

環境エネルギー科学技術に関する 研究開発課題の中間評価結果②

平成 30 年 12 月

環境エネルギー科学技術委員会

省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発

中間評価調整グループ 構成員一覧

(敬称略)

氏 名	所 属
加藤 昌子	北海道大学 大学院理学研究院化学部門 教授
岸野 克巳	上智大学 ナノテクノロジー研究センター 研究センター長・特任教授
福山 博之	東北大学 多元物質科学研究所 副所長・教授
藤岡 洋	東京大学 生産技術研究所 教授
本城 和彦	電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター 客員教授
山地 憲治 (※)	地球環境産業技術研究機構 理事・研究所長

※ 主査

省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発の概要

1. 課題実施期間及び評価時期

2016年度～2020年度

中間評価 2018年度、事後評価 2021年度を予定

2. 研究開発概要・目的

本事業では、「窒化ガリウム（GaN）等の次世代半導体に関して、材料創製からデバイス化・システム応用までの研究開発を一体的に行う研究開発拠点を構築し、理論・シミュレーションも活用した基礎基盤研究を実施することにより、実用化に向けた研究開発を加速すること」を目的としている。次世代半導体の実用化の加速による省エネルギー社会の早期実現に加えて、世界に先駆けた次世代半導体の市場投入による我が国の産業競争力の強化を目指している。

研究開発拠点の中核を担う「中核拠点」を設置し、各領域で行われる研究開発のとりまとめ等を行うとともに、結晶創製に係る研究開発を実施する。さらに、「評価基盤領域」において結晶及びデバイスの評価に係る研究開発を実施するとともに、「パワーデバイス・システム領域」、「レーザーデバイス・システム領域」、「高周波デバイス・システム領域」においては、各デバイスの作製にかかる研究開発を中核拠点及び評価基盤領域と連携しながら推進する。

3. 研究開発の必要性等

（1）必要性

地球温暖化対策や、エネルギーの安定確保等の観点から、これまでにない水準でエネルギーの経済効率性の確保と温室効果ガスの排出削減の両立を求められている我が国にとって、既存の省エネルギー技術のみならず、消費電力の劇的な低減を実現できる革新的な技術の研究開発及び早期の社会実装は必須であり、国が重点的に推進する必要がある。

（2）有効性

省エネルギー効果の高いシステムの実用化に向けて、材料創製からデバイス化・システム応用までの次世代半導体の研究開発を理論・シミュレーションも活用して一体的かつ総合的に推進することは、事業終了後の社会実装を早めることが期待でき、効果的である。

（3）効率性

本事業では、理論・シミュレーションも活用した材料創製からデバイス化・システム応用まで、次世代半導体の研究開発を一体的に加速するため、産学官が結集した研究開発拠点を構築し、産学官のそれぞれの強みを生かした研究開発体制を整備するとともに、技術的な強みが産業競争力

の強化にもつながるよう、知的財産戦略等を合わせて一体的に検討・実施する体制を整えることとしており、効果的かつ効率的な研究開発の実施が期待できる。

4. 予算（執行額）の変遷

年度	2016年度 (初年度)	2017年度	2018年度	2019～2020年度 (年度ごと)	総額
予算額	1,000百万円	1,253百万円	1,440百万円	1,749百万円 (見込み)	7,191百万円 (見込み)
執行額	999百万円	1,253百万円	未定	未定	未定

5. 課題実施機関・体制

① プログラム・ディレクター（PD）、プログラム・オフィサー（PO）

- ・ PD 谷口 研二 （大阪大学 名誉教授）
- ・ PO 上田 大助 （京都工芸繊維大学 特任教授）
- ・ PO 松本 功 （大陽日酸（株） 技監）
- ・ PO 名西 愷之 （立命館大学 名誉教授）

② 中核拠点（結晶創製・研究開発）、2016年度～

研究代表者 名古屋大学 未来材料・システム研究所 教授 天野 浩
 主管研究機関 名古屋大学
 共同研究機関 大阪大学、(株)豊田中央研究所、三重大学、山口大学

2016年度は中核拠点の下で以下のフィージビリティスタディ（FS）を実施。

研究代表者 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授 宮本 恭幸
 主管研究機関 東京工業大学
 共同研究機関 佐賀大学

研究代表者 名城大学 理工学部 教授 竹内 哲也
 主管研究機関 名城大学
 共同研究機関 名古屋大学、三重大学、山口大学

研究代表者 東京大学 大学院工学系研究科 教授 須賀 唯知
 主管研究機関 東京大学
 共同研究機関 なし

③ 評価基盤領域、2016年度～

研究代表者 物質・材料研究機構 技術開発・共用部門長 小出 康夫
主管研究機関 物質・材料研究機構
共同研究機関 早稲田大学、東北大学、筑波大学、産業総合研究所、富士電機（株）、
豊田合成（株）

④ パワーデバイス・システム領域、2016 年度～

研究代表者 名古屋大学 未来材料・システム研究所 特任教授 加地 徹
主管研究機関 名古屋大学
共同研究機関 愛知工業大学、京都大学、産業総合研究所、東北大学、
（株）豊田中央研究所、法政大学、北海道大学

⑤ レーザーデバイス・システム領域、2017 年度～

研究代表者 名城大学 理工学部 教授 竹内 哲也
主管研究機関 名城大学
共同研究機関 名古屋大学、山口大学、三重大学、名古屋工業大学、産業総合研究所、
（株）小糸製作所、ウシオオプトセミコンダクター（株）、
スタンレー電気（株）、日機装（株）、豊田合成（株）

⑥ 高周波デバイス・システム領域、2018 年度～

研究代表者 名古屋大学 大学院工学研究科 教授 須田 淳
主管研究機関 名古屋大学
共同研究機関 名古屋工業大学、東京工業大学、佐賀大学、豊田工業大学、三菱電機（株）

⑦ フィージビリティスタディ（FS）実施機関、2017 年度

研究代表者 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授 宮本 恭幸
主管研究機関 東京工業大学
共同研究機関 佐賀大学

研究代表者 名古屋大学 未来材料・システム研究所 教授 山本 真義
主管研究機関 名古屋大学
共同研究機関 なし

研究代表者 名古屋工業大学 大学院工学研究科 准教授 分島 彰男
主管研究機関 名古屋工業大学
共同研究機関 なし

中間評価票

(2018年9月現在)

1. 課題名 省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発

2. 研究開発計画との関係

施策目標：創・蓄・省エネルギー等に係る革新的な技術の研究開発の推進

大目標（概要）：

COP21 で策定されたパリ協定を踏まえ、長期的視野に立って、CO₂ 排出削減のイノベーションを実現するための中長期的なエネルギー・環境分野の研究開発を、産学官の英知を結集して強力に推進し、その成果を世界に展開していく。（「エネルギー・環境イノベーション戦略」（2016年4月総合科学技術・イノベーション会議決定））

中目標（概要）：

温室効果ガスの抜本的な排出削減の実現に向けた革新的な技術の研究開発を推進する。

重点的に推進すべき研究開発の取組（概要）：

＜温室効果ガスの抜本的な排出削減に向けた明確な課題解決のための研究開発＞

温室効果ガスの抜本的な排出削減に向け、明確なターゲットを示し、その解決を図るための革新的な技術の研究開発を推進し、温室効果ガスの大幅な削減に貢献する。電力損失を大幅に削減できる次世代半導体の実現に向けて、青色発光ダイオード（LED）の研究開発に代表される窒化ガリウム（GaN）に関する我が国の強みを活かした研究開発等に取り組む。

本課題が関係するアウトプット指標：材料創製やデバイス化、システム応用等に関する研究開発テーマ数

	2015年度	2016年度	2017年度
活動実績(件)	-	11	15

本課題が関係するアウトカム指標①：特許出願累積件数

	2015年度	2016年度	2017年度
成果実績(件)	-	2	11

本課題が関係するアウトカム指標②：ウエハ・デバイスの試作数

	2015 年度	2016 年度	2017 年度
成果実績(件)	-	0	10

本課題が関係するアウトカム指標③：本事業による論文数

	2015 年度	2016 年度	2017 年度
成果実績(報)	-	3	22

3. 評価結果

(1) 課題の進捗状況

本事業では徹底した省エネルギー社会の実現に向けて、高電圧・低抵抗で使用でき、大きな省エネ効果が期待される高品質な GaN 等の次世代半導体の 2030 年の実用化に向けた基礎・基盤研究として、2020 年度までの事業期間中に結晶作製技術を創出するとともにデバイス作製方法の目途をたてることを目標としている。そのため、企業での事業化、研究マネジメントの経験を有するプログラム・ディレクター (PD) 及びプログラム・オフィサー (PO) の下、理論・シミュレーションも活用した材料創製からデバイス化・システム応用まで一体となって研究開発するオールジャパン体制を産学官の協力で実現した。その研究実施体制としては、均一性の高い大口径 GaN 結晶基板の育成とその基板上的エピタキシャル結晶成長(結晶基板の結晶面にそろえて単結晶を成長させる技術)に係る研究開発を実施する「中核拠点」を設置し、結晶及びデバイスの評価に係る「評価基盤領域」、各デバイスの作製にかかる研究開発を「中核拠点」及び「評価基盤領域」と連携しながら推進する「パワーデバイス・システム領域」、「レーザーデバイス・システム領域」、「高周波デバイス・システム領域」を形成した。このような研究実施体制の下、「中核拠点」では GaN 結晶基板の大口径化が可能となる薄液成長法において低欠陥化を実現し、GaN 結晶基板上へのエピタキシャル結晶成長においても結晶成長時の圧力を従来の 2 倍の 1.0 気圧とすることで低欠陥(キラ欠陥密度 $< 10^3 \text{ cm}^{-2}$) な GaN 結晶を歩留り 100 % で成長することに成功している。加えて、「評価基盤領域」と「パワーデバイス・システム領域」との連携により、縦型 pn ダイオードの逆方向リークの起源となる欠陥を正確に同定した。各研究領域においても、「評価基盤領域」ではウエハ全面の「ゆがみ」をすばやく可視化する新手法を開発、「パワーデバイス・システム領域」では高速・低欠陥溝加工技術の確立、「レーザーデバイス・システム領域」では低抵抗・低コストを両立する GaN トンネル接合形成技術の確立等の世界初・世界最高水準の成果が得られている。全体としての研究進捗は当初の研究計画に対して順調といえるが、デバイス作製に関連する「パワーデバイス・システム領域」と「レーザーデバイス・システム領域」の研究進捗に一部遅れがある。ただし、これらはデバイ

スを駆動させるために重要かつ世界的にもチャレンジングであると認識されている課題であり、研究開発法人等の有する最先端の計測・評価装置の特徴を最大限に発揮できる研究者を集結させた「評価基盤領域」との連携による詳細な解析と各種アイデアを丹念に検証した取組の結果として目標達成に向けた道筋が見いだされていると評価できる。

以上のことから、中間評価時点における本事業の進捗状況は適正と評価できる。

(2) 各観点の再評価

<必要性>

評価項目

科学的・技術的意義、社会的・経済的意義、国費を用いた研究開発としての意義

評価基準

国費を投入する必要性はあるか

現在、半導体の材料としてはシリコン (Si) が主に用いられているが、パリ協定を踏まえた温室効果ガス削減と我が国の経済成長を両立させるためには、コストパフォーマンスと性能で Si 半導体を凌駕し、現状の削減努力の延長線上にない革新的な技術の創出が不可欠である。変動する再生可能エネルギーの有効利用を可能とするパワー安定化技術としても脚光を浴びる次世代半導体技術の国際的な研究開発の激化を受けて、2016 年 4 月に「エネルギー・環境イノベーション戦略」が策定され、2018 年 4 月には「環境基本計画」においても、GaN 等の新技術を用いた次世代パワーエレクトロニクス技術の開発等一層の省エネルギー技術等の研究開発を図ることが盛り込まれている。エネルギーの経済効率性の確保と温室効果ガスの排出削減の両立に資する次世代半導体技術の早期の社会実装に向けた研究開発を国が重点的に推進する必要性は事業開始当時と比較しても飛躍的に高まっている。

次世代半導体を用いたパワーエレクトロニクスやレーザー照明、高周波通信は、我が国の電力消費のうち大きな割合を占める動力と照明、更なる電力需要の増加が見込まれる情報通信機器の消費電力の低減に大きく寄与すると期待されている。2014 年の青色 LED 開発成功でのノーベル物理学賞受賞に代表されるように、我が国は GaN 等の次世代半導体研究に関する強みを有している。一部既に、炭化ケイ素 (SiC) 等の異種基板に GaN を結晶成長させた GaN デバイスが実用化へ進んでいるが、異種基板上での GaN 等の結晶成長は格子定数や熱膨張係数等の物性の違いから高品質なものとはならない。今後応用の期待されている上記分野へ GaN 等の次世代半導体を本格的に展開するには、大電力で使用する際の耐圧などの性能面と価格競争力の面で大きな課題が存在する。したがって、これまで以上に欠陥が少なく高品質、かつ大口径で低コストの GaN 結晶基板を育成する技術を確立し、高品質の GaN 結晶基板の上に欠陥の少ない GaN 等をエピタキシャルに結晶成長させる基礎・基盤研究開発が必要である。また、材料としての GaN 等の次世代半導体の本質的な特徴を最大限に生かすための周辺技術、例えば、レーザーデバイスであれば発光効率を高めるデバイス構造自体やその製造プロセス、高周波デバイスであれば回路や周辺部材の開発も十分

進んでいない状況にある。さらに、実用化段階での低コスト化には製造プロセスにおける歩留りの向上、デバイスの安定性・信頼性の担保も必要であるが、それには GaN 結晶の欠陥や種々の製造プロセスが最終的なデバイスの特性や劣化に及ぼす影響の相関を明確に紐付けしておくことが必須である。こうした革新的なデバイスの実現は、産業化による社会へのインパクトが非常に大きい一方で、企業が個々に投資をするにはリスクが高いチャレンジングなものであり、国が必要な要素技術の確立のための研究開発を推進することが必要である。新規デバイスの安定性・信頼性の評価は時間を要するため、その劣化メカニズムの解明と対応策の検討も含めて産学官が実際に連携・共働して基礎・基盤研究開発の段階から実施する必要がある。

国際的にも、パリ協定の履行に向けた自動車等の燃費向上の取組や、再生可能エネルギーの導入を進める上で課題となっている変動する電圧を一定電圧へと調整するパワーコンディショナ用途において省エネルギーな次世代半導体の重要性が増しており、研究開発の競争は激化している。例えば、欧州では自動車等のためのパワーデバイス及びシステムの研究開発や第5世代（5G）通信技術の開発が実施され、米国エネルギー省や国防総省でもパワー・高周波デバイス及び回路の基礎・基盤研究開発が実施されている。こうした中、我が国が有する科学技術優位性を産業上の国際競争力の向上へと繋げていくためにも、引き続き、国費を投じた研究開発を継続する必要がある。

以上より、本事業の「必要性」は、引き続き極めて高いと評価できる。

<有効性>

評価項目

実用化・事業化や社会実装に至る全段階を通じた取組

評価基準

実用化に向けた必要な取組が実施されているか

実用化に必要な製造プロセスの歩留り向上、安全性・信頼性を担保するために必須となる GaN 結晶の欠陥や種々の製造プロセスが最終的なデバイスの特性や劣化に及ぼす相関を明確に紐付けする研究実施体制として、理論・シミュレーションから高品質・大口径・低コストな GaN 結晶基板の育成と基板上への GaN 等のエピタキシャル成長技術の開発、実際のデバイスの製造プロセス及び特性・構造解析、回路システムまで産学官が連携して一体的かつ総合的に推進することは早期実用化に資する有効な取組である。

本事業では「中核拠点」をはじめとして5研究領域を設置しているが、一体的かつ総合的な事業推進となるように相互に連携しながら実用化へ向けた基礎・基盤研究開発が推進されていることが確認できる。例えば、「中核拠点」で作製した GaN 結晶を「パワーデバイス・システム領域」と「評価基盤領域」が連携して電気特性に大きく影響する欠陥分類を進めている。また、「レーザーデバイス・システム領域」においても、「評価基盤領域」と連携することで従来測定が不可能であった GaN ナノ構造に局所的にドーピングされたマグネシウム (Mg) 濃度を測定することに成功している。2030 年の実用化に向けては、新たな

価値を有する革新的なデバイスの実証を達成し、民間企業による研究開発を促すことも必要である。GaNの基礎・基盤研究に知見がある名古屋大学が中心となり、GaNの開発研究に強みを持っている企業とともにGaNコンソーシアムを立ち上げており、オープンイノベーションシステムの構築も進めている（2015年10月設立時の参画企業数：23 → 2018年8月時点の参画企業数：47）。理論・シミュレーションも活用した材料創製からデバイス化・システム応用までの全体を俯瞰した一体的かつ総合的な研究開発を実施する体制を整えており、研究の進捗も全体として当初の研究計画に対しておおむね順調である。5研究領域を推進するに当たり、解決しなければいけない課題を21課題設定し、既に解決したものが1課題（5%）、計画に対して順調に進捗しているものが16課題（76%）、一部未達だが今後の見通しが得られているものが4課題（19%）である。引き続き、各研究領域が相互に連携して研究開発を実施することで、高品質なGaN等の次世代半導体の早期実用化が加速されることが期待できる。

以上より、本事業の「有効性」は高いと評価できる。

<効率性>

評価項目

計画・実施体制の妥当性、目標・達成管理の向上方策の妥当性

評価基準

目標達成に向けて適切な事業の実施・運営が行われているか

本事業で構築した理論・シミュレーションも活用した材料創製からデバイス化・システム応用までの全体を俯瞰した研究開発体制は、研究開発法人等に既に投資してある最先端の計測・評価装置と蓄積された解析技術も活用しながら、基礎・基盤研究から実用化までをシームレスに加速するもので、企業での事業化、研究マネジメントの実績を有するPD及びP0のもと知的財産の管理も含めて実用化に向けた効率的な事業運営・研究開発が実施されている。

PD及びP0は、定期的開催されるヒアリング（2018年8月までに計5回）において各領域の進捗状況を踏まえた指導・助言を行い、事業推進会議（2018年8月までに計5回）においても運営状況・方針の確認を行いながら、技術的な強みを効率的に産業競争力の強化へと導くためのリーダーシップを発揮してきた。研究資金を効率的に運用する手法としては、2016年度及び2017年度に実施されたフィージビリティスタディ（FS）があげられる。「レーザーデバイス・システム領域」と「高周波デバイス・システム領域」は本格研究に入る前にFSを実施して、その実現性を評価するとともに実用化に向けた技術課題を明確化しており、PD及びP0によって優れた研究マネジメントがなされた一例と評価できる。また、「高周波デバイス・システム領域」ではFSにおいて理論・シミュレーションによっても精査した実験計画を、今後は「中核拠点」での作製されたGaN結晶基板を用いて、「パワーデバイス・システム領域」で確立したデバイス作製プロセスも横展開しながら、GaNのデバイス研究に特化したクリーンルーム施設（C-TEFs：2018年5月完成）で検証する予

定であり、計画的・効率的な研究推進が期待される。

知的財産の管理においても、研究成果を学会・論文等で発表する前には知的財産委員会での審議（2018年8月までに計67回：メール審議含む）を経てから発表することを徹底しており、知的財産の保護・管理を実用化に向けて効率的に行う運営手法がとられている。また、研究進捗を確認するヒアリングにおいて、知的財産を担当するP0のアドバイスを発端に特許出願がなされた事例も確認され、本事業における運営手法が有効に機能していると評価できる。

以上より、本事業の「効率性」は高いと評価できる。

（3）今後の研究開発の方向性

本課題は「**継続**」、「中止」、「方向転換」する。

理由： 国際的にも次世代半導体への期待はますます高まっており、我が国が有する強みを活かして世界に先駆けて実用化、地球温暖化対策に貢献していくために必要である。理論・シミュレーションから高品質・大口径・低コストのGaN結晶基板の研究開発、要素プロセス開発から実際のデバイスの製造及び特性・構造解析、回路システムまで一体的かつ総合的に推進する産学官オールジャパン体制は、実用化に向けて有効であり、本事業の運営、知的財産等の研究成果の管理も実用化に向けて効率的に行われている。

よって、本事業は継続して実施すべきである。

（4）その他

なお、今後の研究開発の推進に当たり、以下の点に留意が必要である。

- ・ 本プロジェクトは社会実装を目指したものではあるが、そのための基礎・基盤研究開発を実施しており、その意味で成果としての論文数はプロジェクトの規模を考えるとかなり少ないと感じられる（2016年3報、2017年22報）。研究は順調に進んでいるため、特許出願を終えた成果から学術論文としての表出も今後更に期待。
- ・ 知的財産委員会は現在の知的財産のポートフォリオを確認し、2030年の実用化に向けた出口戦略・知的財産戦略を策定・更新し続けることが必要。
- ・ GaNコンソーシアム等も活用しながら、学が中心となって広く産業界での取組・ニーズに関する情報収集を行いながら産と産の連携関係を維持・発展させることでサプライチェーンの構築に貢献し、引き続き、実用化の加速に努めることが必要。
- ・ 関係府省との情報共有をこれまで以上に図るとともに、本事業終了後の成果の橋渡し等をマネジメントすることが必要。
- ・ 昨今の省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体の研究開発における国際競争の激化、技術寿命の短期化、将来の社会のあるべき姿も鑑みながら、半導体分野に関連するより先を見据えた研究開発に向けた戦略的な検討を本格化することが必要。