

次世代パワー半導体 SiC基板を実現する革新的プロセス技術

Dynamic AGE-ing®

ファクトブック



関西学院大学
KWANSEI GAKUIN UNIVERSITY

学校法人関西学院 副理事長 関西学院大学 学長 村田 治（むらた・おさむ）



- 1955年 東京都生まれ
- 1980年 関西学院大学 経済学部 卒業
- 1985年 関西学院大学大学院 博士課程 後期単位取得退学
(経済学研究科専攻)
- 1985年4月 関西学院大学 経済学部 助手
- 1989年4月 関西学院大学 経済学部 助教授
- 1996年4月 関西学院大学 経済学部 教授
教務部長、経済学部長、高等教育推進センター長 歴任
- 2014年4月 関西学院大学 学長・学校法人関西学院 副理事長
- 2020年12月 学校法人関西学院 理事長代行

経済学博士。専攻は理論経済学。日本経済学会、景気循環学会、生活経済学会。

著書に『公債と財政赤字のマクロ理論』（有斐閣1996年）、『現代日本の景気循環』（日本評論社2012年）等。

2017年2月より 中央教育審議会委員。

あしなが育英会副会長（2005年～）、日本私立大学連盟副会長（2016年～）、日本学術振興会評議員（2018年～）、大学基準協会副会長（2019年～）、関西経済連合会評議員（2016年～）、関西生産性本部副会長（2017年～）等。

関西学院大学 理工学部 教授 金子 忠昭（かねこ・ただあき）



- 1986年3月 国際基督教大学 教養学部理学科 物理専攻卒業
- 1991年3月 大阪大学大学院 工学研究科 電磁エネルギー工学専攻
学位取得（工学博士）
- 1991年4月 英ロンドン大学インペリアル・カレッジ
新技術事業団・日英国際共同研究 研究員
- 1995年1月 独シュトゥットガルト マックスプランク固体物理研究所
マックスプランク財団客員研究員
- 1997年4月 関西学院大学 理工学部 物理学科 助教授
- 2003年4月 関西学院大学 理工学部 物理学科 教授
- 2015年4月 関西学院大学 理工学部 先進エネルギー・ナノ工学科 教授

目次

I 社会実装まで研究室で極める、新しい大学のカタチ

2021年度理系4学部新設。“Sustainable Energy”の一大研究拠点に	3
関西学院大学の神戸三田キャンパス（KSC）に2021年度、理系4学部新設 “Sustainable Energy”の一大研究拠点を形成し、地球規模の課題解決を図る	

II パワー半導体SiC基板新製造技術「Dynamic AGE-ing®」

「Dynamic AGE-ing®」とは

次世代パワー半導体SiC基板の高品質・生産性向上を実現する革新的プロセス技術	4
SiC基板製造においては結晶欠陥と機械加工歪みの除去が大きな課題	
非接触型の表面ナノ制御プロセスでSiC基板の“欠陥をゼロ”にする技術を開発	5
DA技術を支える評価手法と要素プロセスの実施例	6
SiC基板内BPDの無害化検証結果	7
今後の展開	
オープンイノベーションによる開発とイノベーションエコシステムの創出	
関西学院大学 金子研究室のSiCプロセス開発の強み	8

III 補足資料

高性能化を目指して進化する「次世代パワー半導体」	9
脱炭素社会の実現に寄与するSiCパワー半導体	
SiCパワー半導体市場は10年後には約5倍の2,000億円規模へ	10
現在は9割を海外企業が占めるSiCウエハー市場	

2021年度理系4学部新設。“Sustainable Energy”の一大研究拠点に

関西学院大学の神戸三田キャンパス（KSC）に2021年度、理系4学部新設

関西学院大学の神戸三田キャンパス（KSC）は理系教育の充実を図るために、2021年度、現在の理工学部、総合政策学部の2学部から5学部制へと生まれ変わります。理学部、工学部、生命環境学部、建築学部の理系4学部が新設され、総合政策学部との「文理横断の学び」を促進するキャンパスとなります。



“Sustainable Energy”の一大研究拠点を形成し、地球規模の課題解決を図る

関西学院大学では、スクールモットーである“Mastery for Service”（奉仕のための練達）を体現し、地球規模課題に取り組む人材を育てる教育・研究を進めてきました。

今回の再編においてKSCは新たなキャンパスコンセプトを掲げています。“Be a Borderless Innovator”——境界を越える革新者たれ。そして、KSCにおける重点研究テーマの1つを、SDGsの17のゴールの1つでもある「持続可能なエネルギー（Sustainable Energy）」に設定。工学部のパワーエレクトロニクス、理学部の次世代有機EL、生命環境学部の人工光合成、建築学部の環境共生型スマートシティなどの研究を推進する一方、総合政策学部蓄積された教育・研究成果を活用し、持続可能な社会の実現に寄与します。

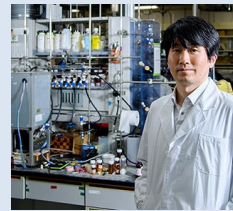
社会から高い注目を集める研究

次世代パワー半導体が地球温暖化の抑制に効果 工学部／金子 忠昭 教授



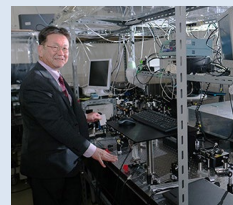
「Sustainable Energy」をけん引する筆頭研究者である金子教授の研究室では、次世代パワー半導体の材料に、現在主流のSi（シリコン）ではなく、より優れた特性を持つSiC（シリコンカーバイド）を使う研究開発を進めています。2,000℃という極限環境での原子配列制御技術は、世界の産業界に大きなインパクトを与えようとしています。エネルギー効率を高めて必要な発電量を減らせば、二酸化炭素（CO₂）の排出量を削減することもでき、地球温暖化抑制につながります。

有機ELディスプレイがきれい、便利、省エネを実現 理学部／畠山 琢次 教授



畠山教授は2016年、最高レベルの発光効率と色純度を示す有機EL用青色発光材料「DABNA」を開発し、JNC石油化学（株）とともに発表。現在、多くのハイエンドスマートフォンに実装されており、その高輝度化、消費電力やブルーライトの低減に貢献しています。また、2019年にはこれを上回る材料「v-DABNA」の開発にも成功しており、更なるエネルギー省エネ化を通じた人類の“Sustainability”への貢献が期待されます。

夢のエネルギー研究「人工光合成」 生命環境学部／橋本 秀樹 教授



「持続可能なエネルギー」という人類のテーマにおいて「夢の研究」とされるのが、橋本秀樹教授が取り組む「人工光合成」です。自然界で植物が行っている光合成を人工的に実現し、水素とCO₂で燃料となるメタノールを生成することを目指しています。実質的なCO₂排出量ゼロ、汚染物質の出ないクリーンエネルギーとして注目されています。この分野は日本で始まり、世界をリードしている分野でもあります。

7 エネルギーをみんなに そしてクリーンに



SDGs #7のゴールに挙げられているのが「エネルギーをみんなに、そしてクリーンに」です。具体的な目標は「すべての人々に手ごろで信頼でき、持続可能かつ近代的なエネルギーへのアクセスを確保する」こと。これはまさしく、KSCの重点研究テーマである「持続可能なエネルギー（Sustainable Energy）」と直結しています。

「Dynamic AGE-ing®」とは

次世代パワー半導体SiC基板の高品質・生産性向上を実現する革新的プロセス技術

パワー半導体とは、電力や電源の制御・供給を行う半導体で、あらゆる電子機器に使われています。現在、パワー半導体の基板の大半はSi（ケイ素：シリコン）が母材となっていますが、今後大きく需要が拡大すると見込まれているのはSiC（炭化ケイ素：シリコンカーバイド）基板を用いた「SiCパワー半導体」です。SiC基板はSi基板に比べて電力ロスが大幅に抑えられ、また耐圧性も高く冷却機器の小型化が可能です。この特性を活かしてEV・HV・FCVなど電動車や鉄道、産業機器、電力などグリーンイノベーションが進む分野で実用化が始まっており、脱炭素社会の実現に向けて、その波及効果は極めて大きいと期待されています。

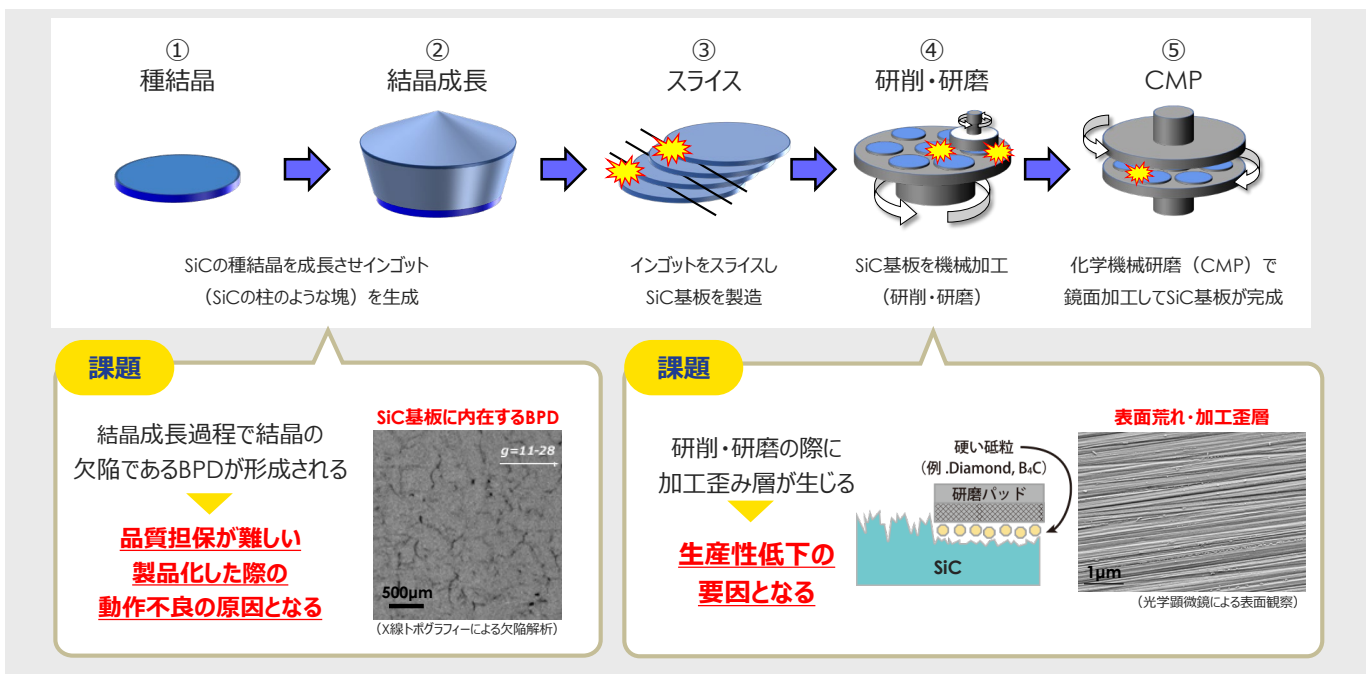
関西学院大学の金子忠昭教授（理工学部 先進エネルギーナノ工学科※）のグループでは、SiC基板の革新的な表面ナノ制御プロセス技術「Dynamic AGE-ing®」を開発しました。SiC基板の飛躍的な高品質化・生産性向上の道筋を示す技術であり、社会実装に向けて開発を進めています。

※2021年4月より工学部所属

SiC基板製造においては結晶欠陥と機械加工歪みの除去が大きな課題

下図にSiC基板の製造工程を示しました。まずSiCを結晶成長させて大きな塊（インゴット）を生成します。この時点で結晶内に基底面転位（Basal Plane Dislocation、以下BPD）と呼ばれる結晶欠陥が生じます。パワー半導体として製品化した際、通電することにより、この欠陥が拡大して動作不良の原因となります。また、SiCインゴットから基板を製造する際、スライス、研削、研磨の機械加工を行います。SiCは硬くて脆いことから機械加工にダイヤモンドを使用しますが、ダイヤモンドが硬すぎるため、表面の結晶が破壊された領域（加工歪み層）がパワー半導体として製品化した際に歩留まり低下の要因となります。こういった課題をクリアする技術は、十分に確立されていないのが現状です。

■従来のSiC基板製造の課題



※画像資料はすべて関西学院大学 金子研究室提供

「Dynamic AGE-ing®」とは

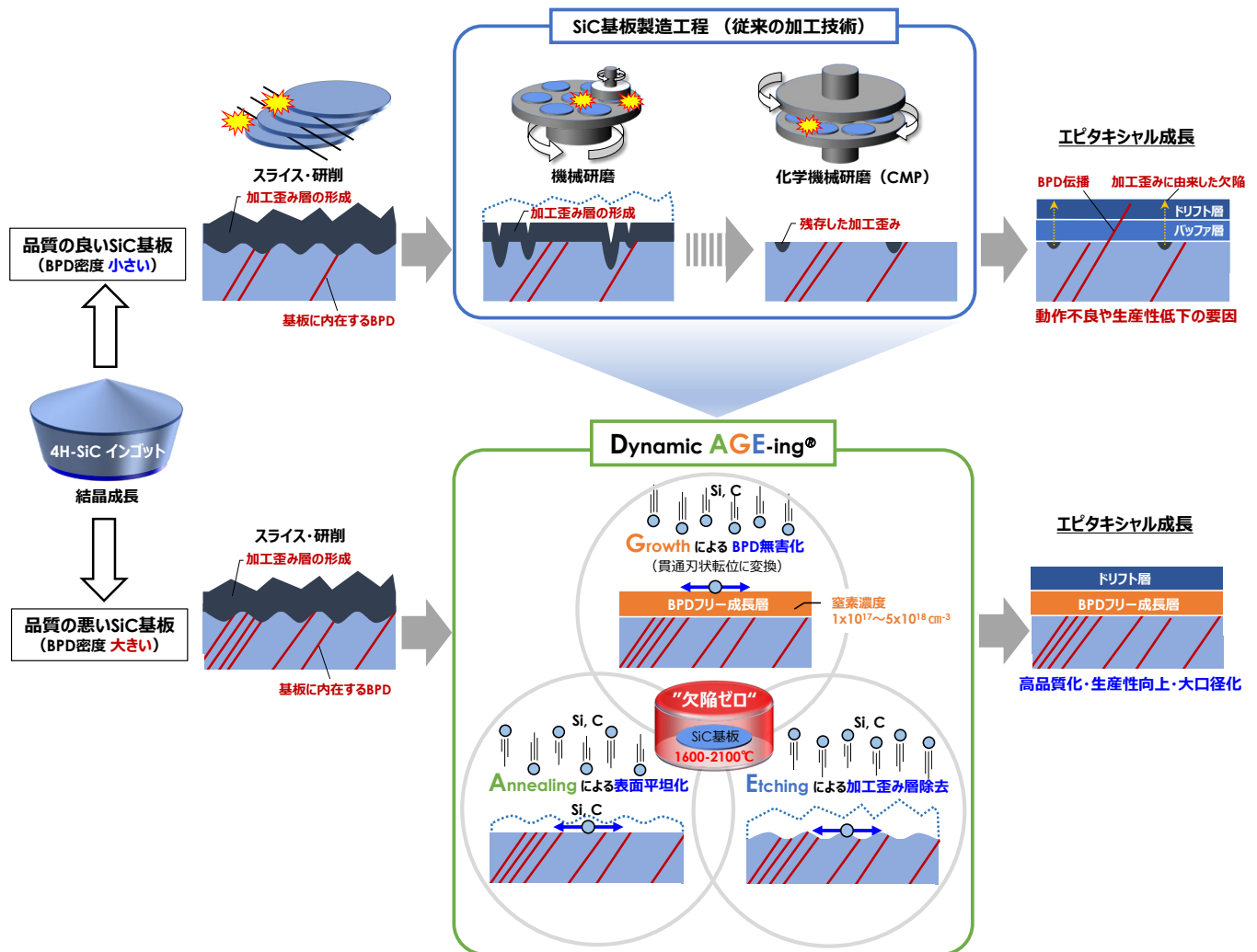
非接触型の表面ナノ制御プロセスでSiC基板の“欠陥をゼロ”にする技術を開発

「Dynamic AGE-ing®」は、従来の加工技術とは異なる、SiC基板への熱エッチングと結晶成長の両方の機能が統合された革新的な非接触型の表面ナノプロセス技術です。

SiC基板を単一プロセス装置内で1,600-2,100℃の超高温下の気相環境におき、温度を変化させることで、結晶表面の原子の配列を自律的に制御します。

「Dynamic AGE-ing®」の適用により、メーカーやサイズを問わずSiC基板の高品質化に加えて、製造工程の簡略化と歩留まりの改善により、生産性向上も可能にします。

■「Dynamic AGE-ing®」の技術概要

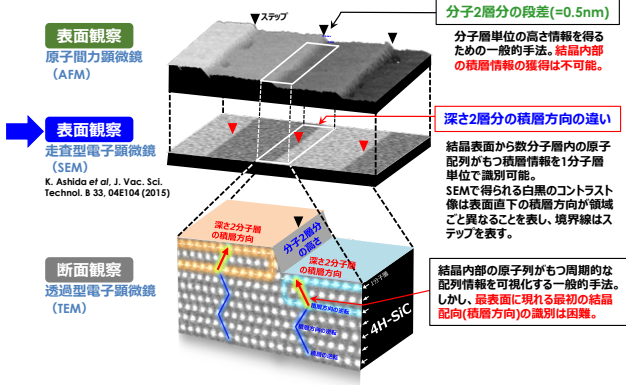


「Dynamic AGE-ing®」とは

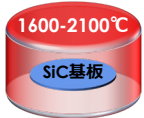
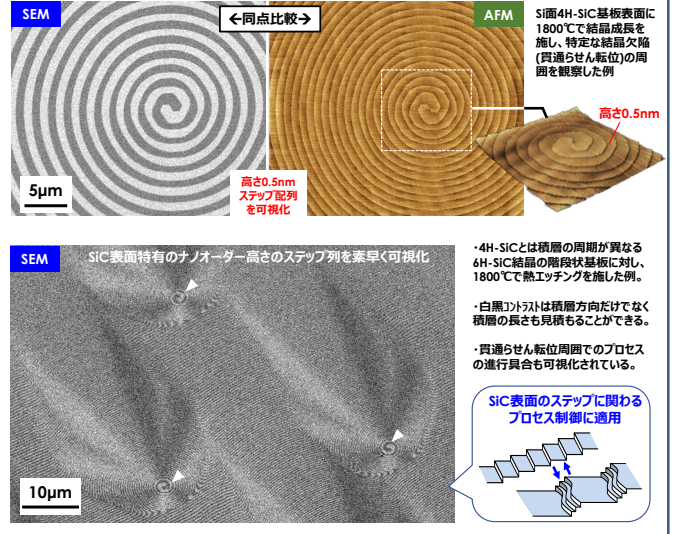
DA技術を支える評価手法と要素プロセスの実施例

SiC結晶表面に現れる積層情報の評価手法

結晶成長では、基板表面に吸着した原子は下地基板がもつ結晶情報をコピーして同じ結晶構造からなる成長層を形成していきます（エピタキシャル成長様式）。4H-SiC基板の結晶では深さ方向に対して2分子層ごと積層の方向が逆転するのですが、基板表面から結晶情報を成長層に正しく受け渡すためには階段状のステップ端に現れた積層情報を利用する必要があります。DAプロセスでは、表面全体をBPD無害化させるための成長およびエッチング条件を、ステップ端がもつ積層情報に応じてプロセス設計に反映しています。従来の評価技術では、表面直下の積層情報も1分子層単位で可視化するのが困難であったため、SiCの結晶構造を反映する表面のステップ積層情報を判別可能な新たな評価法として、低速電子線ナネリング効果を用いた走査型電子顕微鏡の観察法を開発しました。

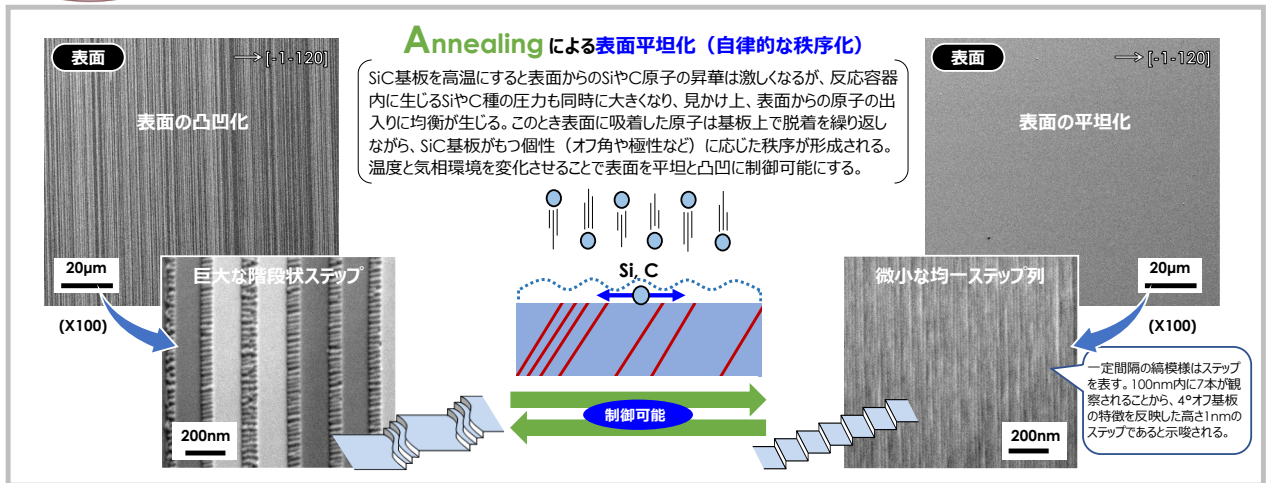


DAプロセス制御のための新しいSEM表面観察手法



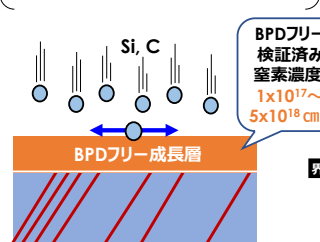
Dynamic AGE-ing®

4°オフ-Si面4H-SiC基板へのDAプロセス実施例 (DAプロセス後の表面または断面をSEMにより観察)



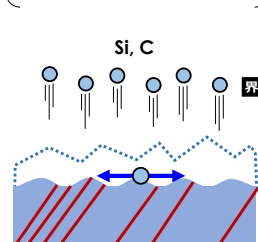
Growth による BPD無害化

基板の電気抵抗に合わせて成長層の抵抗率を調整するため窒素を添加。デバイス動作に影響を与えない貫通刃状転位にBPDが変換されると無害化が可能になる。

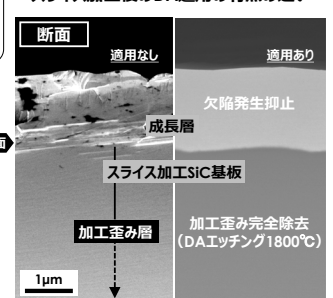


Etching による加工歪み層除去

加工歪みの有無はエッチング後の成長層がもつ結晶品質を通して評価。機械加工等の精度により適用すべきエッチング条件は異なる。



スライス加工後のDA適用の有無の違い



「Dynamic AGE-ing®」とは

SiC基板内BPDの無害化検証結果

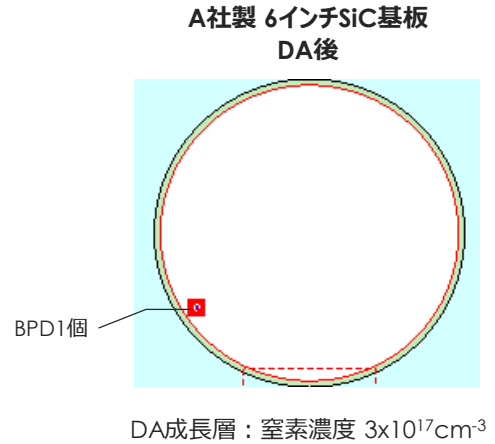
「Dynamic AGE-ing®」を適用することにより、BPDが1cm²あたり7,000個以上内在するSiC基板に対して、基板全面内1個以下となることを測定により確認しました。また、下記を含む複数メーカーのSiC基板において同様の結果を得られています。

■「Dynamic AGE-ing®」(図表内：DA) によるBPD無害化の検証例

一般市販4°オフ-Si面4H-SiC基板を使用

メーカー	サイズ (インチ)	BPD密度：個/cm ²	
		DA前	DA後
A社	6	5,347	0.006
B社	6	4,959	0.000
C社	4	>7,000	0.015
D社	4	1,102	0.000

DA前：X線トポグラフィ、DA後：フォトルミネッセンス（レーザーテック製 SICA-88）にて測定



※画像資料はすべて関西学院大学 金子研究室提供

今後の展開

一般的に半導体のコスト低減には基板の大口径化が必須とされており、世界ではSiC基板の8インチ化の研究開発が進んでいます。しかし、SiC基板が大口径となるにつれてBPDを含む結晶欠陥の増大や基板の反りが大きくなるなど課題が顕著になります。「Dynamic AGE-ing®」は、熱エッチングと結晶成長の機能を統合した非接触型の表面ナノプロセス技術であることから大口径化に適合しやすく、これらの課題解決の一助となると考えています。

関西学院大学は引き続き豊田通商と連携し、今後大口径8インチSiC基板への「Dynamic AGE-ing®」の適用に向けた開発を加速させます。

オープンイノベーションによる開発とイノベーションエコシステムの創出

これまでの産学連携は、「大学が基礎研究」、「メーカーが生産技術と製品・量産化の開発」とすみ分けて研究開発を進めることが主流でした。この度、関西学院大学が20年間培ったSiC関連技術と豊田通商の持つ企業ネットワークを活用し、ユーザ企業及び製造企業が広く参画できるオープンイノベーションによる技術開発とその実用化を推進します。

また、「Dynamic AGE-ing®」という「知」を確実に社会実装し、関西学院大学と参画企業に適切な利益をもたらすために、知財の保護と活用に精通した「みなとみらい特許事務所」が、知財戦略のデザイナーの役割を担います。これにより、「知」と市場、そして各企業を繋ぐイノベーションエコシステムの構築を推進します。



「Dynamic AGE-ing®」とは

関西学院大学 金子研究室のSiCプロセス開発の強み

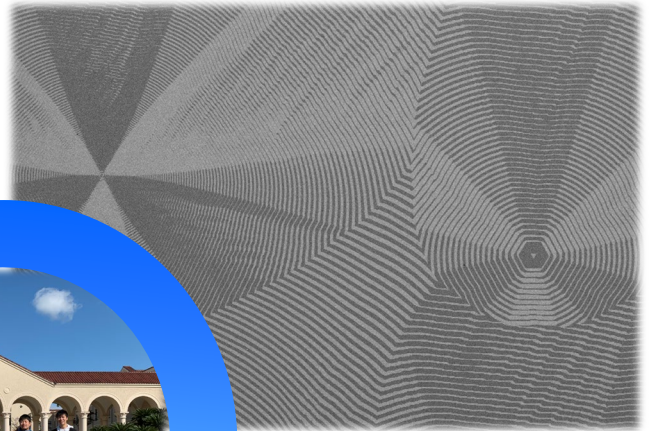
関西学院大学金子研究室は、最新の装置や独自開発した装置を多数所有しています。これらの装置を駆使することで、これまで多くの研究成果を生みだしてきました。最大の強みは、学生自身が高い水準で“モノを創る力”と“モノを視る力”を同時に所有している点にあります。学生個々人が主体的に問題解決に向かい、PDCAを素早く回すことによって、原理に紐づいた最適なプロセス条件を短期間のうちに導き出すことができます。OB、OGをはじめ多くの学生達が、責任感、やり遂げる力、高い目的意識、家族のような一体感を持ってスクールモットー“Mastery for Service”（奉仕のための練達）を体現しています。

■ 装置環境と人間力

KGX-2000 超高温真空加熱炉
KG独自開発6インチSiCプロセス装置



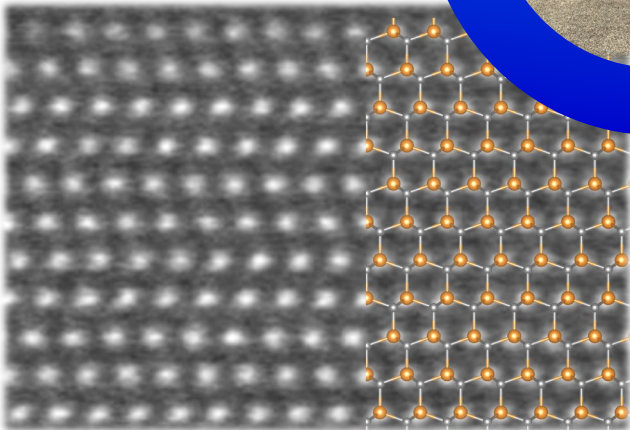
SiC基板表面（原子の表面拡散）



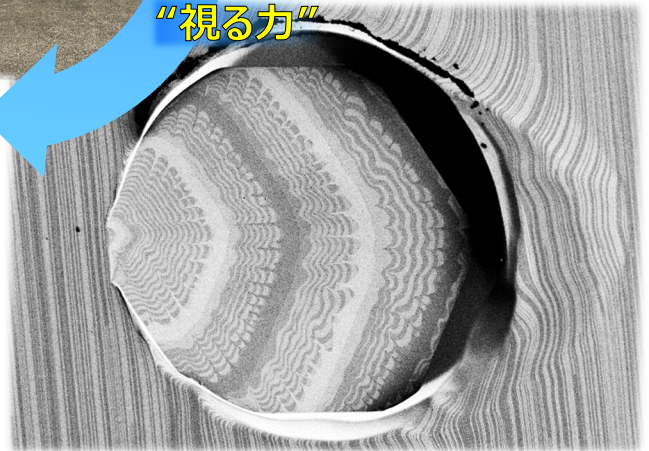
“創る力”



“視る力”



SiC結晶断面（透過電子顕微鏡像）



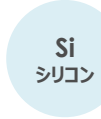
SiC結晶表面（原子の表面拡散）

高性能化を目指して進化する「次世代パワー半導体」

パワー半導体の材料には主にSiが利用され、電気機器の小型化や高性能化に大きく貢献してきました。しかし、素材特性の制約により、高性能化も限界に近づいています。そこで、Siに代わる次世代パワー半導体材料として、SiC、GaN、Ga₂O₃などが注目されています。なかでもSiCは近年、半導体基板としての品質が高まり、多くの機器に利用され始めています。SiCはSiと比較して約9倍の絶縁破壊電界強度*と約3倍の熱伝導率を持ちます。また、耐熱性が高いことから、大容量の電気機器など発熱の制御が求められる用途でより性能を発揮し、冷却器の省力化や小型化によって機器の低コスト化を実現できます。

*絶縁破壊電界強度：ある物質に電界をかけたときに物質が壊れる寸前の限界値。値が大きいほど物質が壊れにくいことを指す。

パワー半導体



素材特性により
高性能化の限界に

次世代パワー半導体



さらなる高性能制御、省電力、小型化へ

■ Si、SiC（4H-SiC）の主な物性値

	Si	SiC	SiC / Si 比
絶縁破壊電界強度 (MV/cm)	0.3	2.8	9.3
熱伝導率 (W/cm・K)	1.5	4.9	3.3
バンドギャップ* (eV)	1.12	3.26	2.9

*バンドギャップ...耐熱性を示す数値

松波弘之ら編著『半導体SiC技術と応用 第2版』
(日刊工業新聞社) (2011) を改変

脱炭素社会の実現に寄与するSiCパワー半導体

地球温暖化抑制を目的として世界が脱炭素社会へ舵を切るいま、エネルギー利用の技術にはさらなる進歩が求められています。あらゆる場面で電力が消費されている中、電力損失を減少させるパワー半導体には大きな期待が寄せられています。とりわけ中・高耐圧デバイスを必要とする自動車、鉄道、産業機器、電力などグリーンイノベーションが進む分野で実用化が始まっており、SiCパワー半導体の需要が高まっています。

新幹線・鉄道車両

2015年から運行開始した山手線車両「E235系」、2019年2月から運行開始の東京メトロ丸ノ内線の制御回路にSiC半導体を採用。2020年7月にデビューした東海道新幹線の新型車両「N700S」にも採用されている。

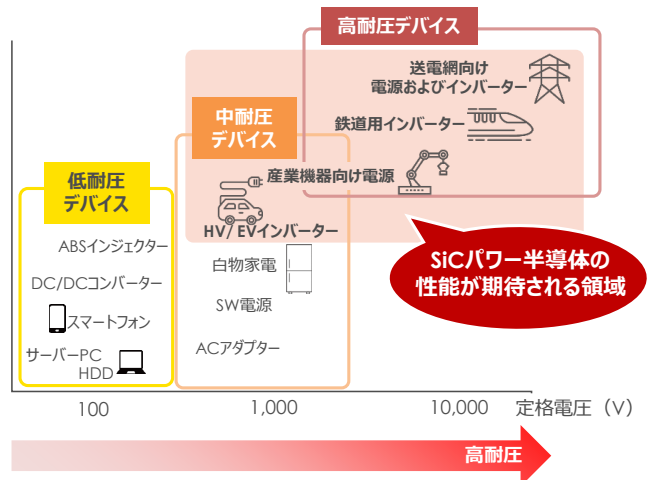


電気自動車 (EV)

米テスラの新型EV「Model 3」ではメインインバーターにSiCパワー半導体を採用。EVの普及が急速に進む中国BYD社でも採用を始めた。今後もこの動きは他社にも拡大していくと予想されている。



定格電流 (A)

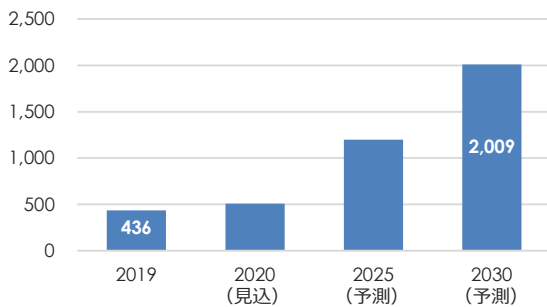


SiCパワー半導体市場は10年後には約5倍の2,000億円規模へ

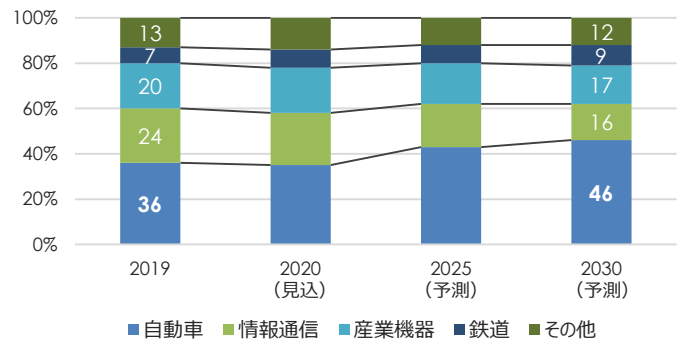
パワー半導体の市場は、2019年の2兆9,141億円から2030年は4兆2,652億円まで拡大すると予測されています。なかでもSiCパワー半導体市場の伸びが最も大きく、2019年の436億円に対し、2030年は2,009億円の市場規模になると予測されています。また、アプリケーション別では自動車分野向けの構成比率が最も大きく、36.0%を占めます。この比率はさらに高まり、2030年には46%になると見られています。

■ SiCパワー半導体の市場規模

□ SiCパワー半導体総市場 実績/予測
(単位：億円)



□ アプリケーション別割合 実績/予測



現在は9割を海外企業が占めるSiCウエハー市場

SiCパワー半導体の主材料となるSiCウエハーの市場は、2030年には2019年の4.6倍である1,280億円に拡大すると予測されています。

現在、SiCウエハーの生産は、海外企業上位2社でシェアの約90%を占めています。多くの国と企業がシェア奪回を目指し、開発競争を激化させています。

■ SiCウエハー総市場 実績/予測
(単位：億円)

