産学共創プラットフォーム 共同研究推進プログラム (OPERA)

終了報告書(公開版)

研究領域名称		超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤 としたエネルギーイノベーションの創出	
共創コンソーシアム名称		超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム	
幹事機関		国立大学法人京都大学	
プロジェクト担当組織		産官学連携本部	
	氏名	木本 恒暢	
△五1-31/公十工	所属機関	国立大学法人京都大学	
領域統括	部署	工学研究科	
	役職	教授	
コンソーシアム HP		https://www.opera.saci.kyoto-u.ac.jp/	

令和5年5月31日

目次

I	ク	゙゙ゼクラ	ティブサマリー
1		技術・	・システム革新シナリオ
2		研究领	頁域及びキーテクノロジー8
3		共創=	コンソーシアム9
	3.	1	産学共同研究における費用負担の適正化・管理業務の高度化 9
	3.	2 #	t創コンソーシアムにおける知的財産の取り扱いルールの方針10
	3.	3 <i>)</i>	、材育成についての方針
	3.	4 榜	幾関連携・協力体制についての方針13
	3.	5 参	§画機関の管理方針
4		オーフ	プンイノベーション機構と連携した取組について17
5			ジェクト終了後の継続的な発展に向けた取組について
6		研究開	見発の状況
	6.	1 码	开究開発課題1「SiC 結晶欠陥および MOS 界面欠陥の低減とモデル化」22
	6.	2 码	研究開発課題 2「革新的ワイドギャップ半導体デバイスの科学」
	6.	3 码	开究開発課題3「パワーデバイスの次世代システム応用」42
	6.	4 码	开究開発課題 4「システム化に向けたパワーモジュールおよび受動素子の開発」 67
	6.	5 码	开究開発課題 5「高信頼性パワーモジュール用基板の開発」85
	6.		开究開発課題 7「耐極限環境 SiC 複合材料開発」92
7			P領域からの展開(活動実績)100
8			ミ装に向けたロードマップ101
9		領域紛	Ŕ括によるプロジェクト総括と今後の展望102
10)	特別	集用語等の説明

エグゼクティブサマリー

<研究開発目標の達成状況及び研究開発成果の創出状況>

(1)研究開発目的

本 OPERA プログラムでは、参画機関が所有するキーテクノロジー(SiC パワー半導体、ワイドギャップ半導体を用いた超高感度センサ技術、電カパケット伝送、高電力密度パワーモジュール、SiC 複合材料の極限環境下での利用技術など)を最大限活用し、「エネルギー(主に電力であるが、電力に限定はしない)の利用を極限的に高効率化し、かつ新たな機能・付加価値を有するエネルギーネットワークが構築された社会(「超スマートエネルギー社会」)」の実現に資する基盤技術の確立を目的とした。また、コンソーシアムの構築を通じて、異分野の連携、若手研究者・技術者や学生の人材育成、対外的な情報発信にも注力した。

(2)技術・システム革新シナリオの実現に向けた主な活動

技術・システム革新のシナリオについては、研究戦略、知財戦略、人材育成、地方創生・共創の各部門のリーダーと領域統括で構成されるコアメンバー戦略会議で定期的に議論し、その具体的な研究開発内容、マイルストーン、知財管理、オープンイノベーション機構での共同研究(競争領域)への移行時期、将来の社会実装に向けた課題などを検討した。コロナ禍にも関わらず、各課題の研究開発は概ね順調に進行したため、当初に設定したシナリオを変更する必要はなかったが、評価委員の先生方のご意見を反映させるよう、数値目標や時期をより具体的に記したシナリオを各グループで策定した。特に、目標とする「超スマート社会」の定義を具体化したことに意義があると考えている。

(3) 特筆すべき研究開発成果と非競争領域からの展開

最終年度を迎え、各課題において優れた成果が得られたが、特に以下の成果は特筆すべきものと考えている。

- 1) 課題1において、SiCパワーMOSFETの高信頼化、高性能化、低コスト化を同時に達成できる複数の成果(世界最高、世界初)が得られた。
 - ・注入された少数キャリアを消滅させる再結合促進層の設計により、SiC 基板に劣化要因となる基底面転位が存在しても劣化を完全に抑制できる構造を実証した。
 - ・独自に提案する酸化抑制プロセスを SiC の無極性面に適用し、実用上重要な高濃度ドープされた p 型ボディ領域上 MOSFET で $130 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上という極めて高い(従来比 6 倍以上)チャネル移動度を達成した(図 S-1)。
 - ・独自構造を有する SiC の相補型 JFET (CJFET) を用いて精密なしきい値電圧制御に成功 し、この技術を用いて NAND ゲートを作製して 350℃での安定動作を実証した。
- 2) 課題3において、独自に提案するパワープロセッシングの実装を進め、従来のパワーエレクトロニクスの枠組みを越える世界初の成果を挙げた。
 - ・一定時間幅の電力パルスに電圧のみの情報タグを付加した信号で電力制御を行う電力パケット伝送技術を確立した。
 - ・この方式をスイッチトリラクタンスモータの駆動に適用することに成功すると共に、このシステムをゴルフカートに組み込んでキャンパス内の走行試験を実施した(図 S-2)。
- 3) 課題7においては、ガスタービン等の燃焼炉のエネルギー変換効率を大幅に向上するためには燃焼温度の向上が最も有効であることに着目し、燃焼炉の高温化を阻んでいる内壁材の限界に挑む研究を推進し、以下の成果を得た。

- ・従来用いられてきた耐熱合金(Ni 系合金)の限界温度(約1120°C)を大きく突破する 1400°Cにおいて安定に動作する BN 粒子分散 SiC 複合材料を開発することに成功した。 具体的には 1400°C、大気下で 10 万回の疲労試験をパスしており、世界最高の特性である。
- ・開発した独自の SiC 複合材料は中性子やイオン照射に対する耐性も優れており、軽水炉 や核融合を含む先進炉にも適用できる特性を有していることを明らかにした。

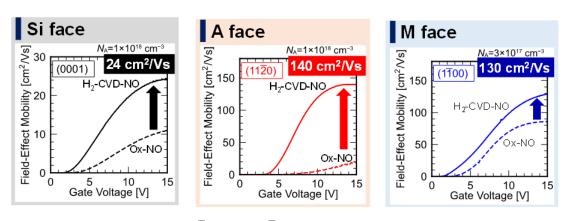


図 S-1 SiC(0001)(Si 面)、(1120)(A 面)、(1100)(M 面) 上に p 型 SiC を形成し、 この上に作製した n チャネル MOSFET のチャネル移動度のゲート電圧依存性

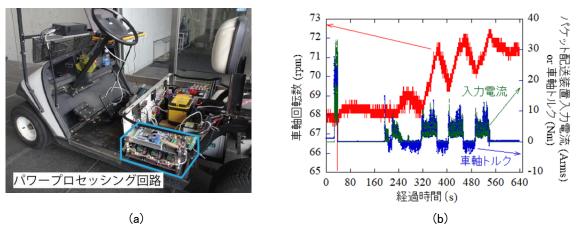


図 S-2 (a) 電カパケット伝送システムのカート駆動主回路への応用 (b)ゴルフカートによる電カパケット配送装置駆動方式 1 kW 級 PM-SRM の走行試験結果

<u><プラットフォームの形成状況></u>

(1) コンソーシアム運営の仕組みの構築

中長期的なビジョン・シナリオを策定し、コンソーシアム全体の基本方針を企画・立案するための最高意思決定機関として超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム協議会を設置し、その中でコアメンバーによる戦略会議を開催し、研究戦略部門、知財戦略部門、人材育成部門、地方創生・共創部門、オープンイノベーション機構との連携における、具体的な方針を策定し、特に民間企業からの事業化ニーズを積極的に収集し、幹事機関である京都大学において集中的にマネジメントをし、コンソーシアム内において革新的な技術シーズとのマッチングについて集中的に取組んだ。研究成果等に関しては、研究開発の効率的な進捗と社会実装に資することに主眼を置き、最適化された情報アクセスの基本方針を定め、オープン・クローズ戦略を徹底することにより、コンソーシアム全体として超スマート社会の実現を強力に推進することに注力した。

(2) 産学共同研究における費用負担の適正化・管理業務の高度化

産学共同研究における費用負担の適正化のため間接経費率の見直し(定率法による負担率を 10%⇒30%に引上げ)を行い、収入の使途を①本学における産官学連携活動の推進・充実 を図るための経費(知的財産権の管理や契約相談等の法務業務などに要する経費)、②戦略的経費として全学のインフラ整備のための経費(共用設備や電子ジャーナル、施設等維持管理などに要する経費)、③プロジェクト管理を高度化するための経費(プロジェクト管理に要する教職員人件費など)に分け、産官学連携本部、全学、部局において戦略的な運用を行うこととした。 また、上記に加えて、令和3年度より研究の「価値」の値付けが可能となる制度を制定し、大学の知の価値を共同研究費に含めて企業に負担していただく仕組みを開始しているところである。

(3) 知的財産の取扱

全ての参画機関との間で、ガイドラインに基づく知的財産の取扱いルールを含む「超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム合意書」を締結した。具体的には、プロジェクトの実施により得られた知的財産権(FIP)、プロジェクト開始前から保有していた知的財産権及びプロジェクト開始後にプロジェクトとは関係なく取得した知的財産権(BIP)、これらに関して規定を盛り込んだ。また、プロジェクトが本格始動した後には、この合意書で定めたガイドラインに基づく知的財産の取扱いルールを円滑に運用するため、実務的な運用、フロー等詳細を定めた「知的財産権管理マニュアル」を制定するとともに、迅速的確な実務の実行を図るため知財関係者名簿の作成を行った。この「知的財産管理マニュアル」では、OPERAにおける知的財産の取扱いルールの周知・徹底を図り、迅速的確かつ円滑な知財委員会の開催や決定がなされるとともに、OPERA知財事務局においてコンソーシアム全体の知的財産活動を統一的に把握可能な体制が構築できた。

(4)人材育成

産学連携を通じたイノベーション創出だけでなく、若手研究者(大学院学生、ポスドク、助教)をいわゆる「T字型人間」に育てる機会として人材育成に取り組んだ。70名を越える学生が本 OPERA プログラムに参画し、多くの博士後期課程学生をリサーチアシスタント (RA) として雇用することによって経済的な支援を行った。日本学術振興会の卓越大学院プログラムとの連携も積極的に進め、本 OPERA プログラムの知財部門リーダーによる「知財基礎と知財戦略」に関するセミナーを開催した。

民間企業との共同研究であっても、学生が中心的な寄与を行った成果発表に関しては、当該学生を筆頭著者として論文発表、学会発表を行う制度とすることによって、学生にインセンティブを与えた。この結果、学生を筆頭著者とする非常に多く(200 件程度)の論文や学会発表を行った。各分野で非常に高い評価を得た学生も多く、例えば、応用物理学会講演奨励賞3名、ECSCRM 2021 Best Presentation Award、2021 IEEE EDS Kansai Chapter of the Year Award、ICSCRM 2019 招待講演(学生による招待講演は異例)などの栄誉を得た(学生の受賞件数:36件)。参画した学生はアカデミア、公立研究所、多様な民間企業にバランスよく就職している。

(5) 今後のコンソーシアム活動の展望

本コンソーシアム形成を通じて取り組んだ諸規程の整備、クロスアポイントメント制度の活用促進、産学連携促進のための諸制度の整備(間接経費率の引き上げ、オープンイノベーション機構(OI機構)における産学連携インセンティブ制度など)、OI機構や京都大学の出資子会社(京大オリジナル(株)等)および学術研究展開センター(URA組織、KURA)との連携による産学連携の京大モデル構築はすでに大学内にノウハウも含めて定着化しており、今後もこれらを活用してコンソーシアムの継続を図る。

1 技術・システム革新シナリオ

本 OPERA プログラムでは、「エネルギー(主に電力であるが、電力に限定はしない)の利用を極限的に高効率化し、かつ新たな機能・付加価値を有するエネルギーネットワークが構築された社会(「超スマートエネルギー社会」)」の実現を目指すものである。本定義の範囲は広いが、参画機関が所有するキーテクノロジー(SiCパワー半導体、ワイドギャップ半導体を用いた超高感度センサ技術、電力パケット伝送、高電力密度パワーモジュール、SiC複合材料の極限環境下での利用技術など)を最大限活用し、それを発展させて上記の「超スマートエネルギー社会」の実現を目指した。

技術・システム革新のシナリオについては、研究戦略、知財戦略、人材育成、地方創生・共創の各部門のリーダーと領域統括で構成されるコアメンバー戦略会議で議論し、毎年の成果を考慮して見直しの可能性を検討した。多様なテーマに関して多くの機関が参画したが、「研究開発成果の概要」に示すように、全ての課題において概ね当初の計画通りに研究開発が進行し、ほぼ全てのマイルストーンを予定された時期に達成した。したがって、当初に策定したシナリオを変更する必要はなかった。一方で、評価委員の先生方のご意見を反映させるよう、数値目標や時期をより具体的に記したシナリオを各グループで策定した。特に、目標とする「超スマート社会」の定義を具体化したことに意義があると考えている。令和2,3年度は新型コロナウィルス感染危機が全世界中に広がり、実験研究時間の制約や研究開発に必要な設備・消耗品の納期遅れが発生したものの、予定通りの成果を挙げたのは特筆すべきことと考える。

また、0I 機構が推進する競争領域の研究開発プロジェクトとの連携も積極的に進めた。具体的には、OPERA プロジェクトで設定する非競争領域の研究開発課題から競争領域の産学連携スキームに発展させることを促進するために、OPERA 運営事務局と OI 機構担当者との情報共有を密に行い、OPERA の今後の研究開発方針を決定した。コンソーシアムの知財部門リーダーは OI 機構知財クリエイティブマネージャーを兼任し、知財戦略においても非競争領域から競争領域への発展を継続的に推進した。この結果、本 OPERA プログラムで得た成果と知財を基に OI 機構での研究開発プロジェクトに移行した例(SiC パワーMOSFET の高性能化)では、知財の取扱いに関する協議や契約を共同研究先の企業とスムーズに進めることができた。

2 研究領域及びキーテクノロジー

社会実装を目指す新たな価値 研究領域 研究領域名称 競争領域へと発展させるための目標: 超スマート社会実現のカギを握る ✓SiC結晶欠陥および酸化膜/SiC界面欠陥の挙 革新的半導体技術を基盤とした 動を学理的に解明することによりSiCパワー MOSFETの本格的普及と低コスト化を実現 エネルギーイノベーションの創出 ✓ワイドギャップ半導体中の特異な点欠陥の制 御を達成し、新奇の超高感度磁気センサの技 (領域統括:木本恒暢 京都大学 工学研究科 教授) 術基盤を構築 (研究開発課題) /低インダクタンスモジュール、リアクトルや コンデンサ等の受動部品の革新的材料・素子 <課題1>SiC結晶欠陥およびMOS界面欠陥の低減と を開発し、高密度電力変換システムの基盤を モデル化 ✓次世代パワー半導体の特性を活かした高密度 <大学等>京都大学 集積電力変換回路技術を確立し、Society5.0 <企 業>参画企業 の基盤技術となりうる統合的駆動(IoDF)技 術開発の端緒を拓く イ電力伝送のデジタル化・ネットワーク機能化 <課題2>草新的ワイドギャップ半導体デバイスの科学 技術を確立し、サイバー・フィジカル融合シ ステムの基盤構築を図る イ電カバケット化・ルーティングの基礎確立を <大学等>京都大学 図り、エネルギーの情報化技術開発を通じて、 <企 業>参画企業 超スマート電力配送に目途 <課題3>パワーデバイスの次世代システム応用 <キーテクノロジー1> SiCパワー半導体信頼性向上のための 設計技術 <大学等>京都大学、京都工芸繊維大学 <企 業>参画企業 <キーテクノロジー2> ワイドギャップ半導体を用いた超高感度 センサ技術 <課題4>システム化に向けたパワーデモジュールおよび <キーテクノロジー3> 受動素子の開発 高効率・大電力変換を可能とするパワー モジュール・受動素子技術 <大学等>大阪大学、信州大学 <企 業>参画企業 <キーテクノロジー4> パワー集積回路・パワープロセッシング技術と 次世代システム応用 <課題5>高信頼性パワーモジュール用基板の開発 <キーテクノロジー5> 電力パケット化・ルーティング技術 <大学等>京都市産業技術研究所 <企 業>参画企業 <キーテクノロジー 6> SiCの極限環境下での利用技術 <課題7>耐極限環境SiC複合材料開発 連携プログラム <大学等>京都大学 オープンイノベーション機構 <企 業>参画企業 卓越大学院プログラム

※課題 6 は欠番 (P20 参照)

3 共創コンソーシアム

3.1 産学共同研究における費用負担の適正化・管理業務の高度化

3.1.1 構築した仕組みの概要及び運用状況

本プログラムを通じて、「産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン」【追補版】に掲げられている、エビデンスに基づく「費用の見える化」を本学における 01 機構の設置と連動して、本コンソーシアムにおいても取組むこととしており、学生の RA 経費の確保など、共同研究の推進に必要となる経費を参画民間企業へ明示し、共同研究の推進に必要となる適切な費用負担を求めてきた。

また、2020 年度に間接経費の見直し(定率法による負担率を 1 0 % ⇒ 3 0 %に引上げ)を行い、収入の使途を①本学における産官学連携活動の推進・充実を図るための経費(知的財産権の管理や契約相談等の法務業務などに要する経費)、②戦略的経費として全学のインフラ整備のための経費(共用設備や電子ジャーナル、施設等維持管理などに要する経費)、③プロジェクト管理を高度化するための経費(プロジェクト管理に要する教職員人件費など)に分け、産官学連携本部、全学、部局において戦略的な運用を行っている。

さらに、「産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン」【追補版】への対応として、 京都大学では直接経費における人件費計上について、令和2年度に構築した研究の「価値」の 値付けが可能となる制度について運用を開始した。こちらは令和3年度に各部局での運用ルー ルが策定された。

3.1.2 得られた効果

これまで共同研究を実施するにあたって大学が負担していたプロジェクト・施設等維持管理費などの必要経費について、大学の知の価値付けと費用の適切な分担を行うことにより、本来必要となる経費を間接経費として適切に計上することが可能になった。これにより生じた新たな財源を戦略的に活用することにより、大学としての共通基盤の整備・充実やプロジェクトマネジメント人材の雇用を行うことで、大学としての研究力及び研究基盤の強化につながった。

3.1.3 今後の課題、プロジェクト終了後の運用方針

今後の課題としては、大学が有する「知」及び研究成果として創出された「知」、並びに必要となるコストに対して、その「価値」を値付けする手法を整理・確立し、それらを企業等に納得の上、受け入れていただくことを「当たり前」としていくことが今後の大きな課題である。それらの課題解決に向け、OI機構とも連携し、共同研究のプロジェクトマネジメントや組織対組織で連携する際の責任者と窓口の一元化・明確化、複層的なコミュニケーションと進捗管理などを徹底することで、本学と共同研究を実施することには大きなメリット(価値)が得られるといったグッドプラクティスを数多く創出することが重要である。

また、そのためには、中長期的な視点に立った大学の研究基盤(マネージャー体制や設備等のインフラなど)の充実が必要不可欠であり、間接経費率の引き上げによって得た新たな財源によって、「知」の創出基盤の強化を図っているところである。それらの投資により、新たな研究成果・特許の創出だけでなく、次世代研究者の輩出や社会への優秀な学生の輩出、企業とのクロスアポイントメント制度の活用による人材交流といった「知」と「人材」の好循環の実現を目指している。

3.2 共創コンソーシアムにおける知的財産の取り扱いルールの方針

3.2.1 構築した仕組みの概要及び運用状況

初年度は、全ての参画機関との間で、ガイドラインに基づく知的財産の取扱いルールを含む「超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム合意書」を締結した。具体的には、プロジェクトの実施により得られた知的財産権(以下、「FIP」という。)について、参画機関はプロジェクト研究目的で無償実施可能とすることや、プロジェクト開始前から保有していた知的財産権及びプロジェクト開始後にプロジェクトとは関係なく取得した知的財産権(以下、「BIP」という。)についても、第三者との共有知的財産権や第三者に独占的な実施権を設定している知的財産権その他合理的な理由が認められる場合を除き、参画機関はプロジェクト研究目的で実施可能とすること、FIPの共有権利者が参画機関を含む第三者への実施を認める場合、FIPの共有権利者は当該 FIP を自由かつ無償にて実施することができ、本学は FIP の共有権利者に不実施補償を求めないこと等を規定した。また、FIP の共有権利者が FIP の独占的な実施を希望した場合、所定の手続きを経た上で、当該 FIP の共有権利者に独占的な実施を認めること(当該 FIP の共有権利者の事業領域を考慮して当該事業領域における独占的実施とすることも含む)や、参画機関が事業化を目的として FIP の実施を希望した場合、当該 FIP の権利者は合理的な条件で実施許諾するよう努めること等、OPERA における非競争領域の研究から 0I 機構における競争領域の研究や事業化への発展を想定した規定も盛り込んだ。

また、プロジェクトが本格始動した翌年度には、この合意書で定めたガイドラインに基づく知的財産の取扱いルールを円滑に運用するため、実務的な運用、フロー等詳細を定めた「知的財産権管理マニュアル」を制定するとともに発明届、公表届といった様式の制定や、全ての参画機関間、とりわけ研究担当者及び知財担当者が緊密な情報交換、迅速的確な実務の実行を図るため知財関係者名簿の作成を行った。この「知的財産管理マニュアル」では、OPERAの目的/OPERA申請時の知的財産の取扱いルールの方針を再度全参画機関で確認するとともに、知財に着目した組織構成図、「超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム合意書」で合意した具体的な知的財産の取扱いルール、知財運営委員会やコンソーシアム協議会による審議・問題解決の方法、出願手続きのフローやバイドール法の適用、JSTへの報告など実務的な知的財産の取扱いの詳細について記載しており、これを全参画機関の研究担当者・知財担当者に対し個別に説明を行うことにより、OPERAにおける知的財産の取扱いルールの周知・徹底を図った。本年度は、幹事機関である京都大学のみならず、サテライト機関からも発明届、出願手続きがなされたが、これにより、迅速的確かつ円滑な知財委員会の開催や決定がなされるとともに、OPERA知財事務局においてコンソーシアム全体の知的財産活動を統一的に把握可能な体制が構築できた。

3.2.2 得られた効果

以上のとおり、プロジェクト初期の段階で OPERA の研究成果たる知的財産のルールから運用までを定め、プロジェクト参画機関に周知・徹底したため、プロジェクト終了間近の現在に至るまで、円滑に運営することができた。

3.2.3 今後の課題、プロジェクト終了後の運用方針

プロジェクト終了後は、自ずとプロジェクト参画機関とやり取りする機会や知財運営委員会の開催頻度が下がることが予想されるため、知財運営委員会での審議事項が生じた場合に現在のような円滑な運営が継続できるかどうかが課題となる。また、既に非競争領域から競争領域に移行したテーマもある中で、その基礎となった OPERA の研究成果知的財産権の維持や円滑なライセンスも今後の課題となることが予想される。

知財運営委員会の円滑な運営については、知財関係者名簿をプロジェクト終了後も定期的に 更新し、随時連絡が取れる体制を継続していくことでプロジェクト終了後も円滑に運営してい く体制を維持する。

また、その基礎となった OPERA の研究成果知的財産権の維持については、今後指定国移行など海外も含めた各国での権利化を予定していることから維持費用が膨大となるが、競争領域へ移行した参画企業が将来的にその実施を希望する場合には、当該参画企業にその予約権という形でライセンスオプションを設定し、重要な知的財産権を継続して維持する体制を整える予定である。参画企業との対話を継続し、予めライセンスを想定した体制を整えることで将来の円滑なライセンスも可能となるものと思われる。

3.3 人材育成についての方針

3.3.1 構築した仕組みの概要及び運用状況

本 OPERA プログラムでは、産学連携を通じたイノベーション創出だけでなく、若手研究者(大学院学生、ポスドク、助教)をいわゆる「T 字型人間」に育てる機会として人材育成に取り組んだ。別表(P22)に示すように、70 名を越える学生が本 OPERA プログラムに参画した。産学連携(共同研究)に基づく企業での短期研究を、その期間と内容に応じて ORT 科目として単位化する制度が設けられている他、特に博士後期課程の学生に対しては、本プログラム補助金あるいは民間企業からの研究経費を基にリサーチアシスタント(RA)として雇用することによって経済的な支援を行った。この際、当該学生のエフォートを適切に管理し、学生が本務の研究課題に十分なエフォートを割けるようにしている。民間企業との共同研究であっても、学生が中心的な寄与を行った成果発表に関しては、当該学生を筆頭著者として論文発表、学会発表を行う制度とすることによって、学生にインセンティブを与えた。また、機密情報の管理は各研究担当者レベル、知財管理は知財管理部門を中心に行ったが、発明に参画学生が寄与した場合は、学生を発明者に含めて特許を出願することも学生にとってインセンティブになったと考えられる。

京都大学および大阪大学では日本学術振興会の卓越大学院プログラム(7年間)が平成30年度に採択されており、優秀な学生を国内外から集めて修士・博士一貫教育プログラムを推進している(特に京都大学の卓越大学院は、実質的な責任者を本 OPERA 領域統括の木本が務めている)。京都大学の卓越大学院プログラムでは、SiCパワーデバイス等の先端デバイスを中核として、基礎物理からシステム応用までを学ぶ機会を学生に提供し、高い専門性・独創性に加えて俯瞰力を身に着けさせる。さらに、我が国を代表する国公立研究所(NIMS、QST、産総研など)、東証上場民間企業、海外有力大学と人材育成で連携し、挑戦力や国際性を身に着けさせ、多く

の履修者、修了者を輩出した。このように、当該卓越大学院プログラムは、本 OPERA プログラムとスコープ、研究教育内容、連携企業が非常によく整合しており、「卓越大学院プログラム」での様々な教育施策、企業との連携企画との相乗効果により、本 OPERA プログラムを加速した。一例として、「本 OPERA プログラム」と「卓越大学院」の連携イベントとして、本 OPERA プログラムにおいて知財部門リーダーを務める中川氏によるセミナー「知財基礎と知財戦略」を開催し、多くの学生が知財の基礎を学んだ。また、本 OPERA プログラムに参画する大学では、企業からの社会人博士を積極的に受け入れ、企業の若手技術者に学理研究や最先端研究を遂行する能力を養成するよう努力している。

3.3.2 得られた効果

企業との共同研究に従事した学生には知財の管理に注意しながら積極的に学会発表や論文投稿を行うよう配慮した結果、学生が筆頭著者となる非常に多く(数十件以上)の論文や学会発表を行うことができた。各分野で非常に高い評価を得た学生も多い。例えば、応用物理学会講演奨励賞(約1500件の講演の内、上位1%にのみ授与)3名、ECSCRM 2021 Best Presentation Award(約300件の発表論文の内、非学生も含めてトップ1件に授与)、2021 IEEE EDS Kansai Chapter of the Year Award(2021年に発表された半導体デバイスに関する全ての発表論文約200件(西日本に在籍する非学生を含む著者)の内、トップ1件に授与)、ICSCRM 2019 招待講演(参加者約1200名、発表論文約350件の中で招待講演は15件、学生による招待講演は本件のみ)などの栄誉を得た。学生の寄与が大きいため、プレス発表の記者会見に学生が同席した例も多い。

また、企業との共同研究に従事した学生の就職についても、当該企業に束縛されることなく、 学生の意思で就職先(志望企業など)を決定できるよう十分に配慮した。修了した学生の進路 は、京都大学、大阪大学、東京工業大学、京都工芸繊維大学、産総研、電力中央研究所、東証上 場民間企業等、多方面に渡り、本 OPERA プログラム参画企業に偏る状況は、一切生じていない。

3.3.3 今後の課題、プロジェクト終了後の運用方針

本 OPERA プログラムを通じた人材育成は順調に進んだが、今後の課題は大学院生 (特に博士後期課程学生)の継続的な経済的支援である。OPERA 事業終了後も、当面は卓越大学院プログラムや研究科が実施する RA 雇用により経済的支援を継続する予定である。さらに将来においては、外部資金の間接経費や民間企業との共同研究経費を活用する予定である。

〇参画学生等の状況リスト

•OPERA 全実施期間の参画学生総数:75名

• 進路状況内訳

進学 :13名
 就職(アカデミア) : 9名
 就職(OPERA の参画企業) : 4名
 就職(その他) :49名

3.4 機関連携・協力体制についての方針

3.4.1 構築した仕組みの概要及び運用状況

京都大学においては、平成 27 年 (2015 年) 3 月に定めたクロスアポイントメントに関する規程「国立大学法人京都大学教職員のクロスアポイントメントの実施に関する規程」に基づき、本コンソーシアムにおける共同研究ならびに 0I 機構における競争領域の産学共同研究をさらに加速化させるため、舟木教授(大阪大学)について京都大学・大阪大学間におけるクロスアポイントメント契約を締結した(令和元年 6 月より実施)。さらに、同様のクロスアポイントメントを活用した研究開発の加速ならびに 0I 機構を軸とする組織横断的なチームによる産学連携推進のために、令和 2 年 7 月より、同機構において研究者の産学連携に対するモチベーションを高めるための「産学連携特別手当」の支給、また、定年後も学内で共同研究を実施できる環境を確保するための「定年制適用除外」を導入した。

コンソーシアムにおける研究開発の加速のため、京都大学が保有する最先端機器の共用システムである「京都大学ナノテクノロジーハブ拠点」を活用した。同拠点については、京都大学学際融合教育研究推進センター内に設置しているナノテクノロジーハブ拠点ユニットが、吉田キャンパスと桂キャンパスの微細加工装置群と宇治キャンパスの微細構造解析用電子顕微鏡群を一体的に運用している。この 90 余種類の最新鋭のマイクロ/ナノの微細加工・評価装置について、参画企業に対して利用を促し、その活用が進んだ。また、京都大学全体としてもそれらの取り組みと並行して、中長期的な設備整備計画(設備マスタープラン)に基づき設備サポート拠点構想を推進し、これまでに学内で 5 つの機器共用拠点を整備した。

実験スペースについては、京都大学国際科学イノベーション棟内にオープンスペースを確保 するとともに、企業との連携の利便性を考慮し、京都市内の京都リサーチパーク内にも連携オ フィスを確保し活用した。

本コンソーシアムでは地域との連携強化も主たる目的の一つとしてきた。大学における学理探求の結果生まれた成果を実用化につなげる段階でキーとなる、ベンチャー志向の中小企業とコンソーシアムとの連携を促進するために、京都市と協力し、本コンソーシアム領域を事業範囲とする企業に対して支援する補助事業「革新的パワーエレクトロニクス実装・事業化推進事業補助金」が令和元年度に立ち上がり、中小企業との連携推進の取り組みを継続している。本補助金の周知に本コンソーシアムが協力するとともに、採択された事業者に対して、コンソーシアム参画教員が京都市のコーディネーターと協力して技術的アドバイスを実施することにより、本コンソーシアム技術の社会実装の加速を図った。

3.4.2 得られた効果

参画する大阪大学の研究者の京都大学とのクロスアポイントメントにより、平成 27 年 10 月に京都リサーチパーク内に設置した民間企業の R&D センターと共同研究を展開したのみでなく、京都大学と同社との連携を図った。また、本コンソーシアム参画教員が京都大学の産官学連携推進特区である 0I 機構に移籍し、継続して共同研究を実施することにより、「産学連携特別手当」や「定年制適用除外」の対象となり、研究者に対するインセンティブ強化につながった。他方、本コンソーシアムは京都市の支援も受けて進めており、特に上記の「革新的パワーエレクトロニクス実装・事業化推進事業補助金」については、2019~2022 年にかけて 8 社を採択し、本コン

ソーシアムとの協働や参画も見据えて、コンソーシアム参画研究者による研究開発指導・協力を 行っており、ネットワークの拡大が図られた。なお、当初予定していた、当該事業採択企業を含む連絡会(シンポジウム)については、新型コロナ禍の影響により中止となった。

3.4.3 今後の課題、プロジェクト終了後の運用方針

上述のとおり、京都大学では、設備共用を全学的に促進するために、中長期的な設備整備計画(設備マスタープラン)に基づき設備サポート拠点構想を継続して推進した。本コンソーシアムが活用を進めたナノテクノロジーハブ拠点を含む「本部構内設備サポート拠点(MaCBES)」のほか、「医学研究支援センター(iSAL)」、「宇治地区設備サポート拠点」、「"桂結"ー最先端研究機器の進化するネットワーク拠点」、「北部キャンパス機器分析拠点」の5拠点を核として、機器の共用システムの運用を今後も大学として継続していく。

「産学連携特別手当」、「定年制適用除外」等の産官学連携推進の仕組みについては既に 01 機構内で制度化しており、本コンソーシアム以外での活用を今後も大学として推進していく。

京都市との連携で開始した「革新的パワーエレクトロニクス実装・事業化推進事業補助金」については、現時点で今後の継続は未定であるが、京都大学桂キャンパスの桂イノベーションプラザ内に京都市との協働オフィス(京都高度技術研究所・京都市桂イノベーションセンター)を設けており、本コンソーシアムとの連携に限らず、京都大学の研究開発シーズの社会実装に向けて今後も定常的に京都市との連携を継続していく。

3.5 参画機関の管理方針

3.5.1 構築した仕組みの概要及び運用状況

コンソーシアムへの新規参画や中途脱退等の全体運営方針に関してはコアメンバー戦略会議 が検討し、その素案を元にコンソーシアム協議会で、全体方針および加入・脱退等の個別方針 を決定した。本コンソーシアムへの参画機関を拡大・維持するために、産官学連携本部と URA 組 織の学術研究支援室(KURA)が学内や企業の研究者をマッチングし、出資子会社の京大オリジ ナル株式会社が関連技術のアウトリーチ活動を担う体制を構築、関連分野の企業へのプロモー ション活動を進めた。特にイベントを介したコンソーシアム活動のアウトリーチについては、 「超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム」 公開キックオフシンポジウム (2019年2月14日)、日本化学会 第99春季年会(2019)(2019年3月16日~19日)、京都大 学インダストリアルデイ 2019②~最先端化学の産業応用~ (2019 年 8 月 29 日) において URA が中心となって OI 機構とも連携してコンソーシアムの紹介を行うとともに、同じく出展してい た企業との連携を深めた。成果公開シンポジウム等のイベントについては、2019 年度~2020 年 度イベントは新型コロナ禍の影響で中止または延期したが、2020年度(2022年3月22日開催)、 2021 年度 (2021 年 3 月 22 日開催) はオンラインで開催するとともに、研究成果のプレスリリー スを行うなど、成果の社会発信に努め、参画機関の拡大を図った。また、OPERA としては最終年 度となる報告会を2023年3月1日に開催し、5年間の総括を行うとともに、今後の展開につい てもビジョンを紹介した。

また上述のとおり、本コンソーシアム独自の取組として、地域の中小企業のコンソーシアムへの将来的な貢献を期待して、新規事業「革新的パワーエレクトロニクス実装・事業化推進事業補助金」(2019 年度~)を本コンソーシアムとの連携の下で京都市が立上げた。当該事業で採択された企業については、コンソーシアムの研究開発領域を含むパワーエレクトロニクス分野の研究開発に助成金を提供するとともに、京都市のコーディネーターの支援の下、コンソーシアム参画研究者による指導を受けられる等のインセンティブを受けられるよう設計した。

3.5.2 得られた効果

上記の活動の結果、本事業開始時に参画の民間 9 企業については、2020 年 4 月までに企業の事業方針変更等のため 3 社が脱退したものの、新たに 6 社が追加参画することとなり、コンソーシアム活動がさらに発展した。

また、京都市事業「革新的パワーエレクトロニクス実装・事業化推進事業補助金」については、2019 度~2022 年度の 4 年間で合わせて 8 件が採択され、それらの採択中小企業に対しては、コンソーシアムの参画研究者および京都市の産学連携コーディネーターが協力して、研究開発支援を行うことによりコンソーシアムとの連携が図られた。

3.5.3 今後の課題、プロジェクト終了後の運用方針

コンソーシアムへの新規参画、脱退については、それぞれの企業の事業方針に左右されることが大きく、特に新型コロナ禍の影響により、企業の継続的な参画を求めることが容易ではなかった。但し、共同研究の競争領域への移行を予め想定したコンソーシアム規程設計を行って

いたため、特に大きな問題等は生じなかったことから、プロジェクト終了後も引き続き同じ規程に基づく管理を行う方針である。

4 オープンイノベーション機構と連携した取組について

4.1.1 仕組みの構築における連携、支援の状況

- ・超スマートエネルギー社会基盤技術共創会議 R3年度の成果報告会において、京都大学のオープンイノベ―ション機構の概要と状況について、統括クリエィティブマネージャーより説明頂いた。
- ・コアメンバー戦略会議 オープンイノベ―ション機構の担当のクリエィティブマネージャーが同席し、情報の共有化 を計った。
- ・オープンイノベーション機構連携会議 オープンイノベーション機構の担当のクリエィティブマネージャー、OPERA側の事務局 が案件毎に随時打ち合わせを行っているが、重要な節目には統括クリエィティブマネージャー と領域統括も出席し、打ち合わせを行った。

4.1.2 連携、支援の効果

オープンイノベーション機構側のクリエィティブマネージャーと緊密に連携を行い、参画企業側のニーズに関して常に検討を行い、具体的な方向性が見えた際には研究課題代表を交えて方針を決定し、オープンイノベーション機構への移行を展開した。(OPERA に参画の 4 社がオープンイノベーション機構へ円滑に移行し、更に 1 社も移行する予定である)

4.1.3 今後の課題と対応方針

OPERA に参画で未だ競争領域への展開を表明していない企業もあり、企業と研究課題代表へのヒアリングを行い、引き続き円滑な移行を目指して活動していく。

5 プロジェクト終了後の継続的な発展に向けた取組について

前節 4 で述べたように、0I 機構との連携に関する枠組みは確立しており、すでに 2 社に対しては一部プロジェクトの 0I 機構へ移行した。プロジェクト終了後も 0I 機構と連携して、各技術シーズの研究開発の競争領域への移行と社会実装を図っていくが、コンソーシアムは引き続き非競争領域におけるオープンイノベーションと次世代技術創発の場として、外部資金の獲得も一部交えながら発展、自立化することを視野に入れている。

本プロジェクト開始時から構想していたオープンイノベーションの京大モデルの構築については、指定国立大学に指定された京都大学の取り組みとして、産官学連携本部、0I機構のみならず、京都大学の出資子会社である京大オリジナル株式会社、株式会社 TLO 京都、京都大学イノベーションキャピタル株式会社が中心となって推進してきており、今後もさらに機能強化を図る。具体的には、2022 年 10 月に、URA 組織である学術研究支援室を学術研究展開センター(KURA)として再編し、URA のネットワークを通じた大学内の研究開発シーズの橋渡し機能を一層強化した。

また、本プロジェクトの運営ノウハウは既に JST 共創の場形成支援プログラム (COI-NEXT) の採択拠点運営においても活かしており、産官学連携本部内に「共創支援チーム」を組織して、情報やノウハウの共有を図ってきた。今後もこの体制を維持しつつ、オープンイノベーションを促進する。

6 研究開発の状況

〇研究開発費(委託研究費及び民間資金)の推移

[単位:千円]

		2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
委託研	調査推進費*	10, 000	10, 000	10, 000	10, 000	10, 000
究費	研究開発費	89, 963	80, 000	89, 277	78, 714	60, 084
民間	共同研究費等(a)	90, 130	86, 990	89, 277	78, 714	60, 084
資 金	リソース提供計(b)	2, 000	1, 250	0	0	0
	民間資金総額 (X)=(a)+(b)	92, 130	88, 240	89, 277	78, 714	60, 084

〇研究開発課題一覧

① 研究開発課題 1-1:SiC における拡張欠陥起因の素子特性劣化抑制

(京都大学、参画企業3社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

② 研究開発課題 1-2:酸化膜/SiC 界面欠陥の低減、MOSFET 特性向上およびモデル化

(京都大学、参画企業:4社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

③ 研究開発課題 1-3: SiC を用いた超高温集積回路に関する基礎研究開発

(京都大学、参画企業1社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

④ 研究開発課題 2 : ワイドギャップ半導体を用いた高感度センサ研究開発

(京都大学、参画企業1社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

⑤ 研究開発課題 3-1:ワイドギャップ半導体パワーデバイスモデルの開発

(京都大学、奈良先端科学技術大学院大学(~R4年2月)、京都工芸繊維大学

(R4年3月~)、参画企業2社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

⑥ 研究開発課題 3-2:高周波スイッチング技術とその回路実装

(京都大学、参画企業2社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

⑦ 研究開発課題 3-3:パワープロセッシングによるモータ駆動

(京都大学、参画企業1社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

⑧ 研究開発課題 3-4:電力パケットによるベストエフォート型電力配送に関する研究開発 (京都大学)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

※旧研究開発課題 6-1 (R2 年度より研究開発課題 3 へ編入)

⑨ 研究開発課題 4-1: 高電力密度パワーモジュールの開発

(大阪大学、参画企業:2社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

⑩ 研究開発課題 4-2:100kHz~数 MHz 帯メタルコンポジット鉄心の開発

(信州大学、参画企業1社)

(実施期間: R1年7月~R5年3月)

⑪ 研究開発課題 4-3:磁性デバイスの巻線交流抵抗低減のための磁束経路制御技術の開発

(信州大学、参画企業2社)

(実施期間: R1年7月~R5年3月)

① 研究開発課題 4-4:パワーエレクトロニクス励磁下の磁性材料特性に関する研究開発

(富山県立大学)

(実施期間: H30年11月~R2年3月)

③ 研究開発課題 4-5:高電圧、高効率トランスの開発

(大阪大学、参画企業1社)

(実施期間: R1年7月~R3年3月)

(4) 研究開発課題 5 : 高信頼性パワーモジュール用基板の開発

(京都市産業技術研究所、参画企業2社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

⑤ 研究開発課題 6-2:クラウド型エネルギーマネジメントシステムによる地域モデル構築に

関する研究開発

(京都大学、参画企業1社)

(実施期間: H30年11月~R2年3月)

(f) 研究開発課題 7-1: 材料特性評価を通じた極限環境下での材料挙動の理解

(京都大学、参画企業1社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

① 研究開発課題 7-2: 放射線環境下での適用可能な材料の開発

(京都大学、参画企業1社)

(実施期間: H30年11月~R5年3月)

6.1 研究開発課題 1「SiC 結晶欠陥および MOS 界面欠陥の低減とモデル 化」

キーテクノロジー	キーテクノロジー1:SiCパワー半導体信頼性向上のための設計技術
課題代表者	木本 恒暢
	京都大学 工学研究科 教授
実施期間	平成 30 年 10 月~令和 5 年 3 月
共同研究機関	京都大学、参画企業 4 社

6.1.1 マイルストーンと達成状況

課題	MS		
番号	番号	マイルストーン内容 	達成状況
課題	MS	SiCウェハに存在する基底面転位・積	(目標達成度 100%)
1–1	1-1-1	層欠陥の熱平衡状態における挙動を、	積層欠陥に捕獲される電子および正
		│欠陥の自由エネルギーに着目して説 │明する物理モデルを構築する。 ドーピ	孔のエネルギーを考慮した熱平衡状
		切りる物壁モナルを構架りる。トーピーング密度 10 ¹⁴ ~10 ¹⁹ cm ⁻³ 、室温~1800°C	態における積層欠陥の挙動を説明す
		の範囲で明らかにして、SiCウェハに	る物理モデルを構築した。ドーピング
		おける基底面転位、積層欠陥の挙動を	密度および温度(少なくとも室温~
		実験的、理論的に明らかにする。	1800℃) によらず、熱平衡状態では積
			層欠陥は縮小するという理論予測を
			得た。SiC 試料を様々な温度で熱処理
			し、いずれの条件でも積層欠陥は縮小
			するという理論予測と一致する実験
			結果を得た。
	MS	SiCウェハに存在する基底面転位・積	(目標達成度 100%以上)
	1-1-2	層欠陥の過剰キャリア注入状態 (デバ	過剰キャリア注入時の積層欠陥近傍
		イス動作時)における挙動を、欠陥の	のキャリア再結合を考慮した物理モ
		自由エネルギーに着目して説明する	デルを構築し、積層欠陥の拡大が生じ
		物理モデルを構築する。過剰キャリア	る臨界条件を計算した。次に、様々な
		密度 10 ¹⁴ ~10 ¹⁷ cm ⁻³ 、室温~300°Cの範	構造を有する SiC pn ダイオードを作
		囲で明らかにして、SiC デバイスのバ	製し、積層欠陥が拡大する臨界キャリ
		イポーラ動作時における基底面転位、 積層欠陥の挙動を実験的、理論的に明	ア密度を求めたところ、概ね理論予測 と一致する結果を得た。さらに、この
		検信欠陥の学期を美駅的、理論的に明	と一致する結果を特だ。さらに、この 知見を基に、過剰キャリアが下地 SiC
		5 M1	基板に到達することを防ぐ構造を提
			案し、実用上十分に高い 800 A/cm2 の
			電流密度で通電しても全く劣化しな
			いことを実証した。
課題	MS	└ │独自の高温熱処理プロセスにより、	(目標達成度 100%以上)
1-2	1-2-1	ゲート酸化膜/SiC 界面における伝導	SiCの熱酸化による欠陥生成機構を原
		帯近傍の界面準位密度を1x10 ¹² cm ⁻² eV	点に立ち戻って解析・考察し、独自の
		以下に低減する。価電子帯近傍の界	酸化抑制プロセスを提案した。独自プ
		面準位密度についても従来方法に比	ロセスを活用することによって、バン
		べて 1/2 以下に低減する。さらに、こ	
	l	7 32111 12377 00 0 01-1	

П		AV1-2-1-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2	12世に位の日子先は古さものより。
		の独自プロセスを用いて n チャネル	ド端近傍の界面準位密度を従来法の
		MOSFET を作製し、界面不安定性をもた	約 1/3 以下に低減することに成功し
		らす窒化やリン原子を導入すること	た。さらに、酸化膜の絶縁性、しきい
		なく 30cm ² /Vs 以上のチャネル移動度	│値電圧の安定性を維持しながら、SiC│
		を達成する。	MOSFET の特性を支配するチャネル移
			動度を(0001)面で 90 cm2/Vs、トレン
			チ MOSFET で重要な(11-20)および(1-
			100)面では130 cm2/Vs 以上という目
			標を大きく上回る高い移動度を達成
			した。
	MS	SiC MOSFET の反転層内のキャリアの	(目標達成度 100%)
	1-2-2	真の移動度の実効電界強度依存性や	様々なドーピング密度を有するp型ボ
		温度依存性を明らかにし、界面準位密	ディ上に作製した SiC MOSFET の Hall
		度分布が与えられればゲート電圧0~	効果測定をゲート電圧と温度を変化
		20V、室温~300℃の範囲で MOSFET の	させながら実施し、SiC MOSFET のフォ
		ゲート特性を予測できる物理モデル	ノン制限移動度を決定した。界面準位
		を確立する。また、MOSFET の p ボディ	への電子捕獲およびその電荷が移動
		領域のドーピング密度を10 ¹⁵ ~10 ¹⁸ cm	度に与える影響を定量化することに
		³ の範囲で変化させたデバイスの特性	より、SiC MOSFET 特性を精度よく計算
		も予測できるようにする。	できるモデルを構築した。
課題	MS	半絶縁性 SiC ウェハあるいは高純度	(目標達成度 90%)
1–3	1-3-1	SiCエピタキシャルウェハへのイオン	SiC 相補型 JFET (CJFET) を提案し、NOT
		注入により作製した独自構造のノー	ゲート、NANDゲート等の基本回路の高
		マリオフ型 JFET(n チャネル、p チャ	温 (350~400℃) 動作を実証した。ま
		ネル)を組み合わせることで、消費電	一た、デバイスシミュレーション結果と
		カの小さい相補型 JFET (CJFET)を実現	実測値の整合に加え、SPICE による回
		する (2V 動作)。この SiC CJFET で	路シミュレーション結果が実験結果
		500℃以上の高温動作を実証する。	と良い一致を示すなど、デバイスおよ
		300 0以工の同温到下で天証する。	び回路のデザイナビリティ(高度な設
			計性) を示すことができた。
-	MS	作制!たらiC C IEET の言泪特性(500°C	(目標達成度 90%)
		作製した SiC CJFET の高温特性(500℃	
	1-3-2	以上)の限界を見極めると共に、この	作製した SiC CJFET の高温特性を調
		SiC CJFET に電子線、ガンマ線等を照	べ、400°C以上の高温では電極の信頼
		射して耐放射線特性(照射時の劣化特	性と寄生 pn 接合部の漏れ電流が課題
		性)を調べ、Si素子に対する3倍以上	であることを見極め、これらを解決する。
		の優位性を実証する。また、照射による。	る電極材料およびデバイス構造に目
		る劣化の起源を物理的に明らかにす	途を立てた。さらに、SiC素子に電子
		る。	線照射を行った場合に生成される欠
			陥の種類とその影響を定量的に調べ、
			Si 素子に対して 3~5 倍の耐久性を有
			することを示した。

6.1.2 最終目標に対する成果の詳細

課題 1-1

1) SiC におけるショックレー型積層欠陥拡大の臨界条件

SiC は積層欠陥の形成エネルギーが比較的低いため、少数キャリア注入によって生じる電子正孔の再結合が結晶内の基底面転位近傍で生じると、この基底面転位を核として積層欠陥の拡大が生じ、SiC デバイス特性を劣化させる(基底面転位が存在してもキャリア再結合がなければ積層欠陥は生じない)。前年度までの研究により、過剰キャリアが少ないときには積層欠陥の縮小が起こり(特性劣化なし)、過剰キャリア密度が、ある臨界値を越えると積層欠陥の拡大が生じる(特性劣化あり)ことを明らかにした。そこで、この積層欠陥の拡大/縮小を支配する臨界値(臨界過剰キャリア密度)を決定することの重要性に着目し、実験および理論計算により臨界過剰キャリア密度を決定した(実験と理論計算結果はよく一致)。求めた臨界過剰キャリア密度は室温で約4-5x10¹⁴ cm⁻³であり、450K の高温では約3x10¹⁵ cm⁻³に増大することがわかった(図1-1)。高温になるほど臨界過剰キャリア密度が増加するのは、積層欠陥に捕獲された電子が熱エネルギーによって伝導帯に放出される割合が増え、積層欠陥の電子的エネルギー利得が小さくなるからであると解釈できる。

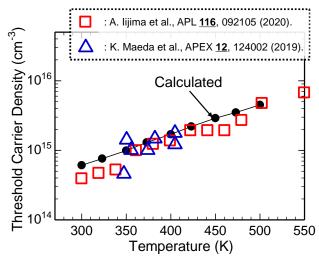


図 1-1 積層欠陥の拡大が生じる臨界過剰キャリア密度の温度依存性

2) 積層欠陥拡大を抑制し、高い信頼性を確保するデバイス構造(再結合促進層)の提案

市販されている SiC ウェハ(基板) 中には、約 500-1000 cm² の密度で基底面転位が存在している。しかしながら、SiC エピタキシャル成長技術の進展により、SiC ウェハ内に存在する基底面転位をほぼ 100% (> 99.99%) の割合で貫通刃状転位に変換できることがわかり、最近の SiC エピタキシャルウェハでは、表面のエピ成長層には基底面転位はほとんど存在しない(基底面転位密度 < 0.02 cm²)。つまり、最適化されたプロセスで作製された SiC デバイスでは、基本的に活性層(エピ成長層)中に基底面転位は存在しないため、積層欠陥の拡大も生じない。しかしながら、デバイスをバイポーラモード(少数キャリア注入)で高電流密度動作を行うと、下地の SiC ウェハ内にまで一部の過剰キャリアが拡散・到達し、ウェハ(基板)内で電子-正孔の再結合が生じる。この際、上述のように SiC ウェハ(基板)内には、基底面転位が約 500-1000 cm² の密度で存在するので、一部の基底面転位を核として積層欠陥が拡大し、デバイス劣化をもたらす。

そこで、本グループでは、高濃度 n 型 SiC 基板と低濃度 n 型 SiC エピ成長層(活性層)の間にキャリア寿命の短い高濃度 n 型 SiC エピ成長層(「再結合促進層」)を挿入することを提案している(図 1-2)。簡単のため pin 構造で比較すると、図 1-2(b) に示すようにキャリア寿命の短い再結合促進層を導入することにより、上部 p 型領域から注入、拡散した正孔のほとんど全てを再結合促進層内部で消滅させることができる。基底面転位が存在するのは、実質的に再結合促進層の下にある SiC 基板領域のみである(再結合促進層内には基底面転位は存在しない)。したがって、この再結合促進層を適切に設計すれば、SiC 基板に到達する正孔密度を上記 1) で決定した「臨界過剰キャリア密度」未満に抑えることができ、その結果、当該劣化現象を完全に抑制可能である。

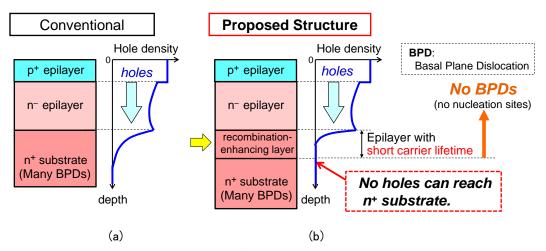


図 1-2 通電劣化現象を抑制するデバイス構造の模式図と通電時の正孔密度分布

3) 高い信頼性を確保するデバイス構造(再結合促進層)の設計と実証

上記 2) で述べた再結合促進層はキャリア寿命が短く、この層に送達した少数キャリアが短時間で消滅する必要がある。デバイス特性に影響を与えることなく、また SiC デバイス量産プロセスを大きく変えることなくキャリア寿命を短くする最も有効な方法は、高濃度窒素 (N) ドーピングである。高濃度ドープされた n 型成長層では、バンド間の直接再結合やオージェ (Auger) 再結合が活発になって全キャリア寿命を $0.1~\mu s$ 以下にすることができる。実際に N ドーピングの密度を広い範囲で変化させて成長した厚膜 n 型 SiC エピ成長層で実測したキャリア寿命の N ドナー密度依存性を図 1-3 に示す。同図中の破線、点線は計算により求めた様々な再結合寿命であり、これらを考慮した総合的なキャリア寿命を実線で描いている。理論計算により求めたキャリア寿命は、実測値をよく再現しており、これを用いれば任意のドーピング密度におけるキャリア寿命を評価することが可能となる。

そこで、SiC pin ダイオードの順バイアス状態における通電を考え、半導体内のキャリア拡散・ドリフトモデルを用いてダイオード内のキャリア密度分布を計算した。特に、様々な厚さとドーピング密度を有する再結合促進層を導入した場合について正孔密度を求め、下地の SiC 基板に到達する正孔密度を導出した。次に、電流密度を広い範囲で変化させ、SiC 基板に到達する正孔密度が上記の臨界過剰キャリア密度に達しない(劣化が起こらない)条件を決定した。図 1-4に pin ダイオードの i 層下部(低濃度 n 型層/再結合促進層界面近傍)における正孔密度(ダイオードの電流密度に相当)を変化させたとき、デバイス劣化を抑制するのに必要な最小の再結合促進層厚さを求めた結果を示す。同図では3種類の異なるドーピング密度を有する再結合促進層に対する結果を示している。同図から、再結合促進層のドーピング密度を 2~5×10¹⁸ cm⁻³に設定し、2~5 μm の厚さとすれば、かなり高い過剰正孔密度(3~5×10¹⁷ cm⁻³: 数 100 A/cm²

以上の高い電流密度)で通電しても劣化が生じないと予測される。

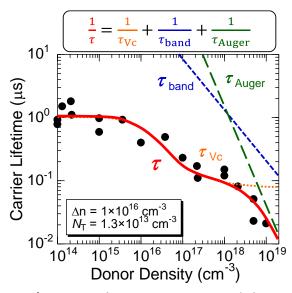


図 1-3 SiC エピタキシャル成長層におけるキャリア寿命の Nドナー密度依存性

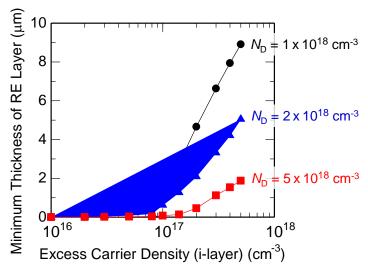


図 1-4 デバイス劣化を抑制するのに必要な最小の再結合促進層厚さの過剰キャリア密度依存性

最後に、実際に様々な厚さとドーピング密度を有する再結合促進層を導入した SiC pin ダイオードを作製し、高電流密度で通電して劣化特性を調べた。劣化の度合いは、通電試験の前後で順方向特性を測定し、電流密度 100 A/cm² 時のオン電圧の変化量(ΔV_F)で評価した。実際の通電劣化特性の例を図 1-5 に示す。同図(a)は再結合促進層なしの場合であり、多くのダイオードにおいて、電流密度が 200~300 A/cm² を越えるとオン電圧が有意に増加(特性劣化)することが確認された。一方、同図(b)は、厚さ 2 μ m、ドーピング密度 $3x10^{18}$ cm³ の再結合促進層を導入した結果である。約 500 A/cm² の高い電流密度までは劣化はほとんど観測されないが、これ以上の電流密度では、ある割合で劣化を示すダイオードが存在する。同図(c)は、厚さ 5 μ m、ドーピング密度 $3x10^{18}$ cm³ の再結合促進層を導入した結果であり、この場合は 800 A/cm² の高電流密度まで、全く劣化現象は観測されなかった。このように、適切な再結合促進層を導入することによって、実用上十分な高電流密度まで劣化を完全に抑制できることを実証できた。

以上のように、欠陥物理に立ち戻って劣化のメカニズムを解明し、かつこの知見に基づいて劣化抑制に有効な構造を提唱し、欠陥があっても実質的に劣化を完全に抑制できることを実証

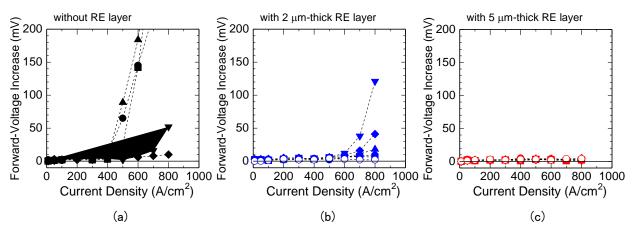


図 1-5 通電による SiC pin ダイオードの劣化特性(電流密度 100 A/cm² 時のオン電圧の変化量(Δ V F)) (a) 再結合促進層なし、(b) 2 μ m 厚さの再結合促進層導入、(c) 5 μ m 厚さの再結合促進層導入

課題 1-2

1)酸化抑制プロセスによる高品質 SiC MOS 界面の形成

酸化膜(SiO₂)/SiC 界面には高密度の界面欠陥(界面準位)が存在して伝導に寄与する電子を捕獲するので、SiC MOSFET ではチャネル移動度が約 $10\sim30~cm^2/Vs$ と著しく低いという課題がある。SiC のバルク移動度を考慮すると、約 $300~cm^2/Vs$ のチャネル移動度が期待できる。したがって、SiC パワーMOSFET の実用化が進んでいるとはいえ、その性能は SiC 固有のポテンシャル(理想特性)から著しく乖離している。図 1-6 に耐圧 600, 1200, 3300~V 級 SiC パワーMOSFET のオン抵抗の成分内訳を示す。同図中、黄色で示すドリフト抵抗は耐圧維持層の抵抗であり、SiC 物性で決まる限界特性(理想特性)に相当する。電車等に用いられる 3300~V の SiC MOSFET ではこのドリフト抵抗がオン抵抗の約 8 割を占めており、3~kV 級 MOSFET の性能は SiC の理想特性に比較的近いと言える。一方、最も市場や産業インパクトの大きい 600~V~MOSFET では、チャネル抵抗がオン抵抗の 7~ 割を占めており、チャネル抵抗の低減、つまりチャネル移動度の向上が最重要課題である。例えば、チャネル移動度を 3~6に向上できれば、チャネル抵抗を 1/3~6、オン抵抗を 1/2~1に縮小できるので、コストが約 1/3~1になる(歩留まりも顕著に向上する)。

現在、SiCパワーMOSFET の価格は同定格の Si デバイスに比べて約3倍高い。したがって、上記のようにチャネル移動度を3倍に向上できれば、Si デバイスに対して数倍以上優れた性能 (低消費電力、高速動作)を有する SiC デバイスを Si と同等価格で製造することが可能となり、パワーデバイス分野における Si から SiC への移行が爆発的に進む。SiC デバイスの普及率が向上すれば、その分、省エネ量が増加するので、社会全体としての顕著な省エネに繋がる。

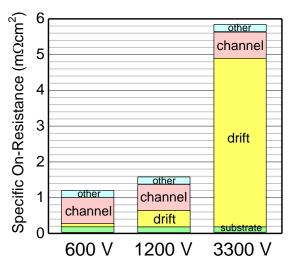


図 1-6 耐圧 600, 1200, 3300 V級 SiC パワーMOSFET のオン抵抗の成分内訳

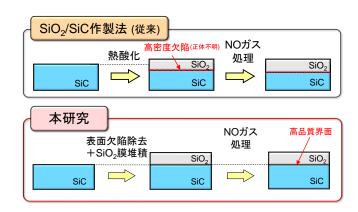


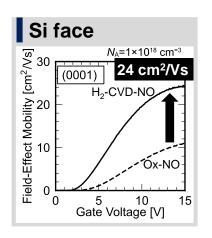
図 1-7 従来の酸化膜形成プロセスと本グループが提案する酸化抑制プロセスの模式フロー

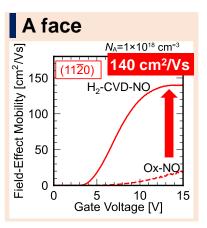
上述の酸化膜 $(Si0_2)$ /SiC 界面に存在する高密度欠陥に関する課題は、当該分野において 20 年以上に亘って進展がなかったが、本グループは OPERA プログラムの研究成果を集約することによって、大幅な界面欠陥の低減とチャネル移動度の向上を達成した。このブレークスルーの最大のポイントは、従来技術である「SiC の熱酸化」では不可避的に $Si0_2$ /SiC 界面近傍に炭素関連欠陥が発生するという実験および理論的知見に基づき、SiC の熱酸化を極力抑制しながら、良質の $Si0_2$ 膜を形成することである(「酸化抑制プロセス」)。図 1-7 に、従来の酸化膜形成プロセスと本グループが提案する酸化抑制プロセスの模式フローを示す。酸化抑制プロセスは、(1) SiC 表面に高温水素処理を施す、(2) $Si0_2$ 膜を堆積法により形成する、(3) NO ガスアニールにより $Si0_2$ /SiC 界面を窒化するという 3 ステップからなる。

様々な SiC 結晶面((0001)、(11 $\overline{2}$ 0)、(1 $\overline{1}$ 00)面)上に p 型 SiC を形成し、この上に n チャネル MOSFET を作製して得たチャネル移動度のゲート電圧依存性を図 1-8 に示す。ここでは、実際のパワーMOSFET 応用を考慮して高濃度ドープされた p 型ボディを有する MOSFET を作製した。同図には従来技術(0x-N0: 熱酸化と NO アニール)および提案する酸化抑制プロセス($H_2-CVD-NO$: 上記の 3 ステッププロセス)によりゲート酸化膜を形成した場合の特性を比較して示している。いずれの結晶面においても、酸化抑制プロセスを活用することによってチャネル移動度を約 $2\sim6$ 倍以上に向上できた。いずれの素子においても、ゲート容量—電圧特性の解析から、界面欠陥密度が $1/2\sim1/5$ に低減できていることを確認している。

次に、提案するプロセスで形成した酸化膜の絶縁性と MOSFET のしきい値電圧の安定性を調べた。いずれも素子の信頼性の観点で重要な評価項目であり、これらの評価項目をクリアできなければパワーMOSFET の製造には使えない。図 1-9 に酸化膜に高電界を加えたときのリーク電流の酸化膜電界強度依存性を示す。提案する酸化抑制プロセスにより形成した酸化膜は非常に絶縁性がよく、約5.5~MV/cmまではリーク電流が検出限界以下であり、絶縁破壊電界は 11.2~MV/cm以上という極めて高い値を得た。これは従来技術(0x-N0)より優れた特性である。MOSFETのゲート電圧に正負の高電圧を加えて酸化膜に電子注入(正電圧印加時)あるいは正孔注入(負電圧印加時)を行った後、ゲート特性を測定してヒステリシス特性を調べた結果を図 1-10に示す。同図に示すように、酸化抑制プロセス($H_2-CVD-N0$)により作製した MOSFET では、ヒステリシスが無視できるほど小さく(0.05~V以下)、この特性も従来技術より優れていることが判明した。

このように、SiC MOSFET において界面の高い品質(低い欠陥密度)、従来技術に比べて 2~6 倍の高いチャネル移動度、酸化膜の高い絶縁性と信頼性を全て満たす酸化膜形成技術を実証したことは世界で唯一無二かつ群を抜く最先端の成果である。





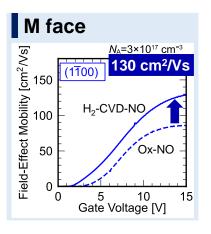


図 1-8 様々な SiC 結晶面 ((0001)、(1120)、(1100)面) 上に p 型 SiC を形成し、この上に n チャネル MOSFET を作製して得たチャネル移動度のゲート電圧依存性

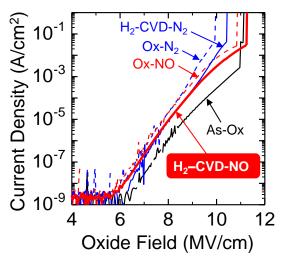


図 1-9 酸化膜リーク電流の酸化膜電界強度依存性

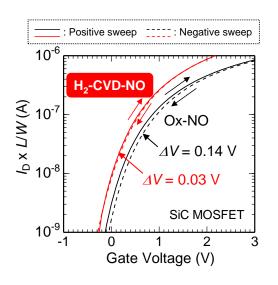


図 1-10 ゲート特性のヒステリシス

2) SiC MOSFET におけるキャリア散乱過程の解明と MOSFET 特性のモデル化

SiC MOSFET のもう一つの大きな課題は、MOS チャネルにおけるキャリアの散乱過程が不明であり、その特性を記述する物理モデルが完全に欠如しているため、デバイス構造が与えられても、その特性を予測できない。Si MOSFET では、酸化膜/Si 界面の欠陥が非常に少ないので、MOSFET の電流—電圧特性から直接的に反転層内のキャリア移動度を決定できる。したがって、ゲート電圧や温度を変化させながら通常の MOSFET 特性、チャネル移動度を測定すれば、容易に電子や正孔の移動度の電界強度依存性、温度依存性を得ることができる。さらに、界面が理想特性に近いので、典型的な物理数式を用いて移動度や MOSFET 特性を記述するモデルを構築できる。一方、SiC MOSFET では反転層内の大半のキャリアが界面欠陥に捕獲されて不動となるため、MOSFET 特性から得られる「チャネル移動度」は見かけの移動度であって真のキャリア移動度ではない。さらに、ゲート電圧や温度の変化に応じて界面近傍のフェルミ準位が変化するため、界面欠陥へのキャリア捕獲量も大きく変化する(定数として扱えない)。これらの問題を解決するため、本研究では、SiC MOSFET のチャネル部に対して Hall 効果測定を行い、真の可動電子密度と電子移動度を測定し、電子の様々な散乱過程を考慮した SiC MOSFET の移動度モデルを構築することを目指した。

図 1-11 に作製した MOS-Hall 効果用素子の模式図を示す。SiC(0001)面上にエピタキシャル成 長あるいはイオン注入条件を変化させることによって、幅広い条件で p 型ボディ領域のアクセ プタ密度を変化させた。また、界面欠陥の影響を明らかにするため、3種類のプロセス(酸化 のみ、酸化+NOアニール、酸化+POCl3アニール)によりゲート酸化膜を形成した。MOS-Hall 効 果測定により得られた電子移動度の界面実効電界依存性を図 1-12 に示す。実効電界が低い(< 0.1 MV/cm) 場合には、ゲート酸化膜の形成プロセスによらず、100 cm²/Vs を越える電子移動度 が得られたが、実効電界が高くなると (> 1 MV/cm)、電子移動度が急激に低下することが明ら かになった。また、比較的界面欠陥の少ない POCI3 アニールを施した MOSFET では、実効電界が 高い場合でも比較的高い移動度を維持することも判明した。同図中の破線は、格子振動による 散乱で決まるフォノン散乱移動度である。「酸化のみ」および「酸化+NO アニール」プロセスで 作製した MOSFET のフォノン散乱移動度はほぼ同一であるが、「酸化+POClaアニール」による MOSFET では、明らかに高いフォノン散乱移動度が得られた。これらの移動度および界面欠陥へ の電子捕獲を考慮して計算した SiC MOSFET (「酸化+NO アニール」プロセス) のゲート特性を 図 1-13 に示す。 図中の●印が実測値、実線および破線が上記で確立したモデルを用いて計算し た特性である。p型ボディ領域の異なる2種類の MOSFET について、数桁に亘って計算値は実測 値によく一致している。

つまり、本研究の成果を集約することによって、SiC MOSFET 特性を計算により再現できることを初めて明らかにした。このようにSiC MOSFET の実測特性を、物理モデルを用いて再現したのは世界初の成果である。

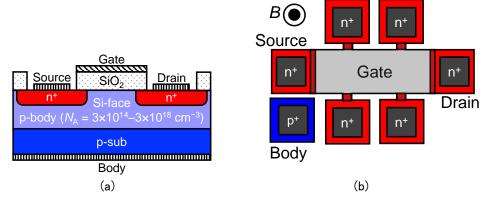


図 1-11 作製した MOS-Hall 効果用素子の模式図 (a) 断面図、(b) 上面図

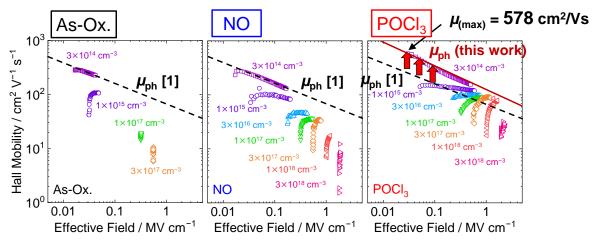


図 1-12 MOS-Hall 効果測定により得られた電子移動度の界面実効電界依存性

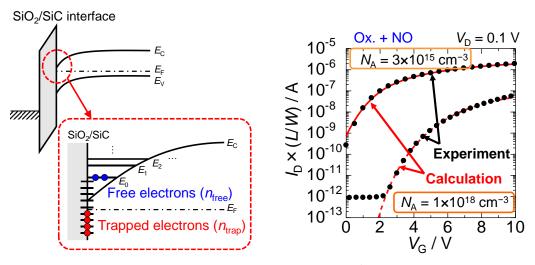


図 1-13 (a) 反転チャネル形成時の SiC MOS 構造のエネルギーバンド図

(b) 移動度および界面欠陥への電子捕獲を考慮して計算した SiC MOSFET のゲート特性

課題 1-3

1) サイドゲート SiC 相補型 JFET (CJFET) の作製と高温動作実証

SiC MOSFET はパワー用途では大本命のデバイスであるが、高温動作時や放射線下におけるゲート酸化膜の特性がデバイスや集積回路の信頼性を大きく制限する。一方、SiC JFET は酸化膜不要であり、SiC pn 接合のみで構成されるので、厳環境(高温、放射線)動作集積回路に最適である。本グループが提案するノーマリオフ特性を有する n チャネル JFET と p チャネル JFET を組み合わせた相補型 JFET (CJFET) は、低消費電力かつ安定な厳環境動作集積回路の基本素子として有望である。本 OPERA プログラムの初期にはトップゲート構造の JFET (図 1-14(a))を主に研究したが、ゲート領域形成時の注入イオン (ドーパント不純物)のチャネリングにより、チャネル部のドーピング密度と厚さが設計からずれるという課題に直面した。そこで、プログラムの後半では、サイドゲート構造の JFET (図 1-14(b))を提案し、作製に取り組んだ。サイドゲート構造では、チャネル厚さはイオン注入のマスクサイズで厳密に決定され、かつドーピング密度もイオン注入時のチャネリングの影響をほとんど受けないので、しきい値電圧の制御性が格段に向上する。

半絶縁性 SiC 基板に直接イオン注入することにより、ソース、ドレイン、ゲート領域を形成することで、サイドゲート構造を有する SiC CJFET (図 1-15) を作製した。作製した n-JFET の

しきい値電圧は +0.72 V、p-JFET のしきい値電圧は -0.76 V となり、ノーマリオフ特性を示した。また、設計通り n-JFET と p-JFET のしきい値電圧の絶対値をほぼ同じ値に揃えることにも成功した。電源電圧を 1.4 Vと低く設定して SiC CJFET インバータ特性を測定した結果を図1-16 に示す。出力が High から Low に遷移する論理しきい値電圧は 0.7 Vであり、電源電圧の1/2 という理想的な特性を示した。高温になると論理しきい値電圧は若干低下するが、350℃の高温でも良好な特性を得た。次に作製した CJFET インバータのスイッチング特性を図 1-17 に示す。電源電圧は同じく 1.4 Vである。同図の灰色実線が実測により得られた特性、青および赤色破線が独自に開発した JFET モデルを用いた SmartSPICE シミュレーションの結果である。図に示すように、室温~300℃の温度範囲で CJFET のスイッチング特性を、SPICE シミュレーションより精度よく再現できており、SiC CJFET の特性を回路シミュレーションで再現できることを意味している。なお、SiC CJFET を 300℃で 1000 時間以上の連続動作テストを行ったところ、特性変化は全く観測されなかった。

耐放射線特性については、電子線照射による SiC デバイス特性の変化を調べた。電子線照射により SiC バルク結晶中にキャリアトラップとして働く点欠陥が生成するが、その生成量は Si に比べて約 1/5 と低いことが明らかになった。したがって、SiC デバイスは Si に比べて電子線に対する耐久性が約 5 倍優れていると言える。

このように、本グループが提唱した SiC CJFET の基本動作を室温~350℃の高温で実証することに成功した。今後、500℃の高温動作を実証するためには、高温で安定な電極金属を探索する必要がある(今回の実験では原理実証を目的としたので、電極に AI/Ti 系を用いたため、高温耐性がない)。SiC CJFET は世界で唯一無二の成果である。他機関は大きな興味を示しているが技術的にビハインドの状態であり、SiC CJFET を設計、作製する技術を有していない。

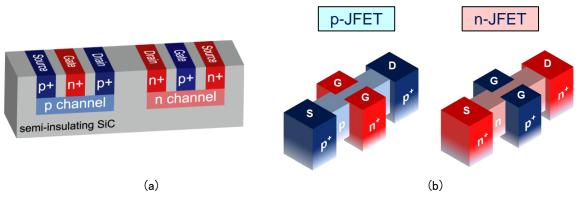


図 1-14 作製した SiC JFET 構造の模式図。(a) トップゲート構造、(b) サイドゲート構造

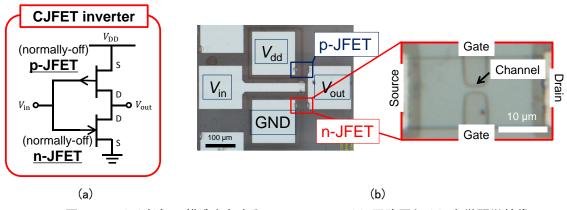


図 1-15 サイドゲート構造を有する SiC CJFET の(a) 回路図と(b) 光学顕微鏡像

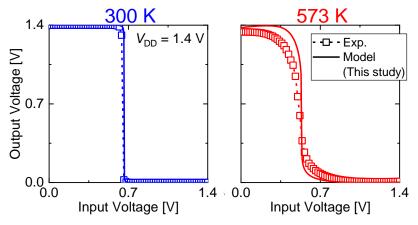


図 1-16 作製した SiC CJFET インバータ特性

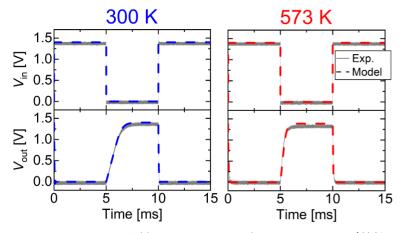


図 1-17 作製した CJFET インバータのスイッチング特性

2) SiC CJFET を用いた基本回路の実証

SiC CJFET の基本動作を実証できたので、次のステップとして NAND、NOR などの基本ゲート回路を SiC CJFET を用いて作製した。CJFET は基本的に CMOS における n-MOSFET を n-JFET、p-MOSFET を p-JFET に置き換えた素子であるので、CMOS を用いた NAND、NOR ゲートにおいて MOSFET を JFET に置換した回路構成により所望の動作が期待される。これも SiC CJFET の特徴の一つである(Si CMOS の基盤技術やデータベースをほぼ全て活用できる)。図 1-18(a)に SiC CJFET を用いた回路構成図、図 1-18(b)にこの NANDO 回路の動作特性を示す。2 つの入力端子の電圧 (00/10/01/11)に応じて、出力端子の電圧が 1/0/0/0 を明確に示している。この動作は 350° C でも確認でき、かつ 1000 時間の連続動作(スイッチング動作)を行っても動作特性の変化は見られなかった。NOR ゲートも作製したところ、同様の特性(正常な論理特性と連続動作で劣化なし)が得られた。SiC MOSFET では、高温動作において顕著なしきい値電圧シフトが観測されているので、この観点でも酸化膜フリーの SiC CJFET の特徴と優位性を物語っている。

これらの結果は、世界初のSiC CJFET を用いた基本論理ゲートの実証であり、他機関の追随を許していない。

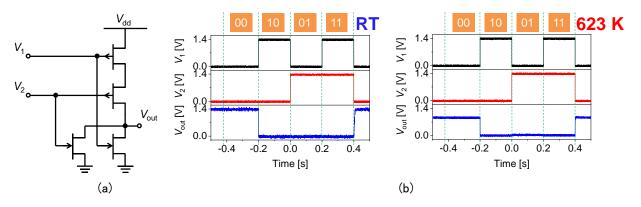


図 1-18 作製した SiC CJFET を用いた NAND ゲートの(a) 回路図、(b) 動作特性

6.1.3 プロジェクト終了後の活動方針

課題 1-1

SiC 特有の劣化現象であるバイポーラ通電時の積層欠陥拡大については、積層欠陥の拡大/縮小現象をモデル化することに成功し、劣化のメカニズムを学術的に明らかにした。この知見を基に、基底面転位近傍における過剰キャリア密度を積層欠陥拡大が生じる臨界値以下にすれば劣化は生じないことを見出した。最後に、過剰キャリアが下地 SiC 基板に到達することを防ぐ「再結合促進層」を提案し、適切な設計をすれば実用上十分に高い 800 A/cm² の電流密度で通電しても全く劣化しないことを実証した。したがって、学術、産業化の両面で、既に最終目標は完全に達成できている。

本プロジェクト終了後は、民間企業(2社)と競争領域での共同研究を継続し、本成果を基にしてバイポーラ通電劣化を完全に抑制した SiC デバイスの量産を目指す。

課題 1-2

酸化膜(SiO₂)/SiC 界面欠陥の起源解明と、この知見を基にした新しい酸化膜形成プロセスの提案を行った結果、従来技術(現在のSiCパワーMOSFET 量産技術)に比べて約一桁低い界面欠陥密度を得ることに成功した。この結果、SiC MOSFET の特性を支配するチャネル移動度を2~6倍以上に向上した。酸化膜の絶縁性、しきい値電圧の安定性を維持しながらチャネル移動度を大幅に向上したのは、当該分野で約20年ぶりの成果とみなされている。さらに、界面欠陥密度を大きく変化させた3種類のSiC MOS 構造について広い実効垂直電界範囲でMOS-Hall 効果測定を行い、SiC 固有のフォノン制限移動度を決定すると共に、界面欠陥が移動度に与える影響を定量化した。したがって、既に最終目標を十分達成しており、特にMOSFET 特性向上については、予想を上回る成果を挙げることができた。

本プロジェクト終了後は、民間企業(2,3社)と競争領域での共同研究を継続する。既に 2社とは 0I 機構における共同研究に移行し、もう 1 社とも競争領域の共同研究に移行する予定 である。市場の大きい耐圧 $600\sim1200~V$ 級の SiC パワーMOSFET は、チャネル抵抗が性能を大き く制約しているので、本成果を量産技術に仕上げれば、SiC パワーMOSFET の大幅な低コスト化 と高信頼性化を達成できる。この結果、現行の Si IGBT から SiC MOSFET への移行が一気に加速し、極めて多くの機器やシステムにおいて顕著な省電力効果を発揮できる。

課題 1-3

燃焼炉制御によるエネルギー高効率化や原子炉モニターを目指した Si の動作限界を越える高温動作集積回路として、SiC 相補型 JFET (CJFET)を提案し、その高温(350~400°C)動作を実

証した。サイドゲート構造の導入やイオン注入技術の高度化により、SiC の物性値から予測される理想特性に近い性能を得た。高温動作に耐える電極材料の探索に着手できなかったため、当初目標である 500℃動作実証は未達であるが、デバイスシミュレーション結果と実測値の整合に加え、SPICE による回路シミュレーション結果が実験結果と良い一致を示すなど、デバイスおよび回路のデザイナビリティ(高度な設計性)を示すことができた。SiC CJFET 単体に留まらず、NAND ゲート、NOR ゲートの高温動作も実証するなど、概ね最終目標を達成できたと考える。本プロジェクト終了後は、民間企業(1社)と競争領域での共同研究を検討中である。また、本研究課題は新たに開拓中のテーマであり、他の公的補助金(科学研究費など)の獲得も目指

6.1.4 その他

している。

・応用物理学会からの依頼により、「SiC パワーデバイス - 材料物性、プロセス、デバイスの基礎と将来展望 -」というタイトルで応物セミナー(3時間)を実施した。当該セミナーは過去最高の参加者数(約140名(過去の参加者数の平均は50~70名))となり、好評を博した。本セミナーを通じて産官学の若手研究者/技術者および当該分野に参入した中堅技術者にSiC パワーデバイスの特徴と課題を伝えることができた。

(「応物セミナー」とは、応用物理学関連の技術や情報を、これから活用しようと考えている人向けに、技術の基礎、最新動向、将来像等を各分野の第一人者がわかりやすく解説するセミナーである。)

・OPERA プログラムで得た成果や知見を核として、SiC デバイスのバイポーラ劣化抑制と MOS 界面制御に関する長文のレビュー論文 (44 ページ) を執筆し、掲載された (Applied Physics Express, 2020年)。当該論文は掲載後 2 年で 16,000 件以上という極めて高いダウンロード数を獲得し、被引用件数も 100 件を越えている。世界中で広く読まれ、若手研究者/技術者だけでなく最先端研究者にとってもバイブルの一つとなっている。これらの内容、インパクトが評価され、応用物理学会論文賞で最も権威ある解説論文賞を受賞した。

6.2 研究開発課題 2「革新的ワイドギャップ半導体デバイスの科学」

キーテクノロジー	キーテクノロジー2:ワイドギャップ半導体を用いた超高感度センサ技術
課題代表者 水落 憲和	
	京都大学 化学研究所 教授
実施期間	平成 30 年 10 月~令和 5 年 3 月
共同研究機関	京都大学、参画企業1社

6.2.1 マイルストーンと達成状況

課題	MS	- / ! - I >	\±_#.4\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\
番号	番号	マイルストーン内容	達成状況
課題	MS	磁場検出感度向上に向け、広領域均一	有限要素法に基づいた電磁界解析を
2-1	2-1-1	高パワーマイクロ波コイルを作製す	行い、そのシミュレーション結果をも
		る。直径1ミリメートルの円状の領域	とに、直径 3.2mm、高さ 1.0mm の円筒
		で 10%以内の均一性で 1 ガウス以上の	形のループコイルから成る広領域均
		磁場強度発生を実現し、高感度化実証	一高パワーマイクロ波コイルを設計
		実験に用いる。マイクロ波パルスによ	し、作製した。結果として、2 ミリ平
		るスピン高度制御システムを導入し、	方メートル以上の領域で、10%以内の
		新たな手法を試みながら磁気センサ	均一性で、最大4ガウスの磁場強度発
		感度の評価を行う。	生の実証に成功し、目標を上回る成果
			を得た。
	MS	直径2ミリ平方メートル程度の領域で	2ミリ平方メートル以上の領域で、10%
	2-1-2	10%以内の均一性で 2 ガウスの磁場強	以内の均一性で、最大4ガウスの磁場
		度発生を実現し、高感度化実証実験に	強度を発生できるコイル作製に成功
		用いる。導入した CVD 法によるダイヤ	し、高感度か実証実験に用いた。
		モンド合成装置により、高品質化技術	CVD 法によるダイヤモンド合成装置を
		を確立させる。この高品質ダイヤモン	導入し、室温における NV 中心の世界
		ドを用いてセンサデバイスを作製す	最長 T2 にほぼ等しい T2 を有するダイ
		る。また、デバイス試料内における光	ヤモンド合成に成功し、高品質ダイヤ
		励起導入路及び NV 中心の発光窓の設	モンド試料合成という目標を達成す
		計などにより、センサデバイスにおけ	ることができた。
		る光励起・検出効率向上化技術を確立	100Hz 及びそれ以下の低周波 AC 磁場を
		させる。新たな量子プロトコルによる	高感度に測定することができる、新たな
		手法を導入し、更にセンサ感度高感度	量子プロトコルによる新規高感度計測
		化の合成条件、微細加工技術条件、デ	手法を開発することができ、新規量子プ
		バイス構造の最適化条件を探りなが	ロトコル開発という目標を達成するこ
		ら、評価結果をフィードバックさせ、	とができた。
		高感度化実証を行う。	上記技術を合わせ、更にセンサ感度高
			感度化の合成条件、微細加工技術条
			件、デバイス構造の最適化条件を探り
			ながら、評価結果をフィードバックさ
			せ、高感度化実証を行った。

MS	R3 年度までの技術を総動員し、更にセ
2-1-3	ンサ感度高感度化の合成条件、微細加
	工技術条件、デバイス構造の最適化条
	件を探りながら感度を評価して、評価
	結果をフィードバックさせることに
	より更なる高感度化を実現する。

R3 年度までの技術を総動員し、更にセンサ感度高感度化の合成条件、微細加工技術条件、デバイス構造の最適化条件を探りながら感度を評価して、評価結果をフィードバックさせることにより、0.33 ピコテスラ(pT)程度の磁場検出感度を実証でき、最終目標を上回る成果を得ることができた。

6.2.2 最終目標に対する成果の詳細

(1) 広領域均一高パワーマイクロ波コイル開発研究

NV 中心を用いた高感度センサデバイスにおいて、計測する NV 中心の数を増やすと、感度はその数の平方根に比例する。例えば 10^4 個の NV 中心を観測すれば、1 個の NV 中心の感度を 10^2

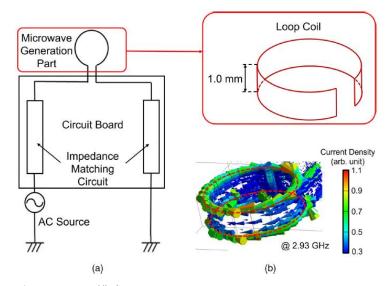


図 2-1 マイクロ波アンテナの構成

(a) マイクロ波アンテナの構成を表す概観図。アンテナに電力を入力するための入ポート部、アンテナ全体でインピーダンス整合を取るためのマッチング回路部分、ダイヤモンド試料にマイクロ波を印加するためのマイクロ波発生部から成る。(b) 本アンテナに電力を入力した際の電流分布のシミュレーション結果. マイクロ波発生部のループコイルはダイヤモンド試料を取り囲む二重コイルのように機能し、試料の広範囲にわたって均一性の高いマイクロ波を印加することが可能となっている。

倍にすることができる。実際には、ダイヤモンド試料の大きさ程度の数ミリ平方メートル以上の領域を、均一に数ガウス程度以上の高パワーで励起する必要があり、その実現が課題として 挙げられた。

この課題に対し、本課題では2ミリ平方メートルの領域で、10%以内の均一性で2ガウスの振動磁場強度発生の実証を最終目標として研究を行った。また、実際の計測では、静磁場を印可するために、振動磁場を発生させるマイクロ波周波数帯域が、十分に広い必要もある。技術的に均一性、高磁場強度、マイクロ波広帯域をすべて備えることは技術的に困難であり、世界

でどこも実現していなかった。

我々は、目標達成のため、図 2-1 (b) に示した、直径 3.2mm、高さ 1.0mm の円筒形のループコ イルから成る広領域均一高パワーマイクロ波コイルを設計し、作製した。2mm 四方で厚さ 1mm 程 度のダイヤモンド試料の全体を取り囲んだ状態でマイクロ波を印加することが可能で、同部分 は1枚の銅板で構成されるが、表皮効果により銅板の両端のみに電流が流れるため、実質的に 二重コイルとして動作する。これは、二重コイルの間に置いたダイヤモンド試料に均一なマイ クロ波を印加すること、二重コイルを銅線で構成する場合と比較し、試料近辺での温度上昇を 抑制すること、銅線二重コイルに比べて応力に対する耐久性を高くし、形状変化しにくくする ことを目的としている。このマイクロ波発生部の動作をシミュレーションにより検証した結果 を図 2-1(b)に示す。本シミュレーション結果は、有限要素法に基づいた電磁界解析を行って得 られたものである。結果を見ると、電流(色付きのベクトル)がループコイルの両端に分布し、 二重コイルのように動作していることが見て取れる。本アンテナは、マイクロ波発生部で発生 するスピン操作用マイクロ波の強度を最大化するため、同部分を挟んで両側に配置されたマッ チング回路において所定の共振周波数でインピーダンス整合を取って高周波の入力電力が効率 よく伝送されるように、また、その結果として伝送線路上に分布するマイクロ波の定在波の山 がループコイルに位置するように、伝送線路の長さや形状および回路素子の種類やインピーダ ンスの値が調整されている。これらの調整によるアンテナの特性への影響の検証は、上述のシ ミュレーションによって行い、それを受けて、アンテナの試作を行った。なお、伝送線路は基 板上に描かれているが、アンテナの試作を重ねる過程で、この基板をガラスエポキシ(FR-4)製 から PTFE 製に変更することにより、アンテナ全体の温度安定性も確保できるようになった。

上記の開発したコイルをもいた成果として、図 2-2 に示したように、2 ミリ平方メートル以上の領域で、10%以内の均一性で、最大 4 ガウスの磁場強度発生の実証に成功し、最終目標を上回る成果を得た。

振動磁場を発生させるマイクロ波周波数帯域については図 2-3 に示したように 290 MHz 程度の広帯域化が実証できた。このような振動磁場の均一性、高磁場強度、マイクロ波広帯域をす

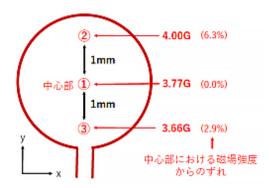


図 2-2 作製したコイルによる磁場強度と均一性の概略図 10%以内の均一性で 最大 4 ガウスの磁場強度発生が実証された

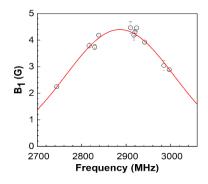


図 2-3 振動磁場(B₁, 縦軸)とそれを発生させるマイクロ波周波数帯域(横軸)の関係 半値全幅で 290 MHz 程度の広帯域化が実証された.

べて備えたコイルは世界初である。

(2) 100Hz 以下の比較的低周波の AC 磁場について、新たな量子プロトコルによる新規高感度 計測手法を開発

低周波交流磁場における検出感度については、新たな低周波 AC 磁場の測定法に関する量子プロトコル手法を考案し、実証実験を行った。図 2-4 に単一 NV 中心を用いた場合の実証実験結果を、従来技術であるハーンエコー法による感度の周波数依存性(ピンク色点線)とパルス光検出磁気共鳴法(オレンジ色点線)との比較も含めて示した。新規手法の実証実験結果を青色の点で示している。ピンク色の点で示した従来技術での結果(シミューレション結果)は、低周波数側では数百 Hz の領域において感度が著しく悪くなる。一方で、青色で示した本手法の実証実験結果では、1 Hz レベルの低周波から実証実験を行い、低周波領域でも感度を維持できていることが示されている。図 2-3 に示した実証では 1 個の NV 中心を用いた際の結果で、感度としては約 10 nT/(Hz) $^{1/2}$ が実現することを示している。多数の NV 中心を含むアンサンブル系での測定により、更なる桁違いの高感度化が期待できる。100Hz 及びそれ以下の低周波 AC 磁場を高感度に測定することができる、新たな量子プロトコルによる新規高感度計測手法を開発することができ、最終目標を達成することができた。

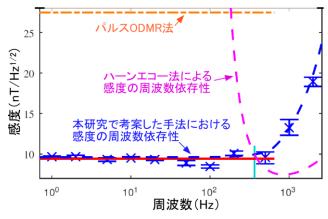


図 2-4 新規低周波 AC 磁場の測定法による感度の周波数依存性. 青色で示した点線がシミュレーション結果で青色の×点が実験結果。従来技術であるハーンエコー法による感度の周波数依存性(ピンク色点線)とパルス光検出磁気共鳴法(オレンジ色点線)との比較(シミュレーション)も含めて示している。

(3) ダイヤモンド合成

CVD 法によるダイヤモンド合成装置を立ち上げ、高品質化技術開発を行った。我々は一般に用いられる毒性の高いフォスフィンではなく、毒性の低いターシャルブチルホスフィンを用いてリンドープ n 型ダイヤモンドを合成した。磁場感度の高感度化に直接結びつく NV 中心の重要な特性として、スピンコヒーレンス時間 (T_2) がある。感度は T_2 の平方根に比例してよくなり、長い方が良い。我々は T_2 の長さは主に膜中の窒素濃度に依存し、原料ガスの総流量、及びメタン流量比率の増加による窒素混入抑制によって、 T_2 が改善することを示した。更に、合成条件検討を行い、窒素等の不純物濃度を更に低減することを実証した。また、この試料を用いてセンサの高感度化に重要な指標である T_2 、及び NV 軸の配向性を調べた。

ダイヤモンドは、原料ガスに水素で希釈した高純度 12 C メタンを用い、ARIOS 社製のマイクロ波プラズマ CVD 装置によって、Ib (111) 基板上に合成した。二次イオン質量分析法により不純物濃度を測定した。ダイヤモンド試料中の不純物を、微量のリンが取り込まれつつ、窒素混入を抑制できたことを確認した。室温における単一 IV 中心の I_2 は自作共焦点レーザー顕微鏡により、ハーン・エコー法によって測定し、IV 軸の方向は光検出磁気共鳴測定により確認した。合成した試料において、図 IV 2-5 に示したように、従来報告されている室温での最長値(IV 2 2.4 ms)に匹敵する IV (2.23±0.08 ms)を有する単一 IV 中心が生成していることを確認した。更に、IV 軸の配向性についても、[111] 方向への高い配向性を確認した。世界最高値に匹敵する IV 中心の IV 2 を有するダイヤモンド合成に成功し、高品質ダイヤモンド試料合成という目標を達成することができた。

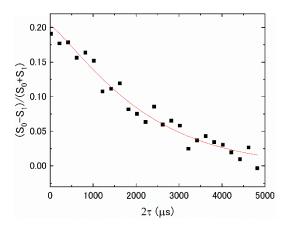


図 2-5 合成したダイヤモンド試料中の単一 NV 中心のスピンコヒーレンス時間 (T_2) 室温における単一 NV 中心の T_2 は自作共焦点レーザー顕微鏡により、ハーン・エコー法によって測定した。

(4) ダイヤモンド磁気センサの高感度化

デバイス試料内における光励起導入路及び NV 中心の発光窓の設計などにより、センサデバイスにおける光励起・検出効率向上化技術を確立させ、更に、微細加工技術条件、デバイス構造の最適化条件を探りながら、評価結果をフィードバックさせ、高感度化実証を行った。

結果として図 2-6 に示したように、0.33 ピコテスラ(pT)程度の磁場検出感度を実証でき、目標を上回る成果を得ることができた。図 2-6 では測定回数と共に検出可能な磁場が理論的に予測されているように、測定回数の平方根に比例して、小さくなっている様子が計測されている。

本プロジェクトにおいては 16 件の特許の出願を行った。京都大学とスミダ電機(株)で米国へも申請中であり、ダイヤモンドの量子センサに関する、国内の企業や大学等の登録件数の中で

はトップの件数である。

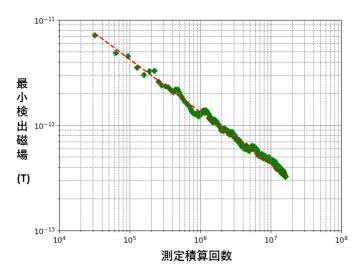


図 2-6 AC 磁場感度測定結果. 縦軸は最小検出可能磁場(T)、横軸は測定積算回数. 赤の点線は 測定回数の平方根に比例して検出可能磁場が小さくなっている場合の線を表している。

6.2.3 プロジェクト終了後の活動方針

本プロジェクトでの成果をもとに、OPERA参画企業と研究継続する。OI機構への移行はすぐには行わない予定である。

6.2.4 その他

特になし

6.3 研究開発課題3「パワーデバイスの次世代システム応用」

キーテクノロジー	キーテクノロジー2:ワイドギャップ半導体を用いた超高感度センサ技術	
	キーテクノロジー3:高効率・大電力変換を可能とするパワーモジュール・受	
	動素子技術	
	キーテクノロジー4:パワー集積回路・パワープロセッシング技術と次世代シ	
	ステム応用	
	キーテクノロジー5:電力パケット化・ルーティング技術	
課題代表者	引原 隆士	
	京都大学 工学研究科 教授	
実施期間	平成 30 年 10 月~令和 5 年 3 月	
共同研究機関	京都大学、京都工芸繊維大学 (R3 年度から)、奈良先端科学技術大学院大学	
	(R3年度迄)、参画企業3社	

6.3.1 マイルストーンと達成状況

		, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
課題番号	MS 番号	マイルストーン内容	達成状況
課題 3-1	MS 3-1-1	・市販パラメータアナライザデータ (~200W)をもとにモデル精度決 上、最適化ツール開発と初期値決テ 手法の検討を行い、その後短パル(数kW)する。 ・パラメータアナライザ、および短別 できる、主成分分析やマルコス制定手法の分析やマルコク ・ボラメータ抽出手法を開発し、統計 がモデルを検討する。実用的な メータ数での(3以下を目標) ル化を目指す。	・ドレス用スに ・ドレン電極にパルス用スカー ・ドレン電極にパルスの電力を実施できることを実施でした。 ・ア発し、1kW以上の電力を実に適力を実施できることを実施であることを実に適力を実にでいた。 ・大きに、パラメータのではいかででででは、のでででででではいいがででででででででででででででででででででででいる。 ・主でではいかが、これででででででででででででででででででででででいた。 ・主でではいかが、これででででででででででででできません。 ・主でではいかででででででででいた。 ・主ができまが響きたいいますがでででででいた。 ・主ができまができまができませい。 ・主ができまができませい。 ・主ができませいが、これでは、 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができませい。 ・主ができまなができませい。 ・主がいかでは、 ・主がいかでは、 ・主がいかでは、 ・さいのでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいいでは、 ・だいのでは、 ・だいいいでは、 ・だい
	MS	回路解析中の反復計算の近似や打ち	モデル評価時間のボトルネックと
	3-1-2	切りにより、精度と計算速度を複数切り替えられる仕組みをデバイスモデルに組み込む。	なっていた表面電位の導出計算に近似解析式を用いることで、回路シミュレーションの 11 倍の高速化を達成した。
課題 3-2	MS 3-2-1	達成方法:電力変換回路の並列化とデジタル並列化技術を実現する。 実施内容:パワー密度が 1kW/200cc 以上の変換回路をデジタル並列化で 実現する。	回路の受動性に基づく制御理論による 各種電力変換回路の直並列の理論構築 と回路実装を行い、レゴブロックのよう に必要な電圧、電流の合わせたモジュー ルの直並列が実現できることを示した。

	MS 3-2-2	達成方法:高周波パワースイッチング 技術基づくパルス電力による電源の 並列化と、パワーの演算による出力の 自在な調整を可能にする。 実施内容:並列化技術を基にパワー密 度が1kW/200cc程度の電力変換回路の 集積化を達成する。パワーの演算処理 (パワープロセッシング)回路を単純 化するため、書き換え可能な回路を設 計する。	電力パケットの演算処理において、その演算をパケットに付加した制御情報により書き換え可能が回路を開発し、その有効性を示した。これにより、電力パルスを信号と同様にデジタルのまま処理できる演算系を実現した。この概念をパワープロセッシングとして提案し、課題 3-3 のモータ駆動に応用し、その有効性を実証した。
	MS 3-2-3	達成方法:デジタルアクティブゲートドライバにより、情報とパワーの変換回路を提案し、新しいインターフェースを提案する。 実施内容:デジタルアクティブケートドライバによる信号側における素子および回路特性に応じた駆動最適化を実現する。	SiC のデバイス特性, 負荷特性に応じてゲート駆動を能動的に制御するアクティブゲート駆動を GaN デバイスを適用した 1bit 高速駆動回路を元に多ビット化し、完全にデジタル化した8bit デジタルアクティブゲート駆動を設計し、kW オーダーの SiC MOSFET の駆動でその有効性を実証した。これによりデバイス特性や負荷状態に応じたゲート駆動回路の設定パラメータの変更が、 SiC MOSFET 駆動中の論理ビット変更により最適化できることを示し、実証した。
課題 3-3	MS 3-3-1	モーター負荷ー冷却系ー電力変換器のマルチフィジックス設計・解析コードを完成する。また、京都大学が開発している 1 kW 級 PM-SRM を対象として、その最適化設計のためのベンチマーク試験と上記コードを利用した評価を完了する。	モーター負荷ー冷却系一電力変換器のマルチフィジックス設計・解析コードを完成した。また、PM-SRMを対象にして、固定子巻線にパルス電流印加することによってアルニコ磁石の着磁束を変化させる技術を発明した。1kW級PM-SRMを対象にして、上記パルス着磁法の最適条件を明らかにし、実験によって実証した。1kW級PM-SRMを対象にして、非線形制動係数とトルク特性の関係を明らかにすると共に、最大効率特性を明確化し、実験によって
	MS 3-3-2	前年度に特性評価した PM-SRM について、さらに SiC コンバータと組み合わせた試験を実施し、同コンバータの優位性を検証する。また、上記ベンチマークデータをベースに、例えば電気自動車用途を想定して、マルチフィジックス設計コードを用いた 10 kW 級回転機設計を実施し、最大効率マップを解析的に明確化する。なお、課題 3-	確認した。 1 kW 級 PM-SRM を対象にして、SiCコンバータによる試験を実施した。また、電気自動車を想定した可変速解析を行った。さらに、1 kW 級 PM-SRM の結果をもとに 10 kW 級 PM-SRM を設計、試作し、1 kW 級 PM-SRM に対して(体積)出力密度を 5 倍にすることに成功した。

	1	T	1
		3 の研究担当者の当初研究活動可能期	
		間の制約から、本テーマの達成時期を	
		R3 1Q と設定していたが、R4 年度も活	
		動可能になったことから、研究内容を	
		上記のようにさらに充実して、達成時	
		期をR4 10に延長する。	
	MS	MS3-3-2 で設計した 10 kW 級モータ	1 kW 級 PM-SRM を用いて、課題 3-2 の
	3-3-3	&SiC インバータシステムを試作し、各	電力パケット配送装置と組み合わせ
		種試験を通して、従来システムに比較	電ガバックト配送装置と幅が合わせ
		して 10%程度以上総合効率が改善する	に成功した。また、10 kW 級モータ&SiC
		ことを示す。特に、電気自動車用途を	コンバータ試験系を構築し、パルス着
		_	–
		想定した最大効率マップを実験的に	磁試験や可変速回転試験等に成功し
		│明確化する。さらには、課題 3-2 の電 │カパケット配送装置と組み合わせた	た。さらに、1 kW 級機と協調させた試 │ │験も実施した。
		ガハグット配送装置と組み合わせた 世界初の駆動制御、および1 kW 級機	験も美施した。
		と 10 kW 級機の自律制御を行う。な	
		お、課題 3-3 の研究担当者の当初研究	
		活動可能期間の制約から、本テーマの	
		達成時期を R3 40 と設定していたが、	
		R4 年度も活動可能になったことから、	
		研究内容を上記のようにさらに充実	
		して、達成時期を R4 4Q に延長する。 	
課題	MS	非同期型電力パケット伝送を用いた	ナローウエストモデルに基づきリン
3-4	3-4-1	ベストエフォート型の電力配送を可	ク層、ネットワーク層、トランスポー
		能とするプロトコル階層の設計と各	ト層、アプリケーション層の 5 階層か
		層の基本設計を行う。	らなる電カパケット伝送のプロトコ
			ル階層を設計した。
	MS	フロー単位の品質制御を可能とする	各層のプロトコルを実装した。リンク
	3-4-2	リンク層、ネットワーク層、トランス	層においては、バス型に接続された電
		ポート層、アプリケーション層の各プ	カパケットルータにおける双方向の
		ロトコルを実装する。リンク層では優	伝送メディアアクセス制御プロトコ
		先度制御に基づく電カフローの品質	ルとして、特別な調停機構を必要とせ
		保証を実現する。ネットワーク層では	ずソフトウェア制御で多重アクセス
		品質保証のためのアドミッションコ	と衝突回避を実現する方式を開発し
		ントロールと品質保証型経路制御を	た。ネットワーク層においては、品質
		行う。	保証型電力フローとベストエフォー
			ト型電力フローの優先度制御と、それ
			に基づく品質(QoS)保証電カルーティ
			ングを SDN (Software Defined
			Networking)の技術を用いて行う方式
			を開発した。

MS	サブシステムを統合し、アプリケー	電力供給源と電力消費機器に組み込
3-4-3	ションからの電力要求に応じて電源	んで統合したシステムを実装し、アプ
	と電力消費機器との間で電力フロー	リケーションからの電力要求に応じ
	が確立し必要な電力が供給される形	て電源と電力消費機器との間で電力
	でのスマートエネルギーマネジメン	フローが確立し必要な電力が供給さ
	トを実現する。	れる形でのスマートエネルギーマネ
		ジメントを、デモシナリオに基づく動
		作検証レベルではあるが実現した。
 •		

6.3.2 最終目標に対する成果の詳細

課題 3-1

デバイス物理にもとづく回路シミュレータ用パワーデバイスモデルにより高精度な回路シミュレーションを実現するため、(1)数 kW までの電力範囲におけるモデルパラメータ抽出手法および(2)統計的ばらつきモデルを開発した。さらに、回路シミュレーションにおけるデバイスモデル計算の高速化を実現するため、(3)本研究開始時と比較し実用上の解析精度を劣化させることなく 11.5 倍の高速化を達成した。

(1) デバイス特性評価のために産業界で広く採用されているカーブトレーサは、ゲート電極にパルスを印加して電流を測定する機能を持つが、本体内に保持できる電力量とパルス幅の下限に限界があるため、デバイスが実際に用いられる大電力での測定ができない(概ね 200W が上限)という課題を見出した。そこで、ドレイン電極にパルス用のスイッチ素子を追加したドレインパルス方式カーブトレーサを開発し(図 3-1-1)、パルス幅を 10us に制御可能にすることで、自己発熱の影響を抑えながら 1kW 以上の大電力領域の電流特性を正確に測定することを可能とした。さらに、これまで明らかにされていなかった SiC パワーMOSFET に適したモデルパラメータの初期値決定法を定義し、高精度なモデルパラメータ抽出が可能になった。

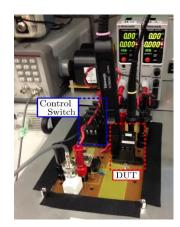


図 3-1-1 大電力カーブトレーサ

(2) 製造工程に起因して生じるパラメータのばらつきを考慮した回路性能の見積もりは、モジュール設計など、並列して使われる素子の特性のマッチングが重要となる場合に強い関心を集めている。しかし、SiC 等のパワーデバイスについて多数デバイスのパラメータを統計的に評価した報告はない。特性ばらつきの統計的モデル化を実現するため、マルコフ連鎖モンテカル口法を用いた統計的モデリング手法を開発し、モデルパラメータの統計的な分布を仮定することなく統計的回路シミュレーションを可能とするデバイスモデルパラメータの生成方法を与えた。複数ロットから得られる、複数の正規分布を重ね合わせる多峰性分布をなすモデルパラメータがある場合には、それに対応する電流分布も多峰性となる。正規分布等を仮定する従来手法では分布の再現が困難であるのに対し、提案手法を用いることで、モデルパラメータの分布に関する事前知識がなくても、真の分布を精度よく再現できることを確認した(図 3-1-2)。さらに、統計的回路設計に向けて統計的な扱いを行うモデルパラメータを絞り込む手法を開発することで、少数のモデルパラメータによる高精度な統計的回路設計を可能とした。

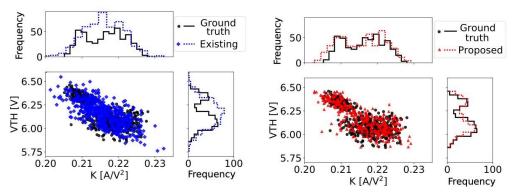


図 3-1-2 生成されたモデルパラメータ分布と正解の比較 左:従来手法、右:提案手法

(3) 回路シミュレーションの高速化を目的として、デバイスモデル計算の高効率化に取り組み、モデル評価におけるボトルネックとなっていた表面電位の導出計算に近似解析式を用いることで高速化を達成した。近似における基本的なアイデアは、MOS キャパシタの電荷のゲート電圧依存性を、蓄積領域、空乏領域、反転領域ごとに場合分けし、領域ごとに適切に変数変換を行うことで従来は反復的に解く必要のあった関数を 2 次の多項式とした点にある。これにより反復計算が不要となり、解析的な導出が可能となる。近似式を導入したデバイスモデルを用いて過渡解析を行った結果、従来と同等の精度を保持しつつ回路シミュレーションを 11.5 倍高速化できることを確認した(図 3-1-3)。反復計算において収束条件を可変とするよりも、高速で安定した精度での計算ができる。

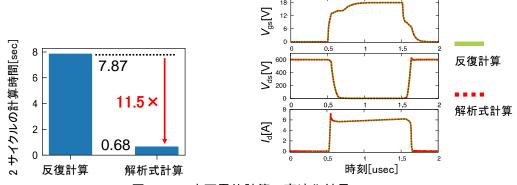


図 3-1-3 表面電位計算の高速化結果 左:1サイクルの過渡解析計算結果、右:対策前後の過渡解析波形比較

課題 3-2

本課題に対して以下の通り目的を達成した。

・MS3-2-1 については、回路の受動性に基づく制御理論による各種電力変換回路の直並列の理論構築と回路実装を行い、レゴブロックのように必要な電圧、電流の合わせたモジュールの直並列が実現できることを示した。また、電力段の電力パケットを用いた論理処理とその誤り訂正による目標値制御法を確立した。理論による原理検証だけでなく、回路実装を実現したことで、レゴブロックのような組み合わせによる電力変換回路の設計を可能にした。単位モジュールは 数百 W で設計したが、パワーデバイスの容量と熱設計によってサイズは変わる。



図 3-2-1 電源回路の集積化を実現するモジュールの直並列化: (a)基本モジュール(入力側)、(b)基本モジュール(出力側)、(c)直列接続、(d)並列接続

・MS3-3-2 については、 MS3-2-1 と合わせて、電力パケットの演算処理において、その演算をパケットに付加した制御情報により書き換え可能が回路を開発し、その有効性を示した。これにより、電力パルスを信号と同様にデジタルのまま処理できる演算系を実現した。この概念をパワープロセッシングとして提案し、無線電力伝送と併用したロボットのような閉鎖系への電力伝送、および課題 3-3 のモータ駆動に応用し、その有効性を実証した。

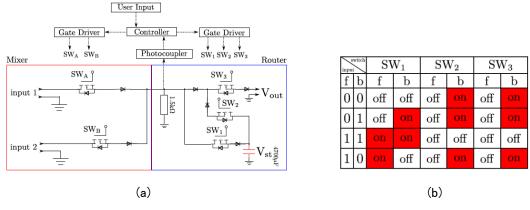


図 3-2-2 書き換え可能な演算回路そその実行結果 (a)回路図、(b)NAND 実行例

注)従来のパワーエレクトロニクスの回路はスイッチングレキュテータであり、すべてのスイッチングクロックを同期させた一定周波数による時間区間において、フィードバックによる導通時間の連続制御を行う方式を取っている。これは一定時間区間ごとの離散制御であるが信号処理のデジタル化ではなくアナログ制御の離散実装である。一方提案するパワープロセッシングにおいては、電力パケットは一定時間幅の電力パルスに電圧のみの情報タグを付加し

た単位で構成し、電力の制御はその数でのみ制御し、またパケット自体もパケットを同期させて伝送することも、クロック情報を付加することで完全に非同期にもできる。このような制御は従来のパワーエレクトロニクスではパルス密度制御として提案されていたものに近いが、その密度制御自体がアナログフィードバックによっているため、同一ではない。以上から本研究では、信号処理と同様に電力を処理できる本方式をパワープロセッシングと呼んでいる。

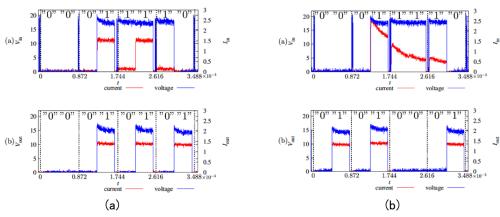


図 3-2-3 電力の演算の実行結果 (a)OR 演算、(b)NAND 演算

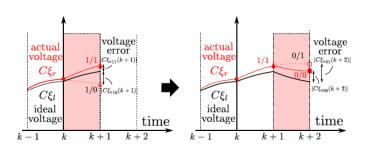


図 3-2-4 誤り訂正アルゴリズム

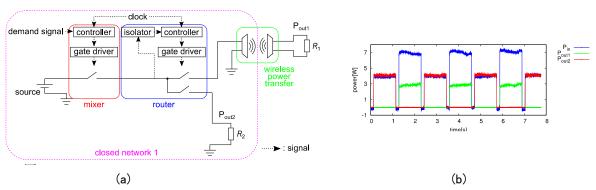


図 3-2-5 ロボットへの応用を想定した無線電力伝送技術による, 電力パケットによる閉鎖系の連携方式の検討: (a)システムの概要、(b)実験結果



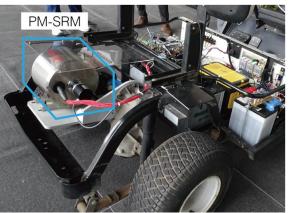


図 3-2-6 電力パケット伝送システムのカート駆動主回路への応用

・MS3-2-3 については、SiC のデバイス特性,負荷特性に応じてゲート駆動を能動的に制御するアクティブゲート駆動を GaN デバイスを適用した 1bit 高速駆動回路を元に多ビット化し、完全にデジタル化した 8bit デジタルアクティブゲート駆動を設計し、kW オーダーの SiC MOSFET の駆動でその有効性を実証した。これによりデバイス特性や負荷状態に応じた ゲート駆動回路の設定パラメータの変更が、 SiC MOSFET 駆動中の論理ビット変更により 最適化できることを示し、SiC MOSFET を実装した高圧昇圧コンバータへの適用において、サージ電圧の抑制と損失の抑制ができることを実証した。



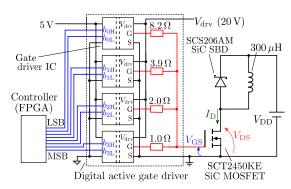


図 3-2-7 開発した 8 ビットデジタルアクティブゲートドライバと FPGA による駆動

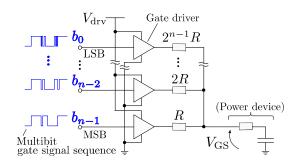
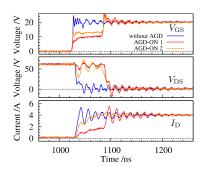


図 3-2-8 ビット列調整によるアクティブゲートドライブ



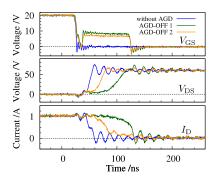
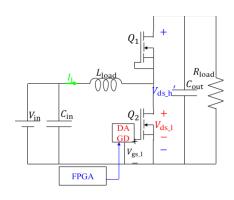


図 3-2-9 ターンオン、オフ時の振動抑制例(実験結果の一例)



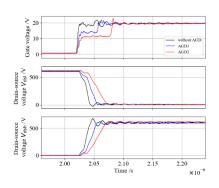


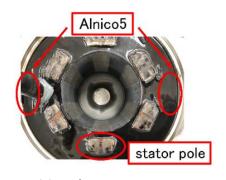
図 3-2-10 高電圧昇圧コンバータ回路への適用例

以上の様に、SiC MOSFET の高速、高周波駆動をベースに、電源回路の直並列制御によるパワー集積回路の提案と実装、電力パケット伝送系によるパワープロセッシングの実現、さらにはその応用を進めた。

課題 3-3

1 kW級PM-SRMの試作と非線形制動係数の影響

定格出力 1 kW の永久磁石補助スイッチトリラクタンスモータ (PM-SRM) の設計、試作および回転試験に成功した。図 1 には、試作した 1 kW 級機の外観写真を示す。また、図 2 には回転試験セットアップを示す。



(a) 固定子



(b) 回転子

図1 試作した PM-SRM の外観写真

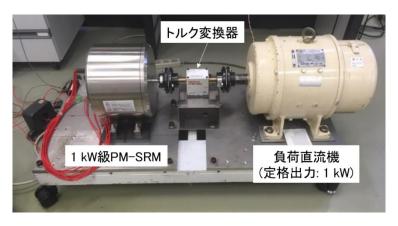


図2回転試験のセットアップ

図1の1kW 級試作機を対象にして、まず制動係数の初期回転数・時間依存性の実験的評価と定式化を行い、当該式を運動方程式に反映した電磁界解析プログラムを開発した。実験結果の一例として、図3には、1kW 級機をフリーランで回転させた場合の制動係数の初期回転数・時間依存性を示す。本実験では、まず図2の試験セットアップにおいて負荷直流機とトルク変換器の間のカップリングを取り外し、1kW 級機をフリーの状態にする。そして、1kW 級機を励磁して無負荷定常回転状態にし、その後励磁を瞬断して過渡回転特性を時間分解能の高いモータアナライザーで計測した。制動係数の計算に際しては、線形の運動方程式を仮定した。本方法によって評価した制動係数は複雑な初期回転数および時間依存性を有している。また、その値は0.5~1.5 mNs/rad程度であるが、一般的に負荷直流機によって強制回転させて求めた値に比較して約1桁程度大きいことが分かった。そこで、図3の特性を定式化し、電磁界解析モデルに反映することによって、詳細な回転特性を解析した。図4は、1kW 級機の過渡負荷特性の電磁界解析例を示す。本解析では、ヒステリシス制御によって回転数を1000 rpm に固定している。同図から平均トルクを求めると14.4 Nmであり、従来の負荷直流機強制回転時の制動係数を用いた場合の結果(9.4 Nm)に比較して1.5倍以上大きい。即ち、PM-SRM の特性を正確に評価するためには、その制動係数を精密に求めることの重要性を示すことができた。

固定子巻線へのパルス電流注入による可変磁束技術の提案

さらに、当初計画に無かった 1 kW 級機のパルス電流注入法によるトルク制御技術について、電磁界解析に基づいて確立し、京都大学単独承継として特許出願も完了した。近年、永久磁石を利用したモータ界磁磁束を運転モードに応じて変化させる可変磁束モータ技術が注目されている。本発明は、SRM について可変磁束技術を実現する独自性のある技術である。図 5 には、図 1 の 1 kW 級機の駆動中にパルス電流注入も可能にした改良形非対称ハーフブリッジコンバータ回路を示す。また、図 6 には 1 kW 級機の運転中にパルス注入(時間: 0.11 s と 0.16 s で注入)した際の過渡回転特性(解析結果)を示す。同図に示すように、パルス電流を注入することによって固定子側アルニコ磁石の着磁量を変化させ、結果としてトルクを可変にできている。従って、この技術を応用すれば、可変速駆動時に時々刻々変化する負荷トルクと回転数に対して、例えば常に最大効率条件で駆動することが可能になる。さらには、非対称ハーフブリッジコンバータを利用した場合とフルブリッジコンバータを利用した場合について、1 kW 級機の回転特性を解析的に明らかにした。

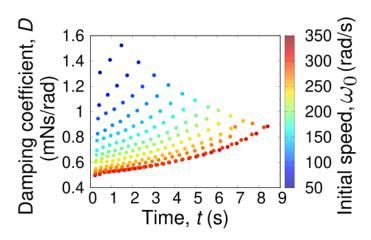


図31 kW級 PM-SRM をフリーランで回転させた場合の制動係数の初期回転数・時間依存性(実験結果)

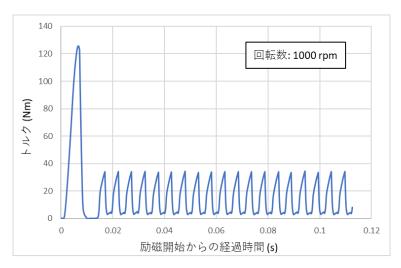


図4 電磁界解析によって得られた PM-SRM の過渡負荷特性例

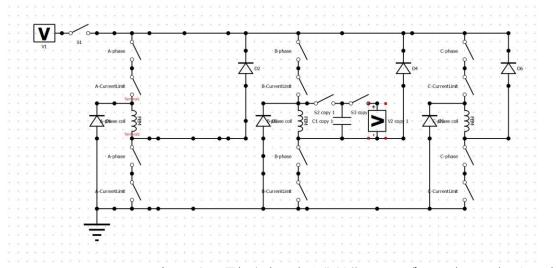


図 5 PM-SRM のパルス注入運転を実現する非対称ハーフブリッジコンバータ回路

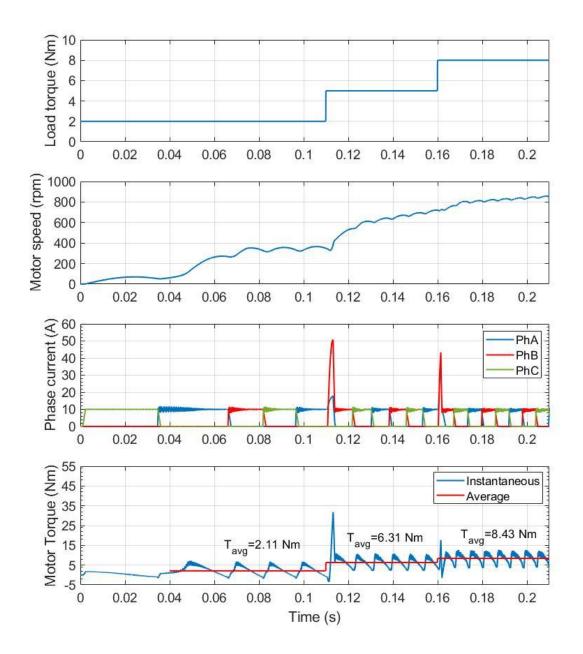


図 6 PM-SRM の運転中にパルス注入(時間: 0.11 s と 0.16 s で注入) した際の過渡回転特性(解析結果)

固定子へのパルス電流注入条件の解析的・実験的検討

PM-SRMの可変速時最大効率制御を実現するために、固定子巻線電流によるアルニコ磁石へのパルス着磁・脱磁特性を解析的かつ実験的に検討した。なお、解析に際しては、アルニコ磁石のリコイル効果の近似モデルを作成して用いている。

図 7 には、固定子巻線によるアルニコ磁石のパルス磁化特性の解析結果を示す。同図において、パルス通電時間が 5 ms の場合を点線で、10 ms の場合を実線でそれぞれ示している。図 7(a)に示すように、通電時間 10 ms の場合では電流が一定値に収束しているが、一方で 5 ms では収束していない。従って、試作した PM-SRM の適切なパルス印加時間は 10 ms 程度と考えられる。なお、パルス印加時間が不必要に長くなると、コイル発熱の問題や、あるいは当該電流によってトルクリッ

プルが大きくなってしまう。パルス印加時間の理論的範囲は、巻線の電気的時定数以上であり、かつ回転子の機械的時定数未満にすべきである。図 7(a)の着磁特性では、電圧 200 V 印加時に 200 A 程度流れており、図 7(b)の脱磁特性では、電圧-100 V で-20 A 前後流れている。

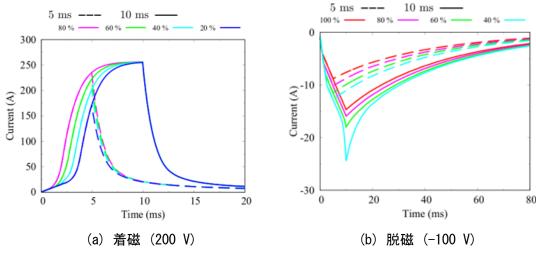
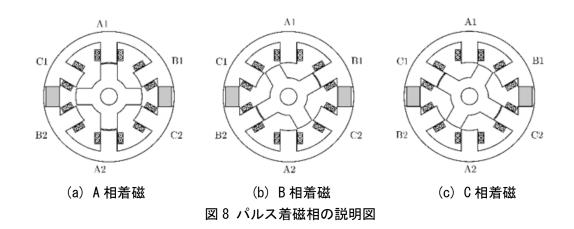


図 7 固定子巻線によるアルニコ磁石のパルス磁化特性 (解析結果)

次に、最適な着磁相の検討を行った。即ち、固定子は A 相、B 相、C 相の 3 相を有するが(図 8)、 着磁および脱磁に適した相の検討を行った。ここで、固定子内のアルニコ磁石の着磁量の指標として、着磁率(Magnetization Level: ML)= (磁石の着磁磁束密度)/(磁石の飽和磁束密度)×100 [%]を定義する。即ち、ML= 0%が未着磁状態であり、ML= 100%が完全着磁状態である。図 9 には、 異なる電圧値や印加時間に対して ML 値として示したパルス着磁解析結果を示す。同図に示すように、A 相で着磁した場合よりも、B、C 相で着磁した場合について ML 値が大きくなっており、即ち着磁効率が高い。このことは、図 10 によって理解できる。即ち、A 相着磁(図 10(a))ではアルニコ磁石に平行なバイパス回路が生じてしまい、当該磁石に印加される磁束量が減少してしまう。一方で、B 相着磁(図 10(b))若しくは C 相着磁(図 10(c))では、アルニコ磁石をバイパスする位置に固定子突極が存在せず、磁束は全てアルニコ磁石を通ることになる。従って、パルス着磁する際は、B 相若しくは C 相巻線を利用した方が良いと理解される。なお、B 相・C 相着磁では、着磁巻線と左右アルニコ磁石の空間対称性が悪く、着磁後磁石表面磁束密度分布の均一性が若干損なわれることや、当該均一性を改善する際に B 相一C 相若しくは C 相→B 相と連続して着磁した方が良いなどの解析結果も得られている。



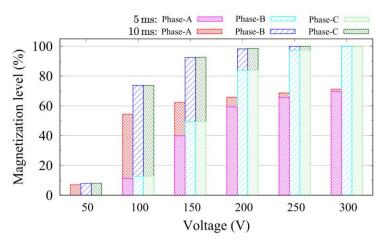


図9 パルス着磁後の Magnetization Level (ML) (解析結果)

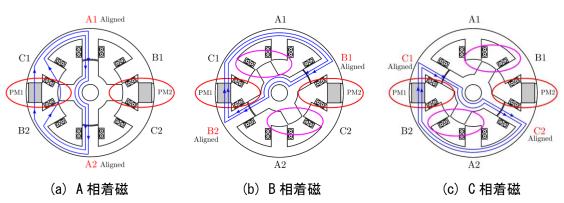


図 10 パルス着磁時の磁束線の模式図

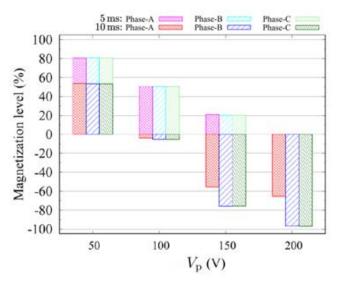


図 11 パルス脱磁後の ML 値 (解析結果)

さらに図 11 には、パルス印加前の ML 値を 100%として、異なる電圧値や印加時間に対して ML 値として示したパルス脱磁解析結果を示す。同図に示すように、減磁電圧値を上げるほど ML 値が低下しており、150 V 以上では大きくマイナス値に移行している。

さらに図 12 には、解析によって得られた左右のアルニコ磁石の着磁ムラと無負荷誘導起電力波形の関係を示す。同図は、回転子を 1500 rpm で強制回転させた場合に固定子巻線に誘導される起

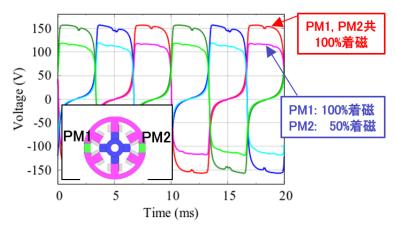


図 12 左右のアルニコ磁石の着磁ムラと無負荷誘導起電力波形(回転数: 1500 rpm、解析結果)

電力波形であり、左右磁石共に 100%着磁した場合には 150 V 程度誘導されている。一方で、PM1 の ML 値は 100%のままとして、PM2 の ML 値を 50%程度の極端に小さくした場合には、誘導起電力値が 120 V 程度に低下している。このことは、つまり出力が低下することになる。しかしながら、誘導起電力波形については、均一に着磁した場合と同じで不均一特性などは表れていない。つまり、アルニコ磁石の着磁量に不均一が生じても、誘導起電力値が少し下がる問題があるものの、トルクリップル等の回転特性としての影響は無いと思われ、即ち着磁ムラに対してロバストであると考えられる。

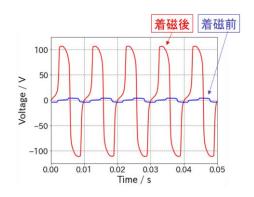
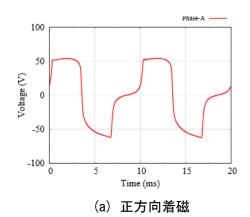
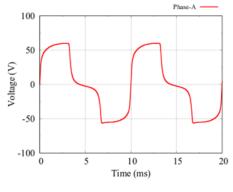


図 13 アルニコ磁石へのパルス着磁前後の無負荷誘導起電力波形(回転数: 1500 rpm、実験結果)

上記解析結果を踏まえて、実機を用いてパルス着磁試験を実施した。回転子が静止状態において、コンデンサバンクからパルス電圧を与え、着磁特性を試験した。なお、図 1(a)に示すように、固定子のアルニコ磁石は樹脂によって封止されていることから、その着磁量を直接計測することができない。そこで、上記解析と同様に、回転子を強制回転させた際の無負荷誘導起電力によって評価した。図 13 には、実験結果の一例を示す。同図に示すように、パルス電流印加によって誘導起電力が発生しており、即ちパルス着磁を実験的に検証することに成功した。また図 14 には、無負荷誘導起電力波形のパルス着磁方向に対する相違を示す。同図に示すように、着磁方向が異なると波形が互いに反転している。従って、同波形を用いて着磁方向を同定することが可能である。なお、当該波形の相違は電磁界解析結果と一致している。





(b) 負方向着磁

図 14 無負荷誘導起電力波形の着磁方向に対する相違(回転数: 1500 rpm、実験結果)

1 kW 級試作機の回転特性

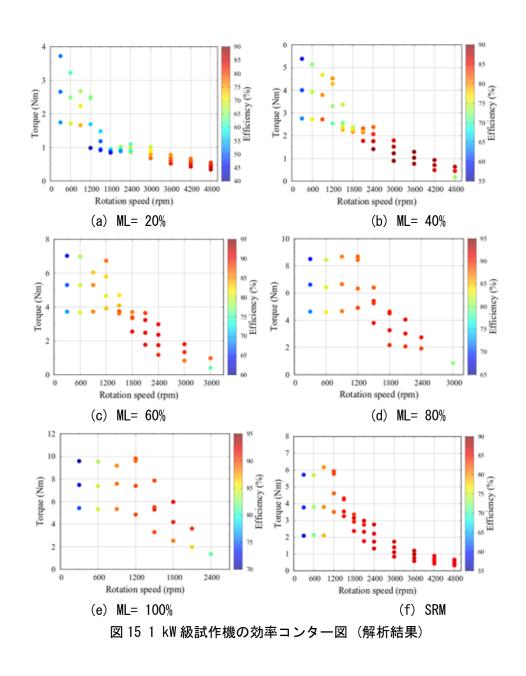
まず、異なる ML 値に対する回転特性を解析的に検討した。表 1 には、直流電圧 ($V_{\rm dc}$)と電流 $(i_{\rm ref})$ の設定条件を示す。図 15 には、解析によって得られた効率コンター図を示す。同図に示すように、高 ML の場合ほど同一駆動条件で得られるトルクが増加しており、一方で逆起電力増大により電流が増加しにくいため、最大回転数は減少している。また、図 16

表 1 直流電圧(V_{dc})と電流(/_{ref})の設定条件

条件	低速領域	中~高速領域
$i_{ m ref}$	6, 8, 10 A	10 A
V_{dc}	140 V	140, 160, 180, 200 V

には最大効率 - 回転数特性を異なる ML 値に対してプロットした結果を示す。同図に示すように、ML 値が大きい場合には低速で効率のピークを示し、ML 値が小さくなるほど当該ピーク値が高速にシフトしている。つまり、最大効率を実現する ML 値は回転数に応じて変化することになり、パルス着磁による可変磁束制御の必要性を明確に示唆している。さらに、例えば回転数 1200 rpm における PM-SRM の最大効率値は、従来形 SRM よりも 7%程度改善しており、優位性が示されている。なお、〇で囲んだ効率低下部は制御不良によるものである。

試作した PM-SRM (図 1)を用いて、回転試験を実施した。図 17 には回転試験系を示すが、図 18 に示す 2 種類の ML 値 (実験結果)に対して実施し、比較検討した。なお、負荷モータの制約によって負荷時最高回転数は 2100 rpm であったが、無負荷回転数は 6000 rpm を超えることを確認している。図 19 には、効率コンター図の試験結果を示す。低速領域では高 ML の方がトルク増加し、一方で速度増加に伴って低 ML の方が高トルクとなっており、解析結果と定性的に一致している。さらに図 20 には、最高効率一回転数特性を示す。本結果を見ても、低速領域では高 ML の方が効率増加し、一方で速度増加に伴って低 ML の方が高効率となっている。さらに、解析結果との対照から、低 ML の ML 値は 36.4%と推定され、高 ML の ML 値は 66.6%と推定されるが、それぞれ ML=40%、60%の解析結果と比較的良く一致している。



100 20 % 60 % 100 % SRM

100 % 80 % SRM

70 60 50

1200 1800 2400 3000 3600 4200 4800

Rotation speed (rpm)

図 16 最大効率 - 回転数特性の解析結果(〇で囲んだ領域は、制御不良領域)

600

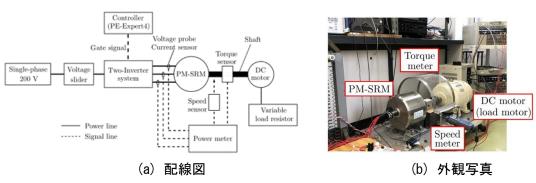


図 17 1 kW 級試作機の回転試験系

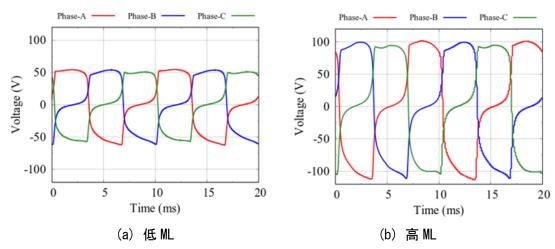


図 18 1 kW 級試作機の回転試験前の無負荷誘導起電力波形 (実験結果)

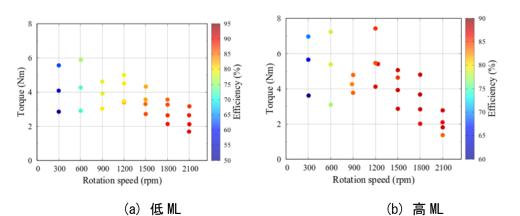


図 19 1 kW 級試作機の効率コンタ一図 (試験結果)

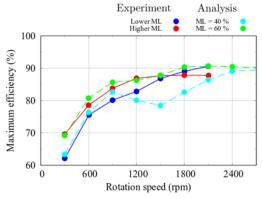


図 20 1 kW 級試作機の最高効率 - 回転数特性 (試験結果)

<u>電力パケット配送装置 (課題 3-2) によ</u>る 1 kW 級 PM-SRM の駆動試験

課題 3-3 と 3-4 の連携テーマとして、電カパケット配送装置による 1 kW 級試作機(図 1)の駆動試験を実施した。即ち、直流電源から電カパケット配送装置 (課題 3-2)によって電カパケットを生成し、それを 1 kW 級試作機の各巻線に供給して駆動制御するシステムを構築した。試行錯誤の結果、図 21 のようなレイアウトにおいて駆動試験に成功した。さらには、京都大学・桂キャンパス実証

電力パケット配電システム

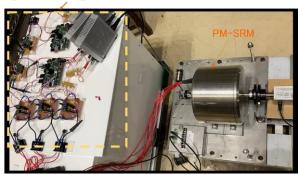


図 21 電カパケット配送装置による 1 kW 級試作機駆動 試験の様子



(a) ゴルフカートの外観写真



(b) 1 kW 級試作機をギアボックス部に取り付けた様子

図 22 電力パケット制御方式 1 kW 級 PM-SRM をゴルフカートに搭載した様子 (京都大学・桂キャンパス実証研究促進ファンドの助成による成果)

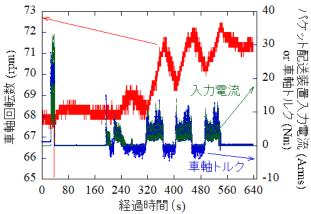
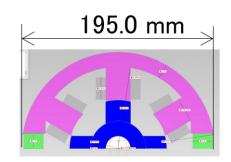
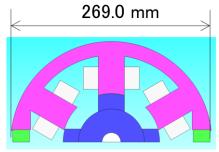


図 23 電力パケット配送装置駆動方式 1 kW 級試作機のゴルフカート走行試験結果例

研究促進ファンド(研究代表者:京都大学大学院工学研究科電気工学専攻・持山志宇助教)の助成を受け、電力パケット制御方式 1 kW 級試作機をゴルフカートに搭載するための開発を行った。図 22 にはゴルフカート走行試験系の外観写真を示すが、タイヤの駆動試験に成功した。課題 3-3 では、課題 3-2 で開発された電力パケット配送装置の他のシステム開発(バッテリー回路、ギア変換装置、トルクセンサー実装、他)を担当した。なお本試験では、厳密には電力パケットを用いた直接駆動はできておらず、電力パケットを 1 kW 級試作機の各巻線が受信した前提で駆動制御を実施したものである。なお、ゴルフカートの走行試験結果にも成功(試験例を図 23 に示す)しているが、詳細は課題 3-2 の報告に譲る。





(a) 既試作の1 kW 級試作機

(b) 新しく設計した 10 kW 級試作機

図 24 OPERA プロジェクトで開発した PM-SRM の断面図

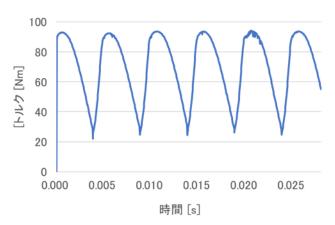


図 25 10 kW 級試作機(図 23(b))の 2次元電磁界解析によるトルク特性(1500 rpm)

10 kW級 PM-SRMの設計、試作、試験

1 kW 級試作機の特性評価結果に基づいて、10 kW 級試作機の設計を実施した。図 24(a)には既試作の1 kW 級試作機の断面図を、同図(b)には新しく設計した 10 kW 級試作機の断面図をそれぞれ示す。10 kW 級機の定格回転数は 1500 rpm であり、1 kW 級機と同等である。従って、10 倍の出力は主としてトルク値を向上することによって実現する必要があり、大トルクを実現するために電流密度を高くする設計を検討する必要がある。最終的に得られた図 24(b)では、1 kW 級機に対して体積の増加率を 1.9 倍に抑えられており、即ち比較的低速回転にもかかわらず出力密度の向上に成功した。即ち、体積出力密度を約5倍(=出力 10倍÷体積増加率 1.9倍)に高められている。図 25には、2次元電磁界解析によって得られた 10 kW 級 PM-SRM(図 24(b))のトルク特性

を示す。アルニコ磁石のパルス着磁率 90%において、出力トルク 65 Nm (出力: 10 kW@1500 rpm)が 実現されている。

図 26 には、試作した 10 kW 級 PM-SRM の外観写真を、図 27 には回転試験ベッドの外観写真をそれぞれ示す。また、駆動試験に際しては、2 台のSiC-PWM インバータを非対称ハーフブリッジ構成として組み合わせた(図 28)。

図 29 には、10 kW 級試作機の固定子アルニコ磁 石着磁特性(1300 rpm)の一例を示す。同図に示す



図 26 10 kW 級試作機の外観写真



図 27 試験ベッドの外観写真



図 28 試作した SiC コンバータの外観写

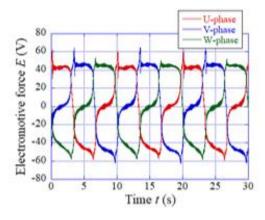


図 29 10 kW 級試作機のパルス着磁試験結果 (1300 rpm)

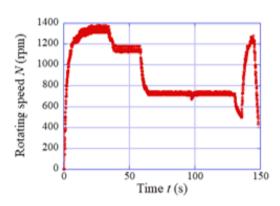


図 30 10 kW 級試作機の可変速回転特性試験結果

ように、10 kW 級試作機においてもパルス着磁に成功している。また、図 30 には可変速試験結果を示すが、トラブルなく試験することが出来た。その他、1 kW 級機との協調制御も実施した。

課題 3-4

ワイドバンドギャップ半導体による非同期型電力パケット伝送を用いたベストエフォート型電力配送を可能とするプロトコル階層を設計し実装する、という最終目標に向けて、非同期型電力パケット伝送を用いたベストエフォート型の電力配送を可能とするプロトコル階層の設計、ならびに、リンク層、ネットワーク層、トランスポート層の各層のプロトコルを設計し実装した。フロー単位の品質制御を可能とするため、リンク層では優先度制御に基づく電力フローの品質保証、ネットワーク層では品質保証のためのアドミッションコントロールと品質保証型経路制御を行う設計とした。

まず、リンク層において、バス型に接続された電力パケットルータにおける双方向の伝送メディアアクセス制御プロトコルとして、特別な調停機構を必要とせずソフトウェア制御で多重アクセスと衝突回避を実現する方式を考案し、制御のためのソフトウェアを開発した。電力パケットルータにおいてバス型の接続を許容することで、point-to-point型の接続に比べて電力ルータ内に経路切替のための半導体スイッチが不要になり、電力の損失を小さくすることができる。同時に回路が簡素化され、電力ルータ間を接続する電線の本数も削減される。双方向伝送を許容し送信用回路と受信用回路を共用することで、さらに回路が簡素化され配線も半分で

すむようになった。プロトコルは、通信において無線 LAN などに用いられている CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, 搬送波感知多重アクセス/衝突回避方式)と同様の考え方による自律分散型メディアアクセス制御に基づくものである。さらにその拡張として、IEEE802.11 無線 LAN における QoS 制御の方式である IEEE802.11e に倣って、集中型の制御プロトコルとして QoS CF-Poll 制御フレームを用いる HCCA (Hybrid coordination function Controlled Channel Access) と、自律分散型の制御プロトコルとして4つの送信キューで優先度制御(priority queuing)を行うEDCA (Enhanced Distributed Channel Access)を提案し、品質保証型とベストエフォート型が混在した複数のフローに対する電力伝送の多重アクセス機構として設計、実装した。

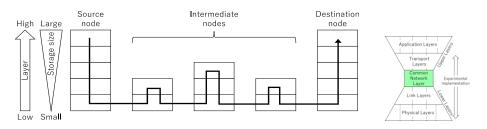


図 3-4-1 ナローウエストモデルに基づく電力パケット伝送のプロトコル階層

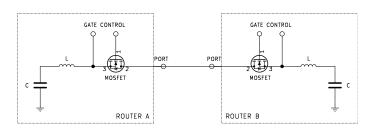


図 3-4-2 電力パケット伝送の物理層の基本回路

次にネットワーク層において、電力パケットによるベストエフォート型電力配送を前提に、品質保証型電力フローとベストエフォート型電力フローの優先度制御とそれに基づく品質 (QoS)保証電力ルーティングを、SDN (Software Defined Networking)の技術を用いて行う方式を提案し、電源(供給)と電力消費機器(需要)をユーザに対して提供されるサービスの優先度に応じて動的にマッチングさせつつ行う集中制御型のアルゴリズムとプロトコルを設計し、SDN コントローラとして実装した。発展形として、電力パケットによる電力ネットワークにおいて、電力消費機器だけでなく経路上重要な点にある電力ルータも蓄電要素として二次電池を備える構成を新たに考慮に加え、エンド・ツー・エンドの適応的なエネルギー伝送帯域制を踏まえた中間ルータ選択を含む経路制御アルゴリズムを設計した。

トランスポート層においては、電力パケットによるベストエフォート型伝送のためのエンド・ツー・エンドのフロー制御と輻輳制御を、インターネットにおける TCP とのアナロジーに基づいて、エンドデバイスである電力消費機器がバッファとなるキャパシタやバッテリーによりある程度のエネルギーを蓄えられることを前提として、電力ルータを複数段介した経路上で複数のフローが重なる場合のエネルギー伝送帯域の適応的な制御の要件を定義し、それに基づくアルゴリズムとプロトコルを設計・実装した。IP (Internet Protocol)ネットワークと電力パケットネットワークの大きな相違は、IP ネットワークでは輻輳が生じルータのバッファが溢れるとパケットが廃棄されるのに対し、電力パケットネットワークでは電力ルータにおいてバッファが溢れた場合には前段ルータからのパケットの送出が抑制されることである。したがって IP

ネットワークのように制御とペイロードを同じパケットに載せて送受する方式では輻輳制御がうまく働かない。一方、電力パケットにおいては、送信側から網に供給されたのと同量のエネルギーが受信側で受け取れればよく、必ずしも供給されたエネルギーそのものを経路に沿って伝送する必要はないとも考えられる。これに沿って、電力パケットにおいて制御情報を電力パケットそのものと分離し、電力パケットは制御パケットの流れに沿って電力ルータ間を送受されるものの、経由する電力ルータでバッファが満杯のときには電力パケットそのものは前段ルータで留め置き、制御パケットにおいてその情報を伝送する、輻輳が原理的に生じない新たな方式を導入し、それに基づいてエンド・ツー・エンドかつ受信者主導型のフロー制御アルゴリズムを設計した。

これまでに開発してきた集中型の品質(Quality of Energy)制御のプロトコルを用いてリアルタイムに経路制御の最適化が行うにあたって、中規模以上のネットワークで最適な経路を厳密に求める問題が計算量的に困難であること、遺伝的アルゴリズム(GA)やシミュレーテッド・アニーリング(SA)などのメタヒューリスティクスを用いた準最適化によってもリアルタイム最適化の要件を満たすことが難しいことを、新たに解決しておくべき課題として位置づけ、この問題を機械学習で解決することに取り組んだ。あらかじめモデルを学習しておくことで短時間で最適にある程度近い解を出力できるようにする機械学習モデルの構築を行った。

6.3.3 プロジェクト終了後の活動方針

課題 3-1

大電力カーブトレーサおよび統計的デバイスモデリング手法を開発するとともに、デバイスモデルを高速化したことで、最終目標を達成できた。民間企業と共同研究マッチングを行うNEDO「官民による若手研究者発掘支援事業」に採択されたことで、共同研究を通じて本研究成果を社会に還元すべく活動を継続する。

課題 3-2

提案している技術の中からより個々の回路や装置に実装しやすい技術として切り出し、一挙にパワープロセッシングへの転換を求めるのではなく、その重要性を認識できる技術の方向を 提示し、基礎技術として製品において用いられ易い展開を進めていく。

課題 3-3

当初計画通りの目標を達成できた。現在、別途参画している JST・A-STEP (JPMJTR201A) では、電気自動車用ならびに鉄道用モータに関する研究開発を実施しており、PM-SRM 駆動システムに関する成果を展開し、その可能性を検討している。また、本プロジェクトの参画企業と共に、電気自動車向他の実用を狙った検討を進めて行く。さらには、京都大学・オープンイノベーション機構と共に、現在別途共同研究を実施している複数企業へも本成果をアピールしていき、実用研究の可能性を探っていく予定である。

課題 3-4

研究開発全体として、リンク層、ネットワーク層、トランスポート層の各層のプロトコルを設計・実装し、これらを連携させての動作が行えているが、実際に電力供給源と電力消費機器に組み込んで統合したシステムを実装し、アプリケーションからの電力要求に応じて電源と電力消費機器との間で電力フローが確立し必要な電力が供給される形でのスマートエネルギーマネジメントについては、デモシナリオに基づく動作検証レベルでの実現である。プロトコルの

設計・実装は、JST スーパークラスタプログラムで開発した電力パケットルータのファームウェアレベルでの改良とソフトウェアシミュレーションに依っており、最新のワイドバンドギャップ半導体を用いた回路としての実装と性能評価を、今後進めていく予定である。

6.3.4 その他

課題 3-4

- ・京都大学においてスマートエネルギーマネジメントに関する学際的研究開発を行う組織として、学際融合教育研究開発推進センター(センター長:時任宣博 理事・副学長(研究担当))における教育研究連携ユニットとして「スマートエネルギーマネジメント研究ユニット」(ユニット長: 岡部 寿男、https://site.smart.kyoto-u.ac.jp/)を2017年4月に設置し、本プロジェクトを含む関連の学内外研究開発プロジェクトとの連携やアウトリーチ活動を行ってきた。本ユニットは2022年4月から5年間の活動延長が認められている(2027年3月まで)。
- ・日本学術振興会「電力と情報通信のネットワーク基盤の融合による超スマート社会」研究専門委員会(委員長:尾辻泰一 東北大学 電気通信研究所 教授, https://www.jsps-elinfonw.riec.tohoku.ac.jp/)に京都大学 岡部寿男が専門委員として参加、電力と情報通信のネットワーク基盤を融合する学理の全方位的な探求、学術界と産業界さらには官との連携による産業技術・社会技術としての開発・育成を目指した議論の中で、本プロジェクトの活動を紹介した。

6.4 研究開発課題 4「システム化に向けたパワーモジュールおよび受動素子の開発」

キーテクノロジー	キーテクノロジー2:ワイドギャップ半導体を用いた超高感度センサ技術	
	キーテクノロジー3:高効率・大電力変換を可能とするパワーモジュール・受	
	動素子技術	
	キーテクノロジー4:パワー集積回路・パワープロセッシング技術と次世代シ	
	ステム応用	
	キーテクノロジー5:電力パケット化・ルーティング技術	
課題代表者	舟木 剛	
	大阪大学 工学研究科 教授	
実施期間	平成 30 年 10 月~令和 5 年 3 月	
共同研究機関	京都大学、大阪大学、信州大学、富山県立大学(R1年度迄)、参画企業6社	

6.4.1 マイルストーンと達成状況

課題	MS		
番号	番号	マイルストーン内容	達成状況
課題	MS	モジュールの動作温度としてジャン	従来の鉛フリーはんだに代わりダイ
4-1	4-1-1	クション温度 175℃以上を実現する	アタッチの接合材料に焼結銀を用
			いることで 175℃動作を実現。
	MS	モジュールの高速スイッチング化技	モジュール内部に DC リンクコンデン
	4-1-2	術として、10nH 以下の PN 端子間の	サを配置した設計とすることで, ルー
		ループインダクタンスを実現する	プインダクタンスを 10nH 未満まで低
			減した。
	MS	モジュールの熱サイクル信頼性とし	ブスバーの超音波接合により, 冷熱衝
	4-1-3	て 3000 サイクルを実現する	撃に対する信頼性を10000サイクル達
			成した。
課題	MS	球形磁性粉末の反磁界効果を利用し、	Fe 系アモルファス、ならびに Fe 系ナ
4–2	4-2-1	大電流磁界でも磁気飽和の影響が少	ノ結晶球形粉末圧粉磁心において、粉
		なく、500℃以上のキュリー温度を有	末の高圧プレス成形による残留歪み
		する鉄系磁性粉末と耐熱バインダの	を除去するポスト熱処理法と高耐熱
		採用によって 100kHz〜数 MHz 帯高耐	シリコーン樹脂バインダの採用に
		熱低損失リアクトルを実現する。低損	よって圧粉鉄心の大幅な低保磁力化
		失リアクトル用鉄心として Fe 系アモ	と 200℃耐熱性を達成し、100kHz~
		ルファス球形磁性粉末メタルコンポ	1MHz の広い周波数範囲でヒステリシ
		ジット鉄心、ならびに Fe 系ナノ結晶	ス損失とうず電流の低減を実現した。
		合金球形磁性粉末メタルコンポジッ	既存の多結晶系圧粉鉄心に対して大
		ト鉄心を開発する。	幅な低鉄損特性を達成した。

		,	,
	MS	金属磁性扁平粉末の形状磁気異方性	Fe 系ナノ結晶合金組成アモルファス
	4-2-2	を利用した扁平粉末積層構造を採用	薄帯を出発とする1~3μm厚のアモル
		して高透磁率化を図るとともに、	ファス扁平粉末作製技術を開発とす
		500℃以上のキュリー温度を有する磁	るとともに、シリコーンをバインダと
		性粉末と耐熱バインダの採用によっ	する 200℃耐熱 Fe 系ナノ結晶扁平粉
		てMHz帯高耐熱トランス用メタルコン	末積層コンポジット鉄心を開発した。
		ポジット鉄心を開発する。	ナノ結晶化ポスト熱処理温度によっ
			て比透磁率を 100~500 の範囲で制御
			可能であるとともに、MHz 帯鉄損最小
			となる条件で熱処理した鉄心はベン
			チマークであるNi-Znフェライトに対
			して大幅な低鉄損化を達成した。
	MS	高耐熱・低損失リアクトル鉄心・トラ	Fe 系アモルファス、ならびに Fe 系ナ
	4-2-3	ンス鉄心の試作・評価、ならびに電源	ノ結晶球形粉末圧粉磁心を採用した
		システムへの実装評価をとおして、連	チョッパコンバータ用リアクトルを
		携企業へ技術移管するとともに実用	試作し、1.5kW 出力 1MHz スイッチング
		化を進める。	昇圧チョッパコンバータに適用して
			95%以上の効率を達成した。
			Fe 系ナノ結晶扁平粉末積層コンポ
			ジット鉄心を採用したプレーナトラ
			ンスを試作し、Beyond MHz スイッチン
			グLLC共振コンバータ用リーケージト
			ランスへの適用可能性を実証した。
			以上の Fe 系メタルコンポジット鉄心
			について関連企業への技術移管を推
			進した。
課題	MS	電磁デバイス(インダクタ)の巻線に	インダクタとキャパシタとを複合し
4-3	4-3-1	磁束経路制御技術を適用する。インダ	た LC 複合素子を用いたπ型フィルタ
		クタとキャパシタを複合することで、	の実装面積と体積は、ディスクリート
		フット面積を低減したフィルタを開	部品で構成された従来フィルタ回路
		発する。	の1/2となった。
	MS	事份ごぶノフ / L ニヽ.フ チヘ ビ\ の光 値	出力 2.16 kW、回転速度 20,000rpm お
	MS 4-3-2	電磁デバイス(トランスなど)の巻線 に磁束経路制御技術を適用する。磁性	出刀 2.16 kW、回転速度 20,000rpm あ いて、磁性くさびを用いることで、総
	4-3-Z	に	損失を 255.5 Wから 241.5 Wに 14.0
		モータの磁性くさびに適用して、モー	
		タの効率向上、発熱低減を図る。	│温度上昇を 1~10 °Cの範囲で低減し │ +-
	<u> </u>		<i>t</i> =.

6.4.2 最終目標に対する成果の詳細

課題 4-1

イ) 高温動作

SiC パワーデバイスは高温動作による小型化において、放熱面積の減少や素子間の距離が小さくなることなどによる発熱密度の増加および熱干渉が懸念される。このため SiC パワーデバイスを一般的なパワーデバイスの動作上限温度 150° Cを超える温度で動作させるためには、SiC パワーデバイスのモジュール等の銅配線への接合における耐熱性能を改善する必要がある。現在接合材料として一般的に用いられている鉛フリーはんだは 220° C近傍に融点を持つため、 150° Cを超える動作温度での劣化が避けられない。本研究では高耐熱性 、高放熱性を両立したダイボンド材料として銀ナノ粒子に着目して検討を行った。SiC パワーデバイスを銅基板へ実装する際の実装条件(加圧力、加熱条件)が接合強度に与える影響について検討を行った。

焼結接合の状態は温度 T と圧力 P により変化する。このため無加圧で接合した場合図 4-1-2 に示すようにはんだ接合と同等の接合強度が得られなかった。このため図 4-1-1 に示す加圧焼結治具を開発した。開発した治具を用いることで図 4-1-2 に示すようにはんだ接合と同等の接合強度を得るとともに、耐熱性能を得ることができた。また鉛フリーはんだに比べて銀の材料としての熱抵抗は低く、また加圧により接合部の厚さを薄くすることができる。このため SiC パワーデバイスのジャンクションから放熱用のヒートシンクまでの熱抵抗を低減可能である。図 4-1-3 は熱抵抗と熱容量で表した過渡熱抵抗特性の測定結果である。ジャンクション-ヒートシンク間の熱抵抗ははんだの場合約 0.77K/W に対し焼結銀では約 0.52K/W となっており、約32%の熱抵抗減少を実現した。



図 4-1-1 開発した加圧焼結治具

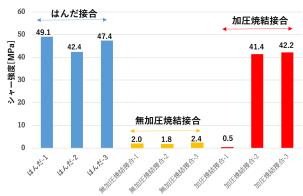


図 4-1-2 接合材料と接合条件別接合強度

パワーデバイスで生じた熱は、接合材料を介して基板の配線導体に伝達しヒートシンクに至る間に拡散する。複数のパワーデバイスが実装されたパワーモジュールでは、パワーデバイスを高密度実装した場合に拡散した熱の干渉が生じる。本研究では熱干渉を抑制するため、熱異方性材料のパワーモジュールへの適用について検討を行った。熱異方性材料として図 4-1-4 に示すグラファイトを銅薄板でサンドイッチしたヒートスプレッダーを適用した。グラファイトの 2 軸は高熱伝導を示すが 1 軸が低熱伝導となる異方性を持つ。また層状構造に起因する剥離を防ぐためのサンドイッチ構造をとっている。このヒートスプレッダーを用いて図 4-1-5 に示す複数のパワーデバイスを実装したヒートスプレッダー付モジュール基板を作成し、パワーデバイスの配置に対する熱干渉低減設計を行った。図 4-1-6 に試作したモジュール基板を示す。

図 4-1-7 は試作したモジュール基板の過渡熱抵抗より求めた構造関数である。図 4-1-7 (a) に示す銅のヒートスプレッダーに対して図 4-1-7 (b) に示すグラファイトを用いたヒートスプレッダーは熱干渉を低減することにより熱抵抗を 8%以上改善可能となった。

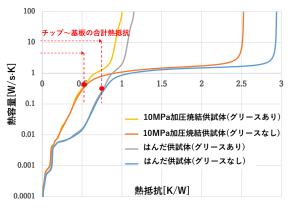


図 4-1-3 熱抵抗と熱容量で表した過渡熱抵抗特性

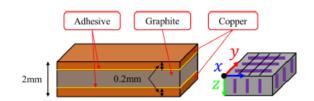


図 4-1-4 ヒートスプレッダー

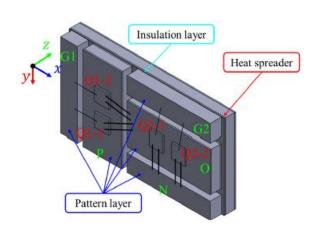


図 4-1-5 ヒートスプレッダー付モジュール基板

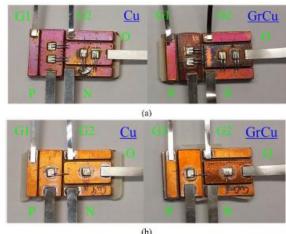


図 4-1-6 試作モジュール基板

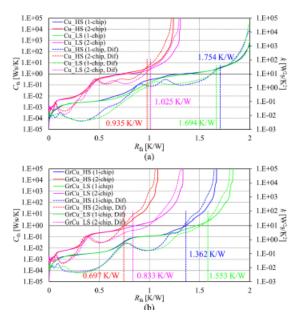


図 4-1-7 構造関数 (a)銅 (b)グラファイト

ロ) 低寄生インダクタンスモジュール

図 4-1-8 に開発した低寄生インダクタンスモジュールの構造を示す。本モジュール基板は DC リンクコンデンサをモジュールに内蔵できるようにセラミック絶縁板上に配線パターンを設計している。またモジュール裏面はヒートシンクに接続して放熱を得る構造となっているが、表面と裏面間の寄生静電容量を定量化して回路動作を評価するために、両者が一致するようなパターン設計となっている。開発したモジュールはトランスファー成型モールドを行い、図 4-1-9 に示す回路実装を行い評価を行った。

図 4-1-10 は電力変換回路としてフルブリッジ回路を構成して動作させた場合に直流電源側に生じる雑音端子電圧ノイズの評価系である。評価対象であるフルブリッジ回路に誘導負荷を接続している。T02474L を用いた回路での回路の寄生成分を抽出し等価回路としてあらわしたものが図 4-1-11 である。図 4-1-12 は雑音端子電圧の実測値およびモデルを用いたシミュレーションによる結果である。寄生成分を考慮することで雑音端子電圧に現れるノイズ成分のピーク周波数および値が一致するようになった。これにより電力変換回路動作において生じるノイズの低減設計が可能となった。

DC Link Capacitor

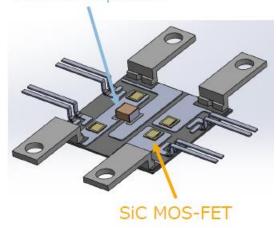


図 4-1-8 モジュール構造

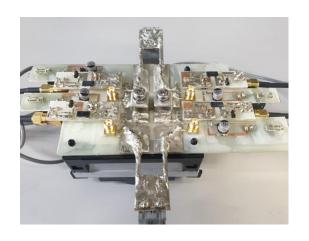


図 4-1-9 モジュール実装状態

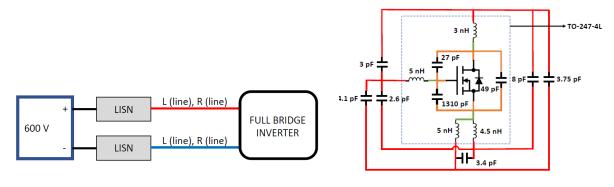


図 4-1-10 ノイズ評価系

図 4-1-11 回路寄生成分等価回路

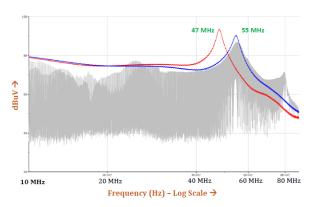


図 4-1-12 雑音端子電圧路

ハ)ブスバー接合信頼性

パワーモジュールへの配線として使用する銅ブスバーとモジュール基板銅箔は通常はんだ接合される。ただし高温動作をさせる場合、銅とはんだの温度に対する線膨張係数が異なることから、温度変化に対して応力ストレスが発生し、温度サイクルによって疲労破壊に至る懸念がある。このため接合材を用いないことで温度膨張係数の違いによる応力ストレスをなくすことを目的として、超音波で接合する方式を開発してきた。図 4-1-13 に示す温度プロファイルの熱サイクル試験を継続実施した。既に 3000 サイクルの寿命は達成しており、今回 10000 サイクルの熱衝撃に対する寿命を実現した。

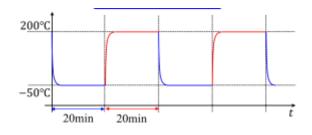


図 4-1-13 熱サイクル試験プロファイル

課題 4-2

a. 目標と研究開発の内容、ならびに実施体制

ワイドバンドギャップパワー半導体の利点を活かす 100kHz〜数 MHz 帯低損失・高耐熱メタル コンポジット鉄心を開発する

- (1) 高耐熱バインダ/メタル系軟磁性粉末コンポジットにより200℃の鉄心耐熱性を実現する。
- (2) メタル系軟磁性球形粉末の反磁界効果の利用により、リアクトル鉄心に適するギャップレ ス低透磁率・恒透磁率・低損失コンポジット材料を開発する。
- (3) メタル系軟磁性扁平粉末の形状異方性の利用により、トランス鉄心に適する高透磁率・低 損失コンポジット材料を開発する。
- (4) 参画企業A社と連携し、開発鉄心をコンバータ/インバータシステムに実装し評価する。

(1) 100kHz~数 MHz 帯低損失リアクトル用 Fe 系メタルコンポジット鉄心の開発 (MS4-2-1)

本研究開発テーマでは、既存の圧粉鉄心を大きく凌駕する低鉄損化を実現するとともに、べ ンチマークである Mn-Zn フェライトの致命的な欠点である熱暴走リスクのないリアクトル用 Fe 系メタルコンポジット鉄心を開発した。

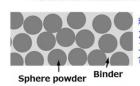
·Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心に対する低保磁力化プロセスの開発によっ て既存圧粉鉄心を大幅に上回る低鉄損化と 200℃耐熱性を達成

Fe 系メタルコンポジット鉄心 (磁性粉末表面に 樹脂バインダを被覆し、プレス成形/硬化して作 製される圧粉鉄心)においては、粉末プレス成形 時の残留歪みによって鉄心保磁力が大きい(ヒス テリシス損が大きい)欠点がある。特に、高い飽 和磁束密度が期待される Fe 系合金磁性粉末は一 般に大きな磁歪定数を持つため、残留歪みが原因 となって保磁力が著しく増大する。

本研究では、結晶磁気異方性の消失によって保 磁力の低減(ヒステリシス損の低減)と、Fe-Si や Fe-Ni などの結晶質合金の 2~3 倍高い電気抵抗 率によってうず電流損の低減が期待されるアモ ルファス磁性合金に着目し、回転水流式アトマイ ズ法 (SWAP 法; Spinning Water Atomization Process) Fe-Si-B-C-Cr 系アモルファス合金球形 粉末を Fe 系メタルコンポジット鉄心の出発素材 に採用した。100kHz~数 MHz の周波数をターゲッ

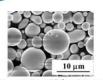
Fe-Si-B-C-Cr系アモルファス合金SWAP粉末

- ·飽和磁束密度B。; 1.3 T
- ・電気抵抗率 ρ ; 1.2 $\mu\Omega$ ・m
- ・磁歪定数 λ_s ; 15 ppm
 - ⇒ 外部応力による磁気弾性エネルギーを介し 保磁力が増大 (ヒステリシス損の原因)
 - ⇒残留歪みの開放が重要



粉末占積率を高くする ために、D₅₀の異なる 二種類の粉末を最適配





D₅₀; 10µm粉末; 80 wt.%

D₅₀; 3.5µm粉末; 20 wt.% 図 4-2-1 Fe 系アモルファス合金粉末の物性 値、コンポジット鉄心の高密度化

トとし、さらに図 4-2-1 に示すように、コンポジット鉄心の高密度化を図るための粉末サイズ として 10μ m と 3.5μ m の二種類を選択し、両者の配合割合とコンポジット鉄心密度の関係を吟 味した結果、10μm粉末:3.5μm粉末=80:20 重量%配合比率で密度最高となった。

図 4-2-2 は Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心の作製法を示すものである。 鉄 心中のうず電流を個々の磁性粉末粒子内に閉じ込めるために粉末表面に高抵抗の皮膜処理が必 要であり、本研究では大気中熱処理によって生成される熱酸化皮膜を採用している。熱酸化は Fe 系アモルファス合金の結晶化温度(約 450℃)未満の 400℃・3 時間行うことで厚さ 10nm の 緻密なガラス質膜(Feと Siの酸化物から構成される)が形成される。エポキシ前駆体、金型か らの離型剤、金型内での粉末流動を促進して均一化する潤滑剤の混合による造粒工程を経た粉 末を高圧プレス後、従来はエポキシバインダ樹脂の硬化と、エポキシ樹脂が分解しない程度の

低温(200°C程度)で歪取り熱処理を行って最終製品としている。しかしながら、200°C程度の熱処理では残留歪みの除去は不十分である。本研究では高圧プレスによって発生する残留歪みを開放するポストプロセスを開発した。Fe 系アモルファス合金を結晶化温度(約 450°C)以上で熱処理すると結晶化と結晶粒の成長によって結晶磁気異方性が発現し保磁力が著しく増大するため、残留歪み開放ポストプロセスでは結晶化しない 400° Cで Ar 不活性ガス雰囲気熱処理し、鉄心内の残留歪みを開放して低保磁力化した。 400° Cの高温熱処理でエポキシ樹脂が熱分解/ガス化して鉄心内に空隙が生じるが、減圧雰囲気でシリコーン含侵し、熱硬化することで樹脂バインダが 200° C耐熱性を有するシリコーンに置き換わる。また、シリコーンバインダは機械的柔軟性を持つため粉末保磁力にも影響しない。

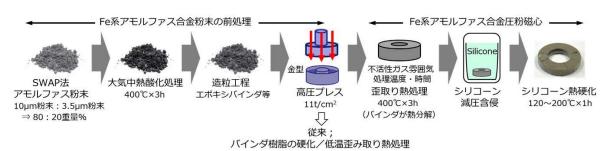
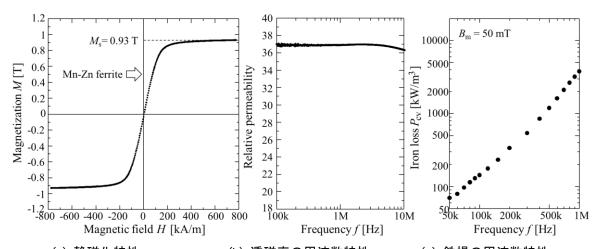


図 4-2-2 100kHz~数 MHz 帯リアクトル用 Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心の作製



(a) 静磁化特性 (b) 透磁率の周波数特性 (c) 鉄損の周波数特性 図 4-2-3 100kHz~数 MHz 帯リアクトル用 Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心の磁気特性

図 4-2-3 に Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心の磁気特性を示す。飽和磁化は 0.93T であり、Mn-Zn フェライトの約 1.9 倍である。比透磁率は約 37 であり、数 MHz の周波数 まで一定であった。ここでは詳細を図示しないが、開発鉄心と既存の多結晶系圧粉鉄心の鉄損を比較した結果、50kHz~1MHz の広い周波数範囲で開発鉄心は既存圧粉鉄心に対して大幅な低鉄損化を達成した。

室温⇒130°C⇒室温の熱サイクル試験(1時間/サイクル×100サイクル=100時間)後の特性変化はなく、シリコーンバインダが鉄心の熱膨張/収縮を吸収し、懸念された熱サイクルによるクラックは皆無であった。

Fe 系メタル系コンポジット鉄心はフェライト系材料に比べてキュリー温度が高く(フェライト系は 300℃未満、メタル系では 550~600℃)、フェライト系におけるホプキンソン効果による 熱暴走のリスクがなく、バインダの高耐熱化によって高温動作に対応できる。本研究で開発した粉末プレス後のポストプロセスによる高耐熱シリコーン樹脂置換によって 200℃の耐熱性を 実現した。

·Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心の開発により、さらなる低鉄損化を達成

前述の Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心を上回る低鉄損化を実現するため、Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心を開発した。Fe 系ナノ結晶合金粉末は Fe-Si-B-Nb-Cu 組成の SWAP 法アモルファス粉末を作製後にナノ結晶化熱処理した粉末として上市されている。ナノ結晶化熱処理によって、図 4-2-4 に示すような Fe-Si ナノ結晶主相、主相の粒成長を抑制する Cu ナノ粒子、Nb-B (-Fe) アモルファスマトリックス相からなる微構造を発現し、

ナノ結晶主相とアモルファスマトリックスの正負反転する磁歪によって優れた低磁歪特性(典型的には、磁歪定数 λ_s <1 ppm)を有し、ナノ結晶組織由来のランダム磁気異方性による結晶磁気異方性の消失と相まって、Fe 系アモルファス合金粉末を上回る低保磁力特性を有する。しかしながら、ナノ結晶化熱処理済みのFe-Si-B-Nb-Cu 粉末を用い、通常の圧粉プロセスでコンポジット鉄心を作製した場合、低磁歪と言えども高圧プレスによる強大な応力によって保磁力が大きく増大し、期待したほどの低鉄損を実現することが困難であった(令和3年度報告書)。そこで、ナノ結晶化前のFe-Si-B-Nb-Cu 組成アモルファス粉末を出発素材に採用し、Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心の作製法(図 4-2-2)を参考に鉄心作製法を改良した。

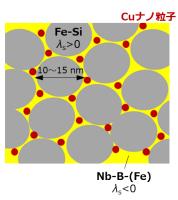


図 4-2-4 Fe-Si-B-Nb-Cu 系 ナノ結晶合金の微構造 (Fe-Si 主相と Nb-B-(Fe)アモル ファスマトリックス相の正負磁歪 キャンセルによって低磁歪を実現)

図 4-2-5 は Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄

心の作製法を示すものであり、粉末プレス後のポスト熱処理によって残留歪みの開放とナノ結晶化を同時に行うことが Fe 系アモルファス合金粉末コンポジット鉄心との違いである。

図 4-2-6 に Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心の磁気特性を示す。飽和磁化 M は Mn-Zn フェライトの約 1.8 倍の 0.91T であった。比透磁率は約 33 で 10MHz 近くまでほぼ一定であるが、Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心の透磁率に対して約 10%低下している。Fe 系アモルファス合金粉末の粉末粒径分布との違いから $10\,\mu$ m 粉末と $3.5\,\mu$ m 粉末の最適配合比率(80:20 重量%)がずれている可能性があり、配合の最適化によって鉄心の飽和磁化と透磁率を向上できる。Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心の鉄損は広い周波数範囲で Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心より小さく、代表値として 1MHz の鉄損は約 58%となり、既存の圧粉鉄心に対しても圧倒的な低鉄損化を達成した。

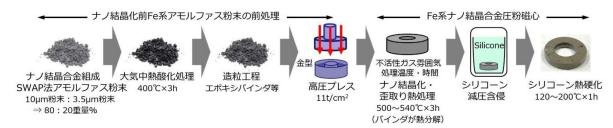
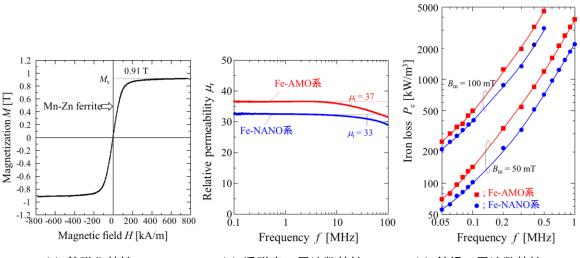


図 4-2-5 100kHz~数 MHz 帯リアクトル用 Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心の作製



(a) 静磁化特性 (b) 透磁率の周波数特性 (c) 鉄損の周波数特性 図 4-2-6 100kHz~数 MHz 帯リアクトル用 Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心の磁気特性

・プロトタイプリアクトルをコンバータ/インバータに実装して評価

粉末焼結部品の開発・製造・販売を行っている関連企業B社と協力して Fe 系メタルコンポジット鉄心リアクトルを試作し、高周波昇圧チョッパコンバータ/60Hz 出力 PWM インバータに実装して評価した。

図 4-2-7 は参画企業 A 社が新幹線電装品の大幅な小型軽量化を目指して上市を計画しているコンバータ/インバータシステム(AC60Hz 出力; 1.5kW、目標総合効率 90%)を示すものであり、DC100V 入力ーDC200V・8.3A(1.67kW)出力 1MHz スイッチング昇圧チョッパ DC-DC コンバータと DC200V 入力ー60Hz・100V・15A(1.5kW)出力 700kW-PWM インバータで構成される。1MHz スイッチング昇圧チョッパ DC-DC コンバータの直流リアクトルと 700kHz-PWM インバータ出力側 LC フィルタ用インダクタに Fe 系アモルファスコンポジット鉄心リアクトルを適用した。図中には直流リアクトルとフィルタインダクタの外観ならびに重量、電気特性を併記している。直流リアクトルのインダクタンスは約 2.9 μ H で自己共振周波数は約 40MHz であり、コンバータのスイッチング周波数 1MHz における Q 値は 225 であった。また、40A 直流重畳電流時のインダクタンスの低下 20%の目標に対し、試作リアクトルでは半分の 10%低下を達成し、優れた直流重

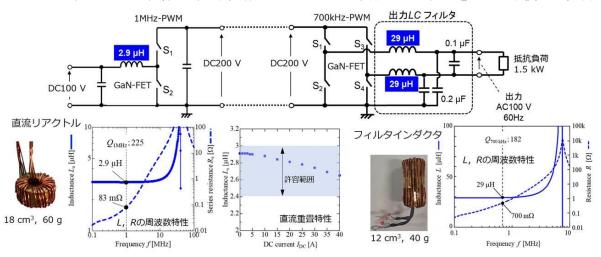


図 4-2-7 参画企業 A 社が新幹線電装品として上市を目指している小型軽量コンバータ/インバータ システム(AC60Hz 出力; 1.5kW、目標総合効率 90%)の構成

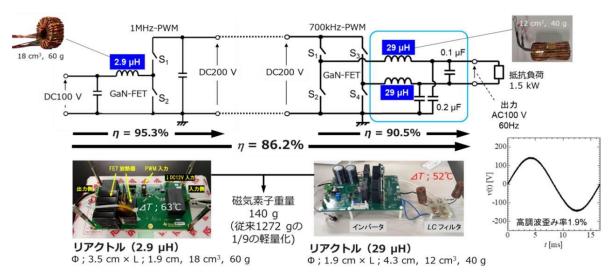


図 4-2-8 コンバータ/インバータプロトタイプを試作(GaN-FET ハーフブリッジ、昇圧チョッパ DC-DC コンバータの直流リアクトルと PWM インバータ出力側 LC フィルタ用インダクタに Fe 系アモルファスコンポジット鉄心リアクトルを実装)

置特性を実現した。また、LC フィルタ用インダクタのインダクタンスは約 29μ H、自己共振周波数は約 8MHz、PWM インバータのキャリア周波数である 700kHz の Q 値は 182 であった。

図 4-2-8 はコンバータ/インバータのプロトタイプの外観と諸特性の評価結果を示すものである。直流リアクトルとフィルタインダクタは自然空冷であり、図中の $\triangle T$ は定格出力時の温度上昇を示している。定格出力時のリアクトルならびにインダクタの温度上昇 $\triangle T$ は、それぞれ、 63° C、 52° Cであり、鉄心の耐熱温度 200° Cから周囲温度 140° C近くまで許容できると予想される。コンバータ/インバータの総合効率は 86.2° であり、定格 1.5kW 出力時 AC60Hz 出力電圧の高調波歪み率は規格(5%以下)をクリアし、1.9%を達成したことでインバータ用 LC フィルタインダクタとしても問題ないことを確認した。

今後の競争領域への展開では、Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心よりさらに低鉄損である Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心を直流リアクトルならびにフィルタインダクタに採用することで磁気素子損失の低減を図り、さらにコンバータ/インバータ主スイッチの見直し(試作品は GaN-FET を採用、SiC-FET を含めてデバイスを最適に選択)によって効率目標 90%以上を達成する計画である。

現在、参画企業 A 社が新幹線電装品向けに上市しているコンバータ/インバータシステムでは主スイッチに I GBT を採用し、50kHz 前後のスイッチング周波数で動作させているが、GaN-FET の採用によってスイッチング周波数を高周波化し、本研究で開発した Fe 系メタルコンポジット鉄心の採用によって磁気素子を従来比で 1/9 まで軽量化されることが実証された。

(2) MHz 帯トランス用 Fe 系メタルコンポジット鉄心の開発(MS4-2-2)

本研究開発テーマでは、MHz 帯鉄心のベンチマークである Ni-Zn フェライトを凌駕する低鉄 損特性と熱暴走リスクの少ない MHz 帯トランス用高透磁率 Fe 系メタルコンポジット鉄心を開 発した。

・Ni-Zn フェライトを大幅に上回る MHz 帯低鉄損特性を有する Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層 コンポジット鉄心を開発

MHz 帯トランス用の高透磁率 Fe 系メタルコンポジット鉄心を開発するにあたっては、磁性粉末を 1~数 μ m に扁平化し(うず電流損の抑制)、これらを樹脂バインダとともに水平積層した構造をとることで扁平磁性粉末の形状磁気異方性を利用した扁平面内高透磁率を実現できる。

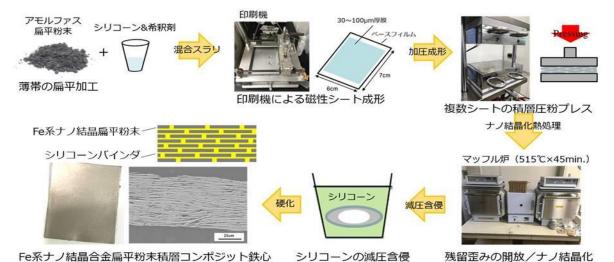


図 4-2-9 MHz 帯トランス用 Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジット鉄心の作製

図 4-2-9 は Fe 系ナノ結晶合金組成(Fe-Si-B-Nb-Cu)アモルファス急冷薄帯を出発とする Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジット鉄心の作製法を示したものである。本方法は図 4-2-5 の Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心の作製方法にもとづいて着想したものであり、振動ミルやアトライタミルによる脆化処理アモルファス薄帯の扁平加工で大きな歪みが残留し、これを圧粉プロセスのポスト熱処理で累積残留歪みの開放とナノ結晶化を同時に行うことで低保力化・低鉄損化する。

図 4-2-10 は Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジット鉄心の磁気特性を示したものである。圧粉後のポスト熱処理温度によって鉄心透磁率が大きく変化し、530 $^{\circ}$ C熱処理で約 500 の比透磁率が得られるが、560 $^{\circ}$ C熱処理条件が鉄損最小となり、この時の比透磁率は約 150 まで低下するものの、10 MHz 近くまで一定となっている。同図 (b) は試作鉄心の鉄損をベンチマークである Ni -Zn フェライト(67 material)と先行開発されたセンダスト(Fe-Si-AI)系扁平粉末積層コンポジット鉄心と比較したものである。Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジット鉄心の 30 MHz、20 mT の鉄損は Ni-Zn フェライトの約 30 %、センダスト扁平粉末積層コンポジット鉄心の約 40 %であり、Ni-Zn フェライトの約 2 倍 であった。

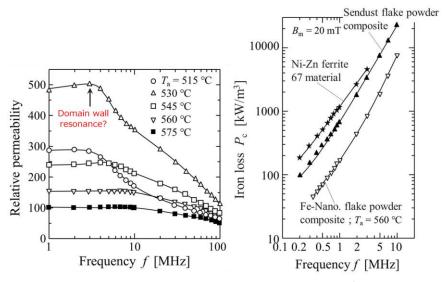
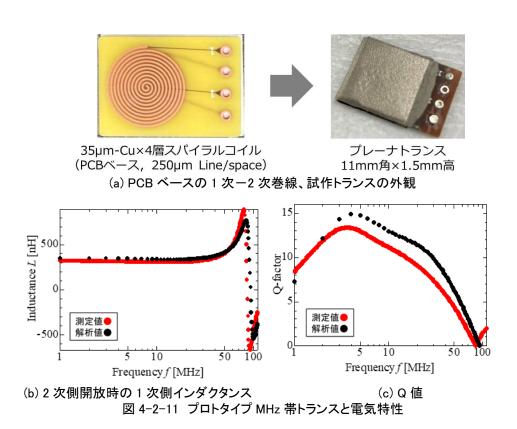


図 4-2-10 MHz 帯トランス用 Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジット鉄心の磁気特性

・プロトタイプ MHz 帯トランスの試作

数 W~10W 程度の出力を有する MHz スイッチング LLC 共振コンバータ用に、MHz 帯で最も鉄損の小さい比透磁率 150 の Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジット鉄心を用いてプレーナトランスを試作した。図 4-2-11 は試作トランスの構成と外観、ならびに諸特性を示したものである。 $35\,\mu$ m 厚銅導体×4 層 PCB を用いて 1 次-2 次巻線(ともに 11 ターン)を作製し、スパイラル巻線を上下から磁性体で挟み込む外鉄構造を採用した。プレーナトランスの磁気回路は $3.5\,\mu$ m 径 Fe-Si 球形粉末コンポジットシート(厚さ $100\,\mu$ m)と $100\,\mu$ m 厚の Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジットシート鉄心によるハイブリッド構造を採用した。 $3.5\,\mu$ m 径 Fe-Si 球形粉末コンポジットシートは本研究とは別に、シート成形メーカーと共同開発したもので、 150° Cを境に低温側で熱可塑性、高温側で熱硬化性を持ち、真空中ホットプレスラミネーションによってコイル導体間のスペース部にコンポジット材料を充填できるとともに導体段差を平坦化できる。PCB 巻線の上下を Fe-Si 球形粉末コンポジットシートで覆った後、上下表面に Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジットシート鉄心を配置してプレーナトランスが完成する。

試作トランスは 11mm 角×1.5mm 高であり、図 4-2-11(b)、(c)に示すように、2 次側巻線開放時の 1 次インダクタンスは約 320nH であり、50MHz 近くまで一定である。また、Q 値は 1.3MHz ~17MHz まで 10 以上の値を示す。ここでは図示しないが、1 次-2 次巻線間の結合係数は 0.85であり、漏れインダクタンスを利用することで Beyond MHz スイッチング LLC 共振コンバータにおける共振用固定インダクタを省略できる。



(3) 連携企業への技術移管と実用化 (MS4-2-3)

図 4-2-13 に Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心および Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心の研究開発の実施体制を示す。焼結部品メーカのB社とは NDA 締結の上、コンポジット鉄心の開発を進めてきた。B社はオリジナル商品としての金属焼結部品の他に、OEM 品として圧粉磁心を大手部品メーカに納入している。本研究による Fe 系メタルコンポ

ジット鉄心が最終的にB社のオリジナル品として上市されるか、OEM 品として上市されるかは、 現在のところ未定である。

参画企業A社は既に上市している新幹線電装品用コンバータ/インバータシステムの大幅な小型軽量化を目的として、本研究のFe 系メタルコンポジット鉄心の直流リアクトルおよびフィルタインダクタへの応用、ならびにコンバータ/インバータへの実装評価を信州大学と連携して研究開発を進めてきた。コロナ禍や中国市場の影響、さらにはコンバータ/インバータの設計仕様の見直しなどが理由で 2022 年度以内の上市は見送られることとなった。

今後の競争領域への展開では、参画企業A社、連携企業B社との連携体制を2023年度以降も継続し、新幹線電装品用コンバータ/インバータシステムの製品化に寄与していく予定である。



課題 4-3

a. LC 複合素子

• 信州大学

図 4-3-1 は LC 複合素子の構造図であり、薄膜導電性高分子電界キャパシタの外周を覆うように磁性材料が配置されている。薄膜キャパシタの電極(正極)をインダクタの巻線として利用することで、キャパシタとインダクタを1つの素子としてパッケージングした。

図 4-3-2 に LC 複合素子の等価回路図を示した。LC 複合フィルタは π 型二次ローパスフィルタを構成している。

図 4-3-3 にディスクリート部品で構成された従来のフィルタ回路と LC 複合素子で構成されたフィルタ回路を示した。

表 4-3-1 に示したように、従来のフィルタ回路と LC 複合フィルタ回路の実装面積は、それぞれ、 224mm^2 と 112mm^2 であり、従来のフィルタと比較して LC 複合素子の実装面積は 1/2 となった。さらに、体積はそれぞれ 1,344 mm^3 と 638 mm^3 であり、LC 複合素子を用いることで体積も 50%削減した。

図 4-3-4 は π 型フィルタのゲイン特性で、LC 複合素子は従来のフィルタ回路のゲイン特性と同等の性能(100 kHz 以下の範囲)が得られた。

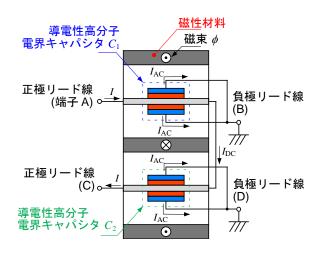


図 4-3-1 LC 複合素子の構造図

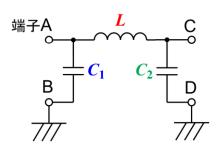
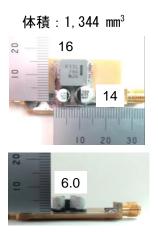


図 4-3-2 LC 複合素子の等価回路



体積: 638 mm³

8.2

13.7

(a) 従来のフィルタ回路の外観(単位: mm) (b) LC 複合素子の外観(単位: mm) 図 4-3-3 従来のフィルタ回路と LC 複合素子の外観

表 4-3-1 従来のフィルタ回路と LC 複合素子の実装面積の比較

名称	実装面積 A (mm²)	厚さ <i>t</i> (mm)	体積 √(mm³)
従来のフィルタ回路	224	6. 0	1, 344
LC 複合素子	112	5. 7	638

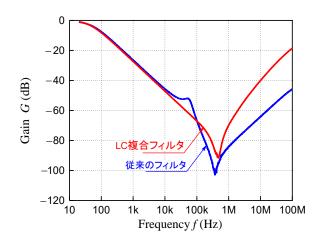


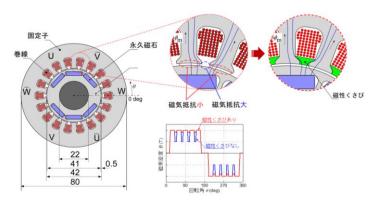
図 4-3-4 従来のフィルタと LC 複合フィルタのゲイン特性の比較

b. 埋込磁石形同期モータ

・信州大学

図 4-3-5 に磁性くさびによる空間高調波の低減効果を示した。図(a)は磁性くさび埋め込み磁石形同期モータの構造である。定子外径 80 mm、回転子外径 41 mm のインナーロータモータであり、極数 6、スロット数 18 であり、出力 2.2 kW、回転数 30,000 rpmである。図(b)にギャップ磁東密度を示した。スロット開口部に磁性くさびを配置することで固定子と回転子との間のギャップに生ずる高調波を低減する。

平均粒径 $30 \mu m$ の Fe-Si-AI (センダスト) 磁性粉と高分子材料を混合した後、スロット開口部に注入して磁性くさびとした。図 4-3-6 にモータの駆動電流をパメータとする埋込磁石形同期モータのトルク特性の実測値を示した。磁性くさびを用いることで、電流 I=19.8 A でトルクリプルを 23.8 %から 17.1 %に 6.7 %低減、電流 I=12.3 A でトルクリプルを 25.6 % から 17.0 %に 8.6 %低減、電流 I=8.4 A でトルクリプルを 29.0 %から 18.3 %に 10.7 %低減した。



(a)モータの構造(単位:mm) (b)ギャップ磁東密度分布 図 4-3-5 磁性くさびによる空間高調波の低減効果

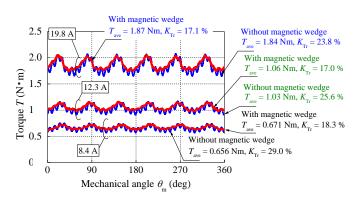


図 4-3-6 モータの駆動電流をパラメータとする埋込磁石形 同期モータのトルク特性の実測値(回転数:5 rpm)

図 4-3-7 に損失特性を示した。 同図は出力 2.16 kW で回転速度 20,000rpm における損失の比較で ある。磁性くさびを用いることで、 総損失を 255.5 W から 241.5 Wに 14.0 W(5.5 %)低減した。電磁界解 は、ステータの渦電流損失が 10.4 %増加し、ロータの渦電流損失が 48.8 %低減した。これは磁性 くさびを用いることで、ステータ りよが 48.8 %低減した。これは磁性 くさでを用いることで、ステータ損失が増加すると し、ステータ損失が増加すると し、ステータ損失が増加するが抑制

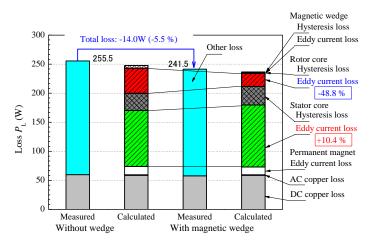


図 4-3-7 埋込磁石形同期モータの損失特性 (出力 2.15 kW、回転数: 20,000 rpm)

されて、ロータ表面の渦電流損が抑制されたためである。

磁性くさびを用いた永久磁石の温度上昇の低減効果を確認するために、永久磁石にサーモラベルを貼り付けた。負荷試験後にモータを分解してサーモラベルを確認したところ、磁性くさび無しのモータは 130~140 °Cの間、磁性くさびを用いたモータは 120~130 °Cの間であり、永久磁石の温度を 1~10 °Cの範囲で低減した。これは、磁性くさびによってスロット高調波に起因する変動成分が抑制され、ロータに発生する渦電流損失が減少し、発熱が抑制されたことを意味している。

6.4.3 プロジェクト終了後の活動方針

課題 4-1

イ)高温動作(大阪大学)

- ・最終目標の達成見込みとプロジェクト終了後の社会実装に向けた活動方針 はんだ接合に代わる焼結銀接合により175℃での高温動作は可能となった。
- ・競争領域での共同研究への展開の計画 焼結銀接合は接合強度を得るためには加圧が必要であることから生産性の問題がある。 焼結銅接合などの加圧を必要としない材料を含めた共同研究先を探索する。

口) 低寄生インダクタンス (大阪大学,参画企業 E)

- ・最終目標の達成見込みとプロジェクト終了後の社会実装に向けた活動方針 目標として設定したパワーモジュール配線の寄生インダクタンス 10nH は達成済。 今後は社会実装に向け、生産性を考慮した構造設計の展開を図る。
- ・ 競争領域での共同研究への展開の計画
 - OI 機構への移行予定はないが、EMI ノイズの定量評価を含めた共同研究への展開を図る。

ハ)ブスパー接合信頼性(大阪大学)

- ・最終目標の達成見込みとプロジェクト終了後の社会実装に向けた活動方針 当初の目標であった 3000 サイクルは達成済み。10000 サイクルで試験終了。故障は無し。
- ・競争領域での共同研究への展開の計画 ブスバー以外の接合への適用を含めて共同研究先を探索する。

課題 4-2

(1) 100kHz~数 MHz 帯低損失リアクトル用 Fe 系メタルコンポジット鉄心、コンバータ/インバー タシステムへの実装 (MS4-2-1、MS4-2-3)

リアクトル用 Fe 系メタルコンポジット鉄心については当初の目標を達成し、コンバータ/インバータシステムでの実装評価によって有効性を実証した。

Fe 系アモルファス合金球形粉末コンポジット鉄心および Fe 系ナノ結晶合金球形粉末コンポジット鉄心を用いた EE 型構造プレーナリアクトル/インダクタの 0 次試作を終え、今後は参画企業 A 社、連携企業 B 社と連携して、新幹線電装品用コンバータ/インバータシステムへの実装・評価、ならびに製品化に寄与していく予定である。(01 機構への移行予定なし。)

(2) MHz 帯トランス用 Fe 系メタルコンポジット鉄心の開発 (MS4-2-2)

Fe 系ナノ結晶合金扁平粉末積層コンポジット鉄心を開発し、Ni-Zn フェライトを大幅に上回る MHz 帯鉄損特性を達成した。また、プレーナトランスを試作して Beyond MHz スイッチング LLC 共振コンバータへの適用可能性を提示した。

本研究の成果はパワエレクトロニクス主回路電流検出シャント抵抗モジュール用の超小型絶縁電源への適用を目的とする電子部品メーカとの共同研究へと繋がった。(0I機構への移行予定はない。)

課題 4-3

- a. LC 複合素子 (信州大学)
- ・最終目標の達成見込みとプロジェクト終了後の社会実装に向けた活動方針 最終目標である、LC 複合フィルタは、従来のフィルタ特性と同等でありながら、体積 1/2 の 小型化を実現した。
- ・競争領域での共同研究への展開の計画 更なる小型化と特性向上を図るために、共同研究を継続する予定である。 (01 機構への移行予定なし。)
- b. 埋込磁石形同期モータ (信州大学)
- ・最終目標の達成見込みとプロジェクト終了後の社会実装に向けた活動方針 最終目標である、トルクリプル低減、効率の向上、発熱の抑制を実現した。
- ・競争領域での共同研究への展開の計画 スピンドルモータでは、振動の抑制も重要であり、この観点からも共同研究を継続する。 (01 機構への移行予定なし。)

6.4.4 その他

特になし

6.5 研究開発課題5「高信頼性パワーモジュール用基板の開発」

キーテクノロジー	キーテクノロジー3:高効率・大電力変換を可能とするパワーモジュール・受
キーテクノロシー	動素子技術
	永山 富男
課題代表者	京都市産業技術研究所 研究室 知恵産業融合センター
	アライアンス推進グループ グループ長
実施期間	平成 30 年 10 月~令和 5 年 3 月
共同研究機関	京都大学、京都市産業技術研究所、参画企業 2 社

6.5.1 マイルストーンと達成状況

課題	MS	マイルストーン内容	達成状況
番号	番号	イイルストン内各	连风状况
課題 5	MS5-1	モジュール用セラミックス絶縁基板 上への熱膨張制御合金の成膜条件 検討	次世代パワーモジュールの高温動作を可能にするため、新たに耐熱性めっきプロセスを開発した。モジュール用セラミックス絶縁基板と熱膨張制御合金メタライズをハイブリッド化させ、冷熱衝撃耐性を向上させたセラミックス回路基板を作製した。量産技術の確立のためのめっき条件検討を行い、研究開始当初と比べ、めっき速度が約2倍に向上した。
	MS5-2	熱膨張係数3~8ppm/Kに制御するためのメタライズ膜の結晶構造制御密着性向上のための微細構造・組織評価	熱処理を伴う結晶構造制御によって、メタライズ膜の熱膨張係とした。これらの値はというを発展の動物である。熱応力にはである。熱応力が高いである。熱応力が高いでは、現行の Ni を主成・かがればいった。を対したが、現行の Ni を主成・かがればいったが、現行の Ni を主成・かがればいったが、現に比が、パワーがをといるを表したが、のかがればいーデをといるを発したが、ががればいーデをといるを発したが、ががれば、いったが、のかがれば、いったが、は、下でののがは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、いるにはいいのでは、ないのではないのでは、ないのではないのではないのでは、ないのではないのではないのではないのではないのではないのではないのではないのでは

MS5-3	ヒートサイクル試験 -40℃~250℃	新規 Fe-Ni 合金メタライズ、および比
	の条件下においてクラックや剥離が	較として従来技術の Ni-P 合金メタラ
	認められない基板の作製技術の確立	イズを施したパワーデバイス回路基
	(MS5-1, MS5-2 の結果を基に)	板について、冷熱サイクル試験を行っ
		た。高温動作性に優れる SiC 半導体の
		利用温度範囲を想定した-50℃~
		250℃での試験の結果、Ni-P 合金メタ
		ライズ膜にはクラックが生じ、この温
		度範囲では、耐熱性が不十分であるこ
		とが分かった。他方、新規 Fe-Ni 合金
		メタライズを行った回路基板は、1000
		サイクル後においてもメタライズ膜
		にはクラックや剥離の発生は認めら
		れず、耐熱性に優れた膜であることが
		示された。

6.5.2 最終目標に対する成果の詳細

回路用銅板とセラミックス基板の接合には、従来技術では、活性ろう金属法を用いている。 活性ろう金属の熱膨張係数は 10ppm/K 以上であり、一方セラミックス基板の熱膨張係数 3~8ppm/K であり、両者の値は大きく乖離している。その結果、接合時に 1000℃近くの高温環境下に曝された後、冷却過程において熱膨張差に起因した大きな歪みが回路と基板との間に生じることが問題となっている。

そこで、低温で反応させることが出来るウェットプロセスの活用が有望視されている。競合技術で使用される部材はNi-P合金であり、その熱膨張係数は12ppm/Kと大きいため、デバイスON/OFF に伴う冷熱サイクルによる回路-基板間の歪みの蓄積やクラックの生成が懸念されている。われわれは、本事業において、低温成膜可能なウェットプロセスを用い、かつセラミックス基板と同等の熱膨張係数を有することで接合信頼性の向上が期待される、新規ウェットプロセスの開発を行った。

課題 5-1

・<u>次世代パワーモジュールの高温動作を可能にするための新規開発メタライズ膜の開発とその量</u> 産技術の確立

Fe-Ni 合金は合金組成に依存して熱膨張制御が可能なため、これら合金膜を成膜するためのめっき条件の探索を行った。その結果、Fe 含有率 $0 \sim 70 \text{wt}\%$ の Fe-Ni 合金皮膜をセラミックス基板上に無電解めっき法で作製することが可能となった(図 5-1-1)。さらに、新規メタライズ膜の量産技術を確立するためのめっき条件の検討を行った結果、研究開始当初と比べめっき速度が約 2 倍に向上した(図 5-1-2)。

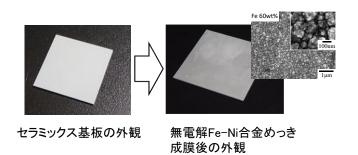


図 5-1-1 セラミックス基板上に施した新規開発膜の外観と SEM 画像

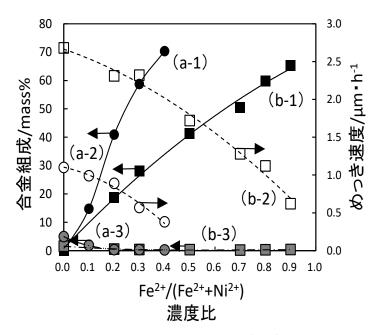


図 5-1-2 新規開発膜の合金組成とめっき析出速度に及ぼすグリシン添加の影響

- (a-1)グリシン無添加時に得られた膜の Fe 含有率 (a-2)グリシン無添加時のめっき析出速度
- (a-3)グリシン無添加時に得られた膜の B 含有率
- (b-1)グリシン添加時に得られた膜の Fe 含有率 (b-2)グリシン添加時のめっき析出速度
- (b-3)グリシン添加時に得られた膜の B 含有率

課題 5-2

新規開発膜の熱膨張係数の制御

新規ウェットプロセスから得られた Fe-Ni 合金膜の熱膨張係数を評価した結果、8ppm/K と低熱膨張合金としては比較的大きな熱膨張係数を示した。そこで、熱処理により膜の結晶構造を制御することによって、図 5-2-1 に示すように、目標値である熱膨張係数 $3\sim8ppm/K$ に制御することができた。

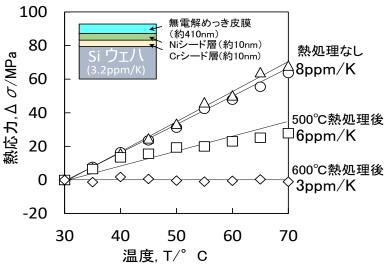


図 5-2-1 新規開発膜の熱膨張係数

・新規開発膜の密着性向上

本事業で開発しているウェット法による新規メタライズプロセスを用いた場合、膜/セラミックス基板との密着性不良が生じることが判明した。そこで、さらにめっき条件を探索することで、セラミックス基板上に作製した Fe-Ni 合金メタライズ膜について、良好な密着性を得ることができた(図 5-2-2)。

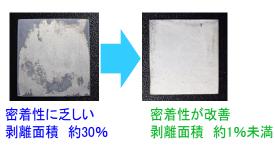


図 5-2-2 新規開発膜の密着性試験結果

・新規開発膜の熱応力評価および微細構造・組織評価

Si 基板上に新規 Fe-Ni 合金メタライズ膜を作製し、パワーデバイス動作を想定した加熱・冷却時の熱応力評価を行った。比較として、競合技術である Ni-B 膜(または Ni-P)についても評価を行った。Si 基板は、パワーモジュール用の絶縁基板として最もよく使用されている Si $_3$ N4 基板とほぼ等しい熱膨張係数($_3$ ppm/K)を有するため使用した。比較サンプルである Ni-B 膜は、270°C付近において、著しい熱収縮が生じることが判明した(図 5-2-3)。この要因については、結晶構造を調べた結果、Ni-B 合金から Ni および Ni $_3$ B への相分離により、膜密度が増大することによると判明した(図 5-2-4)。すなわち、Ni-B 膜は、加熱により膜は著しく収縮する一方で、基板はわずかに伸びることから、その大きな熱膨張差によって、密着性が低下したことが明らかとなった。

他方で、新規開発膜は、加熱による結晶構造変化が生じず(図 5-2-4)、また熱膨張係数も小さいことから、加熱・冷却による膜の伸縮は、基板と同様に僅かであることが示された(図 5-2-3)。これにより、新規開発膜をメタライズ膜として使用することは、高温加熱時の膜/セラミックス基板との密着性低下の抑制に寄与できると考えられ、高温パワーモジュール用膜として好適であると示唆された。

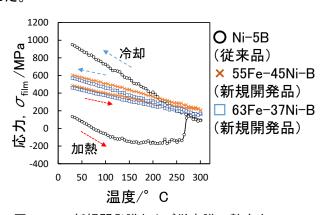


図 5-2-3 新規開発膜および従来膜の熱応力

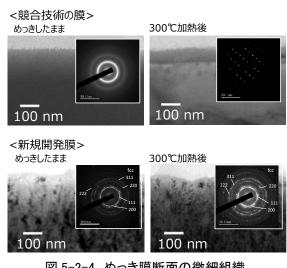


図 5-2-4 めっき膜断面の微細組織 挿入図は制限視野回析を示す。

課題 5-3

・新規 Fe-Ni 開発膜を施したパワーデバイス回路基板の冷熱サイクル試験

新規 Fe-Ni 合金メタライズ、および比較として Ni-P 合金メタライズを施したパワーデバイス 回路基板について、現行の標準的な試験条件の温度範囲(-45° C~ 175° C)、および高温動作性に優れる SiC 半導体利用を想定した温度範囲の(-50° C~ 250° C)において、冷熱サイクル試験を行った。試験後の光学顕微鏡写真を図 5-3 に示す。従来技術である Ni-P 合金メタライズ膜には 1000 サイクル後に膜にクラックが生じた(図中赤丸)。一方、新規 Fe-Ni 合金メタライズを行った回路基板は、メタライズ膜にはクラックが認められず、高い耐熱性を示した。

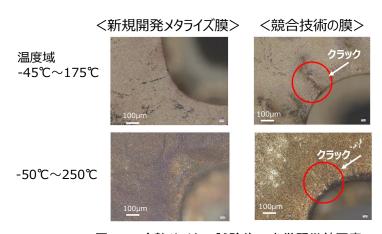


図 5-3 冷熱サイクル試験後の光学顕微鏡写真

6.5.3 プロジェクト終了後の活動方針

本プロジェクトの最終目標である -50° C \sim 250 $^{\circ}$ Cの冷熱サイクル試験 1000 サイクルを、新規メタライズ膜を用いたセラミックス回路基板で達成した。これにより、従来技術のNi-P 合金メタライズ膜ではクラックが発生する課題があったが、その課題を解決し耐熱性が向上した高信頼性パワーデバイス基板を作製できた。また、研究開発期間中に、新規メタライズ膜のめっき速度を約2倍に向上させることに成功し、量産化の可能性が示唆された。

プロジェクト終了後の社会実装に向けては、さらなるめっきプロセスの高度化に取り組む予

定である。本プロジェクトにおける種々検討から課題は抽出しているため、適宜、プロセスの 改良を行っていく予定である。OI機構への移行は当面行わず、企業との競争領域への移行を行 うための上記のプロセス改良に該当する新たな研究課題を探索中である。

6.5.4 その他

特になし

6.6 研究開発課題 7「耐極限環境 SiC 複合材料開発」

キーテクノロジー	キーテクノロジー6: SiC の極限環境下での利用技術
課題代表者	檜木 達也
	京都大学 オープンイノベーション機構 特定教授
実施期間	平成 30 年 11 月~令和 5 年 3 月
共同研究機関	京都大学、参画企業 1 社

6.6.1 研究開発成果の概要

課題	MS	中郊	净代作和
番号	番号	内容	達成状況
課題	MS7-1	1500℃以上での大気、水蒸気雰囲気で	粒子分散 SiC 複合材料の 1550℃まで
7–1		の高温暴露試験を行い、酸化挙動の	の高温酸化挙動の理解を進め、航
		評価を行う。	空・宇宙分野で重要視される疲労試
			験を中心とした評価を進めた。
			1400℃以上の酸化環境に対応する
			材料の改良や表面改質技術の開発
			を行い、従来の材料を凌駕する材料
			の開発に成功した。
課題	MS7-2	同位体分離を行った B を用いた BN 粒	中性子照射を模擬したイオン照射試
7–2		子分散 SiC 複合材料の開発を行う。	験を、軽水炉を想定した 300℃と核融
			合炉等の先進炉を想定した 800℃で
			BN 粒子分散 SiC 複合材料に対して行
			い、寸法変化や微細組織の評価からこ
			れらの環境で BN 粒子分散 SiC 複合材
			料が適用可能であることを示した。

6.6.2 最終目標に対する成果の詳細

ガスタービン等の燃焼炉では、燃焼温度の向上がエネルギー変換効率の向上に繋がる。耐熱合金としてニッケル基合金が使用されているが、クリープ特性等から 1120℃程度が限界とされている。SiC 繊維で強化された SiC マトリックスの複合材料(SiC 複合材料)は、ニッケル基合金を超える耐熱材料として開発が進められ、軽量であることもあり米国企業により航空機エンジンへの適用が始まっている。

参画企業は、自社製の SiC 粉末と他社製の BN 粉末を混合しグリーンシートを形成し、形成したグリーンシートと高結晶性の耐熱グレードの SiC 繊維の朱子織を積層、密着させることにより、プリプレグシートの作製を行った。プリプレグシートを京都大学において、冶具に合わせて、切断、積層を行い、ホットプレス装置(15t)を用いて液相焼結(liquid phase sintering: LPS)を行い、BN 粒子分散 SiC 複合材料を作製した。作製の流れを図 7-1 に示す。図 7-1 の右上の FE-SEM 像で、下部に丸い形状で観察されているものが直径 $10\,\mu$ m 程の SiC 繊維である。SiC 繊維が集まっている繊維束領域と上部の繊維が含まれていないマトリックス領域で構成されている。

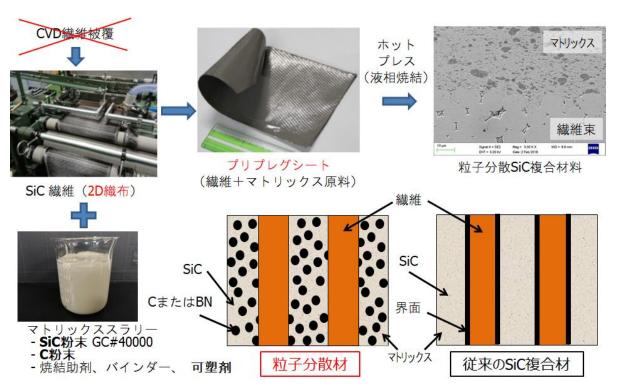


図 7-1 粒子分散 SiC 複合材料の作製の流れ

従来の SiC 複合材料は、マトリックスからの亀裂が一気に破断に繋がらないように SiC 繊維とマトリックスの間に C や BN の界面相を有している。しかしながら、高温酸化雰囲気において SiC は表面にシリカを形成し、酸化の進展を抑制することができるが、既存の SiC 複合材料は C や BN の界面相を介して材料内部に酸化が進行してしまう。本研究では京都大学で開発した界面相の代わりに C や BN 粒子を母材に分散させた粒子分散 SiC 複合材料を用いた。従来の界面相を有する材料では図 7-2 の右図で示すように 1200° Cでも内部に酸化が進行するのに対し、BN 粒子分散 SiC 複合材料では、図 7-2 の左図に示すように、 1500° C、酸化雰囲気に暴露後も内部への酸化の進展を抑制できることが明らかになった。

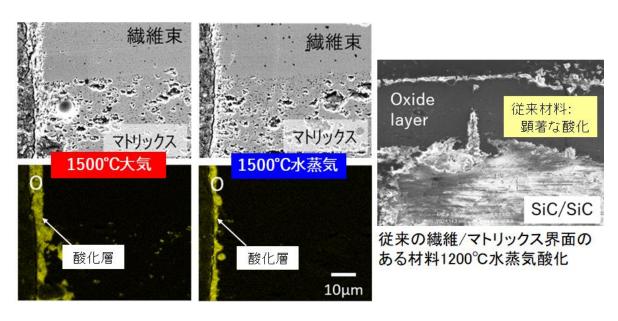


図 7-2 BN 粒子分散 SiC 複合材料の従来材の高温酸化挙動

本研究では、高温での様々な特性の評価を実施したが、強度特性評価においては特に航空機エンジンへの適用で重要視される疲労強度を中心とした評価を行った。基本的な疲労強度評価としては、最大応力まで引張、最大応力の 10%まで応力を下げるのを 1 サイクルとし、最大応力と破断サイクルの関係を得た。本研究では基本的に 2 方向に繊維で強化した材料を用いている。図 7-3 は 0、90° 方向の主軸方向と <math>45° 方向の非主軸方向の疲労試験における破断サイクル数と最大応力の関係を示している。本材料の結果は 1200°C大気下での結果であり、従来材は 1150°C大気下での結果 [1] である。疲労試験は航空機エンジンの離発着に伴う応力を想定しており、最大寿命として 10 万回を基準にしている。

非主軸応力の疲労試験においても、主軸応力と同等の強度特性を示すことが明らかになった。疲労強度は金属材料の降伏応力に相当するマトリックスクラッキング応力と相関があると考えられる。マトリックスクラッキング応力は、理論的には主軸方向の繊維/マトリックス界面強度に依存し[2]、45°の傾斜により界面の剥離が促されマトリックスクラッキングストレスの低下による疲労強度の低下も懸念されたが、本材料では同等の結果が得られた。従来材に比べて界面強度が高くマトリックスクラッキング応力が高いことによるものと考えられるが、正確に理解するためには更なる解析が必要である。本材料は、LPS 法で作製し、繊維/マトリックス界面相が無いのが特徴である。図 7-3 の従来材は化学蒸気浸透(chemical vapor infiltration: CVI) 法で作製し BN 界面相を有している。CVI 法で作製する材料は、LPS 法で作製する材料に比べて、高い強度を有するが、気孔率が比較的高くマトリックスクラッキング応力が低く 100MPa 以下である。本材料は 170MPa 程度のため、マトリックスクラッキング応力以上で亀裂が進展していく

ことが、反映されたものと考えられる。

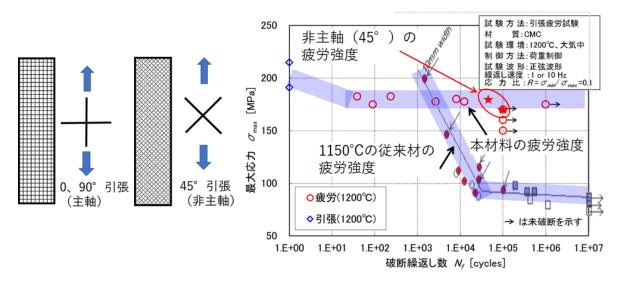


図 7-3 BN 粒子分散 SiC 複合材料の 1200℃大気下での疲労強度

疲労試験に関しては 1400℃大気下においても実施した。1400℃では 1200℃に比べて酸化速度が非常に速く当初の材料では疲労試験において 1200℃よりも劣化が見られた。1200℃においては、酸化膜は主にシリカが形成されていたが、1400℃においてはムライトが形成されていた。ムライトの構成物質となるアルミナの焼結助剤と BN 量の調整を行い 1400℃仕様の材料の開発を行った。1400℃仕様の材料においては、1400℃大気下の試験において 190MPa で 10 万回を達成した。

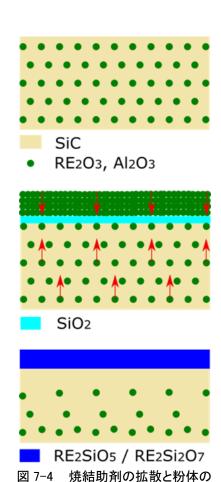
疲労試験においては更に出口企業からのニーズにより、初期亀裂が入るレベルでの変位制御での疲労試験も実施した。試験の繰り返しにより、亀裂が進展し伸びが生じるために、設定した最大歪に必要な応力が緩和されていく傾向が得られた。セラミックスの場合、亀裂の導入は破断に繋がるが、本材料の場合は、金属材料の降伏応力を超える応力をかけた場合と同様に、伸びによる応力緩和の傾向が得られた。

これまでに、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)でも、SiC 複合材料を対象に研究が行われている。米国企業が既に実用化している反応焼結(reaction sintering: RS)法を用いた材料の製造技術を対象にしているが、同等の材料の製造コスト低減が目的であり、材料自身には Si が残るため、Si の融点である 1414° C以上では、使用することはできない。強度の目標としては、不活性雰囲気で 1400° Cに加熱し、冷却後の室温の強度が加熱前に比べて劣化しないこととされている。不活性雰囲気で 1400° Cに加熱すると Si の軟化が予想され、不活性雰囲気においても 1400° Cで疲労強度を行えば、大きく劣化するものと思われるが、室温に戻して引張試験を行っても、強度が劣化する理由は無いので、目標は達成されるものと考えられる。本研究では、 1400° C、大気下で 10 万回までの疲労試験を行っており、SIP の材料も含めて、これまでに報告されている中では、チャンピオンデータが得られた。

航空機エンジンへの適用のためには、耐水蒸気特性が重要となる。1400℃の大気下に関しては、表面へのムライト層の形成により、優れた疲労強度特性が得られた。1550℃での高温水蒸気酸化においても、SEM 観察から非常に薄い酸化膜の形成に抑制することは出来ており、既存の材料に比べれば非常に優れた特性を示したが、実際には減肉が生じており長期間の使用を考えた場合、耐水蒸気被覆は必要となる。耐水蒸気被覆は SIP でも開発が進められたが、基本的に

は米国企業と同様に、耐酸化及び結合層、熱膨張係数緩和層、耐水蒸気層の3層を対象とし溶射等の方法が適用された。非常に複雑で高コストであること、複雑形状への適用、被覆の剝がれ等多くの課題がある。本研究では新たな表面改質による耐水蒸気特性被膜形成技術を開発した。

米国企業の耐環境被覆においては SiC 複合材料の上に、耐 酸化層の Si 層、熱膨張係数緩和層の barium-strontium alumino-silicate (BSAS)とムライトの混合層、耐水蒸気被 覆の BSAS 層で構成されている。本研究では SiC 母材の形成 に LPS を用いる。 SiC の焼結助剤として、耐水蒸気被覆形成 のための Yb_2O_3 と Al_2O_3 を用いて焼結を行った。これらを用い ることにより 1800℃以下で焼結することが可能となる。図 7-4 に示すように、作製した SiC を Yb₂O₃ 粉末で覆った状態 で、1430℃、大気下で加熱を行うことにより、図 7-5 に示す ように次世代の耐水蒸気被覆として期待される Yb₂Si₂O₇[3] の厚い被膜の形成に成功した。大気下での加熱により粉末の 間から酸素が入り、SiCの表面にSiO2が形成される。SiC粒 界に存在する焼結助剤である Yb₂O₃ と Al₂O₃ の表面への拡散 と SiC を覆っている Yb₂O₃ 粉末と SiC 表面に形成された SiO₂ の共晶反応により、Yb₂Si₂O₇が形成された。本被覆は、粉末 内での熱処理のみにより形成できるため、既存の被覆技術に 比べて非常に簡便である。SiC表面に形成するSiO2の変換に より被覆を形成するのと、BN 粒子分散 SiC 複合材料は耐酸



反応による表面改質の

模式図

化特性を備えているため、多層被覆は必要としない。被覆が剥がれたとしても内部からの被覆原料の拡散と表面に形成される SiO_2 の反応により、自己治癒が期待される。本技術は、2022 年 3 月 2 日に特許申請を行った(特願 2022-031961)。

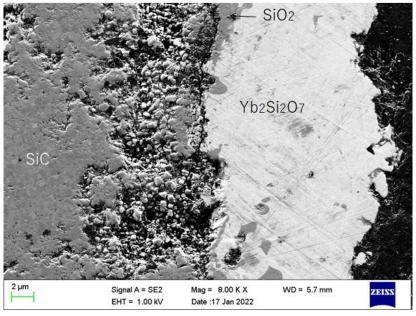


図 7-5 高温大気下で焼結助剤の拡散と粉体の反応により形成した Yb₂Si₂O₇表面層

放射線環境下においては、中性子による原子のはじき出しにより欠陥が生じ、寸法変化や強度特性の劣化が問題となる。高純度 SiC の場合、150℃~1000℃程度の範囲では、比較的低い照射量 (1dpa 程度) で欠陥の生成と回復のバランスが取れ、寸法変化が一定になることが明らかになっている。SiC 複合材料の耐照射特性は、構成要素である繊維及びマトリックスの耐照射特性と繊維とマトリックス間の残留応力の影響を受ける。これまでの研究で SiC 繊維に関しては、中性子照射の結果も報告されているが、本研究で用いる粒子分散 SiC マトリックスに関しては中性子照射の結果が無い。本研究では中性子照射の代わりにイオン照射による原子のはじき出しを行い、BN 粒子分散 SiC の耐照射特性の評価を行った。

供試材として SiC 複合材料のマトリックスに対応する BN 粒子分散 SiC、参照材として BN を含んでいない LPS SiC、CVD SiC を準備した。試料は原子間力顕微鏡(AFM)で nm オーダーでの高低差が検出できるように十分に研磨を行い切り出し、図 7-6 に示すように部分的にカバーをして照射されない領域を確保し、開口部に対して京都大学の複合ビーム 材料 照射 装置 (Dual-Beam Facility for Energy Science and Technology: DuET)を用いて、300°C、800°Cで 0.1~10dpa(displacement per

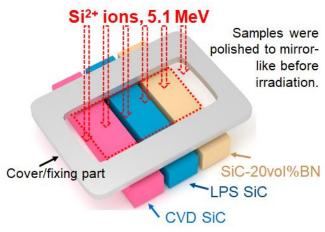


図 7-6 イオン照射模式図

atom)の Si イオンの照射を行った。300℃は軽水炉を対象とし、800℃は、ガス冷却高速炉や事業化の話が進められている核融合炉を対象とした温度域となる。損傷量として dpa で示しているが原子のはじき出しの単位を示している。寸法変化は照射された領域とマスキングにより照射されなかった領域の高低差を、AFM を用いて評価した。照射面に対してナノインデンターやビッカースによる押し込み試験により強度特性の評価を行った。照射前後の後方散乱電子回折(EBSD)により、イオン照射に起因する残留応力評価を行った。微細組織に関しては透過電子顕微鏡(TEM)により評価を行った。

図 7-7 に 300°Cで 3dpa のイオン照射を行った BN 粒子分散 SiC 表面の AFM 像を示す。照射により照射領域が隆起していることが分かる。BN 粒子分散 SiC、LPS SiC、CVD SiC の寸法変化の 800°Cにおける照射量依存性を図 7-8に示す。BN 粒子分散 SiC は LPS SiC や CVD SiC に比べて、全損傷領域において高い値を示したが、基本的には同様な傾向を示したが、基本的には同様な傾向を示したが、基本的には同様な傾向を示した。BN 粒子分散 SiC と CVD SiC の 3dpa 照射後の

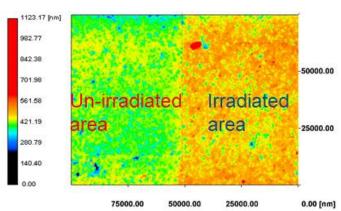


図 7-7 BN 粒子分散 SiC の照射による寸法変化

寸法変化の照射温度依存性を図 7-9 に示す。BN 粒子分散 SiC は CVD SiC に比べて、寸法変化は大きいものの、照射温度の上昇とともに、寸法変化が減少する傾向が見られた。

ナノインデンテーションによる弾性率と硬さ値において、LPS SiCはCVD SiCに比べて共に低い値を示した。照射により変化は非常に限定的であった。ビッカース試験による破壊靭性評

価では、LPS SiC も CVD SiC も照射により大きく上昇した。EBSD による残留応力評価では、照射方向に対しては、寸法変化により残留応力は解放されているが、照射領域の下の非照射領域は寸法変化が起きないため、x、y 方向では解放されない残留応力が残っていた。イオン照射材の強度は残留応力の影響を大きく受けていることが示唆され、同様な照射条件での中性子照射材との比較も含めて検証が必要である。

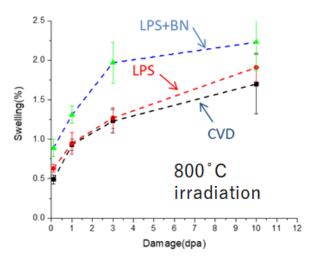


図 7-8 BN 粒子分散 SiC、LPS SiC、CVD SiC の 寸法変化の 800℃における照射量依存性

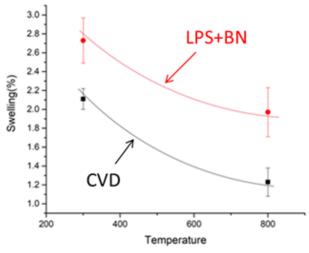


図 7-9 BN 粒子分散 SiC と CVD SiC の 3dpa 照射後の寸法変化の照射温度依存性

TEM 観察により、イオン照射した LPS 材では粒界に存在する焼結助剤 由来の YAG が 300℃の照射では非晶 質化するのに対して、800℃の照射で は図 7-10 に示すように結晶性を保 つことが明らかになった。非晶質化 が起こると照射量に依存して寸法が 増加することを意味する。軽水炉に おいては、照射量が比較的低く数 dpa 程度が想定されている。10dpa ま での照射でも寸法変化は限られてい るのが確認されたので、問題になら ないと考えられる。ガス冷却高速炉 や核融合炉では数 10dpa 程度以上の 照射量が想定されているが、温度は 800℃以上のため、寸法変化の観点で は問題ないものと考えられる。以上 のことから、本研究で開発を行って いる BN 粒子分散 SiC 複合材料は照 射効果の観点では軽水炉、核融合を 含む先進炉への適用ができるものと 考えられる。

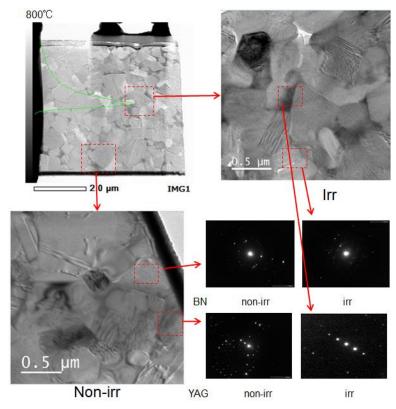


図 7-10 BN 粒子分散 SiC の 800°Cでの照射後の微細組織

【参考文献】

- [1] T. Nakamura, S. Muto, T. Manabe, "Fatigue Behavior of SIC/SIC Ceramic Matrix Composites," Ceramic Engineering and Science Proceedings, 37[2] (2017) 71-77.
- [2] A.G. Evans, J.-M. Domergue, E. Vagaggini, "Methodology for Relating the Tensile Constitutive Behavior of Ceramic-Matrix Composites to Constituent Properties," Journal of the American Ceramic Society, 77[6] (1994) 1425-35.
- [3] K.N. Lee, D.S. Fox, N.P. Bansal, "Rare earth silicate environmental barrier coatings for SiC/SiC composites and Si3N4 ceramics," Journal of the European Ceramic Society, 25 (2005) 1705–15.

6.6.3 プロジェクト終了後の活動方針

本課題では、1500°C以上の耐酸化特性の評価を行い、材料の改良や表面改質技術の開発等を行い、既存の材料を凌駕する SiC 複合材料の開発に成功した。イオン照射試験により、軽水炉や核融合を含む先進炉へ適用できることも示した。出口企業のニーズに対応するため、特性評価に関しても評価法開発も含めて柔軟に対応し、追加となる必要なデータを取得した。数社とNDA を結び情報交換を行い、オープンイノベーション機構において、航空・宇宙関連企業 1 社、エネルギー関連企業 1 社が本材料の実用化のための共同研究に移行した。これらの共同研究では更に広範囲のデータの取得を進めるとともに、実用部材の作製技術の開発を進めている。関連企業への技術移転も同時に進めている。本研究で開発を進める材料は、原料となる SiC 繊維やマトリックスを含むプリプレグシートの焼結により作製することができる。プリプレグシートは柔軟性があり、ある程度の複雑な形状に対しても対応することが可能である。図 7-11 はプリプレグシートを形状物の形状に合わせて切断し、治具に巻き焼結することにより目的とする箱状のものを作製できることを示している。今後は更に複雑な形状も含めた開発を出口企業と進めていく予定である。

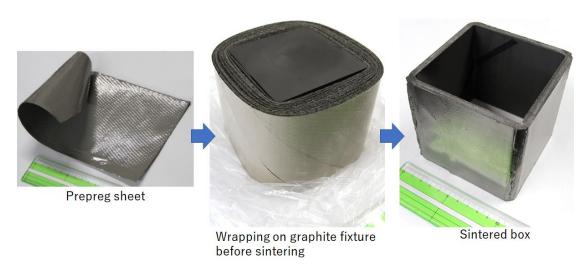


図 7-11 プリプレグシートを用いた部材の作製例

6.6.4 その他

特になし

7 非競争領域からの展開(活動実績)

課題 1-1

劣化現象のメカニズム解明と、デバイス構造の工夫による劣化現象の抑制という学術・産業応用の両面で世界を先導する成果を挙げ、多くの国際会議招待講演(IEEE IRPS, ECSCRM など)や論文発表に繋がった。特に Applied Physics Express に掲載された招待レビュー論文は前述のように当該分野に大きなインパクトを与えている。民間企業(2社)と競争領域での共同研究を継続し、本成果を基にしてバイポーラ通電劣化を完全に抑制した SiC デバイスの量産を目指す。

課題 1-2

学術的知見に基づく独自の酸化膜形成プロセスを提案し、その顕著な有効性を示した。当該成果は "Game Changing Technology" と呼ばれるなど大きな注目を浴び、多数の論文発表、国際会議招待講演(TWHM, APWS, ECSCRMなど)、多数の学会受賞、3件のプレス発表に繋がった。既に民間企業2社とオープンイノベーション機構における共同研究を実施しており、さらにもう1社と競争領域での共同研究を継続する予定である。

課題 1-3

SiC 相補型 JFET (CJFET)を提案し、Si 限界を越える高温 (350~400℃) 動作を実証した。SiC CJFET 単体に留まらず、NAND ゲート、NOR ゲートの高温動作も実証し、1 件のプレス発表を行った。本成果も多数の論文や国際会議招待講演(IIT, ICSCRM、AWAD など)で発表し、複数の受賞を得た。今後は、民間企業(1社)と競争領域での共同研究を検討中である。また、本研究課題は新たに開拓中のテーマであり、他の公的補助金(科学研究費など)の獲得も目指している。

領域名は超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

		実績		備考		
① プロトタイプ	6	件				
② 実用化	0	件				
③ 事業化(製品・サービス等	1	件				
④ 起業(ベンチャー企業等の)設立)			0	件	
⑤ 知的財産権の状況	出願	出願 領域全体 国内			件	
			外国	19	件	
		うちバイゲール適用	国内	18	件	
			外国	19	件	
	登録	領域全体	国内	0	件	
			外国	0	件	
		うちバイゲール適用	国内	0	件	
			外国	0	件	
	ライセ	ンス		2	件	
	ライセ	ンス収入	件数	2	件	
			金額	2,530	千円	
⑥ 成果の発信	プレス	、発表(イベント告知は隙	≩ <)	5	件	
	成果多	発信イベントの開催		10	件	
	展示会	会への出展	国内	4	件	
			外国	0	件	
⑦ 掲載・放映	雑誌排	掲載(WEB含む)		16	件	
	新聞排	掲載(WEB含む)		7	件	
	テレビ	放映		0	件	
⑧ 外部資金の獲得	成果0	の展開に関連して	採択	7	件	
		(当該年度)	金額	338,414	千円	
	研究閉	開発費として	採択	8	件	
		(当該年度)	金額	110,396	千円	
9 論文	論文			98	件	
	うち	査読論文		94	件	
	その他	也著作物(総説、書籍な	(ځ	4	件	
⑩ 発表	口頭夠	発表		198	件	
	ポスタ	一発表		25	件	
	招待詞			65	件	
	その他	<u>h</u>	6	件		
⑪ 受賞				57	件	
⑩ 参加者(年度末時点)	領域的	全体		179	人	

活動実績一覧(集計) 1 / 43 ページ

領域;超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

① プロトタイプ

	成果名称	発表等時期	(企業・大学等)	概要	備考 (関連する研究開発課題番号等)
1	信州大学でのギャップレス鉄心リアクトル プロトタイプの試作、神戸電機産業にお けるコンバータでの実装評価	2020/8/1	信州大学 神戸電機産業 (株)	神戸電機産業向けにコンポジット鉄心プロトタイプ を試作・提供	研究開発課題4-2
2	ギャップレスコンポジット鉄心リアクトルプロトタイプの試作	2021/3/4	信州大学	信州大学でのギャップレス鉄心リアクトルプロトタイプの試作し、神戸電機産業と連携してインバータへの実装評価を実施した。2021年3月4日に発表。	研究開発課題4-2
3	10 kW級永久磁石補助スイッチトリラクタ ンスモータ(PM-SRM)のプロトタイプ機	2022/3/11	京都大学	1 kW級PM-SRMの特性評価結果をもとに、より出力密度の高い10 kW級PM-SRMを試作した。	研究開発課題3-3
4	コンバータ/インバータプロトタイプの試作	2021/10/4	神戸電機産業信州大学	信州大学で試作した改良 型ギャップレス鉄心リアクトルを用いて、コンバータ /インバータプロトタイプ に実装・評価した。	研究開発課題4-2
5	電カパケット配送装置&1 kW級永久磁石 補助スイッチトリラクタンスモータ(PM- SRM)を搭載したゴルフカート	2022/8/30	京都大学	1 kW級PM-SRMによって 駆動するゴルフカートを開発し、走行試験に成功した。その際、課題3-2の電カパケット配電装置も搭載し、未だ完全な電カパケットでは無いもの駆動に成功している。	
6	Fe系ナノ結晶合金コンポジット鉄心リアクトルプロトタイプの試作	2022/9/30	信州大学	低鉄損ギャップレス鉄心 リアクトルプロトタイプを試 作した。	研究開発課題4-2

② 実用化

<u>(4)</u>	長用化				
No	成果名称	発表等時期	担当企業等	概要	備考 (無野来日答)
					(課題番号等)
1					
2					

③ 事業化(製品・サービス等の提供)

No	製品・サービス等の名称	発売等時期	担当企業等	概要	備考 (課題番号等)
1	SiC複合材料開発	2024/10/1		航空・宇宙関連企業1社、 核融合関連企業1社、原 子力関連企業1社と共同 研究を実施し、アプリケー ションに必要な広範囲な 特性のデータベース構 築、実用部材の作製技術 開発を進めている。	研究開発課題7

④ 起業(ベンチャー企業等の設立)

No	法人名称	設立時期	シーズ	概要	備考 (課題番号等)
1					
2					

領域名 超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

⑤-1 知的財産権(出願) A特許 | Bその他の知的財産権

A 特許

No	知財の名称	出願番号	バイ・ト゛ール 適用	出願人	国内/外国	備考 (関連する研究開発課題番号等)
1	測定装置および測定方法	特願2019- 233583	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
2	測定装置および測定方法	17/773,530 (米国)	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2 指定国移行
3	測定装置および測定方法	20904834.7 (欧州)	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2 指定国移行
4	測定装置および測定方法	20208008334 0.9(中国)	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2 指定国移行
5	磁場測定装置および磁場測定方法	特願2020- 032685	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
6	磁場測定装置および磁場測定方法	17/794,124 (米国)	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2 指定国移行
7	スイッチトリラクタンスモータおよびその制御 方法	特願2019- 187814	0	京都大学	国内	研究開発課題3-3 PCT取下
8	スイッチトリラクタンスモータおよびその制御 方法	17/754,511 (米国)	0	京都大学	外国	研究開発課題3-3 指定国移行(審査待ち)
9	スイッチトリラクタンスモータおよびその制御 方法	20875101.6 (欧州)	0	京都大学	外国	研究開発課題3-3 指定国移行(審査待ち)
10	スイッチトリラクタンスモータおよびその制御 方法	20208007080 1.9(中国)	0	京都大学	外国	研究開発課題3-3 指定国移行(審査待ち)
11	コイル部品およびその製造方法	特願2019- 160669	0	信州大学 日本ケミコン(株)	国内	研究開発課題4-2
12	SiC半導体素子の製造方法及びSiC半導体 素子	特願2020- 098244	0	京都大学	国内	研究開発課題1
13	SiC半導体素子の製造方法及びSiC半導体 素子	18/007,985 (米国)	0	京都大学	外国	研究開発課題1 指定国移行
14	SiC半導体素子の製造方法及びSiC半導体 素子	21817045.4 (欧州)	0	京都大学	外国	研究開発課題1 指定国移行
15	SiC半導体素子の製造方法及びSiC半導体 素子	20218003970 5.2(中国)	0	京都大学	外国	研究開発課題1 指定国移行
16	SiC相補型電界効果トランジスタ	特願2020- 104834	0	京都大学	国内	研究開発課題1

⑤-1知的財産権(出願) 3/43

		1		I		T
17	SiC相補型電界効果トランジスタ	PCT/JP2021 /020585	0	京都大学	外国	研究開発課題1
18	SiC半導体素子の製造方法及びSiC MOS FET	特願2020- 210594	0	京都大学	国内	研究開発課題1 PCT取下
19	SiC半導体素子の製造方法及びSiC MOS FET	PCT/JP2021 /039171	0	京都大学	外国	研究開発課題1 国際段階
20	磁場測定装置および磁場測定方法	特願2020- 083739	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
21	磁場測定装置および磁場測定方法	17/922,473 (米国)	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2 指定国移行
22	励起光照射装置および励起光照射方法	特願2020- 098052	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
23	励起光照射装置および励起光照射方法	17/922,500 (米国)	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2 指定国移行
24	励起光照射装置および励起光照射方法	特願2020- 098053	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
25	フラックストランスフォーマー設計支援方法、フラックストランスフォーマー設計支援装置、およびフラックストランスフォーマー設計支援 プログラム	特願2020- 187051	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
26	フラックストランスフォーマー設計支援方法、フラックストランスフォーマー設計支援装置、およびフラックストランスフォーマー設計支援 プログラム	PCT/JP2021 /022060	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2
27	情報処理装置、コンピュータプログラム、情報処理方法及びシミュレーション情報提供 方法	特願2020- 205323	0	京都大学	国内	研究開発課題3-1
28	情報処理装置、コンピュータプログラム、情報処理方法及びシミュレーション情報提供 方法	PCT/JP2021 /042597	0	京都大学	外国	研究開発課題3-1
29	SiC相補型電界効果トランジスタ	特願2022- 065535	0	京都大学	国内	研究開発課題1
30	磁場測定装置および磁場測定方法	特願2021- 084224	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
31	磁場測定装置および磁場測定方法	PCT/JP2022 /009990	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2
32	測定装置および測定方法	特願2021- 127310	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
33	測定装置および測定方法	PCT/JP2022 /022923	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2
34	磁場測定装置および磁場測定方法	特願2021- 127304	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	国内	研究開発課題2
35	磁場測定装置および磁場測定方法	PCT/JP2022 /022913	0	京都大学 スミダコーポレー ション(株)	外国	研究開発課題2

⑤-1知的財産権(出願) 4/43

36	非公開					
37	非公開					
38	非公開					
39	非公開					
40	非公開					
41	非公開					
42	SiC接合型電界効果トランジスタ及びSiC相 補型接合型電界効果トランジスタ	特願2022- 112930	0	京都大学	国内	研究開発課題1
43	非公開					
44	非公開					
45	非公開					
46	非公開					
47	炭化ケイ素セラミックス及びその製造方法	特願2022- 031961	0	京都大学	国内	研究開発課題7

B その他の知的財産権 (実用新案権、意匠権、回路配置利用権、育成者権など)

No	知財の名称	バイ・ドール 適用	国内/外 国	備考
1				
2				

⑤-1知的財産権(出願) 5/43

領域名: 超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

⑤-2 知的財産権(登録) A特許 | Bその他の知的財産権

A 特許

No	知財の名称	特許番号	バイ・ドール 適用		備考 (関連する研究開発課題番号等)
1					
2					

B その他の知的財産権 (実用新案権、意匠権、回路配置利用権、育成者権など)

No	知財の名称	登録番号	バイ・ト [・] ール 適用	出願人	国内/外国	備考
1						
2						

⑤-2知的財産権(登録) 6/43

領域名 超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

⑥ 成果の発信

	ペップロ - 20 年	数 車 ケノロコーノ がい ロタナいじ	☆ ≢ ₩ 囲	+++++++	☆/= π/ + *	
	発表 年月日	発表タイトル、イベント名など	発表機関	主な対応者	発信形式	備考
1	2019/3/28	SIP「次世代パワーエレクトロニクス」 公開シンポジウム	京都大学、奈良 先端科学技術 大学院大学	新谷 道広 (奈良先端科 学技術 大学院大学)	展示会への出展 (国内)	研究開発課題3-3 東京
2	2019/2/14	超スマートエネルギー社会基盤技術 共創コンソーシアム公開キックオフシンポジウム		木本恒暢 (京都大学) 	成果発信イベントの開催	全研究開発課題 京都 後援:京都府、京都市、京 都高度技術研究所
3	2020/1/28 -31	nano tech 2020 (国際ナノテクノロ ジー総合展	神戸電機産業 (株)、信州大 学、大阪大学	佐藤 敏郎 (信州大学)	展示会への出展 (国内)	研究開発課題4-2 東京
4	2020/1/28 -31	nano tech 2020 (国際ナノテクノロ ジー総合展	信州大学	志村 和大 (信州大学)	展示会への出展 (国内)	研究開発課題4-39 東京
5	2019/9/30 -10/4	シリコンカーバイド及び関連材料に 関する国際会議(ICSCRM 2019)	京都市産業技 術研究所	中村 俊博 永山 富男 山本 貴代 (京都市産業	展示会への出展 (国内)	研究開発課題5 京都
6	2020/3/16	超スマートエネルギー社会基盤技術 共創コンソーシアムR1年度成果報告 会	京都大学、东安学、东东学、东东学、东东等、东东东东东东东东东东东东东东东东东东东东东东	木本恒暢 (京都大学)	成果発信イベント の開催	全研究開発課題 コロナ禍により開催中止、 資料配布のみ行った
7	2020/8/21	逆転の発想でSiCパワー半導体の高 品質化に成功	京都大学東京工業大学	木本恒暢 (京都大学)	プレス発表	研究開発課題1 https://www.kyoto- u.ac.jp/ja/research/resear ch_results/2020/200821_1. html
8	2020/9/8	環境に優しい手法でSiC半導体の性 能倍増に成功	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	プレス発表	研究開発課題1 https://www.kyoto- u.ac.jp/ja/research/resear ch_results/2020/200908_2. html
9	2021/3/4	"高周波電力用磁心材料の開発"、 磁気エレクトロニクス研究会	信州大学、公益 財団法人長野 県テクノ財団主 催	佐藤敏郎 (信州大学)	成果発信イベントの開催	研究開発課題4-2 長野
10	2021/3/4	"高周波電力用磁心材料の開発"、 磁気エレクトロニクス研究会	信州大学、公益 財団法人長野 県テクノ財団主 催	水野 勉 (信州大学)	成果発信イベントの開催	研究開発課題4-3 長野
11	2021/3/22	超スマートエネルギー社会基盤技術 共創コンソーシアムR2年度成果報告 会	京都大学、大阪 大学、奈良先端 科学技術大学 院大学、信州大学、京都市産業 技術研究所	木本恒暢 (京都大学)	成果発信イベント の開催	全研究開発課題 オンライン 後援:京都府、京都市、京 都高度技術研究所
12	2021/10/27	界面の高品質化と平坦性向上により SiC半導体の性能を6~80倍向上	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	プレス発表	研究開発課題1 https://www.kyoto- u.ac.jp/ja/research- news/2021-10-27
13	2022/3/25	低消費電力集積回路の350℃基本 動作実証	京都大学	金子光顕 (京都大学)	プレス発表	研究開発課題1 https://www.t.kyoto- u.ac.jp/ja/news/topics/re search/20220325-2
		1	l .	l .	l	1

⑥成果の発信 7/43

14	2021/10/11	Toward accurate modeling of power MOSFET electrical characteristics	奈良先端科学 技術大学院大 学	新谷道広 (奈良先端 大)	プレス発表	研究開発課題3-1 http://www.naist.jp/en/re search_achievements/202 1/10/008401.html
15	2021/6/1	"MHz帯スイッチング電源用インダクタ・トランスの開発" 日本ボンド磁性材料協会、「xEV高性能化と省エネルギーのためのパワーエレクトロニクス用磁性材料とその応用」講演会	信州大学	水野 勉	成果発信イベント の開催	研究開発課題4-3
16	2022/3/4			木本恒暢 (京都大学)	成果発信イベント の開催	全研究開発課題 オンライン 後援:京都府、京都市、京 都高度技術研究所
17	2022/8/30	桂の庭「電力パケット制御方式永久 磁石補助スイッチトリラクタンスモー タを搭載したゴ ルフカートの走行実 証試験を実施しました。」	京都大学桂図 書館	持山志宇 (京都大学)	成果発信イベント の開催	研究開発課題3-2,3-3 https://seeds.t.kyoto- u.ac.jp/
18	2022/12/6	"Beyond MHz磁心材料の開発とインダクタ/トランスへの適用、ならびにDC-DCコンバータへの実装"、岩崎コンファレンス	日本磁気学会	佐藤敏郎 (信州大学)	成果発信イベントの開催	研究開発課題4-2 オンライン
19	2023/3/1	超スマートエネルギー社会基盤技術 共創コンソーシアムR4年度成果報告 会	京都大学、大阪大学、京都工芸、大学、京都工芸、繊維大学、信州大学、京都市産業技術研究所	木本恒暢 (京都大学)	成果発信イベント の開催	全研究開発課題 オンライン 後援:京都府、京都市、京 都高度技術研究所

⑥成果の発信 8/43

(平成30年度~令和4年度) OPERA 活動実績一覧 【幹事機関:京都大学】

領域名:超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

⑦掲載・放映

No	発表 年月日	メディア名 掲載・放映内容の概要	発表機関	主な対応者	形式	備考
1	2019/3/25	日経xTECH Special対談記事「SiCパワーデバイ ス大量活用時代が到来」	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含 む)	研究開発課題1
2	2019/9/17	日経産業新聞 パワー半導体効率アップ	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	新聞掲載(WEB含 む)	研究開発課題1
3	2019/10/20	日経エレクトロニクス SiC CMOS化	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含 む)	研究開発課題1
4	2019/12/6	日経XTECH 電気自動車時代のSiCパワエレ開 発、電気と熱の同時解析で回路の 信頼性向上	奈良先端科学 技術大学院大 学	新谷 道広 (奈良先端科 学技術大学 院大学)	雑誌掲載(WEB含 む)	研究開発課題3- 1 https://xtech.nik kei.com/atcl/nxt /column/18/000 28/00038/?ST=n xt_thmdm_powere le
5	2019/12/20	日経XTECH SiC MOSFETのスイッチ素子を使いこなす、カギ握る容量特性のモデル化	奈良先端科学 技術大学院大 学	新谷 道広 (奈良先端科 学技術大学 院大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題3-1 https://xtech.nik kei.com/atcl/nxt /column/18/000 28/00039/?ST=n xt_thmdm_powere le
6	2020/1/10	日経XTECH 電気と熱の同時解析のポイント、モ デルのパラメーターをデバイスに合 わせる		新谷 道広 (奈良先端科 学技術大学 院大学)	雑誌掲載(WEB含 む)	研究開発課題3- 1 https://xtech.nik kei.com/atcl/nxt /column/18/000 28/00040/?ST=n xt_thmdm_powere le
7	2019/11/20	日経エレクトロニクス 永久磁石補助スイッチトリラクタン スモータについて、固定子巻線か らのパルス電流によってアルニコ 磁石の着磁束を可変とする技術が 紹介された	京都大学	中村 武恒 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題3-3
8	2020/8/21	日経×TECH 30年来の研究開発課題解決に道、 SiC MOSFETのコストを数分の1へ	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題1
9	2020/8/21	電波新聞 SiCパワー半導体 低コスト化へ前 進	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	新聞掲載(WEB含 む)	研究開発課題1
10	2020/8/22	EE Times 新手法の酸化膜形成でSiC- MOSFETの性能が10倍に	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含 む)	研究開発課題1
11	2020/8/26	電波新聞 逆転の発想によるSiCパワー半導 体研究成果	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	新聞掲載(WEB含む)	研究開発課題1
	2020/9/10	EE Times SiC-MOSFETの電子移動度が倍 増、20年ぶりに大幅向上	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含 む)	研究開発課題1
13	2020/9/8	電波新聞 SiO2/SiC界面欠陥、従来の5分の1 に	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	新聞掲載(WEB含 む)	研究開発課題1
14	2020/9/20	日経エレクトロニクス2020年10月号 30年来の課題解決に道_SiC MOSFETのコストを激減	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題1
			<u> </u>	<u>I</u>		

⑦掲載・放映 9/43

15	2020/9/20	日経エレクトロニクス2020年10月号 GaN/SiCの実用化が後押し電力パケットで電源をデジタル化		引原隆士 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題3- 2
16	2021/7/19	Compoud Semiconductor A superior process for the SiC power MOSFET	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	新聞掲載(WEB含む)	研究開発課題1
17	2021/10/27	日刊工業新聞 京大、堆積酸化膜でSiC半導体の 性能6倍 界面欠陥・エネ損失抑え る	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	新聞掲載(WEB含む)	研究開発課題1
18	2021/10/27	EE Times SiC-MOSFETの性能が6~80倍 に、トレンチ型に応用可能	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題1
19	2021/10/27	Yahooニュース SiC-MOSFETの性能が6~80倍に	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題1
20	2021/10/27	マイナビニュース 京大、界面の高品質化と平坦性向 上でSiCのチャネル移動度を6倍以 上に向上	京都大学	木本恒暢 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題1
21	2021/3/29	日刊工業新聞 京大、350°Cで「SiC半導体IC」基本 動作実証 相補型、消費電力抑え る	京都大学	金子光顕 (京都大学)	新聞掲載(WEB含む)	研究開発課題1
22	2021/3/29	Yahooニュース 350℃の高温下で「SiC半導体IC」 基本動作、京大が実証成功した意 義	京都大学	金子光顕 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含む)	研究開発課題1
23	2021/3/30	TechPlus 京大、SiC半導体により350℃でも 動作する集積回路の基本動作実 証に成功	京都大学	金子光顕 (京都大学)	雑誌掲載(WEB含 む)	研究開発課題1

⑦掲載・放映 10/43

(平成30年度~令和4年度) OPERA 活動実績一覧 【幹事機関:京都大学】

領域名: 超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

⑧ 外部資金の獲得

No	配分機関	事業・制度名称	実施期間	新規/ 継続	当該年度配 分額[千円]	配分総額[千円]	採択機関	資金の使途	備考 (関連する研究開発課題番号 等)
1	NEDO	官民による若手 研究者発掘支援 事業	R4.10-R6.9	新規	8,086	18,395	京都工芸繊維大学	成果の展開に関連して	研究開発課題3-1
2	JST/SIP第2 期	「脱炭素社会実 現のためのエネ ルギーシステム」	H30.11-R5.3	継続	6,709	38,461	京都大学	研究開発費として	研究開発課題3-2
3	日本学術振 興会	科学研究費基盤 (B)	R2.4-R5.3	継続	26,011	26,011	京都大学	研究開発費として	研究開発課題3-2 R2:17811,R3:5200,R4:3000
4	日本学術振 興会	科学研究費基盤 (B)	R5.4-R8.3	新規	8,970	15,670	京都大学	成果の展開に 関連して	研究開発課題3-2, 3-1 R5:8970,R6:4300,R7:2400
5	NEDO	先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術 先導研究プログラム	R4/5-R6/3	新規	10,000	10,000	長岡技大 大阪大学 明電舎	成果の展開に 関連して	研究開発課題4-1
6	JST	A-STEP 本格型	2020/12- 2025/3	新規	187,618	418,066	京都大学 ネクスファイテ クノロジー	成果の展開に 関連して	研究開発課題4-1
7	長野県	長野県航空機シ ステム研究開発 費補助金	H28.4-R3.3	継続	700	1,550	信州大学	研究開発費として	研究開発課題4-2
8	JST	未来社会創造事 業	H29.11-R4.3	継続	68,000	73,500	信州大学	研究開発費として	研究開発課題4-2
9	JSPS	科学研究費基盤 研究(B)	R1.4-R5.3	継続	1,700	13,300	信州大学	研究開発費として	研究開発課題4-2
10	文部科学省	革新的パワーエレクトロニクス創 出基盤技術研究 開発事業	R3.8-R8.3	新規	116,750	565,000	信州大学	成果の展開に 関連して	研究開発課題4-2, 4-3
11	津川モーター 財団	研究助成事業	H30-R1	新規	1,000	1,000	信州大学	研究開発費として	研究開発課題4-3
12	JST	未来社会創造事 業	H29.11-R3.3	継続	4,000	4,000	信州大学	成果の展開に 関連して	研究開発課題4-3
13	JST	A-STEP トライア ウト	R2.10-R4.3	継続	2,990	_,	信州大学	成果の展開に 関連して	研究開発課題4-3
14	日本学術振 興会	科学研究費助成 事業 若手研究	H31.4-R4.3	継続	4,160	4,160	京都市産業技 術研究所	研究開発費として	研究開発課題5 「無電解めっき法によるイン バーFe-Ni合金の成膜プロ
15	EC-Euratom	Horizon Europe	R4.9-R8.2	新規	2,116	3,527	京都大学	研究開発費として	研究開発課題7

⑧外部資金の獲得
11/43

(平成30年度~令和4年度) OPERA 活動実績一覧 【幹事機関:京都大学】

領域名超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

① 論文

No	書誌情報 (書式:著者名、タイトル、掲載誌名(書籍名)、巻、号、ページ、発行年)	発表機関 (参画機関の み)	形式(査読の有無) ※プルダウン選択	掲載 状況	備考 (関連する研究開 発課題番号等)
1	T. Kobayashi, Y. Matsushita, T. Kimoto, and A. Oshiyama, "Structural determination of phosphosilicate glass based on first-principles molecular dynamics calculation", Jpn. J. Appl. Phys., 58, 011001/1-4 (2019).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
2	T. Kobayashi, J. Suda, and T. Kimoto, "Reduction of interface state density in SiC (0001) MOS structures by low-oxygen-partial-pressure annealing", Appl. Phys. Express, 12, 031001/1-3 (2019).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
3	M. Nakajima, M. Kaneko and T. Kimoto, "Normally-off 400° C operation of n- and p-JFETs with a side-gate structure fabricated by ion implantation into a high-purity semi-insulating SiC substrate," IEEE Electron Device Lett., vol.40, pp. 866-869 (2019).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
4	K. Ito, T. Kobayashi, and T. Kimoto, "Influence of vacuum annealing on interface properties of SiC (0001) MOS structures," Jpn. J. Appl. Phys., vol.58, 078001/1–4 (2019).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
5	A. Ijjima and T. Kimoto, "Electronic energy model for single Shockley stacking fault formation in 4H-SiC crystals," J. Appl. Phys., vol.126, 105703/1-15 (2019).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
6	T. Kimoto, "Updated trade-off relationship between specific on-resistance and breakdown voltage in 4H-SiC{0001} unipolar devices,"Jpn. J. Appl. Phys., vol.58, 018002/1-4 (2019).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
7	M. Hara, S. Asada, T. Maeda, and T. Kimoto, "Forward thermionic field emission transport and significant image force lowering caused by high electric field at metal/heavily-doped SiC Schottky interfaces," Appl. Phys. Express, vol.13, 041001/1-4 (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
8	A. Iijima and T. Kimoto, "Estimation of the critical condition for expansion/contraction of single Shockley stacking faults in 4H-SiC PiN diodes," Appl. Phys. Lett., 116, 092105 (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
9	T. Kobayashi, T. Okuda, K. Tachiki, K. Ito, Y. Matsushita, and T. Kimoto, "Design and formation of SiC (0001)/SiO2 interfaces via Si deposition followed by low-temperature oxidation and high-temperature nitridation," Appl. Phys. Express, 13, 091003 (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
10	Koji Ito, Takuma Kobayashi, and Tsunenobu Kimoto, "Effect of quantum confinement on the defect-induced localized levels in 4H-SiC(0001)/SiO2 systems," J. Appl. Phys. 128, 095702 (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
11	M. Kaneko, M. Nakajima, Q. Jin, and T. Kimoto, "Experimental Study on Short-Channel Effects in Double-Gate Silicon Carbide JFETs," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 67, 4538 (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1

9論文 12/43

12	K. Tachiki, M. Kaneko, T. Kobayashi, and T. Kimoto, "Formation of high-quality SiC(0001)/SiO2 structures by excluding oxidation process with H2 etching before SiO2 deposition and high-temperature N2 annealing," Appl. Phys. Express, 13, 121002 (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
13	T. Kimoto and H. Watanabe, "Defect engineering in SiC technology for high-voltage power devices" (Invited Review), Appl. Phys. Express, 13, 120101 (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
14	K. Tachiki and T. Kimoto, "Improvement of Both n- and p-Channel Mobilities in 4H-SiC MOSFETs by High-Temperature N2 Annealing," IEEE Trans. Electron Devices, 68, 638 (2021).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
15	K. Tachiki, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Mobility improvement of 4H-SiC (0001) MOSFETs by a three-step process of H2 etching, SiO2 deposition, and interface nitridation," Appl. Phys. Express, 14, 031001 (2021).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
16	K. Tachiki, T. Ono, T. Kobayashi, and T. Kimoto, "Short-Channel Effects in SiC MOSFETs Based On analyses of Saturation Drain Current," IEEE Trans. Electron Devices, 68, 1382 (2021).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
17	M. Hara, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Nearly Fermi-level-pinning-free interface in metal/heavily-doped SiC Schottky structures," Jpn. J. Appl. Phys., 60, SBBD14 (2021).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
18	Q. Jin, M. Nakajima, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Lateral spreads of ion-implanted AI and P atoms in silicon carbide," Jpn. J. Appl. Phys., 60, 051001 (2021).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
19	E. Do, M. Kaneko, and T. Kimoto,"Expansion patterns of single Shockley stacking faults from scratches on 4H-SiC,"Jpn. J. Appl. Phys., 60, 068001 (2021).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
20	K. Kanegae, T. Okuda, M. Horita, J. Suda, and T. Kimoto, "Depth profiles of electron traps generated during reactive ion etching in n-type 4H-SiC characterized by using isothermal capacitance transient spectroscopy," J. Appl. Phys., 130, 105703 (2021).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
21	T. Kimoto, M. Kaneko, K. Tachiki, K. Ito, R. Ishikawa, X. Chi, D. Stefanakis, T. Kobayashi, and H. Tanaka, "Physics and Innovative Technologies in SiC Power Devices," Tech. Digest of 67th IEEE Int. Electron Devices Meeting (San Francisco, 2021),36-1-1 - 36-1-4.	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
22	K. Mikami, K. Tachiki, K. Ito, and T. Kimoto, "Body doping dependence of field-effect mobility in both n- and p-channel 4H-SiC metal-oxide- semiconductor field-effect transistors with nitrided gate oxides," Appl. Phys. Express, 15, 036503 (2022).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1
23	T. Kimoto, K. Tachiki, A. Iijima, and M. Kaneko, "Performance Improvement and Reliability Physics in SiC MOSFETs,"Proc. of IEEE Int. Reliability Phys. Sympo. (Dallas/Virtual, 2022), 5B.1.1 - 5B.1.7.	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題1

9論文 13/43

24	K. Takahashi, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Carrier Trapping Effects on Forward Characteristics of SiC p-i-n Diodes Fabricated on High-Purity Semi- Insulating Substrates," IEEE Trans. Electron Devices, 69, 1989 (2022).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
25	M. Hara, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Critical electric field for transition of thermionic field emission/field emission transport in heavily doped SiC Schottky barrier diodes," Appl. Phys. Lett., 120, 172103 (2022).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
26	K. Tachiki, K. Mikami, K. Ito, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Mobility enhancement in heavily doped 4H-SiC (0001), (11-20), and (1-100) MOSFETs via an oxidation-minimizing process," Appl. Phys. Express, 15, 071001 (2022).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
27	M. Kaneko, M. Nakajima, Q. Jin, and T. Kimoto, "SiC Complementary Junction Field-Effect Transistor Logic Gate Operation at 623 K," IEEE Electron Device Lett., 43, 997 (2022).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
28	K. Ito, M. Horita, J. Suda, and T. Kimoto, "Effective channel mobility in phosphorus-treated 4H-SiC (0001) metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with various p-body doping concentrations, "Jpn. J. Appl. Phys., 61, 098001 (2022).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
29	T. Kimoto, "High-voltage SiC power devices for improved energy efficiency" (Review), Proc. Japan Academy, Ser. B, 98, 161 (2022).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
30	K. Ito and T. Kimoto, "Mobility degradation under a high effective normal field in an inversion layer of 4H–SiC (0001) metal-oxide-semiconductor structures annealed in POCI3," Appl. Phys. Express, 15, 121006 (2022).		論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
31	T. Matsuoka, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Physical properties of sulfur double donors in 4H-SiC introduced by ion implantation," Jpn. J. Appl. Phys., 62, 010908 (2023).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
32	M. Hara, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Enhanced tunneling current and low contact resistivity at Mg contacts on heavily phosphorus-ion-implanted SiC," Appl. Phys. Express, 16, 021003 (2023).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
33	T. Kitawaki, M. Hara, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto, "Impact of the split-off band on the tunneling current at metal/heavily-doped p-type SiC Schottky interfaces," Appl. Phys. Express 16, 031005 (2023).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題1
34	E. D. Herbschleb, Y. Ohki, K. Morita, Y. Yoshii, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, N. Mizuochi, "Low-frequency quantum sensing", Physical Review Applied, 18, 034058 (2022).	京都大学、スミダ電機、産総研	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題2
35	R. Kawase, H. Kawashima, H. Kato, N. Tokuda, S. Yamasaki, M. Ogura, T. Makino, N. Mizuochi, "n-Type diamond synthesized with tert-butylphosphine for long spin coherence times of perfectly aligned NV centers", Journal of Applied Physics, 132, 174504 (2022)	京都大学、産総研、金沢大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題2
36	E. D. Herbschleb, N. Mizuochi, "Alternating-current quantum sensing with nitrogen-vacancy centers", Journal of Applied Physics	京都大学	論文(査読有り)	受付 (審査 中)	研究開発課題2
	-		ž.	-	

9論文 14/43

37	Y. Takemura, K. Hayashi, S. Onoda, H. Abe, T. Ohshima, T. Taniguchi, M. Fujiwara, H. Morishita, I. Ohki, Y. Yoshii, N. Mizuochi, "Broadband microwave antenna for uniform manipulation of millimeter-scale volumes of NV sensors in diamond", Journal of Applied Physics, 132, 224501 (2022).		論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題2
38	T. Nishikawa, N. Morioka, H. Abe, H. Morishita, T. Ohshima, N. Mizuochi. Electrical detection of nuclear spin via silicon vacancy in silicon carbide at room temperature, Applied Physics Letters, vol.121, pp.1840005	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題2
39	Michihiro Shintani, Yohei Nakamura, Kazuki Oishi, Masayuki Hiromoto, Takashi Hikihara, and Takashi Sato: "Surface-Potential-Based Silicon Carbide Power MOSFET Model for Circuit Simulation," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 12, pp. 10774-10783, Dec. 2018. (DOI: 10.1109/TPEL.2018.2805808)	京都大学 奈良先端科学 技術大学院大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-1
40	Manuel Sanchez and Takashi Hikihara, Symmetry Recovering of an AC/AC Converter Working in a Chaotic Regime, NOLTA, IEICE	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
41	Manuel Sanchez, Takafumi Okuda, and Takashi Hikihara, "Stabilization of Mode in Imbalanced Operation of Matrix Converter by Time-Delayed Feedback Control", International Journal of Circuit Theory and Applications, John Wiley, DOI: 10.1002/cta.2556	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題3-2
42	片山慎治, 高橋亮, 引原隆士, "電力パケット伝送システムにおける分散電需給制御の無線を用いた実機検証", 電子情報通信学会和文論文誌A	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題3-2
43	Hiroki Tsukamoto, Michihiro Shintani, and Takashi Sato, "Statistical Extraction of Normally and Lognormally Distributed Model Parameters for Power MOSFETs," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 33, Issue 2, pp.150-158, May. (DOI: 10.1109/TSM.2020.2975300)	京都大学 奈良先端科学 技術大学院大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題3-1
44	Baek Seongcheol, Hiroyasu Ando, Takashi Hikihara, Consensus-Based Distribution of Power Packets and Decentralized Control for Routing, AIP, Chaos (published online).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
45	Naomitsu Yoshida, Ryo Takahashi, and Takashi Hikihara, Power Regeneration from DC Motor with Bidirectional Router in Power Packet Dispatching System, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, Express Letter (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題3-2
46	Yuma Murakawa, Yohei Sadanda, and Takashi Hikihara, Parallelization of Boost and Buck Type DC-DC Converters by Individual Passivity-Based Control, IEICE Trans. A Vol.E103-A, No.3, pp.589-595 (2020).	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
47	Toko Mannari; Takafumi Okuda, Takashi Hikihara, Model for charging/discharging dynamics of cells in redox flow battery with transport delay, Physica Scripta, Phys. Scr. 94 095005 (2019)		論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
48	片山慎治, 高橋亮, 引原隆士, "電カパケット伝送システムにおける分散電力需給制御の無線を用いた実機検証", 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J102-A No. 9 pp. 240-248 (2019)	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2

9論文 15/43

49	Shiu Mochiyama and Takashi Hikihara, Packet-based feedback control of electrical drive and its application to trajectory tracking of manipulator, International Journal of Circuit Theory and Applications, Vol.47, Iss. 4, 612–632 (2019)	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
50	Manuel Sanchez and Takashi Hikihara, Symmetry Recovering of an AC/AC Converter Working in a Chaotic Regime, NOLTA, IEICE, Vol. 10, Issue 2, pp.131-139 (2019)	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
51	Fuat Kucuk and Taketsune Nakamura, "Low-cost permanent magnet-assisted switched reluctance motor for adjustable speed drive applications", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 15, pp. 1213-1218, 2020	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-3
52	Hiroki Tsukamoto, Michihiro Shintani, and Takashi Sato, "Statistical extraction of normally and lognormally distributed model parameters for power MOSFETs," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing (TSM), Vol.33, No.2, pp.150-158, May 2020.	京都大学、奈良先端大	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-1
53	Kyohei Shimozato, Yohei Nakamura, Song Bian, and Takashi Sato, "An electrothermal compact model of SiC MOSFETs for analyzing avalanche failure mechanism," Japanese Journal of Applied Physics (JJAP), Vol.60, No.SB, pp.SBBD11, February 2021.	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-1
54	Toko Mannari, Takafumi Okuda, and Takashi Hikihara, Prediction of restriction in output current by reactant flow in redox flow battery for compensating load variations, International Journal of Circuit Theory and Applications	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
55	Manuel Sánchez Tejada, Takashi Hikihara, The Broken Symmetry of Output Currents in a Matrix Converter and Its Recovery Control, Journal of Circuits, Systems, and Computers, World Scientific	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
56	Shiu Mochiyama and Takashi Hikihara, "Impulsive torque control of biped gait with power packets",Nonlinear Dynamics	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
57	Yuma Murakawa and Takashi Hikihara, "Output Series-Parallel Connection of Passivity-Based Controlled DC-DC Converters: Generalization of Asymptotic Stability", IEEE Trans. CAS I: Regular Papers, Vol. 68, Iss. 4, pp.1750 - 1759, 2021	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
58	Shiu Mochiyama, Takafumi Okuda, and Takashi Hikihara, "Power Packet Dispatching with Shared Power Line: Experimental Verification for Industrial Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, Vol. 2, Iss.2, 164-172, 2021	京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題3- 2_2020
59	Kazuki Hashimoto and Takashi Hikihara, "Equivalent Circuit of Interleaved Air-Core Toroidal Transformer Derived from Analogy with Coupled Transmission Lines", IEICE, ELEX, Vol. 17 Iss. 21 Pages 20200262, 2020	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
60	Fuat Kucuk and Taketsune Nakamura, "Low-cost permanent magnet-assisted switched reluctance motor for adjustable speed drive applications", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 15, pp. 1213-1218, 2020	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-3

9論文 16/43

61	Michihiro Shintani, Aoi Ueda, and Takashi Sato, "Accelerating parameter extraction of power MOSFET models using automatic differentiation," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.37, No.3, pp.2970-2980, March 2022.	奈良先端大、 京都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題3-1
62	Yohei Nakamura, Naotaka Kuroda, Ken Nakahara, Michihiro Shintani, and Takashi Sato, "Evaluation of thermal couple impedance model of power modules for accurate die temperature estimation up to 200°C," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.61, No.SC, pp.SC1082, March 2022.	口一厶、 奈良先端大、 京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-1
63	Shiu Mochiyama, Kazuhiro Koto, and Takashi Hikihara, "Routing optimization on power packet dispatching system based on energy loss minimization," IEICE NOLTA, Volume 13 Issue 1 Pages 139-148	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
64	Hajime Takayama, Takafumi Okuda, and Takashi Hikihara, "Digital Active Gate Drive of SiC MOSFETs for Controlling Switching Behavior Preparation toward Universal Digitization of Power Switching", International Journal of Circuit Theory and Applications (2021,9,5)	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
65	Shota Inagaki, Shiu Mochiyama, and Takashi Hikihara, "Electric Power Processing Using Logic Operation and Error Correction," Royal Society Open Science, Vol. 8, Iss. 7, 8202344 (2021.7.21)	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
66	Yuma Murakawa and Takashi Hikihara, "Output Series-Parallel Connection of Passivity-Based Controlled DC-DC Converters: Generalization of Asymptotic Stability", IEEE Trans. CAS I: Regular Papers, Vol. 68, Iss. 4, pp.1750 - 1759 (2021)	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-2
67	Fuat Kucuk and Taketsune Nakamura, "Development of a variable-magnet switched reluctance motor drive", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 17, pp. 732-738, 2020	京都大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題3-3
68	Yohei Nakamura, Michihiro Shintani, and Takashi Sato, "Dominant Model-Parameter Determination for the Analysis of Current Imbalance Across Paralleled Power Transistors," IEEE Transactions on Power Electronics	ローム, 京都工 芸繊維大学, 京 都大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題3-1
69	Shuhei Fukunaga, Hajime Takayama, and Takashi Hikihara, Slew rate control of switching transient for SiC MOSFET in boost converter using digital active gate driver (accepted by IET Power Electronics)	京都大学	論文(査読有り)	受理	研究開発課題3-2
70	Shuhei Fukunaga, and Tsuyoshi Funaki: "Transient thermal network model identification for power module packages," IEICE Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA), vol.11, no.2, pp157-169, 2020.	大阪大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-1
71	Tomoki Akiyama, Shu Ishida, Tomohiro Shirasawa, Takanobu Fukuoka, Shintaro Hara, Hiroshi Yoshida, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Kousuke Miyaji, "Integrated CMOS Switch Buck DC-DC Converter Fabricated in Organic Interposer with Embedded Magnetic Core Inductor", Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.43, No.3, pp.64-69, 2019.	信州大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-2
72	川原翔太, 稲本恭兵, 山本達也, 金野泰之, ト 穎剛, 佐藤敏郎, 水野 勉, "インダクタキャンセル方式を用い た磁性コンポジット材料の鉄損測定に関する検討", 日 本AEM学会誌, Vol.27, No.2, pp.239-244, 2019.	信州大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-2

9論文 17/43

73	鳥島健太, 志村和大, 佐藤光秀, 水野勉, 松岡孝: "広帯域で大きなインダクタンスをもつハイブリッドインダクタの検討"、日本磁気学会誌, Vol. 4, No. 1, pp. 77-80., 2020.	信州大学	論文(査読有り)	受理	研究開発課題4-3
74	Atsushi Yao and Tetsuo Hatakeyama, "Iron Loss and Hysteresis Properties under High-Temperature Inverter Excitation" Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 43, No. 3, pp. 46-49 (2019)	富山県立大学	論文(査読有り)	掲載 済	研究開発課題4-4
75	Atsushi Yao, Tsuyoshi Funaki and Tetsuo Hatakeyama, "Representation of Magnetic Hysteresis Phenomena under Inverter Excitation in a Circuit Simulator using Coupling Analysis of Electricity and Magnetism" Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 43, No. 6, pp. 105–108 (2019)	富山県立大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-4
76	Atsushi Yao, "Iron Loss and Hysteresis Properties of an Amorphous Ring Core at High Temperatures under Inverter Excitation" Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 44, No. 2, pp. 30–33 (2020)	富山県立大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-4
77	Atsushi Yao, Ryo Moriyama and Tetsuo Hatakeyama, "Iron Loss and Magnetic Hysteresis Properties of Nanocrystalline Ring Core at High and Room Temperatures Under Inverter Excitation" Journal of the Magnetics Society of Japan	富山県立大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-4
78	宮地幸佑, 曽根原誠, 佐藤敏郎, "磁気デバイスと集積回路のヘテロジニアス三次元実装システム, 特集:マイクロ電源に関する最新動向", 日本磁気学会報「まぐね」, 特集:マイクロ電源に関する最新動向, Vol.15, No.3, pp.158-166, 2020.	信州大学	論文(査読無し)	掲載済	研究開発課題4-2
79	佐藤敏郎, "高周波電力用軟磁性磁心材料の損失発生機構", 日本磁気学会報「まぐね」, 初等連載講座「磁性材料と電磁波」, Vol.15, No.4, pp.:223-231, 2020.	信州大学	論文(査読無し)	掲載済	研究開発課題4-2
80	Shuhei Fukunaga, Tsuyoshi Funaki, "Thermal Decouple Design of Multichip SiC Power Module With Thermal Anisotropic Graphite, "IEEE Trans. CPMT, Vol.11, No.5, pp.778-784, 2021.	大阪大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-1
81	Shuhei Fukunaga, Tsuyoshi Funaki, "Chip Layout Optimization of SiC Power Modules Based on Multiobjective Electro-Thermal Design Strategy, " IEEJ J. IA, Vol. 11, No.1, pp.157-162, 2022.	大阪大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-1
82	Manabu Horiuchi, Ryoken Masuda, Yinggang Bu, Masami Nirei, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno, "Effect of Magnetic Wedge Characteristics on Torque Ripple and Loss in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEJ, Journal of Industry Applications, Vol.11 No.1 pp.49-58, 2022.	信州大学	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題4-3
83	熊野 豊, 福永 崇平, 舟木 剛, 「放熱経路として用いられるバスバーの温度分布解析モデル」, エレクトロニクス実装学会誌, 25巻, 3号, pp.269-271, 2022年.	大阪大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題4-1
84	Shuhei Fukunaga, and Tsuyoshi Funaki: "Identification of high resolution transient thermal network model for power module packages," Material Science Forum, vol. 1062, pp. 253-257, 2022.	大阪大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題4-1
85	野村 優貴, 舟木 剛,「VNAのポート延長機能を用いた パワーループ寄生成分の抽出方法」, 電気学会論文誌 D, 142巻, 6号, pp.488-489, 2022年.	大阪大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題4-1

9論文 18/43

86	二社谷 一樹, 井渕 貴章, 舟木 剛, 「SiC MOSFETとゲート駆動回路の温度特性がデッドタイムに与える影響の検討」, 電気学会論文誌D, 142巻, 7号, pp.559-560, 2022年.	大阪大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題4-1
87	Shuhei Fukunaga, and Tsuyoshi Funaki: "Identification of high resolution transient thermal network model for power module packages," Material Science Forum, vol. 1062, pp. 253-257, 2022.	大阪大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題4-1
88	Shuhei Fukunaga, Hajime Takayama, and Takashi Hikihara: "Slew rate control of SiC MOSFET in boost converter using digital active gate driver," IET Power Electronics, in press (accepted, 2022)	大阪大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題4-1
89	佐藤敏郎, 水野勉, "MHz帯スイッチング電源用インダクタ, トランスの開発", 日本磁気学会報「まぐね」, 特集; パワーエレクトロニクスの動向, Vol.17, No.3, pp.142-148, 2022.	信州大学	論文(査読無し)	掲載	研究開発課題4- 2, 4-3
90	川田奈波, 大山秀樹, 南澤俊孝, 曽根原誠, 佐藤敏郎, "倍電流整流回路を用いたLLC共振コンバータ用結合インダクタの作製", 日本磁気学会論文特集号, vol.7, no.1, 5 pages, 2023年5月掲載予定.	信州大学	論文(査読有り)	採録決定	研究開発課題4-2
91	佐藤敏郎, 水野勉, "MHz帯スイッチング電源用インダクタ, トランスの開発", 日本磁気学会報「まぐね」, 特集; パワーエレクトロニクスの動向, Vol.17, No.3, pp.142-148, 2022.	信州大学	論文(査読無し)	掲載	研究開発課題4- 2, 4-3
92	堀内 学, 吉田 亮, 楡井 雅巳, 佐藤 光秀, 水野 勉:埋込磁石形同期モータの磁性くさびに使用する磁性コンポジット材の配合および混合条件, 電気学会論文誌D, Vol. 143, No.1, pp.70-77, 2023.1.	信州大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題4-3
93	堀内 学, 吉田 亮, 楡井 雅巳, 佐藤 光秀, 水野 勉:磁性くさびを用いた埋込磁石形同期モータのトルクリプルおよび損失の低減, 電気学会論文誌D, Vol. 143, No. 2, pp. 157-165, 2023.2.	信州大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題4-3
94	Yamamoto T., Nagayama T., and Nakamura T., Thermal Expansion and Thermal Stress Behavior of Electroless-Plated Fe-Ni-B Alloy Thin Film for High-Density Packaging, J. Electrochem. Soc., 166, D3238-D3245, doi: 10.1149/2.0301901jes, 2019		論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題5
95	Takayo Yamamoto, Tomio Nagayama, Yoshiki Konno, Kaname Okura, and Toshihiro Nakamura,"Preparation and Characterization of Electroless Deposited Fe-Ni-B Alloy Films",. ECS Transactions, Vol.89, No.7, pp.53-64, 2019	京都市産業技 術 研究所	論文(査読有り)	掲載済	研究開発課題5
96	永山 富男, 山本 貴代, 中村 俊博, "インバーFe-Ni合金の電解析出と熱的・機械的特性"科学と工業, Vol.94, No.1, pp.9-17, 2020	京都市産業技 術 研究所	その他著作物(総説、 書籍など)	掲載済	研究開発課題5(総 説)
97	山本貴代、永山富男、中村俊博, "インバー型Fe-Ni合金膜の無電解めっき法による作製", 表面技術, vol. 72, No. 11, pp.599-604, 2021	京都市産業技 術研究所	その他著作物(総説、 書籍など)	掲載済	研究開発課題5解 説
98	T. Hinoki, F. Kano, S. Kondo, Y. Kawaharada, Y. Tsuchiya, M. Lee, H. Sakai, "Development of Liquid Phase Sintering Silicon Carbide Composites for Light Water Reactor," Coatings, 12 (2022) 623.	京都大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題7
99	J. Lee, T. Hinoki, "Densification behavior of monolithic SiC fabricated by pressureless liquid phase sintering method," Open Ceramics, 11 (2022) 100289.	京都大学	論文(査読有り)	掲載	研究開発課題7

9論文 19/43

100	檜木達也、「事故耐性燃料被覆管材料としてのSiC 複合材料の開発(SiC 複合材料の近年の進歩と展望)」、プラズマ・核融合学会誌、98[8](2022)355-59.	京都大学	その他著作物(総説、 書籍など)	掲載	研究開発課題7
101	檜木達也、「まとめ(SiC 複合材料の近年の進歩と展望)」、プラズマ・核融合学会誌、98[8] (2022) 365-66.	京都大学	その他著作物(総説、 書籍など)	掲載	研究開発課題7
102	B. Huang, M. She, L. Feng, Y. Zhong, K. Kawasaki, F. Shinoda, T. Hinoki, "Irradiation response of liquid-phase sintered SiC assisted with Y2O3-Al2O3 sintering additive at 300° C up to 100 dpa," JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS, 579 (2023) 154405.		論文(査読有り)	掲載	研究開発課題7

9論文 20/43

(平成30年度~令和4年度) OPERA 活動実績一覧 【幹事機関:京都大学】

領域1超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

① 発表

W 9E		•						
No	発表者	タイトル	学会名等	場所	年月日	発表機関 (参画機関のみ)	発表形式	備考 (関連する研究開発課題番号 等)
1	T. Kimoto	"Defect electronics in SiC for high-voltage power devices and future prospects (plenary)"	KIEEME-Silicon Carbide Conference	Busan, Korea	2019/3/21	京都大学	招待講演	研究開発課題1
	伊藤滉二, 小林拓真, 小堀田昌宏, 須田淳, 木本恒暢	"SiC MOSFETのゲート特性に着目した伝導帯端近傍の界面準位密度評価"	進パワー半導体	京都	2018/11/6	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
3	立木馨大, 小野貴央, 小林拓真, 木本恒暢	"SiC MOSFETにおける高密度界面準位がロールオフ特性に及ぼす影響の解析"	応用物理学会先 進パワー半導体 分科会第5回講演 会	京都	2018/11/6	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
4	中島誠志, 金子光顕, 木本恒暢	"高温動作集積回路を 目指したノーマリオフ 型 p-JFETおよびn- JFETの同一SiC基板 上への作製"	応用物理学会先 進パワー半導体 分科会第5回講演 会	京都	2018/11/6	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
5	木本恒暢	"SiCへのイオン注入 技術とデバイス応用"	第66回応用物理 学会春季学術講 演会	東京	2019/3/10	京都大学	招待講演	研究開発課題1
	伊藤滉二, 小林拓真, 堀田昌宏, 須田淳, 木本恒暢	"SiC MOSFETにおける界面準位密度分布のボディ層濃度依存性"	第66回応用物理 学会春季学術講 演会	東京	2019/3/10	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	K. Ito, T. Kobayashi, M. Horita, J. Suda, and T. Kimoto		Symposium on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2019	куото	2019/3/5	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	K. Tachiki, T. Ono, T. Kobayashi, and T. Kimoto	"Degradation in threshold voltage roll-off characteristics of SiC MOSFETs induced by interface states", Symposium on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2019, KYOTO, 2019/3/5	Symposium on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2019	куото	2019/3/5	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
9	T. Kimoto	"SiC power devices: Overview, defect electronics, and reliability"	2019 IEEE Int. Reliability Physics Symposium	Monterey, USA	2019/4/2	京都大学	招待講演	研究開発課題1
10	T. Kimoto	"Growth and defect reduction of SiC for low-loss power devices"	2nd Nucreation and Growth Research Conf.	Kyoto	2019/6/10	京都大学	招待講演	研究開発課題1
	T. Kimoto, T. Kobayashi, K. Tachiki, and K. Ito	"Promise and future challenges of SiC power MOSFETs"	Int. Conf. on Insulating Films on Semiconductors 2019	Cambridge, UK	2019/7/1	京都大学	招待講演	研究開発課題1
12	T. Kimoto,	"Progress and future challenges of SiC power devices"	Cambridge Power Electronics Colloquium 2019	Cambridge, UK	2019/7/2	京都大学	招待講演	研究開発課題1
13	K. Tachiki and T. Kimoto	"Reduction of interface states in 4H-SiC/SiO2 near both conduction and valence band edges by high-temperature nitrogen annealing"	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2019	Kyoto	2019/9/30	京都大学	口頭発表	研究開発課題1

⑩発表 21/43

	K. Ito, T. Kobayashi, and T. Kimoto	"Interface state density distributions near the conduction band edge originating from the conduction band fluctuation in SiO2/SiC systems"	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2019	Kyoto	2019/10/1	京都大学	招待講演	研究開発課題1
	M. Nakajima, Q. Jin, M. Kaneko, and T. Kimoto,	"Experimental study on short-channel effects in side-gate SiC JFETs"	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2019	Kyoto	2019/10/1	京都大学	ポスター発表	研究開発課題1
	M. Hara, S. Asada, T. Maeda, and T. Kimoto		Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2019	Kyoto	2019/10/2	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	C. Koo, M. Kaneko, and T. Kimoto	temperature annealing	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2019	Kyoto	2019/10/2	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	K. Kanegae, T. Okuda, M. Horita, J. Suda, and T. Kimoto	"Depth profiles of deep levels generated by ICP-RIE in 4H- SiC"	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2019	Kyoto	2019/10/2	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	M. Kaneko, A. Tsibizov, T. Kimoto, and U. Grossner	"Breakdown characteristics of lateral PIN diodes fully fabricated by ion implantation into HTCVD-grown high-purity semi-insulating SiC substrate"	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2019	Kyoto	2019/10/3	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
20	K. Tachiki, K. Kanegae, and T. Kimoto,	fabricated by ion implantation into HTCVD-grown high-	9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors	Okinawa	2019/11/14	京都大学	ポスター発表	研究開発課題1
	M. Nakajima, Q. Jin, M. Kaneko, and T. Kimoto		9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors	Okinawa	2019/11/14	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	K. Ito, T. Kobayashi, and T. Kimoto	of interface state density originating from tail states of the conduction band in	9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors	Okinawa	2019/11/14	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
23	木本恒暢	"ワイドギャップ半導体 パワーデバイスの発 展と展望"	先進パワー半導 体分科会	広島	2019/12/3	京都大学	招待講演	研究開発課題1
	T. Kimoto, X. Chi, Y. Zhao, H. Niwa, and M. Kaneko	"Breakdown phenomena in high- and low-voltage SiC devices"	Breakdown phenomena in high- and low- voltage SiC devices	Yokohama	2019/12/11	京都大学	招待講演	研究開発課題1
	T. Kimoto and M. Kaneko	"Progress and future challenges of SiC power devices for energy efficiency"	12th Int. Symp. on Advanced Plasma Sci. & Its Applications for Nitrides and Nanomaterials	Nagoya	2019/3/9	京都大学	招待講演	研究開発課題1
	T. Kimoto and M. Kaneko	Progress and Future Prospects of High- Voltage SiC Power Devices	2020 Int. Symp. on VLSI Technology, Systems and Applications	Hsinchu, Taiwan	2020/8/11	京都大学	招待講演	研究開発課題1

⑩発表 22/43

	Do Euihyeon, 金子光顕, 木本恒暢	熱平衡状態における 4H-SiCエピタキシャル 層中シングルショック レー型積層欠陥の縮 小運動	演会	オンライン開催	2020/9/10	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
28	立木馨大, 金子光顕, 小林拓真, 木本恒暢	酸化過程排除プロセスによる高品質4H-SiC/SiO2界面の形成	第81回応用物理 学会秋季学術講 演会	オンライン開催	2020/9/10	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
29	具燦淳, 金子光顕, 木本恒暢	高温アニールおよび 熱酸化処理による高 純度半絶縁性4H-SiC 基板のフェルミ準位の 変化	第81回応用物理 学会秋季学術講 演会	オンライン開催	2020/9/11	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
30	金祺民, 中島誠志, 金子光顕, 木本恒暢	SEM・SCM測定による SiC基板における注入 イオンの横方向広がり の定量測定	学会秋季学術講	オンライン開催	2020/9/11	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	Masahiro Hara, Mitsuaki Kaneko, Tsunenobu Kimoto	Accurate Determination of Barrier Heights in Heavily-Doped SiC Schottky Barrier Diodes Fabricated with Various Metals	2020 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials	オンライン開催	2020/9/29	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	Qimin Jin, Masashi Nakajima, Mitsuaki Kaneko, Tsunenobu Kimoto	Lateral spreads of AI and P atoms implanted into a high- purity semi-insulating SiC substrate	2020 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials	オンライン開催	2020/9/29	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	木本恒暢, 小林拓真, 立木馨大, 松下雄一郎	SiCパワーMOSFETお よび界面高品質化の 進展	第68回応用物理 学会春季学術講 演会	オンライン開催	2021/3/16	京都大学	招待講演	研究開発課題1
34	金子光顕, 中島誠志, 木本恒暢	高温動作SiC相補型 JFET論理ゲートの論 理閾値電圧の温度変 化抑制に関する理論 的検討	第68回応用物理 学会春季学術講 演会	オンライン開催	2021/3/18	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
35	松岡大雅, 金子光顕, 木本恒暢	Sイオン注入n型SiC層のHall効果測定による Sドナーの評価	第68回応用物理 学会春季学術講 演会	オンライン開催	2021/3/18	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
36	立木馨大, 金子光顕, 小林拓真, 木本恒暢		第68回応用物理 学会春季学術講 演会	オンライン開催	2021/3/18	京都大学	招待講演	研究開発課題1
37	三上杏太, 伊藤滉二, 立木馨大, 木本恒暢	様々なボディ層ドナー 密度を有する 4H- SiC(0001) pチャネル MOSFETのチャネル移 動度評価	第68回応用物理 学会春季学術講 演会	オンライン開催	2021/3/18	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
38	伊藤滉二, 堀田昌宏, 須田淳, 木本恒暢	リン処理を施したSiC MOSFETにおける実 効移動度のボディ電 位依存性	第68回応用物理 学会春季学術講 演会	オンライン開催	2021/3/18	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	T. Kimoto, T. Kobayashi, K. Tachiki, K. Ito, and M. Kaneko	Progress and Future Challenges of SiC Power MOSFETs	5th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference 2021	ハイブリッド開催	2021/3/9	京都大学	招待講演	研究開発課題1
40	K. Tachiki and T. Kimoto	Reduction of C- related Defects near SiO2/SiC Interface	Mini-Conference on Materials, Processing and Fabrication of Advanced Wide Bandgap Power Devices	オンライン開催	2021/5/11	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	K. Ito and T. Kimoto	Modeling of MOSFET Characteristics	Mini-Conference on Materials, Processing and Fabrication of Advanced Wide Bandgap Power Devices	オンライン開催	2021/5/11	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
42	前田憲幸, 金子光顕, 木本恒暢	相補型JFETによる高 温動作IC設計に向け たSiC JFETのデバイ スモデル構築	第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	オンライン開催	2021/9/11	京都大学	口頭発表	研究開発課題1

⑩発表 23/43

43	原征大, 田中一, 金子光顕, 木本恒暢		第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	オンライン開催	2021/9/12	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	石川諒弥, 原征大, 田中一, 金子光顕, 木本恒暢	4H-SiCIにおける電子 移動度の異方性	第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	オンライン開催	2021/9/12	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	T. Kimoto, K. Tachiki, T. Kobayashi, and Y. Matsushita	Reduction of interface state density in the SiC MOS structures by a non-oxidation process	2021 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials	オンライン開催	2021/9/15	京都大学	招待講演	研究開発課題1
46	K. Mikami, K. Ito, K. Tachiki, and T. Kimoto	Channel mobility of NO- and N2-annealed 4H-SiC(0001) p- channel MOSFETs with various donor concentrations of n-body	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/26	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
47	K. Ito, M. Horita, J. Suda, and T. Kimoto	Universal Mobility in SiC MOSFETs with Very Low Interface State Density	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/26	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
48	K. Tachiki, K. Ito, M. Kaneko, and T. Kimoto	Mobility improvement in 4H-SiC MOSFETs by H2 etching before SiO2 deposition and interface nitridation	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/26	京都大学	招待講演	研究開発課題1
49	E. Do, M. Kaneko, and T. Kimoto	single Shockley stacking faults from	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/26	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	M. Hara, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto	Ideal Thermionic Field Emission and Field Emission Transport through Metal/Heavily-Doped SiC Schottky Barriers	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/26	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	R. Ishikawa, M. Hara, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto	mobility in 4H-SiC over wide ranges of	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/26	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
52	T. Matsuoka, M. Kaneko, and T. Kimoto	Sulfur ion implantation into SiC: Deep and double donor	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/27	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
53	K. Takahashi, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto	Impacts of High- Concentration Carrier Traps on Electrical Characteristics of p- i-n Diodes on HPSI SiC Substrates	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/27	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
54	N. Maeda, M. Kaneko, H. Tanaka, and T. Kimoto	SPICE model reproducing the static and dynamic characteristics of a SiC complementary JFET inverter from 300 to 573 K	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/27	京都大学	ポスター発表	研究開発課題1
55	M. Kaneko, M. Nakajima, and T. Kimoto	Suppression of a logic-threshold- voltage shift in a SiC complementary JFET logic gate at high temperature	Europ. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2020– 2021	ハイブリッド開催	2021/10/28	京都大学	口頭発表	研究開発課題1

⑩発表 24/43

56	T. Kimoto, M. Kaneko, T. Kobayashi, H.	A New Horizon of SiC Technology Driven by	Europ. Conf. on Silicon Carbide	ハイブリッド開催	2021/10/28	京都大学	その他	研究開発課題1
	Tanaka, K. Tachiki, A. Iijima, S. Yamashita, X. Chi, Y. Zhao, D. Stefanakis, and Y. Matsushita	Deeper Understanding of Physics						
57	T. Kimoto, M. Kaneko, K. Tachiki, K. Ito, R. Ishikawa, X. Chi, D. Stefanakis, T. Kobayashi, and H. Tanaka	Physics and Innovative Technologies in SiC Power Devices	67th IEEE Int. Electron Devices Meeting	ハイブリッド開催	2021/12/15	京都大学	招待講演	研究開発課題1
58	木本 恒暢	SiCパワー半導体の進展と将来展望	第69回応用物理 学会春季学術講 演会	ハイブリッド開催	2022/3/22	京都大学	招待講演	研究開発課題1
59	渡部平司, 木本恒暢	SiCパワーデバイス開発における欠陥制御の重要性	第69回応用物理学会春季学術講演会	ハイブリッド開催	2022/3/22	京都大学	招待講演	研究開発課題1
60	小林拓真, 奥田貴史, 立本藤大, 伊藤滉二, 松下雄一郎, 木本恒暢	SiC熱酸化抑制プロセ スによる高品質 SiC/SiO2界面の形成	第69回応用物理 学会春季学術講 演会	ハイブリッド開催	2022/3/24	京都大学	招待講演	研究開発課題1
61	村木瞬星, 三上杏太, 立木馨大, 木本恒暢	酸化抑制プロセスを 用いて作製したSiC MOSFET特性の表面 水素処理時間依存性	第69回応用物理 学会春季学術講 演会	ハイブリッド開催	2022/3/24	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
62	伊藤滉二, 田中一, 堀田昌宏, 須田淳, 木本恒暢	様々なゲート酸化膜を 有するSiC MOSFETに おけるHall移動度の実 効垂直電界依存性	学会春季学術講	ハイブリッド開催	2021/3/24	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
63	石川諒弥, 原征大, 田中一, 金子光顕, 木本恒暢	4H-SiCIにおける電子 移動度および正孔移 動度の異方性	第69回応用物理 学会春季学術講 演会	ハイブリッド開催	2021/3/25	京都大学	招待講演	研究開発課題1
64	金子光顕, 中島誠志, 金祺民, 木本恒暢	SiC相補型JFET論理 ゲートの350°C動作	第69回応用物理 学会春季学術講 演会	ハイブリッド開催	2022/3/25	京都大学	ポスター発表	研究開発課題1
65	T. Kimoto, K. Tachiki, A. Ijjima, and M. Kaneko	Performance Improvement and Reliability Physics in SiC MOSFETs	IEEE Int. Reliability Physics Symposium	ハイブリッド開催	2022/3/30	京都大学	招待講演	研究開発課題1
66	T. Kimoto	Defect Electronics in SiC Power Semiconductor	2022 Physics Colloquium in Erlangen	ハイブリッド開催	2022/4/27	京都大学	招待講演	研究開発課題1
67	T. Kimoto, A. Iijima, and M. Kaneko	Physical Understanding and Prevention of Bipolar Degradation in SiC Power Devices	241st Electrochemical Society Meeting	Vancouver	2022/5/30	京都大学	招待講演	研究開発課題1
68	T. Kimoto	Progress and Future Challenges in SiC Power Semiconductor	ETH Power Electronics Colloquium 2022	Zurich	2022/6/28	京都大学	招待講演	研究開発課題1
69	M. Kaneko, M. Nakajima, Q. Jin, and T. Kimoto	High-Temperature Operation of SiC JFET-Based Complementary Circuits	2022 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices	ハイブリッド開催	2022/7/20	京都大学	招待講演	研究開発課題1
70	T. Kimoto, K. Tachiki, K. Ito, K. Mikami, M. Kaneko, M. Horita, and J. Suda	High Mobility in SiC MOSFETs with Heavily-Doped p- Bodies	14th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics	広島	2022/8/30	京都大学	招待講演	研究開発課題1
71	K. Ito, M. Horita, J. Suda, and T. Kimoto	Influence of electrons trapped at the interface states on Hall electron mobility in SiC/SiO2 inversion layers	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2022	Davos, Switzerland	2022/9/12	京都大学	口頭発表	研究開発課題1

⑩発表 25/43

				1_			1	TT -4- 00 34 -50 0T .
	K. Mikami, K. Tachiki, M. Kaneko, and T. Kimoto	High-quality MOS interface on 4H-SiC (11-20) formed by the oxidation-minimizing process	Materials 2022	Davos, Switzerland	2022/9/12	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
73	M. Hara, M. Kaneko, and T. Kimoto	Enhanced tunneling current at Schottky contacts formed on heavily P+-implanted SiC	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2022	Davos, Switzerland	2022/9/13	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
74	H. Fujii, K. Kanegae, M. Kaneko, and T. Kimoto	Depth profile analyses of deep levels near 4H-SiC p+-n junctions formed by Al ion implantation	Silicon Carbide and Related	Davos, Switzerland	2022/9/14	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
75	T. Kitawaki, M. Hara, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto	split-off band to tunneling current in	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2022	Davos, Switzerland	2022/9/14	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
76	M. Kaneko, M. Nakajima, Q. Jin, and T. Kimoto	High temperature operation of SiC complementary JFET logic gates fully fabricated by ion implantation	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2022	Davos, Switzerland	2022/9/15	京都大学	招待講演	研究開発課題1
77	T. Matsuoka, M. Kaneko, and T. Kimoto	Anomalously high electron mobility in S- implanted n-type SiC	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2022	Davos, Switzerland	2022/9/15	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
78	S. Shibata, T. Matsuoka, M. Kaneko, and T. Kimoto	Remarkable improvement of threshold voltage controllability in ion-implantation-based SiC JFETs by adopting bottom-gate structure	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2022	Davos, Switzerland	2022/9/15	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
79	R. Ishikawa, H. Tanaka, M. Kaneko, and T. Kimoto	Anisotropy of hole mobility in 4H-SiC over wide ranges of acceptor concentration and temperature	Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2022	Davos, Switzerland	2022/9/16	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
80	木本恒暢, 立木馨大, 伊藤滉二, 三上杏太, 金子光顕	SiCパワーMOSFETの 課題とMOS界面高品 質化の進展	第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	仙台	2022/9/21	京都大学	招待講演	研究開発課題1
81	藤井開, 鐘ヶ江一孝, 金子光顕, 木本恒暢	熱酸化SiO2/SiC界面 近傍に形成されるSiC 中の深い準位		仙台	2022/9/21	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
82	三上杏太, 立木馨大, 金子光顕, 木本恒暢	酸化抑制プロセスに よって形成した高品質 4H-SiC(1120)/SiO2界 面の低温特性評価		仙台	2022/9/21	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
83	伊藤滉二, 田中一, 堀田昌宏, 須田淳, 木本恒暢	SiC (0001), (11-20), (1-100) MOSFETにお けるHall移動度のボ ディ層濃度依存性	第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	仙台	2022/9/21	京都大学	招待講演	研究開発課題1
84	前田憲幸, 金子光顕, 木本恒暢	TCADデバイスシミュ レーションによるSiCサイドゲートJFETにおける短チャネル効果の 解析		仙台	2022/9/22	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
85	柴田峻弥, 松岡大雅. 金子光顕. 木本恒暢	半絶縁性SiC基板へ のイオン注入によるボ トムゲートJFETの作 製	第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	仙台	2022/9/22	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
86	原征大, 金子光顕, 木本恒暢	高濃度Pイオン注入 SiC上ショットキー障壁 におけるトラップアシ ストトンネル電流の解 析	第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	仙台	2022/9/22	京都大学	口頭発表	研究開発課題1

⑩発表 26/43

0.7	ル 마 라 目	ム尼 / 京海 広 ドープ	ㅡ~~ □ 는 □ 뉴 Ⅲ	161.75	0000 /0 /00	1	D = 20 ±	7 T 177 BB 3% -M B5 4
87	北脇武晃, 原征大, 田中一, 金子光顕, 木本恒暢	金属/高濃度ドープp型SiCショットキー界面におけるトンネル電流に対するスプリットオフバンドの影響		仙台	2022/9/22	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	M. Kaneko, M. Hara, M. Nakajima, Q. Jin, and T. Kimoto		Int. Conf. on Ion Implantation Technology 2022	San Diego, USA	2022/9/27	京都大学	招待講演	研究開発課題1
89	K. Tachiki, T. Kimoto	n- and p- Channel	IEEE EDS 22nd Workshop on Electron Devices	大阪	2022/10/7	京都大学	招待講演	研究開発課題1
90	T. Kimoto	Progress and Future Challenges in SiC Power Devices	IME Workshop on SiC Power Devices 2022	ハイブリッド開催	2022/11/8	京都大学	招待講演	研究開発課題1
	T. Kimoto, K. Tachiki, K. Ito, K. Mikami, and M. Kaneko	Progress and Future Challenges in SiC MOSFETs	Asia-Pacific Workshop on Wide Gap Semiconductors 2022	ハイブリッド開催	2022/11/15	京都大学	招待講演	研究開発課題1
92	金祺民, 具燦淳, 金子 光顕, 木本恒暢	熱酸化処理を施した 高純度半絶縁性SiC 基板上n型およびp型 イオン注入層の電気 的性質	第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	東京	2023/3/15	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
	X. Chi, K. Tachiki, K. Mikami, M. Kaneko, T. Kimoto	Subthreshold characteristics of 4H– SiC n– and p–channel MOSFETs at low temperature		東京	2023/3/16	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
94	三上杏太, 金子光顕, 木本恒暢	無極性面を用いた高 移動度SiC pチャネル MOSFETの作製と評 価	第82回応用物理 学会秋季学術講 演会	東京	2023/3/16	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
95	原征大, 金子光顕, 木 本恒暢	高濃度Pイオン注入に	学会秋季学術講	東京	2023/3/16	京都大学	口頭発表	研究開発課題1
96	水落憲和	"量子技術を用いた NV中心量子センサの 高感度化研究"	量子生命科学会	東京	2019/5/23	京都大学	招待講演	研究開発課題2
97	水落憲和	"ダイヤモンド中のNV 中心による量子セン サ"	センシング技術応 用研究会第210回 研究例会	大阪	2020/1/20	京都大学	招待講演	研究開発課題2
98	水落憲和	Quantum Sensing and extension of Spin Coherence of NV centers in Diamond	FQST2020 International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology	東京	2020/2/3	京都大学	招待講演	研究開発課題2
99	水落憲和	ダイヤモンド量子セン サ研究	第75回スピントロニクス専門研究会	Web開催	2020/7/22	京都大学	招待講演	研究開発課題2
	竹村竟, 小野門浩武, 一郡島山, 一郡島山, 大谷藤原下弘出, 大谷藤东大水落 大水落憲和	ための広領域・広帯	2021年 第68回応 用物理学会春季 学術講演会	Web開催	2021/3/17	京都大学	口頭発表	研究開発課題2
101	水落憲和	ダイヤモンド量子セン サの 現状と展望	JSR・東京大学協 創拠点CURIE 第2 回 CURIEセミナー		2021/6/29	京都大学	招待講演	研究開発課題2

⑩発表 27/43

102	水落憲和	ダイヤモンドを用いた	(一社)次世代セン	オンライン開催	2021/7/6	京都大学	招待講演	研究開発課題2
		高感度量子センサ開 発研究	サ協議会 第59回 センサ&アクチュ エータ技術シダイ ジウム「輝くダイ ヤモンド:エレクト ロニクスから量子 センシングへ」					
103	水落憲和		基研研究会 巨視 的量子現象と量子 重力. 京都大学 基 礎物理学研究所		2021/10/11-14	京都入学	招待講演	研究開発課題2
104	N. Mizuochi	diamond semiconductors	24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems / 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (Joint Conference)	オンライン開催	2021/11/1-5	京都大学	招待講演	研究開発課題2
105	Ernst David Herbschleb		応用物理学会固体量子センサ研究会 第2回研究会 〜超高感度磁気 センサの最前線〜	オンライン開催	2021/11/11	京都大学	招待講演	研究開発課題2
106	N. Mizuochi	centers in diamond for		オンライン開催	2022/2/8-10	京都大学	招待講演	研究開発課題2
107	水落憲和	ダイヤモンドNV量子セ ンサ研究の進展	第69回応用物理 学会春季学術講 演会、シンポジウム「ダイヤモンド NVセンタを用いた 固体量子センサの 最新研究動向」	オンライン (青山学院大学)	2022/3/23	京都大学	招待講演	研究開発課題2
108	水落憲和	ダイヤモンドNV中心 の量子状態制御	日本化学会 第 102春季年会, 中 長期テーマシンポ ジウム「分子から 創るSpin Qubitsの 最前線」	オンライン (関西学院大学)	2022/3/24	京都大学	招待講演	研究開発課題2
109	水落憲和		東京大学光量子 科学研究センター セミナー	Web開催 (東京大学)	2022/4/15	東京大学	招待講演	研究開発課題2
110	水落憲和	ダイヤモンド中のNV 中心の特徴と応用研究	日本学術振興会、 アモルファス・ナノ 材料と応用第 147 委員会、第 150 回 研究会		2022/5/11	日本学術振興会	招待講演	研究開発課題2
111	N. Mizuochi	Ultra-long Spin Coherence of NV	The 20th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA 2022)	Web開催 (Jeju, Korea)	2022/7/17-21	International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA)	招待講演	研究開発課題2
112	N. Morioka	for quantum		Web開催 (Jeju, Korea)		International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA)	招待講演	研究開発課題2
113	水落憲和	ダイヤモンドNV中心 の基礎と応用	ワイドギャップ半 導体学会、第7回 研究会 ダイヤモン ドNVセンタとその デバイス応用	Web開催	2022/7/22	ワイドギャップ半 導体学会	招待講演	研究開発課題2

⑩発表 28/43

114	N. Mizuochi	High sensitive quantum sensing of NV centers in diamond semiconductor	14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22	Okinawa	2022/10/16-21	International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices	招待講演	研究開発課題2
115	西川哲理	孔を用いた室温下で	第83回応用物理 学会秋季学術講 演会	web開催 (東北大学)	2022/9/20	応用物理学会	口頭発表	研究開発課題2
116	川瀬凜久	NV量子 センサ高感度 化のためのtert butylphosphine を用い たn型ダイヤモンド合 成	学会秋季学術講	web開催 (東北大学)	2022/9/23	応用物理学会	口頭発表	研究開発課題2
117	川瀬凜久	不純物制御したダイ	第70回応用物理 学会春季学術講 演会	上智大学	2022/3/16	応用物理学会	口頭発表	研究開発課題2
	上田葵, 新谷道広, 岩田大志, 山口賢一, 井上美智子		電子情報通信学会技術研究報告 (VLSI設計技術研究会)	沖縄県青年会館	2019/2/1	奈良先端科学 技術大学院大学	口頭発表	研究開発課題3-1
119	Michihiro Shintani and Takashi Sato	for Surface-	IEEE/ACM Workshop on Variability Modeling and Characterization (VMC)	San Diego, CA	2018/11/1	奈良先端科学 技術大学院大学	ポスター発表	研究開発課題3-1
	Hiroki Tsukamoto, Michihiro Shintani, and Takashi Sato	"A study on statistical parameter modeling of power MOSFET model by principal component analysis"	Conference on	Fukuoka	2019/3/1	奈良先端科学 技術大学院大学	口頭発表	研究開発課題3-1
121	Seongcheol Baek, Hiroyasu Ando, and Takashi Hikihara	"Consensus-Based Distributed Control of Power Packet Distribution Network"	IJKCCS2018	Peyongchang, Korea	2019/01/6-8	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	前田凌佑, 奥田貴史, 引原隆士	SiC MOSFETのデバイ	分科会 第5回講演		2018/11/6	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	片山慎治, 引原隆士	"電力パケットの半二 重伝送に関する基礎 実験"	平成30年電気関 係学会関西支部 連合大会	大阪工業大学	2018/12/1	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	稲垣翔太. 持山志宇, 引原隆士		平成30年電気関 係学会関西支部 連合大会	大阪工業大学	2018/12/1	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
125	岡部寿男	エネルギーの情報化: 10年間の活動と今後 の展望	京都大学スマート エネルギーマネジ メント研究ユニット 第4回スマートエネ ルギーマネジメン トシンポジウム	館	2019/3/27	京都大学	口頭発表	研究開発課題6−1
	加藤丈和, 岡部寿男	"エネルギーの情報 化:10年間の活動と今 後の展望"	第4回スマートエネ ルギーマネジメン トシンポジウム	京都大学	2019/3/27	京都大学	口頭発表	研究開発課題6-1
	Michihiro Shintani, Kazuki Oishi, and Takashi Sato	Power MOSFETs Utilizing a Generic	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM)	Kyoto	2019/9/29- 10/4	奈良先端科学 技術大学院大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	Michihiro Shintani, Hiroki Tsukamoto, and Takashi Sato		IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)	North Carolina, USA	2019/7/7	奈良先端科学 技術大学院大学	ポスター発表	研究開発課題3-1
129	Takashi Hikihara	and its distribution in	PIMS Workshop on Mathematical Sciences and Clean Energy Applications	UBC, Vancouver, Canada	2019/5/23	京都大学	招待講演	研究開発課題3-2

⑩発表 29/43

		14		I	I		I =	TT 000 00 00 00 00 00 00
130	Ryo Takahashi, Naomitsu Yoshida, and Takashi Hikihara	"Power Packet Dispatching System and Router for Bi- directional Dispatching"	IEEE 3rd ICDCM	Matsue	2019/5/23	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
131	橋本和樹, 奥田貴史, 引原隆士	"空芯トランスの内部 磁束密度分布測定系 の開発"	応用物理学会先 進パワー半導体 分科会第14回研 究会	横浜情報文化センター	2019/5/21	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
132	奥田貴史, 引原隆士	"SiC MOSFETを用いた高周波直流昇圧回路に関する検討"	応用物理学会先 進パワー半導体 分科会第14回研 究会	横浜情報文化センター	2019/5/21	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	河本昌樹, 奥田貴史, 引原隆士	"中性点クランプ型コンバータにおける出力 電圧のキャパシタンス 依存性に関する数値 的検討"	システム制御情報 学会SCI'19	中央電気倶楽部	2019/5/23	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	岡本侑己, 持山志宇, 引原隆士	"電カパケットを用いた空間ベクトル法に基づく同期機の可変速制御に関する数値的検討"	システム制御情報 学会SCI'19	中央電気倶楽部	2019/5/24	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
135	片山慎治, 引原隆士	"電力パケットの半二 重伝送に対する競合 回避型プロトコルの実 装"	令和元年電気関 係学会関西支部 連合大会	大阪市立大学	2019/11/30	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	高山創, 奥田貴史, 引原隆士	"ディジタルアクティブ ゲートドライバによる SiC MOSFETの駆動 に関する基礎実験"	令和元年電気関 係学会関西連合 大会	大阪市立大学	2019/12/1	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	稲垣翔太, 持山志宇, 引原隆士	"電力パケットを用いた電力の論理演算の動的な選択アルゴリズム"	電気学会電子回 路研究会	芝浦工業大学 豊 洲キャンパス	2019/9/20	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
138	片山慎治. 引原隆士		電子情報通信学 会電子通信エネ ルギー技術研究 会	龍谷大学	2019/10/10	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	高山創, 奥田貴史, 引原隆士	"ディジタルアクティブ ゲートドライブにおけ るSiC MOSFETのゲー ト駆動波形に関する 一検討"	電気学会半導体 電力変換研究会	立命館大学,大阪 茨木キャンパス	2020/1/24	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
	岡本侑己, 中村武恒, Kucuk Fuat	"永久磁石補助スイッチトリラクタンスモータの制動係数に関する検討"		東京電機大学 東京千住キャンパ ス	2020/3/13	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-3
141	岡部寿男	"Society 5.0(超ス マート社会)の実現に 向けてのIoTの役割"	第5回スマートエネ ルギーマネジメン トシンポジウム	京都大学,東京オフィス	2019/10/31	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-4
142	Kyohei Shimozato, Song Bian, and Takashi Sato	A Compact Device Model for SiC MOSFETs Valid for Wide-Temperature Range	IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA- Asia)	Virtual conference	2020/9/23-25	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	Kyohei Shimozato, Yohei Nakamura, Song Bian, and Takashi Sato	An electrothermal compact model of SiC MOSFETs for simulating unclamped inductive switching tests	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)	Virtual conference	2020/9/27-30	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	Aoi Ueda, Michihiro Shintani, Michiko Inoue, and Takashi Sato	Measurement of BTI- induced Threshold Voltage Shift for Power MOSFETs under Switching Operation	IEEE Asian Test Symposium	Virtual conference	2020/11/22-25	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	Yohei Nakamura, Naotaka Kuroda, Atsushi Yamaguchi, Ken Nakahara, Michihiro Shintani, and Takashi Sato	Influence of Device Parameter Variability on Current Sharing of Parallel-Connected SiC MOSFETs	IEEE Asian Test Symposium	Virtual conference	2020/11/22-25	京都大学 奈良先端大 ローム	口頭発表	研究開発課題3-1

⑩発表 30/43

146	Yuma Murakawa	Regulation of Parallel Connected Boost and Buck Converters byPassivity-Based Control	WiPDA-Asia2020	オンライン開催	2020/09/23- 2020/09/25	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
147	Hajime Takayama	A Study on Suppressing Surge Voltage of SiC MOSFET Using DigitalActive Gate Driver	WiPDA-Asia2020	オンライン開催	2020/09/23- 2020/09/25	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
148	Shinji Katayama, Takashi Hikihara	Experimental Verification of Half- Duplex Power Packet Transmission	IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2020)	オンライン開催	2020/10/10- 2020/10/21	京都大学	ポスター発表	研究開発課題3-2
149	Kazuki Hashimoto, Takafumi Okuda, and Takashi Hikihara	of Stray Capacitances in Air-Core Toroidal	IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2020)	オンライン開催	2020/10/10– 2020/10/21	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
150	Yuma Murakawa and Takashi Hikihara	Passivity-Based Adaptive Control and Decoupling Control for Series-Parallel Connection of DC-DC Converters	2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications	オンライン開催	2020/11/16	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
151	Shiu Mochiyama and Takashi Hikihara	Generation of Symmetrical and Asymmetrical Biped Gaits with Quantized Excitation by Power Packets	2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications	オンライン開催	2020/11/18	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
152	間宮崇弘, 持山志宇, 引原隆士	電カパケットを用いた 時分割多重による無 線電力伝送に関する 検討	電子情報通信学 会総合大会	オンライン開催	2021/3/12	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
153	村川悠磨, 引原隆士	出力側で直並列接続されたDC-DCコンパータの受動性に基づく制御に関する理論的検討	電子情報通信学 会総合大会	オンライン開催	2021/3/10	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
154	福永崇平, 高山創, 引原隆士	GAIC基づくSiC MOSFETのディジタル アクティブゲート駆動 波形の最適化に関す る一検討	電気学会全国大 会	オンライン開催	2021/03/09- 2021/03/11	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
155	塩貝 優, Castellazzi Alberto, 引原隆士	High Frequency Power Converter Design for Low-load Efficiency Boost	電気学会半導体 電力変換研究会	オンライン開催	2021/1/22	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
156	池田大輝, Castellazzi Alberto, 引原隆士	High-Frequency and High-Efficiency Design of GaN-Based Non-Inverting Buck- Boost Converter	電気学会半導体電力変換研究会	オンライン開催	2021/1/22	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
157	片山慎治, 引原隆士	カスケード接続された 電カパケットルータの 出力電圧に関する数 値的一検討	電子情報通信学 会 NLP研究会	オンライン開催	2021/1/22	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
158	村川悠磨,引原隆士	受動性に基づく制御を 適用した直並列DC- DCコンバータの安定 性に関する一般化	電気学会電子回 路研究会	オンライン開催	2021/1/21	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-2
159	岡本 侑己, 中村 武恒, Kucuk Fuat	永久磁石補助スイッチトリラクタンスモータの 可変界磁駆動の実現 に向けたパルス着磁・ 脱磁特性および回転 特性に関する検討		オンライン開催	2021/3/9	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-3_2020

⑩発表 31/43

100	소 # 구 # 도 図 # # 고	悪気力動車・の広田		中田科学开办 家	0001 /0 /10	I	704	7T 77 88 3% 58 85 0 0
	中村 武恒, 岡本 侑己	を目指したスイッチトリラクタンスモータの研究開発〜アルニコ磁石の補助で高性能化への挑戦〜	研究会	&WEB開催	2021/3/12	京都大学	その他	研究開発課題3-3
161	Kyohei Shimozato and Takashi Sato	dGPLVM: A nonparametric device model for statistical circuit simulation	IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS)	Virtual conference	2022/3/21-24	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	西谷洋太, 新谷道広, 井上美智子, 佐藤高史	高精度過渡解析に向けたスイッチング波形によるパワーMOSFETゲート入力容量測定手法	電気学会研究会 資料半導体電力 変換研究会(SPC)	オンライン開催	2022/3/10-11	奈良先端大、京 都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	Kyohei Shimozato, Michihiro Shintani, and Takashi Sato	Adaptive outlier detection for power MOSFETs based on Gaussian process regression	IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)	Virtual conference/Dalla s	2022/3/19-23	京都大学、奈良先端大	ポスター発表	研究開発課題3-1
	佐藤高史, 塚本裕貴, 辺 松, 新谷道広	統計的回路シミュレーションのための非正規 分布モデルパラメータ の生成(招待)	応用物理学会シリ コンテクノロジー分 科会・電子情報通 信学会SDM研究 会		2021/11/11-12	京都大学、奈良先端大	招待講演	研究開発課題3-1
	Yohei Nakamura, Michihiro Shintani, and Takashi Sato	Sensitivity analysis of device parameter variation on current imbalance of parallel connected SiC power MOSFETs	IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE)	Virtual conference	2021/10/10-14	ローム、奈良先 端大、京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
166	Hiroki Tsukamoto, Song Bian, and Takashi Sato	arbitrary model-	International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)	Virtual conference	2021/09/27-29	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	Kyohei Shimozato, Yohei Nakamura, and Takashi Sato	in unclamped inductive switching based on three-	International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)	Virtual conference	2021/09/27-29	京都大学、ローム	口頭発表	研究開発課題3-1
	Yohei Nakamura, Naotaka Kuroda, Ken Nakahara, Michihiro Shintani, and Takashi Sato	Experimental validation of thermal couple impedance model for accurate die temperature estimation in power modules,	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)	Virtual conference	2021/9/6-9	ローム、奈良先 端大、京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
169	塩崎 雅人, 佐藤 高史	X線照射によるパワー MOSFETの特性変動 の分析	DA シンポジウム	オンライン開催	2021/09/01-03	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
170	Michihiro Shintani and Takashi Sato	induced threshold	International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM)	Virtual conference	2021/6/1	奈良先端大、京 都大学	口頭発表	研究開発課題3−1
	Shuhei Fukunaga, Hajime Takayama, and Takashi Hikihara	A study on switching surge voltage suppression of SiC MOSFET by digital active gate drive	The 12th IEEE Energy Conversion Congress and Exposition – Asia, 2021 (ECCE – Asia 2021)	Online	2021/5/24-27,		口頭発表	研究開発課題3-2
172	Hajime Takayama, Shuhei Fukunaga, and Takashi Hikihara	Switching Trajectory Control of SiC MOSFET Based on I- V Characteristics Using Digital Active Gate Driver	2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress and Exposition - Asia (ECCE-Asia 2021)	Online	2021/5/24-27,	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2

⑩発表 32/43

173	Taiki Ikeda, Alberto	Modulation Options	2021 IEEE 12th	Online	2021/5/24-27,	Kyoto Univ	口頭発表	研究開発課題3-2
	Taiki ikeda, Alberto Castellazzi, and Takashi Hikihara	Modulation Options for a High-Frequency High-Efficiency GaN- Based Non-Inverting Buck-Boost DC-DC Converter	Energy Conversion Congress and Exposition – Asia (ECCE-Asia 2021)	- Comme	2021/3/24-21,	icyoto Uliv.	□娱龙仪	iyi 元iがi元i森悠 ら Z
	Shiu Mochiyama, Takashi Hikihara	Impulsive Torque Control of Biped Gait With Spiking- Oscillator-Controlled Power Packet Dispatching System	KF-002283, TS- 20, ISIE2021	Online	2021/6/21	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
175	Yuma Murakawa, Takashi Hikihara	Adaptive Passivity- Based Control for Constant Voltage Output of Series- Paralleled DC-DC Converters	KF-002461, TS- 23, ISIE2021	Online	2021/6/21	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
176	Shinji Katayama and Takashi Hikihara	Connection Dependency of Output Voltage in Cascaded Power Packet Dispatching Network	IEEE International Conference on DC Microgrids (ICDCM 2021), PS1.8	Online	2021/7/20	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	Takahiro Mamiya, Shiu Mochiyama and Takashi Hikihara	An Experimental Study on Time Division Multiplexing of Wired and Wireless Power Transfer by Power Packets	2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2021)	Online	2021/10/1	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
178	村川 悠磨, 引原 隆士	直並列DC-DCコン バータ回路の受動性 に基づく制御と漸近安 定性に関する理論的 検討	第65回システム制 御情報学会研究 発表講演会 (SCI'21)	オンライン開催	2021/5/28	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	福永崇平,高山 創,引原	SiC MOSFETのディジ タルアクティブゲート 駆動波形の多目的最 適化に関する数値検 討	2021年電子情報 通信学会NOLTA ソサイエティ大会	オンライン開催	2021/6/12	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
180	村川悠磨, 引原隆士	DC-DCコンバータの 受動性に基づく適応 制御における制御パ ラメータ設定に関する 数値的検討	2021年電子情報 通信学会NOLTA ソサイエティ大会	オンライン開催	2021/6/12	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
181	片山慎治	カスケード接続された 電力パケットルータの 出力電圧に関する数 値的一検討	2021年電子情報 通信学会NOLTA ソサイエティ大会	オンライン開催	2021/6/12	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	間宮崇弘,持山志宇,引原	テムを用いた複数系 間の無線電力融通に 関する一検討	路研究会		2021/6/24	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	高山創, 福永崇平, 引原隆士	SiC MOSFETのゲート 電圧波形の遺伝的ア ルゴリズムによる最適 化に関する一検討	電気学会電子回 路研究会	オンライン開催	2021/6/24	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3−2
184	岡本 侑己,中村 武恒, K	Pulse Injection and Rotation Characteristics of 1 kW-class AlNiCo Magnet Assisted Switched Reluctance Motor	5th International Electric Vehicle Technology Conference 2021 (EVTeC 2021)	オンライン開催	2021/5/24	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-3
	岡本 侑己. 中村 武恒, Kucuk Fuat	永久磁石補助スイッチ トリラクタンスモータの 着磁特性と負荷特性		オンライン開催	2021/5/28	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-3
	西谷洋太, 新谷道広, 井上美智子, 佐藤高史	高精度な過渡解析に 向けたスイッチング波 形によるパワー MOSFET のゲート入 力容量測定手法		オンライン	2022/3/7	京都工芸繊維 大、奈良先端大、 京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1

⑩発表 33/43

	Yota Nishitani, Michiko Inoue, Takashi Sato, and Michihiro Shintani	Gate Input Capacitance Characterization for Power MOSFETs Using Turn-on and Turn-off Switching Waveforms	European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)	Hannover, Germany	2022/9/5-9/9	京都工芸繊維大、奈良先端大、京都大学	ポスター発表	研究開発課題3-1
188	Masato Shiozaki and Takashi Sato	Characteristic degradation of power MOSFETs by X-ray irradiation and its recovery	IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)		2022/03/27- 03/31	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	熊田翔。 西谷洋太。 古田潤。 小林和淑。 新谷道広	スイッチング波形に基づくドレイン-ソース間容量特性の測定手法に関する検討	電気学会 全国大会	名古屋大学東山 キャンパス	2023/03/15- 03/17	京都工芸繊維大学	口頭発表	研究開発課題3-1
190	Kota Niiyama, Hiromitu Awano, and Takashi Sato	Introducing transfer learning framework on device modeling by machine learning,	IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS)	東京大学	2023/03/27- 03/30	京都大学	口頭発表	研究開発課題3-1
	Shuhei Fukunaga, Hajim	active gate driving of DC-DC converter for suppressing switching surge voltage	The 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022 -ECCE Asia-)			Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
192	Yu Shiogai, Alberto Cas	Characterrization and switching strategy development for SMP SiC Power Modules	The 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022 -ECCE Asia-)	Hyogo, Japan	2022/5/15-19	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	Hajime Takayama, Shuhei Fukunaga, Takashi Hikihara	active gate drive sequence using genetic algorithm	EPE 2022 ECCE Europe	Hannover, Germany	2022/9/5-9	Kyoto Univ.	その他	研究開発課題3-2
194	Hajime Takayama, Shuhei Fukunaga, Takashi Hikihara	An estimation of load- dependent characteristics of SiC power MOSFETs while active-gate-driving	Conference on Silicon Carbide	Davos, Switzerland	2022/9/ 11-16	Kyoto Univ.	ボスター発表	研究開発課題3-2
	間宮 崇弘,持山 志宇, 引原 隆士	電力パケット伝送システムを用いた無線給電における電力変動の抑制に関する一検討	学会 研究発表講 演会	パーク	2022/5/18- /5/20	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
196	間宮 崇弘, 持山 志宇, 引原 隆士		信学会 回路とシ ステム研究会	新潟大学南キャンパス	2022/10/20	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
197	Hajime Takayama, Shuhei Fukunaka, and Takashi Hikihara	Exhaustive search of digitized gate voltage for SiC MOSFETs	2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2022)	Online	2022/12/12- 12/15	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	Shiu Mochiyama	A PDM-based strategy for power packet dispatching on shared power line	2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2022)		2022/12/12- 12/15	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	Ryo Takahashi, Takahiro Mamiya, Shiu Mochiyama, Hamzeh Jaber, Takashi Hikihara, and Alberto Castellazzi	Performance evaluation of discontinuous-PWM Y-Inverter AC motor drive system focusing on a wide range of motor rotation speeds	2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2022)	Online	2022/12/12- 12/15	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
200	金本 公平, 高山 創, 引 原 隆士	電圧制御型アクティブ ゲートドライブにおけ るスイッチング特性の 分布に関する検討	電子情報通信学 会 総合大会	芝浦工業大学大 宮キャンパス	2023/3/7-3/10	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2

⑩発表 34/43

	川染 陸人,持山 志宇, 引原 隆士	SRモータ駆動時の電力パケット情報読取りに関する一検討	電子情報通信学 会 総合大会	芝浦工業大学大 宮キャンパス	2023/3/7-3/10	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	樋渡 建人, 持山 志宇, 引原 隆士	電力回生を考慮した電力パケット密度変調に関する一検討	電子情報通信学会 総合大会	芝浦工業大学大 宮キャンパス	2023/3/7-3/10	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	福永 崇平, 高山 創, 引 原 隆士	ダブルパルス試験に よる事前決定駆動パ ラメータを用いた電力 変換回路の動特性改善	電気学会全国大会	名古屋大学東山 キャンパス	2023/3/15- 3/17	Kyoto Univ.	口頭発表	研究開発課題3-2
	福永崇平, 舟木剛	** 超音波によるパワーモジュール基板へのブスパー接合の初期接合のを強度に関する一様計 ータグチメソッドによる接合パラメータ設計**	平成31年電気学 会全国大会	北海道科学大学	2019/3/12	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
205	佐藤敏郎	"メタルコンポジット鉄 心材料の開発"	長野県テクノ財団 主催,平成30年度 第3回次世代パ ワーエレクトロニク ス研究会	信州大学,工学部 国際科学イノベー ションセンター	2019/3/6	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
	八尾惇, 畠山哲夫	"電気と磁気の連成解析を用いたインバータ励磁下の磁気特性に関する一検討"	平成31年 電気学 会全国大会	北海道科学大学	2019/3/12	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
	八尾惇, 畠山哲夫	"インバータ励磁下の 高温アモルファスリン グの鉄損特性に関す る一検討"	日本鉄鋼協会第 177回春季講演大 会	東京電機大学	2019/3/21	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
208	Shuhei Fukunaga	"A reliability assessment on busbar joint with ultrasonic bonding in power module for thermal stress"	International Symposium on Advanced Power Packaging	Osaka university, Japan	2019/10/7	大阪大学	ポスター発表	研究開発課題4-1
209	Tsuyoshi Funaki	"iA study on parasitic inductance and thermal resistance of	Symposium on Advanced Power	Osaka university, Japan	2019/10/8	大阪大学	招待講演	研究開発課題4-1
210	福永崇平	"パワーモジュールの 過渡熱回路モデル同 定手法に関する基礎 検討"	電気学会 電子デ バイス/半導体電 力変換合同研究 会, EDD-19- 070/SPC-19-156	東北大学	2019/11/1	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
211	野村優貴	"X線装置への適用に向けた高電圧パルス電源の小型化に関する一検討"	令和2年電気学会 全国大会	東京電機大学	2020/3/13	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
212	福永崇平	"有限要素法に基づく パワーモジュールの 電気/熱解析に関する 一検討"	令和2年電気学会 全国大会	東京電機大学	2020/3/13	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
213	藤倉 律也、	"MHz帯電力変換用プレス成型法鉄系メタルコンポジット磁心の作製"		豊橋技術科学大 学	2019/8/1	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
214	傳田隆之	学 "リーケージトランスを 用いたLLC-LC共振型 DC-DCコンバータの 基礎検討"		京都大学	2019/9/27	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
215	佐藤敏郎	"Fe-based Composite Magnetic Core for GaN Power Device Switching Converter"	International Symposium on Advanced Power Packaging 2019 (ISAPP2019)	大阪大学	2019/10/8	信州大学	招待講演	研究開発課題4-2
216	傳田隆之	"鉄系メタルコンポジット磁心トランスを用いたLLC-LC共振型DC-DCコンパータの基礎検討"	電気学会マグネ ティックス研究会	大阪大学,中之島 センター	2019/12/6	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
217	佐藤敏郎	"Beyond MHz帯電力 用磁心材料の開発"	電気学会マグネ ティックス研究会	大阪大学,中之島 センター	2019/12/6	信州大学	招待講演	研究開発課題4-2

⑩発表 35/43

218	佐幸孝昭	"低透磁率磁心を用いたBeyond-MHzスイックを たBeyond-MHzスイック チング電源用EMIフィールタの基礎検討"	電気学会東海支 部学生発表会	信州大学	2020/1/31	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
219	応 媛	"多粒度分布モデルに 基づく鉄系メタルコン ポジット磁心の評価"	電気学会東海支 部学生発表会	信州大学	2020/1/31	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
220	稲垣悠太郎	"MHz帯磁心材料用低 磁歪ナノ結晶扁平粉 末の作製と特性評価"	電気学会東海支 部学生発表会	信州大学	2020/1/31	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
221	植田大輝	"熱測定による鉄損評 価法の基礎検討"	電気学会東海支 部学生発表会	信州大学	2020/1/31	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
222	植田大輝	"温度測定による鉄損 測定法の基礎検討"	令和2年電気学会 全国大会	東京電機大学	2020/3/11	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
223	稲本恭兵	"低粘度アクリル樹脂を用いた磁性コンポジット材の高透磁率化"	電気学会マグネ ティクス研究会	鹿児島大学	2019/11/30	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-3
224	鳥島健太	"広帯域で大きなイン ダクタンスをもつハイ ブリッドインダクタの検 討"	日本磁気学会学 術講演会	京都大学	2019/9/27	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-3
225	八尾惇, 畠山哲夫	"PWM インバータ励磁 下の磁性材料の磁気 ヒステリシス特性の数 値的一検討"	産業応用部門大	長崎大学	2019/8/21	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
226	守山遼, 八尾惇, 畠山哲夫	"高キャリア周波数を 用いたPWMインバータ 励磁下の鉄損特性に 関する一検討"		石川工業高等専 門学校	2019/9/1	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
227	Atsushi Yao and Tetsuo Hatakeyama	"Magnetic Hysteresis Phenomena under PWM Inverter Excitation by using Coupled Analysis between Electricity and Magnetism in Circuit Simulator"	64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials Abstract	Rio All-Suite Hotel & Casino	2019/11/6	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
228	Atsushi Yao and Tetsuo Hatakeyama	"Iron loss characteristics of a high-temperature amorphous ring under PWM inverter excitation	64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials Abstract	Rio All-Suite Hotel & Casino	2019/11/8	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
229	守山遼, 八尾惇, 畠山哲夫	"高温環境におけるインバータ励磁下のナノ結晶リングコアの鉄損特性に関する一検討"		慶應義塾大学日 吉キャンパス	2019/12/19	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
230	守山遼, 八尾惇, 畠山哲夫	"高キャリア周波数を 用いたインバータ励磁 下の磁気および鉄損 特性に関する一検討"	令和元年度 北陸 地区学生による研 究発表会		2020/3/8	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
231	八尾惇	"インバータ励磁下の 磁性材料の磁気およ び鉄損特性"	令和2年 電気学会 全国大会シンポジ ウム	東京電機大学	2020/3/13	富山県立大学	口頭発表	研究開発課題4-4
232	阪部智城	SiC MOSFETのゲート 駆動条件がスイッチン グ特性に及ぼす影響 に関する実験的検討		web開催	2020/5/14	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
233	Yuan Ying	Fabrication of Fe- based soft magnetic flake powders for flake-composite magnetic sheet core	IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG2020)	Montréal, Canada	2020/5/4-7	信州大学	ポスター発表	研究開発課題4-2_2020 BS-09, 新型コロナウィル感染 症の影響により中止, ただし, 発表扱い
234	Kozen Sato	Basic investigation of LLC-LC resonant DC-DC converter using Fe-based metal composite bulk core transformer	IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG2020)	Montréal, Canada	2020/5/4-7	信州大学	ポスター発表	研究開発課題4-2 BH-04, 新型コロナウィル感染 症の影響により中止, ただし, 発表扱い
235	佐藤鴻全	鉄系メタルコンポジット 鉄心リーケージトラン スを用いたLLC-LC共 振型DC-DCコンバー タの試作	第44回 日本磁気 学会学術講演会	オンライン開催	2020/12/14	信州大学	その他	研究開発課題4-2

⑩発表 36/43

236	野間田竜	高速スイッチング電源 用磁心材料に用いる 鉄系ナノ結晶扁平粉 末の作製と特性評価	令和2年度電気学会東海支部主催学生発表会(第2回)	オンライン開催	2021/2/19	信州大学	その他	研究開発課題4-2
237	藤倉律也	数百kHz動作PWM制 御/60Hz出カイン バータ向け出カフィル タ用リアクトルの基礎 検討	令和2年度電気学会東海支部主催学生発表会(第2回)	オンライン開催	2021/2/19	信州大学	その他	研究開発課題4-2
238	佐藤敏郎	高周波電力用磁心材 料の開発	磁気エレクトロニクス研究会、主催; 長野県テクノ財団、共催;IEEE	メルパルク長野	2021/3/4	信州大学	招待講演	研究開発課題4-2
239	堀内学	磁性くさびを用いた埋 込磁石形同期モータ のスロット開口幅およ びトルクリプルに与え る影響		Web会議	2020/5/15	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-3
240	堀内学	磁性コンポジット材を 用いた閉スロットかつ 狭スリット巻線電機子 構造をもつ超高速高 出カモータの提案	電気学会, モータ ドライブ, 回転機, リニアドライブ合同 研究会	Web会議	2020/9/1-2	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-3
241	田中大登	Hybrid Inductor for Improving Gain Attenuation Characteristics of a Pi Filter Circuit	International Conference on Power and Energy Systems Engineering	Web会議	2020/9/26-29	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-3
242	堀内学	Reduction of rotor loss and torque ripple in an IPMSM using magnetic wedges	The 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)	Web会議	2020/11/24-27	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-3
243	Shuhei FUKUNAGA	Identification of high resolution transient thermal network model for power module packages,	The 13th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials	オンライン開催	2021/10/24	大阪大学	ポスター発表	研究開発課題4-1
244	Takanori Kanaya	Fabrication of iron- based amorphous spherical powder pressed magnetic core with low coercivity and low iron loss	IEEE Shin-etsu Section Student Branch (SSB) Online Poster Session 2021	オンライン開催	2021/12/3	信州大学	ポスター発表	研究開発課題4-2
245	川田奈波	倍電流整流回路を用いた LLC 共振形コンバータ用結合インダクタの作製	電気学会マグネ ティックス研究会	オンライン開催	2021/12/9	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
246	小池航太	Fe系ナノ結晶合金扁 平粉末積層シート磁 心の磁気特性とナノ 結晶化熱処理温度依 存性	電気学会マグネ ティックス研究会	オンライン開催	2021/12/10	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
247	Masato Tanaka	Miniaturization of Filter Circuit Using an Inductor and Capacitors Composite Element	Smart	オンライン開催	2021/12/19-22	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-3
248	Tsuyoshi Funaki	A difficulty and solution in transient thermal resistance modeling for wide band gap power semiconductor device	The 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022 -ECCE Asia-)	Himeji	2022/5/18	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
249	Shuhei Fukunaga	A study on digital active gate driving of DC-DC converter for suppressing switching surge voltage	The 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022 -ECCE Asia-)	Himeji	2022/5/18	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
250	福永崇平	SiCパワーデバイスの 熱特性評価に適用す る過渡熱抵抗測定シ ステムの基礎検討	電気学会 電力技術/電力系統技術 /半導体電力変換 合同研究会	沖縄	2023/3/7	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1

⑩発表 37/43

251	清水優人	複数TIMの組み合わせによるパワーモジュールの熱抵抗低減に関する実験的検討	電気学会 全国大 会	名古屋	2023/3/16	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
252	福永 崇平	ダブルパルス試験に よる事前決定駆動パ ラメータを用いた電力 変換回路の動特性改善	電気学会 全国大 会	名古屋	2023/3/16	大阪大学	口頭発表	研究開発課題4-1
253	金谷孝紀	新幹線電装品コン バータ・インバータシ ステム用圧粉磁心リ アクトル の開発	第46回日本磁気 学会学術講演会	信州大学工学部	2022/9/8	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
254	川田奈波	倍電流整流回路用結 合インダクタの作製	第46回日本磁気 学会学術講演会	信州大学工学部	2022/9/8	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
255	金谷孝紀	低保磁力かつ低鉄損 な高周波帯電力変換 用圧粉磁心の作製	電気学会マグネ ティックス研究会	東北大学青葉記念館	2023/1/20	信州大学	口頭発表	研究開発課題4-2
	山本貴代, 永山富男, 紺野祥岐, 大藏要, 中村俊博	"無電解めっき法で作製した高密度実装 UBM用Fe-Ni合金薄膜の熱膨張挙動"	関西表面技術フォーラム	甲南大学	2018/11/22	京都市産業技術研究所	口頭発表	研究開発課題5
	山本貴代, 永山富男, 紺野祥岐, 大藏要, 中村俊博	"無電解めっき法で作製した高密度実装 UBM用Fe-Ni合金薄膜の熱膨張挙動"	第139回表面技術協会講演大会	神奈川大学	2019/3/27	京都市産業 技術研究所	口頭発表	研究開発課題5
258	Takayo Yamamoto	"Preparation and Characterization of Electroless Deposited Fe-Ni Alloy Films"	235th Electrochemical Society Meetings	USA,Dallas, Sheraton Convention Center	2019/5/27	京都市産業技術研究所	ポスター発表	研究開発課題5
259	山本貴代	"Si基板上に成膜した 無電解Fe-Ni-B合金 薄膜の熱応力挙動"	第21回関西表面 技術フォーラム	甲南大学	2019/11/22	京都市産業技術研究所	口頭発表	研究開発課題5
260	Takayo Yamamoto, Tomio Nagayama, and Toshihiro Nakamura	Stress and Microstructure of Electroless Deposited Fe-Ni-B Films	Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science, PRIME 2020	Web発表	2020/10/5	京都市産業技術研究所	口頭発表	研究開発課題5
261	Tomio Nagayama, Takayo Yamamoto, and Toshihiro Nakamura	Microstructure Characterization of Electrodeposited Invar Fe-Ni Alloy	Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science, PRiME 2020	Web発表	2020/10/5	京都市産業技術研究所	口頭発表	研究開発課題5
	山本貴代, 永山富男, 中村俊博	無電解めっき法による インバー合金薄膜の 開発	第22回関西表面 技術フォーラム	Web発表	2020/12/4	京都市産業技術研究所	口頭発表	研究開発課題5
263	山本貴代, 永山富男, 中村俊博	無電解めっき法による インバー合金プロセス の開発		オンライン開催	2021/8/30	京都市産業技術研究所	口頭発表	研究開発課題5
264	Takayo Yamamoto, Tomio Nagayama, and Toshihiro Nakamura	Effect of Glycine on Deposition of Electroless Fe-Ni-B Alloy	INTERFINISH 2020 20th World Congress	オンライン開催	2021/9/7	京都市産業技術研究所	口頭発表	研究開発課題5 (新型コロナウイルス感染症 拡大の影響により、1年開催が 延期されていた)
265	山本貴代. 永山富男, 中村俊博	高耐熱実装のための 無電解Fe-Ni-B合金 めっきプロセスの開発	実装フェスタ関西 2022	パナソニックリ ゾート大阪	2022/7/8	京都市産業技術研究所	ポスター発表	研究開発課題5
266	T. Hinok	"Silicon carbide composites for nuclear fission and fu-sion application"	The Eleventh International Conference on High-Performance Ceramics (CICC- 11)	Kunming, China	2019/5/26-28	京都大学	招待講演	研究開発課題7
	B. Huang, K. Kawasaki, F. Shinoda, T. Hinoki	"Response of C/BN Particle Dispersed SiC Materials to Ion Irradiation"	日本原子力学会 2019年秋の年会	富山大学	2019/9/11-13	京都大学	口頭発表	研究開発課題7

⑩発表 38/43

		Tu	1	1	1	T_+_ + 1 332	I	
	T. Hinoki, K. Kawasaki, F. Shinoda, N. Tsurui, S. Ho-kari, K. Shimoda	"Fatigue Behavior of BN Particle Dispersion SiC Com- posites Fabricated with Prepreg Technique"	10th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HT- CMC 10)	Bordeaux, France	2019/9/22-26	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	B. Huang, K. Kawasaki, F. Shinoda, T. Hinoki	"Phase and microstructure evolution in the SiC materials with sintering additives of Yb2O3 and Al2O3 during high temperature oxidation in air"	The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13)	Okinawa Convention Center	2019/10/27- 11/1	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	T. Hinoki, T. Koyanagi, T. Nozawa, S. Kondo, M. Fer-raris, W. Kim, J. Braun, K.A. Terrani, C.H. Henager8, Y. Katoh, L.L. Snead	"DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF ADVANCED SIC COMPOSITES FOR FUSION"	The 19th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-19)	La Jolla, USA	2019/10/27- 11/1	京都大学	招待講演	研究開発課題7
	B. Huang, Y. Du, J. Lee, K. Kawasaki, F. Shinoda, T. Hinoki	"Swelling and Raman Spectroscopy of C/BN Particle Dispersed SiC Materials after Ion Irradiation"	材料照射研究会	東北大学	2020/1-9-10	京都大学	ポスター発表	研究開発課題7
	B. Huang, Y. Du, J. Lee, K. Kawasaki, F. Shinoda, T. Hinoki	"Microstructural Response of C/BN Particle Dispersed SiC Materials to Ion Irradiation"	日本原子力学会 2020年春の年会	福島大学	2020/3/16-18	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
273	檜木達也	タングステン及びSiC 複合材料開発	核融合フォーラム 炉工学クラスター 炉材料サブクラス ター会合	リモート	2020/11/24	京都大学	招待講演	研究開発課題7
274	檜木達也	イオン照射材に対する 様々な評価技術の開 発	日本原子力学会	リモート	2021/3/18	京都大学	招待講演	研究開発課題7
275	LEE Junyeab,檜木達也	無加圧液相焼結 SiC 材料の緻密化と機械 的特性に及ぼすプロ セスパラメーターの影響	日本セラミックス 協会	リモート	2021/3/23	京都大学	ポスター発表	研究開発課題7
276	Tatsuya Hinoki	Development of Particle Dispersion Silicon Carbide Composites for Nuclear Fission and Fusion Application	THERMEC '2021 - International Conference on Processing & Manufactoring of advanced Materials	オンライン開催	2021/6/4	京都大学	招待講演	研究開発課題7
	檜木達也, 川崎寛治郎, 篠田富士雄, 帆加利翔太, 鴨志田圭吾	BN粒子分散SiC複合 材料の疲労強度特性	セラミックス協会 第34回秋季シンポ ジウム	オンライン開催	2021/9/3	京都大学、フジミ インコーポレー テッド	口頭発表	研究開発課題7
	堺弘行, 檜木達也	SiCの表面改質による REシリケート形成に及 ぼす共晶反応の影響	セラミックス協会 第34回秋季シンポ ジウム	オンライン開催	2021/9/1	京都大学	ポスター発表	研究開発課題7
	Tatsuya Hinoki, Kanjiro Kawasaki, Fujio Shinoda, Keigo Kamoshida, Satoshi Konishi	DEVELOPMENT OF FABRICATION AND JOINING TECHNIQUES FOR SILICON CARBIDE COMPOSITE COMPONENTS	20th International Conference on Fusion Reactor Materials	オンライン開催	2021/10/28	京都大学、フジミ インコーポレー テッド		研究開発課題7
	S. Konishi, T. Hinoki, K. mukai, R. Pearson, C. Baus, T. Nagao	Fusion Blanket systems based on advanced SiCf/SiC composite with LiPb for near term commercial fusion reactors	46th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2022)	リモート	2022/1/25	京都大学	招待講演	研究開発課題7
281	H. Sakai, T. Hinoki	Effect of eutectic reaction on RE- silicate formation by surface modification of SiC	46th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2022)	リモート	2022/1/25	京都大学	ポスタ一発表	研究開発課題7

⑩発表 39/43

	J. Lee, T. Hinoki	Ceramics and SiCf/SiC Composites	46th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2022)		2022/1/26	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	堺弘行, 檜木達也	RE2O3-AI2O3粉体に よるRE2O3-AI2O3- SiO2共晶組成を用い たSiCの表面改質	セラミックス協会 2022年年会	オンライン開催	2022/3/10	京都大学	ボスター発表	研究開発課題7
	Y. Zhong, B. Wang, Y. Du, B. Huang, K. Kawasaki, F. Shinoda, Y. Hayashi and T. Hinoki	Effect of Irradiation Induced Swelling on Fiber/Matrix Residual Stress of Liquid Phase Sintering SiC Composites	日本原子力学会 2022年秋の大会	茨城大学日立 キャンパス	2022/9/8	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	Baopu Wang, Yansong Zhong, Yina Du, Bo Huang, Kanjiro Kawasaki, Fujio Shinoda, Yasunori Hayashi and Tatsuya Hinoki	Irradiation Effect on Fracture Properties of LPS and CVD SiC	日本原子力学会 2022年秋の大会	茨城大学日立 キャンパス	2022/9/8	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	Junyeab Lee, Tatsuya H	properties of SiC Ceramics and SiC- based CMCs Fabricated by Pressureless Liquid Phase Sintering Method	協会第35回秋季 シンポジウム	徳島大学常三島地区およびオンライン	2022/9/14	京都大学	ポスター発表	研究開発課題7
287	檜木達也、堺弘行、 Junyeab Lee	SiCの表面改質による 高緻密Ybシリケートの 形成		徳島大学常三島 地区およびオンラ イン	2022/9/15	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
288	檜木達也	粒子分散SiC複合材料の照射効果	大洗・アルファ合 同研究会	東北大学金属材 料研究所	2022/9/28	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	檜木達也	子分散SiC複合材料 の開発	材料照射研究会 2022	仙台国際センター	2022/12/7	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	Y. Zhong, B. Wang, Y. Du, K. Kawasaki, F. Shinoda, Y. Hayashi and T. Hinoki		材料照射研究会 2022	仙台国際セン ター	44903	京都大学	ボスター発表	研究開発課題7
	Baopu Wang, Yansong Zhong, Yina Du, Kanjiro Kawasaki, Fujio Shinoda, Yasunori Hayashi and Tatsuya Hinoki	Effect of Ion Irradiation Induced Damage and Residual Stress on Mechanical Properties of SiC	材料照射研究会 2022	仙台国際セン ター	44903	京都大学	ポスター発表	研究開発課題7
292	T. Hinoki, H. Sakai and J. Lee	Formation of Rare Earth Silicate on Silicon Carbide Utilizing Oxidation	47th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2023)	Daytona Beach, USA	2023/1/25	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	Y. Zhong, B. Wang, Y. Du, K. Kawasaki, F. Shinoda, Y. Hayashi, T. Hinoki	Effect of high temperature ion irradiation on swelling and microstructure of Liquid Phase Sintering SiC	日本原子力学会	東京大学駒場キャンパス	2023/3/15	京都大学	口頭発表	研究開発課題7
	B. Wang, Y. Zhong, Y. Du, K. Kawasaki, F. Shinoda, Y. Hayashi, T. Hinoki	Effects of Irradiation Temperature and Fluence on Mechanical Properties and Surface Residual Stress of SiC	日本原子力学会	東京大学駒場キャンパス	2023/3/15	京都大学	口頭発表	研究開発課題7

⑩発表 40/43

(平成30年度~令和4年度) OPERA 活動実績一覧 【幹事機関:京都大学】

領域名:超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出

① 受賞

No 受賞	受賞名	主催(表彰団体名)	受賞者氏名	受賞者所属機関	受賞年月	備考 (関連する研究開発課題番号
1	研究奨励賞	 応用物理学会先進パワー半導体分 科会	中島 誠志	京都大学	2018.11	研究開発課題1
2	発表奨励賞	 電気材料技術懇談会 	立木 馨大	京都大学	2019.1	研究開発課題1
3	第8回TIAパワーエレクトロニクス・サマースクール奨励賞	 産業技術総合研究所 	原征大	京都大学	2019.8	研究開発課題1
4	応用物理学会講演奨 励賞	応用物理学会	原 征大	京都大学	1905/7/11	研究開発課題1
5	先進パワー半導体分 科会第6回講演会研 究奨励賞	応用物理学会	伊藤 滉二	京都大学	2019.12	研究開発課題1
6	電気材料技術懇談会 発表奨励賞	電気材料技術懇談会	伊藤 滉二	京都大学	2020.1	研究開発課題1
7	岩谷直治記念賞	岩谷直治記念財団	木本 恒暢	京都大学	2020.3	研究開発課題1
8	科学技術分野の文部 科学大臣表彰科学技 術賞(研究部門)	文部科学省	木本 恒暢	京都大学	2020.4	研究開発課題1
9	馬詰研究奨励賞	京都大学	伊藤 滉二	京都大学	2020. 10	研究開発課題1
10	吉田研究奨励賞	京都大学	金 祺民	京都大学	2020.11	研究開発課題1
11	山崎貞一賞	材料科学技術振興財団	木本 恒暢	京都大学	2020.11	研究開発課題1
12	応用物理学会講演奨 励賞	応用物理学会	立木馨大	京都大学	2021. 3	研究開発課題1
13	工学研究科吉田研究 奨励賞	京都大学	立木 馨大	京都大学	2021. 7	研究開発課題1
14	工学研究科馬詰研究 奨励賞	京都大学	原 征大	京都大学	2021. 7	研究開発課題1
15	13th ECSCRM 2020- 2021, Best Oral Presentation Award	ECSCRM 2020-2021	原 征大	京都大学	2021. 10	研究開発課題1
16	先進パワー半導体分 科会第8回講演会研	応用物理学会	松岡 大雅	京都大学	2021. 12	研究開発課題1
17	究奨励賞 電気材料技術懇談会 発表奨励賞	電気材料技術懇談会	原 征大	京都大学	2022. 1	研究開発課題1
18	化合物半導体エレクト ロニクス業績賞(赤﨑 勇賞)	応用物理学会	木本 恒暢	京都大学	2022. 3	研究開発課題1
19	応用物理学会論文賞 (解説論文賞)	応用物理学会	木本 恒暢	京都大学	2022. 3	研究開発課題1
20	応用物理学会論文奨 励賞	応用物理学会	小林 拓真	京都大学	2022. 3	研究開発課題1
21	応用物理学会講演奨 励賞	応用物理学会	石川諒弥	京都大学	2022. 3	研究開発課題1
22	衞籐細矢記念賞	双葉電子記念財団	木本 恒暢	京都大学	2022. 9	研究開発課題1
23	応用物理学会講演奨 励賞	応用物理学会	伊藤 滉二	京都大学	2022. 9	研究開発課題1
24	IEEE EDS Chapter of the Year Award	IEEE EDS	立木 馨大, 木本 恒暢	京都大学	2022. 10	研究開発課題1
25	先進パワー半導体分 科会第9回講演会研 究奨励賞	応用物理学会	柴田峻弥	京都大学	2022. 12	研究開発課題1
26	電気材料技術懇談会 発表奨励賞	電気材料技術懇談会	石川諒弥	京都大学	2023. 1	研究開発課題1

27	Electronics and Electrical Engineering in Japan Leader Award 2023	Research Institute	木本 恒暢	京都大学	2023. 3	研究開発課題1
28	講演奨励賞	応用物理学会	山下 峻吾	京都大学	2020.3.12	研究開発課題2
29	優秀講演賞	ニューダイヤモンドフォーラム	Ernst David Herbschleb	京都大学	1905/7/12	研究開発課題2
30	日本物理学会 第17 回(2023)若手奨励賞 (領域1)	日本物理学会	Ernst David Herbschleb	京都大学	2022. 10	研究開発課題2
31	奨励賞	平成30年度電気関係学会関西支部 連合大会	片山 慎治	京都大学	2019.1	研究開発課題3-2
32	Best Paper Award	JKCCS2019	Songcheok Baek	京都大学	2019.1.8	研究開発課題3-2
33	NCSP Student Paper Award	NCSP'20 Committee	萬成 遥子	京都大学	2020.3.5	研究開発課題3-2
34	優秀女性研究者奨励 賞(たちばな賞)	京都大学	萬成 遥子	京都大学	2020.2.4	研究開発課題3-2
35	吉田卒業研究·論文 賞	京都大学大学院工学研究科	高山 創	京都大学	2019.6	研究開発課題3-2
36	IEEE関西支部学生研 究奨励賞	IEEE関西支部	塚本 裕貴	京都大学	2021.2	研究開発課題3-1
37	NEパワエレアワード 2020審査員特別賞	日経エレクトロニクス	引原 隆士	京都大学	2020.12	研究開発課題3-2
38	TJCAS2020 Best Student Presentation Award	TJCAS2020	村川 悠磨	京都大学	2020.11	研究開発課題3-2
39	船井研究奨励賞	船井情報科学振興財団	持山 志宇	京都大学	2021.3	研究開発課題3-2
40	SLDM研究会セッショ ン特別賞	情報処理学会	塩崎 雅人	京都大学	2021.11	研究開発課題3-1
41	IEEE関西支部学生研 究奨励賞	IEEE関西支部	片山 慎治	京都大学	2022.2	研究開発課題3-2
42	電子・情報・システム 部門技術委員会奨励 賞	電気学会	高山 創	京都大学	2022.1	研究開発課題3-2
43	20 20年度NLP奨励賞	電子情報通信学会非線形問題研究 専門委員会	片山 慎治	京都大学	2021.5	研究開発課題3-2
44	電気学会 産業応用 部門優秀論文発表賞 2022	電気学会 産業応用部門	西谷洋太	奈良先端科学技術 大学院大学	2022. 9	研究開発課題3-1
45	IEEE関西支部学生研究奨励賞	IEEE関西支部	村川悠磨	京都大学	2022.12	研究開発課題3-2
46	学生優秀賞	IEICE CAS 研究会	間宮崇弘	京都大学	2022.12	研究開発課題3-2
47	IEEE関西支部学生研 究奨励賞	IEEE関西支部	村川悠磨	京都大学	2022.12	研究開発課題3-2
48	学生優秀賞	IEICE CAS 研究会	間宮崇弘	京都大学	2022.12	研究開発課題3-2
49	パワー・エレクトロニク ス・アワード2018 読者 賞	日経エレクトロニクス	舟木 剛	大阪大学	2018.12	研究開発課題4-1
50	MSJ論文奨励賞	日本磁気学会	秋山 知輝, 曽根原 誠, 佐藤 敏郎	信州大学	2019.5	研究開発課題4-2
51	研究奨励賞	電気学会・マグネティックス技術委員	緒方 空人	大阪大学	2021.3	研究開発課題4-1
52	論文賞	日本AEM学会	佐藤光樹, 境木田良学, 場大田 場大 場大 場 場 場 場 場 場 場 場 場 場 場 り 選 り で 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	信州大学、 長野工業高等専門 学校	2021.12	研究開発課題4-3

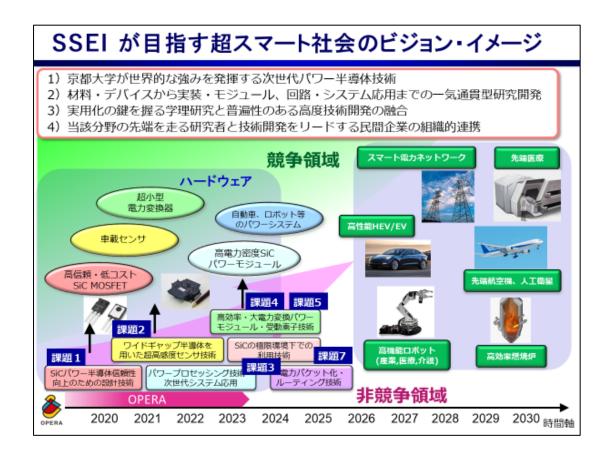
①受賞 42/43

	IPEC Student Poster Competition Excellent Presentation Award	International Power Electronics Conference 2022	關 翔太	大阪大学 	2022.5	研究開発課題4-1
	令和2年度表面技術 協会進歩賞	一般社団法人表面技術協会	山本 貴代	京都市産業技術 研究所	2020.2	研究開発課題5
55	優秀ポスター賞	材料照射研究会	HUANG Bo	京都大学	2019.1	研究開発課題7
56	優秀ポスター賞	日本セラミックス協会	堺 弘行	京都大学	2021.9	研究開発課題7
	the ECD Best Poster	Engineering Ceramics Division (ECD) of The American Ceramic Society	Hiroyuki Sakai	京都大学	2022.8	研究開発課題7

①受賞 43/43

8 社会実装に向けたロードマップ

各研究開発課題に関するロードマップを以下に記載する。



9 領域統括によるプロジェクト総括と今後の展望

本 OPERA プログラムでは、SiC 半導体および電力変換システムを中心に据えながら、関連する非競争領域の多く研究課題を設定し、「超スマート社会」実現の基盤確立を目指した。多様なテーマに関して多くの機関が参画したが、「研究開発成果の概要」に示したように、全ての課題において概ね当初の計画通りに研究開発が進行し、ほぼ全てのマイルストーンを予定された時期に達成した。一部の研究課題では当初の予定を上回る成果も得られた。令和2、3年度は新型コロナウィルス感染危機が全世界中に広がり、実験研究の時間制約や研究開発に必要な設備・消耗品の納期遅れが発生したものの、予定通りの成果を挙げられたのは特筆すべきことと考える。本プログラムの成果を非常に多くの論文、国内外の学会で発表し、多数のプレス発表や特許出願にも繋がった。これらの成果が関連分野で高く評価され、国内外の学会で多くの招待講演の機会を得たことも特筆される。研究開発の現場では非常に多くの大学院学生が基盤研究に取り組み、社会実装を視野に入れた研究の推進、論文発表や学会発表を通じて研究者・技術者としてのスキルを著しく向上した。これは、公的な機関(学会、財団など)から多くの論文賞や奨励賞が本プログラムに参画した学生に授与されたことが客観的に示している。

本事業を基にした社会実装のシナリオについては、各担当グループおよび本プログラムを統括するコアメンバー戦略会議の両方で議論しながら進めた。いくつかの課題において特筆すべき成果が得られ、社会実装の一歩手前であるオープンイノベーション機構(0I機構)での競争領域の共同研究へと順調に移行した例が複数発生した。本プログラムの期間内に0I機構の共同研究に移行しなかった課題においても、本プログラム終了後に民間企業との一対一の共同研究として継続する例が多い。このように、本 OPERA プログラム終了後も、民間企業との共同研究を中心に研究開発を進めることにより、約2~5年後には開発技術の実用化を達成できるものと予想している。もう少し時間が必要な研究課題については、引き続き公的機関からの補助金を獲得しながら社会実装を目指す予定である。

10 特殊用語等の説明

用語	説明
MOSFET	金属/酸化膜/半導体(Metal-Oxide-Semiconductor)の3層構造を中核
	に用いる電界効果トランジスタ(Field Effect Transistor)。通常、
	金属電極に電圧を印加しないときトランジスタは通電しないが、金属
	に十分高い電圧を加えると酸化膜/半導体界面の電子、正孔分布が変
	化し、トランジスタの通電に至る。Si 集積回路やパワーデバイス用途
	で最も重要なトランジスタ構造である。
トレンチ MOSFET	微細なトレンチ (溝) を形成し、その側壁に MOS チャネルを形成する
	MOSFET (通常の MOSFET ではトレンチを形成せず、半導体表面に MOS
	チャネルを形成する)。SiC では(0001)ウェハを基板に使うので、トレ
	ンチ MOSFET ではチャネル移動度の高い(11-20)や(1-100)面をチャネ
	ルに使うことができる。また、短チャネル化が容易、原理的に JFET 抵
	抗がない、セル密度を増大しやすい等の特徴があり、低オン抵抗化に
	適したデバイスである。
接合型 FET(JFET)	ゲートに半導体 pn 接合を用い、その pn 接合界面から伸びる空乏層幅
	によって下地の半導体層の電気伝導度を制御する電界効果トランジ
	スタ(Field Effect Transistor)。
相補型 JFET (CJFET)	相補型 MOS (CMOS) における n チャネル MOSFET を n チャネル JFET、p
	チャネル MOSFET を p チャネル JFET で置き換えた素子。相補型素子の
	構成を取ることによって、静的消費電力をほぼゼロに低減できるの
	で、低消費電力集積回路の基本素子として有望である。
界面準位	絶縁膜/半導体界面において、構成原子の種類や結合構造、結合距離
	などが違うために生じる欠陥によりできるエネルギー準位。本来は電
	子の存在が禁止される禁制帯の中に準位が形成され、キャリアを捕獲
	する。界面準位密度が高いと、MOSFET のオン電流の低下(チャネル移
	動度の低下)、しきい値電圧の不安定性などの問題を引き起こす。
	SiO ₂ /Si 界面では Si 原子からの未結合手が主な起源とされているが、
	SiO ₂ /SiC 界面では界面準位の起源は明らかにされていない。
ダイヤモンド中の NV	ダイヤモンド中の窒素-空孔中心。格子欠陥の一種でダイヤモンドの
中心	結晶中、本来は炭素があるべきところに窒素(N)で置換され、隣接
	する位置に空孔(V)がある複合欠陥で、NV 中心が電子 1 個を捕獲し
	て負に帯電時に NV 中心はスピンと呼ばれる磁気的な性質を示す。
超伝導量子干渉計	超伝導体に基づく、極めて弱い磁場の検出に用いられる非常に感度の
	高い磁気センサの一種。
	(SQUID: superconducting quantum interference device)
コヒーレンス	スピンなどの位相の揃い具合。
エンタングルメント	スピンなどの量子状態の重ね合わせ状態。量子もつれ状態とも呼ばれ
	る。
パーミアンス法	磁気回路において、磁石から空間に漏洩する磁束の量の度合を求める
	方法。
	l .

スイッチトリラクタン	永久磁石を使用せず、安価で堅牢、高温動作可能といった特長があり、
スモータ	永久磁石同期モータの代替として期待され、様々な用途に対して研究
	が進められている。
	(SR モータ : Switched Reluctance Motor)
PM-SRM	永久磁石補助スイッチトリラクタンスモータの略称である。従来のス
	イッチトリラクタンスモータの固定子バックヨークの一部に低保磁
	カ永久磁石を配置し、当該磁石の着磁束を固定子巻線へのパルス電圧
	によって動的に変更することで、同モータとして初めて可変磁束技術
	が実現され、広範な回転数やトルクに対して高効率を実現できる。
磁束経路制御技術	導体内に磁束が浸透しないように磁束の経路を制御して、表皮効果・
	近接効果に起因する交流抵抗を低減する技術
メタヒューリスティッ	最適化問題を解く手法。最適化問題を解く手法には最適性の保証され
ク手法	た解を求める手法である厳密解法,一番良い解(厳密解)ではなくある
	程度良い解(近似解)を求めることが保証されている手法である近似
	解法、求められた解に精度の保証はないが経験的に近似解が求められ
	るとわかっている手法である発見的解法がある。メタヒューリスティ
	クス手法は発見的解法に幾つかのパラメータを追加し問題を巧く解
	く方法である。代表的なメタヒューリスティクス手法に局所探索法、
	多出発局所探索法,反復局所探索法,模擬焼きなまし法,禁断探索法,
	誘導局所探索法がある。
リアクトル	インダクタンス素子としてはインダクタが一般的呼称として用いら
	れるが、電力工学の分野では無効電力の発生源としてリアクタンス素
	子の意味を持つリアクトル(Reactor)と呼称される場合が多い。半
	導体電力変換(パワーエレクトロニクス)分野では小電力用途ではイ
	ンダクタが、大電力用途ではリアクトルが用いられることが多いよう
	であるが、用語の使い分けの明確な基準はない。EMI、EMCの分野では
	インダクタの用語が用いられる。
回転水流式アトマイズ	金属系磁性粉末は主としてアトマイズ法で生産されており、誘導加熱
法 (SWAP; Spinning	溶湯金属を石英ノズルから噴出させ、不活性ガスあるいは高圧水によ
Water Atomization	るジェット流によって溶湯を微粉砕・冷却して作製するガスアトマイ
Process)	ズ法、水アトマイズ法に分類される。アモルファス磁性合金は、Fe、
	Co、 Ni などの磁性元素の一部を B や P などのアモルファス形成能を
	持つ元素で置換した合金組成を採用し、原子配列がランダムである溶
	湯(液相)を超急冷すること作製されるが、従来のアトマイズ法では
	溶湯の冷却速度が足りないため、粉末の大部分が結晶化し、アモル
	ファス粉末の収率が極めて低い課題があった。
	回転水流式アトマイズ法 (SWAP; Spinning Water Atomization
	Process) は溶湯と水との熱交換を向上させるために回転水流を採用
	した改良水アトマイズ法であり、これによってアモルファス合金粉末
	の量産が可能となり、エプソンアトミックス㈱から上市されている。
磁束経路制御技術	導体内に磁束が浸透しないように磁束の経路を制御して、表皮効果・
	近接効果に起因する交流抵抗を低減する技術

めっき	めっき (英語 : plating) は、金属などの材料の表面に、金属の薄膜を
	被覆した表面処理、あるいはその方法を指す。狭義には液中でおこな
	う方法のみを言う。なお、「メッキ」と片仮名で表記されることも少
	なくないため、外来語のように受け取られることもあるが、和製漢語
	とされる「滅金(めっきん)」に由来する語である。鍍金(ときん)と
	もいう。
ナノインデンテーショ	ナノインデンテーションとは、鋭く尖った圧子で深さ数 nm から um
ン	オーダーの押し込んだ時の荷重(力)と変位(押込み距離)を同時測
	定し、荷重変位曲線を得て、複合弾性率・硬さを計測する手法です。
	ナノインデンテーション法による硬度・ヤング率の測定は国際規格
	IS014577 計装化押し込み試験として標準化されています。