

平成27年度実施方針

電子・材料・ナノテクノロジー部

1. 件名

(大項目) 低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト

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号ニ及び第3号

3. 背景及び目的・目標

エネルギー生成方法の多様化は、資源枯渇および地球温暖化の解決に向けた重要な検討課題であるが、中でも、電気エネルギーへの移行は、課題解決の有効な手段のひとつである。電力の生成から消費に至るフローにおいて、電力利用効率向上の手段として、パワー半導体デバイスによる電力変換・制御（直流・交流変換、周波数制御等）は、すでに多くのフェーズで行われている。さらに、これまでパワー半導体が適用されていなかった機器への展開や、新たな応用分野が急激に広がることによって、パワー半導体デバイスが利用される局面は大幅に増加すると見込まれる。たとえば、ハイブリッド自動車の普及など電化の進む社会への転換がその起動力の一つである。また、高度に情報化が進む今日の社会では、ブロードバンドの普及、IT機器の高度化・設置台数の急激な増加に伴い、機器が消費する電力の急激な増大が見込まれており、情報関連機器の省エネルギー化が重要な課題となっている。このためにも、パワー半導体デバイスが電力利用効率向上に大きく役立つと考えられる。このように、パワー半導体デバイスによる電力損失の低減は低炭素社会の実現に向けて極めて重要である。

現在は、パワー半導体デバイスの材料として主にSi（シリコン）が使用されているが、電力損失がSiの1/100以下、数kVの高耐圧性など、パワー半導体として極めて優れた性能を有した新材料SiC（炭化珪素）の実用化が期待されている。また、GaN（窒化ガリウム）、Ga₂O₃（酸化ガリウム）等、SiC以外の新材料についても実用化に向けて研究開発を進めている。新材料パワー半導体デバイスを用いることにより、従来のSiデバイスを用いた電力変換モジュールと比べ、電力損失が格段に低い、また小型で大電力を扱える電力変換機器を実現することが期待される。インバータ等の電力変換装置の適用範囲が鉄道や次世代自動車などの環境産業をはじめとして極めて広いことから、社会全体への波及効果が極めて大きく、さまざまな産業において、その成長の鍵となるものである。したがって、パワー半導体デバイスおよび電力変換機器における技術力は我が国産業の国際競争力を左右するものである。

我が国における関連技術開発としては、主として産業用モータ駆動用を想定して、SiCウエハ品質と関連づけたSiCデバイスの大容量化／高信頼化の技術開発、或いはインバータコア技術開発がNEDOプロジェクト（「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」平成18年～平成20年など）において行われてきている。同プロジェクトにて開発されたSiCウエハ品質向上および評価技術・デバイスプロセス技術・回路技術・熱設計技術等、全体的な技術の高度化の結果として、Siデバイスに比べ大幅な損失低減（同定格インバータユニットにおいて、現在主流のSi-IGBTを適用した場合に比べ、70%損失を低減）が実証されるに至っている。

IT産業の電力消費低減に寄与するため、データセンタやその電力源に用いる交流・直流変換等の高効率化を実現したり、電気自動車のように新たに拡大しつつある応用製品に適した電力変換機器を実現したりするためには、具体的な適用製品を想定して、高電流密度化（大容量化）や、デバイス・機器の信頼性向上といったSiCデバイス性能の高度化を進めることが重要である。同時に、SiCデバイスとの組み合わせにおいて力を発揮する材料・部品・回路設計・ノイズ対策や熱設計などの課題を解決していく必要がある。

一方、SiCパワー半導体デバイスの効率向上・適用範囲拡大を支え、普及の鍵となるのは、SiC半導体材料の高品質化と供給安定化であるが、現在のSiCウエハ市場は、4インチウエハが限定された規模で生産されている状況であって、かつ海外企業による寡占状況と言わざるを得ない。このことから生じる供給安定性への不安及び高価格が開発・普及への足かせになっている。それだけでなく、諸外国においてはごく最近になって6インチウエハ実現がアナウンスされ、かつ、高耐圧領域でのSiC電力変換器の実証が進みつつある。

このような背景のもと、6インチ級SiCウエハ量産化技術の構築と対応するデバイス化プロセス装置開発、並びにSiCパワー半導体デバイスを用いた電力変換器の効能実証を早期に実現することが緊急の課題となった。SiCパワー半導体デバイスの応用製品としては、急激に増大しつつあるIT産業の電力消費量増加の対策となるデータセンタ用電源や、その電力源として意味がある分散型太陽光発電システムなどに用いる電力制御機器が有望であり、その高効率化・小型化・高信頼化に貢献するデバイス技術開発・設計技術開発等を前記したウエハやプロセス装置開発と並行して行うことは極めて重要である。

また、パワーエレクトロニクスは扱う電力の容量が大きいと、機能をワンチップ化して高機能化を図ることは困難であり、高機能化はデバイスを核として、デバイスの制御系や周辺回路を組み合わせたモジュールやパッケージにより、システム全体の最適化を図ることによってなされることとなる。従って、デバイスの高性能化のみが技術を牽引するのではなく、アプリケーションに応じて製作される応用システムも重要な要素となる。従って、パワーエレクトロニクス分野における我が国の競争力を更に強化するためには、各種材料のウエハ、デバイス等の性能向上を図ると共に、産業機器、自動車、民生機器などアプリケーション毎に要求されるスペックを、最適な材料（SiC、GaN等）、設計技術、実装技術等を組み合わせ、最適な応用システムの構築により実現することが重要となる。加えて、応用システムは、新たな用途、デバイス・ユーザーの開拓を図ること等により、他の追随を許さない環境

を作る必要がある。

以上のように、これらの課題に対して積極的な取り組みを行うことは、省エネルギー技術の国際的牽引、及び我が国の産業競争力強化にとって極めて重要な意味を持つものである。

そこで上記を目的として、下記の研究開発項目について実施する。

研究開発項目① 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト

- (1) 高品質・大口径S i C結晶成長技術開発／革新的S i C結晶成長技術開発 [委託事業
共同研究事業 (NEDO負担率1/2)]
- (2) 大口径S i Cウエハ加工技術開発 [委託事業]
- (3) S i Cエピタキシャル膜成長技術 (大口径対応技術／高速・厚膜成長技術) [委託事業]
- (4) S i C高耐圧スイッチングデバイス製造技術 [委託事業]
- (5) S i Cウエハ量産化技術開発 [助成事業2/3]
- (6) 大口径S i Cウエハ加工要素プロセス検証 [委託事業]
- (7) S i C高耐圧大容量パワーモジュール検証 [委託事業]
- (8) 大口径対応デバイスプロセス装置開発 [助成事業2/3]
- (9) 高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発 [委託事業]
- (10) 新世代S i Cパワーデバイス技術開発 [委託事業]

研究開発項目② 次世代パワーエレクトロニクス技術開発 (グリーンITプロジェクト)

- (1) S i Cパワーデバイスを用いたデータセンタ用サーバ電源技術開発
[共同研究事業 (NEDO負担率1/2)]
- (2) S i Cパワーデバイスを用いた太陽光発電用パワーコンディショナ技術開発
[共同研究事業 (NEDO負担率1/2)]
- (3) 次世代S i C電力変換器基盤技術開発 [委託事業]

研究開発項目③ 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

- (1) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の先導研究 [委託事業]
- (2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の実用化助成
[助成事業 (助成率: 2/3) (※2)]
(※2) 民間企業単独あるいは民間企業のみでの連携等により実施される場合、
助成率を1/2とする。

各研究開発項目の達成目標を以下に示す。

研究開発項目① 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト

- (1) 高品質・大口径S i C結晶成長技術開発／革新的S i C結晶成長技術開発

【中間目標】（平成24年度）

昇華法においては、口径6インチで、

- ① 10^3 個/cm²台の転位密度を実現するのに必要な高品質化にかかわる基盤技術を確立する。
- ② 0.5mm/h以上の結晶を実現するのに必要な成長速度向上にかかわる基盤技術を確立する。

【最終目標】（平成26年度）

昇華法においては、口径6インチ、長さ50mm以上で、

- ① 有効面積（端部3mmを除く）全域において転位密度 1×10^3 個/cm²以下の結晶を実現する。
- ② 有効面積（端部3mmを除く）全域において転位密度 5×10^3 個/cm²以下の結晶を成長速度0.5mm/h以上で実現する。

革新的結晶成長法においては、口径2インチ以上、長さ20mm以上の4H-SiC単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証する。

(2) 大口径SiCウエハ加工技術開発

【中間目標】（平成24年度）

ウエハ切断技術に関して、3インチ結晶で切断速度150μm/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代300μm以下を実現する。また、3～4インチ結晶/ウエハを対象にして、切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各要素工程の最適化、及び接続最適化を行い、6インチSiC結晶/ウエハ加工の高速・高品質な一貫プロセス最適化の方針を決定する。

【最終目標】（平成26年度）

6インチ結晶/ウエハを対象に、以下の効率性を実現する。

- ① 切断：速度300μm/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代250μm以下
- ② インゴットから表面仕上げ精度Rms（表面荒さ）0.1nm@2μm×2μmのベアウエハを実現する統合加工プロセスとして、プロセス時間24時間以内

(3) SiCエピタキシャル膜成長技術（大口径対応技術/高速・厚膜成長技術）

【中間目標】（平成24年度）

① 大口径対応技術

みなし6インチ径のエピタキシャル膜成長を行い、6インチ成長プロセスにおける問題点を把握すると共に、当該成長膜に対して以下の品質を実現する。

- ・ 均一度：厚さ±10%、ドーピング濃度±20%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：2個/cm²以下

②高速・厚膜成長技術

口径2インチ、膜厚50 μ m以上のエピタキシャル膜に対して以下の品質を実現し、SiC厚膜形成技術を確立する。

- ・純度 残留キャリア濃度： $3 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ 以下
- ・品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：5個/ cm^2 以下

【最終目標】（平成26年度）

①大口徑対応技術

口径：6インチ、処理枚数：3枚以上のエピタキシャル膜に対し、以下の品質を実現する。

- ・均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、ドーピング濃度 $\pm 10\%$
- ・品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：0.5個/ cm^2 以下

②高速・厚膜成長技術

成長速度100 μ m/h以上で作成した口径4インチ、膜厚50 μ m以上のエピタキシャル膜に対し、以下の品質を実現する。

- ・純度 残留キャリア濃度： $3 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ 以下
- ・均一度：厚さ $\pm 2\%$ 、ドーピング濃度 $\pm 10\%$
- ・品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：1.0個/ cm^2 以下

(4) SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術

【中間目標】（平成24年度）

①新規耐圧構造デバイス

より低損失化が可能な新規高耐圧デバイス構造とその作製要素プロセスを開発し、当該構造で耐圧3kV以上の高耐圧SiC-MOSFET（metal-oxide-semiconductor field-effect transistor、以下、「MOSFET」という。）を実現する。

②高耐圧大容量デバイス

耐圧3kV以上の高耐圧SiC-MOSFETを実現すると共に、SiC-MOSFET、SiC-SBDを適用した3kV以上の電力変換器モジュールを試作して、当該電圧領域のスイッチング及び多並列接続に関する要素技術を確立する。

【最終目標】（平成26年度）

①新規耐圧構造デバイス

必要な各種要素技術を高度化し、耐圧：3kV以上で特性オン抵抗：15m Ω cm²以下の高耐圧SiC-MOSFETを実現する。

②高耐圧大容量デバイス

耐圧：3kV以上、オン抵抗80m Ω 以下（室温環境下）、定格出力電流密度100A/ cm^2 以上の高耐圧SiC-MOSFETを開発し、当該デバイスを用いたMVA級電

力変換器を試作して、その動作時の電力損失が同耐压のSi電力変換器の50%以下であることを実証する。

(5) SiCウエハ量産化技術開発

【最終目標】(平成23年度)

大口径4H-SiCウエハの量産化技術開発可能な環境整備(昇華法結晶成長炉、ウエハ加工装置)を実施し、

①有効面積(端部3mmを除く)全域において転位密度 1×10^4 個/cm²以下の口径6インチ4H-SiCインゴットを実現する。

または、

②成長速度0.25mm/h以上で転位密度 5×10^4 個/cm²以下の口径6インチ4H-SiCインゴットを実現する。

(6) 大口径SiCウエハ加工要素プロセス検証

【最終目標】(平成23年度)

切断技術として、ダイヤモンドを使ったマルチワイヤソーにおいて、SiC6インチインゴットに対して150μm/分以上の高速切断が可能になる最大ワイヤー速度:約4,000m/min、最大張力:70Nの高速高剛性切断技術を実現する。更に、切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各工程に関して、個々の要素工程の能力限界と最適加工条件(砥石、砥粒、研磨定盤種、装置技術、加工動作管理、能率等)を抽出し、SiCウエハ加工における高速一貫プロセス確立に資する統合的なデータ蓄積を行う。

(7) SiC高耐压大容量パワーモジュール検証

【最終目標】(平成23年度)

耐压3.3kV 定格電流75AのSiCショットキーバリアダイオードを開発し、Si絶縁ゲートバイポーラトランジスタと組み合わせて1,000A級大容量パワーモジュールを試作してその動作を実証するとともに、All-SiCデバイスパワーモジュール実現に必要とされるSiC-FETの仕様に対する技術的指針を得る。

(8) 大口径対応デバイスプロセス装置開発

【最終目標】(平成23年度)

6インチSiCウエハを対象に、イオン注入、活性化熱処理、高温酸化等のデバイス化のための高温プロセス装置、或いは透明ウエハ対応露光装置を開発し、所定の処理特性の面内均一性を達成する。具体的には、

イオン注入装置の場合、

- ・室温から800°Cまでの全領域でイオン注入が可能なこと
- ・温度均一性:6インチ面内:±15°C

- ・ A1 注入イオン電流：200 μ A以上

活性化熱処理装置の場合、

- ・ 熱処理温度：1, 800°C以上
- ・ 温度均一性：6インチ面内： $\pm 30^\circ\text{C}$
- ・ 一度に25枚以上処理可能なこと。

高温酸化装置の場合、

- ・ 1, 200°C以上の高温でパイロジェニック酸化、及び H_2 、 NH_3 、 N_2O ガス処理が可能なこと。
- ・ 温度均一性：6インチ面内： $\pm 15^\circ\text{C}$
- ・ 一度に25枚以上処理可能なこと
- ・ 1, 100°Cで処理したSiゲート絶縁膜に含まれる金属不純物が $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 未満であること。

露光装置の場合、

- ・ 6インチ4H-SiCウエハに対する重ね合わせ精度に関して、中心点及び4隅において、バラつき（標準偏差の3倍以内）が65 nm以下であることであること
- ・ 解像度（市販のレジストを用いた標準プロセス）に関して、350 nmのライン&スペースパターンを転写できること。

(9) 高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発

【最終目標】（平成26年度）

接合温度225°C以上で動作するSiCパワー素子の近傍に、新規開発の高耐熱受動部品を配置したパワーモジュールを試作し、各実装部品間の相互の影響を検証する。また、試作したパワーモジュールの耐熱性と電気特性の評価を通して、高温動作における課題を抽出するとともに、その解決の見通しを示す。

ここで、試作するパワーモジュールは耐電圧1200V/50A級とし、開発・搭載する受動部品および部材の仕様は、接合温度225°C以上のパワー素子と統合実装可能であると共に下記の性能を有するものとする。

(スナバコンデンサ) 静電容量0.1 μ F級、耐電圧1kV級、共振周波数10MHz級のコンデンサにおいて、使用時の耐熱温度250°Cであり、 $-40 \sim 250^\circ\text{C}$ の温度領域における静電容量の変動が $\pm 10\%$ 以下、かつ、体積が40 mm^3 以下（例えば、 $5 \times 4 \times 2 \text{ mm}$ ）。

(スナバ抵抗) 抵抗値10 Ω 級、定格電力1W級の抵抗体において、使用時の耐熱温度250°Cであり、 $-40 \sim 250^\circ\text{C}$ の温度領域における抵抗値の変動が $\pm 10\%$ 以下、か

つ、10MHzまでの周波数領域における抵抗値の変動が±10%以下、かつ、体積20mm³以下(例えば、6.3×3.1×1mm)。

(メタライズ放熱基板) 熱伝導率180W/(mK)以上、曲げ強度600MPa以上、破壊靱性6MPa・m^{1/2}以上の絶縁素材を用いた、サイズ5,000mm²以上、厚み1/80インチ(0.32mm)以下で両面に金属プレートが接合されたメタライズ放熱基板において、耐電圧1,200V以上、-40~250℃の温度範囲での耐ヒートサイクルが1,000回以上。

(配線基板) 使用時の耐熱温度250℃であり、当該温度において耐電圧1200V、50A級の電流が通電可能な内部配線を有し、かつ、実装されるパワー素子電極に対する内部配線の位置精度±20μm以下。

(10) 新世代Siパワーデバイス技術開発

【最終目標】(平成28年度)

現状のSiCパワーデバイスと耐圧、電流密度等で同等以上の性能を有する新世代Siパワーデバイスを開発し、トランジスタとしての動作実証を行う。その上で現状のSiパワーデバイスの性能限界を突破する。

研究開発項目② 次世代パワーエレクトロニクス技術開発(グリーンITプロジェクト)

(1) SiCパワーデバイスを用いたデータセンタ用サーバ電源技術開発

【達成目標】(平成24年度)

耐圧:600V以上、電流容量:40A以上、オン抵抗率:2.5mΩcm²以下(室温環境下)のSiCスイッチングデバイスを開発する。また、電力容量が2kW級のサーバ電源のプロトタイプを試作し、その電力変換効率が50%負荷で94%以上であることを実証する。また、Siパワーデバイスで一般的に行われている信頼性試験をSiCパワーデバイスに対しても実施し、Si同等の信頼性を実証する。

(2) SiCパワーデバイスを用いた太陽光発電用パワーコンディショナ技術開発

【達成目標】(平成24年度)

耐圧:1,200V以上、電流容量:75A以上、オン抵抗率:5mΩcm²以下(室温環境下)のSiCスイッチングデバイスを開発する。このSiCスイッチングデバイス技術を用いて、太陽光発電用パワーコンディショナ技術を開発して、電力容量が30kW級の太陽光発電用パワーコンディショナのプロトタイプを試作し、これが定格出力時に98%以上のシステム効率をもつことを実証する。SiCパワーデバイスのスイッチング速度高速化に伴うデバイス設計高度化をあわせて行う。

(3) 次世代SiC電力変換器基盤技術開発

【達成目標】(平成24年度)

次世代パワーデバイスをデバイス温度（※1）200～250℃で動作させることを可能とする高温実装技術を開発する。また、デバイス温度250℃という高温動作デバイス条件を取り入れた高出力パワー密度変換器の統合設計技術の適用により、40W/cm³級の出力パワー密度（※2）を持つ革新的オールSiC電力変換器を製作して、性能の検証を行う。さらに、SiCデバイスの高速・高周波スイッチングで発生する有害なEMIノイズを、ピーク値で、従来比1/6以下（※3、4）に削減する抜本的ノイズ除去技術を開発した後、同技術を前記革新的電力変換器に搭載し、効果の実機検証を行う。

（※1）外部環境温度にデバイス自己発熱による温度上昇分を加えた温度をデバイス温度と定義する。以後に記載されるデバイス温度は全て同定義である。

（※2）出力パワーをSiCパワーデバイス・周辺回路素子・フィルタ・ヒートシンクから成る構成体の総体積により除算したものを出力パワー密度と定義する。

（※3）平成22年度に試作したAll SiCインバータをベースとする。

（※4）ノイズ規格JIS C 4421で規制している150kHz～30MHz周波数帯で、ノイズ実測値に対して同規格カテゴリC3との差分のピーク値を評価する。

研究開発項目③ 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

（1）次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の先導研究

【最終目標】（平成28年度末）

パワーエレクトロニクスを駆使した、独創性や革新性の高い、新しい応用システムに関するコンセプト実証を行う。実証を通じて、考案された応用システムの省エネ効果の有効性や、見込まれる競争力の優位性などを検証し、今後の技術的課題の抽出等を行う。

（2）次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の実用化助成

【中間目標】（平成28年度末）

新材料パワーデバイスを用いたインバータ等の実現に必要な、材料、設計技術、実装技術等を開発する。また、その開発状況を評価することで最終目標達成のための課題を抽出し、解決の技術的見通しを明確にする。

【最終目標】（平成31年度末）

新材料パワーデバイスを用いたインバータ等を開発し、それらを適用した特定用途の応用システムについて試作・動作実証を行う。

4. 実施内容及び進捗（達成）状況

4.1 平成26年度（委託・共同研究）事業内容

研究開発項目① 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト

本プロジェクトは、(1) から (9) について平成23年11月23日付にて独立行政法人産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター長 奥村 元氏をプロジェクトリーダーに委嘱し、以下の研究開発を実施した。

(1) 高品質・大口径SiC結晶成長技術開発／革新的SiC結晶成長技術開発

(1) - 1 - 1 高品質・大口径SiC結晶成長技術開発 (その1)

高品質化のキー技術と位置づけるRAF法ブロック (種結晶) の形成工程において、低 ΔT 成長による応力抑制技術を確立してa面成長を高品質化し、超高品質種結晶を実現した。合わせて、c面成長工程において、RAF種結晶の超高品質化による積層欠陥からのらせん転位変換抑制と、長尺による転位の掃き出しを両立した工程の再現性を高め、長尺c面成長の安定化技術を確立した。これらの技術を総合して、50mmの長尺成長を実施し、そのインゴットから切り出した6インチウエハの結晶性をエッチング法およびX線トポグラフ法で評価して、転位密度 1×10^3 個/cm²以下を実証した。更に、彦根出張所では、大口径シードからの安定成長条件の適正化を行い、6インチインゴットを継続して安定に成長させる量産技術を確立した。

(実施体制：技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構)

(平成26年度で終了)

(1) - 1 - 2 高品質・大口径SiC結晶成長技術開発 (その2)

高品質4インチ結晶からの拡大成長プロセス等により作製した6インチ成長用高品質種結晶を用いて6インチ結晶を成長させ、次にその成長結晶を種とするという結晶継承を継続することでBPDの低減化を中心とした低転位密度化を推進した。合わせて、成長条件の微調整により結晶成長の安定化を実現した。これらの技術を総合して成長速度0.5mm/h以上で作製した第二世代結晶について、ウエハ化加工を行い作製した鏡面研磨ウエハをエッチング法で評価して、転位密度 5×10^3 cm⁻²以下を確認し、最終目標を達成した。

(実施体制：新日鐵住金株式会社)

(平成26年度で終了)

(1) - 2 - 1 革新的SiC結晶成長技術開発 (ガス法)

ガス法では、平成25年度までに確立した高速性、高品質性、長尺化／口径拡大等の各課題に対する要素技術を統合し、口径2インチ、厚さcm級の4H-SiC単結晶を実現した技術を更に高度化するとともに、転位密度等の結晶学的特性の評価を実施した。昇華法を凌駕する1mm/h級の高速成長、および長尺成長が安定的にできるように成長条件を最適化し、昇華法に対する優位性を実証した。

(1) - 2 - 2 革新的SiC結晶成長技術開発（溶液法）

平成25年度に見出した、成長界面モフォロジーの荒れを防ぎ、安定成長を実現するAl添加Si-Cr溶媒を用いた結晶成長の適正化を行い、 $\phi 50 \times 21.5$ mmのSiCバルク単結晶成長を達成した。更に、溶媒から供給されるAlと気相から供給するNの比率を制御することにより、p/n伝導型の制御が可能であることを示した。この方法で成長させたp型結晶は、昇華法では不可能であった $35 \text{ m}\Omega\text{cm}$ の超低抵抗率を達成した。また、n型の超低抵抗率実現にはNの増加とともにAl添加量の低減が求められるが、これに対しては、東北大学と共同で、コンビナトリアル法を用いて、各種添加元素が、SiC成長時のステップ形成へ与える影響を観察・評価することにより、Sn、Vを添加することでAlと同様の安定な成長界面が得られることを明らかにし、n型低抵抗率結晶を実現した。

品質面の優位性としては、溶液法で $\phi 50$ mmから $\phi 70$ mmへ拡大成長を行った場合、拡大成長部では転位がゼロになることを示した。その拡大成長部を種とした結晶成長を行い、成長結晶中にはデバイス特性に有害なTSDが存在しないことを示した。

更に、従来、炭素供給源としての坩堝の消費が、長尺成長の制限因子になっていたことに対し、育成中の雰囲気メタンガスにメタンガスを混合することで、雰囲気ガスからのカーボン供給を行う技術の開発を行い、炭素供給源としての坩堝消費量の抑制と成長速度の高速化が可能であることを示した。また、高圧下の成長でSi溶液の蒸散を抑え成長温度を高温にすることにより、成長速度の増加と4H安定が得られることを示した。

デバイス適用を想定して、基板中に取り込まれたCr等の溶媒成分のエピ層への影響評価を行い、エピ膜中に溶媒成分であるCrは、SIMSで見て存在しないこと、およびエピ膜中に作製したPNダイオードに特別な異常はなかったことを示した。

以上により最終目標を達成した。

（実施体制：技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構）

（平成26年度で終了）

(2) 大口径SiCウエハ加工技術開発

平成25年度より開始した6インチのSiCインゴットの切断、ウエハの研削、粗研磨、仕上げ研磨の加工技術開発を基に一貫加工工程を構築し、実証試験で高速・高品質加工を実証した。構築した一貫工程は、 B_4C 両面ラップ→高剛性鏡面研削（粗・仕上げ）→CMPである。切断技術に関しては、6インチ結晶で $300 \mu\text{m}/\text{分}$ の高速切断と $250 \mu\text{m}$ の低カーブロスを実現するとともに、 $60 \mu\text{m}$ の低SORI値と低加工変質層（ $1 \mu\text{m}$ ）の両立を実現した。CMPに関しては、加工条件の最適化で従来法の2～5倍の加工レートを有する高速CMPを開発し、高速CMP+無潜傷CMPの2段階プロセスで～20倍の高速化を実現した。この一貫工程で実際の6インチ結晶を加工し、トータル加工時間9.7時間、TTV= $1.5 \mu\text{m}$ 、SORI= $11 \mu\text{m}$ 、潜傷フリー、ウエハ面仕上げ精度Rms（表面粗さ） $0.1 \text{ nm}@2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ を実現した。

このプロジェクト製ウエハに(3)-1「SiCエピタキシャル膜成長技術-大口径対応技術」のエピ成長を実施して、エピウエハ製造技術としての実用性を検証した。その結果、加工起因の潜傷が無いこと、およびエッチピット評価法で、界面転位の発生が無いことを確認した。市販6インチ基板に同一条件でエピ成長した場合、加工起因の表面モフォロジー悪化(バンチング)と界面転位が現れたことと比べ、プロジェクト加工基板の高品質性を実証した。

中部大学との共同実施では、新規開発した装置機能・加工法を集中研技術と融合することにより、放電中のワイヤー断線防止と切断ウエハの形状改善を実現し、量産技術としての可能性を検証した。阪大との共同実施では、触媒基準エッチング法平坦化技術を6インチへ展開し、全面潜傷フリー化とともに加工レートの口径依存性が無い技術であることを実証した。

以上により、最終目標を達成した。

(実施体制：技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構)

(平成26年度で終了)

(3) SiCエピタキシャル膜成長技術(大口径対応技術/高速・厚膜成長技術)

(3)-1 大口径対応技術

平成25年度までに明らかにした成長条件設定のガイドラインと蓄積データ、装置構造要因から抽出した濃度均一性改善策、新たに導入・確立したシミュレーション手法を総合して、成長速度等パラメータ相互のトレードオフ関係を把握し成長条件を高度化して最終目標を達成した。シミュレーション手法では、SiC-CVD反応モデルを用いて原料ガスの分解成分からC/Si比を求める方法を開発した。また、大口径化に対する低オフ角ウエハの可能性を2°オフ角基板とオフ角1°以下の微傾斜基板を用いて、実験的に実証した。

SICAで観察されるシャローピットの電気特性への影響調査では、評価グループと連携して、C/Si比を変えてシャローピット密度の異なるエピ膜を作製、テストデバイスとしてSBDを試作・評価して、順方向、逆方向特性ともに影響が出ないことを確認した。更に、6インチで顕在化した界面転位の問題に対し、ウエハ面内の温度分布差に起因することを明確にし、低減の目安($\Delta T \leq 4.5^\circ\text{C}$)を提示した。

以上により、最終目標を達成した。

(3)-2 高速・厚膜成長技術

導入した4インチ高速成長装置を用いて平成25年度までに実現した100 $\mu\text{m/h}$ 以上の高速成長と低残留キャリア濃度を維持しながら、均一性と表面欠陥密度の目標達成に取り組んだ。内外二重管構造のガス導入管を用いて原料ガス配合比の他に、噴射方向の制御を追加して制御性を向上させることで、最終目標値を達成した。当該エピ膜の膜質は、平坦度RMS $\sim 0.1\text{nm}$ 、GD-MSで見て金属汚染無し、PLマッピングでポリタ

イプ、積層欠陥の顕著な発生無し、キャリアライフタイムに影響する $Z_{1/2}$ 、 $EH_{1/6}$ の深い準位は通常エピ同等以下、またショットキー接合特性に異常は見られないことを確認し、良好な膜質であることを検証した。

以上により、最終目標を達成した。

(実施体制：技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構)

(平成26年度で終了)

(4) SiC高耐压スイッチングデバイス製造技術

(4) - 1 新規耐压構造デバイス技術

平成25年度高度化したトレンチ型SiC-MOSFETを作成するための要素プロセス技術(トレンチ形成技術、トレンチゲート酸化膜形成技術等)を駆使し、更には電界緩和構造やCSLの最適化で酸化膜電界強度低減と特性オン抵抗低減を両立させることで、耐压3.7kV、特性オン抵抗 $8.3\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ のトレンチ型SiC-MOSFETを実現し、最終目標を達成した。

SJ構造では、マルチエピタキシャル法によるSJ構造検証用TEGを試作し、3段SJ構造により理論限界を超える耐压向上効果($>2.0\text{ kV}$)を実験的に示すことに成功した。パワーデバイス関係の権威ある国際学会であるISPSD2014においてBest Paper Awardを受賞した。トレンチ埋込エピ法では、HClを導入する事で $L/S=1\mu\text{m}/1\mu\text{m}$ の微細トレンチパターンをボイドレスで埋込むエピ成長技術を開発し、SJ構造を形成するためのタクトタイムを短縮する技術選択肢としての可能性を示した。

以上により、最終目標を達成した。

(4) - 2 高耐压大容量デバイス/変換器技術

大面積の 3.3 kV MOSFETの更なる性能向上に取組み、JFETドープによる低抵抗化と終端領域の縮小による有効面積の拡大により、大容量低抵抗(80 A 、抵抗 $23\text{ m}\Omega$)のMOSFETを実現した。この技術を用いて製造した大容量SiC-MOSFET、SiC-SBDをインバータに組み込み、動作試験を実施して、同等耐压レンジのSi-IGBTのパワーモジュールに対し55%の損失低減を実証し最終目標を達成した。インバータとして65%の体積質量低減を実現するとともに、鉄道車両として30%の損失低減が可能となった。

以上により、最終目標を達成した。

(実施体制：技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構)

(平成26年度で終了)

(6) 大口径SiCウエハ加工要素プロセス検証

(平成23年度で終了)

(実施体制：技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構)

(7) SiC高耐圧大容量パワーモジュール検証

(平成23年度で終了)

(実施体制：技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構)

(9) 高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発

部品開発側（FCRA）と実装開発側（FUPET）との密接な連携のもとで技術開発を推進した。

平成25年度に実施した実装技術開発の結果を踏まえ、耐電圧特性や容量、耐熱性などの最終目標性能を満足する最終レベル部品を、部品開発側から実装開発側に提供した。また、当該高耐熱部品に関して、新たに薄膜基板の破壊強度試験法に関する調査検討を追加した。

実装開発側では、平成25年度に行った構造的、機能的両面からのモジュール化技術開発成果に基づいて1200V/50A級SiCパワーモジュールを試作し、接合温度225℃における動作を達成するとともに、高温動作時のモジュールの耐熱性と電気特性の詳細評価として、通電条件・冷却風速を変えた時の各部の温度上昇測定値と設計値との差異の調査分析、スナバ回路による過電圧抑制の確認、高速動作性能の確認と誤点弧改善策の検討、実用に近い状態でのノイズ影響評価等を実施した。これらの評価を通して組合せ耐久性の改善、組立時の温度等の影響軽減の観点からプロセス条件、材料の改善策を取り纏めた。

以上により、最終目標を達成した。

(実施体制：ファインセラミックス技術研究組合、技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構)

(平成26年度で終了)

(10) 新世代Siパワーデバイス技術開発

(平成26年度進捗状況)

平成27年度より試作する新世代Siパワーデバイスのスケーリング構造検証専用プロセス装置の導入を進めるとともに、そのデバイス構造についてシミュレーションによる検証確認および既存装置による高耐圧Pinダイオードを試作し、評価を行った。また、ゲート駆動回路の基本設計を完了し、評価を開始するとともに、低ノイズ化に向けたノイズモデルの構築を行った。

(実施体制：国立大学法人東京大学、国立大学法人東京工業大学)

研究開発項目② 次世代パワーエレクトロニクス技術開発（グリーンITプロジェクト）

(平成24年度で終了)

4. 2 平成26年度(助成)事業内容

研究開発項目① 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト
(平成23年度で終了)

研究開発項目③ 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

(2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の実用化助成

平成27年1月13日付にて国立大学法人千葉大学大学院工学研究科教授 佐藤之彦氏
をプロジェクトリーダーに委嘱し、以下の研究開発を実施した。

新材料パワーデバイスを用いたインバータの実現に必要な材料、設計技術、実装技術の
開発に向けて、主要研究開発装置の仕様検討と導入を行い、研究開発環境を整備した。

(実施体制：富士電機株式会社、株式会社デンソー、三菱電機株式会社、三菱マテリア
ル株式会社、電気化学工業株式会社、日本ファインセラミックス株式会社、DOWA
エレクトロニクス株式会社)

4. 3 実績推移

実績額推移	21年度	22年度		23年度		24年度	25年度
	委託	委託	助成	委託	助成	委託・共同研究	委託・共同研究
①一般勘定（百万円）	－	0（NEDO） 2,000 （経済産業省）	－	1,391	－	2,170	－
②需給勘定（百万円）	976	638	－	294	－	255	2,022
平成22年度 補正予算額 （一般勘定）	－	515	2,050	－	－	－	－
特許出願件数（件）	2	0	0	19	18	27	16
論文発表数（報）	4	7	0	12	0	25	44
フォーラム等（件）	19	42	0	86	4	103	89

実績額推移	26年度	
	委託・共同研究	助成
①一般勘定（百万円）	－	－
②需給勘定（百万円）	2,780	1,720
特許出願件数（件）	33	0
論文発表数（報）	43	0
フォーラム等（件）	95	0

5. 事業内容

平成27年度は以下の研究開発を行う。また、本事業の運営等に活用するため必要に応じて調査を行う。

5. 1 平成27年度（委託・共同研究）事業内容

研究開発項目① 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト

(1) 高品質・大口径SiC結晶成長技術開発／革新的SiC結晶成長技術開発
(平成26年度で終了)

(2) 大口径SiCウエハ加工技術開発
(平成26年度で終了)

(3) SiCエピタキシャル膜成長技術（大口径対応技術／高速・厚膜成長技術）

(平成26年度で終了)

(4) SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術
(平成26年度で終了)

(6) 大口径SiCウエハ加工要素プロセス検証
(平成23年度で終了)

(7) SiC高耐圧大容量パワーモジュール検証
(平成23年度で終了)

(9) 高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発
(平成26年度で終了)

(10) 新世代Siパワーデバイス技術開発

新世代Siパワーデバイスを開発するための、低欠陥ウエハ技術、スケーリング技術、3次元化等の新構造化技術等の要素技術開発と実証を進める。

デバイスの開発では、平成26年度に開発した高耐圧Pinダイオードをさらに改善し、耐圧3kV級を目指す。また、スケーリング構造検証専用プロセス設備によるMOSデバイス、IGBTデバイスを試作し、従来のSi-IGBTを超える性能を目標とする。

ゲート駆動回路の開発では、平成26年度に構築したノイズモデルの妥当性実証評価を行い、ノイズモデルを完成させ、従来の3倍のノイズ耐性の実現性をシミュレーションで示す。また、IGBT性能アップによる短絡事故時電力の増加に対応し1 μ s以内に機能する短絡保護回路を設計・実証する。さらに、IGBTの微細化に伴うゲート駆動電圧の低減に対応した、低電圧駆動ゲートドライブICチップの設計し、シミュレーションによる検証を行う。

(実施体制：国立大学法人東京大学、国立大学法人東京工業大学)

研究開発項目② 次世代パワーエレクトロニクス技術開発（グリーンITプロジェクト）
(平成24年度で終了)

研究開発項目③ 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

(1) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の先導研究

国立大学法人千葉大学大学院工学研究科教授 佐藤之彦氏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。

平成27年度は、研究開発項目③(1)における公募・採択を行い、実施体制を決定すると共に、新材料パワーデバイスを用いた革新的な応用システムを考案し、その要求に応

じるための先導研究を開始する。

5. 2 平成27年度(助成)事業内容

研究開発項目① 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト

- (5) SiCウエハ量産化技術開発
- (8) 大口径対応デバイスプロセス装置開発
(平成23年度で終了)

研究開発項目③ 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

- (2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の実用化助成
国立大学法人千葉大学大学院工学研究科教授 佐藤之彦氏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。

平成27年度は、新材料パワーデバイスを用いたインバータ等の実現に必要な材料、設計技術、実装技術等の開発に向けた要素技術の研究開発に取り組む。

5. 3 実施体制

別紙を参照のこと

5. 4 平成27年度事業規模

	委託・共同研究事業	助成事業
需給勘定	800百万円(継続) 100百万円(新規)	1,800百万円(継続)

事業規模については、変動があり得る。

6. 事業の実施方式

研究開発項目③(1)について公募を行う。

6. 1 公募

(1) 掲載する媒体

「NEDOホームページ」及び「e-Radポータルサイト」で行う。

(2) 公募開始前の事前周知

公募開始の1ヶ月前にNEDOホームページで行う。本事業は、e-Rad対象事業であり、e-Rad参加の案内も併せて行う。

(3) 公募時期・公募回数

平成27年3月に1回行う。

(4) 公募期間

原則30日間とする。

(5) 公募説明会

関東で開催する。

6. 2 採択方法

(1) 審査方法

e-Rad システムへの応募基本情報の登録は必須とする。

委託事業者の選定・審査は、公募要領に合致する応募を対象に NEDO が設置する審査委員会（外部有識者で構成）で行う。審査委員会（非公開）は、提案書の内容について外部専門家（学識経験者、産業界の経験者等）を活用して行う評価（技術評価及び事業化評価）の結果を参考とし、本事業の目的の達成に有効と認められる委託事業者を選定した後、NEDOはその結果を踏まえて委託事業者を決定する。

申請者に対して、必要に応じてヒアリング等を実施する。

審査委員会は非公開のため、審査経過に関する問合せには応じない。

(2) 公募締切から採択決定までの審査等の期間

原則45日間以内とする。

(3) 採択結果の通知

採択結果については、NEDOから申請者に通知する。なお不採択の場合は、その明確な理由を添えて通知する。

(4) 採択結果の公表

採択案件については、提案者の名称、研究開発テーマの名称・概要を公表する。

7. その他重要事項

7. 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は、経済産業省と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的、および、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。

7. 2 複数年度契約の実施

研究開発項目①（10）の委託事業については平成26～28年度の複数年度契約を行う。

研究開発項目③（1）の委託事業については平成27～28年度の複数年度契約を行う。

研究開発項目③（2）の助成事業については平成26～28年度の複数年度交付決定を行う。

7. 3 知財マネジメントにかかる運用

「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従ってプロジェクトを運用する。（研究開発項目①（10）及び研究開発項目③のみ）

8. スケジュール

8. 1 本年度のスケジュール

平成27年3月下旬・・・公募開始

3月下旬・・・公募説明会

4月下旬・・・公募締切

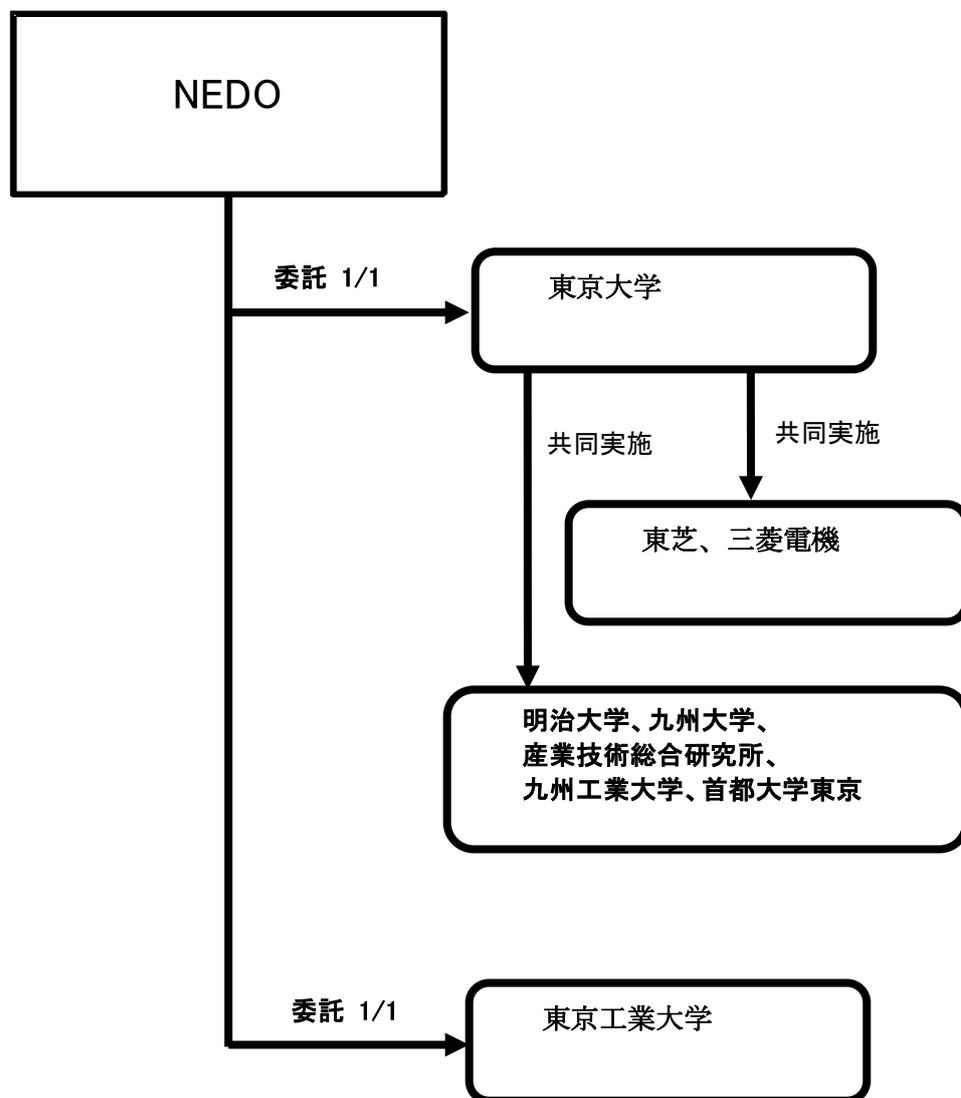
6月上旬・・・契約・助成審査委員会

6月中旬・・・採択決定

9. 実施方針の改訂履歴

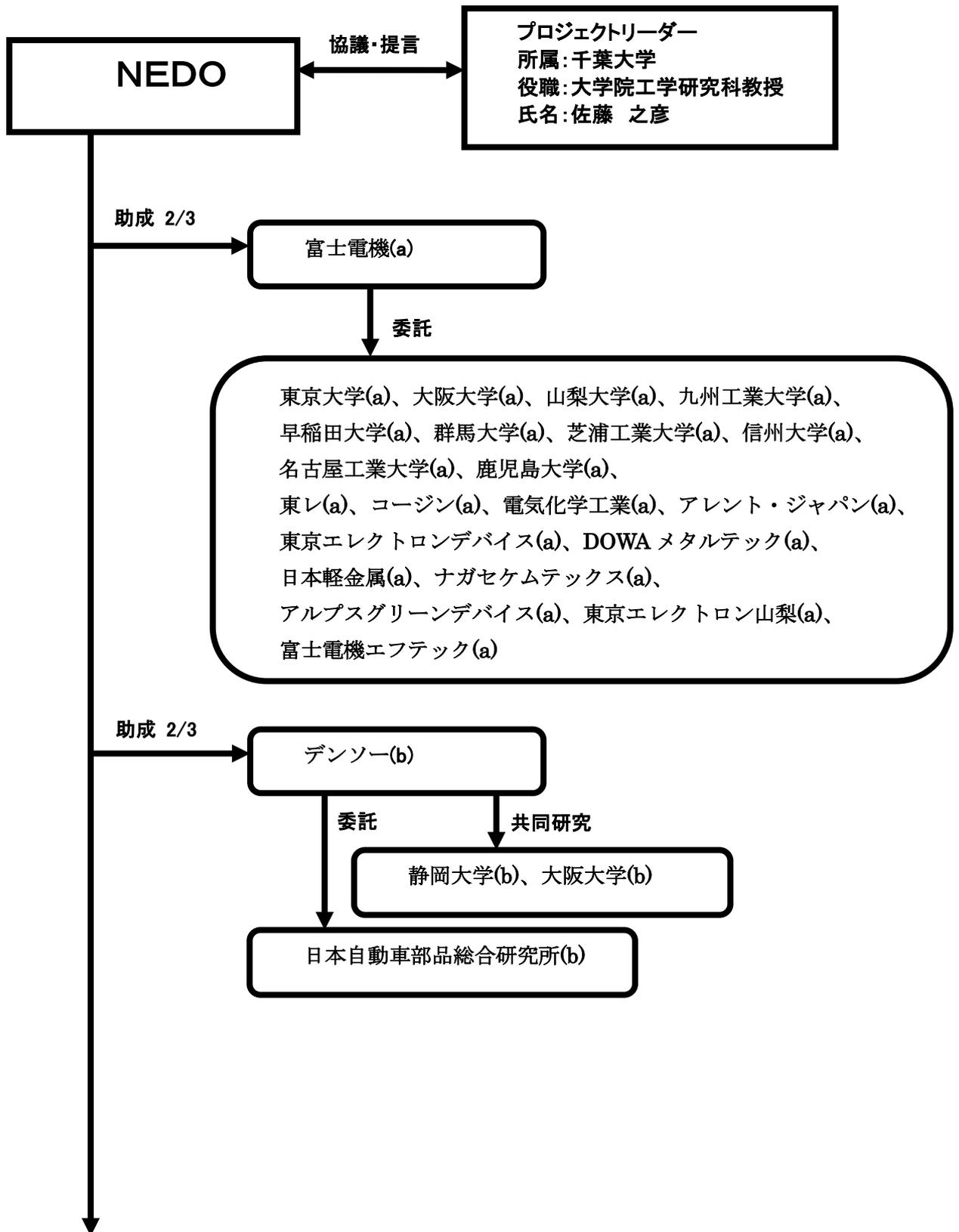
（1）平成27年2月、制定。

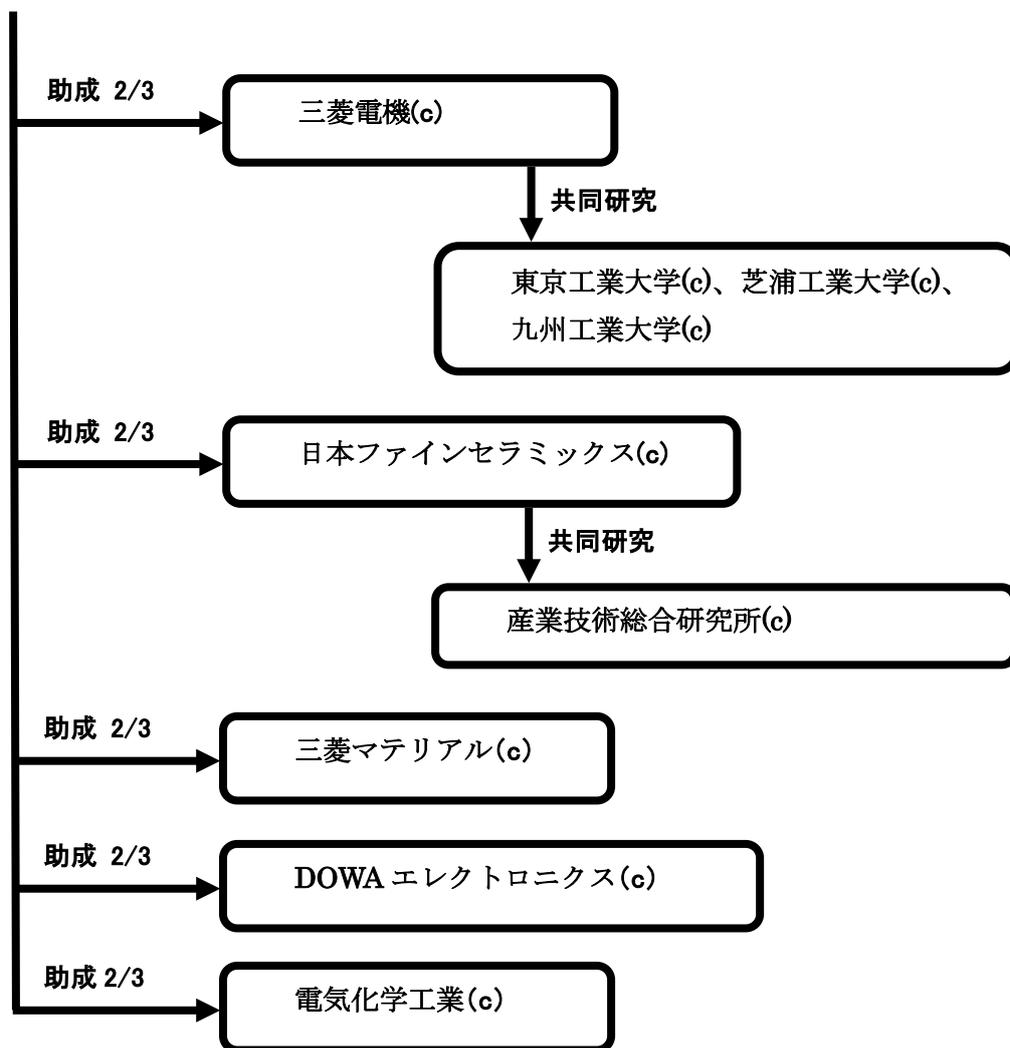
(別紙) 事業実施体制の全体図
研究開発項目①低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト
(10) 新世代 Si パワーデバイス技術開発



研究開発項目③次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

(2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の実用化助成





研究開発テーマ名

(a): 世界のパワエレを牽引する次世代パワーモジュール研究開発と日本型エコシステムの構築

(b): SiCパワーデバイスを用いた超高効率車載電動システムの開発

(c): 高出力密度・高耐圧SiCパワーモジュールの開発