

## 平成23年度実施方針

電子・材料・ナノテクノロジー部

1. 件名                                 プログラム名 ナノテク・部材イノベーションプログラム、  
  I T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)  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、第15条第1項第2号および第15条第1項第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、課題解決の有力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、I T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S i（シリコン）が使用されているが、電力損失がS iの1/100以下、数k V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S i C（炭化珪素）の実用化が期待されている。S i Cパワー半導体デバイスを用いることにより、従来のS i 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、S i C ウェハ品質と関連づけたS i C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」2006年～2008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S i C ウェ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、S i 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S i - I G B T 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。

I T 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S i C 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、S i C 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、S i C 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、S i C 半導体材料の高品質化と供給安定化であるが、現在のS i C ウェハ市場は、4インチウェ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インチウェハ実現がアナウンスされ、かつ、高耐圧領域でのS i C 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S i C ウェ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S i C 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。S i C 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I T 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ェ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。

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、電力分野における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、本研究開発プロジェクトをナノテク・部材イノベーションプログラム、I T 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、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]

- (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]

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]

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/cm<sup>2</sup>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  $1 \times 10^3$ 個/cm<sup>2</sup>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  $5 \times 10^3$ 個/cm<sup>2</sup>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-S i C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S i C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150 $\mu\text{m}/\text{分}$ 以上、同時切断枚数10枚以上、切り代300 $\mu\text{m}$ 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300 $\mu\text{m}/\text{分}$ 以上、同時切断枚数10枚以上、切り代250 $\mu\text{m}$ 以下
- ②インゴットから表面仕上げ精度Rms（表面荒さ）0.1nm@2 $\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 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 $\pm 10\%$ 、ドーピング濃度 $\pm 20\%$
- ・品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：2個/ $\text{cm}^2$ 以下

②高速・厚膜成長技術

口径2インチ、膜厚50 $\mu\text{m}$ 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/ $\text{cm}^2$ 以下

【最終目標】（平成26年度）

①大口径対応技術

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/ $\text{cm}^2$ 以下

②高速・厚膜成長技術

成長速度100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上で作成した口径4インチ、膜厚50 $\mu\text{m}$ 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/ $\text{cm}^2$ 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： $15\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 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 $80\text{m}\Omega$ 以下(室温環境下)、定格出力電流密度 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 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圧の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」

【達成目標】(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 $1\times 10^4$ 個/ $\text{cm}^2$ 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 $0.25\text{mm}/\text{h}$ 以上で転位密度 $5\times 10^4$ 個/ $\text{cm}^2$ 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」

【達成目標】(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ーソーにおいて、SiC6インチインゴットに対して $150\mu\text{m}/\text{分}$ 以上の高速切断が可能になる最大ワイヤー速度：約 $4000\text{m}/\text{min}$ 、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高耐圧大容量パワーモジュール検証」

【達成目標】（平成23年度）

耐圧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SiCFET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」

【達成目標】（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：200μA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：±30°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<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>Oガス処理が可能なこと。
- ・温度均一性：6インチ面内：±15°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1×10<sup>11</sup>cm<sup>-2</sup>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65nm以下であることであること
- ・解像度（市販のレジストをもちいた標準プロセス）に関して、350nmのライン&スペースパターンを転写できること。

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： $2.5\text{ m}\Omega\text{ cm}^2$ 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：1200V以上、電流容量：75A以上、オン抵抗率： $5\text{ m}\Omega\text{ cm}^2$ 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(注1)200~250°C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°C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、 $40\text{ W}/\text{cm}^3$ 級の出力パワー密度(注2)を持つ革新的電力変換器の動作検証が可能なレベルの要素技術を確立する。

(注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。

(注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。

#### 4. 実施内容及び進捗(達成)状況

##### 4.1 平成22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22年度進捗状況)

(1) -1-1 高品質・大口径SiC結晶成長技術開発(その1)

RAF法(Repeated a-face process)による大口径化の課題抽出を行い、安定した継ぎ足し結晶成長条件を把握した。また、装置集結及び新型RAF成長炉導入を完了した。低抵抗化

技術開発として高濃度不純物ドーピングに向けた大口径対応昇華法成長装置開発を行った。

(1) - 1 - 2 高品質・大口径S i C結晶成長技術開発(その2)

6インチ成長炉などの単結晶一貫製造に必要な設備の立上げを完了した。また、目標とする低欠陥密度の実現に向けて貫通刃状転位(T E D)・基底面転位(B P D)・貫通らせん転位(T S D)などの各種欠陥の挙動を分析し、低減に向けた手がかりを得た。

(1) - 2 - 1 革新的S i C結晶成長技術開発(ガス法)

目標達成に向け、新ルツボ構造、膜厚モニタリング機構などの対応策を盛り込める結晶成長用プロトタイプ装置が完成した。また、高速・高品質化の実証に関しては、原料ガス条件による成長速度、品質への影響評価を開始した。

(1) - 2 - 2 革新的S i C結晶成長技術開発(溶液法)

炉内温度分布などデータの検証実験とシミュレーションを進めた。溶液法で課題となるガス巻き込みによるポイド欠陥を抑制する新たな技術を見出し、ポイド欠陥のないΦ20mm、0.25mm厚の4H-S i C結晶成長に成功した。4H-S i Cが安定成長する溶液組成検討の基礎実験の結果、次年度の組成最適化実験につながる知見を得、結晶多形の選択成長や転位・欠陥消滅に関する知見を得た。

(2)「大口径S i Cウエハ加工技術開発」

(平成22年度進捗状況)

拠点整備を行い、大口径対応の各種結晶切断装置(マルチワイヤソー、マルチ放電加工装置)、ウエハ研磨装置を導入した。

研削・研磨の研究開発では、研削実験において基礎データを蓄積してS i Cの高速加工に関する見通しを得た。また、放電加工のプラズマ解析・触媒エッチング法・表面研磨層のダメージ評価法の開発において、各々基礎検討を行い、課題の抽出とその解決に向けた対策の立案を行った。

(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)」

(平成22年度進捗状況)

(3) - 1 大口径対応技術

大口径ウエハ処理実験に向け、3 x 6インチCVD装置を導入した。また、課題抽出のためシミュレーションを立ち上げ、既存装置の膜厚分布を再現できることを確認した。S i面微傾斜エピ成長において従来の2インチの成果を3インチに拡大した実験を行い、ステップバンチングを抑制したエピ表面が3インチ全面で得られた。

(3) - 2 高速・厚膜成長技術

高速成長時の膜質の劣化要因を特定し、解決の手がかりを得た。さらに、厚膜成長においても、高速成膜による膜質の劣化が見られない条件を見出した。

(4)「S i C高耐圧スイッチングデバイス製造技術」

(平成22年度進捗状況)

(4) - 1 新規耐圧構造デバイス技術

プレーナ型MOSFETの最適化による目標達成の条件を明らかにした。そのために必要



なC面低濃度エピタキシャル成長技術の成長条件を検討した。

トレンチMOSFETでは、ダブルトレンチ構造の最適化設計とトレンチ形成要素技術の検討の結果、耐圧1200Vで特性オン抵抗 $1.5\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ が達成可能である事が明らかになり、またオン抵抗低減と酸化膜中の電界強度低減に不可欠な微細トレンチ構造の形成に成功した。SJ構造により3.3kVを超える耐圧実現の道筋を得た。トレンチ埋込法を検討し、条件最適化によって深さ $5\mu\text{m}$ のトレンチ埋込エピタキシャル成長に成功した。

#### (4) - 2 高耐圧大容量デバイス/変換器技術

耐圧終端構造の設計を行い、3.3kVの耐圧を確保できる耐圧終端構造を得た。また、高耐圧大容量化に対する課題抽出にむけ、高耐圧デバイスの評価装置の構築を開始した。

#### (6) 「大口径SiCウエハ加工要素プロセス検証」

(平成22年度進捗状況)

加工要素プロセス検証に向けた準備として実施体制を構築した。

#### (7) 「SiC高耐圧大容量パワーモジュール検証」

(平成22年度進捗状況)

高耐圧大容量パワーモジュール検証に向けた準備として実施体制を構築した。

### 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

(平成21年度進捗状況)

##### (1) - 1 SiC接合FETおよびショットキーダイオードの開発

((1) - 1 - 1 600V/20A接合FETの開発、及び

(1) - 1 - 2 600V/20Aショットキーダイオード)

耐圧600V・電流10Aチップ2素子の並列にて20Aとした接合FETとショットキーダイオード、および単一チップで耐圧600V・20Aとした接合FETとショットキーダイオードを開発した。前者の2素子並列素子において、接合FETのオン抵抗率が $3.5\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下であることを実証し、またショットキーダイオードは後者の単一チップで20A・オン電圧2.0V以下を達成した。また、層間絶縁膜に適用する酸化装置を導入し、立上げた。

接合FETの大電流化のためチップ面積を大きくするとゲート抵抗が大きくなる問題に注目して、その影響を検討した。デバイス内部のゲート電圧は、ゲート抵抗とゲート電流の積で決まる電圧分、外部からゲート電圧として印加された値より低下する。今回の試作により、大容量化すると、入力ゲート電圧と内部ゲート電圧の差が顕著となることが明らかとなった。またその結果、オン電流が低下することをシミュレーションにて確認した。

#### (1) - 2 サーバ用回路・電源システム技術の開発

##### (1) - 2 - 1 高速駆動回路技術開発

耐圧600V・電流10A用接合FETを7個並列接続した基板と、ターンオン時間100ns以下、ターンオフ時間100ns以下を実現する高速スイッチングゲート駆動回路と

を用いて、最大100Aにて、ターンオンは86ns、ターンオフは51nsと、目標を凌駕する動作を実証した。

#### (1) - 2 - 2 サーバ電源システムの開発

SiC-接合FETは閾値電圧が低いことから、 $dv/dt$ により誤動作が発生しやすいことが想像される。そこで、誤オン、誤オフの要因を洗い出し、対策方針を立てた。

サーバ用電源の効率評価に向けては、電源回路を評価するための測定装置一式と電源、負荷装置を購入した。平成21年度は負荷にインダクタンスを用いた評価装置の立上げが完了した。

#### (平成22年度進捗状況)

#### (1) - 1 SiC接合FETおよびショットキーダイオードの開発

##### ((1) - 1 - 1 600V/20A接合FETの開発、及び

##### (1) - 1 - 2 600V/20Aショットキーダイオード)

耐圧600V・電流20Aの接合FETとショットキーダイオード、および耐圧600V・40Aのショットキーダイオードを開発した。電流20Aの接合FETにおいて、接合FETのオン抵抗率が $2.5\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ であることを実証し、またショットキーダイオードは40A・オン電圧2.0V以下を達成した。具体的な開発内容は以下の通り。

前年度の開発で明らかとなった接合FETのゲート電圧低下の対策として、新たなゲートの配線レイアウトを考案し、電圧低下を10Aの接合FETと同程度にまで改善した。また、前年度に立ちあげた酸化装置で層間絶縁膜を形成することにより、ゲート・ソース間のpn接合に流れる順方向のゲート・ソース間電圧2.5Vにおけるリーク電流を、約1桁低減した。また、ノーマリオフ動作に際して接合FETで問題となっている低閾値電圧を改善するため、ゲートへのSiダイオード接続により、閾値電圧を3.5Vに調整可能であることを実証した。

さらに、信頼性の一次評価として、試作した接合FETやダイオードのブロッキング試験や通電試験を行い、問題がないことを確認した。

#### (1) - 2 サーバ用回路・電源システム技術の開発

##### (1) - 2 - 1 高速駆動回路技術開発

20A級のSiC-接合FETの電流・電圧特性、ゲート容量特性などの基本特性の取得を完了し、帰還容量の大きいSiC-接合FETをPFC回路に適用した場合の回路の高効率化の検討を開始した。また、SiC-接合FETを2並列にして、スイッチング試験を開始した。

##### (1) - 2 - 2 サーバ電源システムの開発

平成21年度に導入した電源の効率評価装置を活用し、サーバ用電源として多く用いられている750W電源の効率評価を実施し、効率評価環境を立ち上げた。

(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)

#### (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

(平成21年度進捗状況)

デバイス開発においては、イオン注入機のステージなどの設備を導入する等、3インチSiCウエハを用いたプロセスを構築した。また、大電流デバイスのオンウエハ評価、連続通電評価などのデバイス評価が可能な設備を導入し、評価環境の整備を行なった。また、3Dシミュレーションソフトウェアを導入し、SiCパワーデバイスのデバイス設計高度化の準備を行なった。

回路・システム開発においては、期初目標に掲げた低インダクタンス構造と高速ゲート駆動回路を用いてSiC素子を用いたモジュールを試作してスイッチング動作試験を実施し、基礎特性データを取得した。また、取得したデータを用いて複数の主回路方式を比較検討した結果、2レベル主回路構造の太陽光発電用パワーコンディショナで目標達成の見通しを得た。また、デッドタイム1 $\mu$ sec以下のスイッチングが可能なゲート駆動回路を用いて、キャリア周波数50kHzでのインバータ動作を確認した。

(平成22年度進捗状況)

デバイス開発においては、MOSFETの低オン抵抗化に向けた開発を実施した。具体的には、MOS界面特性の向上のためゲート酸化膜形成時の窒化プロセスの高度化及び3Dシミュレーションの活用によるデバイス構造の最適化を行い、低オン抵抗化を検証するためのTEG評価を行った。

回路・システム開発においては、フィルタの最適設計手法開発として、各種のコア材、巻き線形状でのフィルタの損失特性、周波数特性の精密評価を実施し、平成22年度試作評価予定のミニモデル向けフィルタを試作した。平成21年度に実施した主回路方式による損失推定に、前記評価検討において得られたフィルタの損失データを適用し、変換器とフィルタを含めた総合損失推定の精度を向上させた。

また、太陽光発電用パワーコンディショナの高効率を実現する主回路方式の最適化設計を行い、数kW級の太陽光発電用パワーコンディショナのミニモデルを設計試作し静特性および動特性を評価した。

以上の結果より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の定格運転時の効率が98%以上となる見通しを得た。

(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)

(3) 次世代SiC 電力変換器基盤技術開発

(平成21年度進捗状況)

デバイス開発においては、新規犠牲酸化炉導入等の素子化プロセス設備整備を行った。UMOS構造におけるチャネル移動度と閾値電圧の角度依存性を調べて最適角度を検討し、実際にデバイス構造を試作して順方向特性を測定した。高温での破壊耐量測定等の評価環境を整えると共に、アンモニア熱処理でゲート酸化膜の界面準位密度が低減することを明らかにした。

ウエハ評価研究においては、大口径化に向けての一課題であるウエハの歪みと、切断時の反りなどの関係を検討した。また、転位密度計測法の開発では、光学顕微鏡を用いてエッチ

ピットの自動分類・計数を行うソフトウェアのアルファ版を開発した。また、エピ膜表面で特に問題となる三角欠陥について、より正確な構造評価と、より詳細な分類を行い、発生原因を考察した。さらに、SiCウエハに意図的に金属などをイオン注入・アニールして分析をおこない、個々の不純物元素の効果を検出した。

高温実装技術開発においては、高温課通電試験・高温ダイシェアテスト等の装置準備、実装シミュレーション環境整備、各種部材の物性値の温度特性調査、電極接合の評価・検討を行い、AuGe高温ハンダの高温強度評価などの開発を進めた。また、TaN膜によるAl電極のエレクトロマイグレーション耐性の向上技術、配線基板の表面処理により330℃保持条件下での接合強度低下を抑制する技術等を開発した。一方、高温用高密度電力変換器技術においては、高温での素子の動作特性評価、直流リンクコンデンサの削減、素子温度と出力パワー密度の関係等を回路・制御の両面から検討を進め、10kW試作器の設計（設計値：素子温度約200℃、出力パワー密度約20W/cm<sup>3</sup>）に反映するとともに、統合設計技術への高温動作条件の導入を開始した。

（平成22年度進捗状況）

200～250℃の素子温度を想定した高温実装技術開発においては、AuGe高温ハンダによる電極接合の高温環境下における信頼性の評価を進め、電極接合の劣化機構を明らかにし、その抑制に大きな効果を持つプロセスを開発した。並行して、高温実装のシミュレーション技術の開発を進め、ハンダ領域の熱応力分布を分析した。

高温高出力パワー密度電力変換器の設計・製作技術開発においては、SiC素子の高速スイッチング動作における課題である過渡的な高電圧スパイク発生メカニズムを解明し、その解析モデルを提案した。

定格400V/出力10kWオールSiC空冷3相インバータ（1次試作）を製作し、連続出力試験において、 $T_j = 200^\circ\text{C}$ 、パワー密度20kW/L（世界最高）を達成した。使用したSiCパワー素子はJFETとJBS（SBD）である。本試作に向けては以下の高温実装、熱設計、駆動回路における要素技術を開発して適用した。高温実装においては300℃で3000時間の寿命を有し、 $-40^\circ\text{C} \Leftrightarrow 300^\circ\text{C}$ 冷熱サイクル試験において1500サイクル超の寿命を有する高温高信頼AuGeダイ接合技術を確立した。また、パワーデバイスの温度特性に依存して冷却フィンのサイズが最小にできる事実を見出し、それを利用した最適設計法を樹立した。さらに、高温で高い熱伝導と機械的強度を両立できるセラミック基板-冷却フィン直結型モジュールを提案し、同構造を実現するための独自なアセンブリプロセスを開発した。また、駆動技術においては、SiCデバイスの高速スイッチング性を最大限に発揮できる新たな高速ゲート駆動回路を開発した。直列接続したデバイスの誤点弧というSiC固有の大きな課題を解決する新技術を開発した。

上記インバータ1次試作から得た知見を踏まえ、更なる高パワー密度を目指したインバータ2次試作を企画し、設計を完了し一部の試作を進めた。

（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

独立行政法人 産業技術総合研究所、首都大学東京、千葉大学、東京工業大学）

#### 4. 2 平成22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22年度進捗状況）

（5）「SiCウエハ量産化技術開発」[助成事業2/3]

実施者の公募を行い、実施体制を構築した。

（8）「大口径対応デバイスプロセス装置開発」[助成事業2/3]

実施者の公募を行い、実施体制を構築した。

#### 4. 3 実績推移

実績額推移	21年度	22年度	
	委託	委託	助成
①一般勘定（百万円）	—	0（NEDO） 2,000（経済産業省）	0
②需給勘定（百万円）	976	638	—
特許出願件数（件）	2	0	—
論文発表数（報）	4	7	—
フォーラム等（件）	19	42	0

### 5. 事業内容

#### 5. 1 平成23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  
昇華法において、結晶成長から加工、エピタキシャル膜成長に至るまでの一貫した6インチエピウエハの製造技術の開発を行う。また、革新的結晶成長法によって、昇華法を凌駕するポテンシャルを評価可能なSiC結晶成長の要素技術の開発を行う。さらに、大口径・高品質SiC結晶の評価技術の開発を行う。

（2） 大口径SiCウエハ加工技術開発

切断、研削、研磨の各技術について、6インチウエハに対応した高精度化、高速化及び低コスト化に資する加工技術の開発を行う。具体的には、高速・高効率・低損傷な切断技術の開発、研削精度向上のためのナノレベルでの砥石制御技術、耐薬品性の高いSiCに有効な化学的機械的研磨法（CMP）の開発等を行う。

（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）

S i C ウェハの大口径化に対応した、大面積で均一かつ低欠陥なエピタキシャル膜を高スループットで成長できるエピタキシャル膜成長技術及び高耐圧デバイスの作製に対応できる厚膜を高均一・高純度かつ高速で成長できるエピタキシャル膜成長技術の開発を行う。また、その両者に対応した大口径／厚膜 S i C エピタキシャルウェハ評価技術の開発を行う。

#### (4) S i C 高耐圧スイッチングデバイス製造技術

3 ～ 5 k V 級の高耐圧かつ低損失な S i C スwitching デバイスを製造するための新規耐圧構造の設計／作製技術、高耐圧デバイス酸化膜信頼性向上技術、限界性能向上技術、高耐圧デバイス実装技術、高耐圧デバイス評価技術、大容量電力変換器設計技術の開発を行う。

#### (6) 大口径 S i C ウェハ加工要素プロセス検証

大口径 S i C インゴットから高品質ウェハを実現する大口径ウェハ一貫加工プロセス開発に資するため、インゴット切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各要素プロセスに関して、現状技術での試加工実験を通して、能力限界・個別課題の抽出の準備を行う。

#### (7) S i C 高耐圧大容量パワーモジュール検証

高耐圧 (3. 3 k V 級) かつ低損失な S i C ショットキーバリアダイオードを実現するための新規耐圧構造設計・作製プロセス技術、高耐圧デバイス評価技術の開発を行う。併せて、当該 S i C ショットキーバリアダイオードとスイッチング素子として S i 絶縁ゲートバイポーラトランジスタを選択 (ハイブリッド構造) した大容量パワーモジュール設計技術開発を行う。

### 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 I T 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 [委託]

・耐圧：600V以上、電流容量：20A以上、オン抵抗率：2. 5mΩcm<sup>2</sup>以下 (室温環境下) の S i C スwitching デバイスを開発する。S i パワーデバイスで一般的に行われている信頼性試験を S i C パワーデバイスに対しても実施し、S i 同等の信頼性を実証する。

・電力容量が2kW級のサーバ電源の実験回路を試作し、その電力変換効率が50%負荷で93%以上であることを実証する。

(実施体制：株式会社日立製作所)

#### (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

・パワコン開発では、H22年度に試作したミニモデルを用いた試験結果を元に30kW級太陽光発電用パワーコンディショナのプロトタイプによる目標達成に向けて設計検討を行う。

・デバイス開発では30kW級パワコンに必要なとされるMOSFETを実現する。

(実施体制：三菱電機株式会社)

### (3) 次世代SiC 電力変換器基盤技術開発

・高温高出力パワー密度の電力変換器を想定した要素試験によって、信頼性や設計の評価に必須となる基礎データの一層の拡充を図るとともに、回路や実装に関わるシミュレーション技術等の設計技術を高度化する。また、電力変換器の回路方式や制御方式の面からも引き続き評価を進め、効果を検証する。こうした検討の結果得られた知見を基に、さらなる高温動作化・高パワー密度化の検討を進めるとともに、試作器を用いた検証試験を行う。

・平成22度のインバータ1次試作の結果明確化された実装、組立、駆動の問題を解決する要素技術を開発し、この新技術を組み入れた2次試作を行って（JFET使用）、本プロジェクトのマイルストーンである200℃以上の接合部温度と、25kW/L以上のパワー密度を達成する。

・本プロジェクトの目標達成により適した大容量DMOS-FETが入手可能になる見込みがあることから、その使用を想定したドライブ技術ならびに駆動回路モジュール内実装技術の開発を開始し、デバイスが入手可能であれば実証に進む。その中で、モジュールレベルで起こる高温信頼性問題の顕在化と改良を行う。

(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／独立行政法人産業技術総合研究所 ー首都大学東京、千葉大学、東京工業大学)

## 5.2 平成23年度(助成)事業内容

### (1) 事業方針

平成23年度は、以下の研究開発を行う。

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」[助成事業2/3]

昇華法により、早期の6インチ4H-SiCウエハ実現にむけ、バルク結晶成長やウエハ加工に関わる大口径対応装置導入・立上げを進め、量産化に向けた課題抽出を進める。

#### (8) 「大口径対応デバイスプロセス装置開発」[助成事業2/3]

SiCデバイス化プロセスの内、Siデバイスプロセスとは異なる高温プロセス技術、或いは透明基板対応技術に関して、6インチウエハ対応装置の開発を行う。

## 5.3 実施体制

別紙を参照のこと

## 5.4 平成23年度事業規模

	委託・共同研究事業	助成事業
一般勘定	1, 445百万円（新規）	
需給勘定	269百万円（継続）	
うちNEDO負担額	219百万円	
平成22年度	365百万円（継続・繰越）	2, 200百万円（継続・繰越）
補正予算額（一般勘定）		

## 6. その他重要事項

### (1) 運営・管理

本研究開発の研究開発項目①のうち（1）から（4）、（6）および（7）は、経済産業省が、企業、大学等の研究機関（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって研究開発実施者を選定し、共同研究契約等を締結する研究体を構築して開始したものである。独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が本研究開発の運営・管理を承継するに当たっては、その時点までの進捗状況を踏まえた研究開発内容・計画及び実施体制の妥当性について、外部有識者による審議を含めた評価を行った上で最適な研究開発体制を構築し、実施する。

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。

### (2) 契約の実施

委託事業については平成21～24年度の複数年度契約を行う。

助成事業については平成23年3月～平成24年2月までの交付決定を行う。

## 7. 実施方針の改定履歴

(1) 平成23年3月、制定。

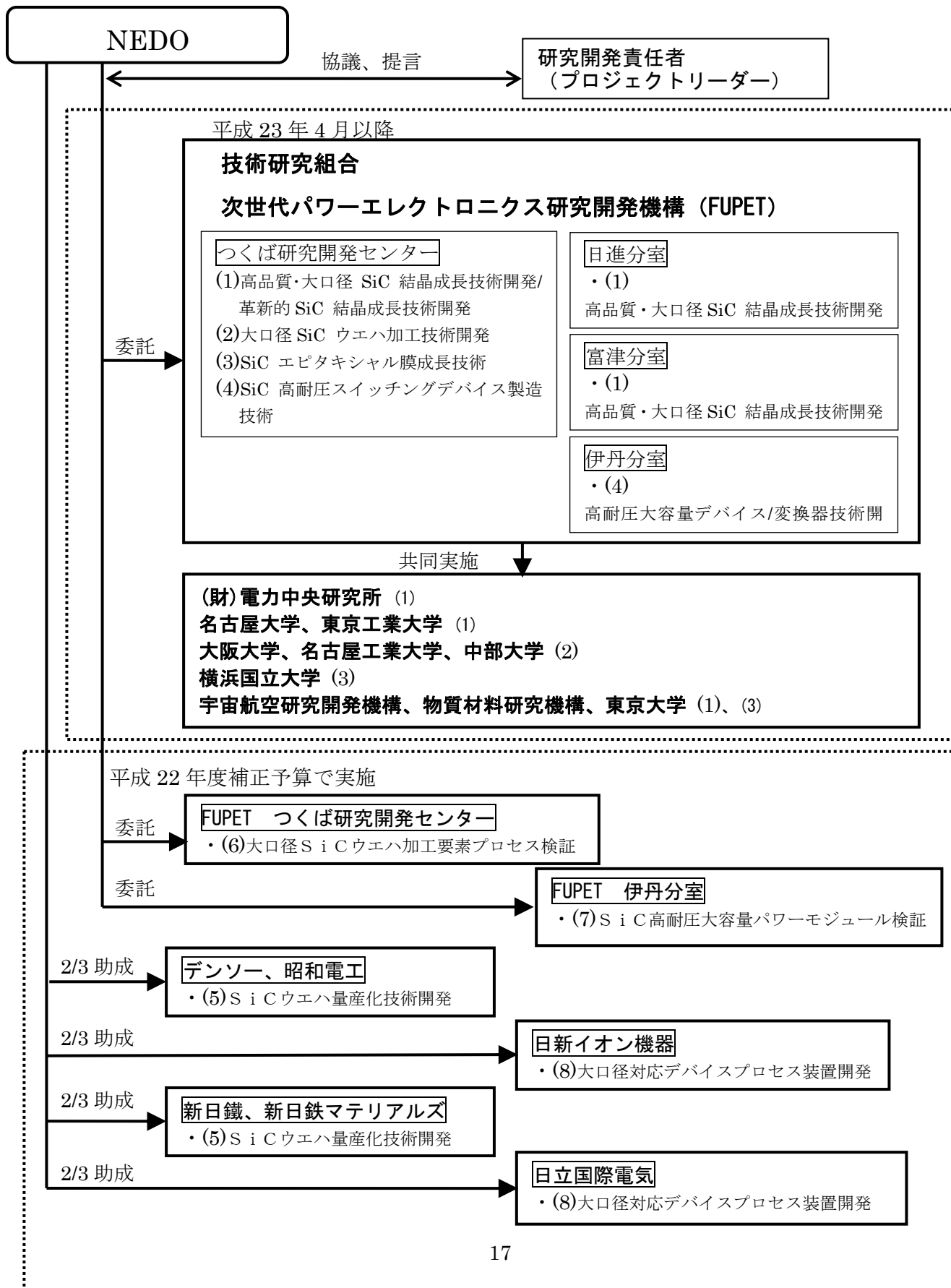
(2) 平成23年3月、実施体制の見直しに伴い体制図を変更。

(3) 平成23年7月、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法の改正に伴う改定。



(別紙) 事業実施体制の全体図

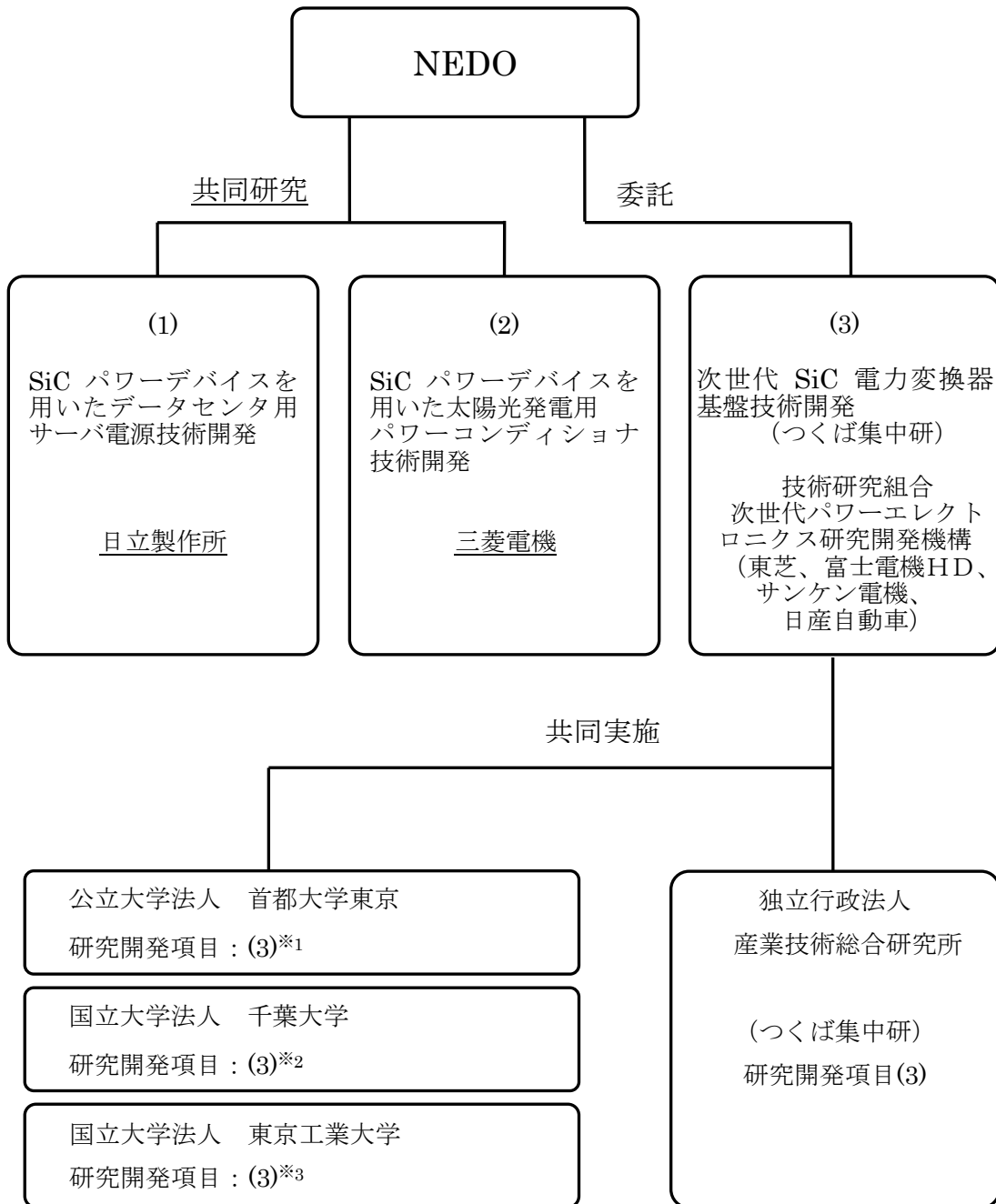
(研究開発項目①低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト)



(案の2)

(別紙) 事業実施体制の全体図

(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))



【研究開発項目】

- ②-(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
- ②-(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
- ②-(3) 次世代 SiC 電力変換機基盤技術開発
  - ※1 高周波スイッチング技術、電磁ノイズ抑制技術
  - ※2 高パワー密度化技術
  - ※3 DC/DC コンバータ実証