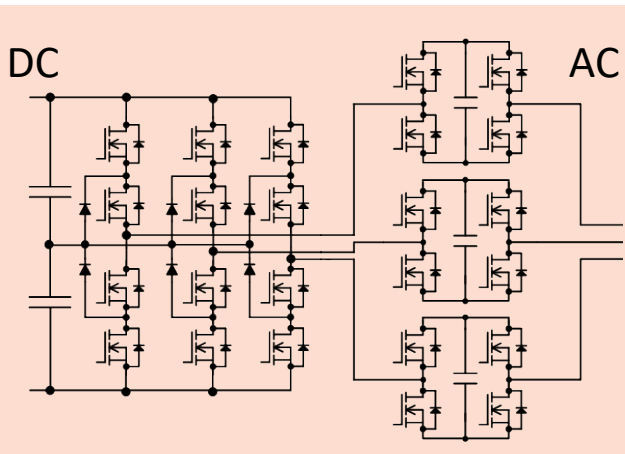
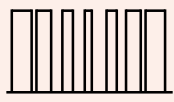




図 パワーモジュールの故障確率 (対数軸) と印加電圧の相関概念図

図 6.5kV SiCパワーモジュール

## 5. 航空機適用に向けた課題と対応策

# インバータの回路方式

	2レベルインバータ	5レベルインバータ	階調制御型インバータ (メイン 3レベル + サブ)
回路構成	 <p>DC AC</p>	 <p>DC AC</p>	 <p>DC AC</p>
出力波形	 <p>矩形波</p>	 <p>疑似正弦波</p>	
長所	素子数が少なく安価	dV/dtが小さく低ノイズ 低耐圧素子の使用可能	dV/dtが小さく低ノイズ 低耐圧素子の使用可能 一般的なパワーモジュール使用可能
短所	dV/dtが大きくノイズ大 ノイズフィルタが大 高耐圧の素子必要	専用モジュール必要 素子数が多くコスト高	素子数が多くコスト高 制御がやや難

故障確率：素子のデレーティングと、素子数により決まる。

使用環境、効率、重量、ノイズ、コストを考慮した回路方式の選定が重要。