

【第3回次世代半導体のアカデミアにおける研究開発等に関する検討会資料】

次世代半導体の研究開発で重点的に取り組むべき 技術課題と必要な方策・支援施策について ～パワエレを中心に～

2024-2-16

大森 達夫

「革新的パワエレ」プログラムディレクター

Program Director of INNOPEL

三菱電機(株)開発本部 主席技監

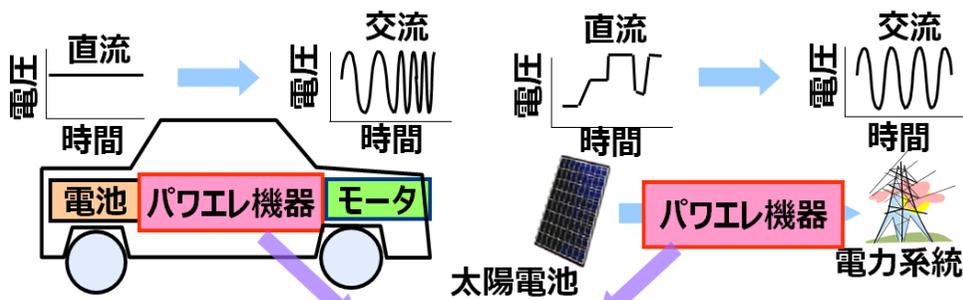
目次

1. 初めに: パワーエレクトロニクス(パワエレ)とは
2. 背景: カーボンニュートラル(豊かな高度エネルギー・情報化社会)に向けて
3. パワーエレクトロニクス(パワー半導体等)の研究開発動向と課題
4. 取り組べき技術課題と必要な方策・支援施策について
5. まとめ

パワーエレクトロニクス(パワエレ)について

パワエレとは: 応用製品(機器)の高性能化、省エネ化の重要技術

- ・ モータを効率よく回したり、機器をきめ細かく調整する(モータ制御⇒移動体、ロボット)
- ・ 電力の発電・送電・消費を効率的・高精度に行う(電力制御⇒電力、ICT機器、家電)



状況に応じた最適な周波数、電圧を供給

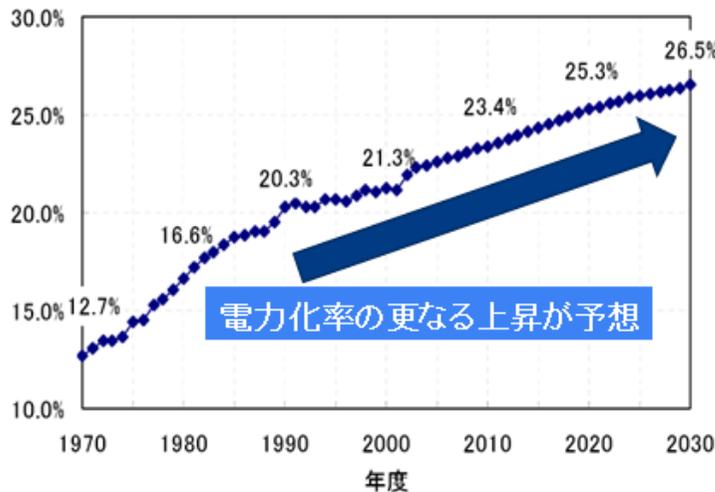
キーパーツ:
パワー半導体、
パワーモジュール*

変動する電池出力を安定した電力系統へ接続

駆動系の事例

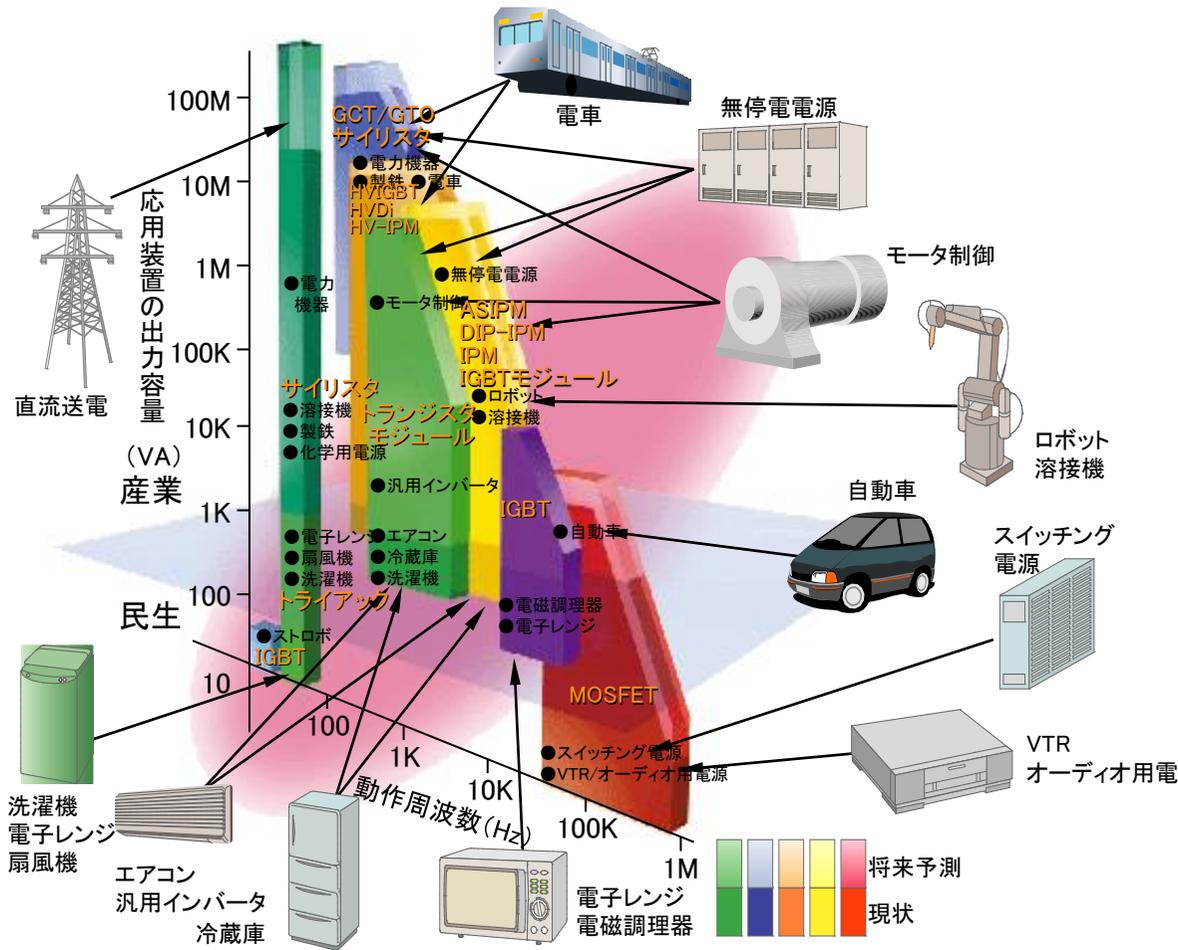
電力系の事例

*パワーモジュール: パワーデバイスを複数組み合わせ、パッケージ化した部品



電力化率(最終消費に占める電力消費シェア)の推移

出典:「2030年までの我が国のエネルギー需要の見通し」経済産業省



パワエレは、電気を使っている機器には必須の技術
 応用製品は広範囲にわたる(それぞれの課題に対応した研究開発)
 出力容量は1W~GWクラス、動作周波数は、数Hz~数MHz

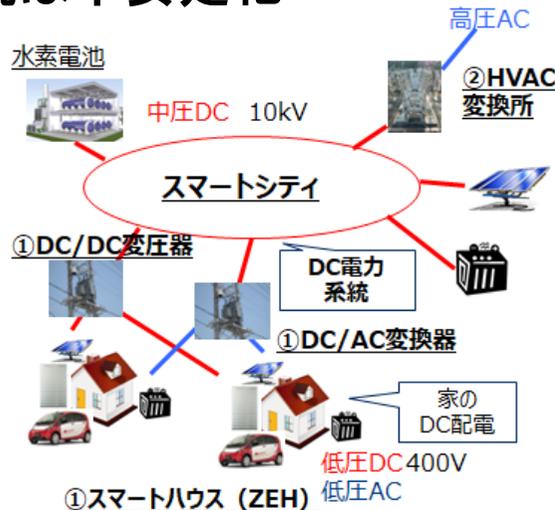
カーボンニュートラル(豊かな高度エネルギー・情報化社会)に向けて

- 2050年カーボンニュートラルという困難な課題を実現するためには、**再エネ利用の拡大**や**需要側の電化・省エネ**が**不可欠**。
- 電力ネットワークの需給調整や太陽光発電等に活用される電力変換器、EV、ロボット、情報機器など、電力供給の上流から電力需要の末端までを支える**パウエレ**は、あらゆる**機器の省エネ・高性能化**につながる**横断的技術**。
- パウエレは、温暖化対策に貢献しつつ我が国の産業構造や経済社会の**変革**をもたらす**イノベーションの鍵**。

エネルギーマネジメントの高度化

再生可能エネルギーの需給が増えるにつれ送配電システムは不安定化

パウエレによる**電力最適化・安定化・ロバスト化・省エネ化**が可能。



電化による省エネ・高性能化

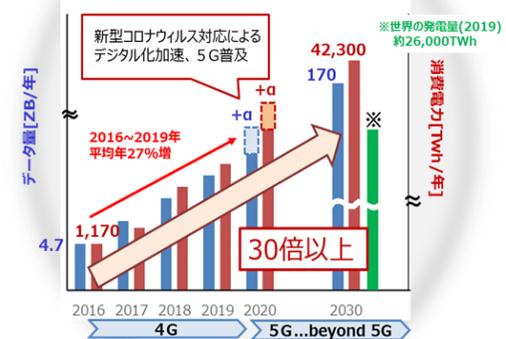
社会の電化や情報化の進展に伴い電力消費が急増大

パウエレの性能向上は**CO₂削減**や**新たなアプリ(製品)の創出**に寄与。



ICT機器の消費電力増

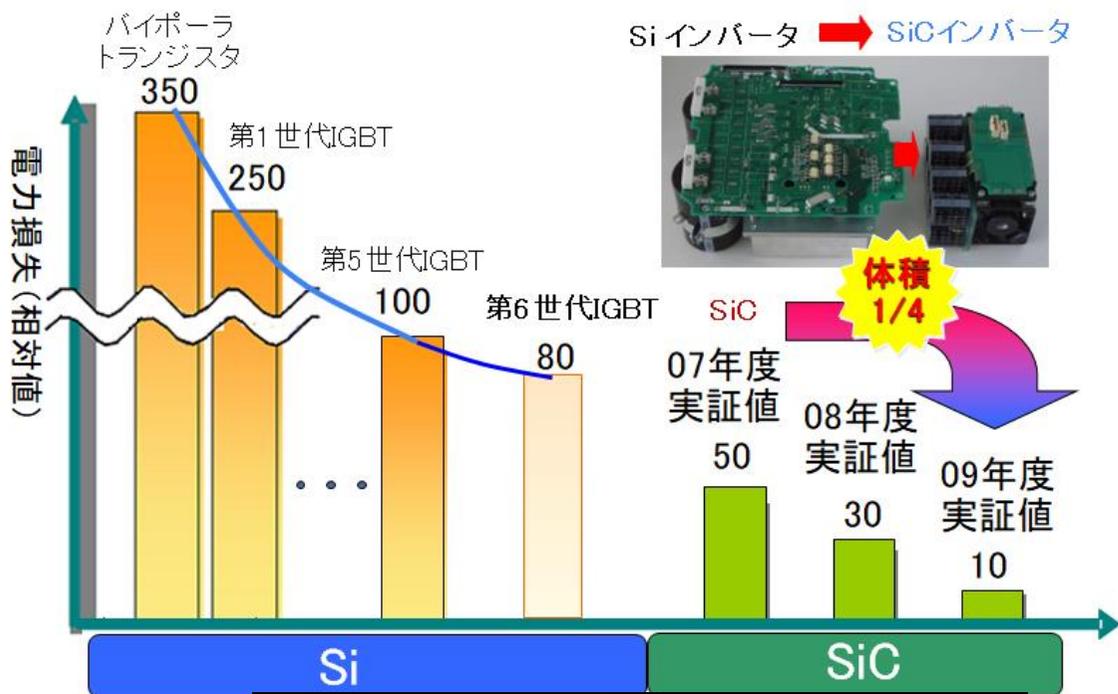
世界の情報通信機器の消費電力は2030年には、2016年の**30倍以上**に



JST LOS提案書「情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響」(Vol.1)より

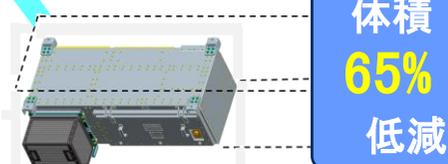
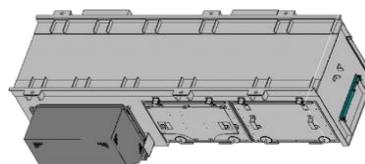
パワエレ(パワー半導体: WBG半導体)の研究開発動向

- Siパワー半導体は世代毎にデバイス構造を進化させて高性能化(～第8世代)を継続的に実現中。
- 優れた材料特性を持つWBG*半導体の研究が継続的に行われ、SiCやGaN等のWBGデバイスのパワエレ、高周波分野で実用化が広がっている。



車両システムとして省エネ

30% 実現



小田急1000形車両に搭載('14.4)

2014年12月より営業運転

新幹線N700系での走行試験を開始('15.6)

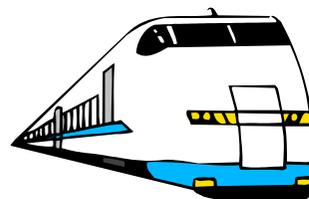
次世代新幹線確認試験車に搭載('18.3)

SiCとSiの物性値比較

材料	禁制帯幅 (eV)	絶縁破壊電界 (MV/cm)
SiC	3.25	3.0
Si	1.1	0.3

数値が大きいほど 高温動作可能

数値が大きいほど 低抵抗化に有利



*: WBG: Wide Band Gap

パワエレ(パワー半導体: WBG半導体)の課題

- WBG半導体(SiC、GaN等)の実用化が広がっているが、その優れた材料特性を十分に活かしたパワーデバイス特性がまだ実現できていない(約1/20以下)。
- デバイスとしての現象の原理理解(メカニズム解明、モデル化)や界面の物性解明・制御技術の研究開発が必要。

次々代パワーデバイスの基本 requirements 特性

- ・チャンネル移動度 μ_{ch} (100cm²/Vs以上)
- ・しきい値電圧 V_{th} (3-5V以上)
- ・しきい値変動 ΔV_{th} ($\pm 0.1V$ 以下)
- ・信頼性を同時に達成

	バルク移動度
SiC	1000cm ² /Vs
Si	1500cm ² /Vs

現状のチャンネル移動度

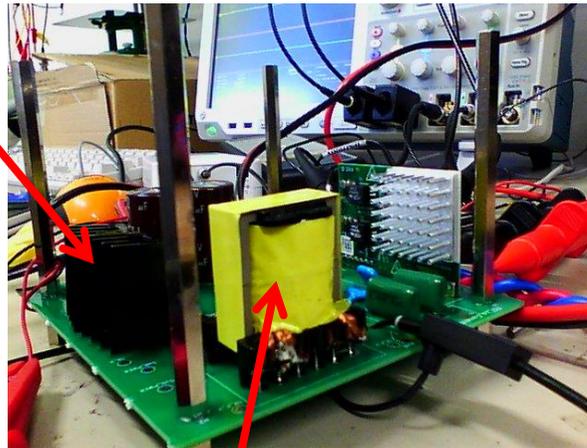
~30cm²/Vs (バルクの3%程度)
1000cm²/Vs (バルクの60%程度)

		Si	SiC	GaN	Ga ₂ O ₃	ダイヤモンド
イオン注入 [/cm ³]	n	10 ¹⁵ ~10 ²⁰	10 ¹⁵ ~10 ²⁰	10 ¹⁸ ~10 ¹⁹	10 ¹⁶ ~10 ²⁰	N/A
	p	10 ¹⁵ ~10 ²⁰	10 ¹⁵ ~10 ²⁰	5x10 ¹⁶ ~10 ¹⁹ (Mg/H共注入) (N追加注入)	1.5x10 ¹⁸ (Nイオン注入)	10 ¹⁹ ~10 ²¹
ゲート絶縁膜 チャンネル移動度 [cm ² /V·s]		熱酸化 800~1100 °C $\mu_{FE} \sim 1000$ (信頼性確保)	熱酸化 1000~1300 °C $\mu_{FE} \sim 30$ (信頼性確保)	デポ膜 Al ₂ O ₃ , AlSiO/AIN $\mu_{FE} \sim 290$	デポ膜 SiO ₂ , Al ₂ O ₃ $\mu_{FE} \sim 70$	デポ膜 Al ₂ O ₃ $\mu_{FE} \sim 40$

次世代(WBG)パワー半導体を用いたパワエレの課題

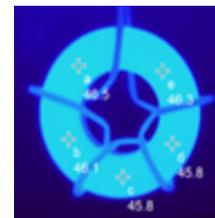
- パワー半導体の高性能化(高速化等)に十分に**対応**できる受動素子の高性能化や**パワエレ回路システム(ハブテクノロジー)**としての研究開発が不十分で、トータルとして優れた性能が十分に発揮できていない。

パワーデバイス

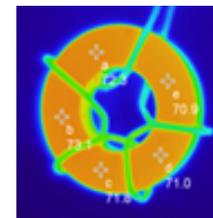


受動素子(コイル)

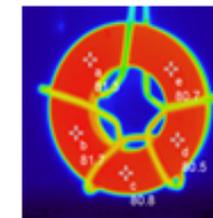
例えば、
次世代半導体による高速スイッチングでも
発熱(ロス)を抑えられる受動素子
が求められている。



300kHz



1MHz



2MHz

受動素子(コイル)における発熱

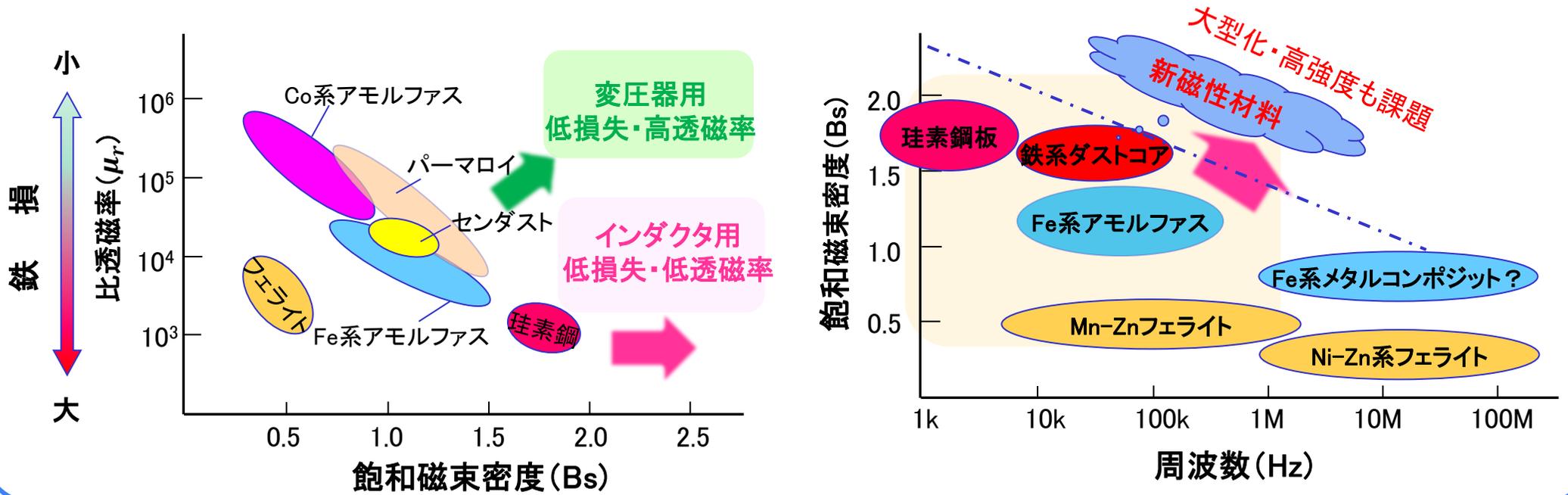
https://product.tdk.com/info/ja/products/ferrite/ferrite/ferrite-core/technote/pov_pc200.html

「出典:TDK株式会社」

- パワー半導体以外のパワエレを構成する受動素子、材料、実装技術の高性能化研究に加え、**パワエレ機器トータル**として「**まとめあげる**」ことに主軸を置いた、**統合的な研究開発**が必要。

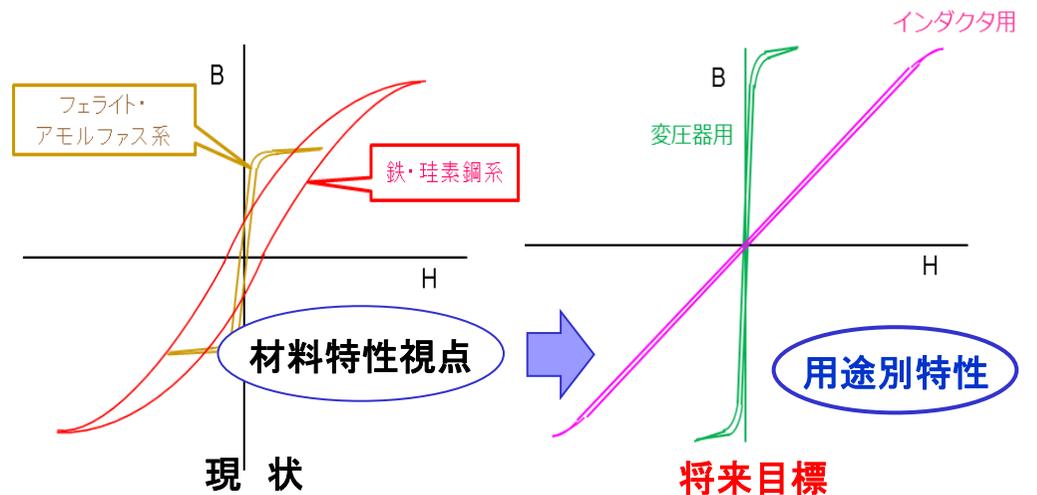
パワエレで使用される受動素子(例:磁気材料・部品の現状と課題)

軟磁性材料の磁化特性と損失の現状と将来目標



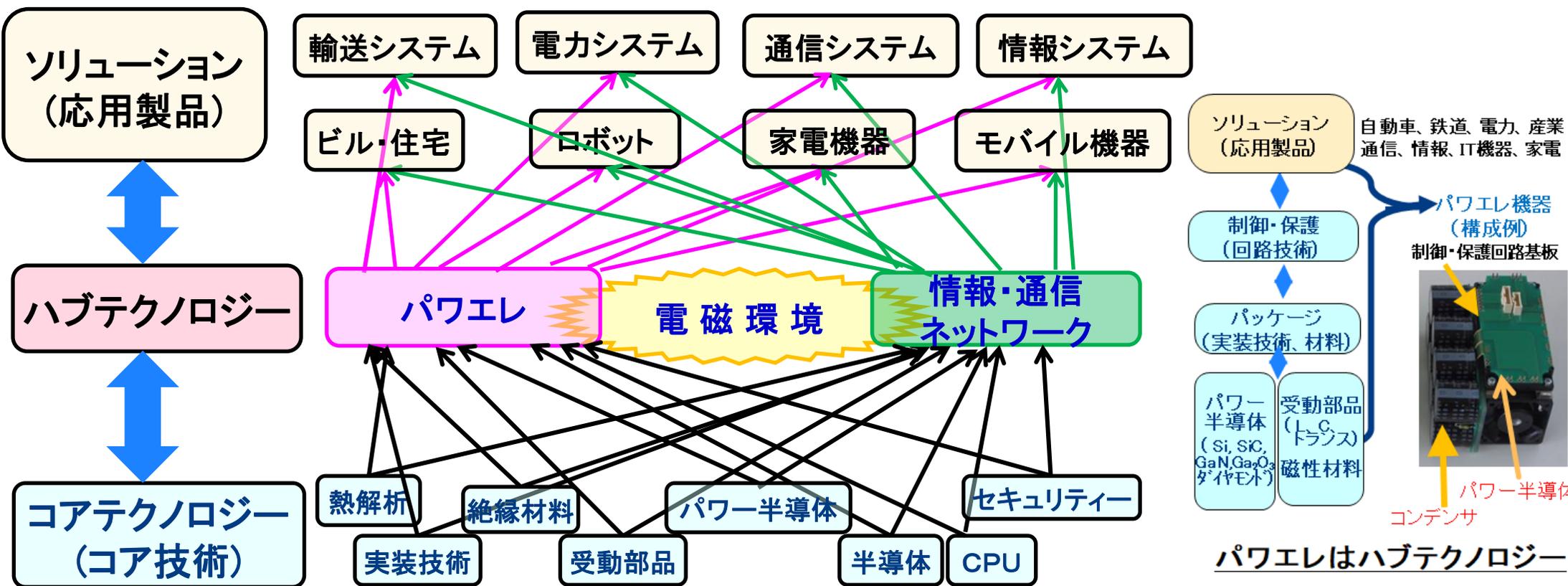
パワエレ用途に適した磁性材料の高性能化に加え学理研究加速が必要

	現状	変圧器	インダクタ
励磁電圧波形	正弦波	矩形波、正弦波、高調波	
磁界バイアス	×	なし	あり
透磁率	高	高	低
飽和磁束密度	高	高	高
損失	低	低	低
周波数	高	適用装置に依存	



パワエレ研究開発の在りかた:ハブテクノロジーとして

- 1) 世界のイノベーションは「ものづくり」から「**ことづくり**」に急速に変化
- 2) 「**地球環境問題**」と「**ことづくり**」は**一体不可分・同時進行**
- 3) 「クローズド・イノベーション」から「**オープン・イノベーション**」への移行
- 4) 「**ハブテクノロジー**」は「コアテクノロジー」と「ソリューション」を牽引
- 5) パワエレは**重要なハブテクノロジー**（**応用製品とコア技術をつなぐ研究開発**）



課題: ハブテクノロジー-学術基盤の育成と、これをスーパーバイス出来る研究者・技術者の育成

今後必要な研究開発

1. 社会に貢献する次世代半導体実現には、
半導体応用システム研究(電力処理、情報処理、AI、通信、ロボット等)に加え、
半導体デバイスとしての現象解明、材料研究、プロセス技術研究等や
応用システムと半導体デバイスをつなぐハブテクノロジー研究の強化と
システム構築に必要な部品・受動素子や、材料(磁性材料、誘電材料等)研究
や実装技術等の研究も必要不可欠である。
2. 応用製品(ソリューション)を実用化して、社会に広く受け入れられて豊かな
社会を実現するための仕組みや検証の容易化も重要である。
3. 具体的には、
材料研究、基礎研究に加え、デバイスとしての現象の原理理解や界面の
物性解明・制御技術等の高性能化研究や応用製品を構成する必須部品
(受動素子等)や関連材料(パワー用低損失軟磁性材料や超ワイドバンド
ギャップ誘電体材料等)、実装技術等の高性能化研究に加え、トータルとして
「まとめあげる」ことに主軸を置いて関連研究と連携させて、回路技術まで含め
た統合最適設計研究ならびにAIやMIを活用した『使える設計法』の研究開発等
の応用製品を見据えた研究開発も必要である。

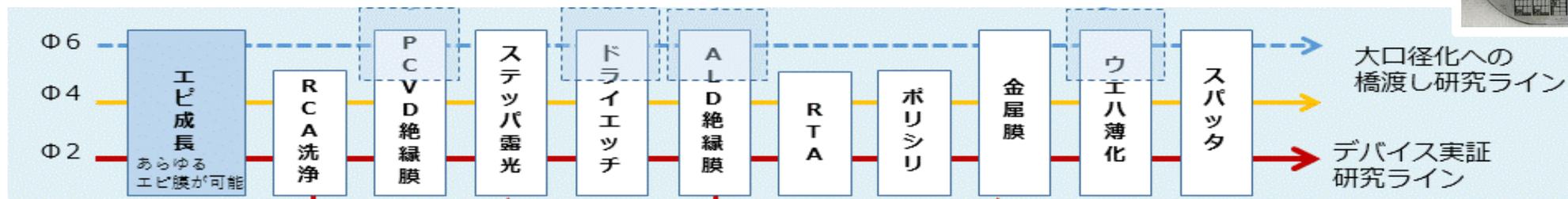
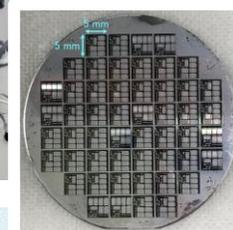
必要な施策：半導体研究ラインの維持・管理・更新・保守・性能向上

1. 次世代半導体研究を継続するには、大学等の**試作評価ライン・設備の維持・管理・更新・保守・性能向上**を継続してサポートする仕組(人、金、物)が必要。
2. 例えば、アカデミアが考えたアイデア、手法等を、手軽に具現化、試作、検証できる環境を、専門性を持つ**スタッフのサポート体制**を十分整えた上で、**アカデミアに開放**できるような体制や仕組みを構築する必要がある。
→これなくしてプロトタイプ開発、**サンプル試作**、**社会適用の検証**は難しい。

名古屋大学のWBG半導体研究の試作評価ライン(例として)

未来材料・システム研究所 (IMaSS) 文科省共同研究・共同利用拠点
エネルギー変換エレクトロニクス実験施設 (C-TEFs)

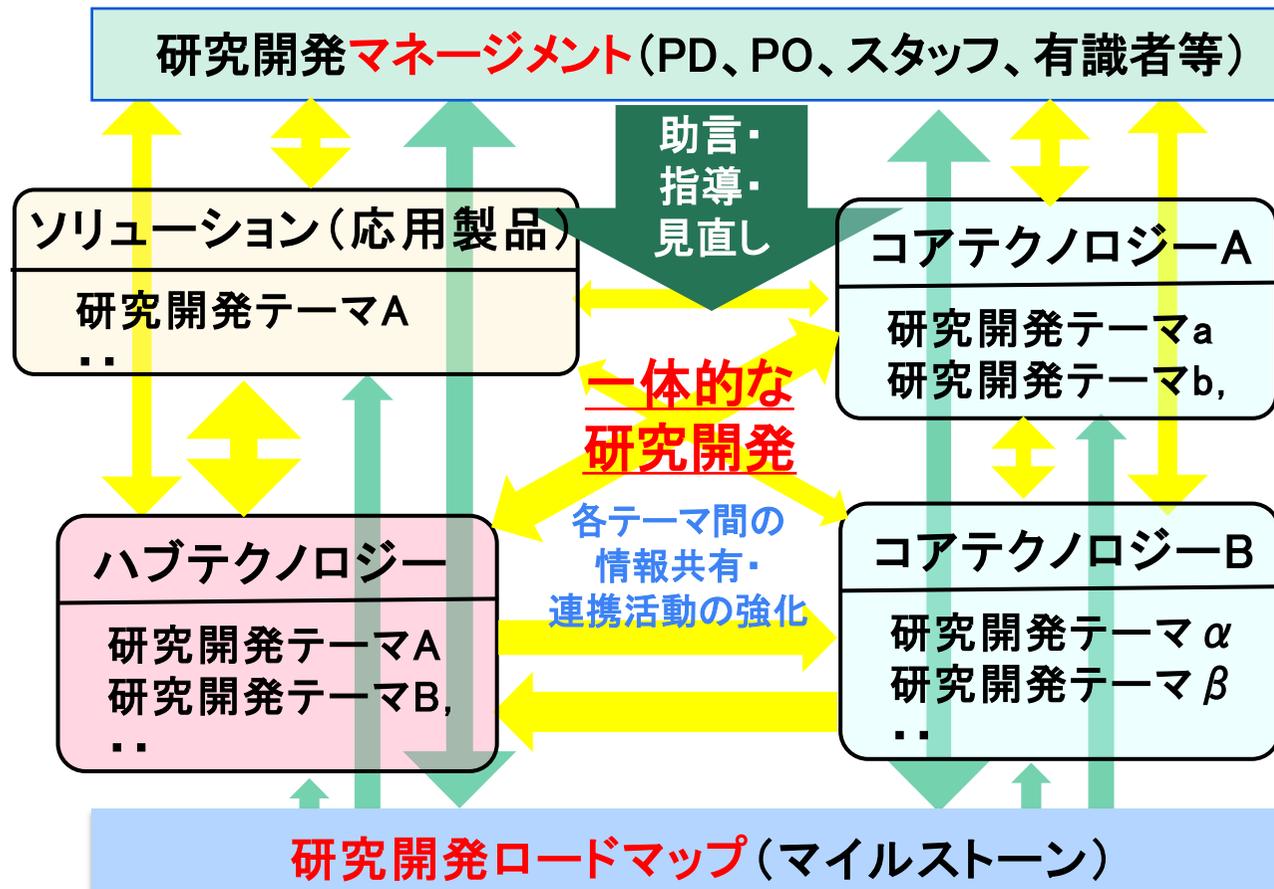
- ・面積: 1000m³のクリーンルーム
- ・GaNに特化したプロセス装置、評価装置群
- ・専従の**テクニカルスタッフ(約10名)**、基本レシピ
- ・ライン**維持費用: 約3億円** (> 利用料収入1億円)
- ・AlN, Ga₂O₃にも対応を拡大中



2インチ、4インチフルウエハに完全対応、少量試験生産にも対応可能な能力

必要な施策：研究開発ロードマップとマネージメント強化

1. 半導体研究は多くの先端的研究成果を統合化する必要があるため、**ソリューション**（応用製品）、**ハブテクノロジー**、**コアテクノロジー**（半導体等）を含めた全体の**将来ビジョン**、研究開発戦略に基づいた**研究開発ロードマップ**を構築し、このロードマップに基づいた**継続的研究投資**の実行と、研究の遂行が必要。
2. 研究開発のロードマップの**見直し**を研究遂行状況等に合わせて**適宜**、**柔軟**に行える研究開発の**マネージメント強化策**（人、金、スタッフ、体制、権限）が必要。



・PD、POと各テーマリーダー、研究者との研究内容・成果やロードマップに対する意見交換や議論により、**リーダークラス**や**若手研究者の育成**にも貢献すると思われる。

まとめ(人材育成等について)

1. 人材育成には**目標とする人材に合わせて戦略**を考える必要がある。
 - 重要な研究分野を引っ張って行く人材(**トップ人材**)育成には、半導体の**アイデア**を気楽に**検証**できる**環境**の提供が重要と思う。
(半導体研究ラインの強化とオープン化も一助になる。)
 - 良い議論ができる指導者や仲間との**深い研究議論**も重要と思う。
(国プロ等でのPD、POとの議論、指導も一助になるように改善が必要。)
 - 海外との強い交流を実現して、世界の**リーダ研究者**との**早期の関係づくり**と、研究開発の世界観の共有の議論も重要と思う。
(研究開発ロードマップと有益な研究成果を持つての議論も一助になる。)

ご清聴ありがとうございました