

軟磁性材料研究会（第26回）

令和6年6月28日(金) 13:00 ~ 15:00 オンライン

1. 調査研究テーマ

材料学的に見たパワー半導体&デバイスの動向と軟磁性材料への期待

小出 康夫

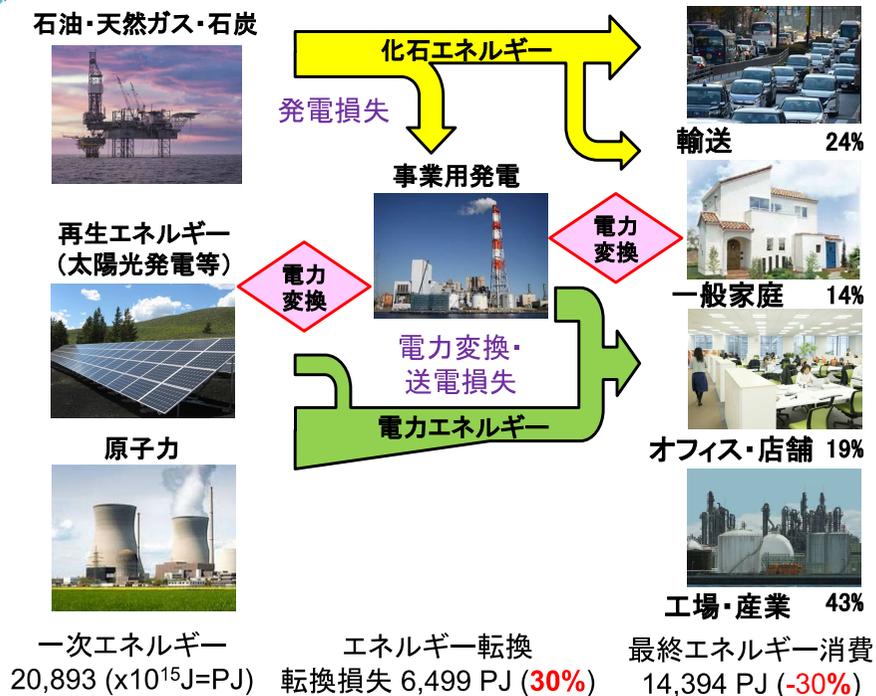
次世代半導体グループリーダー,
文科省事業マテリアル先端リサーチインフラ 運営機構長,
国立研究開発法人 物質・材料研究機構 (NIMS)

内容

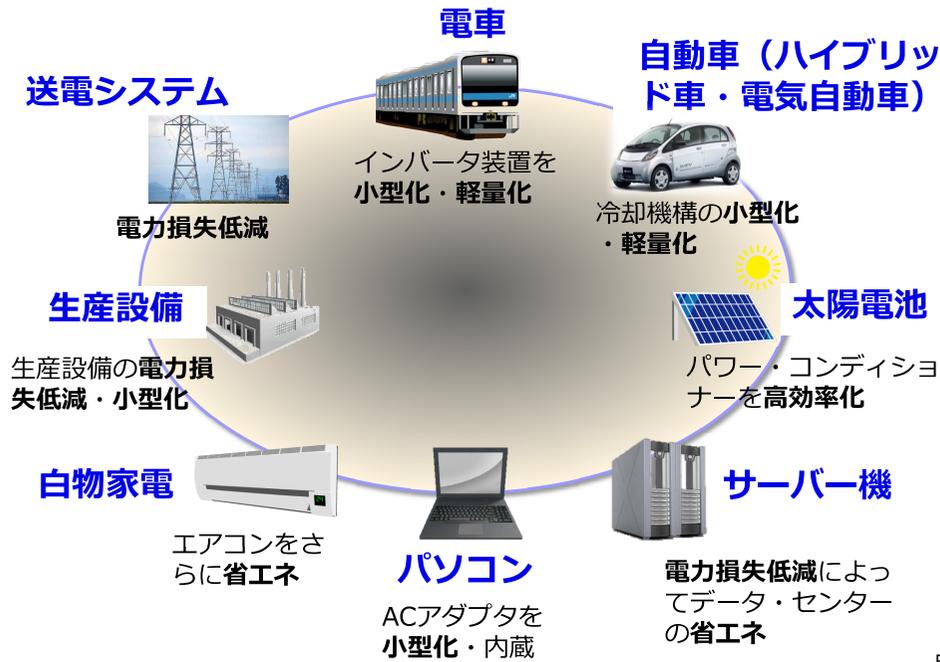
1. 省エネルギー化とパワー半導体・市場
2. 次世代パワー半導体の特徴
3. パワー半導体デバイス市場のゆくえ

1. 省エネルギー化とパワー半導体・市場
2. 次世代パワー半導体の特徴
3. パワー半導体デバイス市場のゆくえ

日本の電力エネルギーの流れ



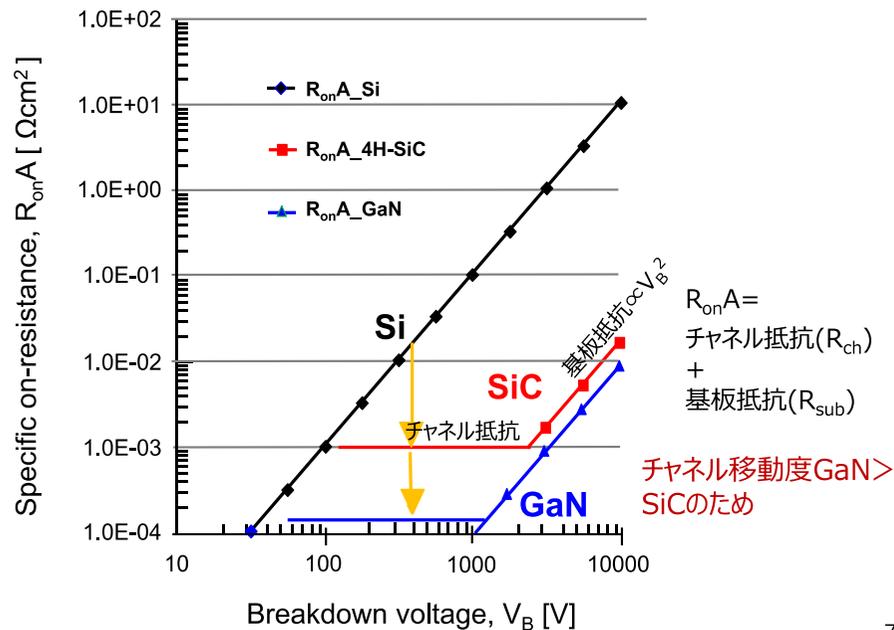
社会インフラの省エネ化ビジョン



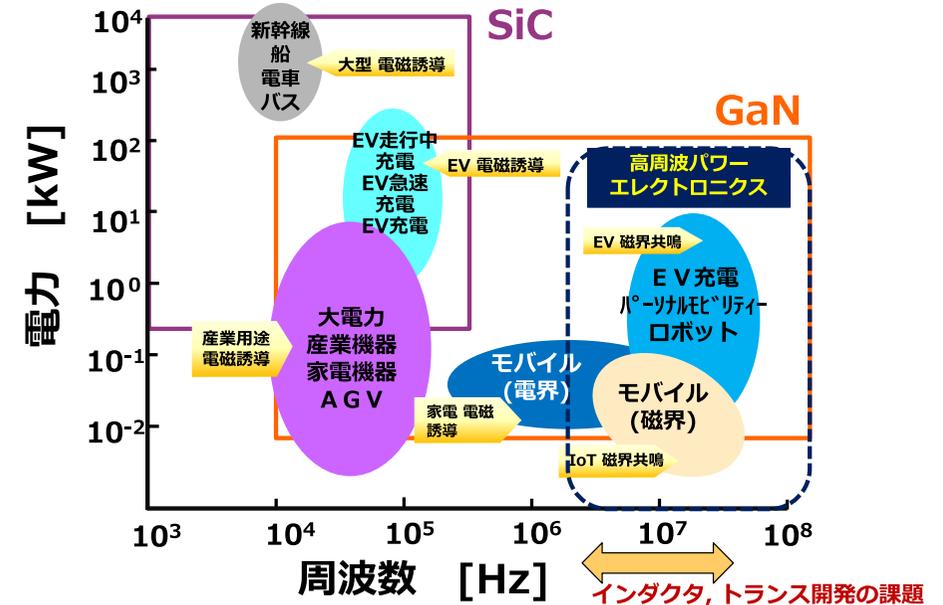
Si, GaAs, SiC, GaNの物性値比較

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
バンドギャップ(eV)	1.12	1.42	3.26	3.39
熱伝導率(W/cmK)	1.5	0.46	3.6	2
移動度 (cm ² /Vs)	電子 μ _e	1450	8500	1245 (HFET)
	正孔 μ _h	370	400	30 (MOSFET)
比誘電率	11.9	13.1	9.7	10.4
飽和ドリフト速度 (cm/s)	電子	1E7	2E7	2.2E7
	正孔	1E7		2.5E7
絶縁破壊電界, E _C (MV/cm)	0.3	0.4	2.7	2.7
活性化エネルギー (meV)	n型	45(P)	5.8(Si)	42(N)
	p型	45(B)	31(Zn)	183(Al)
性能指数(バリガ指数) $\epsilon\mu_e E_c^3 [= V_B / (R_{on}A)]$	1	16	560	950

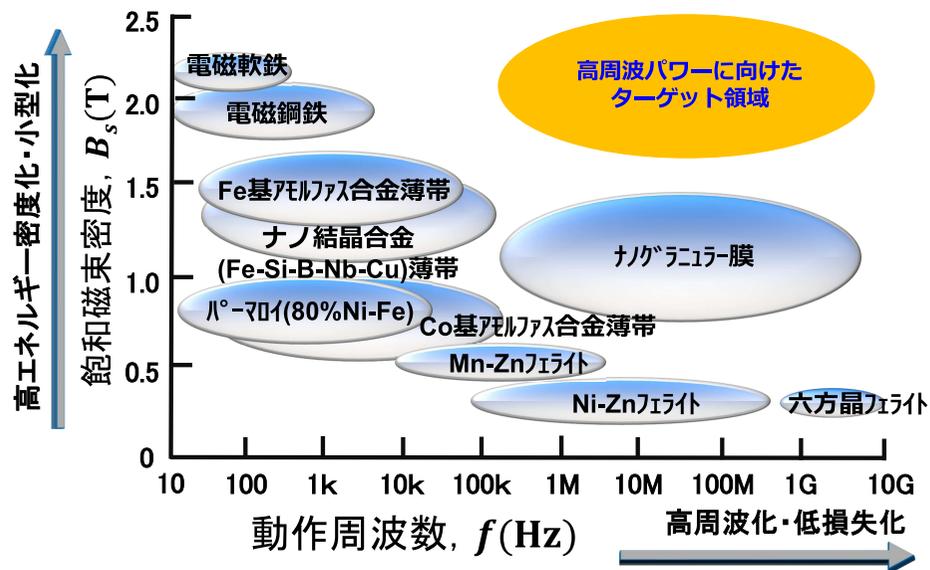
オン抵抗と絶縁破壊電圧の関係—SiC及びGaNの比較



動作周波数と電力および応用例

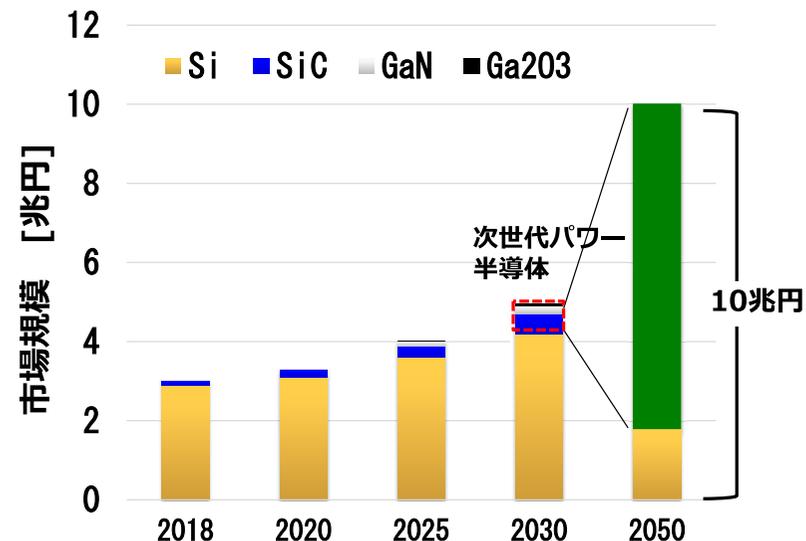


種々軟磁性材料の飽和磁束密度と動作周波数の関係



吉沢克仁, “軟磁性材料の開発動向と展望”, まてりあ 第56巻, 第3号, p.186 (2017)より

パワー半導体市場のゆくえ



出展: NEDO 「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」

1. 省エネルギー化とパワー半導体・市場
2. 次世代パワー半導体の特徴
3. パワー半導体デバイス市場のゆくえ

パワー半導体材料としてのワイドバンドギャップ半導体(WBG)電子デバイスの特徴

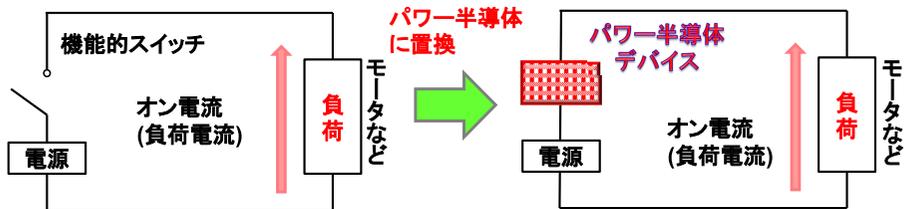
広い禁制帯幅	⇒	高温動作
高い絶縁破壊電界	⇒	高耐圧、低損失
速いドリフト速度	⇒	高い電流駆動力
高い熱伝導度	⇒	優れた放熱

特にSi, GaAs系デバイス特性が理論限界に近づいている

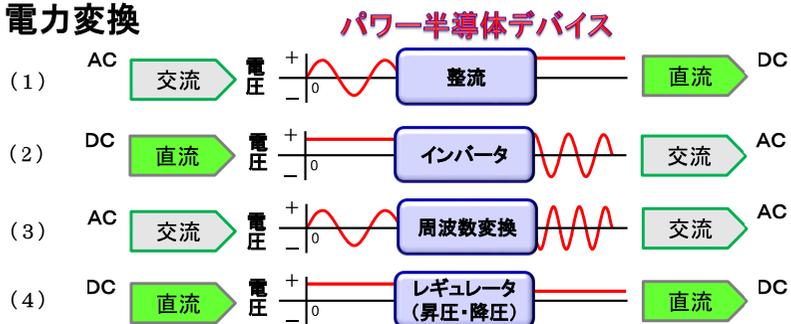
1. 電力変換用パワーデバイス(電力用)
2. 高周波パワーデバイス(通信用)
3. 高温動作デバイス

システムの小型化、高効率化に極めて有望

(1) スwitching



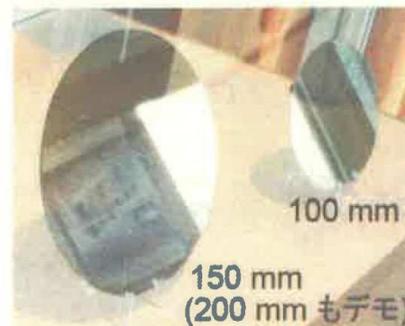
(2) 電力変換



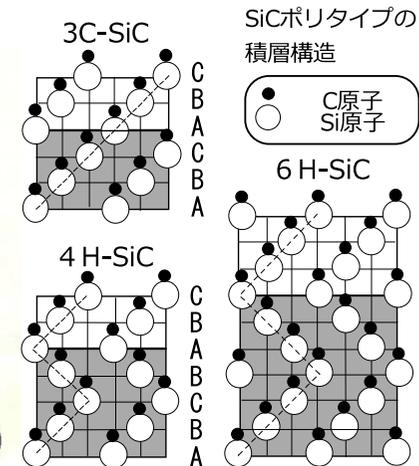
パワーエレクトロニクス回路

SiC半導体の特徴

- 広範囲の伝導性制御 (p型、n型とも)
- 良質の単結晶ウエハ (低抵抗、半絶縁性) が広く市販
- 熱酸化によりSiO₂形成 → MOSデバイス
- ヘテロ接合の形成不可能
- 多くの結晶多形が存在

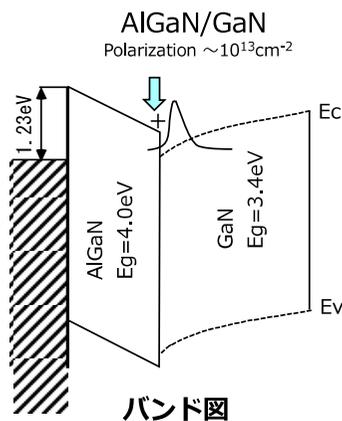
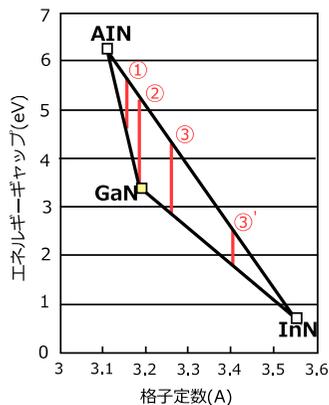


転位密度: 5000 cm⁻² (市販)
< 100 cm⁻² (研究開発)



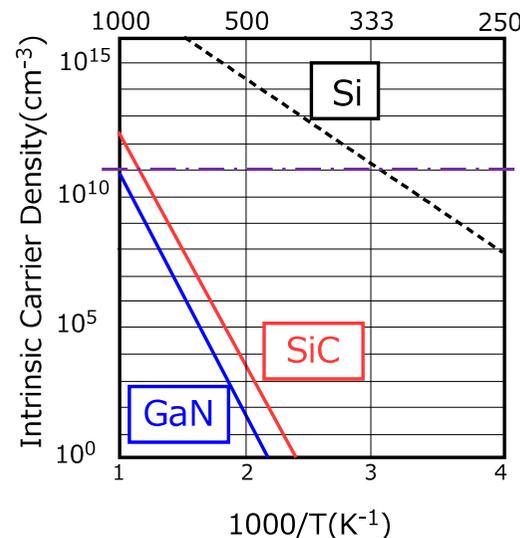
GaN系半導体の特徴

- AlやInとの混晶によるE_gエンジニアリングとヘテロ接合の活用
- 自発分極+ピエゾ分極によりAlGa_n/GaN界面に高濃度2次元キャリアが存在
- 異種基板 (サファイア、SiC、Si) 上へのヘテロエピ成長が一般的



極めて小さい真性キャリア濃度

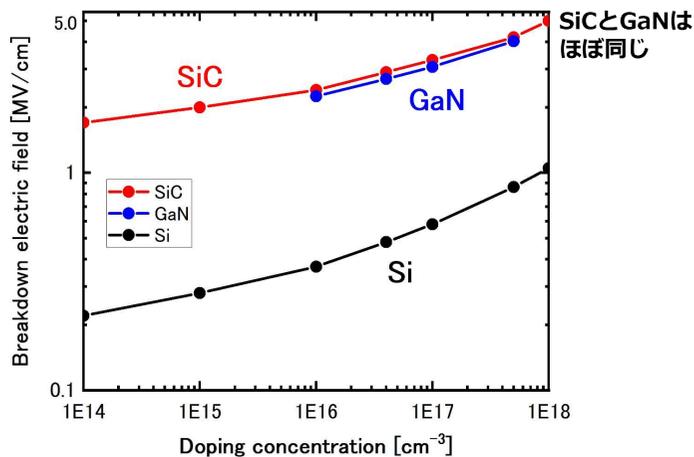
真性キャリア濃度の温度依存性
Temperature (K)



$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

➤ 高温でも小さい真性キャリア密度
→ 高温動作デバイス

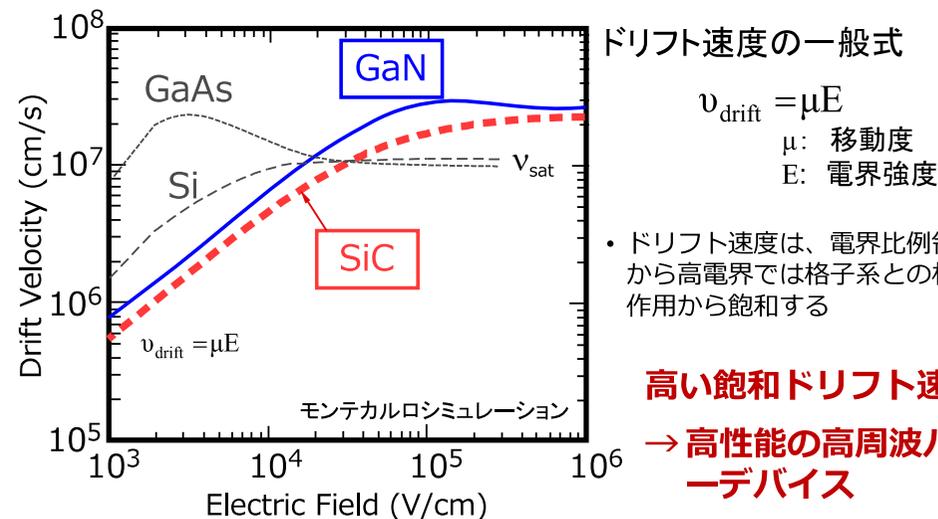
高い絶縁破壊電界



SiC: Niwa *et al.* IEEE Trans. Electron Dev. (2015)
 GaN: Maeda *et al.* J. Appl. Phys. (2021)

Siに比べて約10倍以上の絶縁破壊電界
→電力用パワーデバイス、高周波用パワーデバイス

電子のドリフト速度の電界依存性

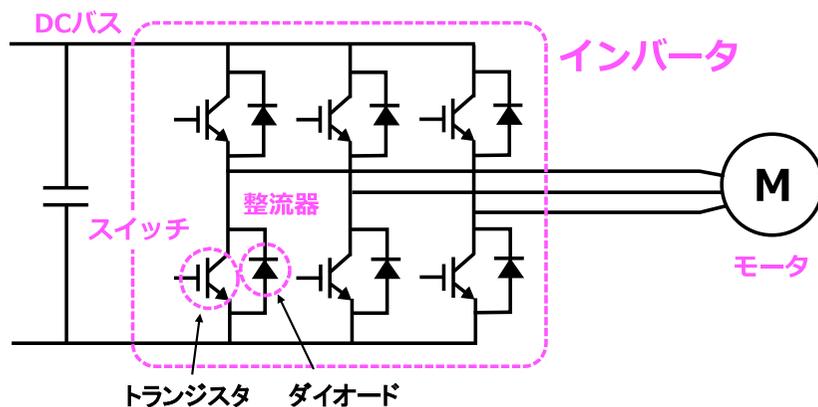


• ドリフト速度は、電界比例領域から高電界では格子系との相互作用から飽和する

高い飽和ドリフト速度
→高性能の高周波パワーデバイス

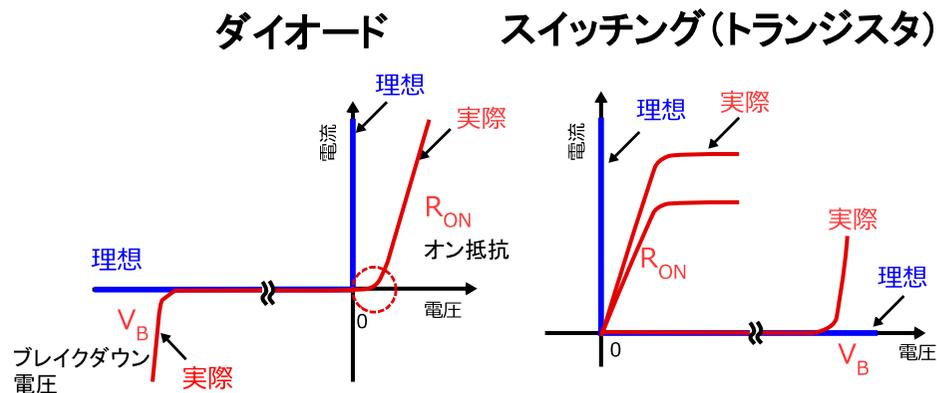
Kimoto and Cooper, John Wiley, 2014
 Farahmand *et al.* IEEE Trans. Electron Dev. 2001

パワーデバイスに要求される特性



1. 高い耐圧
 2. 大電流@低いオン電圧
 3. 高速スイッチング
 4. 堅牢さ(高信頼性)
- 小さい電力損失 (高効率)

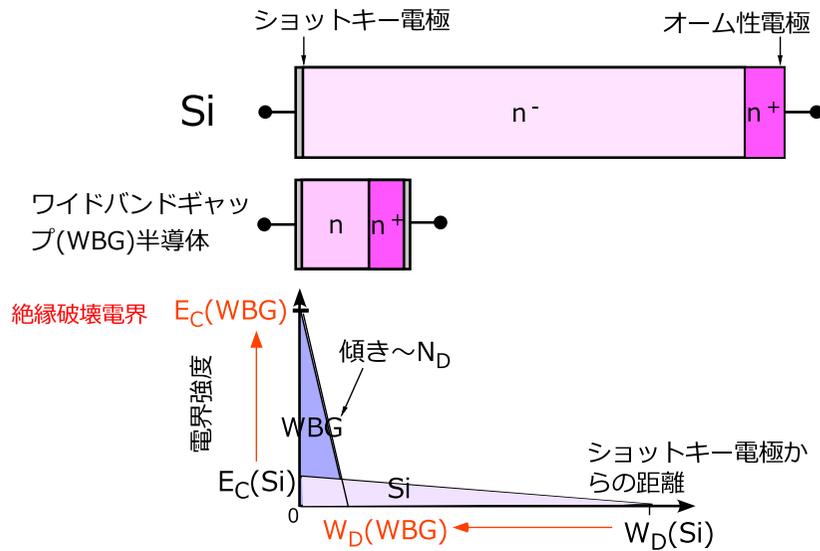
パワーデバイスの理想特性と実際



	理想デバイス (Ideal Device)	実デバイス (Actual Device)
逆方向耐圧 (Reverse voltage)	∞ V	有限 (Finite)
オン抵抗 (ON resistance)	0 Ω	有限($\neq 0$)
スイッチング (Switching)	0 秒 (0 s)	有限($\neq 0$)

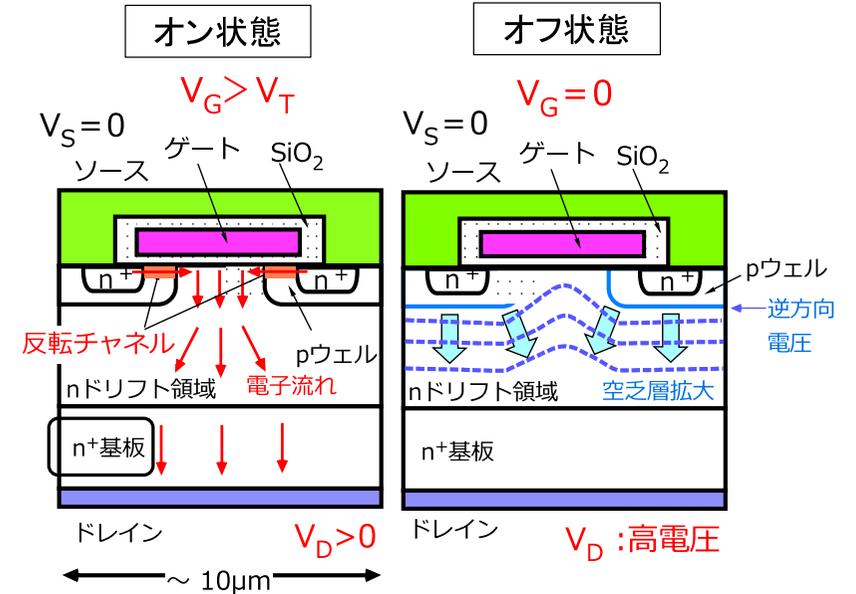
損失の発生 (Loss generation) →

ワイドバンドギャップ (WBG) 半導体パワーデバイスの優位性

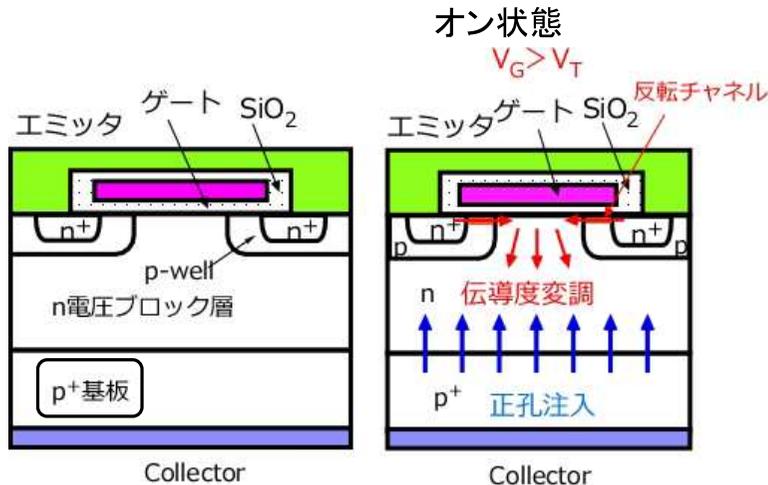


パワー-MOSFET (電界効果トランジスタ)

縦型パワー-MOSFET

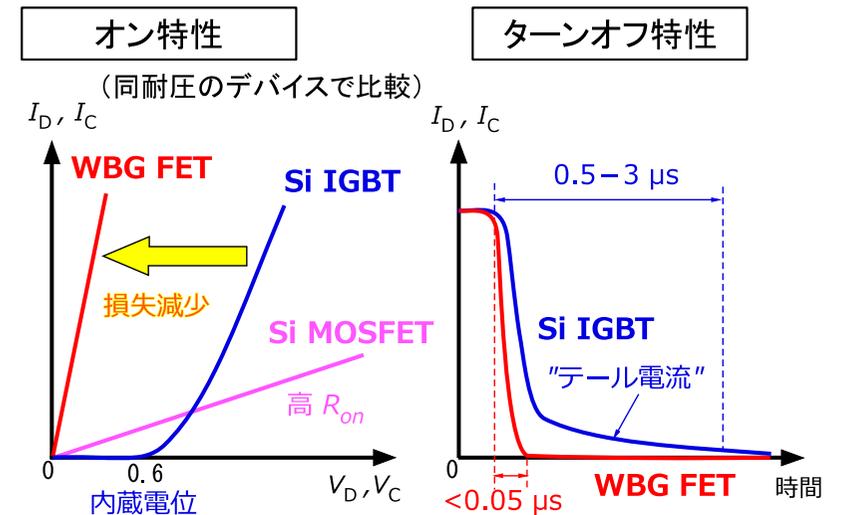


IGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)



- MOSゲート ($I_G = 0$)
- 高耐圧デバイスでも低いオン抵抗
- 比較的遅いスイッチング、比較的大きいスイッチング損失
- 立ち上がり電圧あり

ワイドバンドギャップ (WBG) 半導体パワーFETの優位性



➤ ワイドバンドギャップ半導体(WBG)FET:
低いオン損失&スイッチング損失(+高速スイッチ)

1. 省エネルギー化とパワー半導体・市場
2. 次世代パワー半導体の特徴
3. パワー半導体デバイス市場のゆくえ

Si, SiC, GaNウェハメーカーの世界市場

日本企業上位2社で
57.0% ↓

日本企業主要3社で
88.1% ↓

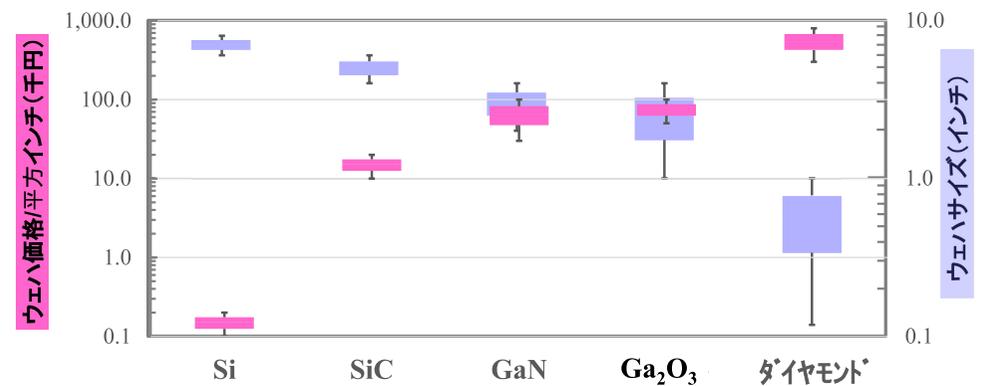
Si	944,411百万円 (2017) ¹⁾	(%)	SiC	13,700百万円 (2018) ²⁾	(%)	GaN	20,600百万円 (2018) ³⁾	(%)
信越半導体		30.0	II-VI (USA)		45.3	住友電気工業		38.4
SUMCO		27.0	CREE Wolfspeed (USA)		32.8	三菱ケミカル		30.5
Global Wafers (台湾)		18.0	SiCrystal (ドイツ)		8.0	住友化学(旧サイオクス)		19.2
Siltronic (ドイツ)		15.0	DowDuPont (USA)		5.1	その他		11.9
その他		10.0	その他		8.8			※LED向け、LD向け、電子デバイス向けを対象

- 1) SEMI, Siltronic社データ参考 楽天証券作成資料2018.3.30より
- 2) 富士経済, 2019年版次世代パワーデバイス&パワーエレクトロニクス関連機器市場の現状と将来展望より
- 3) 富士キメラ総研, 2018LED/LD関連市場総調査より

パワーデバイス用ウェハ・エピ技術比較

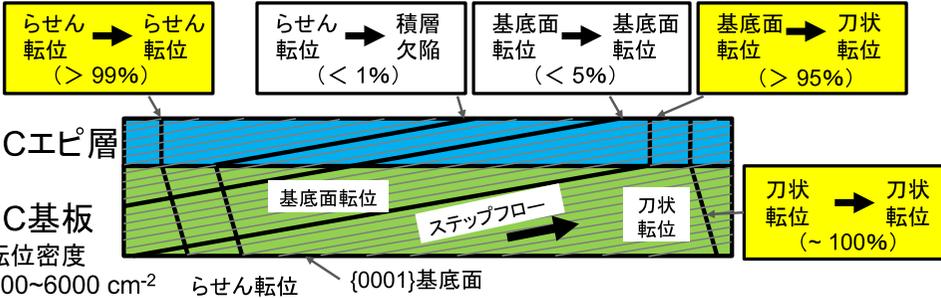
	Si	SiC	GaN
ウェハ技術	結晶成長法 FZ/6インチ CZエピ/8インチ	昇華法 4~6インチ	ハイドライド気相成長 (HVPE) 2~4インチ
価格	<0.2千円/平方インチ	10~20千円/平方インチ	30~100千円/平方インチ
欠陥(転位)密度	無	マイクロパイプ無, 3000/cm ²	10 ⁴ ~10 ⁶ /cm ²
耐圧保持層エピエピ成長速度	FZ	CVD 40~60μm/h	MOCVD <5μm/h
必要エピ厚さ(Si=1)	1	0.05~0.1	0.03~0.06
エピコスト(SiC=1)		1	6~7
技術課題	サイズ ◎	6インチ (8インチデモ)	大型化めど
	欠陥 ◎	欠陥解析進展	欠陥調査中
	その他	低価格化, 国産化	低価格化, 半絶縁基板

ウェハサイズおよび価格比較



SiCにおける結晶欠陥と電子デバイス性能

- ウェハ転位密度3000/cm²のためエピ層中の転位合体・会合は無い
- 種々転位とデバイス性能関係は調査済でキラー欠陥対策済(2009年)



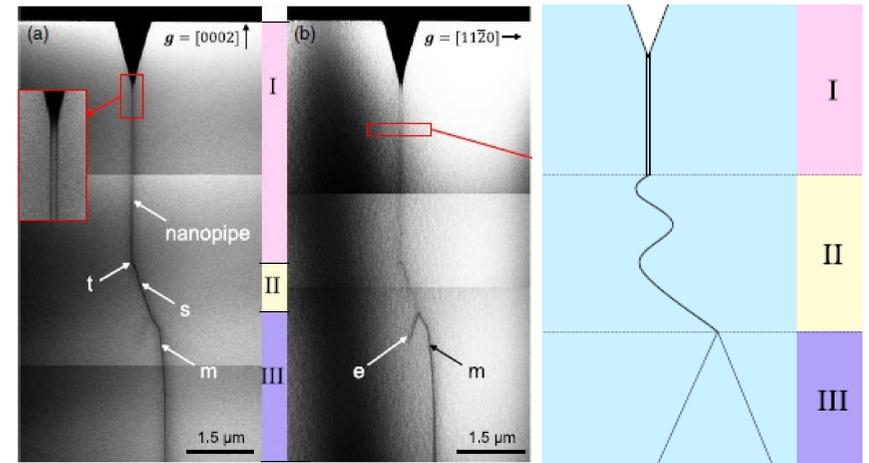
転位種類	SBD	MOSFET, JFET	PN, BJT, Thyristor, IGBT
らせん転位 (ピットなし)	影響無	影響無	オン抵抗&リーク電流に影響無 (ライフタイム減少)
刃状転位 (ピットなし)	↑	↑	↑
基底面転位	↑	↑	パイポーラ劣化(オン抵抗とリーク電流増加)

Kimoto, JJAP, 54, 040103 (2015) より

29/34

GaNにおける結晶欠陥と電子デバイス性能

- ウェハ転位密度10⁶/cm²のためエピ層中の転位合体・会合は有り
- 種々転位とデバイス性能関係は調査中
- らせん転位と他の転位の合体がナノパイプを形成しリーク源となる



Usami & Amano et al., JJAP, 58, SCCB24, (2019) より

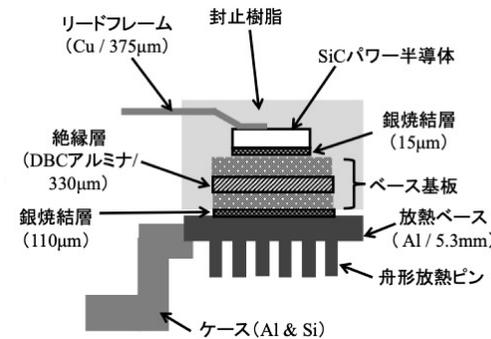
30/34

Si, SiC, GaNウェハの点欠陥

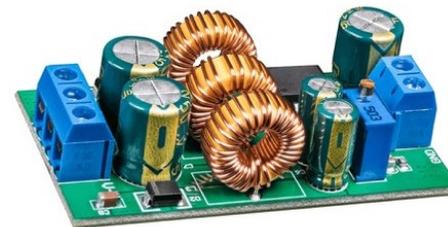
	Si	SiC	GaN
点欠陥		V _C	V _{Ga} V _N 複合体, C _N
点欠陥密度 (1/cm ³)	無	<10 ¹⁰	10 ¹⁴ ~10 ¹⁵

31/34

パワー半導体チップと受動部品の実装の課題



1. パワー半導体チップと受動部品の実装における冷却：空冷か、水冷か
2. 放熱法の開発
3. パワー回路用軟磁性材料のロードマップ作製
4. 動作周波数限界の見極め



32/34

まとめ

1. 次世代パワー半導体SiC及びGaNを材料学的に比較しながら俯瞰
2. ウェハ／エピ技術はSiCが一步進むが国産化に課題
3. ウェハ／エピ技術として、GaN国産メーカーの頑張りと種々方法から研究開発段階
4. 10MHz領域の受動部品インダクタ/変圧器の材料開発が急務
5. パワーデバイスチップ及び受動部品の熱放散技術も課題
6. パワー半導体市場はSiC/GaN電子デバイスの普及拡大が進展

ご清聴有難う御座いました

2024年6月28日
日本ナノ磁性材料協会 軟磁性材料研究会(第26回)

高Bsナノ結晶粉末を用いた 圧粉磁心の開発



株式会社トーキン 研究開発本部
浦田顕理

本日の内容

- ✓ 会社紹介
- ✓ NANOMETの開発背景
- ✓ NANOMET粉末及び圧粉磁心の開発状況

NANOMETの開発背景

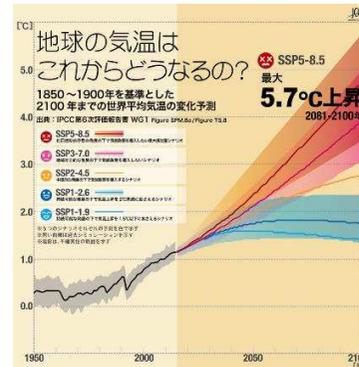


内容

- 開発背景
- NANOMETとは
- 磁気特性向上の原理

21世紀の地球環境問題

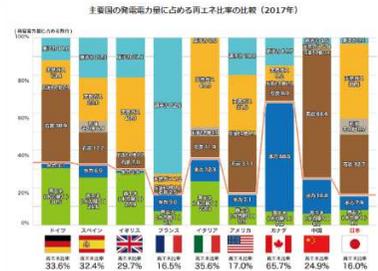
化石燃料消費によりCO₂増加、気温上昇
地球環境の危機



Ref) IPCC資料より抜粋。出典: IPCC第6次評価報告書

国	目標年	目標	EVV	EV	EVV/EV	EVV/EV	EVV/EV
日本	2035年	EVV: 20% (EV: 10%)	20%	10%	2.0	2.0	2.0
	2050年	EVV: 30% (EV: 15%)	30%	15%	2.0	2.0	2.0
中国	2035年	EVV: 20% (EV: 10%)	20%	10%	2.0	2.0	2.0
	2050年	EVV: 30% (EV: 15%)	30%	15%	2.0	2.0	2.0
米国	2035年	EVV: 20% (EV: 10%)	20%	10%	2.0	2.0	2.0
	2050年	EVV: 30% (EV: 15%)	30%	15%	2.0	2.0	2.0
EU	2035年	EVV: 20% (EV: 10%)	20%	10%	2.0	2.0	2.0
	2050年	EVV: 30% (EV: 15%)	30%	15%	2.0	2.0	2.0

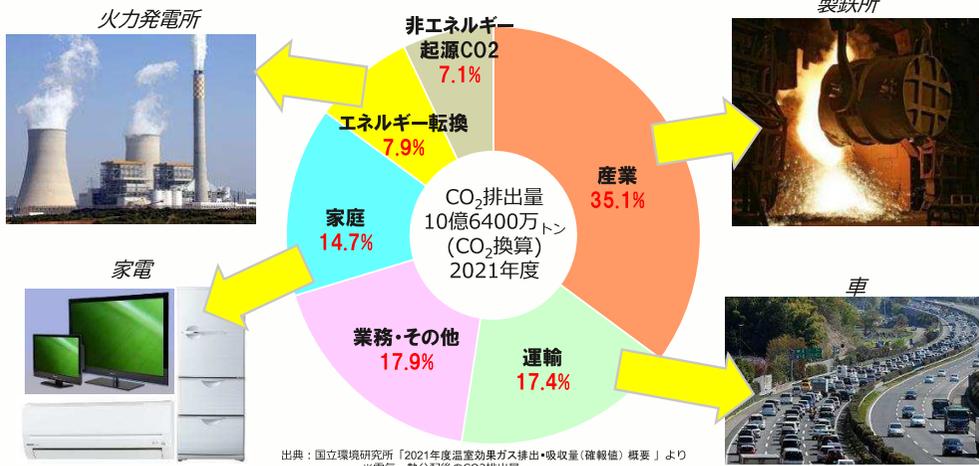
Ref) 経済産業省「トランジション・ファイナンス」に関する自動車分野における技術ロードマップ」



Ref) 資源エネルギー庁

✓ 電動化、再生可能エネルギーへ社会構造転換

日本のエネルギー消費の内訳



✓ あらゆる分野において省エネ化が必要

環境・エネルギー問題対策



エネルギー利用の高効率化



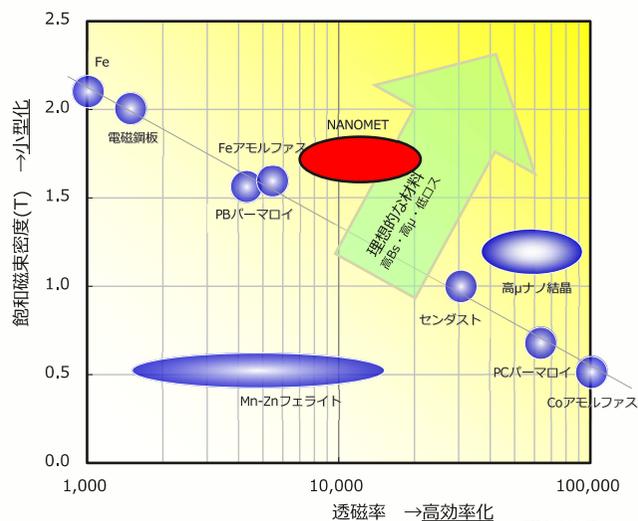
✓ パワエレ技術によりエネルギー(電気)の有効利用

軟磁性材料の技術動向

➢ 磁性部品への要求事項
⇒小型・高効率・高周波化
⇒高信頼性・低価格

➢ 軟磁性材料の
⇒高Bs・低ロスの両立
⇒高生産性と低価格原料

➢ 高Bsタイプのナノ結晶材料
NANOMET



NANOMETとは

・・・東北大学で開発された高Bsタイプのナノ結晶材料※1

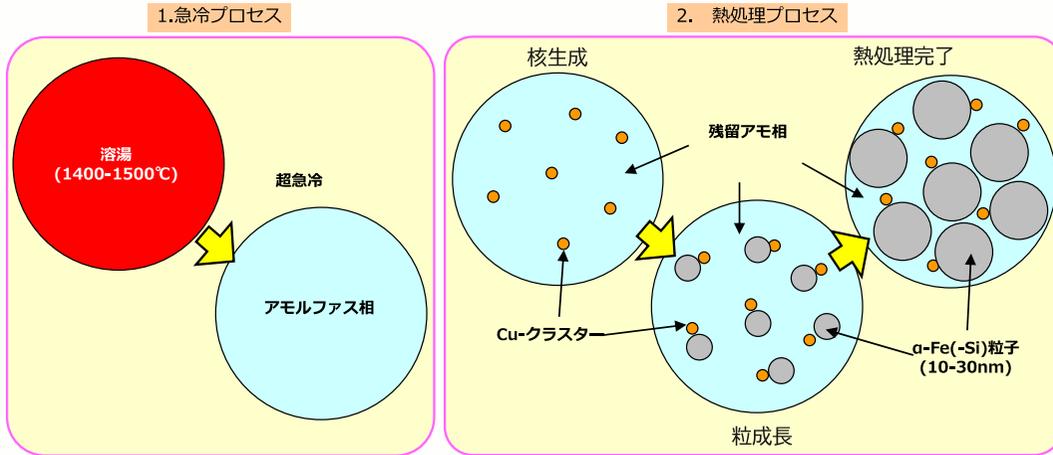
ONANOMETとFINEMET、アモルファスの比較(薄帯)

	アモルファス	FINEMET※2	NANOMET※1
文献組成	Fe ₇₈ Si ₉ B ₁₃	Fe _{73.5} Si _{15.5} B ₇ Nb ₃ Cu ₁	Fe _{83.3} Si ₄ B ₈ P ₄ Cu _{0.7}
特徴	汎用タイプ	高μタイプ	高Bsタイプ
Bs	1.56T	1.23T	1.75T
透磁率	5k	30k-100k	5k-20k
Hc	2~3 A/m	≒1 A/m	2~3 A/m
磁歪	27ppm	≒0	15-20ppm
長所	原料が安く、製造容易	熱処理容易、ゼロ磁歪可能	安価な原料で構成、高Bs
短所	磁歪大、特性中途半端	高価格のNb含有、Bsが低い	製造・熱処理が難しい

※1 A. Makino, H. Men, K. Yubuta, T. Kubota, J. Appl. Phys. 105 (2009), 013922.

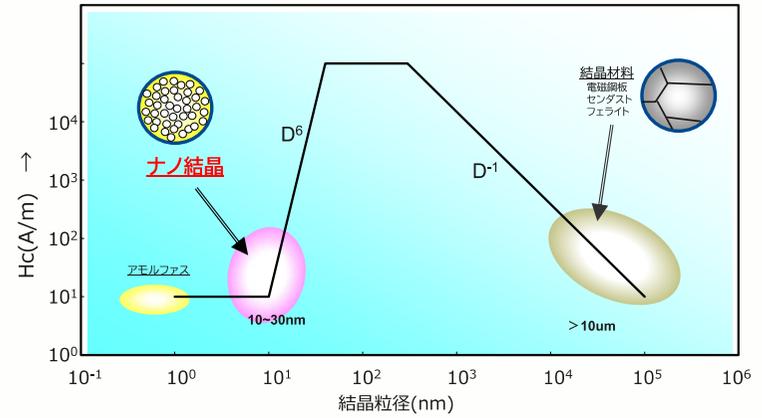
※2 Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi, J. Appl. Phys. 64 (1988), 6044.

ナノ結晶化プロセスの概要



研開本 (ナ) 資 24-028

ナノ結晶材の磁気特性の原理①

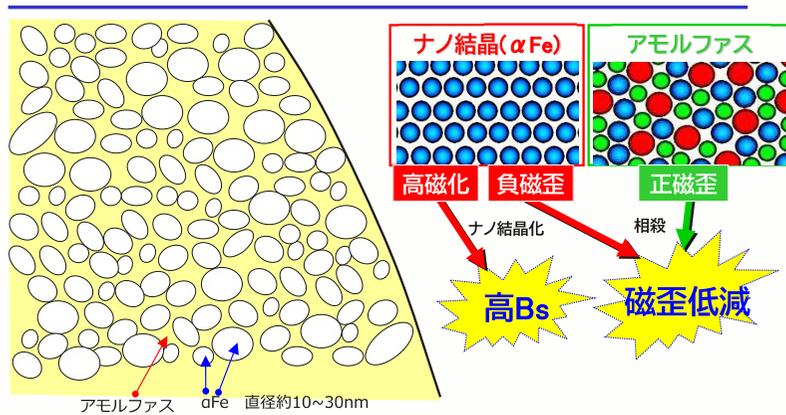


✓ ナノ結晶化に伴う結晶磁気異方性の低減※

※G. Herzer, IEEE Trans. Magn. **25**, 3327(1989).
※G. Herzer, IEEE Trans. Magn. **26**, 1397(1990).

研開本 (ナ) 資 24-028

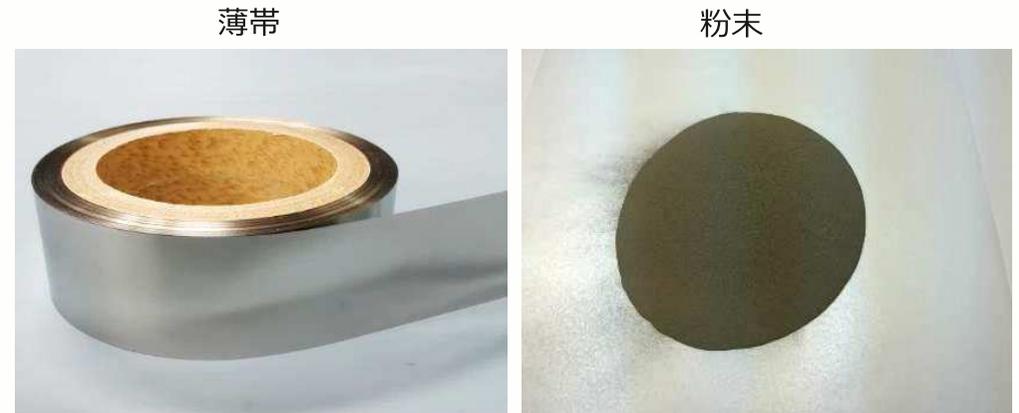
ナノ結晶材の磁気特性の原理②



✓ ナノ結晶化による高Bs化と磁歪低減※

※G. Herzer, Mat. Sci. and Eng. **A133**, 1(1991). 研開本 (ナ) 資 24-028

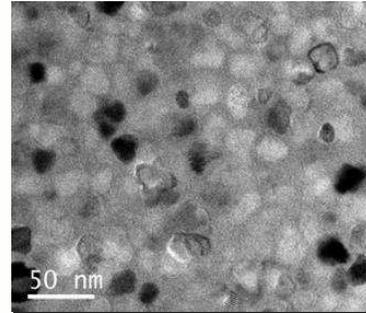
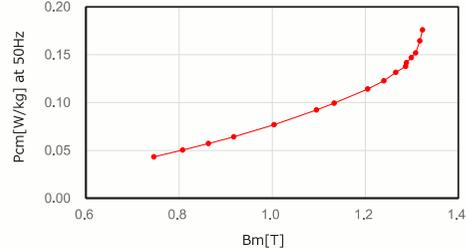
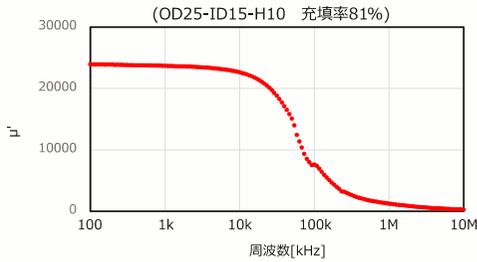
素材の外観



✓ 薄帯や粉末形状で製造可能

研開本 (ナ) 資 24-028

NANOMET薄帯(リングコア)の磁気特性



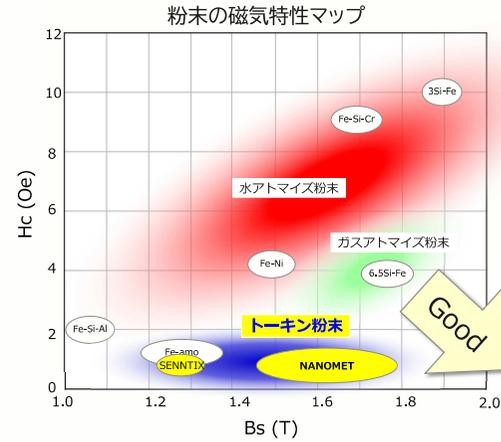
✓ 微細なナノ結晶構造により良好な磁気特性を発現

NANOMET粉末と圧粉磁心の開発状況

内容

- ・ 文科省プロジェクトINNOPELについて
- ・ NANOMET粉末の特性について
- ・ 圧粉磁心化とその磁心特性

NANOMET粉末の磁気特性



- ✓ NANOMET粉末も高Bsと低Hcを両立できる材料
- ✓ 圧粉磁心にて応用展開を検討中

応用展開例(TOKINのデバイス)



INNOPEL

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

本事業では、学究究明も含めた基礎基盤研究の推進により、GaN等の優れた材料特性を実現できるパワーデバイスやその特性を最大限活かすことのできるパワエレ回路システム、その回路動作に対応できる受動素子等を創出し、超省エネ・高性能なパワエレ技術の創出を実現することを目的としています。



「革新的パワーエレクトロニクスのための超低損失磁性材料の創成」

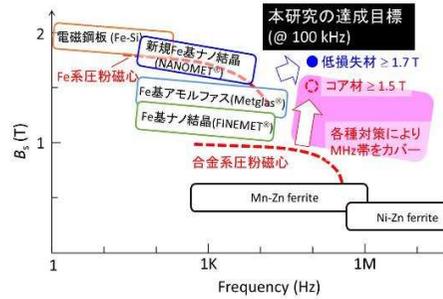
代表者：東北大学教授 岡本先生

2050年カーボンニュートラルに向けた次世代パワーエレクトロニクスの鍵を握る超低損失なバルク軟磁性材料の開発と社会実装を目的とする。パワーデバイスとしてSiCあるいはGaNを用いた高周波駆動環境下において既存材料比1/3の鉄損を目標とする。

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

本プロジェクトにおける磁性コアのターゲット

	中間目標 2023年度	最終目標 2025年度
素材Bs	≥1.7T	
コアBs		≥1.5T
コアロス at 100kHz-100mT	≤200kW/m ³	≤70kW/m ³

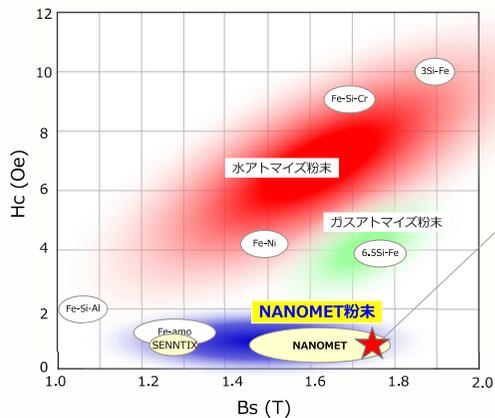


東北大学岡本研究室ホームページ資料より

- ✓ 低損失材であるフェライトやFINEMET並みの低損失化が必要
- ✓ 非常にハードルの高い目標

NANOMET粉末の特性について

NANOMET粉末の選択



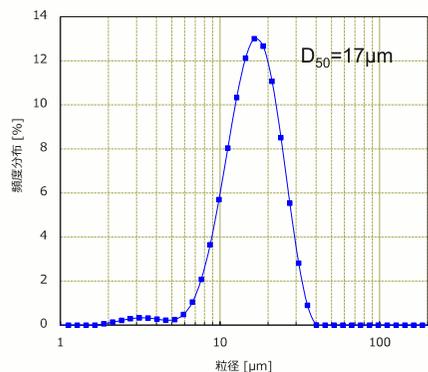
NANOMETは組成や熱処理条件を制御することで、様々な特性を得ることができる。

- 必要特性
- ・熱処理前:
アモルファス相の粉末
 - ・熱処理後:
Bs ≥ 1.7 T
Hc ≤ 1.0 Oe

NANOMET粉末の評価

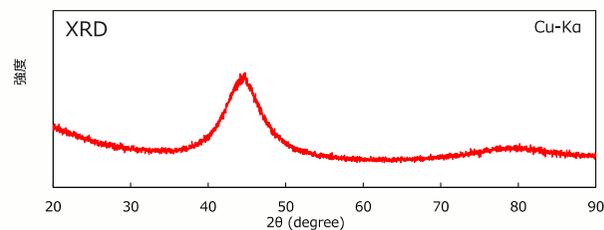
- 製造方法
 - 組成 : Fe-(Si,B,P)-Cu系NANOMET
 - 製法 : 急冷アトマイズ法
- 熱処理方法
 - 保持温度 : 結晶化温度近傍
 - 雰囲気 : 不活性雰囲気
- 評価方法
 - 粒度分布計 : 粒径
 - マイクログラフ : 粉末形状
 - XRD : 析出相、結晶化度、結晶粒径
 - DSC : 結晶化温度
 - VSM : 保磁力、飽和磁化

粒度分布と粒子形状について

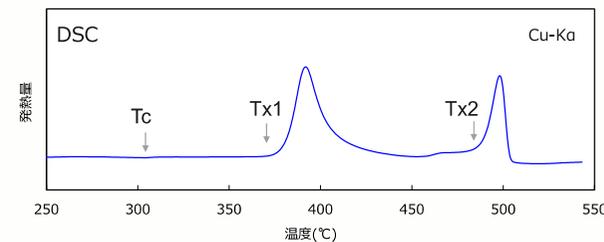


平均粒径17μm、球状粉末を製作

XRDとDSCプロファイル

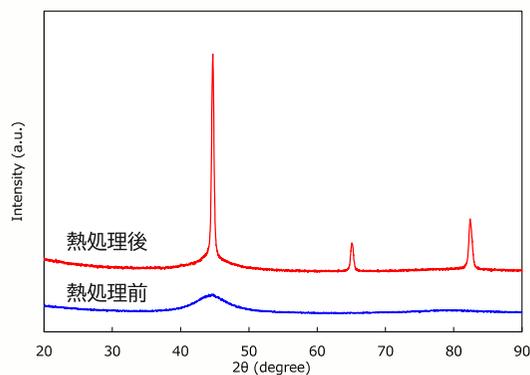


アモルファス粉末
急冷の効いた良好な粉末



2つの結晶化ピーク
他の非晶質系の材料に比べると結晶化温度は低い
FINEMET : Tx1=525°C
2605SA1 : Tx1=531°C

熱処理による析出相の変化



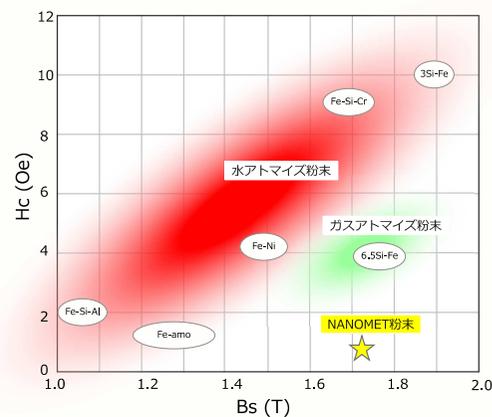
評価項目	熱処理前	熱処理後
Hc※1	1.0 Oe	0.5 Oe
Bs※1	1.62 T	1.73 T
結晶粒径※2	—	25 nm
結晶化度※2	—	45 %

※1 : VSMより測定・算出
※2 : XRDよりWPPD法を用いて算出

熱処理することで

- XRDより、微細なα-Fe(-Si)相が析出
- VSMより、Hc低減 ⇒ 応力緩和、磁歪低減
- Bs向上 ⇒ 磁化の高いαFeの析出

NANOMET粉末の位置づけ



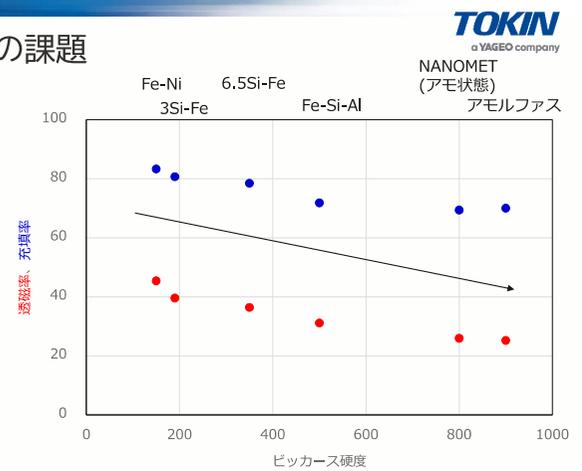
NANOMET粉末の磁気特性
Bs=1.73 T
Hc=0.5 Oe

- ✓ 従来にはない、高Bsと低Hcを両立できる材料
- ✓ 本プロジェクトの素材Bsの目標を達成できることを確認
- ✓ 本粉末を用い圧粉磁心化の検討

圧粉磁心化とその磁心特性



NANOMET粉末の圧粉磁心化の課題



- ✓ 粉末成形と絶縁・結着の為の樹脂の複合材のため密度向上が難しい
- ✓ 軟磁気特性改善のためにSi、Al、Bなど添加すると粉末が硬くなり高充填化困難

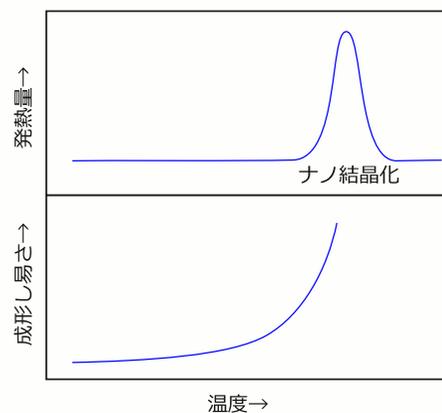
高密度成型について



- 高圧成型
- 潤滑材
- 粒度調整
- **熱間成型**

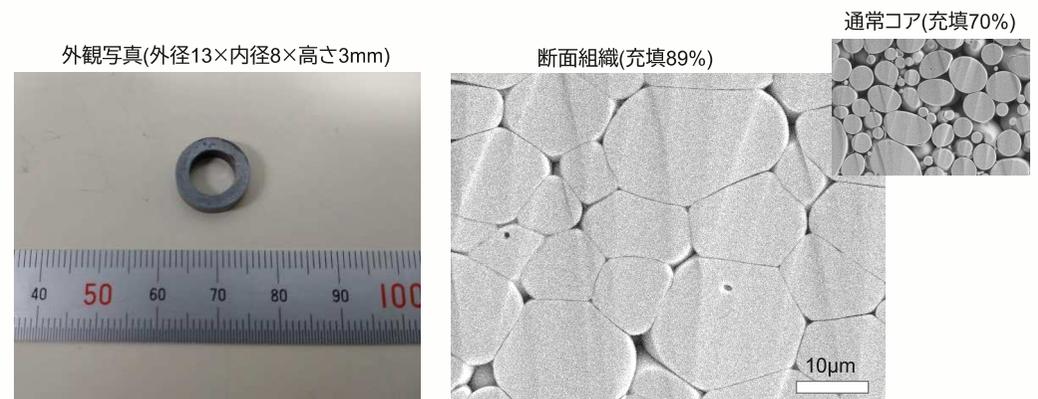


✓ 「ナノ結晶化」と「高密度成型」を同時に実施



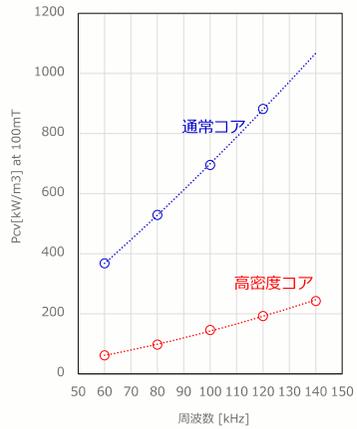
ナノ結晶材における高密度成型の概念図

高密度コアの外観写真と断面組織

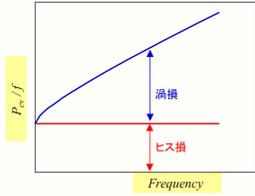


✓ 粉末が変形し高密度化が確認できる。

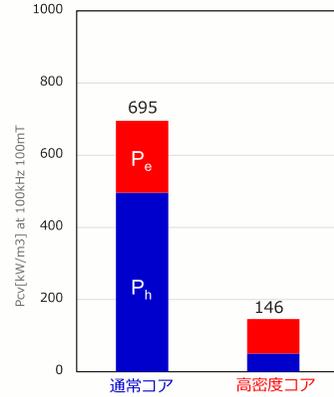
コアロスとロス分離



$$P_{cv} = \frac{K_h * f}{\text{ヒス損}} + \frac{K_e * f^n}{\text{渦損}}$$

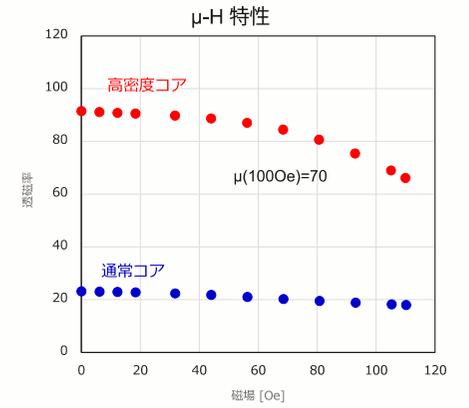
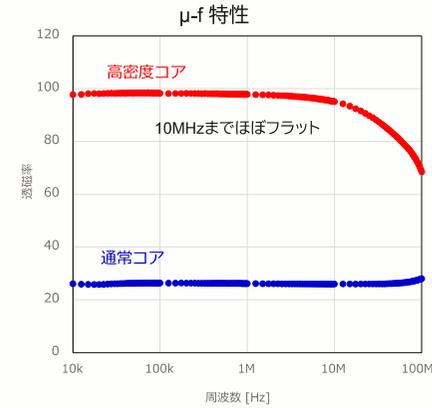


- ヒス損：直流の損失**
- 磁歪や応力
 - 結晶磁気異方性
 - 密度
- 渦損：交流の損失**
- 粉末粒径
 - 粉末抵抗
 - 粉末間抵抗
 - 磁壁移動



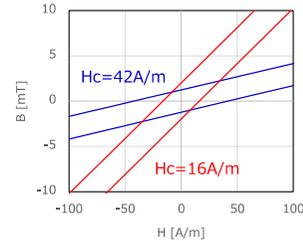
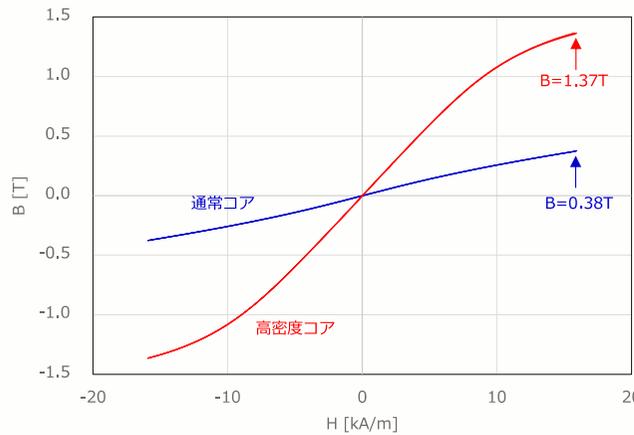
✓ 高密度コアにて大幅な損失低減を確認、特にヒス損低減が顕著。

透磁率と直流重畳特性



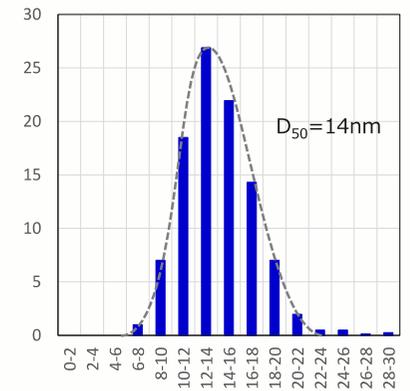
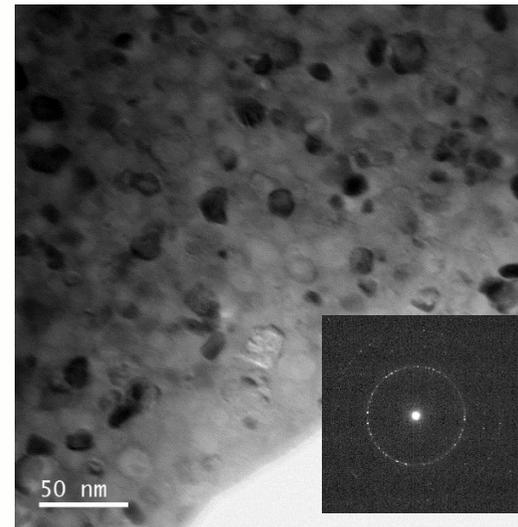
✓ 高密度コアにおいても周波数特性・重畳特性良好

直流BH特性



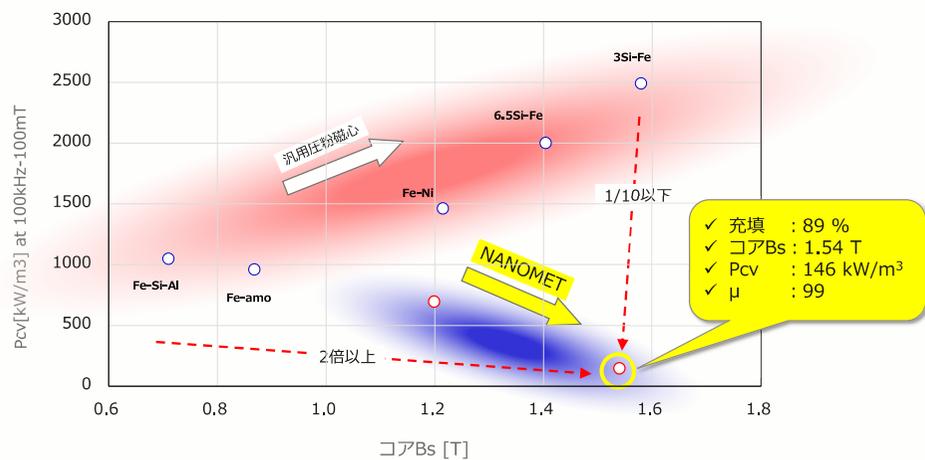
✓ 高密度コアでB向上、Hc低減。良好な直流磁気特性を示す。

TEMによる微細組織観察



✓ 均一な微細組織
✓ bcc構造で粒径14nm

圧粉磁心の磁気特性マップ



✓ 汎用圧粉磁心と比較すると圧倒的な特性を有する

研開本 (ナ) 資 24 - 028

まとめ

- ✓ 高Bsナノ結晶材であるNANOMETの紹介
- ✓ NANOMET粉末の高Bs、低Hcの両立を確認
- ✓ 高密度成型によりNANOMET圧粉磁心を試作
従来より高Bs・低損失の圧粉磁心を実現
- ✓ INNOPELプロジェクトの
Bsのターゲットを達成
コアロスの中間目標達成
今後、コアロスの最終目標を目指す

研開本 (ナ) 資 24 - 028

謝辞

- ・本ナノ結晶材に関する研究では経済産業省及びNEDO※¹より委託研究として多大なるご支援を受けました。またMagHEM※²及びAIST※³より様々な技術支援を頂きました。
- ・また本研究はINNOPEL※⁴の成果の一部です。

- ※1 NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)
- ※2 MagHEM(高効率モーター用磁性材料技術研究組合)
- ※3 AIST(国立研究開発法人産業技術総合研究所)
- ※4 INNOPEL(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)

研開本 (ナ) 資 24 - 028