



第2回 JST OPERAシンポジウム

超スマート社会実現の力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

～ 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 ～
(S S E I)

【幹事機関】 国立大学法人 京都大学

【領域統括】 工学研究科 木本恒暢

2023年 3月13日

本コンソーシアムが目指す社会像

「超スマートエネルギー社会」

エネルギー効率の極限的な向上

- 超低損失パワーデバイス技術
- 高電力密度に耐える実装技術
- 高効率の燃焼制御技術

エネルギーネットワークの高機能化

- パワープロセッシング技術
- 新しいモータ駆動技術
- 二次電池の有効利用技術



直接的な波及効果

- 現行の様々な電力変換器の損失低減(省エネ)
- 低コスト化により、パワエレ適用範囲の大幅拡大(高機能化、省エネ)
- 超小型電力変換器実現により、機電一体モータなどの創出(高機能化)
- 群ロボットや航空機などの閉鎖系における多階層の電源供給技術(高機能化)
- 火力発電、航空機等の燃焼炉の高効率化(省エネ)
- 二次電池残量の精密モニタリング(高機能化)



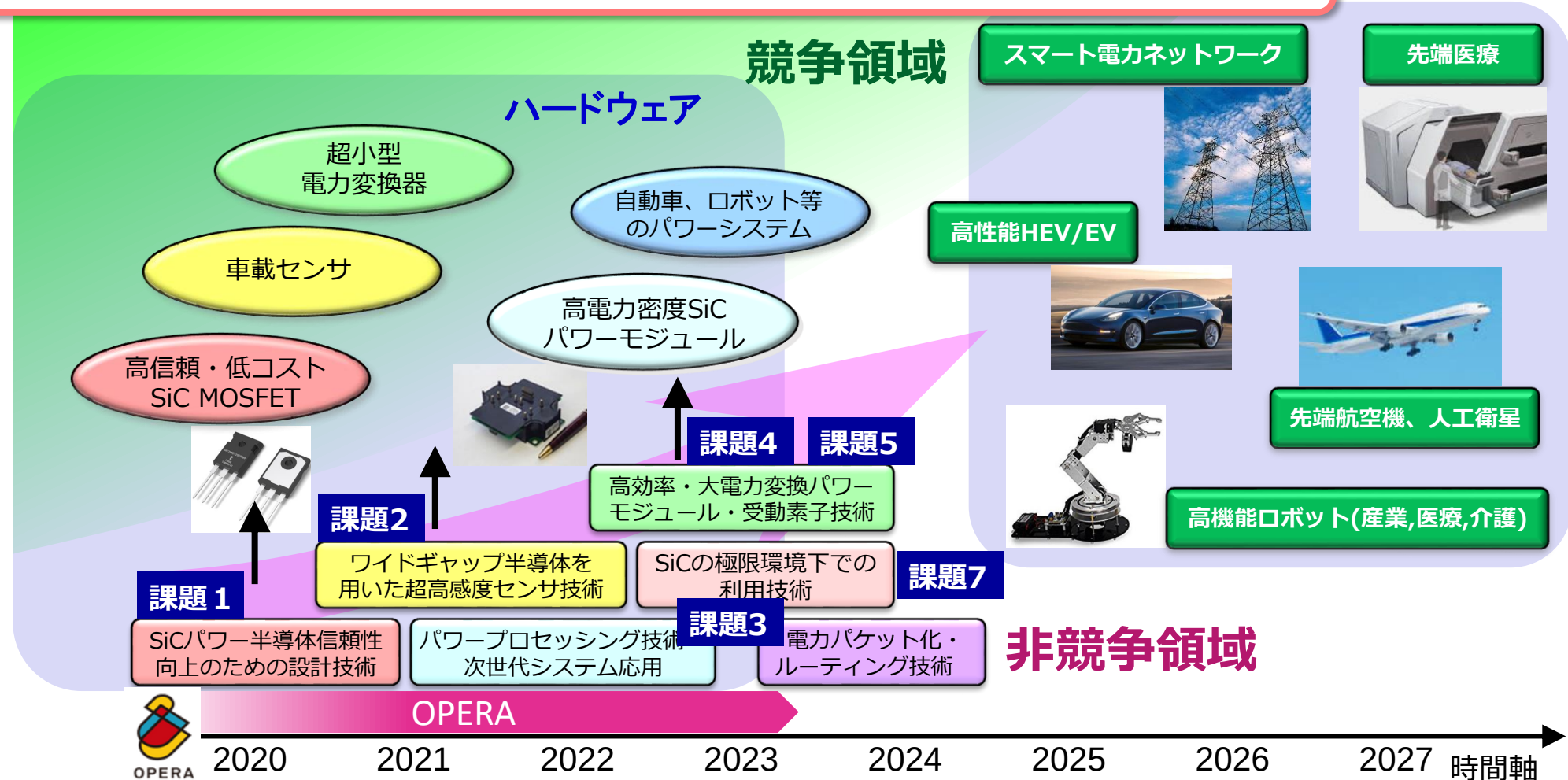
間接的な波及効果

- 医療用加速器の超小型化、汎用化
- 電子トランス＋半導体遮断器を用いた災害に強い電力インフラ



本コンソーシアムが目指すビジョン、ロードマップ

- 1) 京都大学が世界的な強みを発揮する次世代パワー半導体技術
- 2) 材料・デバイスから実装・モジュール、回路・システム応用までの一気通貫型研究開発
- 3) 実用化の鍵を握る学理研究と普遍性のある高度技術開発の融合
- 4) 当該分野の先端を走る研究者と技術開発をリードする民間企業の組織的連携



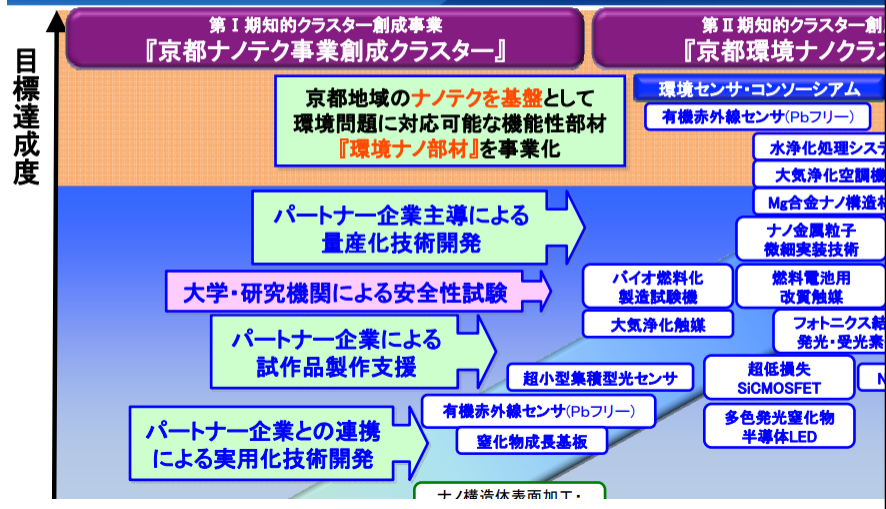
本コンソーシアム設立の背景

文部科学省「知的クラスター創成事業」

第一期(2002~2006年度)

第二期(2008~2012年度)

『知的クラスター』創成による京都地域産業振興



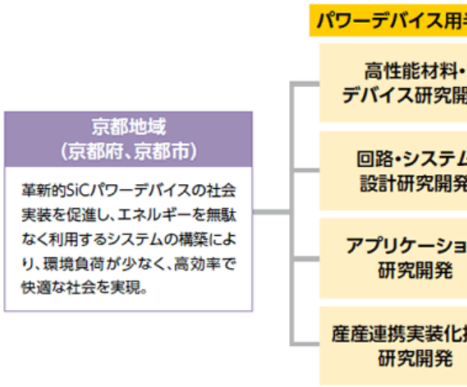
JST「スーパークラスター事業」 (2013~2017年度)

京都地域スーパークラスター／戦略テーマ：クリーン・低環境負荷社会実現ネットワークの構築

研究開発期間：平成 25 年度～平成 29 年度／ <http://kyoto.supercluster.jp/>

京都地域コアクラスター

クリーン・低環境負荷社会を実現する
高効率エネルギー利用システムの構築



JST OPERAプログラム (2018~2022年度)

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

キーテクノロジー・研究開発課題の設定状況

社会実装を目指す新たな価値

＜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

＜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

＜キーテクノロジー6＞
SiCの極限環境下での利用技術

＜課題1＞ SiC結晶欠陥およびMOS界面欠陥の低減とモデル化

〔＜大学等＞ 京都大学
＜企業＞ ローム、住友電気工業、日立製作所、ミライズテクノロジーズ〕

＜課題2＞ 革新的ワイドギャップ半導体デバイスの科学

〔＜大学等＞ 京都大学 ＜企業＞ スミダ電機〕

＜課題3＞ パワーデバイスの次世代システム応用

〔＜大学等＞ 京都大学、京都工芸繊維大学
＜企業＞ ローム、〔日本電産〕〕

＜課題4＞ システム化に向けたパワーデモジュールおよび受動素子の開発

〔＜大学等＞ 大阪大学、信州大学
＜企業＞ ローム、日本ケミコン、神戸電機産業、山洋電気〕

＜課題5＞ 高信頼性パワーモジュール用基板の開発

〔＜大学等＞ 京都市産業技術研究所 ＜企業＞ 上村工業〕

課題6(旧)の一部は卒業、一部はパワープロセッシングに取り組む課題3に統合

＜課題7＞ 耐極限環境SiC複合材料開発

〔＜大学等＞ 京都大学 ＜企業＞ フジインコーポレーテッド〕

課題1: SiC結晶欠陥およびMOS界面欠陥の低減とモデル化

研究開発課題 の概要

- SiCパワーMOSFETの本格的実用化の障壁となっているコストと信頼性を大幅に改善(オン抵抗の低減と積層欠陥拡大の抑制)
- 燃焼炉や原子炉の制御・モニタリングに使用可能な厳環境動作集積回路の基盤を確立



<各サブテーマの概要>

1-1 SiCにおける拡張欠陥起因の素子特性劣化抑制

積層欠陥拡大の条件を明確にし、特性劣化抑制の指針を提示

参画企業: ローム(株)、住友電気工業(株)、(株)日立製作所

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

MOS界面高品質化による移動度向上と特性予測が可能なモデル構築

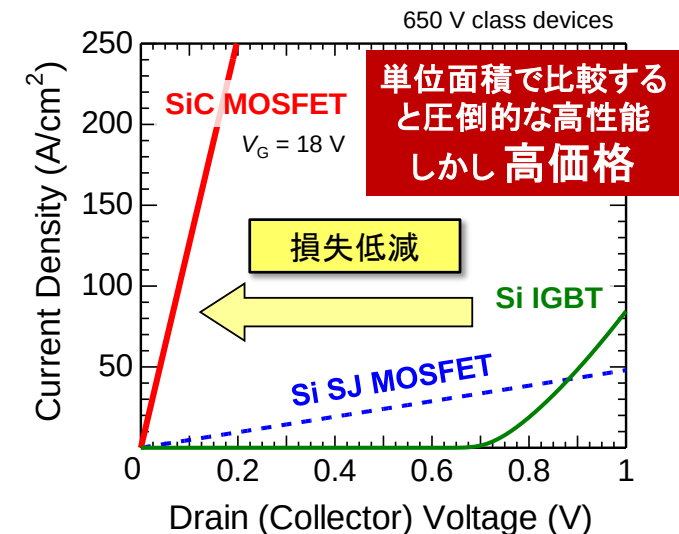
参画企業: ローム(株)、住友電気工業(株)、(株)日立製作所、(株)ミライズテクノロジーズ

1-3 SiCを用いた超高温集積回路に関する基礎研究開発

相補型JFETのしきい値制御と高温動作実証

参画企業: (株)日立製作所

様々なパワートランジスタの特性比較



課題2: 革新的ワイドギャップ半導体デバイスの科学

超スマートエネルギー
社会実現への貢献

ダイヤモンド中のNV中心を用いたセンサ:

- ・ 従来技術に比べて高感度、広いダイナミックレンジなどの優位性
- ・ 例えば、**超高感度電流計測による電池残量モニター**など、超スマートエネルギー社会への貢献が期待

研究開発課題 の概要

ダイヤモンド中のNV中心やSiC中の空孔関連欠陥などを用いた超高感度磁場センサ技術の確立を目指す。比較的安価な部品を用い、100Hz程度の比較的
低周波のAC磁場について、1ピコテスラ(pT)の磁場検出感度の実現を目指す。



<テーマの概要>

1. 高感度センサのスピン制御用高周波磁場発生コイル開発

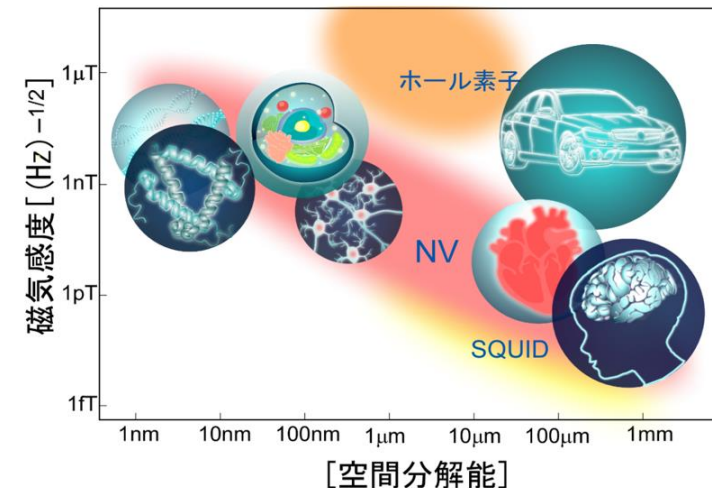
高感度化のため、高い磁場と空間均一性を兼備した磁場発生コイルを開発

京都大学 ⇄ スミダ電機(株)

2. 低周波AC高感度センサ開発

低周波数領域(1Hz-0.6kHz)で多数のNV中心を活用した極限的な高感度化

京都大学 ⇄ スミダ電機(株)



課題3: パワーデバイスの次世代システム応用

研究開発課題 の概要

- SiC MOSFETの高速スイッチング特性を活用して、電力制御の新しい概念、分野を開拓し、次世代エネルギーシステムへの応用を図る



<各サブテーマの概要>

3-1 ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスモデルの開発

SiC MOSFETの特性バラツキを予測するデバイスモデルの構築

京都大学、京都工芸繊維大学 ⇄ ローム

3-2 高周波スイッチング技術とその回路実装

高周波・高速スイッチングを実現するデジタルアクティブゲート

ドライブ回路、電力のデジタル化、パワー集積回路の提案と設計構築

京都大学 ⇄ ローム

3-3 パワープロセッシングによるモータ駆動

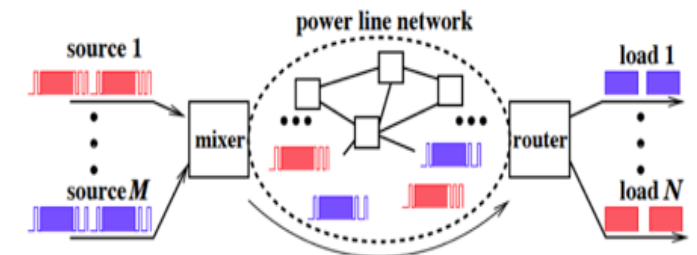
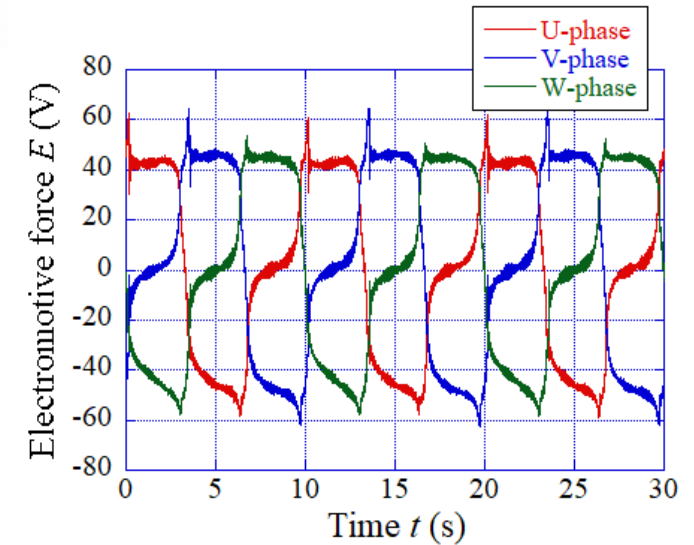
商用レベルのパワープロセッシングによるモータ駆動

京都大学 ⇄ 日本電産

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

双方向ルータによる電力パケットによる電力配送の実現とネットワーク分散

プロトコルの実証



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

研究開発課題 の概要

- SiC MOSFETの高速スイッチングにおいてサージ電圧を10%以下に抑える基板配線設計および、Si半導体の最大接合温度 175°C 以上の動作だけでなく、温度変化に対する信頼性を確保した高電力密度パワーモジュールを開発
- トランス・リアクトルやコンデンサ等の受動部品の開発と共に、パワーモジュールと組み合わせることで電力変換システムの高電力密度化を実現



SANYO DENKI

<各サブテーマの概要>

4-1:高電力密度パワーモジュールの開発

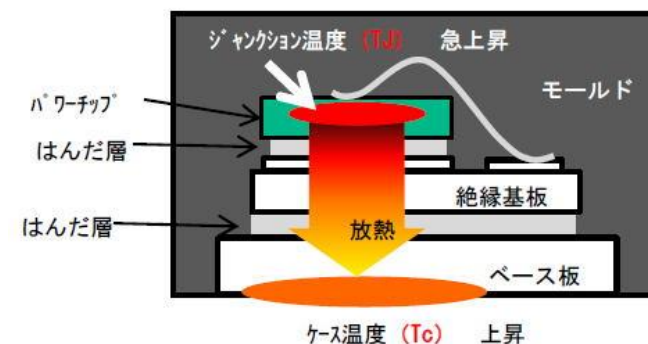
- 電力変換システムの高電力密度化(大阪大⇄ローム)

4-2:100kHz～数MHz帯メタルコンポジット鉄心の開発

- 高周波低損失高耐熱鉄心(信州大⇄神戸電機産業)

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

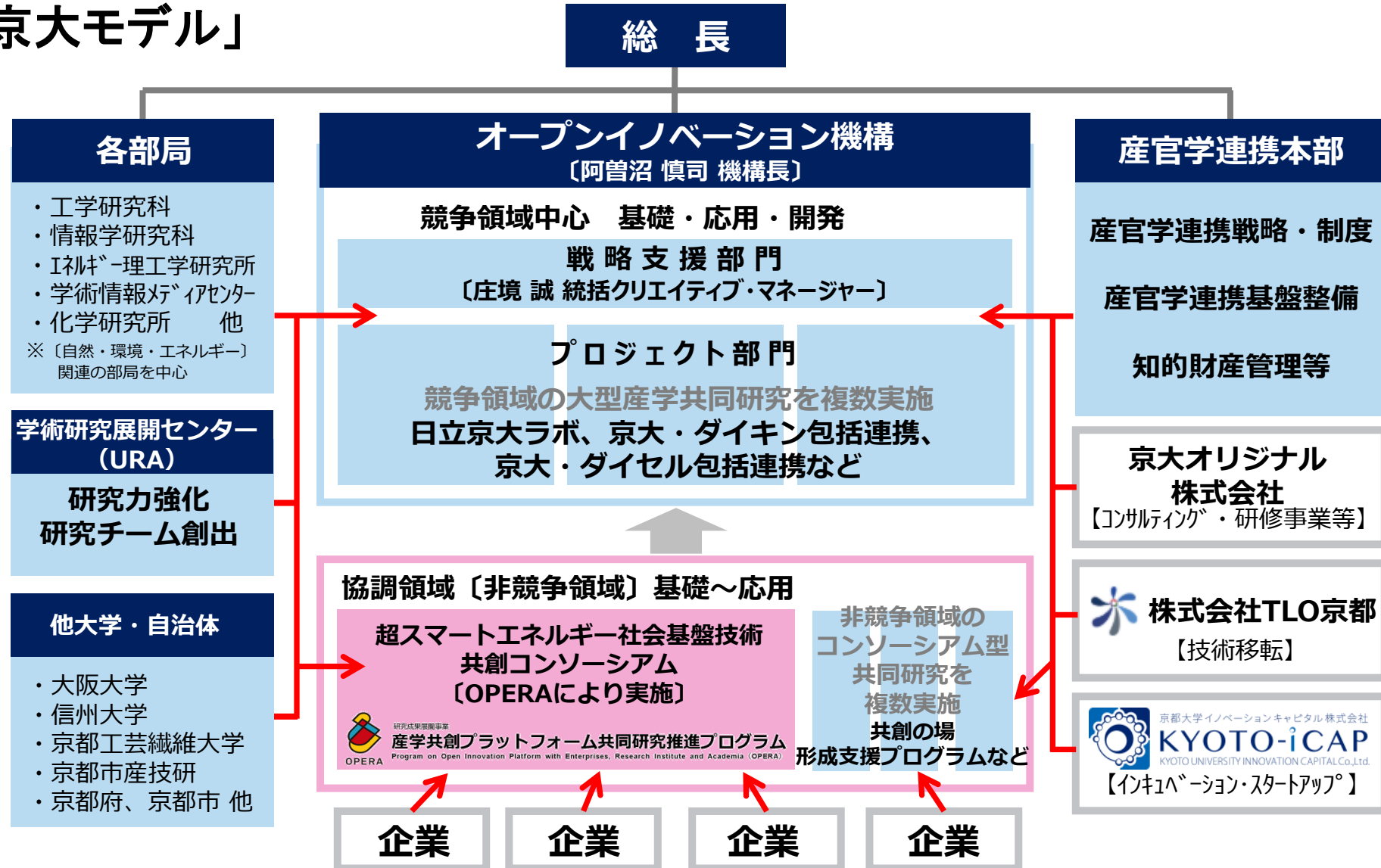
- 磁束経路制御による磁性部品の損失低減(信州大⇄日本ケミコン,山洋電気)



高周波鉄心

産学連携・共同による研究開発推進の仕組みの構築

産官学連携とオープンイノベーションの 「京大モデル」



共創コンソーシアムの運営体制

超スマート社会実現の力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
＜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＞

コンソーシアム協議会

＜プロジェクトの意思決定機関＞ ＜ビジョン・シナリオ策定＞

領域統括
木本 恒暢

コアメンバー
戦略会議

運営事務局

人材育成部門
リーダー 中村 武恒

研究戦略部門
リーダー 引原 隆士

知財戦略部門
リーダー 中川 雅之

地方創生・共創部門
リーダー 舟木 剛

および各参画機関代表が参加

超スマートエネルギー社会基盤技術共創会議
＜参画機関の情報共有・意見交換＞

京都大学〔幹事機関〕

＜課題代表者＞

研究課題
1

工学研究科
木本 恒暢 教授

研究課題
3

工学研究科
引原 隆士 教授

研究課題
2

化学研究所
水落 憲和 教授

研究課題
7

オープンイノベーション機構
檜木 達也 教授

＜プロジェクト担当組織＞
産官学連携本部

オープンイノベーション機構連携会議
＜OI機構との情報共有・意見交換＞

＜参画企業＞

住友電気工業株式会社

ローム株式会社

株式会社日立製作所

日本電産株式会社

スミダ電機株式会社

株式会社フジミインコーポレーテッド

日本ケミコン株式会社

神戸電機産業株式会社

山洋電気株式会社

上村工業株式会社

株式会社ミライテクノロジー

＜参画大学等代表者＞

大阪大学

研究課題
4

工学研究科
舟木 剛 教授

京都市産業技術研究所

研究課題
5

研究室
永山 富男 部長

信州大学

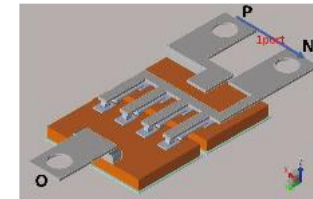
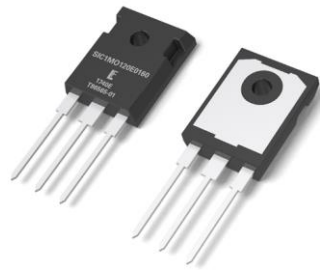
研究課題
責任者

工学部
佐藤 敏郎 教授

京都工芸繊維大学

研究課題
分担

電気電子工学系
新谷 道広 准教授



民間資金の誘致のための体制整備や活動

● コンソーシアムの拡大・維持を図る体制を構築

産官学連携本部 と 学術研究展開センター(KURA): 産学マッチングを支援

京大オリジナル(株): 関連技術のプロモーション、アウトリーチ活動を支援

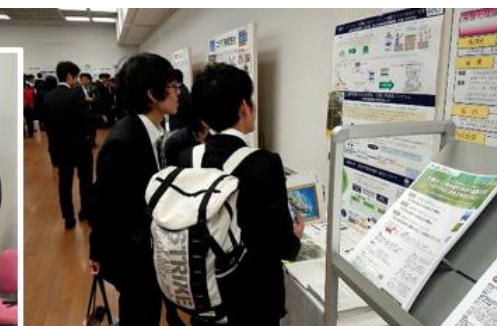
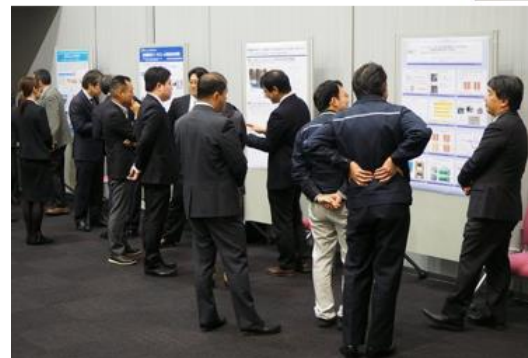
→ プロモーションのためのイベント開催・出展(5件)

● 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を コアメンバー戦略会議およびコンソーシアム協議会で協議・決定

→ 加入・脱退等は、その方針に基づき参画機関同意の下、速やかに遂行

■ 主催・出展イベント

- ・ コンソーシアム公開キックオフシンポジウム (2019年)
- ・ コンソーシアム成果報告会 (2021年, 2022年 [オンライン])
- ・ 日本化学会第99春季年会 (2019/3/16~19)
- ・ 京都大学インダストリアルデイ2019 (2019/8/29)
- ・ イノベーションジャパン2021, 2022



知的財産の取り扱いルール・管理体制 (1)

コンソーシアム協議会

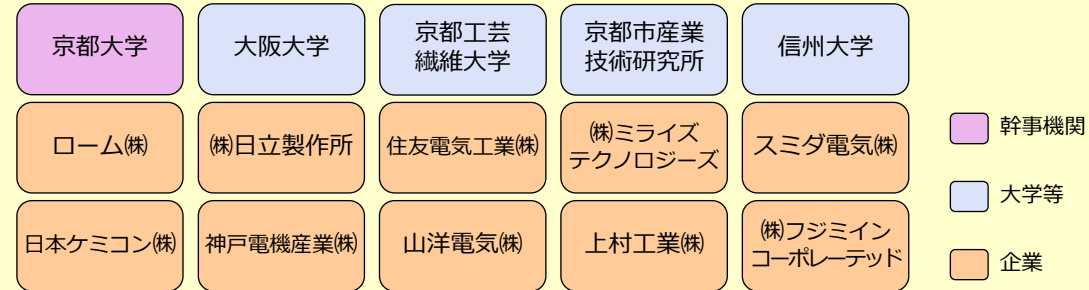
領域統括
木本恒暢
(京大)

地方創生共創
舟木剛
(阪大)

人材育成
中村武恒
(京大)

知財戦略
中川雅之
(京大・知財)

研究戦略
引原隆士
(京大)



日本電産※MFのみ

知的財産の取り扱いルール・管理体制 (2)

コンソーシアムで共通の知的財産取り扱いの合意書を参画機関と合意し、
発明が生じた場合には知財運営委員会を開催して判断

管理体制

- プログラム後半に発明届が急増したが、知財運営委員会は円滑に運営
- OPERAのFIP, BIP含めたパテントポートフォリオ構築とそれに基づく特許管理を実施
 - パテントポートフォリオの位置づけを考慮しながら、特許出願及びライセンス戦略の立案を実践
- OI機構と連携した明細書のブラッシュアップや、OI機構による大型共同研究の創成を含めた情報共有や議論を実施
 - OPERA研究成果普及の最大化

ローム社 中原様から成果事例の紹介





Electronics for the Future

第2回 JST OPERAシンポジウム

2023年3月13日
ローム株式会社
研究開発センター
中原 健



参画テーマについて

参画当時の課題意識

- 80年弱の歴史を持つSiに比べ、SiCは基礎的な部分でわからないことが多い
→品質保証の基礎が脆弱
- デバイス特性向上はそのままアプリケーション向上を意味しない
→アプリケーション視点の獲得
- 上記2点が相まって、フロントローディング設計がかなり未成熟
→計算技術を磨く必要がある



本プロジェクト参画の理由

- ・SiCに関しては、ロームは一貫して京都大学と連携し、その価値を享受してきた。
- ・SiCは産業視点では未熟であり、大学の「知」をまだ必要としている。

<課題1> SiC結晶欠陥およびMOS界面欠陥の低減とモデル化

- <大学等> 京都大学
- <企業> **ローム**、住友電気工業、日立製作所、ミライズテクノロジーズ

<課題2> 革新的ワイドギャップ半導体デバイスの科学

- <大学等> 京都大学
- <企業> スミダ電機

<課題3> パワーデバイスの次世代システム応用

- <大学等> 京都大学、京都工芸繊維大学
- <企業> **ローム**、[日本電産]

<課題4> システム化に向けたパワーデモジュールおよび受動素子の開発

- <大学等> 大阪大学、信州大学
- <企業> **ローム**、日本ケミコン、神戸電機産業、山洋電気

<課題5> 高信頼性パワーモジュール用基板の開発

- <大学等> 京都市産業技術研究所
- <企業> 上村工業

課題6(旧)の一部は卒業、一部はパワープロセッシングに取り組む課題3に統合

<課題7> 耐極限環境SiC複合材料開発

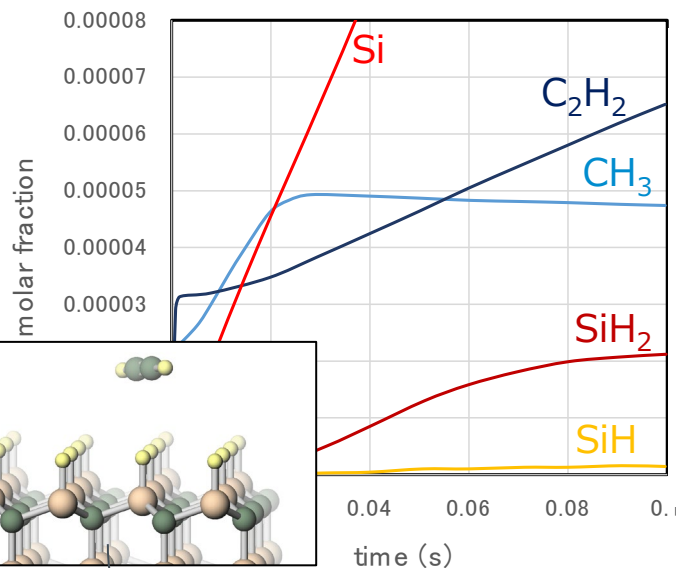
- <大学等> 京都大学
- <企業> フジミインコーポレーテッド

<参画課題1>に関わる成果：SiCエピの成長機構解明

SiCエピの高品質化(欠陥密度低減・均一性向上・大口径化・etc.)の知見獲得

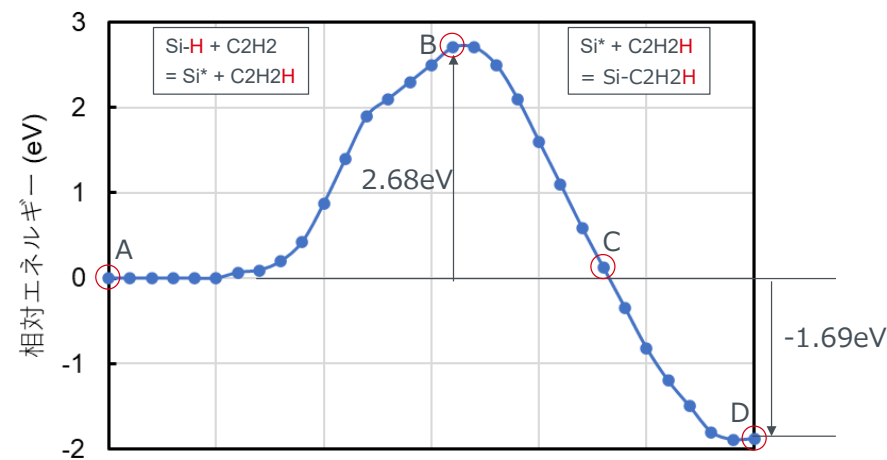
- 化学反応シミュレーション・第一原理計算・エピ成長実験により、次世代SiCエピ成長技術(成長条件・生産装置構造等)の高度化に資する知見を獲得。

原料ガスの分解挙動



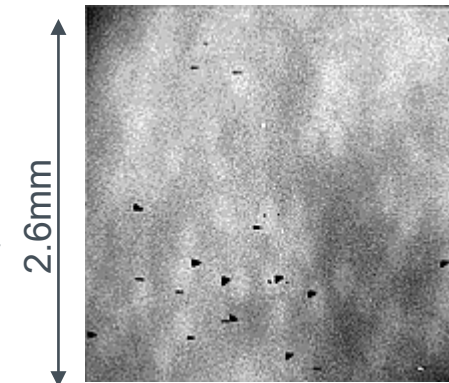
Cプリカーサの吸着挙動

(第一原理計算)



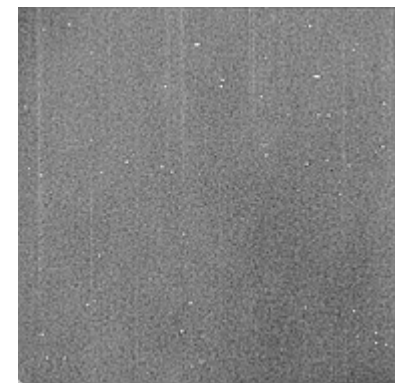
エピ欠陥密度(PL Imaging)

条件改良前



欠陥密度：325 /cm²

条件改良後



欠陥密度：< 3 /cm²

**CVDシミュレーションモデルの高精度化への知見
エピ装置デジタルツイン構築の足掛かり**

成長条件・装置部材の知見獲得

非常に限られた回路トポロジーしかないパワー回路で新規トポロジーを獲得

遺伝的アルゴリズムによるビット信号最適化

ワイドバンドギャップ半導体の高速駆動性能を活かす
→アナログ回路のパラメータ調整から駆動ビット信号列の選択問題に
置換し、スイッチングロス最適化できるようになった。

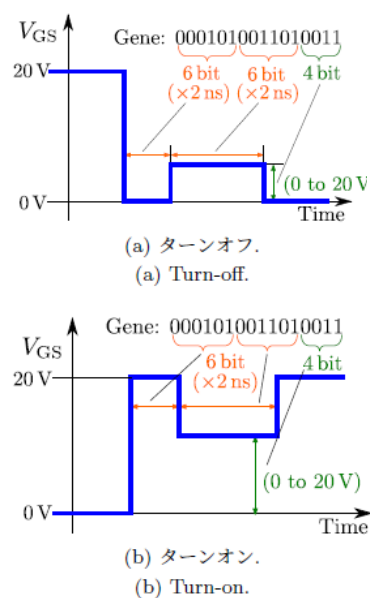
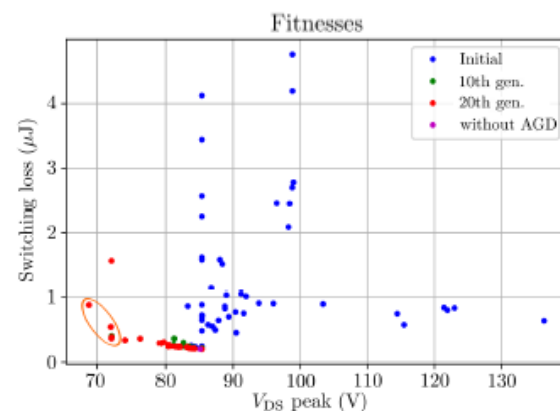


図 3: ゲート信号列と遺伝子との対応。

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、ETC-21-026より



(a) 初期世代, 10 世代目, 20 世代目の集団に属する個体と, AGD を行わない場合の個体の適応度の分布。

ビット信号による駆動の実現

1ビットのGaN-HEMTを用いた高速ゲートドライブ回路をベースにした4ビットゲートドライバの駆動を確認し、高速FPGA からのビット信号による駆動により、素子のバラツキ、過渡状態の高速な調整が可能になった。

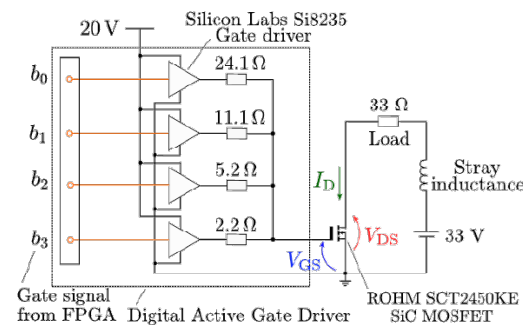


FIGURE 5 Schematic diagram of experimental circuit [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

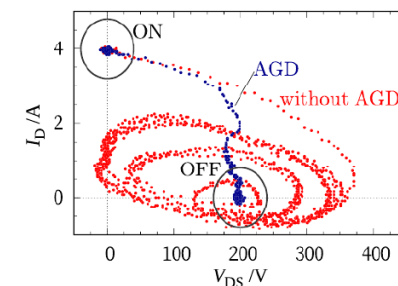


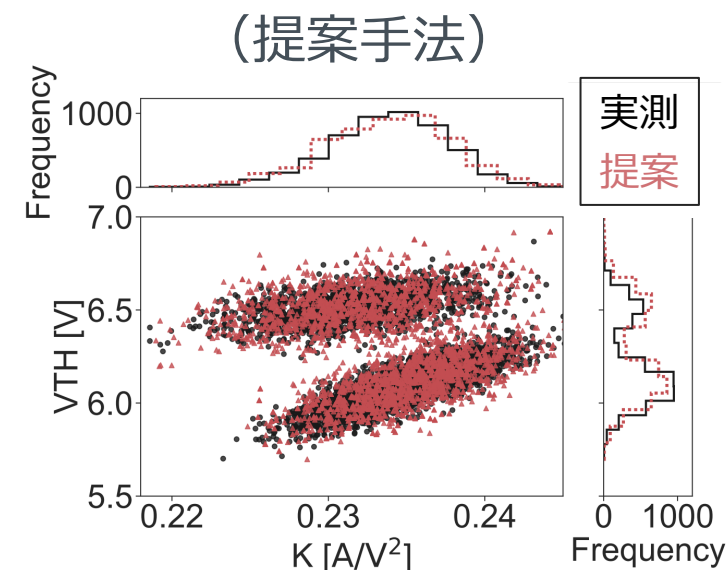
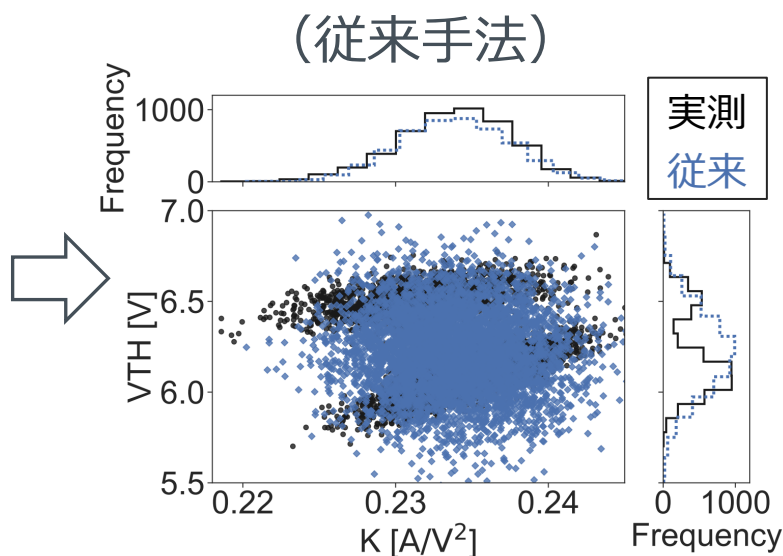
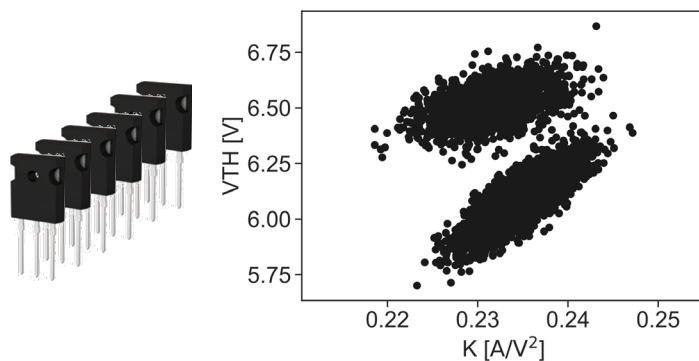
FIGURE 11 Switching trajectories without/with AGD under a higher-voltage condition [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

Hajime Takayama, Takafumi Okuda, and Takashi Hikiyara, "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 より

デバイスの特性バラつきを考慮した回路シミュレーション手法の開発

- MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 法を用いた提案手法により、任意の形状をもつモデルパラメータ分布（≡特性ばらつき分布）を回路シミュレーション上で表現

SiC MOSFET (1000個) の
モデルパラメータ分布



*H. Tsukamoto et al., *International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)*, pp. 192-196 (2021).

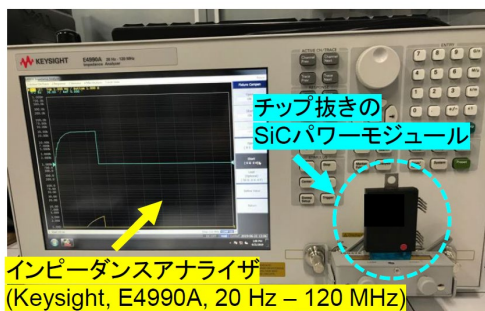
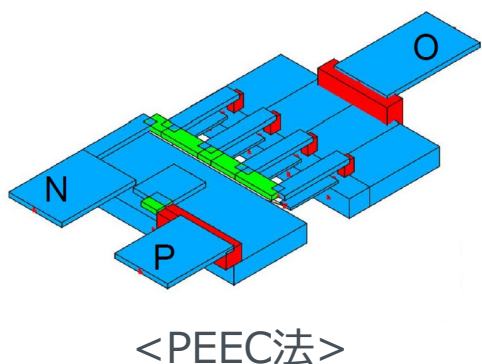
*Y. Nakamura et al., *IEEE Transactions on Power Electronics* **38**, pp.4632-4646 (2023).

従来手法と比べ、約1/5の誤差でモデルパラメータ分布のばらつきを再現

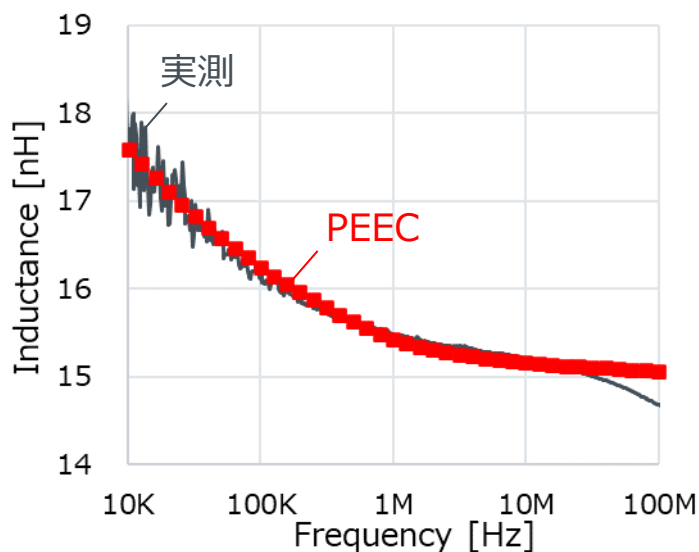
※本研究において、弊社研究員が博士号を取得しました

SiCパワーモジュールのノイズを左右する寄生インダクタンスの抽出方法を確立

- PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) 法を用いて寄生インダクタンスを抽出し、実測と一致することを確認
- 寄生インダクタンスに応じて対地間容量を調整することで、コモンモードノイズの低減を実証



<実測>



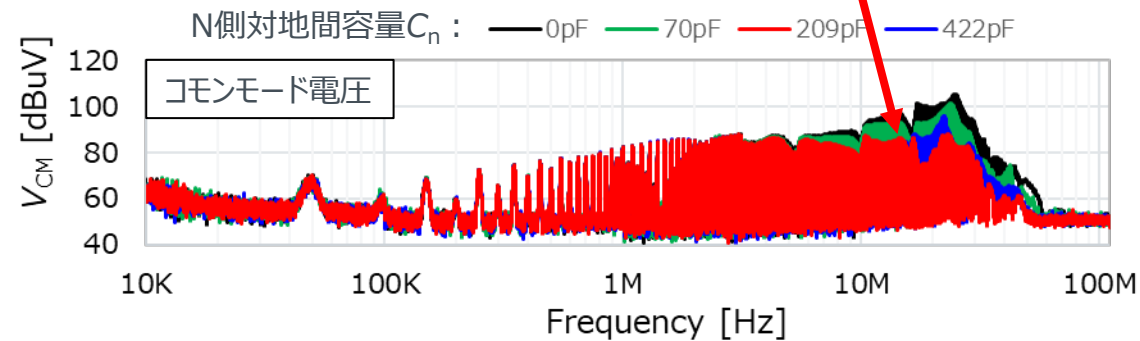
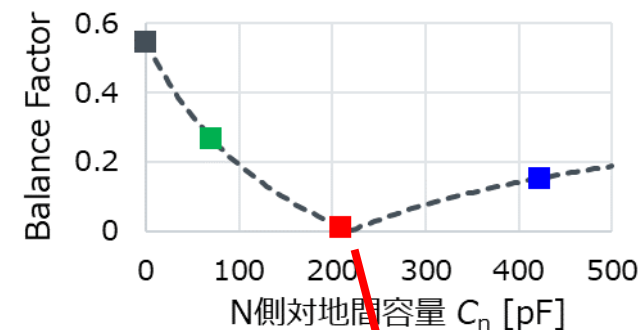
寄生インダクタンスを抽出し、
実測との一致を確認

Balance Factor

$$\frac{L_p C_p - L_n C_n}{(L_p + L_n)(C_p + C_n)}$$

C_p, C_n : 対地間容量

L_p, L_n : 寄生インダクタンス



インピーダンスバランスでコモンモードノイズを低減



Electronics for the Future

まとめ — 本コンソーシアムの今後

2018.11～2023.3



OPERA/SSEI

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

のべ6大学＋1機関＋15企業

- ・競争領域への展開
全ての課題が、OPERA活動後に競争領域へ展開、
展開予定(一部の企業は既に展開済)
- ・展示会への出展 4件
- ・プロトタイプ製作 4件
- ・特許出願 26件 (内 海外出願 3件)
- ・新聞、雑誌掲載 23件
- ・論文発表 80件
- ・学会発表 219件 (内 招待講演53件)
- ・受賞 30件

(2022年9月末時点)

2023.4～(予定)

超スマートエネルギー社会基盤技術共創ユニット
(検討中)

超スマート社会の実現を支える
OPERA創出技術の深耕と社会実装促進

京都大学
カーボンニュートラル推進フォーラム

約200名の研究者が参画

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて産業界と協力して
取り組むため、関連する情報交換の場として京都大学内に設置

- OPERAコンソーシアムの成果である基盤技術をさらに次の展
開に発展させるため、CNフォーラムの主要テーマの1つに位置
付け、活動を持続展開
- コンソーシアム以外の異業種の研究者や企業との交流、情報
交換のための学内外シンポジウムを開催
- 学外情報のフォーラムメンバーへの提供により大型の公的資
金の獲得を支援
- URA、OI機構等の継続サポートにより、企業との交流会の開
催等により、大型の共同研究の組成にも引き続き取り組む

