

平成20年度実施方針

電子・情報技術開発部

1. 件名

プログラム名 ITイノベーションプログラム
エネルギーイノベーションプログラム
(大項目) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発

2. 根拠法

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号ハ

3. 背景及び目的

(1) 背景及び目的

情報家電の普及や通信需要の拡大に対処する電気エネルギーの高効率利用の実現、及びハイブリッド自動車や産業用の様々なモータ制御、家電製品の電源制御など、我が国の重要産業の国際競争力強化と省エネルギーを図るためには、その基盤となるパワーエレクトロニクスの研究開発が必要である。また、経済産業省が発表した新産業創造戦略（平成17年5月）において、我が国の産業競争力強化のために注力すべき分野として、環境・エネルギー機器が挙げられており、パワーエレクトロニクス機器には、一層の低消費電力化・小型化が求められている。本プロジェクトでは、自動車・家電製品等の低消費電力化実現に不可欠な炭化ケイ素（SiC）等を用いたパワーエレクトロニクスインバータ基盤技術を平成20年度までに確立し、我が国の関連産業の国際競争力強化と省エネルギーに資することを目的としてITイノベーションプログラムおよびエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。

低損失・高密度パワーエレクトロニクス機器を実用化するためには、SiCスイッチング素子技術を用いて、低損失・高密度インバータ技術開発を行うことが必要である。すなわち具体的な適用製品を想定して、従来のSiスイッチング素子を高性能SiCスイッチング素子に置き換えてインバータに用いるための回路設計技術、ノイズ対策や熱設計などのSiCスイッチング素子実装に伴う課題等を解決していく必要がある。一方、革新的な超低損失・高密度インバータを実現するために、SiCスイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等のSiC材料のポテンシャルを最大限活用した高度化が求められる。これらの技術開発のためには素子特性評価とSiCウェハ評価を多面的に結びつけ、SiC単結晶ウェハおよびエピタキシャル製膜技術へフィードバックすることが不可欠である。さらに、高度化SiCスイッチング素子の性能を最大限活用したインバータ高パワー密度化に関わる設計技術・高速制御技術・高温実装技術等の基盤技術開発が必要である。

[委託事業]

(2) 実施項目

本プロジェクトでは、これらの要請を具現化して、SiCスイッチング素子を用いたパワーエレクトロニクスインバータ基盤技術を確立することを目的とする。

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について研究開発を実施する。

- ①高効率・高密度インバータユニット技術開発
- ②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発

(3) 最終目標（平成20年度）

具体的な製品応用を想定したSiCを用いた低損失インバータユニットを試作し、電力変換損失を同一定格のSiインバータユニットの30%以下に低減する。

また、SiC材料のポテンシャルを最大限活用した革新的な超低損失・高密度インバータを実現するために、SiCスイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等の性能高度化や、インバータ設計・高速制御・高温実装等に関わる基盤技術を確立する。

4. 実施内容及び進捗（達成）状況

独立行政法人産業技術総合研究所イノベーション推進室 技術顧問 荒井和雄をプロジェクトリーダーとし、以下の研究開発を実施した。

(1) 平成19年度（委託）事業内容

研究開発項目①高効率・高密度インバータユニット技術開発（担当：三菱電機株式会社）

インバータユニットを構成する基本要素デバイスであるSiCスイッチング素子（MOSFET）とダイオード素子（SBD）の開発を主に平成18年度に実施した。MOSFETのオン抵抗低減に向け、セルの微細化検討を実施した。パワーデバイスとしての安全動作の評価の一環としてMOSFETの短絡耐量を評価した。スイッチング損失低減に向けて駆動方式を検討し、ゲートドライバー回路の設計、試作を行った。SBDとMOSFETチップを試作し、それらを組み合わせたモジュールにおいてスイッチング特性を評価した。

平成19年度において、SiCモジュールを用いた3.7kWインバータユニットの試作、評価を行い、損失50%減、パワー密度9W/cm³を実証した。素子の並列化により大容量化した30A級のモジュールを試作し、その静特性、動特性から3相インバータユニット（14kVA）適用時の損失を推定した。その結果Siインバータ比で損失30%が達成できる見通しを得た。高キャリア周波数化に向けて20kHzでの基礎特性評価を実施した。4インチウェハの評価に着手した。

研究開発項目②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発

（担当：独立行政法人産業技術総合研究所／財団法人新機能素子研究開発協会）

SiCパワー素子のポテンシャルを最大限活用した革新的な超低損失高密度インバータを実現するために、SiCを用いたダイオード素子・スイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等の性能高度化が必要である。以下の3項目を設定し研究開発を実施した。

(1) インバータ大容量化基盤技術の研究

平成18年度において、2インチSiC基板上の各種素子構造の特性マッピングを行う作製・評価プロセスを確立すると共に、種々の高度評価法によるSiC基板欠陥評価方法を開発した。

平成19年度では、2インチSiC基板上への素子製造プロセスを確立して、3mm²素子

(PiN, SBD, DMOS) の試作を行って歩留り30%を得ると共に、放射光X線トポグラフィーや光学的表面検査装置等での結晶欠陥と素子破壊箇所の対応付け、素子特性劣化メカニズムに関連した絶縁破壊箇所特定用TEG構造の開発等を通してキラー欠陥の同定を行った。また、活性化熱処理プロセスにおけるSiC基板表面荒れ抑制のための新たな処理法や逆方向耐圧向上のためのJBS構造等を開発・導入した。更に、伊丹サイトでのダイオード試作を念頭に置いて実用化に必須である4インチSiCウェハの評価を行った。

(2) インバータ信頼性向上基盤技術の研究

平成18年度において、欠陥密度自動算出技術や転位欠陥上の酸化膜構造解析技術を含め、2インチSiC基板上の各種サイズのゲート酸化膜信頼性評価素子の作製・評価技術を開発した。

平成19年度では、2インチSiC基板上への素子製造プロセスを確立して、3mm²MOSキャパシタで信頼性の評価を行い、種々の仕様の基板上のMOSキャパシタ測定から、MOSキャパシタ中の欠陥増加が絶縁破壊電荷を減少させていることを明らかにした。それらキラー欠陥の種類について、放射光X線トポグラフィー、EBICや破壊検査である熔融KOHエッチング、透過型電子顕微鏡等により解析を進めた。また、C面上MOSキャパシタにおいて、MOSFETの高チャネル移動度とゲート酸化膜の高信頼性を両立するためのゲート酸化膜形成技術を開発し、信頼性耐量の増加に成功した。

(3) インバータ高パワー密度化基盤技術の研究

平成18年度において、世界最高の $1.8\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の低損失MOSFET性能を実証し、次世代インバータ開発の早期実用化を加速するため、低オン抵抗化、及び試作効率化のために必要な微細加工プロセスの確立と、試作デバイスによるインバータ基本回路を試作して各種パラメータの抽出とその等価回路モデル化を行うと共に、高出力性能の評価を可能とするインバータ動作評価環境を整備した。

平成19年度では、プロジェクト内製のIEMOSやSBDをインバータ基本回路に適用して総合評価を開始した。高パワー密度設計に活用するため、主回路、デバイス等の設計パラメータを統合したインバータ損失統合設計シミュレータのプログラムを改善し、それを用いた低オン抵抗デバイスによるチョッパ回路の設計・試作を通してインバータ損失統合設計手法の妥当性を確認した。また、高温(250℃)環境動作のための電極形成技術、信頼性評価、実装技術や高速制御技術、ノイズフィルタ技術に関する課題抽出／詳細分析を進め、その結果を上記損失統合設計シミュレータに組み込んだ。

プロジェクト全体での一体的なSiC調達管理（担当：財団法人新機能素子研究開発協会）

平成18年度において、ウェハ品質評価管理室において、プロジェクト全体での一体的なSiCウェハ調達管理を行い、系統的なデータ・集積管理を実施した。

平成19年度では、調達したSiCウェハ品質評価用の各種ウェハ評価装置の導入を行うと共に、品質／使用管理のための定量的評価法を確立して品質データベースシステムを構築すると共に、キラー欠陥の同定を進めた。また、ウェハメーカ、エピ外注先との情報交換を行い、品質改善のための議論を進めた。

(2) 実績推移

実績額推移（百万円）：	平成18年	平成19年	合計
需給勘定	2,066	1,089	3,155
特許出願件数	2	9	11
論文・学会発表数	22	50	72
フォーラム・新聞発表等件数	1	1	2

5. 事業内容

独立行政法人産業技術総合研究所イノベーション推進室 技術顧問 荒井 和雄をプロジェクトリーダーとし、以下の研究開発を実施する。実施体制については、別紙を参照のこと。

(1) 平成 20 年度 (委託) 事業内容

研究開発項目①「高効率・高密度インバータユニット技術開発」(担当:三菱電機株式会社)

SiCモジュールを適用した出力容量(14 kVA)の3相インバータユニットを試作し、その損失が同定格のSiインバータユニットの30%以下であることを実証する。また、パワーエレクトロニクス機器のフィルター等の小型化が期待できるインバータの高キャリア周波数化(>15kHz)に関し評価検討を行い、高キャリア周波数化効果を明確にする。

研究開発項目②「高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発」

(担当:独立行政法人産業技術総合研究所/財団法人新機能素子研究開発協会/三菱電機株式会社)

(1) インバータ大容量化基盤技術の研究

様々な欠陥や欠陥密度を有するSiC基板を用いて、各種の5mm²SiC素子や破壊箇所特定用TEGを作製して、素子特性や歩留まりの評価を行なう。高度評価法によるウェハ欠陥の位置や種類(形状)と素子特性との対応から、結晶欠陥と耐圧、リーク電流との対応付けをしてキラークラック欠陥を同定する。また、SiC素子特有のプロセスの問題点について歩留まりを向上する技術を開発する。以上より、5mm²、100A級を達成するのにSiC基板に要求される欠陥種及び欠陥密度や素子構造及び製造プロセスの条件を明確にする。

また、産業技術総合研究所と新機能素子研究開発協会においては、種々のSiC基板欠陥評価方法を用いて(3)のウェハ品質評価と連携した4インチウェハ評価を実施する。さらに、三菱電機において、4インチウェハを用いたダイオード試作評価を実施する。これらのウェハ評価により得られた結晶欠陥情報とデバイス特性評価を連携させ、素子特性を劣化させるメカニズム解明に資する共に、実用化のためのプロセスコストの低減を図った高効率・高密度インバータ実現に向けての課題解決に資する。

また、カーボンキャップを形成する専用の装置を早期に導入して、全てのSiC素子の試作に適用する。これにより、プロセス欠陥を極力除去し、結晶欠陥と電気特性と相関付けを促進することでキラークラック欠陥を同定し、ウェハ企業へのフィードバックを行い、早期にSiC基板の品質の向上を図る。

(2) インバータ信頼性向上基盤技術の研究

様々な欠陥や欠陥密度を有するSiC基板を用いて、5mm²のゲート酸化膜キャパシタ及びMOSFETを試作してゲート酸化膜特性を測定し、ゲート酸化膜の信頼性とチャネル移動度が両立するゲート酸化膜形成条件を明確にする。また、高度評価法によるウェハ欠陥の位置や形状、特性との対応から、TZDB特性、TDD寿命との対応づけしてキラークラック欠陥を同定する。以上より、5mm²、100A級のSiC MOSFETを実用化するのに必要な信頼性寿命(30年)を得るために必要なSiC基板の欠陥種及び欠陥密度を明確にする。

また、カーボンキャップ形成技術をイオン注入面のゲート酸化膜形成時の活性化熱処理技術に適用する。これにより、プロセス欠陥を極力除去し、結晶欠陥とイオン注入面上のゲート酸化膜の信頼性の相関付けを促進することでキラークラック欠陥を同定し、ウェハ企業へのフィードバックを行い、早期にSiC基板の品質の向上を図る。また、デバイス企業が持ち帰り、実際の量産プロセスに用いることができる、大口径化SiC基板にも適用可能なカーボンキャップ方式の活性化熱処理技術を開発し、SiC素子の実用化を促進する。

(3) インバータ高パワー密度化基盤技術の研究

素子あたり10 A以上のSiC低損失MOSスイッチング素子(オン抵抗2~5m Ω ・cm²級)を用いて実インバータ回路への適用を進めると共に、妥当性を確認したインバータ損失統合設計手法を用いてインバータ損失の限界を迫及する限界設計技術を開発する。また、高密度インバー

タ高速制御技術および高温（250℃）環境での動作のための実装技術の指針を提示し、50W/cm³以上の高パワー密度SiCインバータの実現に必要な条件とその見通しを明確化する。

また、10A以上の容量の大きいSiC低損失MOSスイッチング素子（オン抵抗2～5mΩ・cm²級）の試作にも適用可能なカーボンキャップ方式の活性化熱処理技術を開発する。

プロジェクト全体での一体的なSiC調達管理（担当：財団法人新機能素子研究開発協会）

ウェハ品質評価管理室において、プロジェクト全体での一体的なSiCウェハ調達管理を行い、系統的なデータ・集積管理を実施する。大口径4インチウェハの評価を実施する。また、SiC基板やそれをを用いたデバイス性能の評価結果をSiC基板/エピ基板作製企業、研磨企業へ開示して、ウェハ欠陥の許容範囲明確化、SiC基板品質向上を促進すると共に、プロジェクトへの高品位な基板の供給を行う。

また、カーボンキャップ方式の活性化熱処理技術用のSiC基板の調達、品質評価、管理を行い、さらに同定されたキラー欠陥の技術情報をウェハ企業にフィードバックする。

（2）平成20年度事業規模

需給勘定 890百万円（継続）

事業規模については、変動があり得る。

6. その他重要事項

（1）運営・管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権を有するNEDO技術開発機構は、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

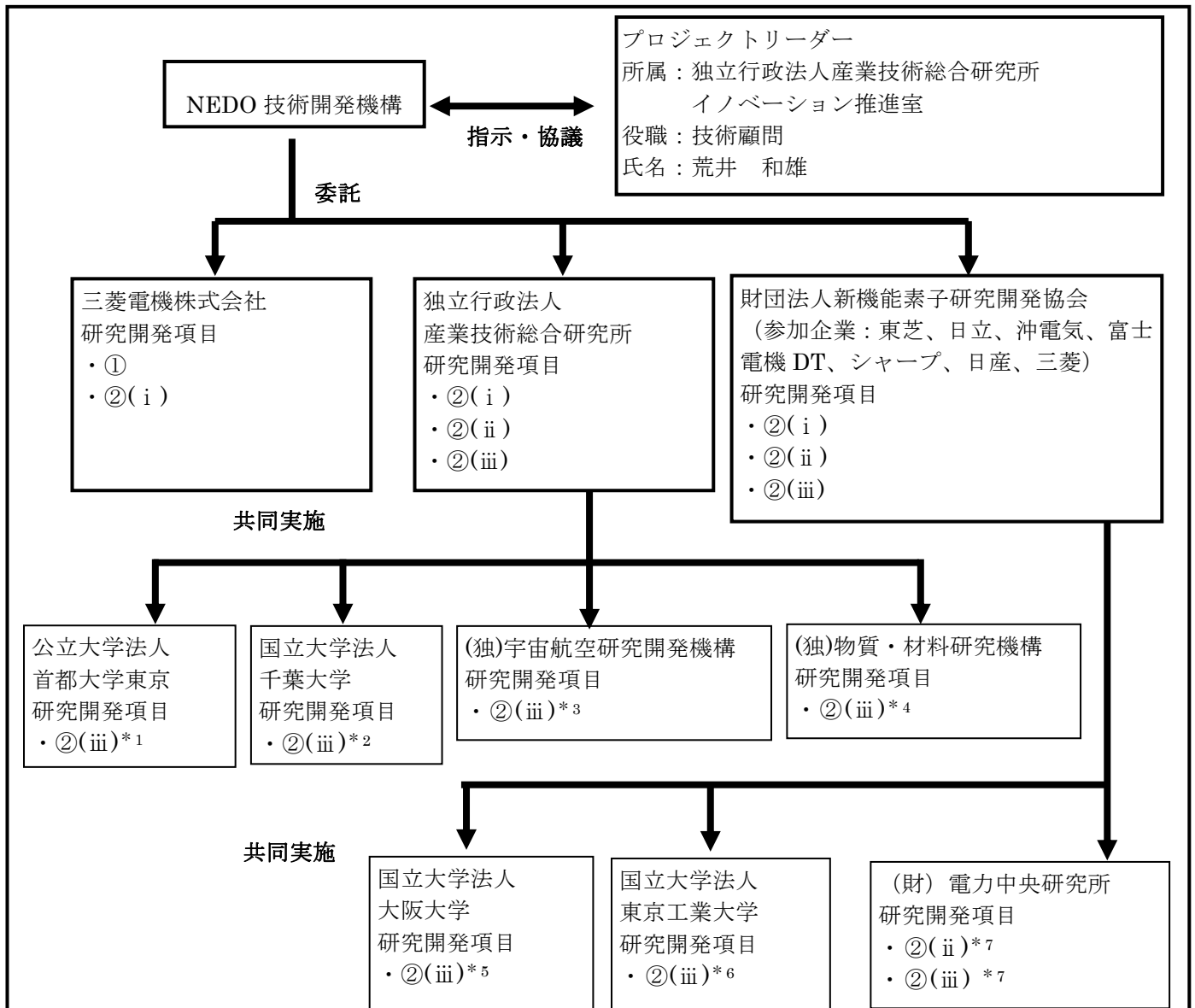
（2）複数年度契約の実施

平成18年度から20年度の複数年度契約を行う。

（3）年間スケジュール

平成20年	3月	6日	・・・	部長会付議
平成20年	3月	11日	・・・	運営会議付議
平成20年	4月		・・・	契約変更
平成20年	6月		・・・	契約変更

「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」 実施体制



【研究項目】

- 研究開発項目①「高効率・高密度インバータユニット技術開発」
- 研究開発項目②「高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発」
 - (i) インバータ大容量化基盤技術の研究
 - (ii) インバータ信頼性向上基盤技術の研究
 - (iii) インバータ高パワー密度化基盤技術の研究

- *1 SiC インバータ EMI 対応技術の研究開発
- *2 SiC インバータ高速制御技術の研究開発
- *3 SiC デバイスのフォトルミネッセンスマッピング法による評価
- *4 SiC デバイスの EBIC 法による評価
- *5 SiC デバイス実装に対応可能なハイブリッド銀ペーストの開発
- *6 電力変換システムとその応用に関する研究
- *7 デバイス作製プロセス起因欠陥の評価／インバータ設計最適化技術の開発