

# 「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」

研究開発項目①(10) 新世代 Si パワーデバイス技術開発

研究開発項目③(2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

研究開発項目④ 新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発

## 事業原簿【公開版】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 IoT 推進部
-----	--

# —目次—

—目次—	1
概 要	4
プロジェクト用語集	11
<b>I. 事業の位置付け・必要性について</b>	<b>I-1</b>
1. 事業の背景・目的・位置付け	I-1
1.1. 事業の背景	I-1
1.2. 事業の目的	I-1
1.3. 事業の位置づけ	I-3
1.3.1. 政策的位置づけ	I-3
1.3.2. 市場動向	I-4
1.3.3. 国際的なポジション	I-5
1.3.4. 海外状況まとめ	I-8
1.3.5. 今回の事業の位置づけ	I-9
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-11
2.1. NEDO が関与することの意義	I-11
2.2. 実施の効果(費用対効果)	I-11
2.2.1. アウトカム効果	I-11
2.2.2. 実施の効果(費用対効果)	I-12
<b>II. 研究開発マネジメントについて</b>	<b>II-1</b>
1. 事業の目標	II-1
2. 事業の研究計画	II-3
2.1. 研究開発の内容	II-3
2.1.1. 研究開発スケジュール	II-3
2.1.2. プロジェクト費用	II-5
2.2. 研究開発の実施体制	II-6
2.3. 研究開発の運営管理	II-8
2.4. 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	II-9
2.4.1. 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメント	II-9
2.4.2. 知財マネジメント	II-10
3. 情勢変化への対応	II-11
4. 中間評価への対応	II-12
5. 評価に関する事項	II-13
<b>III. 研究開発成果について</b>	<b>III-1</b>
1. 事業全体の成果	III-1
1.1. 事業全体の成果の概要	III-1
1.2. 研究開発項目毎の主な成果と目標の達成度	III-3
1.3. 成果の意義	III-4

1.4. 成果の普及 .....	III-5
2. 研究開発項目毎の成果 .....	III-7
2.1. 研究開発テーマ「新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発」 .....	III-7
2.2. 研究開発テーマ「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」研究開発項目毎の成果 .....	III-8
2.3. 研究開発テーマ「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」 .....	III-9
2.4. 研究開発テーマ「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」 .....	III-10
2.5. 研究開発テーマ「次世代パワーデバイスを用いた発電電動一体ターボチャージャによる排熱回収システムの研究開発」 .....	III-12
2.6. 研究開発テーマ「パワーエレクトロニクス用大口径バルクGAN結晶の研究開発」 .....	III-13
2.7. 研究開発テーマ「窒化ガリウムパワーデバイス高出力化のための高放熱構造の研究開発研究開発」 .....	III-15
2.8. 研究開発テーマ「高効率大容量無線通信を実現する高周波GAN-HEMTの研究開発」 .....	III-16
2.9. 研究開発テーマ「低不純物・高成長速度の次世代 HVPE 法による低価格・大電力 GAN パワーデバイス製造プロセスの研究開発」 .....	III-16
2.10. 研究開発テーマ「GAN物性を最大限に発揮させる最適なパワーデバイス構造の確立とその工業的な製造プロセスに繋がる絶縁膜形成技術の研究開発」 .....	III-18
<b>IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて .....</b>	<b>IV-1</b>
1. 事業全体の実用化・事業化に向けた取組及び見通し .....	IV-1
2. 研究開発企業毎の実用化・事業化に向けた取組及び見通し .....	IV-2
2.1. 「新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発」における実用化・事業化の見通し(三菱電機) .....	IV-2
2.2. 「新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発」における実用化・事業化の見通し(東芝) .....	IV-2
2.3. 「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」における実用化・事業化の見通し(富士電機) .....	IV-2
2.4. 「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」における実用化・事業化の見通し(デンソー) .....	IV-2
2.5. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し(三菱電機) .....	IV-3
2.6. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し(DOWA エレクトロニクス) .....	IV-4
2.7. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し(三菱マテリアル) .....	IV-4
2.8. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し(デンカ) .....	IV-5
2.9. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し(日本ファインセラミックス) .....	IV-5
2.10. 「次世代パワーデバイスを用いた発電電動一体ターボチャージャによる排熱回収システムの研究開発」における実用化・事業化の見通し(ACR) .....	IV-5
2.11. 「パワーエレクトロニクス用大口径バルクGAN結晶の研究開発」における実用化・事業化の見通し(三菱ケミカル・日本製鋼所) .....	IV-6
2.12. 「窒化ガリウムパワーデバイス高出力化のための高放熱構造の研究開発」における実用化・事業化の見通し(三菱電機) .....	IV-6
2.13. 「高効率大容量無線通信を実現する高周波GAN-HEMTの研究開発」における実用化・事業化の見通し(住友電工) .....	IV-6
2.14. 「GAN デバイス用 HVPE の研究開発」における実用化・事業化の見通し(太陽日酸) .....	IV-7

(添付資料)

- ・特許論文等リスト
- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価関連資料(事前評価書、パブリックコメント募集の結果)

# 概 要

	最終更新日	2020年11月11日	
プログラム (又は施策)名	科学技術・イノベーション、地球温暖化対策		
プロジェクト名	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(研究開発項目①(10)新世代 Si パワーデバイス技術開発、研究開発項目③(2)次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発及び研究開発項目④新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発)	プロジェクト番号	P10022
担当推進部/ PMまたは担当者	IoT 推進部/ 主査(PM) 野村 重夫 (2017年11月～2020年3月) 主査(PM) 柚須 圭一郎(2017年1年～2017年10月) 主査(PM) 間瀬 智志 (2014年4月～2016年12月)  主査 池田 光 (2019年4月～2020年3月) 主査 高橋 晋 (2018年12月～2020年3月) 主査 直島 康浩 (2016年11月～2018年11月) 主査 岡本 直樹 (2016年4月～2019年3月) 主査 大西 一三 (2016年4月～2017年6月) 主査 山本 興輝 (2014年4月～2016年2月) 主査 杉山 五美 (2014年4月～2016年10月)		
0. 事業の概要	<p>本事業では、パワー半導体の性能限界突破や新材料パワー半導体を駆使したパワーモジュールやアプリケーションへの応用開発を行い、電力変換器等のパワーエレクトロニクス機器の性能向上や適用範囲拡大により、飛躍的な省エネ化を実現する。 具体的には以下の研究開発を行う。</p> <p><b>【研究開発項目①(10)】</b> Si パワーデバイスに関し、従来技術の延長線上にない革新的な手法を用いることで、現状の Si パワーデバイスの性能限界突破を行う。低欠陥ウェハー技術、スケールアップ技術、3次元化等の新構造化技術等を駆使し、極限の材料及びデバイス構造等を開発することにより、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する。また、開発した新世代Siパワーデバイス的高速スイッチングを可能にするゲートドライバやスイッチング技術等を開発する。</p> <p><b>【研究開発項目③(2)】</b> 新材料パワー半導体を各種アプリケーションに適用するため、モジュール化のための材料、設計技術、実装技術等の開発を行う。開発した技術を適用した新材料パワーモジュールの開発や開発したモジュールを適用したシステムの試作、動作実証等を行う。</p> <p><b>【研究開発項目④】</b> 低欠陥で、パワーデバイスに供する新材料ウェハー実現のための革新的製造技術を開発する。また、低コスト化を実現するためのウェハーの大口径化に関する革新的製造技術を開発する。新たな用途開拓を見据えて、その実現に必要な技術に関して下記の研究開発を実施する。</p> <p>①新材料パワーデバイスの実用に即した成膜技術や放熱技術などの共通基盤技術の開発 ②大容量高周波無線通信デバイス技術などのIoT社会を実現するための要素技術開発 ③新材料パワーデバイスの社会実装に向けた将来の革新的な用途開拓に関する可能性の検証</p>		
1. 事業の位置付け・必要性について	<p>パワーエレクトロニクスは、鉄道・自動車・産業機械・家電など生活に身近なあらゆるところに適用される技術であり、その高性能化はあらゆるところの省エネに繋がり、低炭素社会実現の鍵となる技術である。</p> <p>また、パワーエレクトロニクス関連市場は、現在6兆円に対し、2030年には20兆円まで拡大する見込みである。成長市場で優位性を確保し、経済成長に繋げることは重要である。本事業の成果により、半導体デバイス関連の国内企業群が国際的に大きい存在感を有するほか、自動車産業をはじめとする電機産業以外の産業競争力強化にも大きい貢献が期待される。</p> <p>海外では、Power America や NY-PEMC をはじめとした大型の国家プロジェクトが次々に組成され、本分野の推進を強化している。また、ECPE をはじめとしたコンソーシアム活動も盛ん</p>		

である。日本は多くの有力企業を抱えている一方で、一企業だけで対抗することは困難になりつつある。従って NEDO が関与し、本分野の研究開発を強力に推進することが重要になってくる。

2. 研究開発マネジメントについて

事業の目標	<p><b>【研究開発項目①(10)】</b>  (2016 年度末)  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 パワーデバイスの開発。</p> <p>(2019 年度末)  2016 年度末までに動作させた新世代 SiC パワーデバイスとゲートドライブ IC を組み合わせたプロトタイプモジュールを作成し、産業用実用化クラスの出力(例えば 10kW)の変換器実証運転を行う。また、パワーデバイスとしては、低欠陥ウェハー技術、スケーリング技術等の新構造化技術等の高度化を図り、スケーリングコンセプトの連続性を確認する。</p> <p><b>【研究開発項目③(2)】</b>  &lt;2016 年度末&gt;  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。</p> <p>&lt;2017 年度末&gt;  (次世代パワーモジュール)  パワエレ製品を使用する最終顧客要求を満足させる最適な新材料パワーモジュールを開発し、SiC パワーモジュールの事業化と SiC パワーモジュールを搭載したパワエレ機器の事業化に繋げる。</p> <p>(車載電動システム)  試作した SiC パワーデバイスを用いた新電動システムを実車に搭載し、実走行での動作を確認、システム制御上の課題抽出を実施するとともに、モード走行相当の走行時の電動損失を実測し、燃費向上効果を定量化する。</p> <p>(高耐圧 SiC パワーモジュール)  新規に開発した部材および高耐圧 SiC パワーデバイスを組み込んだ高出力密度・高耐圧パワーモジュールを試作し、定格容量でもモジュールとしてのスイッチング動作を実証する。</p> <p>&lt;2019 年度末&gt;  (発電電動一体ターボチャージャ)  SiC デバイスを用いた IPM 及び発電電動機一体ターボチャージャの性能/耐久評価を行い、実用化可能であることを実証する。また、発電電動機と SiC デバイス組み込みインバータをエンジンに取り付け耐久評価を実施して実用性を実証する。これらを通して、本システムが低速トルク大幅アップと高速域での燃費向上を達成でき、かつ実用化可能なレベルであることを実証する。</p> <p><b>【研究開発項目④】</b>  &lt;2019 年度末&gt;  (大口径バルク GaN 結晶)  貫通転位密度 1,000/cm<sup>2</sup>以下、口径4インチ以上の単結晶を実現し、当該結晶を用いたデバイス品質のウェハー作成プロセスを生産性の高い方法で確立する。上記新材料を用いた口径6インチの単結晶実現のための製造技術を確立する。</p> <p>(新規用途開拓)  ① 開発した共通基盤技術について、実用に即した性能評価を行い、実用化の見通しを明確化  ② 要素技術を実装した新材料パワーデバイスを試作・動作検証し、Si、SiC等の他材料のデバイスと比較した競争優位性の明確化  ③ 新材料パワーデバイスの革新的な用途に関して、具体的かつ定量的な要求仕様及びその実現可能性の明確化</p>
-------	--

主な実施事項		H26fy (FY2014)	H27fy (FY2015)	H28fy (FY2016)	H29fy (FY2017)	H30fy (FY2018)	H31fy (FY2019)	
事業の計画内容	研究開発項目 ①(10)	新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発						
	研究開発項目 ③(2)	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						
		高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発						
		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						
		③(1)革新的アプリケーション開発 (6 テーマ)	次世代パワーデバイスを用いた発電電動一体ターボチャージャによる排熱回収システムの研究開発					
研究開発項目 ④	パワーデバイス用新材料ウェハの革新的製造技術の開発							
	新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進							
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	H26fy (FY2014)	H27fy (FY2015)	H28fy (FY2016)	H29fy (FY2017)	H30fy (FY2018)	H31fy (FY2019)	総額
	一般会計	-	-	-	-	-	-	
	特別会計 (需給)	2,159	2,947	2,179	2,054	780	574	10,694
	開発成果促進財源	-	-	-	-	-	-	
	総予算額	2,159	2,947	2,179	2,054	780	574	10,694
	(委託)	○	○	○	○	○	○	
	(助成) :助成率 2/3	○	○	○	○	○	○	
(共同研究) :負担率△/□	-	-	-	-	-	-		
開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局 研究開発課 商務情報政策局 情報産業課						
	プロジェクトリーダー	千葉大学 佐藤之彦 教授						

	<p>委託先 (委託先が管理法人の場合は参加企業数及び参加企業名も記載)</p>	<p>研究開発項目①(10) 委託先:国立大学法人東京大学(共同実施先:国立大学法人九州工業大学、国立大学法人九州大学、学校法人明治大学、公立大学法人首都大学東京、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人横浜国立大学、北九州市、株式会社東芝、三菱電機株式会社)、国立大学法人東京工業大学</p> <p>研究開発項目③(2) 助成先:富士電機株式会社(委託先:国立大学法人東京大学、国立大学法人大阪大学、国立大学法人山梨大学、国立大学法人九州工業大学、学校法人早稲田大学、国立大学法人群馬大学、学校法人芝浦工業大学、国立大学法人信州大学、国立大学法人鹿児島大学、国立大学法人名古屋工業大学、東レ株式会社、株式会社コージン、デンカ株式会社、アレントジャパン株式会社、東京エレクトロニクス株式会社、DOWA メタルテック株式会社、日本軽金属株式会社、ナガセケムテックス株式会社、アルプスグリーンデバイス株式会社、東京エレクトロニクス株式会社、富士電機エフテック株式会社)、株式会社デンソー(共同研究先:国立大学法人静岡大学、国立大学法人大阪大学、委託先:株式会社日本自動車部品総合研究所)、三菱電機株式会社(共同研究先:国立大学法人東京工業大学、学校法人芝浦工業大学、国立大学法人九州工業大学)、日本ファインセラミックス株式会社(共同研究先:国立研究開発法人産業技術総合研究所)、三菱マテリアル株式会社、DOWA エレクトロニクス株式会社、デンカ株式会社、株式会社ACR(共同研究先:学校法人東京理科大学)</p> <p>研究開発項目③(1)(革新的アプリケーション開発) 委託先:公益財団法人鉄道総合技術研究所、株式会社 ACR(共同実施先:国立研究開発法人産業技術総合研究所)、国立大学法人京都工芸繊維大学(再委託先:国立大学法人千葉大学)、公立大学法人首都大学東京、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人筑波大学、株式会社パルスパワー技術研究所、東京計器株式会社、株式会社プラズマアプリケーションズ、国立大学法人信州大学、国立大学法人大阪大学</p> <p>研究開発項目④ 委託先:三菱電機株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所、住友電気工業株式会社(共同研究先:国立大学法人東京工業大学、国立大学法人東北大学、国立研究開発法人情報通信研究機構)、国立大学法人名古屋大学(再委託先:株式会社デンソー)、太陽日酸株式会社、国立大学法人名古屋大学、国立大学法人名古屋工業大学、国立大学法人筑波大学</p>
<p>情勢変化への対応</p>		<p>事業を推進しながら課題として見えてきたものについて、適宜新テーマを追加。具体的には、「調査」「人材育成」「先導研究」の追加を行った。さらに 2017 年度からは、「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」と「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」について当初6年の計画を4年に期間短縮し、実用化・事業化を加速した。また、大口径・高品質バルク GaN 結晶の実用化加速を行うため、内閣府SIP/次世代パワーエレクトロニクスより開発テーマを移管するとともに、GaN 先導研究を受け、研究開発項目④として「新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発」の国プロを新規に追加した。</p> <p>知財戦略の見直しを行い、海外における特許出願も積極的に実施した。</p> <p>各種国際学会(ECSCRM/ICSCRM, ECCE, APEC, 等)にも積極的に参加(12回)し、材料・デバイス・モジュール・応用の各分野に渡って研究開発の最新動向の調査を行い、米国・中国等の研究開発の動向を踏まえ、各種ウェハー技術、デバイス技術、ドライブ技術、モジュール技術の目標設定や目標の妥当性確認等に活用した。さらに、SiC や GaN などの新材料パワエレに関する応用を推進できる人材の底上げを狙った人材育成事業についても、業界/参加企業の要請を受け、関東・関西に加え名古屋地区での開催を追加するとともに、事業終了後の継続性を維持するために、e-ラーニング教材の作成や書籍化を含む各種取り組みを行い、結果として自主運営に切替え有料での講座を開設し、業界/参加企業からは大変好評だった人材育成の取り組みを継続した。</p>
<p>中間評価結果への対応</p>		<p>主な指摘事項は3件あり、各指摘に対する対応を以下に示す。</p> <p>①ベンチマークとして単に欧米の国家PJだけとの比較がされているが、それは国際動向のほんの一端であり、それらを取り巻く産業情勢をより正確に把握しておく必要がある</p> <p>【対応】海外PJ動向のみならず、個別の企業の動向も含めた産業情勢を把握した上で研究開発を行った結果、目標の見直し等に繋がった。また、各種調査事業も活用し幅広い情報収集に努めた。さらに、パワエレシンポジウムにて応用分野から見たパワエレへの期待を実施者とも共有し、研究や事業化を加速した。</p>



		<p>②競合相手、特に海外メーカーは M&amp;A で開発期間を大幅に短縮しているため、本 PJ においても更なる開発スピードの向上が求められる</p> <p>【対応】Si-IGBT テーマでは、原理検証ができたことを受け、早期事業化を促し、企業の事業計画に反映した。一部のテーマの事業期間を 6 年から 4 年に短縮するなど、これまでもスピード向上に向けた取組を実施した。新材料 GaN ウェハテーマは、要素技術開発に目途が付いた段階で内閣府 SIP から経産省-Pj に移管し、実用化を強力に助成する体制とした(2017 年度) さらに、2018 年末に予算前倒し等を行うとともに、6 インチ結晶成長オートクレープの設計提案目標を引き上げ、量産化を加速した。</p> <p>③SiC パワエレの今後のさらなる普及には、応用分野の発掘と拡大が重要である。そのためには、SiC ウェハの更なる高品質化、低コスト化も重要な課題である。デバイス自体のコストについては、一部企業で検討されているが、全体としてはまだ検討が不十分である</p> <p>【対応】低コスト化等の普及に向けた課題は、実施者毎の事業部門との会議等にて更なる検討を行い、低コスト化に繋げた。SiC モジュールのサンプルを潜在顧客に提供し、応用分野の発掘を推進した。また、NEDO 調査事業で新材料ウェハのコストトレンドも調査した。</p>
評価に関する事項	事前評価	2013 年度(平成 25 年度)実施 担当部 IoT 推進部
	中間評価	2016 年度(平成 28 年度) 中間評価実施
	事後評価	2020 年度(令和 2 年度) 事後評価実施
3. 研究開発成果について		<p>【研究開発項目①(10)】</p> <p>&lt;2016 年度末&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・新世代 Si-IGBT を試作するため、まず縦型 MOSFET の試作を行った。ピーク移動度では、<math>300\text{cm}^2/\text{Vs}</math> (目標:<math>300\text{cm}^2/\text{Vs}</math>)の MOSFET を得ることに成功した。この技術を応用して新構造縦型 IGBT を試作し、良好な電流密度が得られている。</li> <li>・新開発のゲートドライブ回路を高電圧パワーエレクトロニクス回路に組み込み実証評価する環境を構築し、インバータ動作により連続運転を行った。3kV スイッチング環境を構築した。</li> </ul> <p>&lt;2019 年度末&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・世界初、5V(従来 15V)駆動の高耐圧(3kV)Si-IGBT 試作し、デジタルゲート制御により特性改善を達成した。</li> <li>・スケールリング IGBT コンセプトの連続性を確認した。</li> <li>・5kW 3 相インバータの連続運転し、産業用実用化クラス変換器を実証した。</li> </ul> <p>【研究開発項目③(2)】</p> <p>&lt;2016 年度末&gt;</p> <p>(次世代パワーモジュール)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目標である、コスト 30%削減、量産化工数半減、サンプル供給期間 1/4 のパワーモジュール開発について達成のメド付け完了。</li> </ul> <p>(車載電動システム)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目標である、従来システムから損失 1/3 となる昇圧コンバータレス PCU を用いた車載電動システムについて、システム単体での目標達成を確認。</li> </ul> <p>(高耐圧 SiC パワーモジュール)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目標である、耐圧 6.5kV、出力密度が同耐圧 Si モジュール比 2 倍以上のパワーモジュールについて、回路動作検証用のモジュールにて実現可能であることを確認。</li> </ul> <p>&lt;2017 年度末&gt;</p> <p>(次世代パワーモジュール)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・パワー密度:<math>1000\text{kVA/L}</math>、製品コスト:約 30%減の SiC パワーモジュールを開発した。</li> <li>・モジュールの新たな試作工法により、サンプル供給期間 1/4 に短縮を実現した。</li> </ul> <p>(車載電動システム)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・100kw クラスのシステムで JC08 モード実車走行時、PCU 損失 1/3 を実現可能なレベルの損失低減効果を実証した。</li> </ul> <p>(高耐圧 SiC パワーモジュール)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐圧 6.5kV、出力密度が当社同耐圧 Si モジュール比 2 倍以上の SiC パワーモジュールを達成した。</li> </ul> <p>&lt;2019 年度末&gt;</p> <p>(発電電動一体ターボチャージャ)</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試作部材を用いて、発電電動機一体ターボチャージャによる排熱回収システムを構築した。</li> <li>・発電電動機と SiC デバイス組み込みインバータをエンジンに取り付け耐久評価を実施して低速トルクアップ(吸気圧力 100kpa)と車両燃費改善効率 5%を実現した。</li> </ul> <p><b>【研究開発項目④】</b>  &lt;2019 年度末&gt;  (大口径バルク GaN 結晶)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・独自の低圧アモナーマル法を用いて、貫通転位密度 1000 個/cm<sup>2</sup>以下、4 インチの単結晶育成に成功した。</li> <li>・量産化に向けた低圧アモナーマル法による 6 インチ結晶成長オートクレーブの設計提案目標を引き上げ、達成した。</li> </ul> <p>(次世代 HVPE 法)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・縦型 GaN の低価格化に寄与する、次世代 HVPE エピ成長法を開発した。  &lt;外部原料供給装置を開発による原料を連続供給、高速回転による高速成長&gt;</li> <li>・2 インチ以上、成長速度 0.5mm/h、厚さ 1mm 以上の実現可能性を実証した。</li> <li>・縦型 HEMT デバイス耐圧 1000V 相当の不純物レベルを達成し、高耐圧用途向けデバイスの実用化の見通しを明確にした。</li> <li>・試作デバイスの動作実証を行い、本研究のエピ成長法の有用性を示した。</li> </ul> <p>(絶縁膜形成技術)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・GaN パワーデバイスの性能と信頼性に大きな影響を及ぼすゲート絶縁膜にフォーカスして、1)MOS 形成プロセス確立、2)MOS 構造の界面、絶縁膜の欠陥評価、3)MOSFET の動作実証を行って最適プロセス条件を確立した。</li> <li>・独自の絶縁形成装置を開発するとともに、界面準位密度 <math>1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}</math> と良好な界面を達成し、縦型 GaN パワーデバイスやパワー IC の絶縁膜形成技術の実用化の見通しを得た。</li> </ul> <p>(高放熱構造)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・世界初、基板とダイヤモンドの常温直接接合で GaN on ダイヤモンドデバイス作製に成功した。  &lt;従来の GaN on SiC デバイスと比較して約4割の温度低減を実現&gt;</li> <li>・実用に即した伝導率、製膜速度、面内均一性の目標を達成し、実用化の見通しを得た。  ※上記により、GaN の特長(高周波、高出力)が活きる革新的用途に関する要求仕様と実現可能性の明確化を行った。  ※上記の開発した3つの共通基盤技術(HVPE 法、絶縁膜形成技術、高放熱構造)の実用化見通しを明確化した。</li> </ul> <p>(高周波 GaN-HEMT)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・低抵抗/大電流特性の N 極性 GaN トランジスタ(逆 HEMT)の試作・動作検証を行った。</li> <li>・Si/SiC デバイスに対する競争優位性を確保する各数値目標を達成した。  ※上記により、Si/SiC デバイスに対する競争優位性の明確化を行った。</li> </ul>
投稿論文	「査読付き」48 件
特 許	「出願済」113 件(うち国際出願 20 件)
その他の外部発表 (プレス発表等)	研究発表・講演 275 件、新聞雑誌等への掲載 15 件、展示会への出展 21 件、受賞実績 12 件
4. 実用化・事業化 見通しについて	<p><b>【研究開発項目①(10)】</b>&lt;東芝、三菱電機(共同実施先)&gt;  ・22-23 年度に新世代 Si-IGBT の事業化を目指す。</p> <p><b>【研究開発項目③(2)】</b>  (次世代パワーモジュール)&lt;富士電機&gt;  ・顧客最適化による性能最大化を図った製品を目指し、社内製品に搭載して 20 年度から販売を開始した。</p> <p>(車載電動システム)&lt;デンソー&gt;  ・搭載車両を決定し、SiC パワーモジュールを 25 年、車載電動システムを 28 年の実用化予定。  ガス成長法による低コスト SiC ウェハは 25 年量産予定。</p> <p>(高耐圧 SiC パワーモジュール)&lt;三菱電機&gt;  ・6.5kV パワーモジュールについてユーザーとともに採用システムを探索中。</p> <p>(発電電動一体ターボチャージャ)&lt;ACR&gt;  ・大手トラックメーカーと目標値の共有化と実用化を検討し、24 年販売開始予定。</p> <p><b>【研究開発項目④】</b></p>

	<p>(大口径バルク GaN 結晶) &lt;三菱ケミカル&gt;          ・6 インチサイズの GaN 単結晶基板のサンプル販売を 1 年前倒し、23 年度に始める。</p> <p>(次世代 HVPE 法) &lt;大陽日酸&gt;          ・本事業終了後も量産化に向けた改善技術の開発を継続し、23 年度目途に量産化を行う。</p> <p>(高放熱構造) &lt;三菱電機&gt;          ・まずは 24 年度を目途に、小型化・高出力化が強く求められるレーダー用途に適用し、その後、価格、市場性を見たうえで 25 年度以降、順次民生向け展開を図る予定。</p> <p>(高周波 GaN-HEMT) &lt;住友電工&gt;          ・量産に向けた技術開発を継続し、23 年から製造部門の技術立上げを行うと共に、製品としての増幅器開発を行い、26 年頃から製品適用する。</p>	
5. 基本計画に関する事項	作成時期	2014 年 4 月 作成(研究開発項目③の追加)
	変更履歴	<p>2014 年 5 月 改訂(研究開発項目①(10)の追加)</p> <p>2015 年 2 月 改訂(研究開発項目③に革新的アプリケーション開発を追加)</p> <p>2015 年 9 月 改訂(根拠法の追加等)</p> <p>2017 年 1 月 改訂(研究開発項目①(10)の延長及び研究開発項目④の追加)</p> <p>2018 年 3 月 改訂(研究開発項目④の対象範囲の変更)</p> <p>2020 年 2 月 改訂(プロジェクトリーダーの担当範囲の誤記訂正、及び西暦表記への変更)</p>

## プロジェクト用語集

用語	説明
Ag	銀、パワー半導体素子とモジュール基板との間の接合材料として用いられる。
EV	Electric Vehicle の略で、電気自動車のこと。近年、資源制約や環境問題への関心の高まりを背景に、電気自動車が注目を集めている。
FCV	Fuel Cell Vehicle の略で、燃料電池自動車のこと。燃料電池で水素と酸素の化学反応によって発電した電気を使って走る自動車で、走行時に CO <sub>2</sub> や排気ガスを排出しない。
GaN	窒化ガリウム (Gallium nitride)、ガリウム(Ga)と窒素(N)で構成される化合物半導体材料。
HV	Hybrid Vehicle の略で、ハイブリッド自動車のこと。ガソリンエンジンとモーターの併用で遠距離走行ができる。
IGBT	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ (Insulated Gate Bipolar Transistor) の略称。IGBT は、パワー半導体素子のひとつで、MOS 構造 (金属-酸化膜-半導体構造) を組み込んだバイポーラトランジスタである。Si のパワー素子では主力となる素子である。
IP6X	JIS で規定された防水や防塵の程度についての等級であり、IP6X は粉塵が内部に侵入しないことを示す。
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor の略称。電界効果トランジスタ (FET) の一種である。ゲート電圧によりオンオフを制御する素子であり、高速の動作が可能であるという特徴を持つ。
PCS	パワーコンディショナー (Power Conditioning System) のことで、太陽光発電等から発電された直流電気を一般家庭などで使用できるように交流に変換する機器。
PHV	Plug-in Hybrid Vehicle の略で、プラグインハイブリッド自動車のこと。外部電源から充電できるタイプのハイブリッド自動車で、走行時に CO <sub>2</sub> や排気ガスを出さない電気自動車のメリットとガソリンエンジンとモーターの併用で遠距離走行ができるハイブリッド自動車の長所を併せ持つ自動車。
SBD	ショットキーバリアダイオード (Schottky Barrier Diode) の略称。ショットキーバリアダイオードは、PN 接合ダイオードに比べ順方向電圧降下が低く、スイッチング速度が速い特徴を持つ。
Si	ケイ素 (Silicon、シリコン)、多くの半導体で使用されている半導体材料。

SiC	炭化ケイ素 (Silicon Carbide)、シリコン(Si)と炭素(C)で構成される化合物半導体材料。
SiN	窒化ケイ素 (Silicon nitride)、ケイ素(Si)と窒素(N)で構成され、パワーモジュールの基板材料に使用される。
UPS	Uninterruptible Power Supply の略で、入力電源断の際にも、停電することなく電力を出力する装置。無停電電源とも呼ばれる。
インバータ	直流(DC)を交流(AC)に変換する電力変換回路。
ガス成長法	高純度原料ガスを連続的に供給することにより、高品質かつ長尺な SiC バルク単結晶を得ることを期待されている結晶成長法。
コンバータ	交流(AC)を直流(DC)に変換したり、直流(DC)を異なる電圧の直流(DC)に変換(DC-DC コンバータ)する電力変換回路。
サージ	電気回路に瞬間的に発生するパルス状の電圧あるいは電流。パワー回路では、スイッチングに伴う過渡時に現れることが多く、適切な設計を行わないと、素子破壊などの深刻な問題が生じる。
次世代自動車	ハイブリッド自動車、電気自動車、プラグインハイブリッド自動車、燃料電池自動車、クリーンディーゼル車、CNG 自動車等を指す。窒素酸化物(NO <sub>x</sub> )や粒子状物質(PM)等の大気汚染物質の排出が少ない、または全く排出しない、燃費性能が優れているなどの環境にやさしい自動車。
昇華法	昇華とは、元素や化合物が液体を経ずに固体から気体、または気体から固体へと相転移する現象のことで、SiC は液体にならないため、昇華によって結晶成長させる方法。
スケージング則	MOS トランジスタの寸法を一律小さくすると、電力やスイッチング速度等が一定の係数で改善されるという規則。
ダイアタッチ	半導体素子を基板に接合すること。
縦型デバイス	基板に対して垂直方向に電流が流れる構造の半導体素子。
トレンチ	シリコン表面に溝を形成して、そこにゲート構造を形成するトランジスタ構造のこと。(トレンチ構造、トレンチ型 MOSFET)
パワーデバイス	パワー半導体素子のこと、トランジスタやダイオード等からなる。
パワーモジュール	パワーデバイスや周辺回路部品を回路基板上に搭載して樹脂や金属等により封止したもの。大電力分野ではパワーデバイス単体製品は少なく、パワーモジュール製品が一般的。
分散電源	比較的小規模な発電設備を需要家の近くに配置する電力供給方式で、送電ロスが少ないが潮流制御が必要になる。

無停電電源	入力電源断の際にも、停電することなく電力を出力する装置。UPS (Uninterruptible Power Supply)とも呼ばれる。
ライフタイム	キャリアの寿命のことで、発生した過剰キャリアが再結合により $1/e$ (約 0.368) に減少するまでの時間。
<p>ラマン分光分析</p> <p>HVPE 法 (Hydride Vapor Phase Epitaxy)</p> <p>(ゲート)絶縁膜</p>	<p>ラマン散乱光の性質を調べることで分子構造や結晶構造などを知る手法。</p> <p>ハイドライド気相成長法。別名、ハロゲン輸送法とも言う。気相成長の一種であり、<math>H_2</math> や <math>N_2</math> などのキャリアガスとともに原料ガスを輸送して、下地結晶上に目的とする結晶を成長させる手法。</p> <p>電界効果トランジスタ (FET) において、ゲートとチャンネル(基板)の間に存在する絶縁膜。</p>

# I. 事業の位置付け・必要性について

## 1. 事業の背景・目的・位置付け

### 1.1. 事業の背景

パワーエレクトロニクスは、電気エネルギーの発生から輸送、消費までの流れの中で、半導体を用いて直流から交流、交流から直流への変換、電圧や電流、周波数を自在に制御する技術であり、電気インフラを支える基本技術である。

現在、風力発電や太陽光発電などでの電気エネルギーの効率的な発生や輸送・制御のための電力機器や鉄道、自動車、産業機器や家電製品など生活に身近な様々な電気利用機器に適用され、これらの機器の高性能化や省エネ化のためのキーテクノロジーとなっている。今後一層の産業競争力の強化及び省エネ化を推進するには、パワーエレクトロニクスの適用用途の拡大や普及拡大、性能向上による省エネ効果の増大等が必要とされ、パワーエレクトロニクスに関連する技術の高度化は社会的な課題となっている。

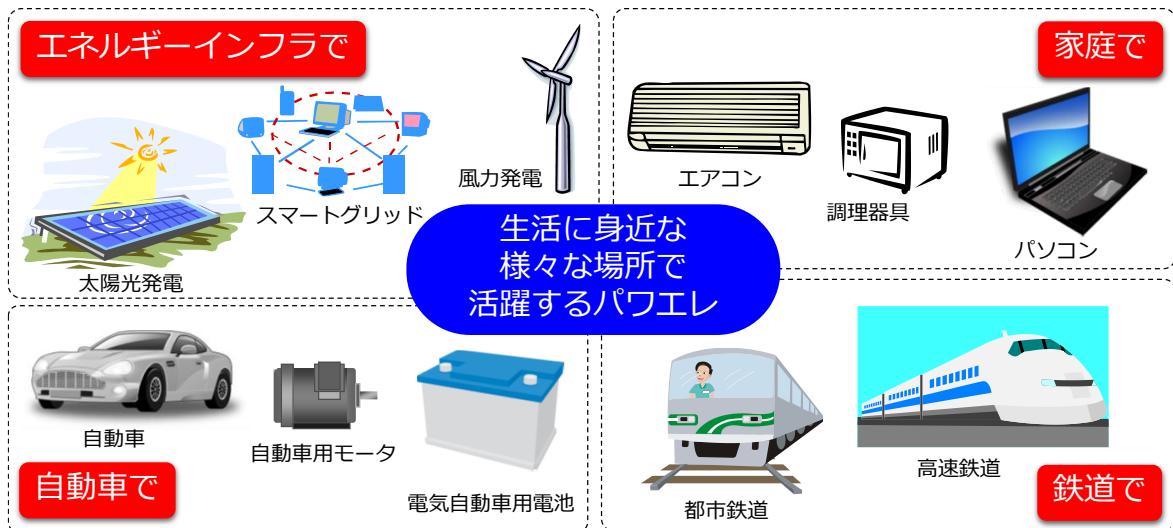


図 1-1 パワーエレクトロニクスの主な適用先

### 1.2. 事業の目的

本事業の目的の概要は、パワーエレクトロニクス技術の高度化により、省エネルギー技術の国際的牽引と我が国の産業競争力強化である。

研究開発項目ごとの詳細な目的は下記の通りである。

#### 「研究開発項目①(10) 新世代 Si パワーデバイス技術開発」

20 年以上にわたって高耐圧に対応するパワーデバイスとして Si-IGBT が重要な役割を担ってきたが、従来技術の延長によるデバイス開発では性能限界が見え始めていると言われている。その解決手段の一つとして、SiC 等の新材料パワーデバイスの開発を推進し、実用化が進みつつあるが、普及にはまだある程度の時間を要する見込みであり、Si パワーデバイスの更なる性能向上についての期待は高い。

また、パワーデバイス市場の中でも特に Si-IGBT は国内メーカーがその 40% のシェアを握っており、かつ市場自体も年 15% の成長率が予測される有望市場である。一方で、現在主流の

200mm ウェハプロセスから 300mm プロセスへの転換も現実的な流れとしてはあり、転換期に合わせて競合である欧米勢や後発のアジア勢の動きが活発化している。このような状況の中、国内メーカーの優位な環境を維持しつつ更なる成長を遂げるには、従来技術の延長線上にない新世代 Si パワーデバイスを開発し、他の追随を許さない環境を作る必要がある。

「研究開発項目③(2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発」

SiC 等の新材料パワーデバイスは、鉄道、民生機器等に採用され、実用化が進みつつある。今後、低炭素社会の実現・産業競争力の強化を更に推進するためには、新材料パワーデバイスの耐圧や信頼性等の向上、コスト低減等により、適用される製品の裾野を広げることが重要となる。

なお、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、産業機器、自動車、民生機器などの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(Si、SiC、GaN)、をデバイスや回路等の設計技術、実装技術等を組み合わせ、最適な応用システムを構築することにより実現することが重要となる。また、より新しく、独創性に富むなどの応用分野(アプリケーション)の開拓を進め、新市場の創出を行うことも重要である。

「研究開発項目④ 新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発」

SiC と並び期待されているパワーデバイス用新材料(GaN)は、一般的にウェハの品質及びコストがそのパワーデバイス実用化に対し大きなボトルネックとなっている。こうした新材料(GaN)を用いたパワーデバイスの研究は、欧米においても国家的な研究開発事業として取り組まれてきている。こうした中、我が国においても、SiC の次も見越した手だてを講じていくことが重要である。このために必要となるウェハの高品質化、低コスト化に取り組む。

新材料(GaN)パワーデバイスは、Si、SiC 系のパワーデバイスと比較して高周波数かつ高出力な用途に適用可能であり、スイッチングデバイス、パワーIC、高周波無線デバイス、レーダー、エネルギー伝達デバイスなど、様々な応用が期待されている。パワーデバイス材料として Si、SiC の技術開発が先行している中、新材料パワーデバイスの市場を形成し、牽引していくためには、単に Si、SiC 系のパワーデバイスの代替のみならず、SiC 等の従来材料では不可能な用途の開拓を見据え、新材料の特徴である高周波特性や放熱特性等を最大限に活かす研究開発が必要である。

本事業が主なターゲットとして想定している製品は図 1-2 の通りである。



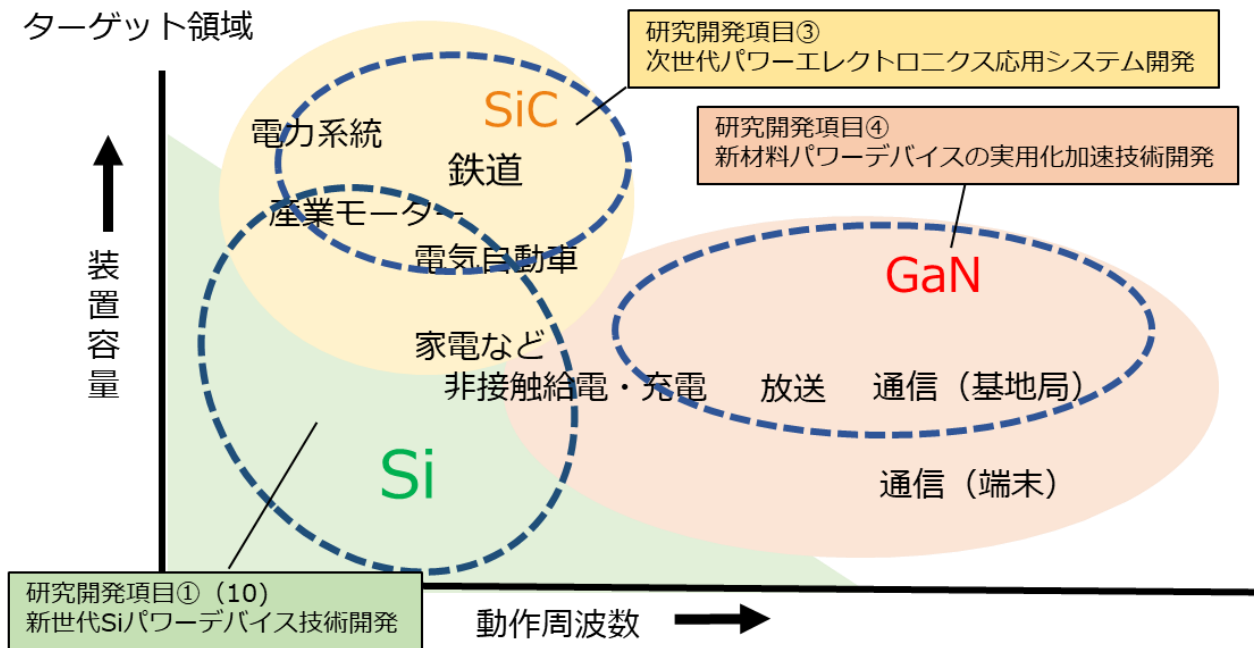


図 1-2 材料別の主な製品ターゲット

### 1.3. 事業の位置づけ

#### 1.3.1. 政策的位置づけ

パワーデバイスの性能向上に関する研究開発や、パワーエレクトロニクスによる電力制御等のエネルギー利用の革新を目指した研究開発は、各種閣議決定文書等の中で重要な研究開発として位置付けられている。

具体的な例として、「エネルギー基本計画(平成 26 年 4 月閣議決定)」「日本再興戦略 2016(平成 28 年 6 月閣議決定)」「科学技術イノベーション総合戦略 2015(平成 27 年 6 月閣議決定)」において、それぞれ次のような記述がなされている。

・エネルギー基本計画:

「電力消費の一層の効率化が期待される次世代パワーエレクトロニクス機器をはじめとした技術革新の進展により、より効率的なエネルギー利用や、各エネルギー源の利用用途の拡大が可能となる」

・日本再興戦略 2016:

「我が国初の窒化ガリウム(GaN)等を活用した高効率デバイス等の研究開発・実証・実装を進め、早期の実用化に向けた取組を推進する」

・科学技術イノベーション総合戦略 2015:

「革新的デバイスでは、モーターや情報機器等の消費電力を大幅に低減する超低損失パワーデバイス(SiC、GaN 等)、…を推進し、…」

上記の他にも多くの政府系文書の中で、パワーエレクトロニクス関連技術は重要な技術として位置付けられている。

### 1.3.2. 市場動向

世界のパワーデバイス市場予測(金額ベース)を図1-3に示す。2018年の約3兆円から2025年には約4兆円、2030年には約5兆円と拡大することが見込まれている。半導体材料で見たその内訳は、大部分がSiであり、2018年では全体の約99%となるが、2020年代にはSiC、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>といったWBG半導体の市場も徐々に増加して、2030年には、Siが約86%、SiCが約9%、GaNが約2%、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が約3%とWBG半導体の割合が増加していくと予想されている。

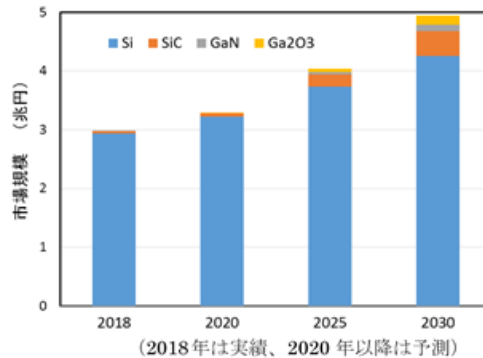


図1-3 パワーデバイス市場予測

出典:「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」(富士経済、2019)を基に NEDO 作成(2019)

図1-4にSiCデバイスの適用分野別市場予測を示す。2020年代から市場の拡大が予想されており、適用分野としては、特に、自動車、産業での伸びが大きくなっている。一方、図1-5にGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスの適用分野別市場予測を示す。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では周波数性能の優位性から情報通信機器での市場拡大が見込まれている。図1-2に示したようにSiCとGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のデバイス特性の違いから適用市場分野の違いが出ている。

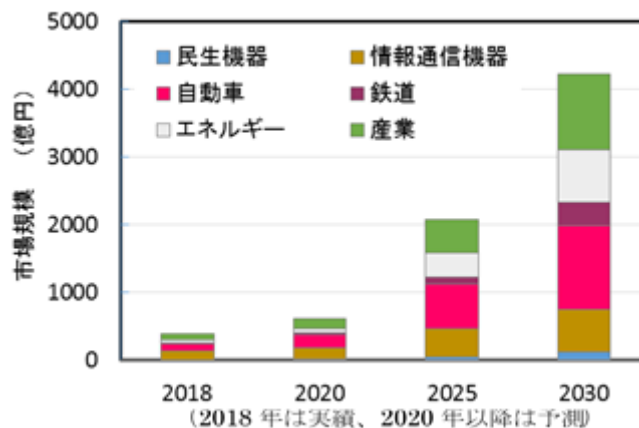


図1-4 SiCデバイスの適用分野別市場予測

出典:「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」(富士経済、2019)を基に NEDO 作成(2019)

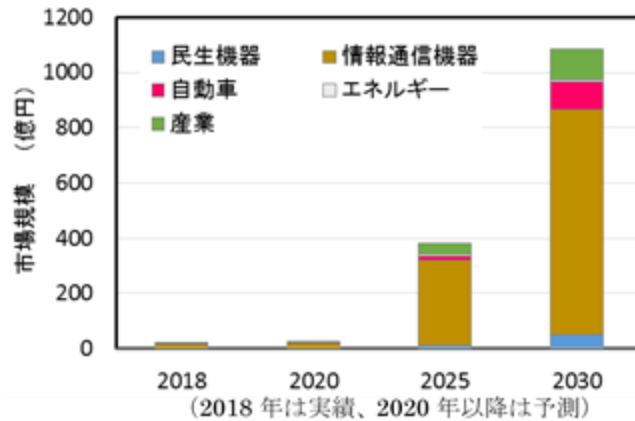


図 1-5 GaN デバイスの適応分野別市場予測

出典:「2019 年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」  
(富士経済、2019)を基に NEDO 作成 (2019)

### 1.3.3. 国際的なポジション

市場におけるメーカーシェアに関して、図 1-6 にパワーデバイスの 2018 年のメーカーシェアを、図 1-7 にパワーモジュールの 2018 年のメーカーシェアを示す。図 1-8 にパワー半導体用 Si ウェハの 2018 年のメーカーシェアを示す。パワーデバイス、パワーモジュールについては Si の製品が大部分であり、一部 WBG を含んでいる。我が国はそれぞれで上位にあり、パワーデバイスでは日本の上位 5 社で約 20%のシェア、パワーモジュールでは日本の上位 4 社で約 45%のシェアを有しており、Si ウェハでは日本の 2 社で約 33%のシェアを有している。パワーデバイスでは、欧米の規模の大きいメーカーに比べて、日本メーカーの規模は 1/3 以下であり、複数社が存在して対抗する構図となっている。また、欧州大手企業では Si の 300mm ラインによる生産を予定しており、今後のシェアが変わっていく可能性がある。

パワーデバイスのメーカーシェア  
(2018実績):1.7兆円(パワーIC除く)

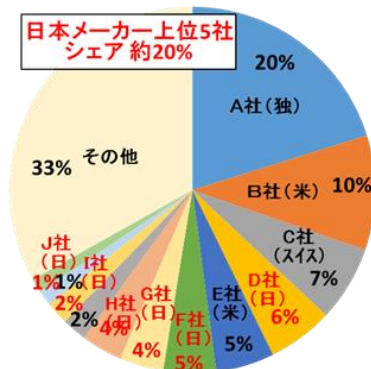


図 1-6 パワーデバイスのメーカーシェア

出典:「2019 年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」  
(富士経済、2019)を基に NEDO 作成 (2019)

パワーモジュールのメーカーシェア  
(2018実績):4,080億円

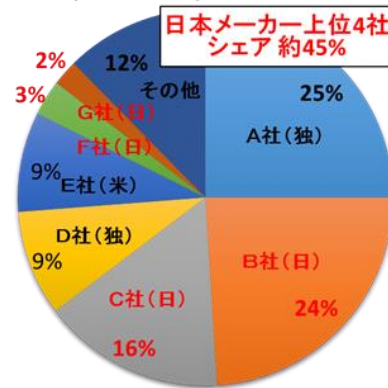


図 1-7 パワーモジュールのメーカーシェア

出典:「2019年版次世代パワーデバイス&パワーエレ関連機器市場の現状と将来展望」  
(富士経済、2019)を基に NEDO 作成(2019)

パワー半導体用Siウェハラのメーカーシェア  
(2018年実績):1650億円

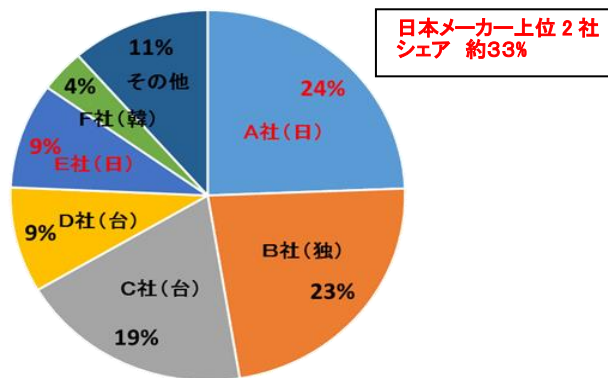


図 1-8 パワー半導体用 Si ウェハラのメーカーシェア

出典:「Status of the Power Electronics Industry Market and Technology Report, 2019 edition」  
(Yole Développement, 2019)を基に NEDO 作成(2019)

図 1-3 で示したように WBG 半導体の市場規模がまだ小さいが、SiC デバイスと SiC ウェハラの 2018 年のメーカーシェアを図 1-9、図 1-10 に示す。SiC デバイスは日欧米でシェアを分け合う状況であり、SiC ウェハラでは米国が 80%以上のシェアを有しており、寡占状態にある。

SiCデバイスのメーカーシェア  
(2018年実績): 390億円

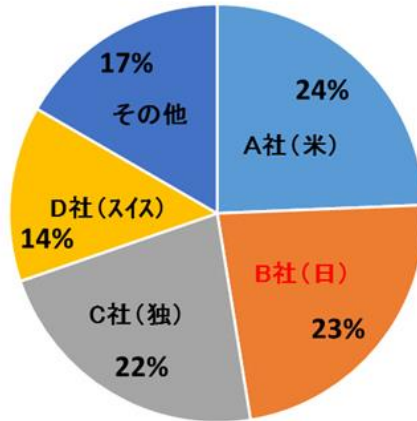


図 1-9 SiC デバイスのメーカーシェア

出典:「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」  
(富士経済、2019)を基に NEDO 作成(2019)

SiCウェハのメーカーシェア  
(2018年実績): 137億円

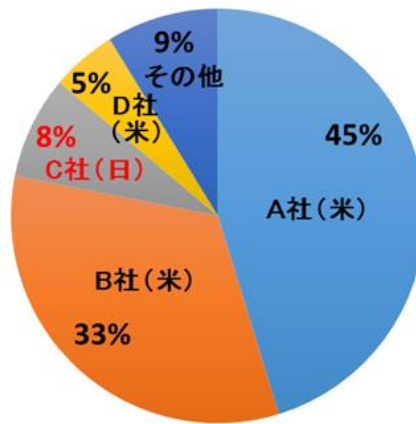


図 1-10 SiC ウェハのメーカーシェア

出典:「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」  
(富士経済、2019)を基に NEDO 作成(2019)

#### 1.3.4. 海外状況まとめ

パワーエレクトロニクス技術は、CO<sub>2</sub> 排出削減に繋がる省エネルギー化の重要なコア技術との位置付けられることもあり、日本、米国、欧州では国家レベルでの研究開発が継続的に行われている、Si のパワー半導体が普及する中で次世代のパワー半導体となる SiC、GaN 等 WBG 半導体の研究開発に関して、基板、デバイスから応用技術まで幅広い取組みが行われている。

米国では、直近の主な活動として NGPEMII (The Next Generation Power Electronics Manufacturing Innovation Institute) による PowerAmerica、DOE (エネルギー省: Department of Energy) による SWITCHES (Strategies for Wide Bandgap, Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems) 及び PNDIODES (Power Nitride Doping Innovation Offers Devices Enabling SWITCHES)、さらに、ニューヨーク州と企業による NY-PEMC (New York Power Electronics Manufacturing Consortium) 等がある。PowerAmerica は 2015 年に設立され、DOE が約 7000 万ドル出資、パートナー企業とノースカロライナ州からも出資され、2019 年時点で総額約 1 億 5000 万ドルのファンディングを実施している。SiC 製造プロセス技術を中心に基板、デバイスから応用までの垂直統合型の研究開発が行われている。モーター、電力システム、再生エネルギー、電気自動車、防衛装備等のアプリケーションを想定しており、人材育成も取り組まれている。SWITCHES は 2014 年から 2020 年 3 月まで実施された DOE 出資の約 3200 万ドルのプロジェクトで、GaN の基板、デバイス及び SiC、ダイヤモンドのデバイス技術の研究開発が行われた。NY-PEMC は 2014 年に発表され、ニューヨーク州が約 1 億 3500 万ドル、民間企業が約 3 億 6500 万ドル出資した総額約 5 億ドルの産官学コンソーシアムである。6 インチの SiC 製造プロセスを主体にデバイス及びアプリケーションでの性能向上を目指した研究開発が行われ、コンソーシアムメンバーによる製品化を行う段階にある。

欧州では、欧州連合 (EU) の科学技術政策のフレームワークプログラムの中でいくつかのプロジェクトが実施されている。例えば、第 7 期フレームワークプログラムの SPEED (Silicon Carbide Power Technology for Energy Efficient Devices) は 2014 年から 4 年間実施された EU 出資の約 1230 万ユーロのプロジェクトで、SiC 基板、デバイス製造技術等の研究開発が行われた。また、欧州のパワーエレクトロニクス関連の代表的なコンソーシアムである ECPE (European Center for Power Electronics) では、欧州のフレームワークプログラムにおいてパワーエレクトロニクスの研究開発を統合する役割を担っている。

中国では、中国製造 2025 において半導体分野の研究開発投資を行っており、半導体メモリと並んでパワー半導体 (SiC、GaN) の国内企業への支援政策を進めている。

タイトル	概算予算	内容	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21~	
日本 SIP パワエレ	110億	・SiC/GaN基盤技術 ・将来技術	5年								
日本 METI パワエレ	110億	・SiC応用、極限Si ・GaN実用化	6年								
米国 Power America	73.5億 (158億)	・SiC製造プロセス ・垂直統合型 ・人材育成		5年+a							
米国 NY-PEMC	142億 (525億)	・6インチSiC量産 ・ファンダリー型	5年								
米国 SWITCHES	33.6億	・GaN基板・デバイス ・SiC、ダイヤモンド	6年								
米国 PNDIODES	17.9億	・GaNイオン注入 ・GaNゲート絶縁膜				4年					
欧州 SPEED	15.3億	・SiC基板/エピ ・高耐圧SiCデバイス	4年								
欧州 Wi n SiC4AP (33.5億)	4.96億	・SiCインバータ ・市場導入				3年					
欧州 REACTION	12.4億 (62億)	・SiC 8インチ パイロットライン					3.5年				
中国 先端SiC	31億	・EV用モータ・充電器 (SiC使用)				3年					

(1\$=¥105, 1€=¥124, 1RMB=¥15.69として換算)

図 1-11 パワーエレクトロニクス関係のプロジェクト等のまとめ

### 1.3.5. 今回の事業の位置づけ

NEDO では、「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」において様々なパワーエレクトロニクスの研究開発を推進している。今回の事後評価で対象とする事業は、そのうち下記の3項目である。

#### 研究開発項目①(10) 新世代 Si パワーデバイス技術開発

Si パワーデバイスに関し、従来技術の延長線上にない革新的な手法を用いることで、現状の Si パワーデバイスの性能限界突破を行う。

#### 研究開発項目③(2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

次世代パワエレの有望半導体の一つである SiC については、新材料パワー半導体を各種アプリケーションに適用するため、モジュール化のための材料、設計技術、実装技術等の開発を行い、パワーモジュール開発及びシステムの試作、動作実証を行う。

#### 研究開発項目④ 新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発

次世代パワエレの新材料として GaN に着目し、実用化を加速すべく大口径バルク GaN 結晶の高品質・低コスト化技術開発と新材料(GaN)の新規用途開拓に向けた共通基盤技術開発および要素技術開発を行う。



なお、本事業の基本計画の全体構成は図 1-12 の通りであり、研究開発項目①(1)～(9)、研究開発項目②、研究開発項目③(1)については既に評価を終えている。

<b>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</b>		
(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 (2) 大口径SiCウエハ加工技術開発 (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) (4) SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術 (5) SiCウエハ量産化技術開発 (6) 大口径SiCウエハ加工要素プロセス検証 (7) SiC高耐圧大容量パワーモジュール検証 (8) 大口径対応デバイスプロセス装置開発 (9) 高熱部品統合パワーモジュール化技術開発	2010～2014年度	評価済
<b>(10) 新世代Siパワーデバイス技術開発</b>		2014～2019年度
<b>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)</b>		
(1) SiCパワーデバイスを用いたデータセンター用サーバー電源技術開発 (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 (3) 次世代SiC電力変換器基盤技術開発	2009～2012年度	評価済
<b>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</b>		
(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	2015～2016年度	評価済
(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	2014～2019年度	
<b>研究開発項目④ 新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発</b>		
(1) パワーデバイス用新材料ウエハの革新的製造技術の開発	2017～2019年度	
(2) 新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進	2017～2019年度	

図 1-12 本事業の基本計画の全体構成



## 2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 2.1. NEDO が関与することの意義

これまで述べてきた通り、パワーエレクトロニクスは、鉄道・自動車・産業機械・家電など生活に身近なあらゆるところに適用される技術であり、その高性能化はあらゆるところの省エネに繋がり、低炭素社会実現の鍵となる技術である。

また、パワーエレクトロニクス関連市場は、現在 6 兆円に対し、2030 年には 20 兆円まで拡大する見込みである。成長市場で優位性を確保し、経済成長に繋げることは重要である。本事業の成果により、半導体デバイス関連の国内企業群が国際的に大きい存在感を有するほか、自動車産業をはじめとする電機産業以外の産業競争力強化にも大きい貢献が期待される。

海外では、NGPEMII (The Next Generation Power Electronics Manufacturing Innovation Institute) による Power America や NY-PEMC をはじめとした大型の国家プロジェクトが次々に組成され、本分野の推進を強化している。また、ECPE をはじめとしたコンソーシアム活動も盛んである。日本は多くの有力企業を抱えている一方で、一企業だけで対抗することは困難になりつつある。従って、NEDO が関与し、本分野の研究開発を強力に推進することが重要になってくる。

### 2.2. 実施の効果（費用対効果）

#### 2.2.1. アウトカム効果

##### 【CO<sub>2</sub>削減効果】

現状の Si インバータを SiC 等の次世代のインバータに置き換えることによって、もしくは現状インバータ化していない用途等のインバータ化率を向上させることによって、CO<sub>2</sub> 排出量の大幅な削減が可能になる。適用対象分野として、EV/HV、産業機器、コンピュータ関連、無停電電源、太陽光発電(分散電源用インバータ)、インバータ化率向上のアプリケーションを想定し、それぞれの適用率から削減量を算出した結果、2030 年には CO<sub>2</sub> 排出量を約 1,515 トン削減可能と見積もっている。

##### 【経済効果】

再生可能エネルギーの更なる普及、産業機器・家電・次世代自動車等の一層の省エネ化に伴い、パワーエレクトロニクス関連の世界市場は大きな伸びが期待されている。パワーエレクトロニクス関連の市場は、現在 6 兆円に対し、2030 年には 20 兆円まで拡大する見込みであり、本事業の成果は 20 兆円市場の創成に貢献するものである。

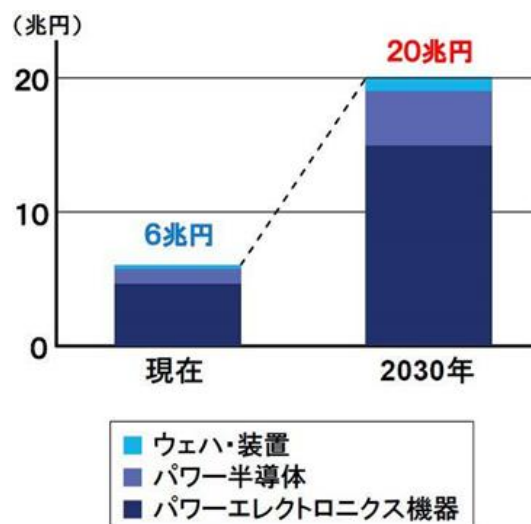


図 1-13 パワエレの世界市場規模

【出典】平成 25 年 9 月 13 日 第 114 回総合科学技術会議 資料 5

### 2.2.2. 実施の効果（費用対効果）

費用対効果としては、2014 年度から 2019 年度までの 6 年間の総事業費 107 億円に対し、2030 年度における売上は、パワエレ関連市場で約 4 兆円、SiC デバイス市場で約 860 億円と予測している。同じく 2030 年度における CO<sub>2</sub> 削減効果としては、パワー半導体の高度化により CO<sub>2</sub> 排出量 1,515 万トンの削減を見込んでいる。

#### プロジェクト費用の総額

・2014年度～2019年度事業費計： 107億円

#### 売上予測（2030年）

- ・パワエレ関連市場： 4兆円（20兆円市場の20%獲得）
- ・SiCデバイス市場： 860億円（4,300億円市場の20%獲得）

#### CO<sub>2</sub>削減効果(2030年)

- ・パワー半導体の高度化により、CO<sub>2</sub>排出量1,515万トン削減

※対象としたアプリケーションは、EV/HV、産業機器（インバータ代替）、コンピュータ関連、無停電電源、太陽光発電（分散電源用インバータ）、インバータ化率向上

## II. 研究開発マネジメントについて

### 1. 事業の目標

研究開発項目①(10)の目標等は下記の通りである。

<2016年度末の中間目標>

#### 研究開発項目① (10) 新世代Siパワーデバイス技術開発

テーマ	目標	根拠
新世代Si-IGBTと 応用基本技術の研究開発	IGBTスケールリング則の実証 (k=3のIGBTの性能実証) スケールリングIGBT用の駆 動・保護技術、低インダク タンスPKG技術(含む放熱)、 耐ノイズ技術の確立	独自のスケールリング構造の開発、適用 低電圧・高速ゲートドライブ回路技術、絶縁・ 高速結合技術、耐ノイズ実装回路、高精度評価 技術を開発・適用

<2017年度末の最終目標>

#### 研究開発項目① (10) 新世代Siパワーデバイス技術開発

テーマ	目標	根拠
新世代Si-IGBTと 応用基本技術の研究開発	大電流パワーモジュールの試 作と産業用実用化クラス変換 器実証、スケールリングIGBT コンセプトの連続性を確認	新世代Si-IGBTとゲートドライブ技術の高度化 により、国内の半導体産業ならびにパワーエ レクトロニクス機器の国際競争力を強化

なお、本テーマ(新世代Si-IGBTと応用基本技術の研究開発)については、今後「Si-IGBT」と略す。

研究開発項目③では、4つの大きなテーマを実施しており、それぞれの目標等は下記の通りである。上段の3テーマは、2016年度末の中間目標としてこの要素技術の確立を、2017年度末の最終目標はその実証を行うことである。最下段のテーマは、2019年度末の最終目標である。

#### 研究開発項目③ (2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

テーマ	目標	根拠
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	コスト30%削減、量産化工 数半減、サンプル供給期間 1/4のパワーモジュール開発	低コストかつ超短納期化により、顧客最適化 が必要な新エネルギー分野・EV分野・特殊イ ンバーター分野等のパワーモジュール市場を 牽引。
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	従来システムから損失1/3と なる昇圧コンバータレス PCUを用いた車載電動シス テム開発	EV市場でのSiCパワーデバイスの適用拡大に重 要となる高効率化を追求する新電動システム。
高出力密度・高耐圧SiCパ ワーモジュールの開発	耐圧6.5kV、出力密度が同耐 圧Siモジュール比2倍以上の パワーモジュール開発	SiCの高耐圧・高出力密度の特性を活かすこと で、鉄道分野の世界市場への更なる展開に期 待。
次世代パワーデバイスを用 いた発電電動機一体ター ボチャージャによる排熱 回収システムの研究開発	低速トルク大幅アップと高 速域での燃費向上の達成と、 実用化可能なレベルである ことの実証	発電電動機一体型ターボチャージャによりエ ンジンの排気ガスを電気エネルギーとして回 収し、そのエネルギーで発電電動機を駆動す ることにより大幅な省エネルギー化を図る。

なお、各テーマについては、今後そのテーマ名の一部を取り、「次世代パワーモジュール」「車載電動システム」「高耐圧 SiC パワーモジュール」「発電電動機一体ターボチャージャ」と略す。

研究開発項目④(1)の目標等は下記の通りである。

<2019年度末の最終目標>

#### 研究開発項目④(1) パワーデバイス用新材料ウエハの革新的製造技術の開発

テーマ	目標	根拠
パワーエレクトロニクス用大口径バルクGa <sub>N</sub> 結晶の実用化開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・貫通転位密度1000個/cm以下の4インチ単結晶の実証</li> <li>・6インチ用φ240mm大型オートクレーブの設計提案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・転位密度はSiCと同等以下が必要と推察。パワーデバイス作製には最低4インチが必要。</li> <li>・将来の6インチ結晶の実用化に向けた不可欠な設備。</li> </ul>

なお、本テーマ(パワーエレクトロニクス用大口径バルク GaN 結晶の実用化開発)については、今後「大口径バルク GaN 結晶」と略す。

研究開発項目④(2)の目標等は下記の通りである。

<2019年度末の最終目標>

#### 研究開発項目④(2) 新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進

テーマ	目標	根拠
新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進  <ul style="list-style-type: none"> <li>・成膜技術や放熱技術などの共通基盤技術</li> <li>・大容量高周波無線通信デバイス技術などの要素技術開発</li> <li>・革新的な用途開拓に関する可能性検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発した共通基盤技術の実用化見通しの明確化</li> <li>・新材料パワーデバイスを動作検証し、Si、SiC等と比較した競争優位性の明確化</li> <li>・革新的用途に関する要求仕様と実現可能性の明確化</li> </ul>	新材料パワーデバイスの市場を形成・牽引していくためには、単にSi、SiC系の代替のみならず、SiC等の材料では不可能な用途の開拓を見据え、新材料の特徴である高周波特性や放熱特性等を最大限に活かす研究開発が必要。 (以下の研究開発を推進) ①低不純物・高成長速度の次世代HVPE法による低価格・大電力Ga <sub>N</sub> パワーデバイス製造プロセスの研究開発 ②Ga <sub>N</sub> 物性を最大限に発揮させる最適なパワーデバイス構造の確立とその工業的な製造プロセスに繋がる絶縁膜形成技術の研究開発 ③高効率大容量無線通信を実現する高周波Ga <sub>N</sub> HEMTの研究開発 ④窒化ガリウムパワーデバイス高出力化のための高放熱構造の研究開発

なお、各具体的研究開発テーマについては、今後そのテーマ名の一部を取り、「次世代 HVPE 法」「絶縁膜形成技術」「高周波 GaN-HEMT」「高放熱構造」と略す。

## 2. 事業の研究計画

### 2.1. 研究開発の内容

#### 2.1.1. 研究開発スケジュール

研究開発項目①(10)については、2014～2016年度の3年間の事業として計画し、必要に応じて延長等を行うこととしていた。具体的には、パワーデバイスのスケールリング則という新しい概念の原理実証を指標とし、継続性を判断することとしていた。

2015年度末時点で、シミュレーションのみならず実証データとしてスケールリング則の成立の見込みが確認できたため、さらに2017～2019年度の3年間の事業延長を実施した。

研究開発スケジュールの詳細は図2-1の通りであり、最初の3年でスケールリング則の原理実証を行い(スケールリング係数:k=3)、2017年度以降は、微細化の程度を大きくし(k=5)、更なる性能向上の可能性の追求等を行った。

研究開発項目③(2)の上段3テーマについては、2014～2019年度の最大6年間の事業として計画し、大きくは3つのテーマを推進している。そのうち、「車載電動システム」及び「高耐圧SiCパワーモジュール」については当初6年の事業を予定していたが、事業化加速等を目的として、期間を4年に短縮することとした。

研究開発項目③(2)の最下段のテーマは、研究開発項目③(1)の先導研究において、実用化の見通し等の観点から外部有識者による評価等を踏まえ、実用化に向けた継続的な取組が必要な研究開発内容の絞り込み予定であったが、実用化に向けた取組が必要であると判断されたため、2017～2019年度の3年間の助成事業として引き続き研究開発を行った。

研究開発項目①(10)および研究開発項目③(2)の研究開発スケジュールの詳細は図2-1の通りである。

研究開発項目①(10) 新世代Siパワーデバイス技術開発

テーマ	2014	2015	2016	2017	2018	2019
【新世代IGBT試作WG】	高耐圧PINダイオード試作 ▽	IGBT(k=3)設計・試作・評価 ▽	統合 ▽	高耐圧3kV IGBT設計・試作・評価 ▽	IGBT(k=5)設計・試作・評価 ▽	
新世代Si-IGBTと 応用基本技術の研究開発	ノイズモデル 構築 ▽	ドライブ回路 設計 ▽	IC/モジュール 試作・評価 ▽	ドライブICを用いた動作実証 モジュール ▽	インバータ ▽	連続運転 ▽
【ドライブ回路技術WG】						

研究開発項目③(2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

テーマ	2014	2015	2016	2017	2018	2019
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	アダプティブインターフェイス技術の 検討・開発 ▽	各分野への 適用検証 ▽		新システムに よる次世代モジ ュール開発 ▽		
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	モータ/モジュール/ウエハの 要素技術の検討 ▽	要素技術の 試作・確認 ▽		車両搭載 実験 ▽		当初6年の計画を 4年に期間短縮
高出力密度・高耐圧SiC パワーモジュールの開発	基本仕様 検討 ▽	主回路 設計 ▽	モジュール試作 動作検証 ▽	連続動作 試験 ▽		当初6年の計画を 4年に期間短縮
次世代パワーデバイスを用いた発電電動一体ターボ チャージャによる排熱回収 システムの研究開発			先導研究 ③(1) →	SiCモジュール/インバータ/一体のターボチャージャ 一次試作 ▽	二次試作 ▽	システム評価 ▽

図2-1 研究開発スケジュール



研究開発項目④(1)については、内閣府「SIP/次世代パワーエレクトロニクス」にて研究開発を推進していたが、研究開発が順調に推移し、実用化に近づいてきたため、SIPより事業の移管を行い、2017～2019年度の3年間の助成事業として計画した。

研究開発項目④(2)については、2017～2019年度の3年間の事業として計画した。

研究開発項目④(1)および④(2)の研究開発スケジュールの詳細は図2-2の通りである。

#### 研究開発項目④(1) パワーデバイス用新材料ウエハの革新的製造技術の開発

テーマ	2014	2015	2016	2017	2018	2019
パワーエレクトロニクス用大口径バルクGaN結晶の実用化開発	研究環境整備▽	内閣府SIPにて推進 2-in 要素技術開発▽		2in結晶成長▽	4in結晶成長▽	6inオートフレイブ設計▽

#### 研究開発項目④(2) 新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進

テーマ	2014	2015	2016	2017	2018	2019
新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進		①次世代HVPE法 (共通基板技術/成膜技術)		装置 成長 立上▽ 実験▽	装置 成長 改良▽ 実験▽	大口 成長 径化▽実験▽
・成膜技術や放熱技術などの共通基盤技術		②絶縁膜形成技術 (共通基板技術/成膜技術)		プロセス解析▽	試作・動作実証▽	
・大容量高周波無線通信デバイス技術などの要素技術開発		③高放熱構造 (共通基板技術/放熱技術)		GaN on ダイヤ検討▽	デバイス 設計・試作▽	評価・検証▽
・革新的な用途開拓に関する可能性検証		(可能性検証/用途開拓)		市場調査▽	コンポーネント 要求仕様▽	デバイス 要求仕様▽
		④高周波GaN HEMT (要素技術/高周波無線)		基礎検討▽	開発・設計▽	構造最適化▽

図2-2 研究開発スケジュール

## 2.1.2. プロジェクト費用

2014年度から2019年度のプロジェクト費用は、表2-1の通り。少額で実施している調査事業や人材育成事業及び革新アプリについてはその他の予算として総額を記載している。

表2-1 プロジェクト費用

(百万円)

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	合計
<b>研究開発項目① (10)</b>								
新世代Siパワーデバイス (Si-IGBT)		857	740	680	400	400	329	3,406
<b>研究開発項目 ③ (2)</b> 応用システム開発 (SiC)	次世代パワーモジュール <モジュール>	531	789	489	447	—	—	2,256
	車載電動システム <システム>	69	493	384	278	—	—	1,224
	高耐圧SiCパワーモジュール <モジュール>	671	667	363	495	—	—	2,196
	発電電動一体ターボチャージ <システム>	—	—	—	70	40	30	140
<b>研究開発項目 ④</b>	④(1) 大口径バルクGaN結晶	—	—	—	177	173	110	460
<b>新材料 (GaN)</b>	④(2) 新規用途開拓 (4テーマ合計)	—	—	—	164	137	80	381
<b>その他</b> (GaN先導研究、調査、人材育成、革新アプリ)		32	258	263	23	30	25	631
<b>合計</b>		<b>2,159</b>	<b>2,947</b>	<b>2,179</b>	<b>2,054</b>	<b>780</b>	<b>574</b>	<b>10,694</b>

## 2.2. 研究開発の実施体制

本事業は以下に示す実施体制にて推進した。研究開発項目①(10)の実施体制を図 2-3 に、研究開発項目③(2)の実施体制を図 2-4 に、研究開発項目④の実施体制を図 2-5 に示す。また、その他事業の実施体制を図 2-6 に示す。

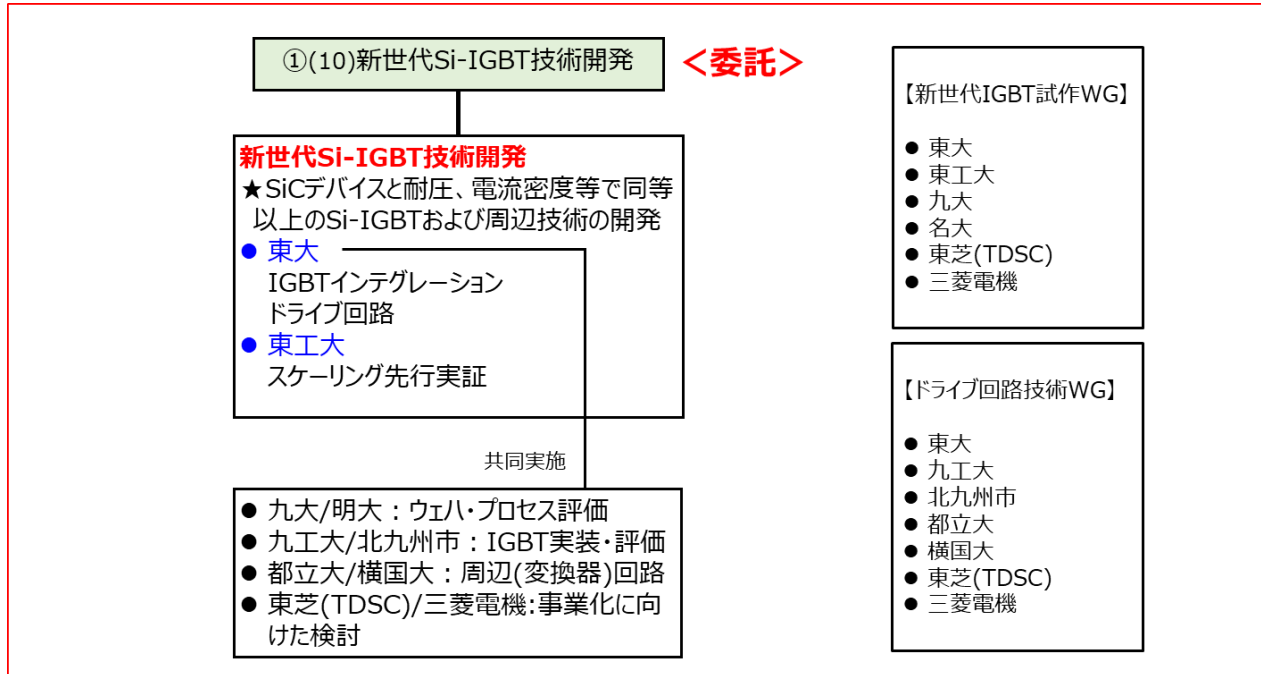


図 2-3 研究開発項目①(10)実施体制

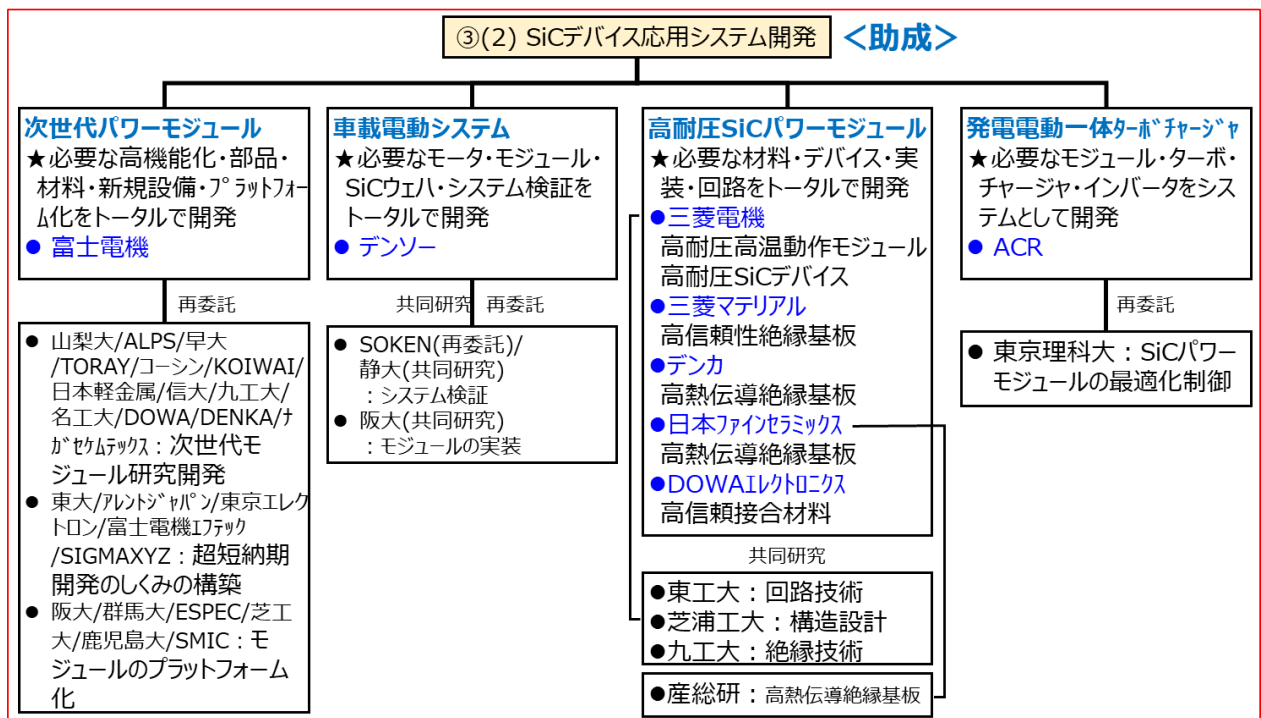


図 2-4 研究開発項目③(2)実施体制



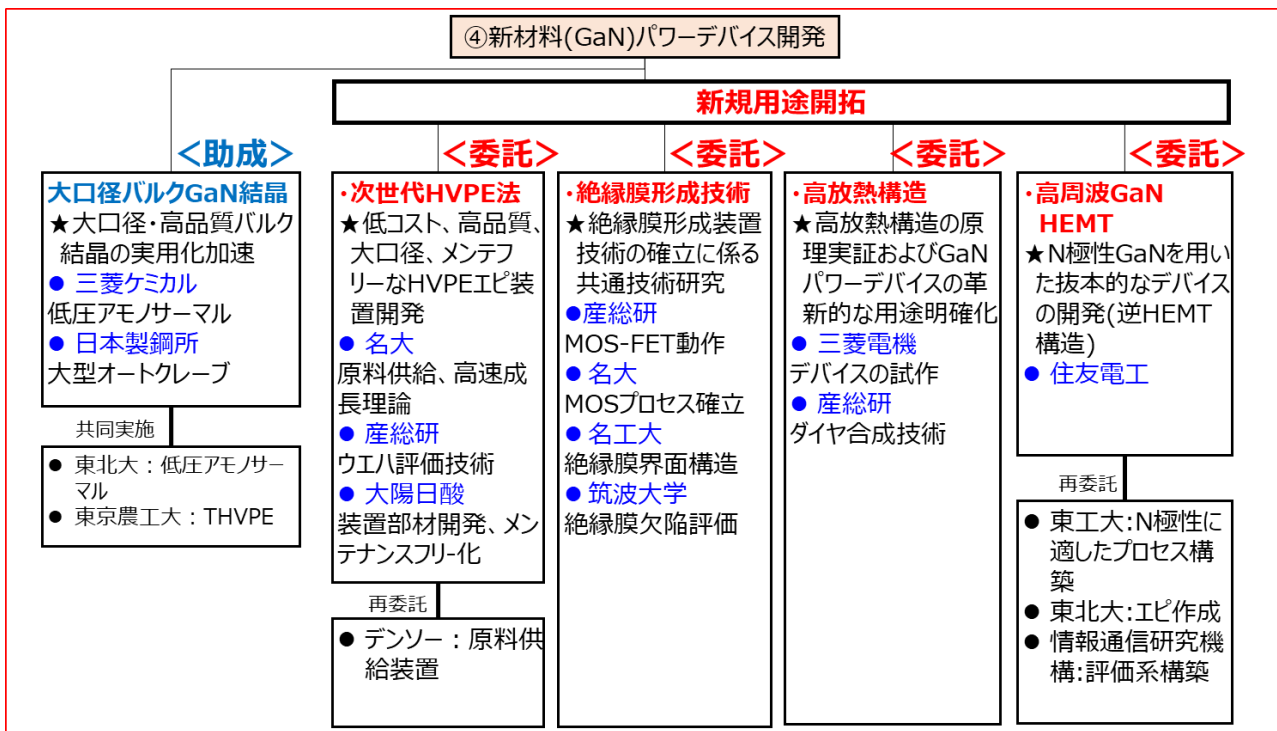


図 2-5 研究開発項目④実施体制

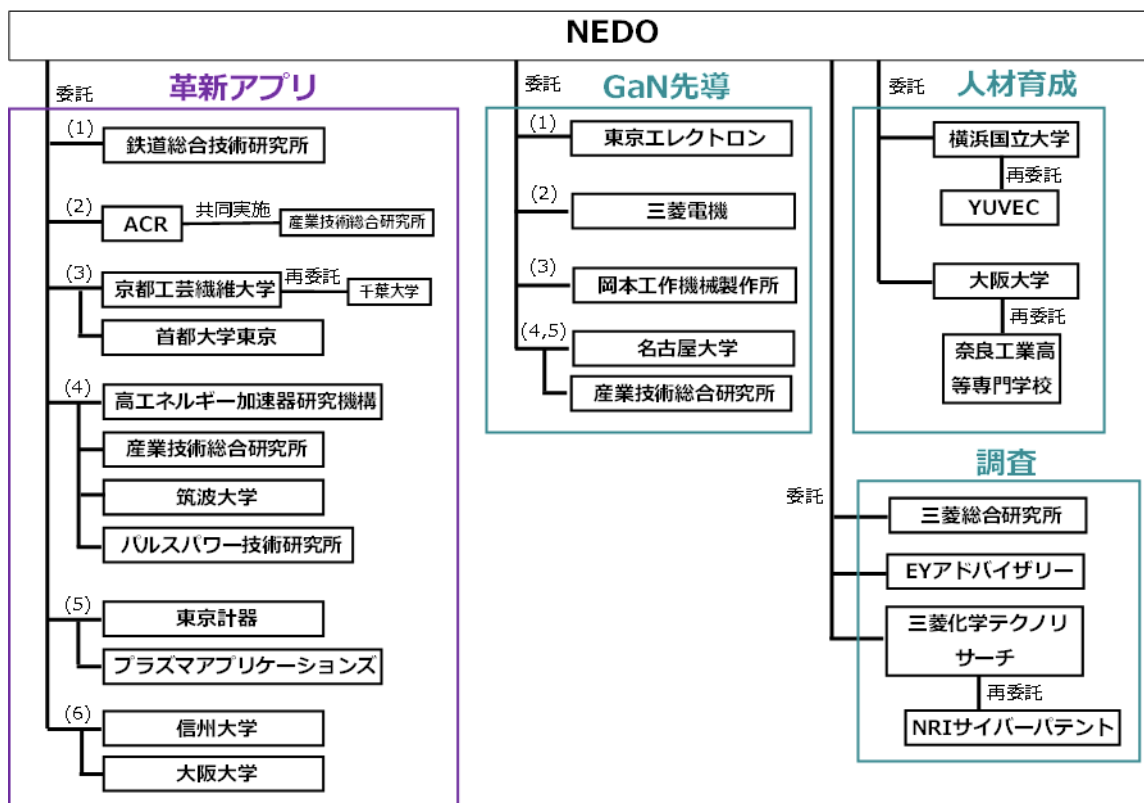


図 2-6 その他事業の実施体制

### 2.3. 研究開発の運営管理

本事業は「パワーエレクトロニクス」という共通の研究対象のもと、多岐にわたる研究開発を実施している。従って、有識者による定期的な集団指導体制を構築し(プロジェクト推進委員会の設置)、様々な観点から定期的に助言等をもらいながら推進することとした。プロジェクト推進委員会は年2回のペースで実施しており、2~3回に1回の頻度で研究現場において委員会を開催し、有識者の理解を深めた上でコメント等をもらうようにしている。2014~2016年度までのマネジメント体制を図2-7に示す。

研究開発項目①(10)(Si-IGBT)については、実施者でもある東京大学の平本教授をリーダーとして、事業を推進している。

研究開発項目③(SiC デバイス応用システム開発)については、基本的には各実施者内にリーダーを設置しているが、事業全体を俯瞰し、プロジェクト推進委員会より高い頻度で指導等を行うべく、千葉大学の佐藤教授をプロジェクトリーダーとして事業を推進している。

人材育成等の少額で実施している事業については、基本的には NEDO 単体でマネジメントを行っているが、必要に応じて外部有識者による委員会等により、実施内容の検討等を行っている。

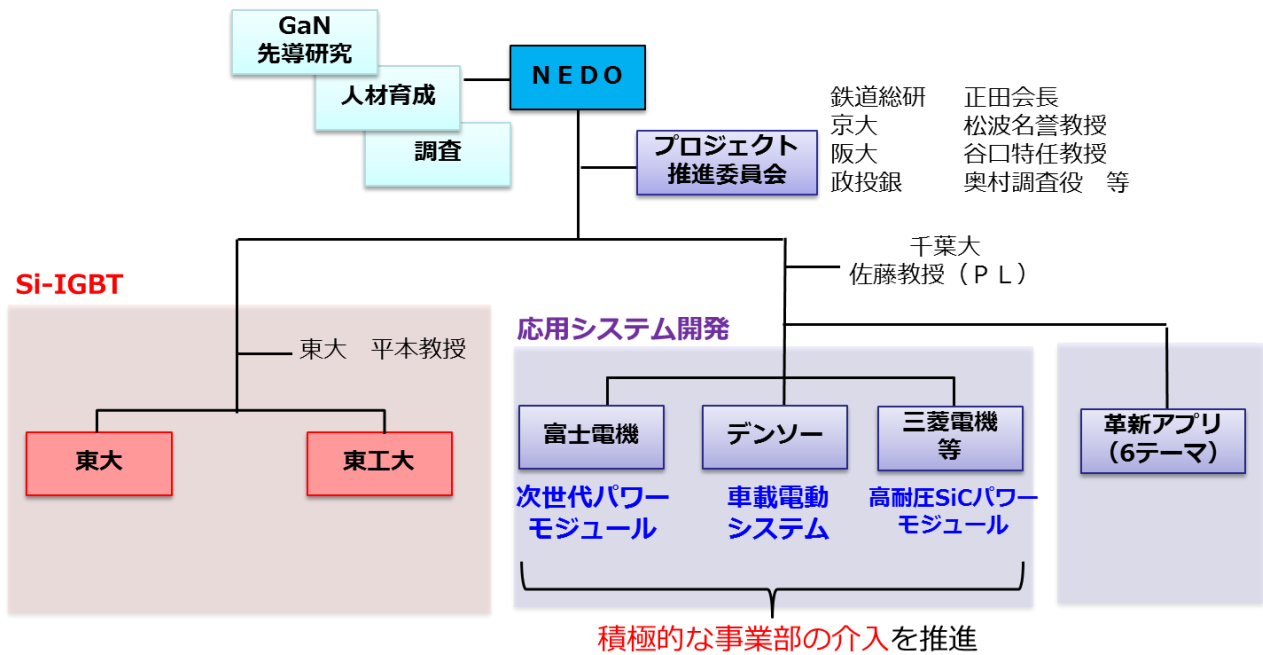


図 2-7 マネジメント体制 (2014~2016 年度)

2017 年度からは千葉大学の佐藤教授を事業全体のプロジェクトリーダーとして事業を推進している。マネジメント体制を図 2-8 に示す。

研究開発項目④(新材料(GaN)パワーデバイス開発)についても、各実施者内にリーダーを設置している



## 2.4.2. 知財マネジメント

知財は、プロジェクト実施後の実用化に向けた出口戦略を構築・実現するにあたり鍵を握るとともに、戦略的な取組を関係者の合意の下で進める必要があり、その実現に向けた的確なマネジメントの実施が不可欠である。このため、本プロジェクトでは NEDO プロジェクト知財基本方針を適用し、テーマ毎に実施者間での知財合意書の作成や知財運営委員会の設置を行った。

助成事業については、実施者主体で実施する事業であるため、知財マネジメント方針の適用対象外とするのが一般的であるが、多数の大学や企業が参加するテーマであることに鑑み、NEDO プロジェクトで初めて知財マネジメント方針の適用対象とした。

また、知的財産権等に関する戦略として、特許に関しては国際的視野に立って戦略的にパワエレ分野の主導権を取るべく、積極的に国内・海外ともに出願することを基本とした。ただし、以下の場合、数々の成果技術について公開されることによるデメリットの方が大きいと判断し、戦略的に特許取得を見送り、ノウハウとして秘匿する場合がある。

- ・既に強力な基本特許を出願済みの技術領域
- ・事業開始前に重要要素技術に関する強力な特許網構築済みの技術領域
- ・製品を分解しても解明不能な技術に関する技術領域（材料・プロセス等）

知財運営委員会の運用としては、メンバーを各テーマの委託先および再委託先で構成し、プロジェクト期間中、毎月の運営会議時に必要に応じて同時開催多いときは月に 1 回、少なくとも半年に 1 回は開催して、知財の出願、他社知財の調査、ノウハウ指定について審議・認定等を実施した。

### 3. 情勢変化への対応

事業の推進しながら課題として見えてきたものがあれば、適宜その事業設計を行い、新テーマを追加してきた。2016年度までの詳細は表 2-2 の通り。

表 2-2 少額事業の概要と狙い(2014～2016年度)

～2016年度	概要	狙い
GaN先導研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ GaNパワーデバイス（特に<b>縦型デバイス</b>）実現に向け、技術課題等を整理。</li> <li>・ GaNパワーデバイスに関し、プロセス開発も含め<b>今後の技術的方向性を提示</b>することを目標とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ GaN材料を用いたパワーデバイスは一部商業化され始めているが、<b>GaNという材料が本来有しているポテンシャルを十分に発揮できていない</b>。</li> <li>・ 今後の本格研究を見据え、GaNパワーデバイス研究の注力の方向性を定める。</li> </ul>
人材育成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ パワエレの専門的な学習をしていない企業の研究者等を対象に、<b>座学のみならず実習も伴うセミナー</b>。</li> <li>・ <b>事業終了後の継続性</b>を保つための取組（e-ラーニング教材作成等）を併せて実施。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本事業を通じて基礎的な土台を固め、特に<b>SiCやGaNなどの新材料パワエレ</b>について、応用を推進できる人材育成を狙う。</li> </ul>
調査 (ロードマップ策定含む)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 一般的な技術動向や市場動向等の調査に加え、<b>アプリごとにパワエレ適用に係るロードマップ</b>を策定。</li> <li>・ 現在対象としたアプリは、<b>鉄道、道路交通、電力安定化、産業（産業ロボット、医療機器）</b>。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ロードマップ策定を通じ、以下の実現を目指す。             <ol style="list-style-type: none"> <li>①現在実施している<b>プロジェクトの妥当性</b>等の確認、<b>今後立案すべきプロジェクト等の検討</b>。</li> <li>②デバイスメーカー、機器メーカー、機器ユーザー等の各レイヤー間で、情報交換や議論を行う場を設け、<b>関係者の連携を強化</b>。</li> </ol> </li> </ul>

また、2017年度以降の取組の詳細を表 2-3、表 2-4 に示す。

表 2-3 2017年度以降の取組(1)

動向・情勢の変化	対応の概要	対応の狙い	
次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海外メーカーがM&amp;A等で開発期間を短縮</li> <li>・ 研究開発が順調に進展</li> </ul>	<p>「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」と「高出力密度・高耐圧SiCパワーモジュールの開発」については、<b>当初6年の計画を4年に期間短縮</b></p>	<p>研究開発の進捗が良いことから、<b>事業化の加速</b>を狙い、プロジェクトを早期卒業させた。</p>
新材料(GaN)パワーデバイスの実用化加速技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 新材料(GaN)パワーデバイスの国家的研究開発が進展</li> <li>・ SIP/次世代パワエレの新材料(GaN)ウェハの要素技術開発に目処</li> <li>・ GaN先導研究にて有望テーマを発掘</li> </ul>	<p>GaN先導研究を受け、国プロ立ち上げ  <b>(1) 新材料ウェハー（助成）</b>            実用化が近づいてきたため、SIPよりテーマ移管  <b>(2) 新規用途開拓（委託）</b>            次世代HVPE法、絶縁膜形成技術、高放熱構造、高周波GaN HEMT</p>	<p>(1)大口径・高品質バルクGaN結晶の<b>実用化加速</b>。            (2)新たな用途開拓を見据えて、その実現に必要な<b>共通技術、要素技術を開発</b>する。</p>

表 2-4 2017 年度以降の取組 (2)

	動向・情勢の変化	対応の概要	対応の狙い
特許出願	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2016年度までは国内特許出願のみ</li> <li>・パワーエレクトロクス分野の国際的競争が激化</li> </ul>	<p>知財戦略の見直しを行い、<b>海外における特許出願も積極的に実施した。</b> (2016～2019年度で20件の海外出願達成)</p>	<p>海外特許出願による国際競争力の強化</p>
調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Si-IGBT, SiC, GaNの国際研究開発が継続的に進展</li> <li>・諸外国の動向把握の必要性増大</li> </ul>	<p>国際学会(ECSCRM/ICSCRM, ECCE, APEC, 等)に積極的に参加(12回)し、材料・デバイス・モジュール・応用の各分野に渡って<b>研究開発の動向を調査</b></p>	<p>米国・中国等の研究開発の動向を踏まえ、各種ウェハー技術、デバイス技術、ドライブ技術、モジュール技術の<b>目標設定や目標の妥当性確認等に活用した。</b></p>
人材育成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・業界／企業におけるパワエレ人材育成のニーズが拡大</li> <li>・人材育成事業が<b>大変好評</b>で事業終了後の継続希望あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・関東・関西に加え<b>名古屋地区</b>での開催を追加(トータルで489名が受講)</li> <li>・e-ラーニング教材の作成や書籍化</li> <li>・事業終了後は<b>自主運営</b>に切替え有料での講座を開設して<b>人材育成の取り組みを継続</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開催地区を増やすことで、<b>参加しやすい環境を作り</b>、SiCやGaNなどの新材料パワエレについて、応用を推進できる<b>人材の底上げを狙う。</b></li> <li>・事業終了後も<b>日本のパワエレ技術者の継続育成を図る。</b></li> </ul>

#### 4. 中間評価への対応

中間評価での主な指摘事項とその後の対応について、表 2-5 示す。

表 2-5 中間評価での主な指摘事項と対応

	主な指摘事項	対応
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベンチマークとして単に欧米の国家 P J だけとの比較がされているが、それは国際動向のほんの一端であり、それらを取り巻く産業情勢をより正確に把握しておく必要がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海外 P J 動向のみならず、個別の企業の動向も含めた産業情勢を把握した上で研究開発を行った結果、目標の見直し等に繋がった。</li> <li>【情報収集回数 (2017～2019年度)】 企業37回、大学36回、研究機関15回、業界団体5回、学会参加23回 (内、国際学会12回)、等</li> <li>・各種調査事業も活用し幅広い情報収集に努めた。</li> <li>・パワエレシンポジウムにて応用分野から見たパワエレへの期待を実施者とも共有し、研究や事業化を加速。</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・競合相手、特に海外メーカーはM&amp;Aで開発期間を大幅に短縮しているため、本PJにおいても更なる開発スピードの向上が求められる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Si-IGBTテーマでは原理検証ができたことを受け、早期事業化を促し、企業の事業計画に反映した。</li> <li>・一部のテーマの事業期間を6年から4年に短縮するなど、スピード向上に向けた取組を実施。</li> <li>・新材料GaNウエハテーマは、要素技術開発に目途が付いた段階で内閣府 S I P から本プロジェクトに移管し、実用化を強力に助成する体制とした(2017)。 → さらに、2018年末に予算前倒し等を行うとともに、6インチ結晶成長オートクレーブの設計提案目標を引き上げ、量産化を加速。</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SiCパワエレの今後のさらなる普及には、応用分野の発掘と拡大が重要である。そのためには、SiCウェハーの更なる高品質化、低コスト化も重要な課題である。デバイス自体のコストについては、一部企業で検討されているが、全体としてはまだ検討が不十分である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低コスト化等の普及に向けた課題は、実施者毎の事業部門との会議等にて更なる検討を行い低コスト化に繋がれた。 → <b>実施者報告を参照</b></li> <li>・SiCモジュールのサンプルを潜在顧客に提供し、応用分野の発掘を推進。</li> <li>・NEDO調査事業で新材料ウエハのコストトレンドも調査。</li> </ul>

## 5. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義及び将来産業への波及効果等について、研究開発項目①(1)から(9)については、外部有識者による研究開発の中間評価を2012年度、事後評価を2015年度に実施し、研究開発項目①(10)については、中間評価を2016年度、事後評価を2020年度に実施し、研究開発項目②については、事後評価を2013年度に実施し、研究開発項目③については、中間評価を2016年度、事後評価を2020年度に実施し、研究開発項目④については、事後評価を2020年度に実施する。



### III. 研究開発成果について

#### 1. 事業全体の成果

##### 1.1. 事業全体の成果の概要

電気エネルギー生成方法の多様化は、資源枯渇及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)、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(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及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。

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、各種材料のウェハー、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。

本事業では、既存分野を中心に様々な市場・用途に採用されており市場占有率が2020年時点でも90%以上を占めるSiと次世代パワエレの有望半導体の一つであるSiCおよび次世代パワエレの新材料としてGaNの3つのパワー半導体材料に着目してパワーエレクトロニクス技術の高度化に取り組んできた。表1-1に本事業の代表的な成果の概要を示す。



表 1-1 本事業の代表的な成果の概要

研究開発項目	目標	成果の概要
①(10)新世代Siパワーデバイス技術開発<委託>	Siの性能限界を突破し、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パワーデバイスの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<b>世界初、5V(従来15V)駆動の高耐圧(3kV)Si-IGBT</b>試作し、デジタルゲート制御により特性改善を達成</li> <li>・<b>スケールリングIGBTコンセプトの連続性を確認</b></li> <li>・5kW 3相インバータの連続運転し、<b>産業用実用化クラス変換器を実証</b></li> </ul>
③(2)次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発<助成>	SiCパワー半導体モジュール化のための材料、設計技術、実装技術等の開発を行い、パワーモジュール開発およびシステムの試作、動作実証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新材料パワーデバイスを用いた<b>SiCパワーモジュール</b>とインバータ等を開発し、<b>特定用途の応用システムを実証</b>(産業機器、EV、トラック、等)</li> </ul>
④ 新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発<助成/委託>	低欠陥新材料(GaN)ウエハの革新的製造技術開発・実証とウエハ大口径化に関する革新的製造技術確立及び新規用途開拓の推進	<ul style="list-style-type: none"> <li>・4インチGaNウエハについて品質、コスト、量産性を兼ね備えた<b>革新的製造技術</b>を開発</li> <li>・6インチ用大型<b>オートクレーブ</b>について<b>目標を上回る設計を提案</b></li> <li>・新材料パワーデバイスの新規用途開拓に必要な要素技術、基盤技術を開発等</li> </ul>

研究開発項目①(10)新世代Siパワーデバイス技術開発では、Siの性能限界を突破し、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パワーデバイスの開発に取り組み、世界初、5V(従来 15V)駆動の高耐圧(3kV)Si-IGBT を試作しやすケーリング IGBT コンセプトの連続性を確認するなどの成果を得た。

研究開発項目③(2)次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発では、新材料パワーデバイスを活用したインバータ等の開発とそれらを適用した特定用途応用システムの試作・動作実証に取り組み、必要な要素技術とともに新材料パワーデバイスを用いたパワーモジュールとインバータ等を開発し、特定用途として産業機器、EV、トラック等向けの応用システムを実証する成果を得た。

研究開発項目④新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発では、低欠陥新材料(GaN)ウエハの革新的製造技術開発・実証とウエハ大口径化に関する革新的製造技術確立及び新規用途開拓の推進に取り組み、4インチGaNウエハについて品質、コスト、量産性を兼ね備えた革新的製造技術を開発するとともに、6インチ用大型オートクレーブについて目標を上回る設計提案を行った。また、新材料パワーデバイスの新規用途開拓に必要な要素技術、基盤技術を開発するなどの成果を得た。

## 1.2. 研究開発項目毎の主な成果と目標の達成度

本事業の研究開発項目毎の主な成果と目標に対する達成度を、以下に示す。いずれの研究開発項目についても、計画通りあるいはそれを上回る成果を得て、目標を達成している。

### 研究開発項目① (10) 新世代Siパワーデバイス技術開発 <委託>

テーマ	目標	主な成果と意義	達成度
新世代Si-IGBTと 応用基本技術の 研究開発	<中間 (2016年度末)> 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パワーデバイスの開発	・縦型MOSFETと新構造縦型IGBTを試作 →チャネル移動度> 300cm <sup>2</sup> /Vs達成 →従来比 <b>2倍以上の電流密度</b> 達成 ・ <b>3kV以上耐圧のダイオード特性</b> 確認	○
	<最終 (2019年度末)> 大電流パワーモジュールの試作と産 業用実用化クラス変換器実証、ス ケーリングIGBTコンセプトの連続 性を確認	・ <b>世界初、5V(従来15V)駆動の高耐圧 (3kV)Si-IGBT</b> 試作し、デジタル ゲート制御により特性改善を達成 ・ <b>5kW 3相インバータの連続運転し、 産業用実用化クラス変換器を実証</b> ・ <b>k=5 IGBT基本セル試作、 スケーリングIGBTコンセプトの連続性を確認</b>  【意義】 ・従来技術の延長線上にない新世代Siパワー デバイスを開発し、 <b>他の追従を許さない環境を 作った</b> ・ゲート駆動電圧をロジック回路レベルに低減 し、デジタルゲート制御を導入することで、 <b>AI制 御を可能とするパワエレ2.0への道筋</b> つけた	○

### 研究開発項目③ (2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発 <助成>

テーマ	目標	主な成果と意義	達成度
世界のパワエレを牽 引する <b>次世代パワー モジュール</b> 研究開発 と日本型エコシステ ムの構築	<中間 (2016年度末)> コスト30%削減、量産化工数半減、 サンプル供給期間1/4のパワーモ ジュール開発の要素技術開発	・パワー密度:1000kVA/L ・製品コスト: <b>約30%減達成</b> ・モジュールの新たな試作工法により <b>サンプル供給期間1/4に短縮</b> を実現 ・試作モジュールの <b>安定動作を実証</b> 【意義】 ・SiCモジュール応用製品の <b>普及拡大</b>	○
	<最終 (2017年度末)> 特定用途応用製品の動作実証	・100kwクラスのシステムでJCO8モード 実車走行時、PCU <b>損失1/3</b> を実現可 能なレベルの <b>損失低減効果</b> を実証 【意義】 ・ <b>実用化可能なレベルであることを実証</b>	○
SiCパワーデバイスを用いた超高効率 <b>車載 電動システム</b> の開発	従来システムから損失1/3となる昇 圧コンバータレスPCUを用いた車載 電動システム開発の要素技術開発	・100kwクラスのシステムでJCO8モード 実車走行時、PCU <b>損失1/3</b> を実現可 能なレベルの <b>損失低減効果</b> を実証 【意義】 ・ <b>実用化可能なレベルであることを実証</b>	○
	<最終 (2017年度末)> 特定用途応用システムの動作実証	・ <b>実用化可能なレベルであることを実証</b>	○
高出力密度・高耐圧 <b>SiCパワーモジュール</b> の開発	<中間 (2016年度末)> 耐圧6.5kV、出力密度が同耐圧Siモ ジュール比 <b>2倍以上</b> のパワーモ ジュール開発の要素技術開発	・耐圧6.5kV、出力密度が当社同 耐圧Siモジュール比 <b>2倍以上</b> の SiCパワーモジュールを達成 ・試作モジュールの <b>安定動作を実証</b> 【意義】 ・SiCモジュール応用製品の <b>普及拡大</b>	○
	<最終 (2017年度末)> 特定用途応用製品の動作実証	・ <b>実用化可能なレベルであることを実証</b>	○
次世代パワーデバイ スを用いた <b>発電電動 一体ターボチャジャ</b> による排熱回収シス テムの研究開発	<最終 (2019年度末)> 低速トルク(吸気圧力)の大幅アップ と高速域での燃費向上の達成と、実 用化可能なレベルであることの実証	・ <b>低速トルクアップ(吸気圧力100kpa)</b> ・ <b>車両燃費改善効率5%</b> の実現 【意義】 ・ <b>実用化可能なレベルであることを実証</b>	○

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

### 研究開発項目④ (1) パワーデバイス用新材料ウエハの革新的製造技術の開発 <助成>

テーマ	目標	主な成果と意義	達成度
パワーエレクトロニクス用大口径バルクGaN結晶の実用化開発	<b>&lt;最終 (2019年度末) &gt;</b> ・貫通転位密度1000個/cm <sup>2</sup> 以下の4インチ単結晶の実証 ・6インチ用φ240mm大型オートクレーブの設計提案	・貫通転位密度1000個/cm <sup>2</sup> 以下を達成 ・6インチ結晶成長オートクレーブの設計提案目標を引き上げ、達成 【意義】 ・品質、コスト、量産性を兼ね備えた <b>革新的な製造技術</b> 、我が国のパワエレ技術の <b>国際的な競争力向上</b> に寄与	◎

### 研究開発項目④ (2) 新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進 <委託>

テーマ	目標	主な成果と意義	達成度
新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進  ・成膜技術や放熱技術などの共通基盤技術  ・大容量高周波無線通信デバイス技術などの要素技術開発  ・革新的な用途開拓に関する可能性検証	<b>&lt;最終 (2019年度末) &gt;</b>  ・開発した共通基盤技術の実用化見通しの明確化  ・新材料パワーデバイスを動作検証し、Si、SiC等と比較した競争優位性の明確化  ・革新的用途に関する要求仕様と実現可能性の明確化	・縦型GaNの <b>低価格化</b> に寄与する、 <b>次世代HVPEエビ成長法を開発</b> ・絶縁膜/GaN界面にチャンネル形成するデバイス構造の <b>絶縁膜形成プロセス確立</b> ・ <b>世界初、基板とダイアの常温直接接合でGaN on ダイヤモンドデバイス作製に成功</b> →共通基盤技術の <b>実用化見通し明確化</b> ・低抵抗/大電流特性のN極性GaNトランジスタ (逆HEMT) の試作・動作検証 → Siに対する <b>競争優位性</b> を確保する <b>全ての目標指標を達成</b> 【意義】 ・ <b>革新的用途開拓に関する実現可能性を明確化</b> 、 <b>国際的な競争力向上</b> に寄与	○

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

### 1.3. 成果の意義

研究開発項目①(10) 新世代Siパワーデバイス技術開発では、Siの性能限界を突破し、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パワーデバイスの開発に取り組み、世界初、5V(従来 15V)駆動の高耐圧(3kV)Si-IGBT を試作しやすケーリング IGBT コンセプトの連続性を確認するなどの成果を得て、従来技術の延長線上にない新世代Siパワーデバイスを開発し、他の追随を許さない環境を作るとともに、ゲート駆動電圧をロジック回路レベルに低減し、デジタルゲート制御を導入することで、AI 制御を可能とするパワエレ 2.0 への道筋をつけた。

研究開発項目③(2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発では、新材料パワーデバイスを活用したインバータ等の開発とそれらを適用した特定用途応用システムの試作・動作実証に取り組み、必要な要素技術開発とともに新材料パワーデバイスを用いたインバータ等を開発し、特定用途として産業機器、EV、鉄道、トラック等向けの応用システムが実用化可能なレベルであることを実証し、SiCモジュール応用製品の普及拡大に寄与した。

研究開発項目④新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発では、低欠陥新材料(GaN)ウエハの革新的製造技術開発・実証とウエハ大口径化に関する革新的製造技術確立及び新規用途開拓の推進に取り組み、4インチGaNウエハについて品質、コスト、量産性を兼ね備えた革新的製造技術を開発するとともに、6インチ用大型オートクレーブについて目標を上回る設計提案を行った。また、新材料パワーデバイスの新規用途開拓に必要な要素技術、基盤技術を開発するとともに、革新的用途開拓に関する実現可能性を明確化して、新材料(GaN)パワエレ技術の国際的な競争力向上に寄与した。

以上のパワーエレクトロニクス技術の高度化により、本事業の目的である省エネルギー技術の国際的牽引と我が国の産業競争力強化に貢献した。

## 1.4. 成果の普及

ニュースリリースによる普及活動一覧を表 1-2 に示す。報道(新聞、雑誌、等)を含めた社会一般に積極的に成果の発信を行うことで、本パワエレ事業への一般社会からの関心に応えた。また、世界初の3件を含むニュースリリースは、新聞・Web ニュースなどに数多く取り上げられ、広く一般社会からの注目を集めると共に、成果の普及に大いに貢献した。

表 1-2 ニュースリリースによる普及活動一覧

発信元	発表年月日	題名
NEDO	2014/8/15	SiCパワー素子の自動車や鉄道車両向け応用システム開発
NEDO	2015/6/11	パワーエレクトロニクス分野の新たな先導研究を開始、応用分野を発掘、新市場を創出目指す
NEDO	2015/6/30	世界初、新幹線車両の高速走行にフルSiCパワーモジュールを搭載
NEDO	2016/4/4	パワーエレクトロニクスの新しい応用展開創出を目指す人材育成事業を開始
NEDO	2016/3/28	SiCパワー半導体用接合材の自己修復現象を発見(阪大、デンソー)
NEDO	2016/12/6	NEDOプロジェクトの研究開発成果を国際学会IEDM2016で発表
NEDO	2019/5/28	世界初、3,300V級シリコンIGBTのスイッチング制御を5Vゲート駆動で実証
NEDO	2019/9/2	世界初、単結晶ダイヤモンド基板を用いたマルチセル構造のGaN-HEMTを開発

パワエレシンポジウムによる普及活動一覧を表 1-3 に示す。シンポジウムで応用分野から見たパワエレへの期待を実施者とも共有し、研究や実用化事業化を加速した、また、最終回(第6回)には、本事業の成果報告を行うとともに、ポスターセッションで来場者との積極的な意見交換も実施した。

表 1-3 パワエレシンポジウムによる普及活動一覧

開催	年度	年月日	主なテーマ	概略来場者
第1回	FY2014	2014/11/28	パワエレプロジェクト(国プロ)の成果と普及に向けて、他(招待講演など)	150
第2回	FY2015	2016/1/8	国内外連携促進(海外メカによる講演, 国プロ(NEDO-JST共有促進))	200
第3回	FY2016	2017/2/14	鉄道・航空・宇宙分野での次世代パワエレ応用	200
第4回	FY2017	2018/2/14	電力インフラ・輸送分野での次世代パワエレ応用	250
第5回	FY2018	2018/11/22	次世代モビリティ分野での次世代パワエレ応用	220
第6回	FY2019	2020/2/25	モビリティ電動化、医療への先進パワー半導体応用、プロジェクト成果報告	130

本事業での論文、外部発表等の一覧を表 1-4 に示す。世界初を含む多くの成果を新聞／国内外の学会等で発表した。論文については、IEEE Trans.6 件を含み 48 件の論文が掲載された。また、試作品を展示等に出展して、成果のアピールも行った。

表 1-4 論文、外部発表等の一覧

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total
論文	0	0	8	10	13	17	48
研究発表・講演	0	13	50	71	67	74	275
受賞実績	0	0	0	4	3	5	12
新聞・雑誌等への掲載	0	0	2	4	5	4	15
展示会への出展	0	4	9	2	4	2	21

※2020年9月1日現在

本事業での特許出願件数を表 1-5 に示す。以下に示す知的財産権戦略に基づき、外国特許出願 20 件を含む 100 件以上の特許を出願した。

本事業における知的財産権戦略の基本的な考え方は、「特許に関しては国際的視野に立って戦略的にパワエレ分野の主導権を取るべく、積極的に国内・海外ともに出願することを基本とした。ただし、以下の場合等で成果技術が公開されることによるデメリットの方が大きいと判断される場合は、戦略的に特許取得を見送り、ノウハウとして秘匿する。

- ①既に強力な基本特許を出願済みの技術領域
- ②事業開始前に重要要素技術に関する強力な特許網構築済みの技術領域
- ③製品を分解しても解明不能な技術に関する技術領域（材料・プロセス等）

また、互換性確保などのモジュール実装仕様に関しては、標準化を推進した。

表 1-5 特許出願件数一覧

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
国内特許出願	13	18	27	27	6	0	2	93
外国特許出願	0	0	2	15	3	0	0	20
Total	13	18	29	42	9	0	2	113

※2020年9月1日現在

特許及び論文のリストを別添として添付する。



## 2. 研究開発項目毎の成果

以下に、それぞれの研究開発項目のテーマに対する成果を、個別に報告する。

### 2.1. 研究開発テーマ「新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発」

(東大、東工大)

本研究開発では、材料技術、プロセス技術、新構造化技術を駆使することにより、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 Si-IGBT およびその周辺技術を開発し、新世代の Si-IGBT 技術を確立することを目的とした。日本オリジナル技術である電子注入の促進構造を進化させた新世代 Si-IGBT コンセプトと、さらに磨きかけた回路技術などの応用基本技術により、画期的な高性能パワーデバイス(低オン電圧化、大電流密度化、ゲートドライブ技術の高度化、低コスト化)を実現し、国内の半導体産業ならびにパワーエレクトロニクス機器の国際競争力強化に資する。

新世代 IGBT では、従来困難と思われていた微細化による性能向上を、いわゆる三次元間引き構造を採用することで新しいスケールング則を導入し達成することを目指した。現行製品相当  $k=1$  IGBT に対し、MOS 構造部を  $1/3$  にスケールングした  $k=3$  の IGBT を試作した(ここで  $k$  はスケールング係数)。ゲートドライブ電圧も  $15\text{ V}$  から  $5\text{ V}$  に低減される。定格電圧は  $1000\text{ V}$  および  $3000\text{ V}$  とした。試作したスケールング  $k=3$  IGBT は従来のスケールングされていない  $k=1$  IGBT に対してオン電圧の低減を達成するとともに、ターンオフ損失  $35\%$  低減を実現した。スケールングの先行研究では  $k=3$  及び  $k=5$  の IGBT ユニットセルの設計、試作プロセス構築、試作評価を行い、それぞれ期待通りの電子注入促進効果を定量的に検証した。また TCAD シミュレーションにより  $k=5$  以降のスケールングスキームの考察を行った。更に、デバイス特性からキャリアのライフタイムを精度良く測定する新たな手法を開発し、酸化や窒素アニールなどの高温プロセスによるライフタイムの劣化を定量的に評価した。一方、新世代 IGBT 実現には、長いキャリアライフタイムを持つ高純度のシリコン単結晶の実現が不可欠である。酸素と炭素を抑制する高純度結晶成長技術によりバルクライフタイム  $18\text{ ms}$  以上のシリコン単結晶ウェハの作製に成功した。

新世代 IGBT では、ゲートドライブ回路をデジタル化し、パワーエレクトロニクスに人工知能(AI)等の膨大なデジタル集積回路技術を持ち込むことを目指した。デジタル制御ゲートドライブ IC 試作し、制御最適化による IGBT の損失低減を実証することに成功した。さらに IGBT の  $5\text{ V}$  ゲート駆動での耐ノイズ性を実証し、ゲートドライブ一体型モジュールの作製・評価を行い、本プロジェクトで試作した上記  $k=3$  IGBT のスイッチング試験に成功した。直流電圧  $400\text{ V}$ 、出力  $5\text{ kW}$ 、周波数  $20\text{ kHz}$  のインバータ連続動作にも成功している。

以上の研究開発により、本研究開発で提案した新世代 IGBT に関する当初の目標を達成し、新世代 IGBT のコンセプトを実証することができた。

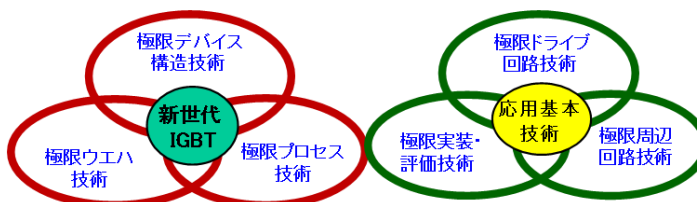
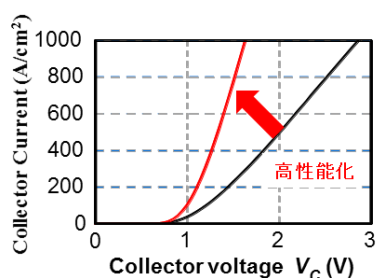


図 2.1-1 本テーマのイメージ図

## 2.2. 研究開発テーマ「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」研究開発項目毎の成果

(富士電機)

本プロジェクトでは、SiC デバイス、最新 Si デバイスおよび今後創出されると予想される GaN デバイスの優れた特性を活かし、顧客カスタム要求を満たしながらも超短納期で低コストな次世代パワーモジュールを実現する研究開発を行って来た。

加えて、これらの研究開発を可能とする日本型パワーモジュールエコシステムを構築し、日本の強い新エネルギー分野、EV 分野およびカスタム要求度の高い特殊インバータ分野/特殊電源分野などで、世界のパワーエレクトロニクスを牽引することも目的とした。そして、具体的には下記 1)~4)の開発を実施しプロジェクト期間中に達成することを目指した。

- 1) パワーモジュール製品の創出
- 2) 超短納期開発のしくみ構築
- 3) 日本型エコシステムの構築
- 4) 国際標準化すべき項目の抽出

表 2.2-1 研究開発項目と目標

研究開発項目	目標
1) パワーモジュール製品の創出	・パワー密度 産業用自冷式 : 1000kVA/L EV 向け水冷式 : 2500kVA/L ・製品コスト: 約 30%減 (現状 Si モジュール構造に SiC デバイス搭載時の比較)
2) 超短納期開発のしくみ構築	・量産化までのリードタイム約 50%減(当社比) ・顧客へのサンプル供給期間約 1/4(当社従来開発品比)
3) 日本型エコシステムの構築	・理念目標の共有 ・摺合わせ範囲の拡大 ・摺合わせの高速化
4) 国際標準化すべき項目の抽出	標準化を検討し、JEITA 信頼性委員会に提案

## 2.3. 研究開発テーマ「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」 (デンソー)

本テーマは、電機動力を用いた次世代環境対応車に使用される車載電動システムの更なる効率向上ため、従来のハイブリッド車等で多く採用されている Si パワーデバイス(IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子と昇圧コンバータ、インバータを用いた電動システムに対して、低損失な SiC パワーデバイス(MOSFET)を用いたインバータを活用し、昇圧コンバータを用いない新規なマルチ電源マルチインバータの超高効率車載電動システムの開発および車載実証を行うものである。

2014 年度から 2016 年度で、その構成要素である小型・高出力 SiC パワーモジュール、マルチインバータに対応したモーター巻き線/システム制御技術の成立性検証、実車適用における機能検証・課題抽出を実施し、2017 年度に実車にて動作検証を実施した。

2016 年度までに主要要素技術目処付けを完了し、実施項目①新巻線モーターおよびシステム制御技術では、サージ電圧低減方法に確立、専用の制御回路の動作確認完了、実施項目②小型高温 SiC パワーモジュール技術では、SiC パワーモジュールでの低損失動作確認、高耐熱実装材料の選定及び信頼性確認、実施項目③高品質 SiC ウェハの製造と安定供給では、φ6 インチの高品質 SiC ウェハの安定成長確認、実施項目④システム性能検証では、新システムのモード走行領域での動作確認、損失低減効果を確認した。

2017 年度には実車での効果のシミュレーション及び実車搭載まで完了し、助成終了後、2019 年度までに当初目標とした実車での動作検証を完了した。その後も自社内で SiC パワーモジュール、ガス成長法による SiC ウェハ、提案電動システムの車載実用化に向けた開発を継続中である。

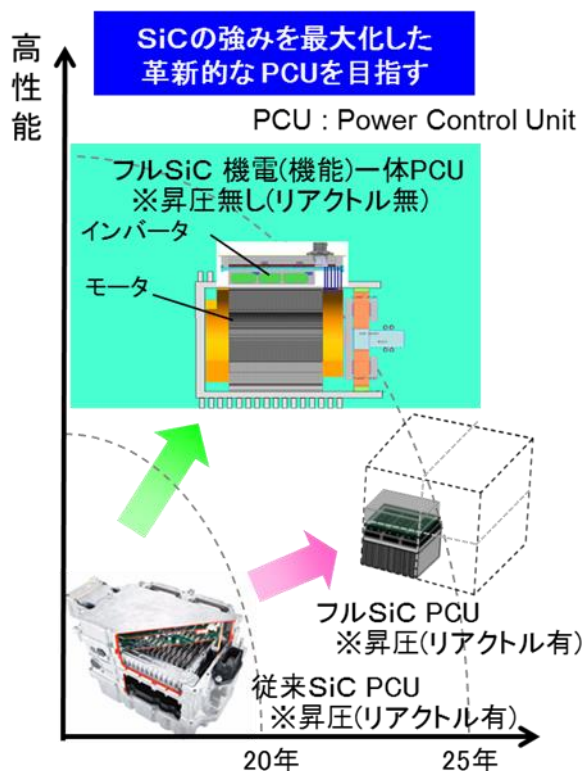


図 2.3-1 本テーマのイメージ図



## 2.4. 研究開発テーマ「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」

(三菱電機、三菱マテリアル、デンカ、日本ファインセラミックス、DOWA エレクトロニクス)

パワーモジュールを高出力密度化することにより、パワーエレクトロニクス機器の高効率化や小型・軽量化を実現できる。本テーマでは、海外メーカーの追従を許さない出力密度2倍(対 Si 比)という目標を掲げ、高効率な SiC デバイスの適用に加えて、高出力密度パッケージ化を行うことで、この目標を実現する。そのために、高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールおよびこれを実現する為の材料、デバイスの開発を行う。これにより、高効率な SiC パワーモジュールの適用領域を拡大することができ、省エネルギーに大きく貢献できる。また、海外メーカーに対する競争力を強化でき、パワーモジュール、パワーモジュール用部材およびパワーエレクトロニクス機器に関する国内産業の育成と雇用の拡大に大きく貢献する。

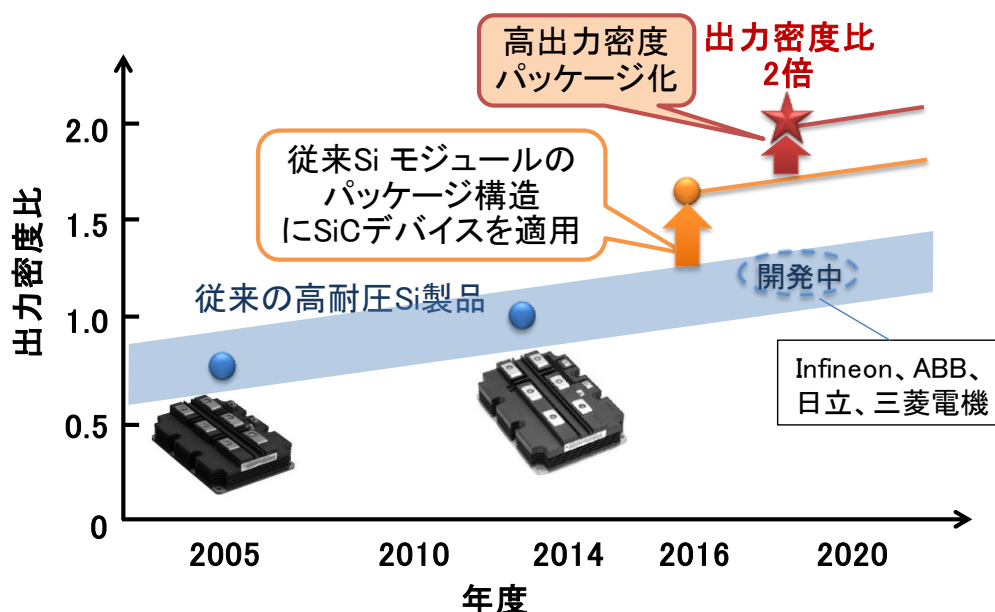


図 2.4-1 本テーマの目標の位置づけ

開発項目は、高耐熱・高放熱を実現するモジュール、高放熱・高信頼な絶縁基板や高信頼な Ag 接合材といった新規材料、高効率かつ高耐圧な SiC パワーデバイスである。モジュールおよびデバイスは三菱電機(株)、絶縁基板は三菱マテリアル(株)、デンカ(株)、日本ファインセラミックス(株)、Ag 接合材は DOWA エレクトロニクス(株)が主に開発を担当する。

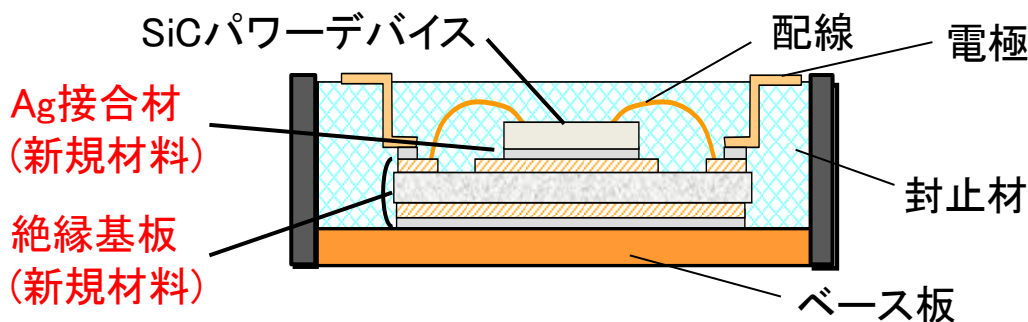


図 2.4-2 パワーモジュールの断面模式図

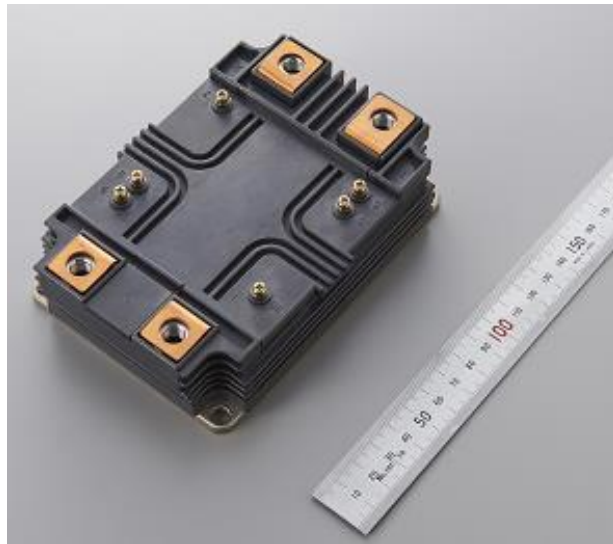


図 2.4-3 開発した 6.5kV 耐圧 SiC パワー半導体モジュールの外観

本プロジェクトにより、当社独自のダイオードと MOSFET を 1 チップ化したダイオード内蔵 SiC-MOSFET を開発、チップ搭載面積を半減するとともに、優れた熱伝導性と耐熱性を両立する絶縁基板と、信頼性の高い接合技術により、高放熱・高耐熱小型パッケージを実現した。  
6.5kV 耐圧 SiC パワー半導体モジュールの試作を行い、当社 6.5kV 耐圧 Si パワー半導体モジュール比で損失 3 分の 1、出力電力密度 2 倍以上を達成した。

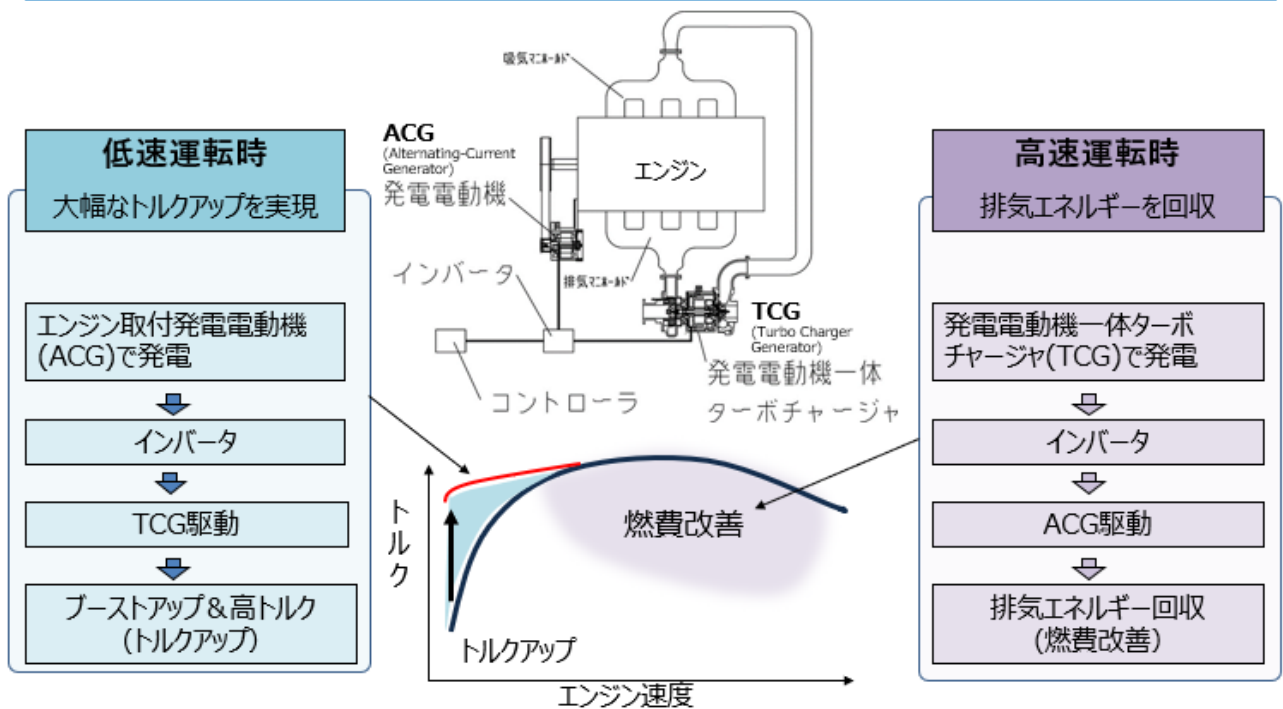
## 2.5. 研究開発テーマ「次世代パワーデバイスを用いた発電電動一体ターボチャージャによる排熱回収システムの研究開発」

(ACR)

本件の事業目的は以下のとおり。

インバータにより制御される発電電動機一体型ターボチャージャによりエンジンの排気ガスエネルギーを電気エネルギーとして有効に回収すると共に、得られた電気エネルギーによりエンジンに取り付けた発電電動機を駆動し、大幅な省エネルギー化を図るシステムの実現に向けて、次世代パワーデバイスを用いたインバータや発電電動機等の要素技術の開発を目的とする。

低損失のSiC素子を使用した高効率インバータと、可変機構を備えた発電電動機組込みターボシステム



## 2.6. 研究開発テーマ「パワーエレクトロニクス用大口径バルク GaN 結晶の研究開発」

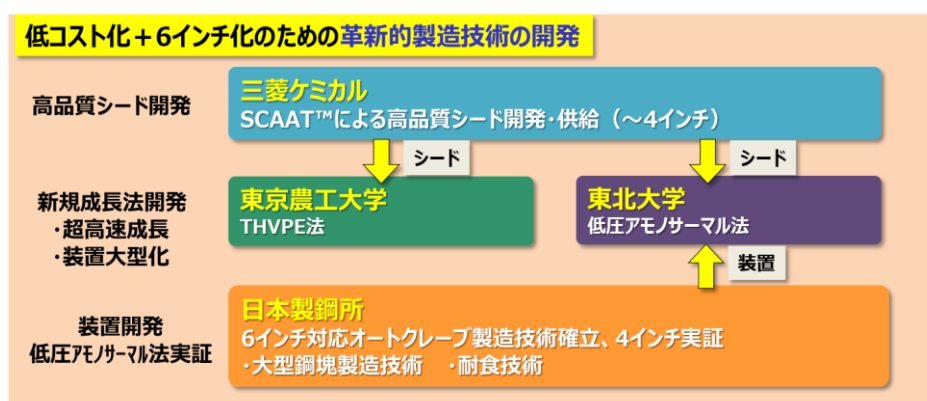
(三菱ケミカル、日本製鋼所)

次世代パワー半導体デバイスとしては SiC が先行しているが、GaN 基板を用いるパワー半導体デバイスについては GaN 基板の品質、サイズ、コストがボトルネックとなりデバイス開発が遅れている。GaN をパワーデバイス用基板として用いるためには、品質、サイズ、コストの三つの課題を解決する必要がある。

本事業では上記課題の解決をはかるため、三菱ケミカルが独自に開発してきた SCAAT™ による低転位化技術により、SiC 基板並みの品質の実現を目指した。サイズについては、まずは 4 インチサイズの高品質基板の作製技術を確立するとともに、6 インチ基板が製造可能な大型装置(オートクレーブ)の設計まで行う計画とした。さらに、SCAAT™ は超高压での成長が必要なためオートクレーブの大型化が困難であったが、成長圧力の低減が可能なアモノサーマル技術(低压アモノサーマル)を開発することにより装置の大型化をはかり、生産性を大幅に向上することで SiC に対して競争力のあるコストの実現を目指した。

また、本事業ではアモノサーマル法(SCAAT™, 低压アモノサーマル)による高品質化・大型化と並行して、トリハライド気相成長法(THVPE 法)による結晶成長技術の検討も行った。THVPE 法は従来の HVPE 法よりも高速成長が期待され、低コスト化を実現できるポテンシャルを有している。

下図に本事業の開発スキームを示す。三菱ケミカルが SCAAT™ により 4 インチサイズの低転位シードの開発。日本製鋼所が大型オートクレーブの開発と 4 インチ結晶の実証。低压アモノサーマル結晶成長技術開発を東北大学と、THVPE 法による結晶成長技術開発を東京農工大学と共同開発を行った。



三菱ケミカル社独自の酸性アモノサーマル法 SCAAT™ を用いて、転位密度の低減と大口径化を進めた結果、転位密度を  $1 \times 10^3 / \text{cm}^2$  以下まで低減させる技術の開発に成功した。大型化では 4 インチウェハーを取得可能なサイズの大型結晶の成長に成功した。今回開発した技術は、将来の 6 インチ化においても適用、発展させることが可能である。更に、日本製鋼所と進めている 6 インチサイズの結晶が製造可能な大型設備の製造も技術的な目途が立っており、製造コスト、サイズともに SiC と同等以上を達成できる可能性がある。本事業の成果は、従来技術では到達困難であった、品質、コスト、量産性を兼ね備えた革新的な製造技術と位置付けられるものであり、我が国の技術競争力を維持・向上させることに大きく寄与するものである。

また、日本製鋼所が掲げていた目標(低压酸性アモノサーマル法用のオートクレーブの試作とそれを用いた 4 インチ GaN 結晶成長の実証、6 インチ GaN 結晶成長用の低压用大型オートクレーブの設計・提案)はすべてを達成し、「低压酸性アモノサーマル法を用いた GaN 基板の安価

での量産化」への道筋をつけることが出来たのは大きな成果である。日本製鋼所が長年培ってきた技術を基盤として本事業の目標を達成することが出来た。本成果を元に、6 インチ用大型オートクレーブを製造し、パワーエレクトロニクス用 GaN 基板を量産することで、品質・価格競争力のある GaN 基板の提供が期待される。

## 2.7. 研究開発テーマ「窒化ガリウムパワーデバイス高出力化のための高放熱構造の研究開発研究開発」

(三菱電機、産総研)

窒化ガリウム(GaN)パワーデバイスは、その他の化合物半導体と比較して、高周波数かつ高出力な用途に適用可能であり、一部商業化が始まると共に、様々な応用が期待されている。今後、パワーデバイス材料として市場を形成し、牽引していくためには、単に従来の代替のみならず、GaN の高周波数、高出力等の特徴が最大限に生きる用途に向けて実用化を見据えた研究開発を実施する必要がある。そこで、マイクロ波領域において、GaN パワーデバイスのさらなる高出力化による将来の革新的な用途を明確化すると共に、本用途の開拓を見据えて高出力化のための高放熱構造の原理実証を行った。

研究開発内容の概要は、SiC 等の従来材料では不可能な用途での実用化を見据えて、① GaN パワーデバイスでしかできない新たな応用に関して、具体的かつ定量的な要求仕様を予測、策定 ② GaN パワーデバイスの将来の革新的用途に関する原理検証のため、高熱伝導率の多結晶ダイヤモンドを放熱構造に適用した高出力 GaN/ダイヤモンド構造デバイスの要素技術を開発し、デバイスを試作・動作検証、その評価結果から、SiC 等の他材料のデバイスと比較した競争優位性及び実現可能性を明確化 ③ GaN/ダイヤモンド構造デバイスを実現するための基盤技術として、マイクロ波プラズマ CVD 装置を用いて大面積ダイヤモンドを合成するための原理実証を行い実用化の見通しを明確化 である。ダイヤモンド合成技術に関しては、新規合成装置の報告例はほとんど見られず、本研究開発による新規大面積合成手法はダイヤモンド放熱デバイスの普及に貢献できるものと考えている。

本事業の結果、表面活性化接合法を適用して高出力に対応したマルチセル構造の GaN/ダイヤモンドデバイスを世界に先駆けて実現できた。これまでは海外の研究機関で小出力向けのシングルセル構造の GaN/ダイヤモンドデバイスの試作例が報告されているが、今回のマルチセル構造での実現は、ダイヤモンドを用いた高放熱構造 GaN パワーデバイスの産業化に向けた大きな成果と考える。また、本研究開発においては GaN/ダイヤモンドデバイス作製方式としてダイヤモンド成長方式とデバイス接合方式のいずれにおいてもデバイス作製に成功したが、後者の方式は、デバイス動作時の温度抑制効果に優れていると同時に、既存工程である GaN/シリコントランジスタ作製工程を転用できるため、産業応用の面で優れると考えられる。さらに従来構造である GaN/SiC パワーデバイスにおいては基板である SiC ウェハの多くを米国からの輸入品に頼っているが、本研究開発成果である GaN/ダイヤモンド構造では、ベースとなる GaN/Si トランジスタおよびダイヤモンド基板のいずれも国産品での調達が可能のため、国内産業の発展に貢献できると考えられる。

また、マイクロ波プラズマ CVD 装置を用いて大面積ダイヤモンドを合成するための原理実証においては、新しい原理に基づくプラズマ源に関する基盤的な原理検証ができた。想定していた様に、マイクロ波の位相を制御することで、能動的に放電領域を変化することができた。合成速度の飛躍的な向上が期待しにくいフィラメント CVD 法を除いて、ダイヤモンドを 4 インチ φ 以上の大面積に渡って結晶成長するには、現状では 915MHz 周波数帯を利用したマイクロ波プラズマ CVD 法に頼らざるを得ない。本研究開発に関連する分野でも、世界的にこのアプローチが採用されている。しかし、この手法は数 10 年前に提案された合成装置概念を継承したものであって、更なる飛躍的な合成効率向上、コスト低減を見込みづらい。この観点で、本研究成果は、従来方式ではほぼ達成し得ない技術領域へ踏み込める可能性を示す極めて重要な意義を持つと考える。誘電体加熱に用いられてきたマイクロ波重畳方式を端緒として、独自に構築してきたシミュレーション技術・装置設計技術を駆使して、この方式をダイヤモンド結晶成長に適用可能な方式へと昇華させ、実際に放電試験を可能とした。異分野融合の結果とも言える、重要な成果と考える。

## 2.8. 研究開発テーマ「高効率大容量無線通信を実現する高周波 GaN-HEMT の研究開発」

(住友電工)

来るべき IoT 社会においては無線通信の大容量化が求められ、高周波化が必須となると共に、送信機器の一層の高出力・高効率化(=低消費電力化)が求められる。こうした要請に応えるため、効率に優れる GaN を用いた高電子移動度トランジスタ(GaN HEMT)への期待が高まっている。本事業では、GaN HEMT の抜本的な特性改善のため、新たな結晶成長技術である N 極性 GaN 結晶を用いた逆 HEMT 構造を開発した。

開発にあたっては、まず、カーボン面半絶縁性 SiC 基板の結晶軸に対する傾斜角(以下、オフ角)を最適化し、この基板上に高品質な GaN 結晶を成長する条件を明らかにした。得られた成長条件を用いることで、界面が急峻な HEMT 構造結晶を得た。また、GaN バッファ層の高抵抗化を図るため、GaN バッファ層に Al 添加する構造とした。次に、N 極性デバイスを作製するための基本情報として、GaN 結晶のウェット/ドライエッチングのプロセス耐性を明らかにした。これを基に、GaN 結晶上に Ti/Al 系材料で低抵抗な電極を形成する条件を得た。これらの要素技術を基に、逆 HEMT 構造トランジスタを設計・試作した。初期の試作において、最大電流とコンタクト抵抗にトレードオフの関係が存することが明らかとなったが、これを打破するために新たにバリア層に InAlGaN を用いることとし、これにより目標のオン抵抗、最大電流を得た。

以上の研究開発により、国内で初めて半絶縁性 SiC 基板上で N 極性逆 HEMT 構造を実現し、そのトランジスタ動作を確認した。高品質な N 極性 GaN 結晶の成長条件を獲得したことで、国内で初めて逆 HEMT の構造優位性を実現する道筋を得ると共に、電極形成を始めとする N 極性 GaN HEMT 形成のプロセス技術における課題を明確化できた。

## 2.9. 研究開発テーマ「低不純物・高成長速度の次世代 HVPE 法による低価格・大電力 GaN パワーデバイス製造プロセスの研究開発」

(名大、産総研、太陽日酸)

近年 GaN 単結晶基板の大口径化と品質向上が進み、縦型 GaN パワーデバイスの開発が行われている。縦型 GaN パワーデバイスではドリフト領域を長くし、キャリア密度を低濃度で制御する必要があり、エピ中に取り込まれる不純物濃度を低くするとともに、速度が速い(10 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上)成長方法が必要である。しかし、現在一般的に用いられている有機金属気相成長法(MOVPE)ではこの要求を満たすことが困難である。MOVPE 法では原料に有機金属材料を用いており、これは炭素(C)を含むため、一定量(10<sup>15</sup>から 10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>程度)の炭素が不純物として膜中に混入する。高耐圧の縦型デバイスでは、低濃度の n 型ドリフト領域のエピ成長が必須であるが、この炭素の不純物は電子トラップとして働くことから、炭素の濃度が n 型不純物よりも高い場合、低濃度 n 型伝導性の制御が困難である。また、MOVPE 法では成長速度を上げると C 濃度が増加するため、成長速度が数  $\mu\text{m}/\text{h}$  程度までに制限される。さらにパワーデバイスの製作コストが高いと、電源装置の価格を押し上げるため大きな問題となる。高耐圧な縦型 GaN パワーデバイスではドリフト領域の長さが長いいため、厚い膜厚の結晶成長が必要であり、エピコストが大きい問題となることが予測される。そのため、低コストでデバイス構造を結晶成長により形成する技術が必要となる。

このような背景から本研究開発では、GaN パワーデバイスの製造コストを下げるために、結晶成長速度の速い HVPE 法に注目し、パワーデバイス用のエピ成長技術の開発を行った。HVPE 法を用いれば、エピコストを 1/5 程度にできると予想され、インパクトが大きい。パワーデバイス用のエ



エピ成長技術に求められる課題は簡単にまとめると(1)結晶品質が良好なこと、(2)結晶成長速度を制御できること、(3)膜厚の面内均一性がよいこと、(4)不純物濃度が低いこと、(5)n型やp型ドーピングが制御性良く行えること、(6)AlGaInなどの混晶が成長可能なこと、(7)混晶の組成を変化させる場合の急峻性がよいこと、(8)原料が安いこと、(9)原料の利用効率が高いこと、(10)装置のメンテナンスが容易なこと、などがある。

名古屋大学と協力機関である株式会社デンソーは、外部から供給が可能な GaCl<sub>3</sub> に着目し、エピ成長を行うための GaCl<sub>3</sub> の供給装置の開発を行った。4H-SiC 基板の(000-1)C 面上に N-face GaN が良好に結晶成長が可能であることを示した。また STR 社の結晶成長シミュレーションを用いて、基板を高速回転させ成長炉の構造を最適化すれば直径2インチ基板上に 500μm/h の高速で成長する条件があることを示した。さらに、エピ成長に必要な成長速度の制御性も実証した。エピ成長では不純物濃度の低減が必要なため配管からの不純物の発生の抑制も行い縦型パワーデバイスに用いるレベルのエピ成長が可能であることを示した。GaCl<sub>3</sub> の外部供給装置を用いた HVPE によるエピ成長技術は、海外ではまだ例がない。HVPE による低コストのエピ成長技術を日本で実現し、日本の GaN エピ技術の競争力を高める上で重要である。

結晶成長装置の製造を行う太陽日酸株式会社と名古屋大学は、不純物濃度の低減、ドーピング、AlGaIn 膜の成長などの実証を行った。不純物については、Si や O も検出限界値程度まで減少させることに成功し、HVPE を用いた超高純度の結晶を得ることに成功した。SiCl<sub>4</sub> を用いて n ドーピングを行い他のグループと同等の電気特性を得た。また MgO を用いれば p 型の制御が可能であることを世界で初めて示した。HVPE 法を用いたエピ成長技術を確立する上で必要不可欠な技術である。GaN 上への AlGaIn 膜の成長も実証し、急峻な界面を有することを示した。また、反応の副生成物である NH<sub>4</sub>Cl や GaCl<sub>3</sub> などのトラップやフィルターを改良しメンテナンス性の向上を図った。

また、名古屋大学と産業技術総合研究所は、顕微ラマン分光で、ラマンスペクトルを詳細に分析することにより転位種を同定する技術を初めて開発した。また X 線トポグラフィーを組み合わせることで転位欠陥の詳細を調べた。これにより非破壊で転位を詳細に特定することが可能となり、検査時に GaN 基板を破壊する必要がないことはコストの面で産業的に重要である。

以上に示したエピ成長技術に関する成果は、縦型パワーデバイスの実用化において、低価格化と高性能化を可能とするものであり、極めて重要なものである。



## 2.10. 研究開発テーマ「GaN物性を最大限に発揮させる最適なパワーデバイス構造の確立とその工業的な製造プロセスに繋がる絶縁膜形成技術の研究開発」

(産総研、名大、名工大、筑波大学)

本プロジェクトでは、GaN材料を用いたFETのMOSゲート構造を形成する上で重要な絶縁膜の形成プロセスの開発と、それを最適な条件で行うための絶縁膜形成装置の開発を行った。MOSゲートは、将来有望とされているGaN材料を用いた縦型パワーデバイスやパワーICを実用化する上で、それらの性能を左右する重要な部分である。

絶縁膜/GaN界面の形成方法や特性の解明については名古屋大学と名古屋工業大学が担当した。SiO<sub>2</sub>/GaN界面は熱安定性が高く800℃の熱処理でも界面の組成急峻性を維持しており、界面準位密度を $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ まで低減できることを示した。

筑波大学では陽電子消滅を用いた空孔の解析を行い、窒素と酸素雰囲気中の熱処理の違いや、SiO<sub>2</sub>/GaN界面とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaN界面の安定性の比較などを行った。さらにn-GaN基板上に絶縁膜を形成した前後のドナーESR信号の変化量より、界面の電子トラップ密度(単位 $\text{cm}^{-2}$ )を簡便に評価する新しいESR法を開発した。

nチャンネルMOSFETについては実用性があることが明確になった。産業技術総合研究所でGaNのc面に平行にチャンネルをもつMOSFETでは移動度 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 以上得られた。また筑波大学はGaNのm面に平行にチャンネルを持つMOSFETを作成し良好な動作が得られた。またpチャンネルMOSFETの世界で初めての動作に成功した。一方で価電子帯端近辺は界面準位密度が高くpチャンネルの移動度は低かった。pチャンネルで高い移動度を得るために、より一層の技術開発が必要であることが明らかになった。本事業のpチャンネルMOSFETは絶縁膜/GaN界面にチャンネルを形成するMOSFETであり、従来報告されているAlGaN/GaN界面の二次元ホールガスをを用いたpチャンネルFETとは異なる。そのためSiと同様のプロセスにより形成できるため実用性が高い。

絶縁膜形成装置の開発は、トレンチ構造のMOSゲートの制作が可能なALD装置をベースに、協力機関であるサムコ株式会社と行った。緻密な酸化膜の形成が必要であるという知見が名古屋工業大学や名古屋大学の実験結果より得られたため、オゾンが供給できる構造とした。前処理構造を導入しプロセスダメージを低減することにより界面準位密度を $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 以下にすることが可能になった。本装置は産総研の共用設備として導入し、利用者に広く開放することにより、本プロジェクトの成果の普及を図ることとした。

本プロジェクトでの課題であるMOSゲート技術は、将来有望とされているGaN材料を用いたパワーデバイスやパワーICを実用化する上で、それらの性能を左右する重要な部分であり、産業的に意義が大きい。

## IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

### 1. 事業全体の实用化・事業化に向けた取組及び見通し

以下に本事業の实用化・事業化に向けた取組及び見通しの概要を示す。

#### 研究開発項目① (10) 新世代Siパワーデバイス技術開発 <委託>

テーマ	実施者	实用化・事業化見通し	分野
新世代Si-IGBT と 応用基本技術の研究開発	東芝(TDSC)、 三菱電機 (共同実施先)	・22-23年度に新世代Si-IGBTの 事業化予定	・産業および民生用途

#### 研究開発項目③ (2) 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発 <助成>

テーマ	実施者	实用化・事業化見通し	分野
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	富士電機	顧客最適化による性能最大化を 図った製品を目指し、社内製品に 搭載して20年度から販売を開始	インバータ、 PCS/UPS、電源、等
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	デンソー	搭載車両を決定し、SiCパワーモ ジュールを25年、車載電動システ ムを28年の实用化予定 ガス成長法による低コストSiCウェ ハーは25年量産予定	大出力EV、大出力 PHV、FCV向け電動 システム
高出力密度・高耐圧SiCパ ワーモジュールの開発	三菱電機等	6.5kVパワーモジュールについてユーザ とともに採用システムを探索中	鉄道等
次世代パワーデバイスを用いた 発電電動一体ター ボチャージャによる排熱 回収システムの研究開発	ACR	大手トラックメーカーと目標値の共 有化と实用化を検討し、24年販売開 始予定	トラック等

#### 研究開発項目④ (1) パワーデバイス用新材料ウエハの革新的製造技術の開発 <助成>

テーマ	実施者	实用化・事業化見通し	分野
パワーエレクトロニクス 用大口径バルクGaN結晶 の实用化開発	三菱ケミカル 日本製鋼所	6インチサイズのGaN単結晶基 板のサンプル販売を1年前倒し、 23年度に始める。	高性能なパワー半導 体需要向け

#### 研究開発項目④ (2) 新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進 <委託>

テーマ	実施者	实用化・事業化見通し	分野
新材料パワーデバイスの 新規用途開拓の推進  ・成膜技術や放熱技術 などの共通基盤技術  ・大容量高周波無線通信 デバイス技術などの 要素技術開発  ・革新的な用途開拓に 関する可能性検証	大陽日酸	本事業終了後も量産化に向け た改善技術の開発を継続し、 23年度目途に量産化を行う。	化合物半導体成膜装 置
	三菱電機	まずは24年度を目途に、小型 化・高出力化が強く求められる レーダ用途に適用し、その 後、価格、市場性を見たうえで 25年度以降、順次民生向け 展開を図る予定。	レーダ用途、携帯基 地局、衛星通信、マ イクロ波加熱、プラ ズマCVD装置
	住友電工	量産に向けた技術開発を継続 し、23年から製造部門の技術 立上げを行うと共に、製品と しての増幅器開発を行い、26 年頃から製品適用する。	ポスト5G基地局

## 2. 研究開発企業毎の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

以下に企業毎の実用化・事業化の見通しを示す。

### 2.1. 「新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発」における実用化・事業化の見通し (三菱電機)

本テーマの成果の一つであるスケーリング IGBT 技術を部分的に取り込んだ製品を開発することを決定した。2022～2023年度に量産開始することを目標にする。また、ドライブ技術を製品に取り込むための基盤技術の確立に向け、研究・開発を継続しており、2022年度にドライブ技術と取り込んだ新製品の事業化判断を行う予定である。

### 2.2. 「新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発」における実用化・事業化の見通し (東芝)

本テーマの成果を元に、事業化に向けた社内開発・評価を継続、市場調査・商品企画を実施中である。また、1200V 系 IGBT を先頭に次世代 IGBT 製品の展開を予定している。

### 2.3. 「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」における実用化・事業化の見通し (富士電機)

本プロジェクトの成果を事業に結び付けるため、ワーキンググループ (WG) を設置し検討を重ねて来た。WG ではパワエレ製品のエンドユーザのニーズを定期的に研究に反映させ、パワエレ製品からのパワーモジュールに対する要求の対応策や製品事業化について検討を行って来た。

これらの活動から、パワエレ製品を使用する最終顧客要求を満足させる最適なパワーモジュールを開発しパワエレ製品の性能最大化を図ることを目指した。

### 2.4. 「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」における実用化・事業化の見通し (デンソー)

本テーマの成果は既存の市販されている電動システムとは異なる新規なシステムであり、かつ電動システムの稼働比率の高い、PHV、EV、FCV の方が効果が大きいと見込めるため、最初の製品ターゲットとしては、大出力 EV、大出力 PHV、FCV 向け電動システムを想定している。実用化・事業化への課題は、カーメーカーに対する新システムの訴求であり、実車での性能実証を行った後、デンソー事業部が主体となり燃費性能、コスト、体格を見積もり、カーメーカーにアピールしていく。搭載車両が決まれば、カーメーカーと具体的な仕様を詰め、車両適合して信頼性確認を行い、実用化 (2025 年以降の見込み) していく。

また、SiC パワーモジュールとしては、具体的な製品形態での信頼性評価を行った後、新システムへの適応を目指す。要素技術レベルではデンソー事業部で既に開発中の既存システムに適用検討中で、次期製品に展開の予定である。

また SiC ウェハについては、昇華法ウェハは、2018 年より高品質φ6 インチウェハを協力会社にて製造し、デンソー社内の車載用 SiC パワーモジュールの開発に供給している。2022 年頃から車載製品適用を目指す。また、ガス成長法による低コスト SiC ウェハについては、2020 年度までに基本技術を確認し、量産化検討に入る。量産開始は 2025 年を目指す。

## 2.5. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し（三菱電機）

高耐圧モジュールは年平均成長率 9.1%と高い成長を続けると予測されており、また日本メーカーの競争力が強い市場であり、今後もこの市場での競争力確保が国内産業にとって重要となる。本テーマでは、海外メーカーの追随を許さない、出力密度 2 倍(対 Si 比)という目標を掲げ、高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールおよびこれを実現する為の材料、デバイスの開発を行う。これを達成することで、高効率で省エネルギー性に優れた SiC パワーモジュールの適用領域を拡大することができ、海外メーカーに対する競争力を大幅に強化することができる(図 2.5-1)。

事業化は三菱電機株式会社 パワーデバイス製作所にて検討中である。

パワーモジュールの競争力強化により、モジュール事業が拡大するだけでなく、モジュール用部材やパワーエレクトロニクス機器の事業拡大にも寄与できる。特に、パワーエレクトロニクス機器の市場規模はパワーモジュールより 2 桁大きく、その波及効果は大きい。

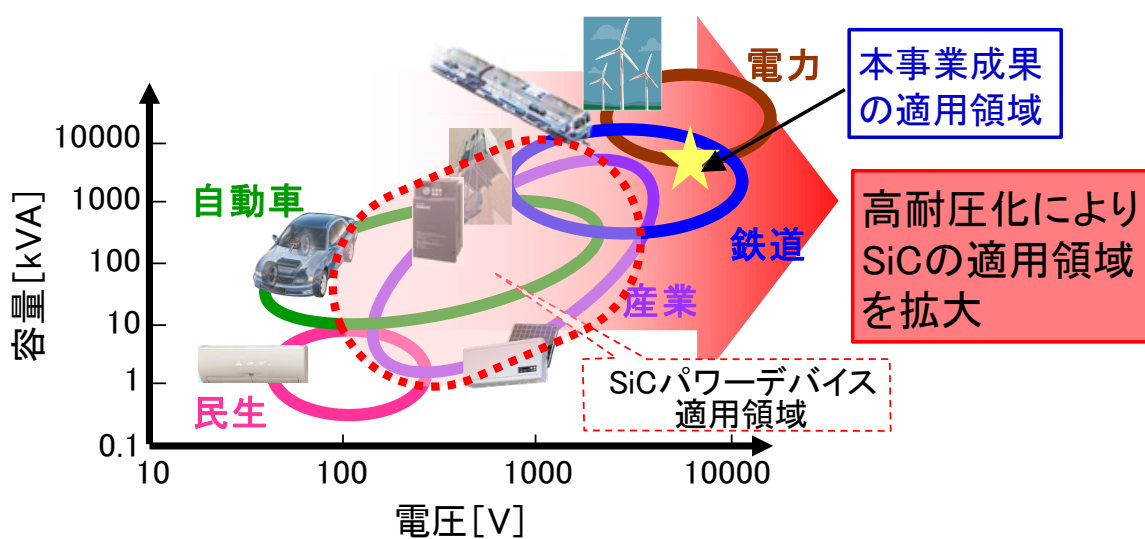


図 2.5-1 プロジェクトの位置づけ

## 2.6. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し（DOWA エレクトロニクス）

本開発プロジェクトにおいて、これまで接合材として使用されていたはんだ材では信頼性が確保できない用途において、接合銀ペーストで接合させると高い信頼性が得られるといった基礎研究がおこなわれている。

DOWA エレクトロニクスは銀粒子粒径制御技術、量産化技術を持ち合わせており、この技術と粒子分散技術を用いて銀ペーストの開発を進めてきた。

パワー半導体向けのダイアタッチ材として接合銀ペースト開発の検討は各社されているが、十分な信頼性を確保するためには高加圧による接合が必須であった。そのため、接合時における素子へのダメージが大きく、接合プロセスにおける歩留まり改善が必要であった。

DOWA エレクトロニクスでは銀粒子制御技術を使用し、低加圧接合に適した粒子の採用及び粒子高分散化により、目標である信頼性を確保しつつ 5MPa での低加圧接合を達成した接合銀ペーストの開発にめどをつけた。

本製品であるが、他社従来材料と大きく異なる点は 5MPa と低加圧で接合ができ、Cu 表面への接合が可能ということでプロセスコストの低減にも貢献できることである。また接合銀ペーストに用いられる粒子はすべて内製粉を用いており価格競争力も持ち合わせている。

今後であるが、高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュール向けで信頼性を確保し、事業化に向けた生産性、再現性等の品質安定化についても取り組んでいく。

本接合材の市場は SiC パワーモジュールに限定しても電鉄をはじめとした産業用途で今後拡大していくことが期待される。その他にも自動車向けや民生用途にも需要が出てくることが期待される。今後事業化に向けての課題の一つとして販売数量向上のために本材料の対象性品拡大のため自動車向け、民生用途にもペーストカスタマイズなどを実施していく。

## 2.7. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し（三菱マテリアル）

「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」のプロジェクトの中では絶縁基板開発 (Cu 付 DBA 基板) を担当した。パワーモジュール用の絶縁基板は大きく電鉄・新エネルギー向け、産業機械向け、車載向け、民生向けの 4 種類に大別され、最も高い耐圧が要求されるのは電鉄・新エネルギー向けである。本基板は三菱電機様の次世代電鉄向けモジュール評価に合格しているものの、三菱電機様からは量産採用の確約は未だに頂いてはいないが、他用途 (新エネルギー分野や車載向け) にも適用可能であるため、現在新規顧客への提案活動を行っている。

一方、量産プロセス開発も継続して行っており、上記新規顧客からは想定以上の低コスト要求があるため、主にプロセスコスト低減に向けた検討に注力している。

また、プロジェクトの執行は研究所が主体となって取り組んでいたが、現在事業部も含めた開発体制をとっており、これまでの車載向け絶縁基板の量産実績を活かして技術の確立を目指していく予定である。

今後の EV/HEV の普及に伴い、絶縁基板の市場成長率は、電鉄向けに比べて車載向けの方が高いとされている。本基板の更なる拡販に向けて、特に車載向けに対しマーケティング・営業活動を継続していく予定である。

## 2.8. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し（デンカ）

高熱伝導・高耐圧 SiN 回路基板の事業化に向けて、2017 年に基本技術を確立し、量産に向けた課題の抽出を行った。今後、回路基板の長期信頼性評価や量産化検討を行い、事業化する。また、本製品に要求される高熱伝導率および高耐圧を両立した SiN 回路基板は、本開発品が唯一である。

## 2.9. 「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」における実用化・事業化の見通し（日本ファインセラミックス）

本開発品となる次世代高熱伝導 SiN セラミック基板は、高放熱性・絶縁性・機械的特性（熱サイクルを伴う環境下での耐ストレス性）などの特性を備えた材料であり、高耐圧化、高出力密度化が進むパワーモジュールを構成する絶縁基板への適用が期待されるセラミック基板である。

特に SiC パワー半導体のような高い作動温度において、本開発品の特性を十分に発揮できるものと考えられ、本開発品が実用化されることによって次世代パワーエレクトロニクスの国際競争力が向上することをねらう。

## 2.10. 「次世代パワーデバイスを用いた発電電動一体ターボチャージャによる排熱回収システムの研究開発」における実用化・事業化の見通し（ACR）

静翼切替機構付きの電動発電機組込みターボ過給機に、高効率で大出力の SiCMOSFET からなるインバータを組み合わせることで、既存のターボ過給システムと比べて応答性に優れ、燃費改善効果の高いターボ過給システムを提供し、乗用車からトラックまで自動車の走行燃費改善を実現することを目標に研究開発を進めてきた。

販売対象として、国内向けには、

- a) 小型ディーゼルトラックに省燃費ターボ過給システムとして搭載
- b) ガソリン乗用車に高性能過給システムとして搭載
- c) 大型トラック向け過給システムとして商品化

これらは既存のターボ過給システムでは達成できない、高性能な過給システムを既存のエンジンに搭載することを目指しており、自動車メーカーに技術を提供する形で実用化を目指す。

当初の市場導入予定は、小型トラックは2021年からシステムを搭載し一般路走行を可能にしてトラックメーカーに評価していただく。約 1 年間動力性能、燃費性能、初期耐久性を評価していただき2022年から自動車メーカーでの商品開発のスタートを目標とする。商品として販売されるのは2024年限定販売開始を予測している。

ガソリン車へは 2022年に搭載試験を開始し2023年に同様に乗用車メーカーでの商品開発開始を目指す。販売開始は2025年と予測する。

大型トラック用も2022年から商品開発以降を目指す但長期にわたる信頼性試験が必要であり、販売開始は2025年以降と予測する。

海外でも、高過給によるダウンサイジングは、基本的な省燃費技術として主要な自動車メーカーで採用されている。本技術は、高過給をするほど顕著になる従来のシステムの欠点を解消できるので、海外でも実用化される可能性が大きいと考えている。

## 2.11. 「パワーエレクトロニクス用大口径バルク GaN 結晶の研究開発」における実用化・事業化の見通し（三菱ケミカル・日本製鋼所）

SCAAT™は三菱ケミカルが独自に開発した酸性アモナーマル法で、世界最高水準の高品質 GaN 結晶（市販品より2桁低転位密度）が得られることを実証し、4 インチサイズの結晶取得にも成功した。ただし、超高压での成長のため、生産性に影響するオートクレーブの大型化に制約があった。低压アモナーマルは東北大学、日本製鋼所、三菱ケミカルが共同で開発したオリジナル技術であり、SCAAT™の約半分の圧力での成長を可能とし、その結果、SCAAT™に対し圧倒的生産性を有する大型オートクレーブの製造に目途がついた。今後、SCAAT™と低压アモナーマルを組み合わせることで 5G 等の先端半導体向けに大口径の高品質な GaN 基板を高い生産性で供給することを目指す。6 インチサイズの GaN 単結晶基板のサンプル販売は当初計画より1年前倒し、2023 年度に開始する。

## 2.12. 「窒化ガリウムパワーデバイス高出力化のための高放熱構造の研究開発」における実用化・事業化の見通し（三菱電機）

GaN がパワーデバイス材料として市場を形成し、牽引していくためには、単に従来の代替のみならず、GaN の高周波数、高出力等の特徴が最大限に活きる用途に向けて実用化を見据えた研究開発を実施する必要がある。本研究開発では、高熱伝導率の多結晶ダイヤモンドを放熱構造に適用した高出力 GaN/ダイヤモンド構造デバイスの要素技術を開発し、デバイスを試作・動作検証、その評価結果から、SiC 等の他材料のデバイスと比較した競争優位性及び実現可能性を明確化した。

本研究開発成果の実用化、事業化に向けては、まずは 2024 年度を目途に、小型化・高出力化が強求められるレーダー用途に適用し、その後、価格、市場性を見たうえで 2025 年度以降、順次民生向け展開を図る予定である。

## 2.13. 「高効率大容量無線通信を実現する高周波 GaN-HEMT の研究開発」における実用化・事業化の見通し（住友電工）

携帯無線通信の基地局に設置される増幅器には、2000 年代後半の 4G 導入時以降、GaN を用いたトランジスタ（以下、GaN HEMT）が採用され、徐々に高周波デバイス市場に浸透してきた。海外ベンダーの Si デバイスが市場を占める中、当社は、GaN HEMT で事業を拡大し、Si デバイスからの置換えを牽引している。

5G の普及期となるポスト 5G では、超低遅延および多数同時接続の実現に向けて、高周波化・広帯域化が進展すると共に、Massive MIMO と呼ばれる多数のアンテナを用いたシステム構成が主流となる。このため、アンテナの前段に設置される増幅器には、広帯域化と共に更なる小型・低消費電力化が強求められる。こうした要求に応えるには、増幅器に用いるトランジスタの高出力密度性能が重要な役割を果たし、これを高めることで素子の小型化ができると共に、同一出力で容量が低下することで広帯域性能を得ることが可能となる。出力密度性能は材料で決まるため、5G 導入以降の市場においては、GaN 増幅器の需要が一層高まると予測される。

GaN HEMT の開発には、結晶成長技術をコアとして半導体プロセス技術と回路技術の垂直統合が必須であり、日本が優位性を発揮できる半導体産業だが、現状の GaN HEMT の基本構造

は、2000 年代後半から大きく変化しておらず、個々の要素技術の改善、改良の積み重ねで特性向上を図ってきている。こうした改善の積み重ねによる特性改善には限界が見えつつある。

こうした状況を打破し、飛躍的な特性改善を目指すために、今回の委託事業において新規の結晶成長技術を確立し、GaN HEMT の大幅な特性向上を目指した。当社は、GaN HEMT を用いたデバイス、モジュール製品を事業化し国内外の無線通信機器メーカーに供給しており、最終製品の製造能力、販路は既に獲得している。本委託事業の成果を現状の GaN HEMT に適用することで、早期に市場に導入でき、これにより、海外の GaN 競合からの性能優位性を堅持拡大し、国内産業として国際競争力の強化を目指す。2023 年以降、製造部門において技術立上げを行うと共に、製品としての増幅器開発を行い、事業展開する計画としている。

## 2.14. 「GaN デバイス用 HVPE の研究開発」における実用化・事業化の見通し（大陽日酸）

P 型ドーピングは MgO を原料に用いて取り込み、活性化に成功したが、Mg 成分はガス供給を停止しても、その後の固相中に Mg が残るメモリ効果が見られた。これを解決しないと、急峻な界面を得られず、デバイス性能劣化につながる。この抑制について、引き続き名古屋大学と共同開発を継続していく。3 年後には高速成長可能で MOVPE 並みの性能を持った厚膜 GaN デバイスを製造可能な試験機を製造販売し、それと前後し、他プログラムとのシナジー効果を得つつ量産機を製造販売する。



●特許論文等リスト

◎研究開発テーマ「新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発」

【特許】

番号	出願人	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	公立大学法人首都大学東京	特願 2016-166831	日本	2016/8/29	審査請求済、審査中	ゲート駆動装置	小原秀嶺 他
2	国立大学法人九州工業大学、三菱電機(株)、(株)東芝	特願 2016-239927	日本	2016/12/9	米国特許登録 ( WO2018-105749 登録料納付手続中)	絶縁ゲートバイポーラトランジスタ装置、半導体装置の生産方法、及び、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ装置の生産方法	大村一郎 他
3	国立大学法人九州工業大学、三菱電機(株)、(株)東芝	PCT-JP2017-44260	PCT	2017/12/9	同上	絶縁ゲートバイポーラトランジスタ装置、半導体装置の生産方法、及び、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ装置の生産方法	大村一郎 他
4	公立大学法人首都大学東京	特願 2018-037185	日本	2018/3/2	未審査請求 (審査請求期限: 2021/3/2)	ゲート駆動装置	萬年智介 他
5	国立大学法人九州工業大学	特願 2018-164922	日本	2018/9/3	公開済 特開 2020-039205 (令和 2 年 3 月 12 日)	電力変換器、可変信号遅延回路及び電力変換方法	大村一郎 他
6	東京都公立大学法人	特願 2020-143003	日本	2020/8/26	未審査請求 (審査請求期限: 2023/8/26)	演算装置、制御システム及び演算方法	山口大輝 他
7	国立大学法人東京大学	出願準備中	日本	2020/11 出願予定		絶縁ゲートバイポーラトランジスタ	平本俊郎 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Hidemine Obara	横浜国立大学	Active Gate Control in Half-Bridge Inverters Using Programmable Gate Driver ICs to Improve Both Surge Voltage and Converter Efficiency	IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.54, No. 5 Sep./Oct. 2018, 4603	有	Sep./Oct. 2018
2	Xin Liu	九州大学	Numerical analyses and experimental validations on transport and control of carbon in Czochralski silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth 499 (2018) 8–12	有	online 24 July 2018
3	Y. Miyamura	九州大学	In-situ measurement of CO gas concentration in a Czochralski furnace of silicon crystals	Journal of Crystal Growth 507 (2019) 154–156	有	online 16 November 2018

4	H. Kobayashi	明治大学	Evaluations of minority carrier lifetime in floating zone Si affected by Si insulated gate bipolar transistor processes	The Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) A special issue of the Japanese Journal of Applied Physics 58, SBBD07 (2019)	有	online February 25, 2019
5	Y. S, Cheng	首都大学東京	Optimization Platform to Find a Switching Pattern of Digital Active Gate Drive for Reducing Both Switching Loss and Surge Voltage	IEEE IAS Transactions (IEEE Transactions on Industry Applications), Vol.55, No. 5, Sep. / Oct. 2019	有	Sep./Oct. 2019
6	Takuya Saraya	東京大学	Impact of Structural Parameter Scaling on On-state Voltage in 1200 V Scaled IGBTs	Japanese Journal of Applied Physics 59, SGGD18 (2020)	有	online March 4, 2020
7	Yukihisa Suzuki	首都大学東京	Estimation of Switching Loss and Voltage Overshoot of Active Gate Driver by Neural Network	The IEICE (Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) Transactions on Electronics	有	Nov. 2020 確定
8	Kiyoshi Takeuchi	東京大学	Bipolar Transistor Test Structures for Extracting Minority Carrier Lifetime in IGBTs	IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing VOL. 33, NO. 2, 159	有	May. 2020

## 【外部発表】

### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Koutaro Miyazaki	東京大学	Automatic Optimization of IGBT Gate Driving Waveform Using Simulated Annealing for Programmable Gate Driver IC	ECCE (IEEE Energy Conversion Congress and Exposition)	2016年9月18日～22日
2	Kazunori Hasegawa	九州工業大学	Mutual Inductance Measurement for Power Device Package Using Time Domain Reflectometry	ECCE (IEEE Energy Conversion Congress and Exposition)	2016年9月18日～22日
3	小原秀嶺	首都大学東京	プログラマブルゲートドライバ IC を用いた負荷電流フィードバックアクティブゲート制御	電気学会 産業応用部門大会	2016年9月1日～9月3日
4	西澤伸一	産業技術総合研究所	新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発: PJ 概要と IGBT チップ開発	NPERC-J セミナー (New Generation Power Electronics and System Research Consortium of Japan; 会員限定)	2016年5月28日, 四谷主婦会館
5	大村一郎	九州工業大学	新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発: PJ 概要と IGBT ドライブ回路技術	NPERC-J セミナー (New Generation Power Electronics and System Research Consortium of Japan, 会員限定)	2016年5月28日, 四谷主婦会館
6	高宮真	東京大学	LSI 屋から見たパワーエレクトロニクス: 両者の融合に向けて	NPERC-J 第3回ワークショップ「PE システムインテグレーションの新しい息吹と応用」,	2016年5月27日, 東京
7	Koutaro Miyazaki	東京大学	20-ns Short-Circuit Detection Scheme with High Variation-Tolerance based on Analog Delay	IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)	2016年12月5日～8日,

			Multiplier Circuit for Advanced IGBTs		Auckland, New Zealand
8	K. Kakushima	東京工業大学	Experimental Verification of a 3D Scaling Principle for Low Vce(sat) IGBT	IEDM2016:2016 IEEE International Electron Devices Meeting	2016年12月3日～7日, San Francisco, CA
9	Hidemine Obara	首都大学東京	Active Gate Control in Half-Bridge Inverter by Using Programmable Gate Driver ICs to Improve both Surge Voltage and Switching Loss	IEEE APEC (Applied Power Electronics Conference)	2017年3月26日～30日
10	崔 通	東京大学	デジタルゲート駆動 IC を用いた IGBT のスイッチング時における損失とオーバーシュートの自動最適化	電子デバイス/半導体電力変換合同研究会 北九州	2016年11月14日～15日, 九州工業大学 戸畑
11	大村一郎	九州工業大学	次世代パワーエレクトロニクス研究センターの取り組み	九工大主催 NEDO シンポジウム	2016年10月17日
12	高宮真	東京大学	IoT 技術とパワーエレクトロニクスの融合	第3回 NEDO パワーエレクトロニクスシンポジウム 期待される次世代パワーエレクトロニクスの応用 ～地上から宇宙まで～【基調講演】	2017年2月14日 (大手町フィナンシャルシティカンファレンスセンター)
13	Makoto Takamiya	東京大学	Power Electronics 2.0:IoT-Connected and AI-Controlled Power Electronics Operating Optimally for Each User	IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD2017) 【Invited lecture】	May 28–June 1, 2017, Sapporo, Japan
14	小原秀嶺	横浜国立大学	プログラマブルゲートドライバ IC を用いた IGBT モジュール用ゲート駆動制御回路の開発	電気学会産業応用部門大会	2017年8月, 函館
15	K. Kakushima	東京工業大学	Demonstration of Reduction in Vce(sat) of IGBT based on a 3D Scaling Principle	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), 【Invited lecture】	2017年9月22日, 仙台
16	Tomoyuki Mannen	首都大学東京	Active Gate Control for Switching Waveform Shaping Irrespective of the Circuit Stray Inductance in a Practical Full-Bridge IGBT Inverter	IEEE APEC2018 (Applied Power Electronics Conference and Exposition)	2018年3月4～8日
17	S. Abe	九州工業大学	Modelling of the shoot-through phenomenon introduced by the next generation IGBT in inverter applications	European Symposium on Reliability of Electronic Devices Failure Physics and Analysis (ESREF)	2017年9月25～28日, フランス・ポルドー
18	K. Tsutsui	東京工業大学	3D Scaling for Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) with Low Vce(sat)	ASICON (International Conference on ASIC)【Invited lecture】	2017年10月25～28, 中国
19	桜井貴康	東京大学	「トリオンノード・エンジン」が創るオープンイノベーション・プラットフォーム みんなで作る IoT/CPS の未来	CEATEC2017 【招待講演】	2017年10月6日
20	筒井一生	東京工業大学	三次元スケーリングによる IGBT の VCEsat 低減の実験的検証	電気学会研究会	2017年11月20日

21	K. Takeuchi	東京大学	Measurement of IGBT trench MOS-gated region characteristics using short turn-around-time MOSFET test structures	31st International Conference on Microelectronic Test Structures, Austin, Texas (ICMTS)	March 19-22, 2018
22	高宮真	東京大学	IoT 技術とパワーエレクトロニクスの融合	パワー・エレクトロニクス・サミット 2017 【アワード受賞講演】	2017 年 12 月 5 日
23	H. Iwai	東京工業大学	3D scaling of Si-IGBT	EUROSOI-ULIS 2018 Spain Granada, Sponsor IEEE EDS 【Invited lecture】	2018 年 3 月 19 日-21 日
24	小林弘人	明治大学	Si-IGBT プロセスによる Fz-Si の少数キャリアライフタイムへの影響評価	2018 年春の応用物理学会	2018 年 3 月 17 日～20 日
25	秋山寿夫	首都大学東京	デジタルゲート駆動を実現する三相インバータ制御回路基板の開発	電気学会 全国大会	2018 年 3 月 14～16 日
26	Y. S, Cheng	首都大学東京	Optimization System to Find a Switching Pattern of Digital Active Gate Drive for Full-Bridge Inverter Circuit	ECCE (IEEE Energy Conversion Congress and Exposition)	2018 年 9 月 23～27 日
27	K. Kakushima	東京工業大学	New methodology for evaluating minority carrier lifetime for process assessment	2018 Symposia on VLSI Technology and Circuits (VLSI シンポジウム)	2018 年 6 月 18～22 日, Honolulu, HI
28	M. Tsukuda	九州工業大学	Bias voltage criteria of gate shielding effect for protecting IGBTs from shoot through phenomena	29th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF)	October 1-5, 2018, Aalborg Denmark
29	R.N. Tripathi	九州工業大学	A fully digital feedback control of gate driver for current balancing of parallel connected power devices	29th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF)	October 1-5, 2018, Aalborg Denmark
30	T. Hoshii	東京工業大学	Verification of Injection Enhancement Effect on IGBTs by Measuring Electron and Hole Currents Separately	48th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)	Sept. 3-6, 2018, Dresden Germany
31	H. Kobayashi	明治大学	Evaluations of Minority Carrier Lifetime in FZ-Si Affected by Si-IGBT Processes	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM) 2018	Sep. 9-13, 2018, Tokyo
32	角嶋邦之	東京工業大学	少数キャリアライフタイムによる半導体プロセスの評価手法の提案	電気学会 C 部門大会 シンポジウム【依頼講演】	2018 年 9 月 5 日～9 月 8 日, 北海道大学
33	柿本浩一	九州大学	結晶成長における軽元素制御	日本学術振興会第 145 委員会 第 159 回研究会【依頼講演】	2018 年 7 月 13 日, 明治大学駿河台
34	小林弘人	明治大学	Si-IGBT プロセスによる FZ-Si の少数キャリアライフタイムへの影響評価-II-	2018 年秋の応用物理学会	2018 年 9 月 18 日～ 21 日, 名古屋
35	高宮真	東京大学	パワーエレクトロニクスと LSI の異分野連携:IGBT 向けデジタルゲートドライバ IC	2018 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 【依頼講演】	2018 年 9 月 11 日～14 日
36	平本俊郎	東京大学	思い入れのシリコンデバイス Perspective	イノベーション協創研究会 【依頼講演】	2018 年 7 月 20 日

37	K. Kakushima	東京工業大学	New methodology for evaluating minority carrier lifetime for process assessment	電気学会 電子・情報・システム ナノエレクトロニクス基盤ヘテロ集積化・応用技術調査専門委員会(CEDD1145)【依頼講演】	2018年7月20日早稲田大学研究開発センター
38	Yu Shan Cheng	首都大学東京	High-Speed Searching of Optimum Switching Pattern for Digital Active Gate Drive Circuit of Full Bridge Inverter Circuit	IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC2019)	March 17-21, 2019, Anaheim, CA
39	T. Saraya	東京大学	Demonstration of 1200 V Scaled IGBTs Driven by 5 V Gate Voltage with Superiorly Low Switching Loss	2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM2018)	December 1-5, 2018, San Francisco, CA
40	小林弘人	明治大学	Minority carrier lifetime degradation in FZ-Si by advanced Si-IGBT processes	日本学術振興会結晶加工と評価技術・第145委員会、他主催 第8回シリコン材料の科学と技術フォーラム2018	2018年11月18日～21日、岡山
41	K. Takeuchi	東京大学	Vertical Bipolar Transistor Test Structure for Measuring Minority Carrier Lifetime in IGBTs	ICMTS2019 (32nd IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures)	March 18-21, 2019, Fukuoka, Japan
42	R.N. Tripathi	九州工業大学	A fully digital feedback control of gate driver for current balancing of parallel connected IGBT	九州工業大学 重点プロジェクトセンター合同ワークショップ～IoTとエネルギーが融合する21世紀型インフラとその信頼性～	2018年11月6日～7日 Kitakyushu International Conference Center
43	M. Watanabe	東京工業大学	Impact of three-dimensional current flow on accurate TCAD simulation for trench-gate IGBTs	The 31st IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)	May 19-23, 2019, Shanghai,
44	K. Miyazaki	東京大学	Gate Waveform Optimization in Emergency Turn-off of IGBT Using Digital Gate Driver	the 10th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia)	May 27-30, 2019, Busan, Korea
45	T. Saraya	東京大学	3300 V Scaled IGBTs Driven by 5 V Gate Voltage	The 31st IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)	May 19-23, 2019, Shanghai,
46	M. Tsukuda	北九州市環境エレクトロニクス研究所	Self-Turn-On-Free 5 V Gate Driving for 1200 V Scaled IGBTs	The 31st IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)	May 19-23, 2019, Shanghai,
47	大村一郎	九州工業大学	パワー半導体のデジタルゲート駆動:NEDO—PJとドライブ関連技術の報告	NPERC-J セミナー	2018年12月12日
48	更屋拓哉	東京大学	5 V ゲート駆動 1200 V 級スケール IGBT の動作実証とスイッチング損失の低減	応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会 第213回研究集会 電通 SDM 共催研究集会 (IEDM 特集)【招待講演】	2019年1月29日、機械振興会館
49	小林弘人	明治大学	Si-IGBT プロセスによる FZ-Si の少数キャリアライフタイムへの影響評価-III-	応用物理学会 2019年 春季 学術講演会	2019年3月9日～12日、東京工業大学大岡山

50	Hidemine Obara	横浜国立大学	Design and Implementation of Digital Active Gate Control with Variable 63-level Drivability Controlled by Serial 4-bit Signals	The Eleventh Annual Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)	September 29 – October 3, 2019, Baltimore, Maryland, USA
51	Toru Sai	東京大学	Load Current and Temperature Dependent Optimization of Active Gate Driving Vectors	The Eleventh Annual Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)	September 29 – October 3, 2019, Baltimore, Maryland, USA
52	Ravi Nath Tripathi	九州工業大学	Peak minimization based gate delay compensation for active current balancing of parallel IGBT system	30th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF2019)	2019年9月23日~26日 Toulouse, France
53	Koutaro Miyazaki	東京大学	CNN-based Approach for Estimating Degradation of Power Devices by Gate Waveform Monitoring	The 17th IEEE International Conference on IC Design and Technology (ICICDT)	2019年6月17日~19日 Suzhou, China
54	Ravi Nath Tripathi	九州工業大学	Active Voltage Balancing for Series Connected IGBT System using Gate Delay Control	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM-2019)	2019年9月2日~5日, Nagoya University, Aichi, Japan
55	小原秀嶺	横浜国立大学	4ビットシリアル信号入力デジタルアクティブゲート回路の開発	2019 電気学会産業応用部門大会	2019年8月20日~22日、長崎大学
56	Munetoshi Fukui	東京大学	Turn-Off Loss Improvement by IGBT Scaling	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM-2019)	2019年9月2日~5日, Nagoya University, Aichi, Japan
57	Takuya Saraya	東京大学	Impact of Structural Parameter Scaling on On-state Voltage in 1200 V Scaled IGBTs	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM-2019)	2019年9月2日~5日, Nagoya University, Aichi, Japan
58	鈴木敬久	首都大学東京	ニューラルネットワークによるアクティブゲートドライバの入出力関係の推論	2019年電気学会産業応用部門大会	2019年8月20日~22日 長崎大学
59	Yu Shan Cheng	首都大学東京	Digital Active Gate Drive with Optimal Switching Patterns to Adapt to Sinusoidal Output Current in a Full Bridge Inverter Circuit	IEEE IECON 2019	2019年10月14日~17日
60	平本俊郎	東京大学	5 V ゲート駆動による 3300 V スケーリング IGBT のスイッチング動作	電子情報通信学会 SDM/ICD 研究会 8 月研究会【依頼講演】	2019年8月7-9日、北海道大学
61	T. Hiramoto	東京大学	Switching of 3300 V Scaled IGBT by 5 V Gate Drive	ASICON (International Conference on ASIC) 【招待講演】	2019年10月29~11月1日、中国重慶
62	佐藤亮平	九州大学	熱負荷工程における Si 基板中の転位挙動に関する数値計算	2019年秋の応用物理学会	2019年9月18日~21日 北海道大学



63	西澤伸一	九州大学	結晶成長速度が固液界面形状および結晶内温度分布に及ぼす影響	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2020年7月28日～8月2日、Colorado
64	Toru Sai	東京大学	Stop-and-Go Gate Drive Minimizing Test Cost to Find Optimum Gate Driving Vectors in Digital Gate Drivers	IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)	2020年3月15日～19日 New Orleans, USA
65	Toru Sai	東京大学	Robust Gate Driving Vectors to Load Current and Temperature Variations for Digital Gate Drivers	4th IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC 2019), Special Session	2019年11月25日～28日 Singapore
66	Tomoyuki Mannen	首都大学東京	Effect of the Snubber Capacitor in a Practical IGBT Full-Bridge Inverter with Digital Gate Drivers	4th IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC 2019), Special Session	2019年11月25～28日
67	Ravi Nath Tripathi	九州工業大学	Digital Gate Drive Control Method for Active Voltage Balancing of Series-connected IGBT Devices	11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS2020)	2020年3月24日～26日 Berlin Germany
68	Ravi Nath Tripathi	九州工業大学	Dynamic Current Balancing of Parallel Connected IGBT Devices us-ing PCB Sensor for Integration in Power Modules	11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS2020)	2020年3月24日～26日 Berlin Germany
69	渡辺 正裕	東京工業大学	トレンチゲート型 Si-IGBT の 3 次元精密 TCAD シミュレーション	電子情報通信学会 SDM 研究会【招待講演】	2019年11月7～8日、東京・機会振興会館
70	佐藤亮平	九州大学	デバイスプロセスの高温熱負荷工程における Si 基板中の転位挙動に関する数値計算	電気学会 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会	2019年11月28日～29日
71	更屋拓哉	東京大学	5 V ゲート駆動による 3300 V スケーリング IGBT の動作実証	電気学会 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会	2019年11月28日～29日
72	山口大輝	首都大学東京	Digital active gate control for a three-phase inverter circuit to suppress surge voltage and improve efficiency	IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2020)	2020年10月11日-15日
73	鈴木 敬久	首都大学東京	ニューラルネットワークを用いたアクティブゲートドライバの最適スイッチングパターン推定のための予備的検討	電子情報通信学会総合大会	2020年3月17日-20日
74	平本俊郎	東京大学	Newly emerged Si-IGBT possibility for new generation PE	NPERC-J シンポジウム	2020年1月29日、イイノホール
75	平本俊郎	東京大学	新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発 (発表およびポスター展示)	第 6 回 NEDO パワーエレクトロニクスシンポジウム	2020年2月25日、ステーションコンファレンス 東京
76	長谷川一徳	九州工業大学	Shoot-through protection for an inverter consisting of the next-generation IGBTs with gate impedance reduction	European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF)	2020年10月5-8日、ギリシャ アテネ

77	門 龍翔	明治大学	Si-IGBT 作製プロセスにおける水素熱処理の影響評価	応用物理学会 2020 年 秋季 学術講演会	2020/9 月
78	Daiki Yamaguchi	首都大学東京	Digital active gate control for a three-phase inverter circuit for a surge voltage suppression and switching loss reduction	IEEE ECCE	2020 年 10 月 11 日～15 日
79	鈴木敬久	首都大学東京	ニューラルネットワークを用いたアクティブゲートドライバのスイッチングパターン推定	2020 年電子情報通信学会ソサイエティ大会	2020 年 9 月 15 日～9 月 18 日
80	執行直之	東京工業大学	Modeling and Simulation of Si IGBTs	International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD) 2020 <b>【招待講演】</b>	2020/9/23-10/6 (virtual conference)

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	媒体名	発表年月
1	東京大学、九州工業大学	スケーリング IGBT が拓くパワーエレクトロニクスの新しいパラダイム	応用物理機関誌 <b>【依頼投稿】</b>	2017 年 11 月号
2	東京工業大学	微細化によるシリコンパワートランジスタの高効率化に成功	プレスリリース(報道機関)	2016 年 12 月 5 日
3	東京大学	「良い物を安く」の競争軸からの脱却を目指して	日刊工業新聞	2017 年 7 月 10 日
4	九州工業大学、東京工業大学	Si IGBT が SiC に肉迫、素子構造や駆動法の改善で	日経エレクトロニクス 9 月号	2017 年 9 月号
5	九州工業大学	極限 IGBT の研究開発	NPERC-J アニュアルレポート	2018 年 6 月 1 日
6	東京工業大学	半導体の少数キャリア寿命を正確に測定する手法開発	プレスリリース(報道機関)	2018 年 6 月 18 日
7	九州工業大学	戦略デバイスとして期待高まる IGBT	日刊工業新聞 <b>【依頼記事】</b>	2019 年 2 月 18 日
8	九州工業大学	超高速パワー半導体パッケージの性能評価手法を提案	プレスリリース(新聞投げ込み)	2019 年 5 月 10 日
9	東京大学	3300 V 級シリコン IGBT で 5 V ゲート駆動のスイッチングに世界で初めて成功	日刊工業新聞、EE Times Japan <b>【記者会見】</b>	2019 年 5 月 28 日

(c)展示会への出展

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	東京大学、東京工業大学	新世代 Si-IGBT と応用基本技術の研究開発	モノづくり日本会議(第 6 回パワエレシンプोजウム)	2020 年 2 月 25 日 東京



【表彰(受賞)】

番号	受賞者	所属	タイトル	発表機関・発表誌名	発表年月
1	桜井貴康	東京大学	ゲート駆動にデジタル制御を適用、「パワエレ IoT」実現に道	日経エレクトロニクス【NE パワー・エレクトロニクス・ア ワード受賞】	2017年9 月号
2	北九州市/大 村一郎	九州工業大学	パワー半導体でのムーアの法則:シリコ ン IGBT のスケーリング則 : (スケーリン グ則の原理発見)	環境省【平成 30 年度地球 温暖化防止活動環境大臣 表彰】	2018年12 月3日

◎研究開発テーマ「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」

【特許】 非公開

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	両角朗	富士電機	Influence of Cooling Rates on Reliability of Solder Joints Using Sn-13wt.% Sb Binary Alloy for Power Semiconductor Modules	IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology	有 (論文)	2016/5/3 0

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	立岡正明	富士電機	高密度樹脂封止パッケージの高信頼性検証	エレクトロニクス実装学会 MES 2015	2015/9/3
2	高橋良和	富士電機	パワー半導体パッケージ技術の最新動向	エレクトロニクス実装学会 MES 2015	2015/9/3
3	高橋良和	富士電機	次世代パワー半導体技術	電子デバイスフォーラム京都	2015/11/13
4	高橋良和	富士電機	パワー半導体モジュールの最新パッケージ技術	インターネプコン 2016	2016/1/14
5	須賀唯知	東京大学 富士電機	銅のギ酸還元反応の研究	エレクトロニクス実装学会 春季講演大会	2016/3/22
6	市村裕司	富士電機	樹脂封止パッケージの高密着化による高信頼性検証	エレクトロニクス実装学会 春季講演大会	2016/3/24
7	堂本高士	デンカ	Deterioration Means of Thermal Interface Materials	SEMI-THERM 2016	2016/3/25

8	高橋良和	富士電機	- Panel Session - Power Module Integration	ECTC 2016	2016/5/31
9	満留博	九州工業 大学 富士電機	Basic Study on Partial Discharge Location in Power Module	International Conference on Dielectrics 2016	2016/7/4

(b)新聞・雑誌等への掲載 なし

(c)展示会への出展

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	富士電機	IP6x 対応 INV (Type I)	システムコントロールフェア 2015	2015/12/02- 04
2	富士電機	日本のパワー半導体でエネルギー 問題を解決・次世代パワーモ ジュールエコシステム	セミコン・ジャパン 2015	2015/12/14- 16
3	富士電機	APS (Type III)	Inno Trans.	2016/09/20- 23

## ◎研究開発テーマ「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」

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	(株)デンソー	特願 2014-209025	国内	2014/10/10	登録	電動機駆動装置	野村由利夫他
2	(株)デンソー	特願 2014-209026	国内	2014/10/10	登録	電動機駆動装置	野村由利夫他
3	(株)SOKEN	特願 2014-224083	国内	2014/11/04	登録	電力変換装置	高橋芳光他
4	(株)デンソー	特願 2014-224084	国内	2014/11/04	登録	電力変換装置	野村由利夫他
5	(株)SOKEN	特願 2014-262447	国内	2014/12/25	登録	電力変換装置	脇本亨他
6	(株)デンソー	特願 2014-262469	国内	2014/12/25	登録	電力変換装置	野村由利夫他
7	(株)SOKEN	特願 2015-4283	国内	2015/01/13	登録	電力変換装置	脇本亨他
8	(株)デンソー	特願 2015-8567	国内	2015/01/20	登録	スイッチング素子の駆動装置	入江将嗣他
9	(株)デンソー	特願 2015-41230	国内	2015/03/03	登録	自動同期整流回路	今澤孝則他
10	(株)SOKEN	特願 2015-59552	国内	2015/03/23	登録	電力変換装置	伊藤満孝他
11	(株)SOKEN	特願 2015-59553	国内	2015/03/23	登録	電力変換装置	高橋芳光他
12	(株)SOKEN	特願 2015-59554	国内	2015/03/23	放棄	電力変換装置	高橋芳光他

13	(株)デンソー	特願 2015-62521	国内	2015/03/25	登録	スイッチング素子の駆動装置	入江将嗣他
14	(株)SOKEN	特願 2015-140408	国内	2015/07/14	公開	電力変換装置	高橋芳光他
15	(株)デンソー	特願 2016-23618	国内	2016/02/20	登録	スイッチング素子の駆動装置	入江将嗣他
16	(株)デンソー	特願 2016-31955	国内	2016/02/23	公開	同期整流回路	入江将嗣他
17	(株)SOKEN	特願 2016-37241	国内	2016/02/29	登録	電力変換装置	高橋芳光他
18	(株)SOKEN	特願 2016-46935	国内	2016/03/10	登録	電力変換装置	高橋芳光他
19	(株)デンソー	特願 2016-52375	国内	2016/03/16	登録	銀ナノワイヤの製造方法	岩重朝仁他
20	(株)SOKEN	特願 2016-56674	国内	2016/03/22	登録	電力変換装置	伊藤満孝他
21	(株)SOKEN	特願 2016-57954	国内	2016/03/23	登録	電力変換装置	伊藤満孝他
22	(株)デンソー	特願 2016-93999	国内	2016/05/09	登録	電力変換装置	風岡諒哉他
23	(株)SOKEN	特願 2016-143058	国内	2016/07/21	登録	電力変換装置	伊藤満孝他
24	(株)デンソー	特願 2016-209563	国内	2016/10/26	放棄	ゲート駆動回路	山田英明他
25	(株)SOKEN	特願 2016-228835	国内	2016/11/25	登録	回転電機	高橋芳光他
	(株)SOKEN	16/423737	米国	2017/11/16	出願	回転電機	高橋芳光他
	(株)SOKEN	201780072872	中国	2017/11/16	出願	回転電機	高橋芳光他
	(株)SOKEN	112017005983.6	独国	2017/11/16	出願	回転電機	高橋芳光他
	(株)SOKEN	PCT/ JP2017/041195	PCT	2017/11/16	出願	回転電機	高橋芳光他
26	(株)SOKEN	特願 2016-247627	国内	2016/12/21	公開	電力変換装置	伊藤満孝他
27	(株)SOKEN	特願 2016-247628	国内	2016/12/21	登録	電力変換装置	高橋芳光他
28	(株)デンソー	特願 2017-39268	国内	2017/03/02	公開	電力変換器および電力変換器の調整方法	風岡諒哉他
29	(株)デンソー	特願 2017-55741	国内	2017/03/22	公開	半導体装置	今澤孝則他
30	(株)デンソー	特願 2017-170204	国内	2017/09/05	公開	交流電動機の制御装置	小俣隆士他
31	(株)デンソー	特願 2017-178967	国内	2017/09/19	公開	三相インバータ装置	土田正裕他
32	(株)デンソー	特願 2017-192685	国内	2017/10/02	公開	電力変換器	風岡諒哉他

33	(株)デンソー	特願 2017-199371	国内	2017/10/13	公開	三相インバータ装置	土田正裕他
34	(株)デンソー	特願 2018-6282	国内	2018/01/18	公開	充放電制御装置	山田哲也他

## 【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	丹羽章雄他	(株)デンソー	SiC-MOSFET の電流センス機能を用いたデッドタイム制御回路	電気学会論文誌 D 136(2),145-151, 2016	有	2016/02/01
2	陳伝トウ他	大阪大学	Self-healing of cracks in Ag joining layer for die-attachment in power devices	Applied Physics Letters 109(9):093503	有	2016/08/01
3	陳伝トウ他	大阪大学	Mechanical Deformation of Sintered Porous Ag Die Attach at High Temperature and Its Size Effect for Wide-Bandgap Power Device Design	Journal of Electronic Materials 46 (3), 1576-1586	有	2016/12/13
4	陳伝トウ他	大阪大学	Macroscale and microscale fracture toughness of microporous sintered Ag for applications in power electronic devices	Acta Materialia 129, 41-51	有	2017/02/05
5	陳伝トウ他	大阪大学	High-temperature reliability of sintered microporous Ag on electroplated Ag, Au, and sputtered Ag metallization substrates	Journal of Materials Science Materials in Electronics 29 (3), 1785-1797	有	2017/10/23
6	杉浦和彦他	(株)デンソー	Reliability Evaluation of SiC Power Module with Sintered Ag Die-Attach and Stress-Relaxation Structure	IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY	有	2019/04/09
7	杉浦和彦他	(株)デンソー	Reliability Evaluation of SiC Power Module with Sintered Ag Die-Attach and Stress-Relaxation Structure	IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY	有	2019/04/09

## 【外部発表】

### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	丹羽章雄他	(株)デンソー	デッドタイム制御機能を内蔵した SiC-MOSFET ゲートドライバ	平成 27 年電気学会産業応用部門大会	2015/09/03
2	丹羽章雄他	(株)デンソー	Novel Dead Time Controlled Gate Driver Using the Current Sensor of SiC-MOSFET	IEEE IECON2015	2015/11/12
3	陳伝トウ他	大阪大学	FEM 解析より低発生応力となる最適モジュール構造の設計	第30回エレクトロニクス実装学会	2016/03/22
4	陳伝トウ他	大阪大学	Low-stress design for SiC power modules with sintered porous Ag interconnection	Electronic Components and Technology Conference	2016/05/31
5	杉浦和彦他	(株)デンソー	タングステン化合物粒子添加による Ag 焼結接合材料の熱安定性の向上	第31回エレクトロニクス実装学会	2017/03/07
6	風岡諒哉 他	(株)デンソー	パワーデバイスの過電流検出用センスセルを用いたモーダ電流検出	平成 27 年電気学会全国大会	2017/03/17
7	杉浦和彦他	(株)デンソー	First Failure Point of a SiC Power Module with Sintered Ag Die-Attach on Reliability Tests	ICEP (International Conference on Electronics Packaging) 2017	2017/04/20
8	杉浦和彦他	(株)デンソー	Ag 焼結接合材料の熱安定性の向上	第27回マイクロエレクトロニクスシンポジウム	2017/08/29

9	杉浦和彦他	(株)デンソー	Ag 焼結接合および応力緩和構造を適用した SiC パワーモジュールの信頼性評価	第119回マイクロ接合研究委員会	2017/09/29
10	山田隆弘	(株)デンソー	SiC 実用化に向けた周辺技術の社内開発事例	自動車技術会 車載パワーエレクトロニクス技術シンポジウム	2017/10/30
11	杉浦和彦他	(株)デンソー	SiC を用いた両面冷却パワーモジュール	応用物理学会・先進パワー半導体分科会第9 回研究会	2017/12/22
12	鶴田和弘	(株)デンソー	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	SiC アライアンス研究会	2018/03/07
13	山田隆弘	(株)デンソー	高品質 SiC デバイスと車載向け実用化技術	パワーデバイス・イネーブリング協会主催セミナー	2018/07/30
14	徳田雄一郎	(株)デンソー	ガス成長法による φ4 インチ 4H-SiC 結晶の高速成長	先進パワー半導体分科会第5 回講演会	2018/11/05
15	徳田雄一郎	(株)デンソー	ガス成長法による φ4 インチ 4H-SiC SiC バルク 単結晶の高速成長と ウェハ 品質評価	第1 回結晶工学 x ISYSE 合同研究会	2018/11/29
16	山田隆弘	(株)デンソー	高品質 SiC デバイスと車載向け実用化技術	自動車技術会 車載パワーエレクトロニクス技術シンポジウム	2019/01/24
17	杉浦和彦他	(株)デンソー	車載パワーモジュールの実装技術課題	エレクトロニクス実装学会パワーエレクトロニクス研究会 公開研究会	2019/02/19
18	鶴田和弘	(株)デンソー	デンソーにおける SiC 車載適用化技術開発の取り組み	「SIPパワーエレクトロニクス自動車用高耐熱モジュールの開発」成果報告会	2019/03/07
19	徳田雄一郎	(株)デンソー	高温ガス成長法による高速レートでの φ4"長尺 4H-SiC SiC 結晶の成長	第66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/03/09
20	神田貴裕	(株)デンソー	高温ガス成長法 Φ6inch 4H-SiC 結晶 の開発	第66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/03/11
21	山田隆弘	(株)デンソー	車載を睨む SiC デバイス実用化技術	パワーデバイス・イネーブリング協会主催セミナー	2019/03/20
22	鶴田和弘	(株)デンソー	自動車におけるパワーエレクトロニクス	TIA パワーエレクトロニクスサマースクール	2019/08/26
23	徳田雄一郎	(株)デンソー	Fabrication of 4H-SiC PiN Diodes on Substrate Grown by HTCVD Method	SSDM2019	2019/09/04
24	徳田雄一郎	(株)デンソー	Fast 4H-SiC Bulk Growth by High-Temperature Gas Source Method	ICSCRM2019	2019/10/03
25	岡本武志	(株)デンソー	Development of 150mm 4H-SiC Substrates in High-temperature Chemical Vapor Deposition Method	ICSCRM2019	2019/10/03

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	デンソー、大阪大学	SiC パワー半導体用接合材の自己修復現象を発見	NEDO web サイト	2016/3/28

### (c)展示会への出展

番号	所属	タイトル	形態	発表年月
1	デンソー	SEMICON Japan 2015 (NEDO ブースでの展示)	展示	2015/12/16-18
2	デンソー	人とくるまのテクノロジー展 2018 横浜	展示	2018/05/23-25
3	デンソー	人とくるまのテクノロジー展 2018 名古屋	展示	2018/07/11-13

◎研究開発テーマ「高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発」

・研究開発項目①「主回路設計技術、パッケージ設計技術」

・研究開発項目⑥「高耐圧 SiC デバイス開発」

【特許】 非公開

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	日野史郎、他	三菱電機(株)	Demonstration of SiC-MOSFET Embedding Schottky Barrier Diode for Inactivation of Parasitic Body Diode	The European Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2016 pp.477	有	2016/09
2	友久伸吾	三菱電機(株)	SBD 内蔵 SiC-MOSFET の開発	三菱電機技報 2017 年 1 月号 pp.45	無	2017/01
3	川原 洸 太郎、他	三菱電機(株)	6.5 kV Schottky-Barrier-Diode-Embedded SiC-MOSFET for Compact Full-Unipolar Module	The 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, pp.2-1	有	2017/05
4	豊田吉彦、他	三菱電機(株)	6.5kVフルSiCパワーモジュール	三菱電機技報 2017 年 1 月号、pp.15	無	2017/07
5	川原 洸 太郎、他	三菱電機(株)	Impact of Embedding Schottky Barrier Diodes into 3.3 kV and 6.5 kV SiC MOSFETs	The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2017, pp.663	有	2017/09
6	中嶋純一、他	三菱電機(株)	6.5-kV Full-SiC Power Module (HV100) with SBD-embedded SiC-MOSFETs	Power Conversion and Intelligent Motion Europe 2018, pp.441	有	2018/05
7	海老原 洪平、他	三菱電機(株)	Investigation of the Robust Edge Termination Applied to 6.5kV SiC MOSFET	Materials Science Forum, pp.778	有	2018/06
8	小林 浩	三菱電機(株)	6.5 kV Full-SiC Power Semiconductor Module	Mitsubishi Electric ADVANCE September 2018 pp.6	無	2018/09
9	佐藤隆彦	芝浦工業大学	Evaluation of Fatigue Crack Propagation Behavior of Pressurized Sintered Ag Nanoparticles and Its Application to Thermal Fatigue Life Prediction of Sintered Joint	Materials Transactions 2019 Vol 60 (6), pp.850	有	2019/03

【外部発表】

(b) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	福本晃久、他	三菱電機(株)	パワーモジュールの焼結 Ag 接合部の破壊メカニズムに関する調査	第 22 回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム	2016/02
2	中田修平	三菱電機(株)	Development of High Voltage SiC Devices and Its Applications	International SiC Power Electronics Applications Workshop	2016/05

3	高橋秀人、 他	芝浦工業 大学	Ag ナノ焼結接合体の熱疲労き 裂進展解析	日本金属学会 2016 年秋期講演大会	2016/09
4	塩田竜太 郎、他	芝浦工業 大学	Ag ナノ粒子焼結体のクリープ変 形機構の検討	第 26 回マイクロエレクトロニクスシンポ ジウム秋季大会 MES2016	2016/09
5	堀貴文、 他	九州工業大 学、三菱電 機(株)	窒化アルミニウム絶縁基板の高 温領域までの誘電特性の評価	平成 28 年度(第 69 回)電気・情報関 係学会九州支部連合大会	2016/09
6	福本晃久、 他	三菱電機 (株)	ダイボンド用焼結 Ag ナノ粒子接 合の緻密度と接合信頼性の関 係調査	第一回超音波フォーラム(主催 株式 会社日立パワーソリューションズ)	2016/12
7	三井陽平、 他	東京工業大 学	3.3-kV Si-IGBT モジュールの連 続スイッチング試験システムと損 失評価	電気学会 半導体電力変換研究会	2017/01
8	福本晃久、 他	三菱電機 (株)	パワーモジュールのチップ下接 合層における鉛直方向破壊と熱 抵抗との関連調査	第 23 回「エレクトロニクスにおけるマイ クロ接合・実装技術」シンポジウム	2017/01
9	相子祐樹、 他	芝浦工業大 学	加圧焼結した Ag ナノ粒子の疲 労き裂進展速度におよぼす温度 の影響	第 23 回「エレクトロニクスにおけるマイ クロ接合・実装技術」シンポジウム	2017/02
10	高橋秀人、 他	芝浦工業大 学	Ag ナノ粒子焼結接合部の熱疲 労き裂進展解析	第 23 回「エレクトロニクスにおけるマイ クロ接合・実装技術」シンポジウム	2017/02
11	阿部剛志、 他	九州工業大 学、三菱電 機(株)	高温誘電特性における窒化アル ミニウムおよび窒化ケイ素基板の 特性比較	平成 29 年 電気学会全国大会	2017/03
12	谷垣剛司、 他	三菱電機 (株)	ダイボンド用焼結 Ag ナノ粒子接 合の緻密度と接合信頼性の関 係調査	日本金属学会 2017 年春期講演大会	2017/03
13	福本晃久、 他	三菱電機 (株)	パワーモジュールのチップ下焼 結銀接合層における鉛直方向 破壊と熱抵抗との関連調査	第 27 回マイクロエレクトロニクスシンポ ジウム	2017/08
14	佐藤隆彦、 他	芝浦工業大 学	Ag ナノ粒子焼結体の疲労き裂 進展速度におよぼす焼結圧力 の影響	日本金属学会 2017 年秋期講演大会	2017/09
15	末永道哉、 他	九州工業大 学、三菱電 機(株)	窒化ケイ素の交流伝導特性にお ける温度・周波数の影響	平成 29 年電気学会 基礎・材料・共通 部門大会	2017/09
16	末永道哉、 他	九州工業大 学、三菱電 機(株)	空気中の窒化アルミニウム楔 ギャップの部分放電開始電圧に 及ぼす温度の影響	平成 29 年電気学会 基礎・材料・共通 部門大会	2017/09
17	生出珠之 助、他	東京工業大 学、三菱電 機(株)	6.5 kV 耐圧 SiC-MOSFET モ ジュールの連続スイッチング試 験	電気学会 半導体電力変換研究会	2018/01
18	佐藤隆彦、 他	芝浦工業大 学	加圧焼結した Ag ナノ粒子の疲 労き裂進展速度におよぼす焼結 圧力の影響	第 24 回「エレクトロニクスにおけるマイ クロ接合・実装技術」シンポジウム	2018/01
19	阿部剛志、 他	九州工業大 学、三菱電 機(株)	Influence of Dielectric Constant on Partial Discharge Inception Voltage of Ceramic Insulating	10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems	2018/03

			Substrate under High Temperature		
20	八田英之	三菱電機(株)	Advances in SiC power devices for power electronics applications	International Power Electronics Conference 2018	2018/05
21	田中貴規	三菱電機(株)	SiC 結晶欠陥とパワーデバイス開発	日本学術振興会 第 161 委員会 第 109 回研究会	2019/01
22	地道拓志	三菱電機(株)	Medium and High Voltage DC-DC Converters Intended for Offshore Wind Farms	ECPE Workshop: New Technologies for Medium-Frequency Solid-State Transformers	2019/02
23	日野史郎、他	三菱電機(株)	ボディードायオードの不活性化を実現する SBD 内蔵 MOSFET	応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 13 回研究会	2019/02
24	手崎和明、他	東京工業大学、三菱電機(株)	6.5-kV, 400-A, SiC-MOSFET/SBD デュアルモジュールの熱量測定法によるターンオフ損失測定	2019 年電気学会全国大会	2019/03

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	媒体名	発表年月
1	三菱電機(株)	6.5kV 耐圧フル SiC パワー半導体モジュールを開発	三菱電機ニュースリリース(1/31) 2月1日朝刊(日経産業新聞、日刊工業新聞、電気新聞、化学工業日報、日刊産業新聞)に掲載 日刊工業新聞電子版、Car Watch、鉄道チャンネル、EE Times Japan,他にて電子掲載	2018/01
	三菱電機(株)	Gaining Speed: Mitsubishi Electric SiC-Power Modules	Bodos Power Systems	2018/09

### (c)展示会への出展

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	三菱電機、DOWA、三菱マテリアル、デンカ、日本ファインセラミックス	高出力密度 SiC パワーモジュール	SEMICON Japan 2015 (NEDO ブースでの展示)	2015/12
2	三菱電機(株)	低加圧接合可能な SiC 向け高信頼性銀ナノペースト	国際ナノテクノロジー総合展	2017/2
3	三菱電機(株)	6.5kV 耐圧フル SiC パワー半導体モジュール	三菱電機研究開発成果披露会	2018/02
4	三菱電機(株)	R&D Activities for SiC Power Device	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials2019(三菱電機展示ブース)	2019/09
5	三菱電機(株)	6.5kV Full-SiC Power Semiconductor Module	WCRR(World Congress on Railway Research) 2019 TOKYO (三菱電機展示ブース)	2019/10



6	三菱電機(株)	高出力密度・高耐圧 SiC パワーモジュールの開発	【第 6 回パワエレシンポジウム】ポスター展示	2020/2
---	---------	---------------------------	-------------------------	--------

・研究開発項目②「低加圧 Ag 接合材開発」

DOWA 株式会社

【特許】 なし

【論文】 なし

【外部発表】 (a)学会発表・講演:なし、(b)新聞・雑誌等への掲載:なし

(c)展示会への出展

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	DOWA	DOWA 展示ブース	PCIM Europe 2014	2014/05
2	DOWA	DOWA 展示ブース	PCIM Europe 2015	2015/05
3	DOWA	低加圧接合可能な SiC 向け高温耐久ナノ銀接合材	nanotech 2017	2017/02

・研究開発項目③「高温度サイクル AlN 回路基板開発」

三菱マテリアル株式会社

【特許】 非公開

【論文】 なし

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	長友義幸	三菱マテリアル(株)	Advanced power module structures for high-temperature semiconductor devices (tentative)	ECTC2016	2016年6月
2	長友義幸	三菱マテリアル(株)	パワーデバイス向けセラミック基板の技術・開発動向	JMS セミナー「パワーデバイスの組立・放熱技術の最新動向」	2016年12月

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	媒体名	発表年月
1	三菱マテリアル(株)	高放熱性を有する「Cu 放熱板一体型 DBA 基板」を開発	プレスリリース	2015年1月
2	三菱マテリアル(株)	パワーモジュール用 DBAC 基板	鉄鋼新聞	2019年11月

(c)展示会への出展

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	三菱マテリアル(株)	Cu 付 DBA 基板を展示品として紹介。リーフレット「厚 Cu 付き DBA 基板」を希望者に配布	ネプコンジャパン 2018	2018 年 1 月
2	三菱マテリアル(株)	Cu 付 DBA 基板を展示品として紹介。パンフレット「DBAC(Cu 付 DBA) 基板」を希望者に配布。 出展社セミナー「次世代 SiC 実装ソリューションの提案」の中でも紹介。	ネプコンジャパン 2019	2019 年 1 月
3	三菱マテリアル(株)	パネル「パワーモジュール用高性能絶縁基板」で Cu 付 DBA 基板を紹介。 特別講演「高機能金属開発とリサイクル」の中 でも紹介	第 6 回 高機能金属展	2019 年 12 月

・研究開発項目④「高熱伝導 SiN 回路基板開発」

デンカ株式会社

【特許】 なし

【論文】 なし

【外部発表】 新聞・雑誌等への掲載:なし、展示会への出展:なし

(a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	広津留秀樹	デンカ	次世代パワーモジュールに向けたセラミックス放熱基板の取り組み	日本セラミックス協会 第 28 回秋季シンポジウム	2015/09

(d)その他

番号	所属	タイトル	形態	発表年月
1	デンカ	電鉄用、自動車用高信頼性セラミックス回路基板の開発と量産化	日本ファインセラミックス協会産業振興賞 受賞	2016/05

・研究開発項目⑤「高熱伝導 SiN セラミック基板開発」

日本ファインセラミックス株式会社

【特許】 非公開

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Chika MATSU NAGA	AIST	Dielectric breakdown of silicon nitride substrates with various thicknesses	Journal of the Ceramic Society of Japan 126 [9] 693-698 2018	有	2018/06

【外部発表】 (a)学会発表・講演:なし、(b)新聞・雑誌等への掲載:なし

(c)展示会への出展

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	日本ファインセラミックス(株)	窒化ケイ素基板	interOpto2019	2019/12

(d)【その他】

番号	所属	タイトル	形態	発表年月
1	日本ファインセラミックス(株)	日本セラミックス協会 技術賞	高熱伝導窒化ケイ素放熱基板の開発	2017/06

◎研究開発テーマ「パワーエレクトロニクス用大口径バルク GaN 結晶の実用化開発」

【特許】 なし

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	富田大輔 包全喜 斉藤真 ほか	東北大学 日本製鋼所 三菱ケミカル	Effects of extra metals added in an autoclave during acidic ammonothermal growth of m-plane GaN single crystals using an NH <sub>4</sub> F mineralizer	APPLIED PHYSICS EXPRESS, 11(9), 2018, 091002 1-4	有	2018/08
2	富田大輔 斉藤真 包全喜 ほか	東北大学 三菱ケミカル 日本製鋼所	酸性アモノサーマル法による GaN 単結晶の育成	日本セラミックス協会 セラミックス誌、53(12)、2018、874-877	有	2018/12
3	Kenji Iso Daisuke Oozeki Syoma Ohtaki Hisashi Murakami Akinori Koukitu	東京農工大 三菱ケミカル	Growth of GaN on a three-dimensional SCAAT™ bulk seed by tri-halide vapor phase epitaxy using GaCl <sub>3</sub>	Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) 58 (2019) SC1024	有	2019/5

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	斉藤真 包全喜 富田大輔 ほか	三菱ケミカル 日本製鋼所 東北大学	Recent progress of acidic ammonothermal growth of GaN	10th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-X)	2017/09
2	秩父重英 斉藤真 包全喜 ほか	東北大学 三菱ケミカル 日本製鋼所	酸性窒化剤を用いたアモノサーマル法による電子デバイス用 GaN 結晶合成の進展	2017 年秋季応用物理学会 シンポジウム	2017/09
3	斉藤真 包全喜 嶋紘平 ほか	三菱ケミカル 日本製鋼所 東北大学	酸性アモノサーマル法による GaN バルク結晶作製技術の進展	日本学術振興会 結晶成長の科学と技術第 161 委員会 研究会	2018/07

4	齊藤真 包全喜 嶋紘平 ほか	三菱ケミカル 日本製鋼所 東北大学	酸性アモノサーマル法による 大型 GaN 結晶成長への取り 組み	2018 年日本結晶成長学会 特別講演会	2018/07
5	秩父重英 齊藤真 包全喜 ほか	東北大学 三菱ケミカル 日本製鋼所	Recent progress in acidic ammonothermal growth of GaN crystals	The 7th International Symposium of Growth of III-Nitrides (ISGN-7)	2018/08
6	Makoto Saito Q. Bao K. Shima D. Tomida K. Kojima T. Ishiguro S. F. Chichibu	東北大学 三菱ケミカル 日本製鋼所	Recent progress of large size bulk GaN crystal growth by acidic ammonothermal method	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2018)	2018/11
7	Kenji Iso Daisuke Oozeki Syoma Ohtaki Hisashi Murakami Akinori Koukitu	東京農工大 三菱ケミカル	GaN growth on the three- dimensional-shaped SCAAT™ bulk seed by tri- halide vapor phase epitaxy using GaCl <sub>3</sub>	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2018)	2018/11
8	秩父重英 齊藤真 包全喜 ほか	東北大学 三菱ケミカル 日本製鋼所	酸性アモノサーマル法による 大口径 GaN バルク結晶作製 技術の展望	日本学術振興会 結晶加工と評価技術 第 145 委員会研究会	2018/12
9	三川豊	三菱ケミカル	酸性アモノサーマル法 SCAAT™によるバルク GaN 結晶成長	日本学術振興会 ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス 第 162 委員会 第 111 回 研究会	2018/12
10	秩父重英 齊藤真 包全喜 ほか	東北大学 三菱ケミカル 日本製鋼所	Recent progress in acidic ammonothermal growth of GaN crystals	11th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPLasma2019)	2019/03
11	富田大輔 包全喜 齊藤真 ほか	東北大学	酸性アモノサーマル法による GaN 結晶育成に金属添加が 与える影響	2019 年 第 66 回応用物理学会春季学 術講演会	2019/03
12	秩父重英 齊藤真 包全喜 ほか	東北大学 三菱ケミカル 日本製鋼所	酸性触媒を用いた低圧ア モノサーマル法による GaN バ ルク結晶成長	日本学術振興会 先端ナノデバイス・ 材料テクノロジー 第 151 委員会研究会	2019/05
13	D. Tomida Q. Bao M. Saito K. Kurimoto M. Ito T. Ishiguro S. F. Chichibu	東北大学	Effects of an extra Al metal added during the acidic ammonothermal growth of GaN crystals	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13)	2019/07
14	Yutaka Mikawa Takayuki Ishinabe Yuji Kagamitani Hirotaka Ikeda Tae Mochizuk	三菱ケミカル	Acidic Ammonothermal Growth of Bulk GaN	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13)	2019/07
15	栗本浩平 齊藤真 富田大輔	日本製鋼所 三菱ケミカル 東北大学	酸性アモノサーマル法による GaN バルク結晶成長	第 80 回 応用物理学会秋季学術講演会	2019/09

	ほか				
16	Yutaka Mikawa Takayuki Ishinabe Yuji Kagamitani Hirotaka Ikeda Tae Mochizuki	三菱ケミカル	Acidic Ammonothermal Growth of Bulk GaN	The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS2019)	2019/11
17	越智仁	三菱ケミカル	-	三菱ケミカルホールディングス グループ事業説明会	2020/02
18	Kenji Iso Syoma Ohtaki Erina Miyata Yuka Kido Hisashi Murakami Akinori Koukitu	東京農工大 三菱ケミカル	Dislocation density reduction in (10-1-1) GaN at a high temperature using tri-halide vapor phase epitaxy	SPIE Photonics West OPTO	2020/02
19	Yutaka Mikawa TakayukiIshinab e Yuji Kagamitani Tae Mochizuki Hirotaka Ikeda Kenji Iso Tatsuya Takahashi Kohei Kubota Yuuki Enatsu Yusuke Tsukada Satoru Izumisawa	三菱ケミカル	Recent progress of large size and low dislocation bulk GaN growth	SPIE Photonics West OPTO	2020/02
20	栗本浩平 斉藤真 嶋紘平 ほか	日本製鋼所 三菱ケミカル 東北大学	4 インチ成長用オートクレーブ を用いた低圧酸性アモノサー マル法によるバルク GaN 結晶 成長	第 67 回 応用物理学会春季学術講演会	2020/03

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	媒体名	発表年月
1	三菱ケミカル	大型・低欠陥な GaN 基板 20 年度に量産設備、実証	化学工業日報	2020/03
2	東北大学	Ammonothermal growth of 2 inch long GaN single crystals using an acidic NH <sub>4</sub> F mineralizer in a Ag-lined autoclave	Appl. Phys. Express 13, 055505 (2020)	2020/04
3	東北大学	省エネルギーに資する窒化ガリウム単結 晶基板の量産法を開発 -次世代パワー エレクトロニクスの実現に道-	東北大学プレスリリース 化学工業日報 鉄鋼新聞 ほか	2020/06
4	三菱ケミカル	大型・低欠陥 GaN 基板を開発	セラミックス (公益社団法人日本セラミックス協会 発行)	2020/07
5	三菱ケミカル	三菱ケミ、量産前倒し 6インチGaN単結晶基板	日刊工業新聞	2020/09

(c)展示会への出展

なし

◎研究開発テーマ「窒化ガリウムパワーデバイス高出力化のための高放熱構造の研究開発」

【特許】

番号	出願人	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	三菱電機株式会社	PCT/JP2017/047232	PCT	2017/12/28	公開	窒化物半導体装置およびその製造方法	松田喬他
2	三菱電機株式会社	PCT/JP2018/024584	PCT	2018/6/28	公開	半導体装置、および、半導体装置の製造方法	吉嗣晃治他
3	三菱電機株式会社	PCT/JP2019/007036	PCT	2019/2/25	出願	半導体装置の製造方法	藤川正洋他

【論文】 なし

【外部発表】

(c) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	吉嗣晃治	三菱電機株式会社	GaN/Diamond 基板の熱抵抗評価	秋季応用物理学会講演会	2018年9月
2	吉嗣晃治	三菱電機株式会社	Thermal Analysis of GaN/Diamond Substrates	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN)	2018年11月
3	檜座秀一	三菱電機株式会社	High-Power GaN-on-Diamond HEMTs Fabricated by Surface-Activated Room Temperature Bonding	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)	2019年9月
4	檜座秀一	三菱電機株式会社	単結晶ダイヤモンド放熱基板を用いたマルチセル構造 GaN-HEMT の開発	一般社団法人電子実装工学研究所研究会	2019年10月
5	檜座秀一	三菱電機株式会社	表面活性化常温接合法による GaN-on-Diamond HEMT の作製	一般社団法人電子情報通信学会電子デバイス研究会	2020年1月
6	檜座秀一	三菱電機株式会社	表面活性化接合法により作製したダイヤモンド基板上 GaN デバイス	一般社団法人電気学会高機能化合物半導体エレクトロニクス技術と将来システムへの応用調査専門委員会3月研究会	2020年3月
7	滝口雄貴	三菱電機株式会社	表面活性化接合法により作製した GaN-on-Diamond HEMT の特性評価	応用物理学会春季学術講演会	2020年3月

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	媒体名	発表年月
1	三菱電機株式会社	高熱伝導率ダイヤモンド基板を用いた GaN デバイスの熱解析	三菱電機技報 vol93, pp196	2019年3月



【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Sho Inotsume, Nobuhiko Kokubo, Hisashi Yamada, Shoichi Onda, Jun Kojima, Junji Ohara, Shunta Harada, Miho Tagawa, Toru Ujihara	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,	Behavior of Threading Dislocations from GaN Substrate to Epitaxial Layer	Phys. Status Solidi B	有	2020/02
2	Kokubo Nobuhiko, Tsunooka Yosuke, Fujie Fumihito, Ohara Junji, Onda Shoichi, Yamada Hisashi, Shimizu Mitsuaki, Harada Shunta, Tagawa Miho, Ujihara Toru	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Nondestructive visualization of threading dislocations in GaN by micro raman mapping	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS	有	2019/05
3	Kazukuni Hara , Shigeyuki Takaki, Shinichi Tanishit, Daisuke Uematsu1, Yuto Hoshino, Nobuyuki Otake, Junji Ohara, Shoichi Onda	DENSO CORPORATION Advanced Research Innovation Center, Nagoya University	GaN epitaxial growth on 4degree off-axis Si- and C-face 4H-SiC without buffer layer by tri-halide vapor phase epitaxy with high-speed wafer rotation	JJAP “Frontiers of Nitride Semiconductor Research”	有	2019/06
4	N. Kokubo, Y. Tsunooka, F. Fujie, J. Ohara, S. Onda, H. Yamada, M. Shimizu, S. Harada, M. Tagawa, T. Ujihara	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Determination of edge-component Burgers vector of threading dislocations in GaN crystal by using Raman mapping	Appl. Phys. Express, 11	有	2018/10
5	N. Kokubo, Y. Tsunooka, F. Fujie, J. Ohara, K. Hara, S. Onda, H. Yamada, M. Shimizu, S. Harada, M. Tagawa, T. Ujihara	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Detection of edge component of threading dislocations in GaN by Raman spectroscopy	Appl. Phys. Express, 11	有	2018/05

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Sho Inotsume, Nobuhiko Kokubo, Hisashi Yamada, Shoishi Onda, Jun Kojima, Junji Ohara Shunta Harada, Miho Tagawa, Toru Ujihara	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Behavior of dislocations in GaN epitaxial layer propagating from substrate	ICMaSS	2019/11



2	N. Kokubo, S. Inotsume, Y. Tsunooka, F. Fujie, J. Ohara, S. Onda, H. Yamada, M. Shimizu, S. Harada, M. Tagawa, T. Ujihara	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Analysis of Inclined Threading Dislocation from GaN [0001] by Raman mapping	SSDM	2019/09
3	Sho Inotsume, Nobuhiko Kokubo, Hisashi Yamada, Shoichi Onda, Jun Kojima, Junji Ohara, Shunta Harada, Miho Tagawa, Toru Ujihara	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Behavior of Dislocations Propagating from GaN Substrate to Epitaxial Layer	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13)	2019/07
4	N. Kokubo, Y. Tsunooka, F. Fujie, J. Ohara, S. Onda, H. Yamada, M. Shimizu, S. Harada, M. Tagawa, T. Ujihara	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Nondestructive Visualization of Threading Dislocations in GaN by Micro Raman Mapping	International Workshop on Nitride Semiconductors 2018(IWN2018)	2018/11
5	小久保 信彦, 角岡洋介, 藤榮 文博, 大原 淳士, 恩田正一, 山田 永, 清水 三聡, 原田 俊太, 田川 美穂, 宇治原 徹	Nagoya University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Determination of edge-component Burgers vector of threading dislocations in GaN crystal by using Raman mapping	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019/09
6	宇治原徹, 小久保信彦, 角岡洋介, 藤榮文博, 井爪将, 恩田正一, 山田永, 清水三聡, 原田俊太, 田川美穂	名古屋大学, 産業技術総合研究所	顕微ラマン分光法による GaN 中の転位欠陥解析と機械学習の活用	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/03
7	小久保信彦, 角岡洋介, 藤榮文博, 大原淳士, 恩田正一, 山田永, 清水三聡, 原田俊太, 田川美穂, 宇治原徹	名古屋大学, 産業技術総合研究所	ラマン分光法と機械学習による GaN 単結晶における貫通転位の歪み場解析	先進パワー半導体分科会 第 5 回講演会	2018/11
8	小久保信彦, 角岡洋介, 藤榮文博, 大原淳士, 恩田正一, 山田永, 清水三聡, 原田俊太, 田川美穂, 宇治原徹	名古屋大学, 産業技術総合研究所	ラマン分光法による GaN 単結晶における貫通転位の歪み場解析	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/09
9	井爪将, 小久保信彦, 山田永, 恩田正一, 大原淳士, 原田俊太, 田川美穂, 宇治原徹	名古屋大学	GaN 基板からエピタキシャル膜へ伝播する転位の分類と挙動の解明	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/09
10	小久保信彦, 角岡洋介, 藤榮文博, 大原淳士, 恩田正一, 山田永, 清水三聡,	名古屋大学, 産業技術総合研究所	ラマン分光法による GaN 単結晶における貫通転位の歪み場解析	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/03

	原田俊太, 田川美穂, 宇治原徹				
11	小久保信彦, 角岡洋介, 藤榮文博, 大原淳士, 原一都, 恩田正一, 山田永, 清水三聡, 原田俊太, 田川美穂, 宇治原徹	名古屋大学, 産業技術総合研究所	ラマン分光法による GaN 単結晶における貫通転位の刃状成分の解析	応用物理学会 先進パワー半導体分科会	2017/11
12	K. Hara, S. Takaki, D. Uematsu, Y.Hoshino, N.Ootake, J. Ohara, S. Onda	DENSO CORPORATION Advanced Research and Innovation Center, NAGOYA UNIVERSITY	Gallium Nitride Epitaxial Crystal Growth by Tri-halide vapor phase epitaxy with High-Speed Wafer Rotation	European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2018)	2018/09
13	K. Hara, S. Takaki, D. Uematsu, Y.Hoshino, N.Ootake, J. Ohara, S. Onda	DENSO CORPORATION Advanced Research and Innovation Center, NAGOYA UNIVERSITY	Gallium Nitride Epitaxial Crystal Growth by Tri-halide vapor phase epitaxy with High-Speed Wafer Rotation	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2018)	2018/11

(b)新聞・雑誌等への掲載 なし

(c)展示会への出展 なし

◎研究開発テーマ「GaN 物性を最大限に発揮させる最適なパワーデバイス構造の確立とその工業的な製造プロセスに繋がる絶縁膜形成技術の研究開発」

【特許】 なし

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	S. Miyazaki and A. Ohta	名古屋大学	Photoemission-based Characterization of Gate Dielectrics and Stack Interfaces	Electrochemical Society (ECS) Transaction, vol. <b>92</b> , No.4, pp.11-19.	有	2019
2	N. Takada, N. Taoka, A. Ohta, T. Yamamoto, N. X. Truyen, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, K. Makihara, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Comparative Study of Photoluminescence Properties Obtained from SiO <sub>2</sub> /GaN and Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GaN Structures	Japanese Journal of Applied Physics, vol. <b>58</b> , No.SI, SIIB22	有	2019
3	N. Takada, N. Taoka, T. Yamamoto, A. Ohta, N. X. Truyen, H. Yamada, T.	名古屋大学、産業技術総合研究所	Impact of Remote Plasma Oxidation of a GaN Surface on	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, No.SE, 2019, SEEC02	有	2019

	Takahashi, M. Ikeda, K. Makihara, M. Shimizu, and S. Miyazaki		Photoluminescence Properties			
4	S. Miyazaki and A. Ohta	名古屋大学	Photoemission Characterization of Interface Dipoles and Electronic Defect States for Gate Dielectrics	Electrochemical Society (ECS) Transaction, vol. <b>90</b> , No.1, 2019, pp.113-120	有	2019
5	T. Yamamoto, N. Taoka, A. Ohta, N. X. Truyen, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, K. Makihara, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Low Temperature Formation of Ga-oxide/GaN Interface with Remote Oxygen Plasma and Its Interface Properties	Japanese Journal of Applied Physics, vol. <b>57</b> , No. 6S2, 2018, 06JE01	有	2018
6	T. Yamamoto, N. Taoka, A. Ohta, N. X. Truyen, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, K. Makihara, O. Nakatsuka, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Energy Band Structure of Ga-oxide/GaN Interface Formed by Remote Oxygen Plasma and Its Electrical Properties	Japanese Journal of Applied Physics, vol. <b>57</b> , No. 6S3, 2018, 06KA05	有	2018
7	N. X. Truyen, N. Taoka, A. Ohta, K. Makihara, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Interface Properties of SiO <sub>2</sub> /GaN structures Formed by Chemical Vapor Deposition with Remote Oxygen Plasma Mixed with Ar or He	Japanese Journal of Applied Physics, vol. <b>57</b> , No. 6S3, 2018, 06KA01	有	2018
8	A. Ohta, N. X. Truyen, N. Fujimura, M. Ikeda, K. Makihara, and S. Miyazaki	名古屋大学	Total Photoelectron Yield Spectroscopy of Energy Distribution of Electronic States Density at GaN Surface and SiO <sub>2</sub> /GaN Interface	Japanese Journal of Applied Physics, vol. <b>57</b> , No. 6S3, 2018, 06KA08	有	2018
9	N. X. Truyen, N. Taoka, A. Ohta, K. Makihara, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	High Thermal Stability of Abrupt SiO <sub>2</sub> /GaN Interface with Low Interface State Density	Japanese Journal of Applied Physics, vol. <b>57</b> , No. 4S, 2018, 04FG11	有	2018
10	N. Truyen, A. Ohta, K. Makihara, M. Ikeda, and S. Miyazaki	名古屋大学	Characterization of Remote O <sub>2</sub> Plasma Enhanced CVD SiO <sub>2</sub> /GaN(0001) Structure Using Photoemission Measurements	Japanese Journal of Applied Physics, vol. <b>57</b> , no. 1S, 2017, 01AD02	有	2017
11	S. Miyazaki, A. Ohta, and N. Fujimura	名古屋大学	Characterization of Interfacial Dipoles at Dielectric Stacks by XPS Analysis	Electrochemical Society (ECS) Transaction, vol. <b>80</b> , No.1, 2017, pp.229-235	有	2017
12	S. Miyazaki, N. Truyen, A. Ohta, and T. Yamamoto	名古屋大学	Photoemission Study of Gate dielectrics on Gallium Nitride	Electrochemical Society (ECS) Transaction, vol. <b>79</b> , no.1, 2017, pp.119-127	有	2017

13	T. Kubo and T. Egawa	名古屋工業大学	Electron-spin-resonance Studies of AlGaIn/GaN MIS-HEMT Structures with Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fabricated by Atomic Layer Deposition	Physica B, vol. <b>571</b> , 2019, pp.210-212	有	2019
14	N. H. Trung, N. Taoka, H. Yamada, T. Takahashi, T. Yamada, and M. Shimizu	産業技術総合研究所、名古屋大学	Experimental Demonstration of n- and p-channel GaN-MOSFETs toward Power IC Applications	ECS Journal of Solid State Science and TEchnology, 2020 9 015001	有	2020
15						

## 【外部発表】

### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	S. Miyazaki and A. Ohta	名古屋大学	Photoemission Study of Chemically-Cleaned GaN Surfaces and GaN-SiO <sub>2</sub> Interfaces Formed by Remote Plasma CVD	Material Research Meeting (MRM) 2019	Dec. 10-14, 2019
2	S. Miyazaki and A. Ohta	名古屋大学	Photoemission Based Characterization of Gate Dielectrics and Stack Interfaces	236th The Electrochemical Society (ECS) Meeting	Oct. 13-17, 2019
3	K. Watanabe, A. Ohta, N. Taoka, H. Yamada, M. Ikeda, K. Makihara, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Characterization of Ni/GaN(0001) Interfaces by Photoemission Measurements	2019 International Conference of Solid State of Device and Materials (SSDM)	Sep. 2-5, 2019
4	S. Miyazaki and A. Ohta	名古屋大学	Photoemission Characterization of Interface Dipoles and Electronic Defect States for Gate Dielectrics	Semiconductor Technology for Ultra Large Scale Integrated Circuits and Thin Film Transistors VII (ULSIC vs. TFT 7)	May 19-23, 2019)
5	大田 晃生	名古屋大学	GaN 洗浄表面および絶縁膜/GaN 界面の化学結合・欠陥準位密度評価	NPF セミナー 省エネルギー社会に貢献する GaN 材料の将来とそのキープロセス技術	2019 年 3 月 14 日
6	S. Miyazaki and A. Ohta	名古屋大学	Photoemission Study of Gate Dielectrics - Quantitative Characterizations of Dielectric Functions, Interface Dipoles and Electronic Defect States	11th International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics	Dec. 6-7, 2018
7	N. Takada, N. Taoka, T. Yamamoto, A. Ohta, N. X. Truyen, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, K. Makihara, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Impact of Remote Plasma Oxidation of GaN Surface on Photoluminescence Properties	40th International Symposium on Dry Process (DPS)	Nov. 13-15, 2018
8	N. Takada, N. Taoka, A. Ohta, T. Yamamoto, N. X. Truyen, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda,	名古屋大学、産業技術総合研究所	Photoluminescence from Insulator/GaN Structures Formed with Remote Plasma	14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and	Oct. 21-25, 2018

	K. Makihara, M. Shimizu, and S. Miyazaki			Nanostructures (ACSIN-14) in conjunction with 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26)	
9	S. Miyazaki, and A. Ohta	名古屋大学	Photoemission Study of Gate Dielectrics and Stack Interfaces	2018 International Conference of Solid State of Device and Materials (SSDM)	Sep. 19-13, 2018
10	N. X. Truyen, N. Taoka, A. Ohta, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, K. Makihara, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Carrier Conduction in SiO <sub>2</sub> /GaN Structure with Abrupt Interface	The 2018 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications (2018 VLSI-TSA)	Apr. 16-19, 2018
11	高田 昇治、田岡 紀之、大田 晃生、山本 泰史、グエン スァン チュン、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモートプラズマを用いて形成した SiO <sub>2</sub> /Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GaN 構造の PL 特性	2018 年 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018 年 9 月 18 日-21 日
12	大田 晃生、宮崎 誠一	名古屋大学	化学溶液洗浄した GaN 表面および絶縁膜/GaN 界面の化学構造・欠陥準位密度評価	応用物理学会・先進パワー半導体分科会第 4 回個別討論会	2018 年 7 月 30 日
13	グエン スァン チュン、田岡 紀之、大田 晃生、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	Ar または He 希釈リモート酸素プラズマ CVD によって形成した SiO <sub>2</sub> /GaN 界面の構造・特性比較	電気通信情報学会(SDM) [シリコン材料・デバイス] シリコンテクノロジー分科会 6 月度合同研究会	2018 年 6 月 25 日
14	松田 亮平、大田 晃生、田岡 紀之、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモートプラズマ支援 CVD により形成した SiO <sub>2</sub> /GaN 界面の化学結合状態および熱的安定性評価	電気通信情報学会(SDM) [シリコン材料・デバイス] シリコンテクノロジー分科会 6 月度合同研究会	2018 年 6 月 25 日
15	高田 昇治、山本 泰史、田岡 紀之、大田 晃生、グエン スァン チュン、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモートプラズマによって酸化された n-GaN の PL 特性	2018 年 第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018 年 3 月 17 日-20 日
16	グエン スァン チュン、田岡 紀之、大田 晃生、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	GaN(0001)面上への He 希釈リモート酸素プラズマ支援による SiO <sub>2</sub> CVD -Ar 希釈リモート酸素プラズマ支援との違い	2018 年 第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018 年 3 月 17 日-20 日
17	山本 泰史、田岡 紀之、大田 晃生、グエン スァン チュン、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	プラズマ酸化で形成した Ga 酸化物薄膜/GaN 構造のエネルギーバンド構造と電氣的界面特性	電子デバイス界面テクノロジー研究会—材料・プロセス・デバイス特性の物理—(第 23 回)	2018 年 1 月 18 日-20 日

18	A. Ohta, N. Truyen, N. Fujimura, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki	名古屋大学	Evaluation of Filled Electronic States of Epitaxial GaN(0001) Surface by Total Photoelectron Yield Spectroscopy	2017 International Workshop on Dielectric Thin Films For Future Electron Devices – Science and Technology – (IWDTF 2017)	Nov. 20-22, 2017
19	T. Nguyen, N. Taoka, A. Ohta, K. Makihara, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, M. Shimizu, S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Electrical Properties of SiO <sub>2</sub> /GaN Interfaces Formed by Remote Oxygen Plasma Mixed with He or Ar	2017 International Workshop on Dielectric Thin Films For Future Electron Devices – Science and Technology – (IWDTF 2017)	Nov. 20-22, 2017
20	T. Yamamoto, N. Taoka, A. Ohta, X. Nguyen, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, K. Makihara, O. Nakatsuka, M. Shimizu, S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Energy Band Structure of Ga-oxide/GaN Interface Formed by Remote O <sub>2</sub> Plasma	2017 International Workshop on Dielectric Thin Films For Future Electron Devices – Science and Technology – (IWDTF 2017)	Nov. 20-22, 2017
21	T. Yamamoto, N. Taoka, A. Ohta, N. Truyen, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, K. Makihara, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Oxidation of GaN surface by remote oxygen plasma	39th International Symposium on Dry Process (DPS)	Nov. 16-17, 2017
22	N. Truyen, N. Taoka, A. Ohta, K. Makihara, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	High Thermal Stability of Abrupt SiO <sub>2</sub> /GaN Interface with Low Interface State Density	2017 International Conference of Solid State of Device and Materials (SSDM)	Sep. 19-22, 2017
23	N. Truyen, N. Taoka, A. Ohta, K. Makihara, H. Yamada, T. Takahashi, M. Ikeda, M. Shimizu, and S. Miyazaki	名古屋大学、産業技術総合研究所	Interface Properties of SiO <sub>2</sub> /GaN Formed by Remote-Plasma-Assisted CVD	2017 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2017)	Jul. 3-5, 2017
24	S. Miyazaki, N. Truyen, and A. Ohta,	名古屋大学	Photoemission Study of Gate dielectrics on Gallium Nitride	ULSIC vs TFT: 6th International Conference on Semiconductor Technology for Ultra Large Scale Integrated Circuits and Thin Film Transistors	May 21-25, 2017
25	グエン スアン チュン、田岡 紀之、大田 晃生、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモート O <sub>2</sub> プラズマ支援 CVD による SiO <sub>2</sub> /GaN(0001)の化学結合状態及び電気特性評価	第 17 回 日本表面科学会 中部支部・学術講演会	2017 年 12 月 16 日
26	グエン スアン チュン、田岡 紀之、大田 晃生、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモート O <sub>2</sub> プラズマ支援 CVD SiO <sub>2</sub> /GaN(0001)の化学結合状態及び電気特性評価	電子情報通信学会 電子デバイス研究会(ED)窒化物半導体光・電子デバイス、材料、関連技術、及び一般、ED2017-61	2017 年 11 月 30 日-12 月 1 日
27	山本 泰史、田岡 紀之、大田 晃生、グエン スアン チュン、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモート酸素プラズマによって酸化した GaN の表面構造	先進パワー半導体分科会 第 4 回講演会	2017 年 11 月 1 日-2 日

28	グエン スアン チュン、田岡 紀之、大田 晃生、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	熱処理がリモートプラズマ CVD SiO <sub>2</sub> /GaN 構造の化学結合状態及び電気特性に与える影響	応用物理学会 SC 東海地区学術講演会 2017	2017 年 10 月 29 日
29	山本 泰史、田岡 紀之、大田 晃生、グエン スアン チュン、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモートプラズマ酸化した GaN の表面構造と電子状態	応用物理学会 SC 東海地区学術講演会 2017	2017 年 10 月 29 日
30	グエン スアン チュン、田岡 紀之、大田 晃生、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモートプラズマ CVD SiO <sub>2</sub> /GaN 界面の熱安定性	2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017 年 9 月 5 日-8 日
31	山本 泰史、田岡 紀之、大田 晃生、グエン スアン チュン、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモート酸素プラズマで形成した Ga 酸化物/GaN 構造のエネルギーバンド構造と電気的特性	2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017 年 9 月 5 日-8 日
32	Nguyen Xuan Truyen、田岡 紀之、大田 晃生、山田 永、高橋 言緒、池田 弥央、牧原 克典、清水 三聡、宮崎 誠一	名古屋大学、産業技術総合研究所	リモート酸素プラズマ支援 CVD による急峻 SiO <sub>2</sub> /GaN 界面の形成とその電気的特性	2017 年真空・表面科学合同講演会 第 37 回表面科学学術講演会・第 58 回真空に関する連合講演会	2017 年 8 月 17 日-19 日
33	吉田信輝、古岡啓太、久保俊晴、江川孝志	名古屋工業大学	Pt/ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGaIn/GaN MIS-HEMT の電気特性に及ぼすフォーミングガスアニールの効果II	2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019 年 9 月 18 日-21 日
34	横井駿一、久保俊晴、江川孝志	名古屋工業大学	ALD-SiO <sub>2</sub> /AlGaIn/GaN MIS-HEMT の電気特性に及ぼす成膜後熱処理の効果	2019 年 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019 年 9 月 18 日-21 日
35	S. Yokoi, T. Kubo, and T. Egawa	名古屋工業大学	Estimation of Post-deposition Annealing Effects on Electrical Properties of ALD-SiO <sub>2</sub> /AlGaIn/GaN MIS-HEMTs	2019 International Conference of Solid State of Device and Materials (SSDM)	September 2-5, 2019
36	N. Yoshida, K. Furuoka, T. Kubo, and T. Egawa	名古屋工業大学	Effects of Forming Gas Annealing Depending on Gate Electrode Materials in ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGaIn/GaN MIS-HEMTs	13th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM)	August 26-29, 2019
37	K. Furuoka, T. Kubo, and T. Egawa	名古屋工業大学	Effect of Forming Gas Annealing Conditions on Electrical Properties of ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGaIn/GaN MIS-HEMTs	12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma)	March 17-21, 2019
38	古岡啓太、久保俊晴、江川孝志	名古屋工業大学	Pt/ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGaIn/GaN MIS-HEMT の電気特性に及ぼすフォーミングガスアニールの効果	2019 年 第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019 年 3 月 9 日-12 日

39	T. Kubo, K. Furuoka, M. Makoto, and T. Egawa	名古屋工業大学	Effects of Forming Gas Anneal on Electrical Properties of ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> MIS-HEMTs	49 <sup>th</sup> IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference (SISC)	December 5-8, 2018
40	T. Kubo, K. Furuoka, M. Makoto, and T. Egawa	名古屋工業大学	Effects of Annealing Ambient on ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> MIS-HEMTs	The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN)	November 11-16, 2018
41	古岡啓太、久保俊晴、江川孝志	名古屋工業大学	ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> MIS-HEMT の電気特性に及ぼす水素アニールの効果	2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018年9月18日-21日
42	久保俊晴、三好実人、江川孝志	名古屋工業大学	ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> MIS-HEMT における成膜後水素アニールの効果	2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月17日-20日
43	T. Kubo and T. Egawa	名古屋工業大学	ESR Studies of Layer Thickness and Post-deposition Annealing Effects on ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> MIS-HEMT Structures	48 <sup>th</sup> IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference (SISC)	December 6-9, 2017
44	久保俊晴、三好実人、江川孝志	名古屋工業大学	電子スピン共鳴による AlGa <sub>N</sub> 上 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の化学状態評価	2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017年9月5日-8日

(b)新聞・雑誌等への掲載                   なし

(c)展示会への出展                       なし



## 「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」

## 基本計画

IoT 推進部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

## (1) 研究開発の目的

電気エネルギー生成方法の多様化は、資源枯渇及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、化石燃料から再生可能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）、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（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及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I

ンバータコア技術開発が国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）のナショナルプロジェクト（「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SiCウエハ品質向上及び評価技術・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組を行うことは、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。

なお、本事業は、ある程度明確な製品イメージのあるものへの適用を目指した応用開発を中心に取り組むことに対し、内閣府が実施する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）にて取り組まれる「次世代パワーエレクトロニクス」は、電力や自動車等向けの新技术を中心に取り組まれるものである。

## （2）研究開発の目標

本事業は、以下の研究開発項目により構成する。

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

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③ 次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

研究開発項目④ 新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発

本事業の目標の概要は、高品質・低コストな大口径SiCウエハ製造技術、SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術、応用に即した電力変換器の設計技術開発、システムにおけるSiCスイッチングデバイスの効果実証、高温実装技術、新世代Siパワーデバイス開発をはじめとする要素技術の確立、さらにSiC、GaN等の新材料も活用し、実用化を見据えた応用研究開発である。

### ① アウトプット目標

研究開発項目①においては、別紙の研究開発計画に基づき、2012年度までに基盤技術を確立し、2014年度までに①高品質・大口径結晶成長、ウエハ加工、エピタキシャル膜形成まで一貫した製造技術の確立、②高耐圧スイッチングデバイス製造技術を確立し、これを用いた低損失電力変換器の試作・実証等を行う。

また、SiC大口径ウエハ化に関して、現状の昇華法結晶成長技術を6インチ対応とし、ウエハ加工プロセスと併せ6インチ4H-SiCウエハを実現する。また、ウエハ加工要素プロセスの能力検証を加速し、SiCデバイス化のための高温プロセス装置等に関して6インチ対応装置を開発すると共に、3kV以上の高耐圧領域でのSiCダイオードを用いた低損失パワーモジュールの性能検証を行う。

さらに、SiCの特長である高い接合温度において動作するSiCパワー素子の近傍に配置できる高耐熱受動部品を開発するとともに、それらを配置したパワーモジュールを試作して各実装部品間の相互の影響を検証し、それによって各開発部品の優位性を明らかにする。

加えて、現状のSiパワーデバイスの性能限界を突破し、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する。

研究開発項目②においては、別紙の研究開発計画に基づき、データセンタやその電力源としての分散型太陽光発電システムにおいて交流・直流変換等、電力制御に用いられているパワーデバイスを、従来のシリコンに代わりより低損失かつ高耐電圧であるSiCを用いたものとする技術開発を行うとともにシステムレベルでの実証を行う。これにより、電源で発生するエネルギー損失を飛躍的に削減する技術を確立するため、2012年度末までに次の最終目標を達成する。

- ・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負荷50%で94%以上であることを実証する。
- ・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。
- ・デバイス温度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し、60W/cm<sup>3</sup>級の出力パワー密度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。

研究開発項目③においては、別紙の研究開発計画に基づき、新材料パワーデバイスを活用した、次世代自動車、次世代産業機器、次世代民生機器等の応用システムの開発を行う。

研究開発項目④においては、別紙の研究開発計画に基づき、新材料パワーデバイスについて、ウエハの革新的製造技術の開発及び新規用途開拓の推進を行う。

## ② アウトカム目標

本事業により高度化したパワー半導体を、輸送機器、産業機器、コンピュータ関連、無停電電源、太陽光発電などの主要産業分野に適用することにより、電力変換損失を削減し、2030年までにCO<sub>2</sub>排出量を1,515万トン削減する。

さらに2030年に予想されるパワーエレクトロニクス関連市場約20兆円に対して、本事業により高度化したパワー半導体を適用することにより、市場の約20%の獲得を目指す。

## ③ アウトカム目標達成に向けての取組

研究開発と並行して、(i)最新の技術動向・産業動向を調査し、プロジェクト実施者に定期的にフィードバックすることにより、適切な目標の修正を行うなどプロジェクトを適切に運営、(ii)成果報告会・シンポジウム等の取組を通じて、本事業の情報発信及び次世代パワーエレクトロニクスの普及促進、(iii)パワーエレクトロニクス技術に関する人材育成の活動により、企業の研究活動の支援等を行う。

### (3) 研究開発の内容

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、別紙の研究開発計画及び別紙2の研究開発スケジュールに基づき研究開発を実施するとともに、国内外の関連情報の収集及び調査等を行う。研究開発項目は以下の通り設定する。

#### 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SiC結晶成長技術開発／革新的SiC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SiCウエハ加工技術開発 [委託事業]
- (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）  
[委託事業]
- (4) SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術 [委託事業]
- (5) SiCウエハ量産化技術開発 [助成事業（助成率：2／3）]
- (6) 大口径SiCウエハ加工要素プロセス検証 [委託事業]
- (7) SiC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（助成率：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、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）]

研究開発項目①（9）は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、原則、委託事業として実施する。ただし、上記以外のもの（※1）は、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

（※1） 民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独等、産学官連携とならないもの。

- (10) 新世代Si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) 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  
[共同研究事業（NEDO 負担率：1／2）]
- (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  
[共同研究事業（NEDO 負担率：1／2）]
- (3) 次世代SiC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。

#### 研究開発項目④ 新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発

(1) パワーデバイス用新材料ウエハの革新的製造技術の開発

[助成事業(助成率: 2/3)(※3)]

(2) 新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進 [委託事業]

(※3) 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。

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、研究開発項目①のうち(1)から(4)まで、(6)及び(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り、NEDO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、業務委託契約を締結して実施する。

上記以外の研究開発項目は、NEDOが、単独ないし複数の原則本邦の企業、大学等の研究機関から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。(原則、日本国内に研究開発拠点を有しているものを対象とする。で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。)本研究開発において、NEDOが主体となって行うべき基礎的・基盤的研究開発である研究開発項目①のうち(1)から(4)、(6)、(7)、(9)及び(10)、研究開発項目②、研究開発項目③のうち(1)及び研究開発項目④のうち(2)の各事業は委託または共同研究により実施し、市場化に向けた産業界の具体的な取組が示されるべき実用化研究開発である研究開発項目①のうち(5)及び(8)、研究開発項目③のうち(2)及び研究開発項目④のうち(1)の事業は助成(助成率2/3※)により実施する。なお、研究開発項目③(1)で実施する委託事業は、目標を達成した後、実用化に向けた取組が必要と判断された場合には、引き続き研究開発項目③(2)の助成事業として実施する。

また、研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体にはNEDOが委嘱する研究開発責任者(プロジェクトリーダー)として、研究開発項目①(1)から(9)及び②については国立研究開発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、さらに研究開発項目②についてはサブプロジェクトリー

ダーとして、国立研究開発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 清水 肇氏を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。研究開発項目③については、プロジェクトリーダーとして、国立大学法人千葉大学大学院融合理工学府 佐藤 之彦教授を置き、研究開発を実施する。

2017年度からは、佐藤教授を事業全体のプロジェクトリーダーとし、事業を推進する。

※研究開発項目③(2)及び研究開発項目④(1)については、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。

## (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDO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、事業の目的及び目標、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。具体的には、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技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、適宜プロジェクトリーダーとともに事業の進捗について報告を受けること等により進捗の確認及び管理を行うものとする。

## 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、2009年度から2019年度までの11年間とする。ただし、この期間内において、研究開発項目毎に研究開発期間を設定する。

研究開発項目①のうち(1)から(4)については、2010年度から2014年度までの5年間とし、(5)から(8)については、2011年3月から2012年2月までとし、(9)については、2012年度から2014年度までの3年間とし、(10)については、2014年度から2019年度の6年間とする。

研究開発項目②については、2009年度から2012年度までの4年間とする。

研究開発項目③のうち(1)については、2015年度から2016年度までの2年間とし、(2)については、2014年度から2019年度までの6年間とする。研究開発項目④については、2017年度から2019年度までの3年間とする。

なお、研究開発期間については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、延長する等、適宜見直すものとする。

## 4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義及び将来産業への波及効果等について、研究開発項目①(1)から(9)については、



外部有識者による研究開発の中間評価を2012年度、事後評価を2015年度に実施し、研究開発項目①(10)については、中間評価を2016年度、事後評価を2020年度に実施し、研究開発項目②については、事後評価を2013年度に実施し、研究開発項目③については、中間評価を2016年度、事後評価を2020年度に実施し、研究開発項目④については、事後評価を2020年度に実施する。中間評価結果を踏まえ、事業の加速・縮小など必要な体制の再構築を含め、後年度の研究開発に反映することとする。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

## 5. その他の重要事項

### (1) 研究開発成果の取扱い

#### ① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究開発成果のうち、共通基盤技術に係るものについては、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDO及び実施者が協力して普及に努めるものとする。

#### ② 知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備事業又は標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、海外展開を行う上で、性能評価指標やインターフェース等に関する標準案の検討、提案及び海外実証等を積極的に行う。

#### ③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先及び共同研究先に帰属させることとする。

なお、国際展開を見据えた、パワー半導体デバイス及び電力変換機器に係る技術に係る知財管理を適切に行うこととし、「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)次世代パワーエレクトロニクス」での知的財産権等の管理のされ方と整合が取れるものとする。

### (2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するために、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

### (3) 根拠法

本研究開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1号ニ、第3号及び第9号に基づき実施する。

#### (4) その他

受託者は、本研究開発から得られる成果の産業面での着実な活用を図るため、事業化への計画を立案する。事業の進捗等を考慮して計画の必要な見直しを行うとともに、研究開発期間中であっても、実用化が可能な成果については、迅速な事業化に努めるものとする。具体的には、高品質・低コストな大口径SiCウエハ及びSiC高耐圧スイッチングデバイスの実用化・事業化に加え、最終製品であるオールSiC電力変換器搭載ハイブリッド／電気自動車・鉄道等の実用化についても具体的な計画の立案に努めるものとする。

また、本研究開発の成果となる次世代パワーエレクトロニクス材料・デバイス等の応用開発を更に推進するために、関連する人材育成事業を行う。

#### 6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 2009年3月、「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）」制定。
- (2) 2011年1月、「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」制定。
- (3) 2011年3月、「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」及び「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）」の基本計画の統合に伴う改訂。
- (4) 2011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訂。
- (5) 2012年3月、研究開発項目①（9）の追加による改訂。
- (6) 2014年4月、研究開発項目③の追加による改訂。
- (7) 2014年5月、研究開発項目①（10）の追加による改訂。
- (8) 2015年2月、研究開発項目③（1）の追加等による改訂。
- (9) 2015年9月、根拠法の追加等による改訂。
- (10) 2017年1月、研究開発項目①（10）の延長及び研究開発項目④の追加による改訂。
- (11) 2018年3月、研究開発項目④の対象範囲の変更に伴う改訂。
- (12) 2020年2月、プロジェクトリーダーの担当範囲の変更、及び西暦表記への変更に伴う改定。

## (別紙) 研究開発計画

### 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」

##### 1. 研究開発の必要性

次世代パワー半導体として期待されるS i Cの開発・普及にあたっては、ウエハの品質及び供給の不安定性、高コストが最大のボトルネックとなっている。高品質・低コストな大口径S i C結晶成長技術の確立により、S i Cウエハを安定的に供給することによって、多量のウエハを必要とするデバイス及びインバータ等のモジュール開発を加速し、早期の実用化につなげることが可能となる。

##### 2. 研究開発の具体的内容

現在のS i C結晶成長法である昇華法は、生産性、品質、コストともに課題がある。これらを解決するため、昇華法の抜本的な高度化のほか、飛躍的な品質や生産性の向上が期待される革新的な結晶成長技術(ガス法、液相等)の開発を行う。また、大口径・高品質S i C結晶の評価技術を開発する。

##### 3. 達成目標

昇華法において、以下の項目を満たす製造技術を確立する。なお、2012年度までに基盤技術を確立し、2013年度以降、大口径ウエハ加工技術、大口径エピタキシャル膜成長技術の成果を合わせ、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インチエピウエハ製造技術として確立する。また、革新的結晶成長法についても、2012年度までにそのための要素技術を確立し、2014年度までに将来的に昇華法を凌駕するポテンシャルを評価可能な大型結晶を実現してその可能性を検証する。さらに、大口径・高品質S i C結晶の評価技術を確立する。

#### 【中間目標】

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。

革新的結晶成長法においては、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確立し、口径2インチ、厚さ1mmの4H-S i C単結晶の成長を実現する。

**【最終目標】**

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-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。

## 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」

### (2)「大口径S i C ウェハ加工技術開発」

#### 1. 研究開発の必要性

S i Cはダイヤモンドに次ぐ高硬度を有しているため精密加工が極めて困難であり、例えば、現在の4インチウェハの切断に際しては、高価なダイヤモンドスラリーを多量に使わなければならないうえ、その切断スピードは極めて遅く、数日を要している。結晶の大口径化に伴い、既存の加工技術では、更に時間を要することになり、加工工程がボトルネックになるおそれがある。また、加工コストはウェハのコストの約1/3を占めており、低コスト化の観点からも技術の高度化が必要である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

切断、研削、研磨の各技術について、6インチウェ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S i Cに有効な化学的機械的研磨法（CMP）の開発等を行う。

なお、これらの各工程は前後の工程に大きな影響を与えるため、密接な連携を図りつつ研究開発を実施することとする。

#### 3. 達成目標

6インチ結晶において、以下の項目を満たす実用的な加工（切断・研削・研磨）技術を確立する。なお、2012年度までに基盤技術を確立し、2013年度以降、大口径結晶成長技術、大口径エピタキシャル膜成長技術の成果を合わせ、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インチエピウェハ製造技術として確立する。

#### 【中間目標】

ウェハ切断技術に関して、3インチ結晶で切断速度150 $\mu$ m/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代300 $\mu$ m以下を実現する。また、3～4インチ結晶/ウェハを対象にして、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S i C結晶/ウェハ加工の高速・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】

6インチ結晶/ウェハを対象に、以下の効率性を実現する。

- ① 切断：速度300 $\mu$ m/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代250 $\mu$ 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 $\mu$ m×2 $\mu$ mのベアウェ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

## 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」

### (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）」

#### 1. 研究開発の必要性

エピタキシャル膜の品質はデバイスの性能・歩留まりに直接影響するため、その技術開発は極めて重要である。SiCエピタキシャル膜の作製にあたっては、1,600°Cから1,800°Cの高温環境下でシランガス(SiH<sub>4</sub>)とプロパンガス(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)からSiCを合成するため、高温環境下での極めて精密な制御技術を要する。そのため、SiCデバイスの普及において、エピタキシャル膜成長プロセスの高コスト性がボトルネックになっており、低コスト化には大口径ウエハを同時に多数枚処理できるエピタキシャル膜成長技術及びその品質評価技術の確立が必要である。

一方、デバイスの高耐圧化に対応するためには、数10μm以上の厚いエピタキシャル膜が必要となる。そのため、プロセス時間の観点から、厚いエピタキシャル膜の作製には成長速度が重要であり、高速エピタキシャル膜成長技術が必要となるが、現状デバイス品質との両立は確認されていない。それゆえ、高耐圧デバイスの実現・普及には、量産に対応できる高速成長での高品質・厚膜エピタキシャル膜成長技術及びその特性評価技術の確立が必要となる。

#### 2. 研究開発の具体的内容

SiCウエ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を開発する。また、その両者に対応した大口径／厚膜SiCエピタキシャルウエハ評価技術を開発する。

#### 3. 達成目標

SiCエピタキシャル膜成長の大口径対応技術と高速・厚膜成長技術を確立する。大口径対応技術については、2012年度までに基盤技術を確立し、2013年度以降、大口径結晶成長技術、大口径ウエハ加工技術の成果を合わせ、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インチエピウエハ製造技術として確立する。高速・厚膜成長技術については、2012年度までにプロトタイプ炉によって要素技術開発を進め、2013年度以降、高耐圧デバイス用厚膜エピタキシャル膜成長技術の確立を目指すとともに、高耐圧デバイス製造技術開発のために厚膜・高純度エピウエハを提供する体制を整える。

#### 【中間目標】

##### 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/cm<sup>2</sup>以下

#### ②高速・厚膜成長技術

口径2インチ、膜厚50μm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： $3 \times 10^{14}$ /cm<sup>3</sup>以下
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：5個/cm<sup>2</sup>以下

### 【最終目標】

#### 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±5%、ドーピング濃度±10%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：0.5個/cm<sup>2</sup>以下

#### ②高速・厚膜成長技術

成長速度100μm/h以上で作成した口径4インチ、膜厚50μm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： $3 \times 10^{14}$ /cm<sup>3</sup>以下
- ・ 均一度：厚さ±2%、ドーピング濃度±10%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：1.0個/cm<sup>2</sup>以下

## 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」

### (4)「SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術」

#### 1. 研究開発の必要性

3～5kV領域の高耐圧スイッチングデバイスの実用化により、高速鉄道等のインバータの電力変換効率の向上や小型・軽量化による設計の自由度向上など、低炭素社会の構築、産業競争力強化に極めて大きな効果が期待される。

#### 2. 研究開発の具体的内容

3～5kV級の高耐圧かつ低損失なSiCスイッチング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。

#### 3. 達成目標

以下の項目を満たすSiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術を確立する。

新規耐圧構造デバイスについて、2012年度までに、当該耐圧構造設計・作製プロセス技術、高耐圧デバイス酸化膜信頼性向上、高耐圧デバイス実装技術、高耐圧デバイス評価技術、高温実装技術などの要素技術を開発し、2013年度以降、エピタキシャル膜の成長技術（高速・厚膜成長技術）の成果を活用して、新規耐圧構造を適用した低損失なSiC高耐圧スイッチングデバイスを試作し、動作実証を行う。

高耐圧大容量デバイスについて、2012年までに、高耐圧大容量デバイス設計・試作技術、限界性能向上技術、電力変換器設計技術などの要素技術を開発する。2013年度以降、エピタキシャル膜の成長技術（高速・厚膜成長技術）の成果を活用して、SiC高耐圧大容量スイッチングデバイスの製造技術の確立を進めるとともに、大容量電力変換器の試作を行い、大容量・低損失動作の実証を行う。

#### 【中間目標】

##### 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】

##### 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：3 kV以上で特性オン抵抗：1.5 mΩ cm<sup>2</sup>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：3 kV以上、オン抵抗80 mΩ以下（室温環境下）、定格出力電流密度100 A/cm<sup>2</sup>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。

## 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)「S i C ウェハ量産化技術開発」

#### 1. 研究開発の必要性

2010年になり、海外ウェハメーカーによるS i C 6インチウェハ実用化の動きがより活発化してきており、2011年から2012年には少量ながら、4インチウェハと同等品質の6インチウェハ試供品が市場投入されると見込まれる。これにより本格展開に向けて大口径S i C ウェハの独占供給による価格吊り上げやそれに伴う日本国内関連産業の停滞が懸念される。

この状況を打破するためには、本体プロジェクトによる高品質・大口径化技術開発の完了に先立って、既存技術を活用していち早く6インチウェハを実現することが急務である。早期の6インチ実現を進めることにより、量産化に向けた技術課題の早出しが進むだけでなく、S i C 基板供給の海外依存を脱却し、国内S i C 基板の安定供給による国内S i C 市場の立ち上げ加速化につながる。また、本体プロジェクトで開発を進める高度化技術（高品質・高生産性）の受け皿となるウェハ技術検証ライン構築にも資すると期待できる。

#### 2. 研究開発の具体的内容

昇華法をベースとした既存技術活用により、早期に6インチ4H-S i C ウェハ実現にむけた道筋を明確にする。そのために、バルク結晶成長やウェハ加工に関わる大口径対応装置導入・立上げを進め、6インチ4H-S i C インゴットの実現と共に、その量産化に向けた課題抽出を進める。その中では、必要な製造要素技術の工業レベルでの再現性、及び量産性の検証を含めた生産性向上技術、低コスト化技術（装置改善・工程改善）、検査技術の開発を並行して進め、月産1,000枚規模のS i C ウェハ生産技術へ展開可能な、量産化製造に関する基盤技術を確立する。

上記開発成果は、将来的には、6インチS i C ウェハを継続的に試作可能なプロトタイプライン構築に繋げる。そのラインを活用してデバイス・システム開発にウェハ供給を実施し、その評価結果をフィードバックすることで量産化技術開発の加速化を図る。

#### 3. 達成目標

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

- 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/cm<sup>2</sup>以下の口径6インチ4H-S i C インゴットを実現する基盤技術を確立する。

または、

- 成長速度0.25mm/h以上で転位密度 $5 \times 10^4$ 個/cm<sup>2</sup>以下の口径6インチ4H-S i C インゴットを実現する基盤技術を確立する。

## 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」

### (6)「大口径S i C ウェハ加工要素プロセス検証」

#### 1. 研究開発の必要性

S i C ウェハの加工技術に関して、産業的に見合ったウェハコストを実現するため、インゴット切断、研削、粗研磨（ラッピング）、仕上げ研磨（CMP）の4工程を6インチ級の大口径ウェハに対応させながら、従来技術を越える高能率、低ダメージ、超平坦化を一貫プロセスとして達成することが、今後の高品質6インチウェハ早期実用化のためには必須となる。しかしながら、高硬脆材料であるS i Cインゴットを能率良く、かつ加工変質層の発生を最小限に抑えてウェハに加工する上記4工程における最適な要素プロセスは、未成熟であると共々個々の能力限界が明確ではない。

特に切断技術においては、ワイヤー速度、ワイヤー張力不足に起因する切断能率の低さが問題視されている。また、上記各工程においては、高能率化と低損傷化の二律背反性がS i C ウェハ加工にとって極めて解決が難しい課題となっており、本体プロジェクトにおける大口径ウェハ高速一貫加工プロセスの確立のためには、S i C材料に対する各種加工法の特徴、及び加工ダメージ層形成過程の高精度な分析を通じて、個々の要素工程の能力限界と最適加工条件を抽出しておくことが早期に求められる。

#### 2. 研究開発の具体的内容

本体プロジェクトにおける大口径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・個別課題の抽出を進め、大口径S i C ウェハ高速一貫加工プロセス加工への適用性を検証する。

#### 3. 達成目標

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、S i C 6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 $4,000\text{m}/\text{min}$ 、最大張力： $70\text{N}$ 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、S i C ウェ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。

## 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」

### (7)「SiC高耐圧大容量パワーモジュール検証」

#### 1. 研究開発の必要性

3～5kV領域の高耐圧デバイスの実用化により、高速鉄道等のインバータの電力変換効率の向上や小型・軽量化による設計の自由度向上など、低炭素社会の構築、産業競争力強化に極めて大きな効果が期待される。この電圧領域では、社会インフラとしての応用分野が広いにもかかわらず、SiCを用いたパワースイッチングデバイスやパワーモジュールの開発が諸外国に比べて後手に回っている。しかしながら、パワーモジュール応用がより簡易なダイオードを選択するだけでも、リカバリー損失及びターンオン時のスイッチング損失を低減でき、従来のSiデバイスを用いたものに対して大幅な低損失化・小型化が可能となり、早期実用化に大きな進展が期待できると共に、上記電圧領域におけるAll-SiCデバイスパワーモジュール実現に技術的指針を与えられることから、SiCダイオードを用いた高耐圧パワーモジュール検証への早期の取組が求められている。

#### 2. 研究開発の具体的内容

高耐圧(3.3kV級)かつ低損失なSiC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。また、当該SiC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Si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を開発し、SiC大容量パワーモジュールの試作/動作実証を行うことで、SiCデバイスの活用が当該電圧領域におけるパワーモジュールでも有効であることを実証する。

#### 3. 達成目標

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。

## 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」

### (8)「大口径対応デバイスプロセス装置開発」

#### 1. 研究開発の必要性

S i Cデバイス化プロセス技術において、先行しているS iデバイス技術と大きく異なり、更なる開発の必要性があるのは、プロセス温度がより高いイオン注入、活性加熱処理、高温酸化等の高温熱処理プロセス、並びにウエハが透明であることに起因した困難さが残存する露光プロセスである。これらのデバイス化プロセスではS iデバイス用の装置技術を転用することが本質的に困難であり、また、既存のS i C 4インチプロセス装置技術の延長では均一性等の生産レベルで必要とされる性能の達成も困難である。S i Cの6インチウエハが実用化されても以後のデバイス化プロセスで対応できず、このままでは6インチウエハに立脚したデバイス開発に支障を来す。実用化のためには、S i C 6インチウエハを想定した当該デバイス化プロセス装置の開発が不可欠である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

S i Cデバイス化プロセスの内、S i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を開発する。

更に、当該装置を用いたデバイス試作によって最終性能を確認できるよう、研究計画終了後に必要な措置をとる。

#### 3. 達成目標

6インチS i C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  $\mu$ A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 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 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、ばらつき(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」

### (9) 「高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発」

#### 1. 研究開発の必要性

S i パワー半導体素子で達成不可能なレベルの小型・軽量電力変換器の実現には、S i C パワー半導体素子の採用と、その高温動作・高速スイッチングが有効である。例えば電気自動車などの応用分野において、これに関連する技術開発に対する期待が大きい。中でも、高耐熱の受動素子等の開発と、それらをパワー半導体素子近傍に配置する実装技術が重要である。しかし、従来のS i パワー半導体素子の動作温度を超える環境に対応する実装技術、並びに実用的高耐熱部品の開発は未着手であり、早期開発が望まれている。

このため、S i C 高性能パワー半導体素子を対象にした高温実装技術の開発と、これに適合する高耐熱部品の要素開発を連携して進める必要がある。

#### 2. 研究開発の具体的内容

S i では動作不可能な接合温度領域(200~250℃)においてS i C パワー素子が高速スイッチング性能を発揮できるよう、開発する耐熱部品をパワー素子近傍に配置するために必要な高信頼接合技術等の実装基盤技術を開発する。

上記の実装技術に対応する高温領域において基本性能(耐電圧・周波数特性等)を有し、かつ実装プロセスに対する耐性を有する受動部品(スナバコンデンサ・スナバ抵抗等)、及び過酷なヒートサイクルに耐えるメタライズ放熱基板・配線基板等の構造部材の要素技術を開発する。

部品レベルの耐熱性及び電気特性、並びに部品を実装技術によって統合し単一パッケージ化した際の耐熱性及び電気特性を評価し、問題点を把握する。これにより、高耐熱部品と、それに対応した統合モジュール技術を効率的に開発する。

#### 3. 達成目標

接合温度が225℃以上で動作するS i C 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・搭載する受動部品及び部材の仕様は下記のとおりとする。

(スナバコンデンサ) 静電容量0.1 $\mu$ 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℃であり、-40~250℃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40mm<sup>3</sup>以下(例えば、5×4×2mm)。

(スナバ抵抗) 抵抗値  $10\ \Omega$  級、定格電力  $1\ \text{W}$  級の抵抗体において、使用時の耐熱温度  $250\ ^\circ\text{C}$  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、 $10\ \text{MHz}$  までの周波数領域における抵抗値の変動が  $\pm 10\%$  以下、かつ、体積  $20\ \text{mm}^3$  以下 (例えば、 $6.3 \times 3.1 \times 1\ \text{mm}$ )。

(メタライズ放熱基板) 熱伝導率  $180\ \text{W}/(\text{mK})$  以上、曲げ強度  $600\ \text{MPa}$  以上、破壊靱性  $6\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  以上の絶縁素材を用いた、サイズ  $5000\ \text{mm}^2$  以上、厚み  $1/80\ \text{inch}$  ( $0.32\ \text{mm}$ ) 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  $1200\ \text{V}$  以上、 $-40\sim 250\ ^\circ\text{C}$  の温度範囲での耐ヒートサイクルが  $1000$  回以上。

(配線基板) 使用時の耐熱温度  $250\ ^\circ\text{C}$  であり、当該温度において耐電圧  $1200\ \text{V}$ 、 $50\ \text{A}$  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  $\pm 20\ \mu\text{m}$  以下。



## 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」

#### 1. 研究開発の必要性

20年以上にわたって高耐圧に対応するパワーデバイスとしてSi-IGBTが重要な役割を担ってきたが、従来技術の延長によるデバイス開発では性能限界が見え始めていると言われている。その解決手段の一つとして、SiC等の新材料パワーデバイスの開発を推進し、実用化が進みつつあるが、普及にはまだある程度の時間を要する見込みであり、Siパワーデバイスの更なる性能向上についての期待は高い。

また、パワーデバイス市場の中でも特にSi-IGBTは国内メーカーがその40%のシェアを握っており、かつ市場自体も年15%の成長率が予測される有望市場である。一方で、現在主流の200mmウエハプロセスから300mmプロセスへの転換も現実的な流れとしてはあり、転換期に合わせて競合である欧米勢や後発のアジア勢の動きが活発化している。このような状況の中、国内メーカーの優位な環境を維持しつつ更なる成長を遂げるには、従来技術の延長線上にない新世代Siパワーデバイスを開発し、他の追随を許さない環境を作る必要がある。

#### 2. 研究開発の具体的内容

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を駆使し、極限の材料及びデバイス構造等を開発することにより、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する。

また、開発した新世代Siパワーデバイス的高速スイッチングを可能にするゲートドライバやスイッチング技術等を開発する。

#### 3. 達成目標

##### 【中間目標】(2016年度末)

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。

##### 【最終目標】(2019年度末)

2016年度末までに動作させた新世代SiパワーデバイスとゲートドライブICを組み合わせたプロトタイプモジュールを作成し、産業用実用化クラスの出力(例えば10kW)の変換器実証運転を行う。また、パワーデバイスとしては、低欠陥ウエハ技術、スケーリング技術等の新構造化技術等の高度化を図り、スケーリングコンセプトの連続性を確認する。

## 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」

#### 1. 研究開発の必要性

近年のIT技術の進展によりIT機器が消費する電力も膨大な量が見込まれている。こうした背景の下、省エネルギー化・地球温暖化解消の観点から、データセンタ用サーバ電源に代表される数kW級電源機器の電力損失の大幅低減と機器小型化の実現が必須課題となっており、その実現には電源機器へのSiCパワーデバイスの適用が有効である。そのためには、SiCパワーデバイスの高性能化とSiCパワーデバイスを適用した電源機器用電力変換器の高度化に関する技術開発が必要である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

電力容量が数kW級のデータセンタ用電源の省エネルギー化、小型化に向け、SiCパワーデバイスの高性能化技術開発を行い、それらの開発により得られた高性能デバイスを電源機器用電力変換器へ適用して電力変換技術の開発を行う。加えて、上記電源のプロトタイプを試作し、その低損失、高効率特性を実証する。SiCパワーデバイス開発においては、SiCダイオード、SiCスイッチングデバイスの高性能化、スイッチング特性改善等の技術開発を実施する。サーバ電源開発においては、電源機器に適した駆動方式、高効率化等に関わる技術開発を行う。

#### 3. 達成目標

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。

## 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」

### (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」

#### 1. 研究開発の必要性

パワーエレクトロニクス応用としてモータ駆動と同様に重要な数10kW級の太陽光発電用パワーコンディショナに関して電力損失の大幅低減と機器の小型化を実現するためには、SiCデバイスの適用が有効である。そのためには、SiCパワーデバイスの高性能化と、SiCパワーデバイスを適用したパワーコンディショナの高度化に関する技術開発が必要である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

太陽光発電システム用パワーコンディショナの省エネルギー化、小型化に向け、SiCパワーデバイスの高性能化技術開発を行うと共に、駆動回路方式に対応したSiCデバイスのしきい値制御技術を行う。さらに、それらの開発により得られた高性能デバイスを用いて、太陽光発電システム用パワーコンディショナへ適用する電力変換技術の開発を行う。加えて、上記パワーコンディショナのプロトタイプを試作し、その低損失、高効率特性を実証する。デバイス技術においては、SiCダイオード・SiCスイッチングデバイスの低オン抵抗化技術、しきい値制御技術、変換器の駆動方式、スイッチング技術及び、フィルタの最適化技術開発を実施する。

#### 3. 達成目標

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。

## 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」

### (3)「次世代SiC電力変換器基盤技術開発」

#### 1. 研究開発の必要性

高出力パワー密度を持つ革新的電力変換器を実現するためには、パワーデバイスを高速かつ高温で動作させる必要があり、高温環境下での高信頼化技術や周辺回路デバイス等を含めた設計技術と実装技術が不可欠となることから、これらの技術を開発・統合する電力変換器の高出力パワー密度性能を検証する必要がある。

#### 2. 研究開発の具体的内容

次世代パワーデバイスを利用した革新的電力変換器設計技術と高温実装技術等を開発し、それらを取り入れた電力変換器の高出力パワー密度性能の検証を行う。

より具体的には、次世代パワーデバイスを、高温で反復動作させると共にその優れた高温特性の活用を可能とする実装要素技術(配線、絶縁、冷却、回路レイアウト技術等)を開発する。また、高温環境下でのデバイス特性試験を通じて高パワー密度変換器の統合設計体系に高温条件を導入する。これらにより、次世代パワーデバイスを用いた電力変換器の高出力パワー密度性能の向上を図る。

#### 3. 達成目標

次世代パワーデバイスをデバイス温度<sup>(※1)</sup> 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、60W/cm<sup>3</sup>級の出力パワー密度<sup>(※2)</sup>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。

(※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。

なお、2010年度計画策定にあたり、産業技術政策動向等及び目標の必須性を勘案して基本計画の見直しを行った結果、「研究開発項目③」の「(1)電力変換器用SiCパワースwitchングデバイス基盤技術」については、当該研究開発は2009年度をもって終了することとした。

## 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」

#### 1. 研究開発の必要性

パワーエレクトロニクスは、省エネの切り札、産業競争力強化の鍵となることが期待できる技術分野であり、このうち、パワー半導体の領域においては、日本は産業競争力を有している。本領域の強みを活かし、産業競争力を更に強化するため、より新しく、独創性に富むなどの応用分野（アプリケーション）の開拓を進め、新市場の創出を行うことも重要である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

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ついての先導研究を実施する。具体的には、考案された応用システムのコンセプト実証を行う。

#### 3. 達成目標

##### 【最終目標】（2016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。

なお、目標を達成した後、実用化の見通し等の観点から外部有識者による評価等を踏まえ、実用化に向けた継続的な取組が必要な研究開発内容の絞り込みを行う。実用化に向けた取組が必要と判断された場合には、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」において引き続き研究開発を実施することがある。

## (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」

### 1. 研究開発の必要性

S i C等の新材料パワーデバイスは、鉄道、民生機器等に採用され、実用化が進みつつある。今後、低炭素社会の実現・産業競争力の強化を更に推進するためには、新材料パワーデバイスの耐圧や信頼性等の向上、コスト低減等により、適用される製品の裾野を拡げることが重要となる。

なお、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、産業機器、自動車、民生機器などの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（S i、S i C、G a N）、をデバイスや回路等の設計技術、実装技術等と組み合わせ、最適な応用システムを構築することにより実現することが重要となる。

### 2. 研究開発の具体的内容

材料、設計技術、実装技術等の開発により、新材料パワーデバイスも用いた応用システムの試作・実証を行う。

(想定する応用システムの例)

- ・6.5 k Vの高耐圧S i Cパワーデバイスを全面採用したエネルギー効率2倍、サイズ1 / 4となる産業機器用インバータを開発し、エネルギー効率に優れた次世代産業機器の応用システム
- ・従来のS iパワーデバイスを用いたインバータと比較して、エネルギー効率2倍、サイズ1 / 4となる車載品質のインバータを開発し、航続距離が長く、エネルギー効率に優れた次世代自動車の応用システム
- ・プロジェクト開始時点のS iパワーモジュールと比較して周波数10倍化、パワー密度100倍化、エネルギー効率2倍化された新材料のパワーモジュールを開発し、エネルギー効率に優れた次世代民生機器の応用システム

### 3. 達成目標

【中間目標】(2016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となる、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。

なお、公募により選定したテーマ毎に中間目標を設定する。

**【最終目標】（2019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

なお、公募により選定したテーマ毎に最終目標を設定する。

#### 研究開発項目④「新材料パワーデバイスの実用化加速技術開発」

##### (1)「パワーデバイス用新材料ウエハの革新的製造技術の開発」

###### 1. 研究開発の必要性

SiCと並び期待されているパワーデバイス用新材料は、一般的にウエハの品質及びコストがそのパワーデバイス実用化に対し大きなボトルネックとなっている。こうした新材料を用いたパワーデバイスの研究は、欧米においても国家的な研究開発事業として取り組まれてきている。こうした中、我が国においても、SiCの次も見越した手だてを講じていくことが重要である。このために必要となるウエハの高品質化、低コスト化に取り組む。

###### 2. 研究開発の具体的内容

低欠陥で、パワーデバイスに供する新材料ウエハ実現のための革新的製造技術を開発する。また、低コスト化を実現するためのウエハの大口径化に関する革新的製造技術を開発する。

###### 3. 達成目標

###### 【最終目標】(2019年度末)

- ・貫通転位密度  $1,000/cm^2$ 以下、口径4インチ以上の単結晶を実現し、当該結晶を用いたデバイス品質のウエハ作成プロセスを生産性の高い方法で確立する。
- ・上記新材料を用いた口径6インチの単結晶実現のための製造技術を確立する。



## (2) 「新材料パワーデバイスの新規用途開拓の推進」

### 1. 研究開発の必要性

新材料パワーデバイスは、Si、SiC系のパワーデバイスと比較して高周波数かつ高出力な用途に適用可能であり、スイッチングデバイス、パワーIC、高周波無線デバイス、レーダー、エネルギー伝達デバイスなど、様々な応用が期待されている。パワーデバイス材料としてSi、SiCの技術開発が先行している中、新材料パワーデバイスの市場を形成し、牽引していくためには、単にSi、SiC系のパワーデバイスの代替のみならず、SiC等の従来材料では不可能な用途の開拓を見据え、新材料の特徴である高周波特性や放熱特性等を最大限に活かす研究開発が必要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

新たな用途開拓を見据えて、その実現に必要な技術に関して下記の研究開発を実施する。

- ① 新材料パワーデバイスの実用に即した成膜技術や放熱技術などの共通基盤技術の開発
- ② 大容量高周波無線通信デバイス技術などのIoT社会を実現するための要素技術開発
- ③ 新材料パワーデバイスの社会実装に向けた将来の革新的な用途開拓に関する可能性の検証

### 3. 達成目標

#### 【最終目標】(2019年度末)

①開発した共通基盤技術について、実用に即した性能評価を行い、実用化の見通しを明確化、②要素技術を実装した新材料パワーデバイスを試作・動作検証し、Si、SiC等の他材料のデバイスと比較した競争優位性の明確化、③新材料パワーデバイスの革新的な用途に関して、具体的かつ定量的な要求仕様及びその実現可能性の明確化、を最終目標とする。

(別添) 研究開発スケジュール

	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
研究開発項目 ①(1)~(9)		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										
				中間評価			事後評価					
研究開発項目 ①(10)						新世代Siパワーデバイス 技術開発		中間評価	新世代Siパワーデバイス 技術開発			事後評価
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)						事後評価					
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					事後評価	
								中間評価				
研究開発項目 ④									新材料パワーデバイスの 実用化加速技術開発			

# 事前評価書

		作成日	平成26年2月19日
1. プロジェクト名	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／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. 推進部署名	電子・材料・ナノテクノロジー部		
3. プロジェクト概要（予定）			
(1) 概要			
1) 背景			
<p>パワーエレクトロニクスとは、電気の周波数や電圧、交流・直流の変換などへ半導体を用いて高効率に行う技術であり、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーの普及や発電効率の向上、家電や産業機器、次世代自動車等の一層の省エネ化のためのキーテクノロジーである。</p> <p>我が国ではこれまで、パワーエレクトロニクスの研究開発として、Si（ケイ素）より物性値（例えば耐圧性、耐熱性）に優れるSiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）等の新材料の活用注目し、国家プロジェクトを実施してきており、実用化に向けて努力が続いている。特に近年では、SiCウエハの高品質化と大口径化を中心に大きな研究開発プロジェクトを実施してきており、日本の高い国際競争力を有している。</p> <p>他方、欧州ではGaNのパワーエレクトロニクスに関する研究開発を強化する流れがあり、米国では、軍事技術への展開を目的に着々と研究開発が進められ、加えて、中国、韓国、台湾は技術力向上によって日本を猛追している。</p> <p>今後更なる高機能化、高性能化を図るには、パワーエレクトロニクスは扱う電力の容量が大きいため、機能をワンチップ化させることは困難であり、高機能化等はデバイス含めシステム全体で図ることとなる。従って、デバイスの高機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。</p>			
2) 目的			
本事業で拡充する研究開発の目的は、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である。

### 3) 実施内容

#### 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

材料、設計技術、実装技術等の開発により、新材料パワーデバイスを用いた応用システムの試作・実証を行う。なお、必要に応じて、応用システム毎の要求に応じた新材料・新構造等の基盤研究・先導研究も実施する。

#### (2) 規模

平成 26 年～31 年度(6 年間)

総事業費 (NEDO 負担分) : 150.0 億円 (2/3 助成) <sup>(※)</sup> (予定)

平成 26 年度政府予算案 : 25.2 億円 (需給) (予定)

(※) 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、1/2助成とする。

(3) 期間 平成 26 年度～31 年度 (6 年間)

## 4. 評価内容

### (1) プロジェクトの位置付け・必要性について

#### 1) NEDOプロジェクトとしての妥当性

パワーデバイスは、世界市場を欧州とほぼ二分している等、本分野は我が国が競争力を有する技術分野である。

この競争力を活かし、現下の最重要課題である再生可能エネルギーの拡大と省エネの一層の促進に貢献するパワーエレクトロニクスの技術革新に取り組み、結果として、成長する市場で大きなシェアを確保することは、まさに国策として重要である。

「日本再興戦略 - JAPAN is BACK」(平成25年6月14日閣議決定)では、「次世代デバイス・部素材(パワーエレクトロニクス等)研究開発・事業化」と題して、「風力発電やメガソーラー等の再生可能エネルギーの発電効率向上や、省エネ家電・次世代自動車等の一層の省エネ化のためのキーテクノロジーであるパワーエレクトロニクスについては、2020年までに新材料等による次世代技術の本格的な事業化を目指す」として、その旨が明記されているところ。

<p>2) 目的の妥当性</p>
<p>これまで実施してきた新材料パワーエレクトロニクスの基盤的技術の早期実用化を通じて事業面での競争力強化を行い、本分野における我が国の競争力を不動のものとするを狙ったプロジェクトであり、適切である。</p>
<p>(1) プロジェクトの位置付け・必要性についての総合的評価</p>
<p>産業政策及びエネルギー政策上、我が国が競争力を有する本分野の推進は非常に重要となり、NEDOとして取り組む意義のあるプロジェクトである。</p>
<p>(2) プロジェクトの運営マネジメントについて</p>
<p>1) 成果目標の妥当性</p>
<p>中間年度である平成28年度末までに、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となる、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。</p> <p>最終年度である平成31年度末までに、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</p> <p>なお、公募により選定したテーマ毎に中間目標、最終目標は改めて設定する。</p>
<p>2) 実施計画の想定と妥当性</p>
<p>現在実施しているプロジェクト（平成22～26年度）では、6インチSiCウエハの高品質化、エピタキシャル膜成長技術、ウエハ加工技術の確立、高耐圧デバイスの製造技術の研究、高耐熱部品のモジュール化技術の開発を実施している。</p> <p>今回拡充する本プロジェクト（平成26～31年度）は、上記成果等を活用した応用システムの研究開発であり、早期実用化による事業面での国際競争力強化に貢献し、本分野における日本の地位を不動のものとする。</p>
<p>3) 評価実施の想定と妥当性</p>
<p>NEDOは、(1) 事業の位置付け・必要性、(2) 研究開発マネジメント、(3) 研究開発成果、(4) 実用化、事業化に向けての見通し及び取り組みの4つの評価項目について、外部有識者による評価を行う。中間評価を平成28年度、事後評価を平成32年度に実施する。</p> <p>なお、中間評価結果を踏まえ、必要に応じて事業の加速・縮小・中止等、</p>

見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、事業実施を前倒しする等、適宜見直すものとする。
<b>4) 実施体制の想定と妥当性</b>
応用システム毎に、研究開発を主体的に進める企業からテマリーダーを選び、サプライチェーンで垂直連携となるコンソーシアムを編成し、プロジェクトを推進する。
<b>5) 実用化・事業化戦略の想定と妥当性</b>
市場調査、ベンチマークに基づき新たな産業等を作る戦略・シナリオを策定し、終了後3年以内の実用化を目指す。また、成果に応じて、6年間の事業期間終了を待たずに卒業し、実用化に移行させる。 なお、インフラ系などは、海外での調達を見据えて海外実証の活用を検討する。
<b>(2) プロジェクトの運営マネジメントについての総合的評価</b>
研究開発の段階に応じて適切な実施体制を構築し、それに対応した評価等を行う仕組みを想定しており、適切な運営マネジメントとなっている。
<b>(3) 成果の実用化・事業化の見通しについて</b>
<b>1) プロジェクト終了後における成果の実用化・事業化可能性</b>
SiCパワーモジュールの産業機器、自動車等への適用、GaN/Siパワーモジュールの民生機器等への適用を想定している。
<b>2) 成果の波及効果</b>
半導体工学全般、計測工学、材料工学、信頼性工学など他の研究分野に大きな波及効果を及ぼすことが期待される。
<b>(3) 成果の実用化・事業化の見通しについての総合的評価</b>
応用システムの開発については、実用化・事業化の見通しの明確なコンソーシアムのみ実施者として選定すると共に、実施者に事業化シナリオ等を意識して開発に取り組んでもらうことで、妥当な体制となっている。

「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 基本計画（案）」  
に対するパブリックコメント募集の結果について

平成26年3月17日  
NEDO  
電子・材料・ナノテクノロジー部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。  
貴重なご意見を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間  
平成26年2月28日～平成26年3月13日
2. パブリックコメント投稿数<有効のもの>  
計3件
3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

ご意見の概要	ご意見に対する考え方	基本計画・技術開発課題への反映
全体について		
<p>[意見1]（1件） 低炭素化は地球規模で重要なテーマであるとともに、対象が自動車、電車、電力、民生と広範囲にわたり、日本の産業の強化や雇用の拡大に寄与するという意味で非常に有意義なプロジェクトだと考えます。また、プロジェクト成果はエネルギー効率2倍、サイズ1/4とインパクトが大きく、社会を変えていく原動力になると期待できます。是非、このプロジェクトを推進し、日本の産業力を強化していただきたいと考えます。</p>	<p>[考え方と対応] 貴重なご意見、ありがとうございます。本プロジェクトを通じて、パワーエレクトロニクス関連の広範囲な産業競争力を強化し、併せて低炭素社会の実現に努めて参ります。</p>	<p>[反映の有無と反映内容] 特になし。</p>

<p>[意見2] (1件)</p> <p>2011年3月の福島第一原発事故以降、我が国のエネルギー政策に対する国民の関心は高まり、再生可能エネルギー導入に対する期待と共に、省エネ技術開発の必要性に対しても理解が急速に深まりつつある。一次エネルギーに於ける電力比率向上、或いは電気自動車やハイブリッド自動車の普及に伴うパワーエレクトロニクスの高度化は、将来的にも重要な技術項目の一つであり、新興国に簡単に真似されない特徴有る我が国のコア技術として成熟させる目的のためにも、今後数年間での重点的な研究開発が望ましいと個人的には考える。</p> <p>これらの背景から、貴機構が今回公募する予定の新規プロジェクト「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」は、国民全体の省エネ技術向上に裨益する研究開発として、国内電機メーカーを始めとする民間企業各社、大学・国研を含めたオール・ジャパン体制でのプロジェクトとして、是非ともキック・オフ、推進して頂きたいと考えます。</p>	<p>[考え方と対応]</p> <p>貴重なご意見、ありがとうございます。本プロジェクトでは、応用システム毎に、研究開発を主体的に進める企業からテーマリーダーを選び、サプライチェーンで垂直連携となるコンソーシアムを編成して、プロジェクトを推進する予定です。その活動を通じて、低炭素社会の実現及び日本の産業競争力強化を実現して参ります。</p>	<p>[反映の有無と反映内容]</p> <p>特になし。</p>
<p>[意見3] (1件)</p> <p>本プロジェクトは、より一層の低炭素社会の実現、及びパワーデバイスにおける日本の国際競争力強化に対して非常に有効なプロジェクトと認識しています。本プロジェクトではSiCの要素技術だけでなく、応用技術の研究・開発も実施しますので、SiCパワーデバイスの適用製品の拡大、信頼性向上、コスト低減等が期待できます。特に、高耐圧・高温モジュールの実現は技術的に最も難しいものではありますが、そこで研究・開発された技術は他の応用システムへの展開も可能ですので、適用製品が拡大するものと考えます。さらに、本プロジェクトにて開発された材料、部材についても国際競争力が強化されるものと考えます。</p>	<p>[考え方と対応]</p> <p>貴重なご意見、ありがとうございます。本プロジェクトでは、応用システムの実現に必要な技術開発を実施するものであり、材料、部材についても必要に応じて開発対象としております。材料、部材等の国際競争力強化も本プロジェクトで期待している効果の一つとなります。</p>	<p>[反映の有無と反映内容]</p> <p>特になし。</p>

以上