



【報告 6】 電力設備用パワー半導体の長期信頼性評価と SiCパワー半導体による技術革新

電力中央研究所 研究参事
エネルギートランスフォーメーション研究本部
材料科学研究部門 研究推進マネージャー（パワー半導体）
土田秀一

研究成果報告会2025

2025年11月13日

 電力中央研究所

© CRIEPI 2025



 電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

パワー半導体に関する研究

- 広域連系のための交直変換器等において、運用開始後25－30年を経過したパワーエレクトロニクス（パワエレ）設備が多く存在している
 - Siパワー半導体の長期信頼性評価に関する研究を進め、特定のストレス印加により、一部の電気特性が変化することを明らかにした
-
- 再エネ連系やEV充電、データセンター等における電力変換容量が増大しており、変換ロスの低減のニーズが高まっている
 - 電力変換の損失低減を実現する次世代パワー半導体の研究に先駆的に取り組み、SiCパワー半導体・高効率変換器の実用化に貢献している

© CRIEPI 2025

1

本報告の内容は電力インフラに対し どのような価値向上の要素を持っているか

価値向上の要素

更新判断と
高経年化対策

運用変化
対応

自然災害
対応

設備保全・
合理化

性能向上・
非化石等増発電

報告会の構成

報告 1 電力流通設備のアセットマネジメントへの貢献

報告 2 火力発電設備の運用変化に伴う課題への対応

報告 3 水力発電設備の高経年化・自然災害リスクへの対応

報告 4 電力流通設備の災害復旧支援システムの開発と実務適用 — 災害情報共有プラットフォームの活用拡大 —

報告 5 電力設備の電気化学的手法による腐食劣化評価 — 送電鉄塔とコンクリート構造物への適用 —

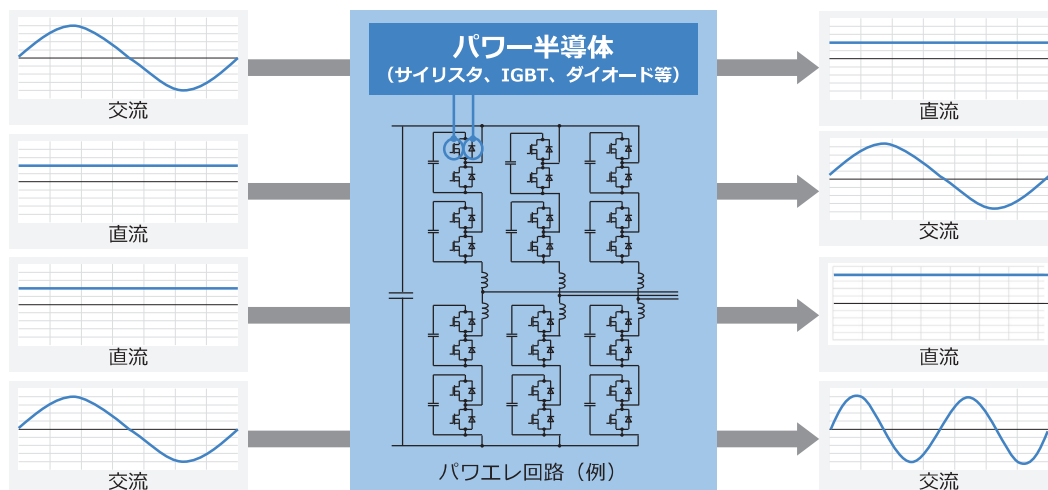
報告 6 電力設備用パワー半導体の長期信頼性評価とSiCパワー半導体による技術革新

報告内容

1. 電力系統におけるパワー半導体およびパワーエレクトロニクス電力変換装置の役割
2. Siパワー半導体の長期信頼性評価の研究
3. 炭化ケイ素（SiC）パワー半導体の開発と実用化の進展

パワー半導体とパワーエレクトロニクス

- **パワー半導体**：電流のオン・オフを行うことで電力を制御する半導体デバイス
- **パワーエレクトロニクス（パワエレ）**：パワー半導体を用いた電力の変換・制御技術



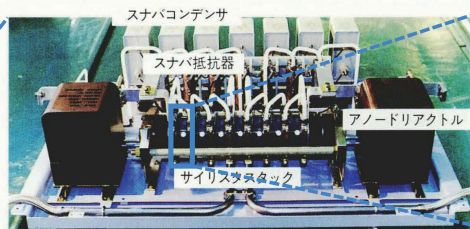
電力系統におけるパワエレ設備の構成

- 大型のパワエレ設備では、パワー半導体が複数個直列に接続されて一つのモジュールが構成され、モジュールを多段に積み上げることで、一つの変換器が構成される
- 大型設備では、1サイト当たり数百から千を超えるパワー半導体を使用される
- パワー半導体が形成される単結晶ウエハには、オフ時には高電圧が加わり、オン時には大電流が流れることで、**電氣的・機械的なストレス**が与えられる

■ 周波数変換所の交流/直流変換器の例（サイリスタバルブ）※1



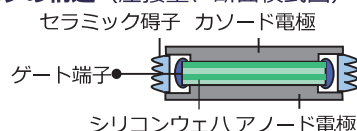
■ サイリスタモジュールの例※2



■ 電力用パワー半導体の例（サイリスタ）



■ サイリスタの構造（圧接型、断面模式図）



※1 Y. Makino and T. Sakai, CIGRE, B4-107 (2016).

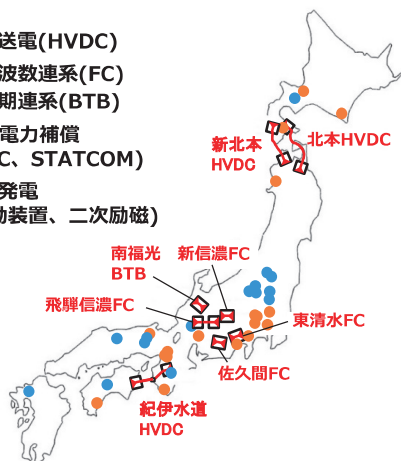
※2 三瓶ら, 日立評論, 76, 45-50 (1994).

電力系統におけるパワエレ設備

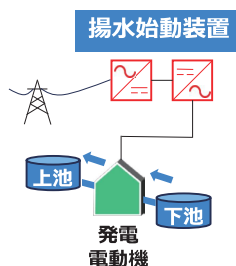
- 系統連系 (HVDC、FC) や無効電力補償 (SVC、STATCOM)、揚水始動装置、発電機励磁装置等の用途でパワエレ設備が重要な役割を果たしている
- 経年20-30年の設備*が増加し、更新判断を迫られる機器も存在。経年設備の安定運用や適正な更新判断のニーズ ※HVDCとFC全11設備のうち、6設備が運用開始後25年以上経過

電力系統におけるパワエレ設備の活用例

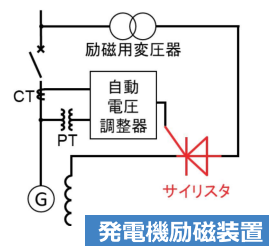
- 直流送電(HVDC)
- 異周波数連系(FC)
- 非同期連系(BTB)
- 無効電力補償 (SVC、STATCOM)
- 揚水発電 (始動装置、二次励磁)



■ 水力発電分野

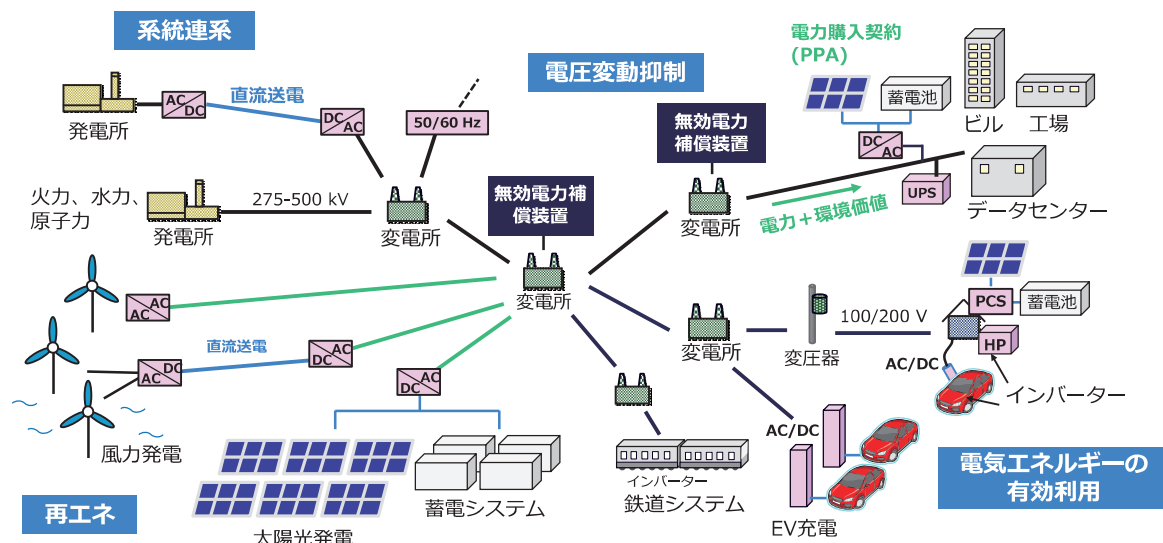


■ 火力発電分野



- 太陽光発電/蓄電システムの系統連系のためのパワエレ設備が増加
→ 再生エネルギーの有効利用のための系統連系装置の低損失化、電圧変動抑制
- EV充電やヒートポンプのモータ駆動、データセンター/サーバーへの電力供給
→ 電気エネルギーの利用効率の向上により、CO₂削減等の社会ニーズに対応

パワー半導体・パワエレ機器の低損失化、小型化のニーズ



当所におけるパワー半導体研究

【研究テーマ・1】

シリコン (Si) パワー半導体の長期信頼性評価

目的: 電力系統で用いられている経年パワエレ設備の長期安定運用や設備更新の判断に資する知見および診断技術の獲得

【研究テーマ・2】

炭化ケイ素 (SiC) パワー半導体の高信頼性化と大容量化に向けた材料研究

目的: 低損失パワー半導体の早期導入の支援、電力設備に適用する上での信頼性確保

パワエレ設備の不具合事例の調査（国内）

発表時に資料揭示

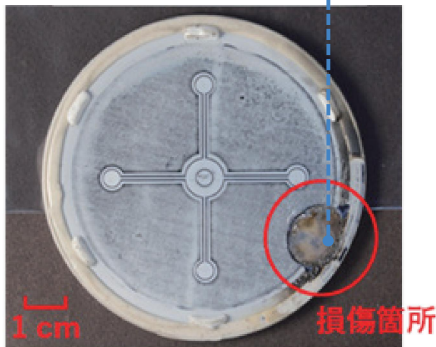
パワー半導体の故障解析

故障した電力用パワー半導体の詳細調査

電力設備での運転中に不具合が発生したパワー半導体の特性評価や材料分析を実施。その結果から、起こった現象を推定

- 火力発電所の発電機励磁装置で故障したサイリスタから取り出した半導体ウエハ

ウエハ端部の絶縁性能の低下が故障要因と推定



電力中央研究所 Annual Report 2024

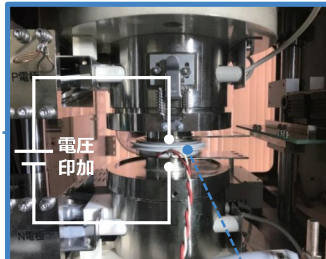
発表時に資料掲示

パワー半導体の長期信頼性の評価試験

- 電力システムで使用される数kV、数kA仕様のパワー半導体（主にサイリスタ）の電気特性を評価できる機関は国内にほとんど無い
- 当所は、6kV、6kAまでの電気特性を評価できる専用の電気特性評価装置を製作・導入した。本装置により、大半の電力用ダイオード、サイリスタについて、各種の電気特性を測定することが可能

パワー半導体電気特性評価装置

【最高電圧：6 kV, 最大電流：6 kA】



パワー半導体の規格（例：JEC2403）に準拠した評価体制を構築

圧接型Si
パワー半導体

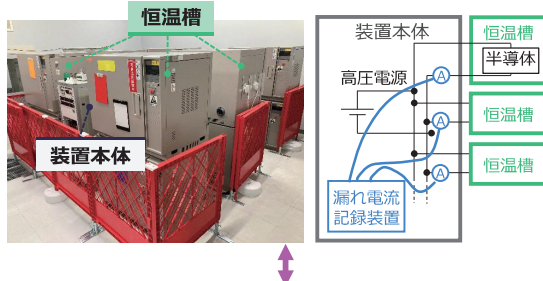
測定可能なパワー半導体と電気特性

測定対象	サイリスタ ダイオード
電気特性 項目	・ 漏れ電流（順方向、逆方向） ・ オン電圧 ・ ゲートトリガ電流 ・ 保持電流 ・ ターンオン特性 ・ ターンオフ特性 ・ 逆回復特性

パワー半導体の長期信頼性の評価試験

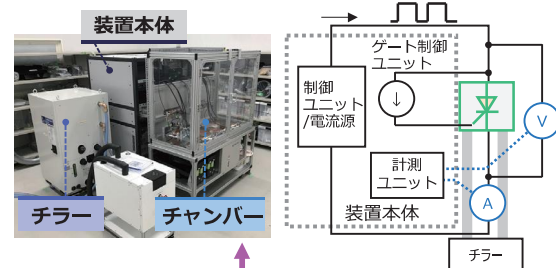
高温動作寿命試験

パワー半導体に対し、通常使用条件よりも高い温度と電圧を連続的に印加し、劣化を加速



パワーサイクル試験

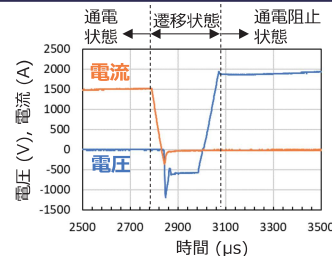
パワー半導体に間欠的に大電流を通電することで、周期的な温度変化を繰り返し発生させ、劣化を加速



電気特性評価試験

■サイリスタの電気特性の評価結果の例

ターンオフ波形：通電状態から通電阻止状態への移行



パワー半導体の長期信頼性の評価試験

発電所からのサンプル採取

電力各社より設備更新の情報提供を受け、採取を計画。全国各地（10か所以上）の発電所から、これまでに数百個のパワー半導体（サイリスタ等）を採取

電力設備からパワー半導体を分離・回収する手順を確立

変電設備

変電所A	STATCOM
変電所B	SVC
変電所C	SVC
変電所D	SVC

火力発電設備

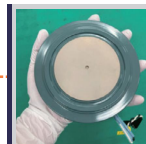
発電所A	励磁装置
発電所B	励磁装置
発電所C	励磁装置
発電所D	起動装置

水力発電設備

発電所A	励磁装置
発電所B	励磁装置
発電所C	励磁装置
発電所D	揚水始動装置
発電所E	揚水始動装置
発電所F	二次励磁装置
発電所G	二次励磁装置

■採取したサンプルの一例

（複数のパワー半導体が組込まれた、スタックと呼ばれる単位）



スタックを解体して得たパワー半導体（サイリスタ）

現場で20-40年使用されたパワー半導体の状態を調べた報告例は世界でも僅少

パワー半導体の長期信頼性の評価試験

電力用パワー半導体の長期使用後の電気特性評価

- 電力系統の現場で長期間（20-40年）使用された多数のパワー半導体の電気特性を測定し、その絶対値や分布から、長期使用に伴う特性変化の評価を実施

発表時に資料掲示

パワー半導体の長期信頼性の評価試験

加速劣化試験による電氣的・機械的ストレスと電気特性の関係性の評価

- 印加するストレスの種類と、電気特性の変化の有無を実験的に検証。複数の電気特性の中に、ストレスにより劣化しない特性と、劣化し得る特性があることが判明

発表時に資料掲示

まとめと今後の展開 (Siパワー半導体の長期信頼性評価)

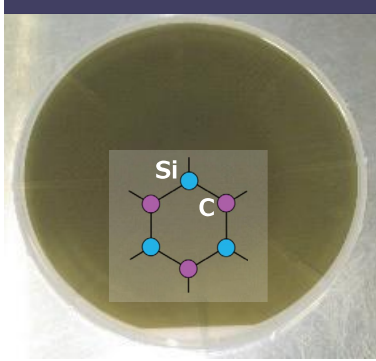
- Siパワー半導体の長期信頼性評価の一環として、パワエレ設備の不具合事例調査と、パワー半導体の故障解析、長期間使用されたパワー半導体を対象とした評価試験を行った
- 電気特性評価試験と長期信頼性評価試験から、特定のストレス印加により一部の電気特性が変化することを明らかにした
- 特性変化に対応した劣化評価方法の劣化診断への適用を検討中

今後の展開

- 現場で適用可能なSiパワー半導体の簡易的診断手法の開発

SiCパワー半導体の特徴と課題

SiC単結晶



Si-C間の強い原子間結合力

▶ 高い絶縁破壊電界強度

SiCパワー半導体

従来型Siパワー半導体に比べて、損失1/10、耐電圧2.5倍、駆動周波数10倍、動作温度100℃高のポテンシャル (インバーター損失~1/3、体積~1/4の効果)

従来型Siパワー半導体よりも損失低減と高速駆動が可能

長所

SiC
単結晶

パワエレ機器の効率向上と小型化を実現するキーマテリアルとして期待

課題

- ① SiC単結晶材料の生産性が低く高コスト
- ② 結晶欠陥が多く、素子の性能や信頼性に影響を及ぼす

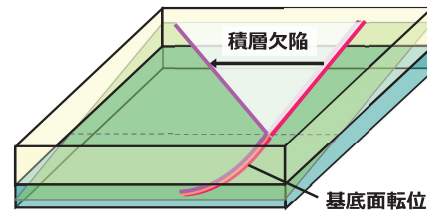
発表時に資料揭示

SiCパワー半導体の通電劣化現象

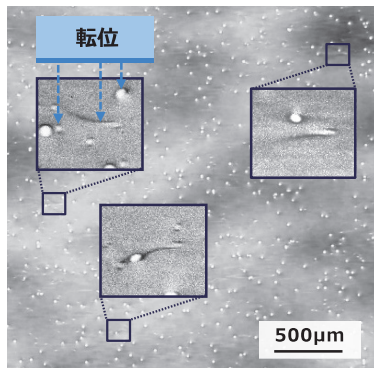
- SiC結晶中の欠陥（基底面転位）が原因となり、通電によって素子特性が劣化する

SiCパワー半導体の電力機器への適用に対して、通電劣化の現象解明および抑制技術の開発が必須

- SiC単結晶における積層欠陥の拡大現象



- SiC単結晶膜の放射光X線トポグラフィ像



- 通電後のSiC-PNダイオードのカソードルミネッセンス像

- 通電前(実線)と通電後(破線)のSiC-PNダイオードの順方向特性

発表時に資料揭示

© CRIEPI 2025

18

SiCパワー半導体の通電劣化現象の抑制技術

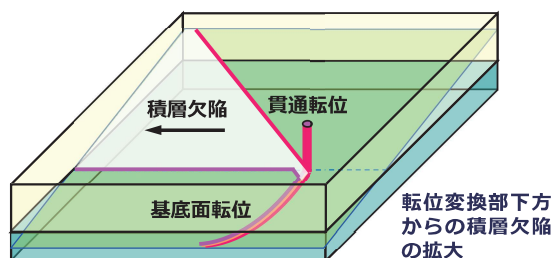
1. 通電劣化の要因となる転位の低減

- SiC単結晶膜の形成時における転位の転換



SiC基板と単結晶膜の界面付近で、転位の向きを変えることで、単結晶膜から通電劣化の要因となる**基底面転位**を排除（貫通転位は通電劣化の要因とならない）

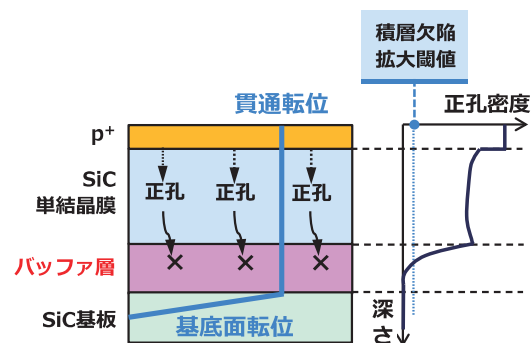
H. Tsuchida et al., Mater. Sci. Semicon. Process. 78, 2 (2018).



© CRIEPI 2025

2. 基板中へのキャリア注入の抑制

- バッファ層による基板へのキャリア注入の抑制



SiC単結晶膜とSiC基板の間に、キャリア（正孔）を消滅させる**バッファ層**を挿入することで、PNダイオードの通電時における基板中の正孔密度を、積層欠陥が拡大する閾値*以下に抑制

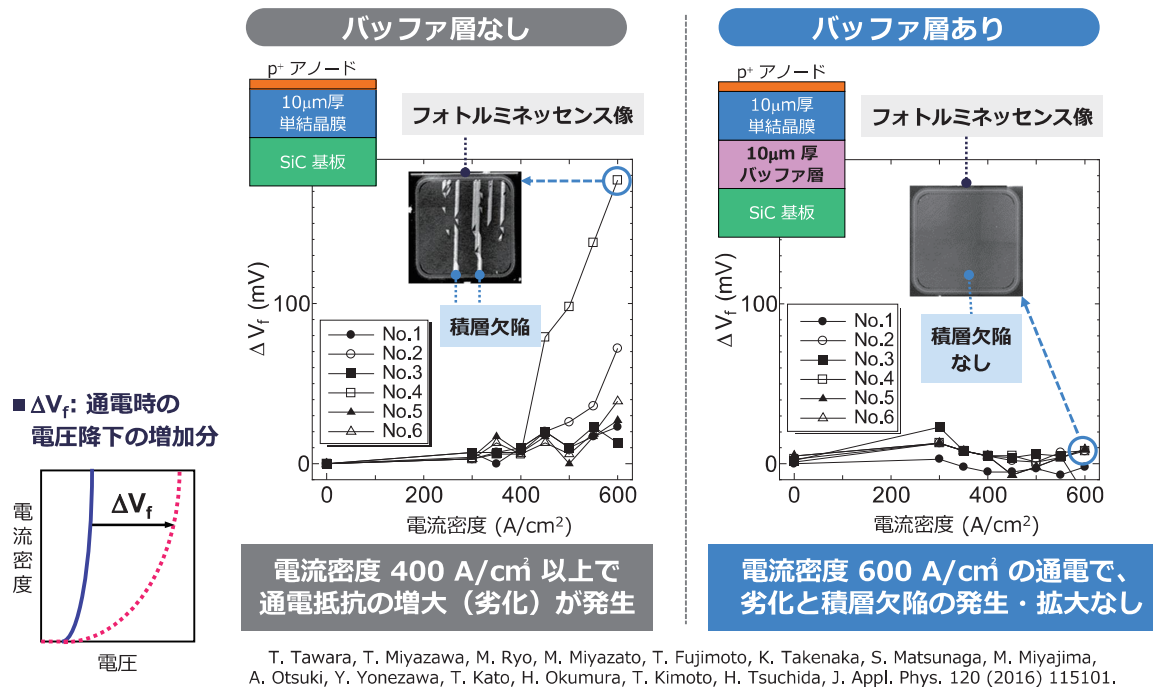
*K. Maeda, K. Murata, T. Tawara, I. Kamata, H. Tsuchida, APEX 12, 124002 (2019).

19

試作SiC-PN ダイオードの通電試験の結果



戦略的イノベーション
創造プログラム (SIP)



© CRIEPI 2025

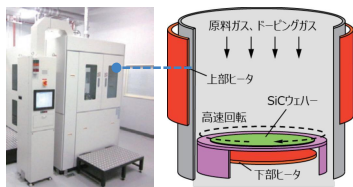
20

研究成果の実用化と社会実装の進展

■ 素子特性を低下させる結晶欠陥を大幅に低減した**高品質SiC単結晶膜**を**高速に成膜**する製造装置と成膜技術を開発 (メーカーとの共同開発)

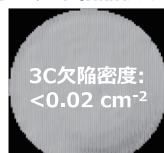
材料メーカーや半導体製造装置メーカーを通じて、
SiCパワー半導体の社会実装 (再エネ連系、EV等) の進展に貢献

■ 開発した高品質SiC単結晶膜の高速成膜装置

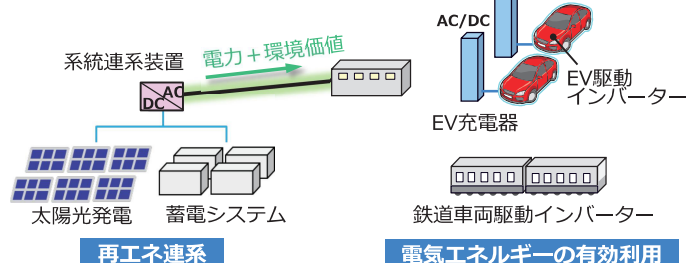


耐電圧数kV以上に相当する膜厚とドーピング密度の6インチ単結晶膜の高速成膜を実現

■ 成膜した6インチ単結晶膜の光学顕微鏡像



■ SiCパワー半導体の社会実装事例



今後に期待される大容量設備での応用例

- ・ 静止型無効電力補償装置、半導体変圧器
- ・ 風力発電の系統連系装置、直流送電の交直変換装置

© CRIEPI 2025

21

まとめと今後の展開 （SiCパワー半導体の高信頼性化と大容量化に向けた材料研究）

- SiCパワー半導体の通電劣化を抑制するための基礎技術を得た
- 開発した高品質SiC単結晶膜の高速製造技術が実用化され、社会実装が進展

今後の展開

- SiCパワー半導体の長期信頼性を確保するための材料スペックの提示
- 高品質SiC単結晶の適用による高耐電圧SiCパワー半導体の信頼性検証

SiCパワエレ技術のCO₂削減ポテンシャル:10-11億トン/年 (NEDO TSC Foresight 2023) →世界のCO₂排出量の2%超に相当

当所のSiCパワー半導体研究の成果物:

- ・ 特許出願数: 110件
- ・ 査読付論文数 233件、国際会議招待講演 42件
- ・ 外部資金研究 13件
- ・ 第50回 (2023年度) 岩谷直治記念賞*「高品質SiC単結晶膜の高速成長技術の開発」

* 岩谷直治記念賞:

公益財団法人岩谷直治記念財団が、エネルギーおよび環境に関する優れた技術開発で、かつ**顕著な産業上の実績**が認められている業績を表彰するもの

ご清聴ありがとうございました

電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry