

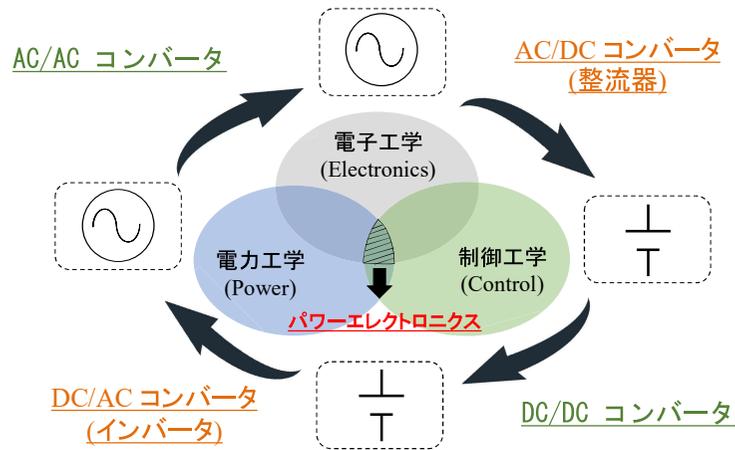
パワーエレクトロニクス機器の 高付加価値化を実現する磁気部品の応用技術

名古屋大学 未来材料・システム研究所
附属未来エレクトロニクス集積研究センター
(兼) 大学院工学研究科 電気工学専攻 今岡 淳
Email: imaoka.jun.n9@f.mail.nagoya-u.ac.jp

アジェンダ

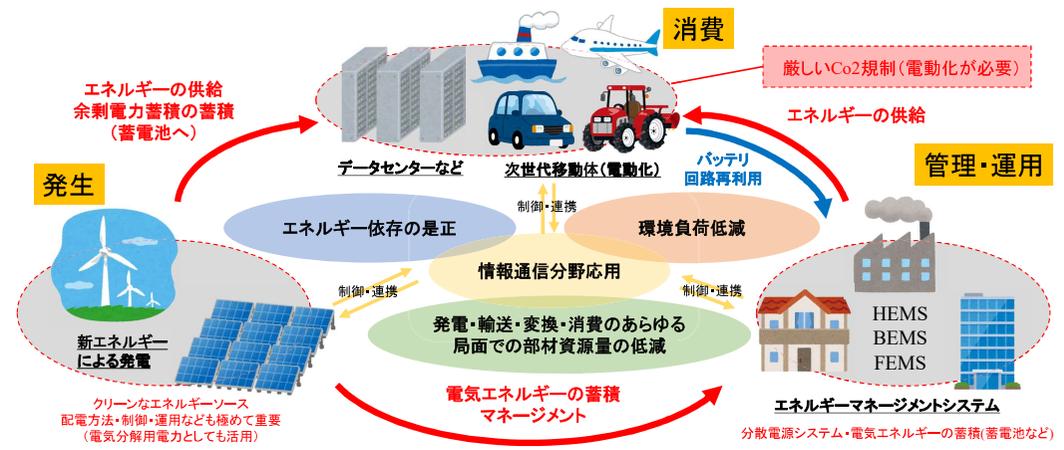
1. パワーエレクトロニクスに関する社会動向
 - パワーエレクトロニクスの基本と貢献領域
2. パワーエレクトロニクスで利用される磁性材料・磁気部品の基本
 - パワエレ回路・磁性材料・部品の基本
3. 複合物理・分野領域で拓く磁気部品の応用技術
 - フロントローディングデザイン技術(電気・磁気・構造・計算機)
 - 磁気部品の統合化(回路・磁気・材料連携領域)
 - 高周波駆動を可能とする磁気部品の高放熱化・低ノイズ化(磁気・熱)
4. まとめ

パワーエレクトロニクス



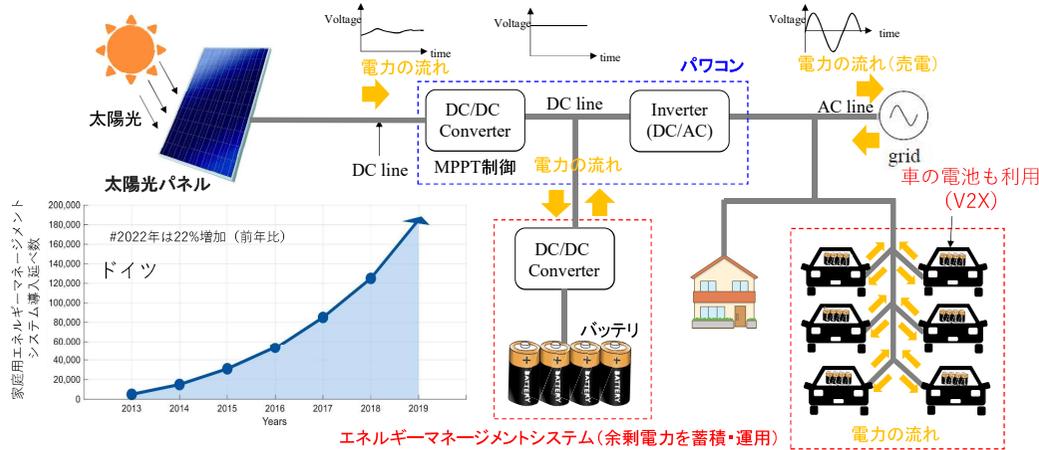
半導体を活用して電気性状(周波数・電圧・電流)を変換する技術分野

パワーエレクトロニクスの貢献領域



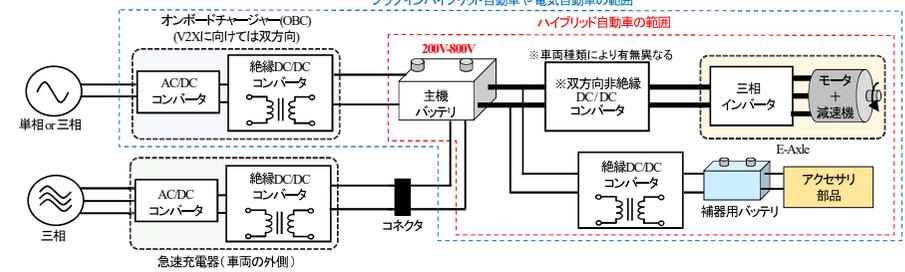
カーボンニュートラルへ向けてパワエレに対する期待値は高い
(社会実装に向けては単一業界だけでなく業界間が連携することが極めて肝要)

エネルギー管理システムの普及と車載バッテリーの活用



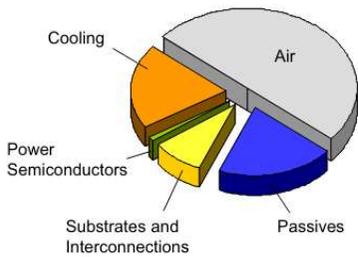
エネルギー管理システム + 電動化車両のバッテリーを活用することも重要

車の電動化(多くの選択肢)

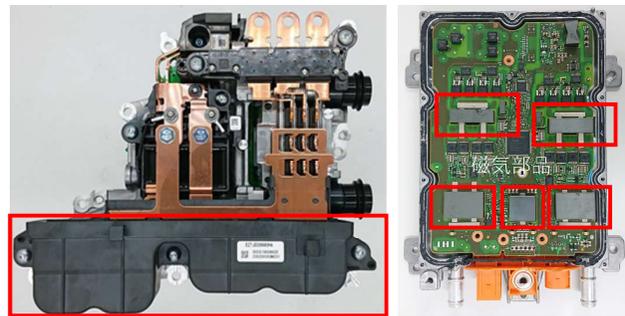


電動化 → 車両内・インフラ含めて多数の電力変換回路 + 大容量化が必要 (PE分野への要望: 高効率化・高電力密度化・省資源化などが必要)

本発表の目的



HEV/EVにおけるPE回路における体積割合



車載用インバータ (SiCを利用)

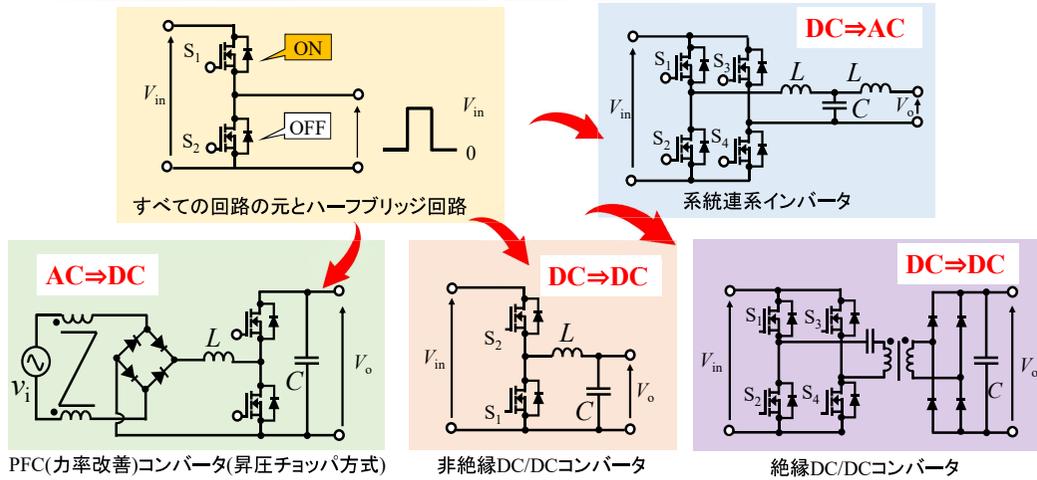
絶縁型降圧DC/DCコンバータ

アジェンダ

1. パワーエレクトロニクスに関する社会動向・技術動向 (業界俯瞰)
 - パワーエレクトロニクスの基本と貢献領域
2. パワーエレクトロニクスで利用される磁性材料・磁気部品の基本
 - パワエレ回路・磁性材料・部品の基本
3. 複合物理・分野領域で拓く磁気部品の応用技術
 - フロントローディングデザイン技術 (電気・磁気・構造・計算機)
 - 磁気部品の統合化 (回路・磁気・材料連携領域)
 - 高周波駆動を可能とする磁気部品の高放熱化・低ノイズ化 (磁気・熱)
4. まとめ

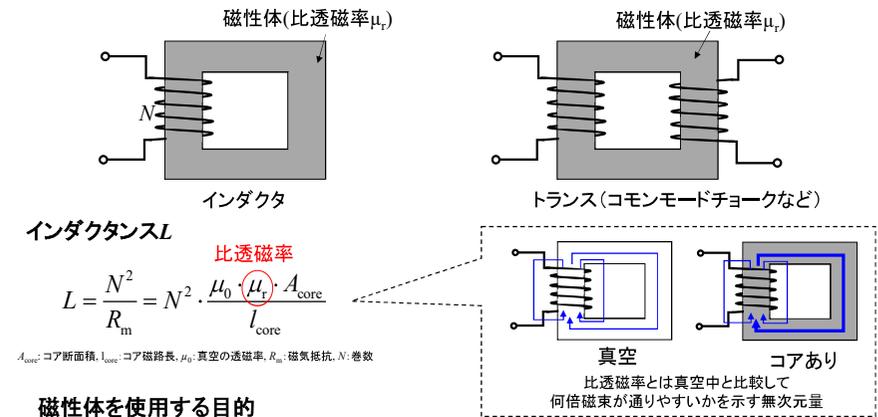
電源装置には数多くの受動素子が利用される (回路の占有割合は2-4割程度)
 本発表の目的: 磁気系部品におけるフロントローディング技術および応用技術の紹介

パワーエレクトロニクス回路の基本的な回路構成



磁気部品はパワエレ回路の中でも基本かつ重要な部品(機器の価値差別化は磁気部品?)

電力変換器用磁気デバイスで磁性体を使用する目的



磁性体を使用する目的

- 空芯より少ない巻数で所望のインダクタンスを得るため
- 銅損を減らすため(空芯であれば巻き数は増大で損失も増加)
- 漏洩する磁界を防ぐため(近接した回路を実現するため)

電力変換回路で使用される磁性材料の種類

	フェライト(焼結)コア	粉末コア	積層コア
外観			
製造	焼結	粉末・加圧	積層
飽和磁束密度	300~500mT	~2T	~2T
比透磁率	~10000(高いもので)	1~200	~100000
キュリー温度	< 300°C	< 399°C ~ 700°C (金属組成による)	< 399°C ~ 700°C (金属組成による)
応用先	・高周波変換器用 ・インダクタ・トランス ・ノイズフィルタなど	・直流用インダクタなど	一般市販品は商用周波数から数kHz ~数十kHzの変圧器 広帯域のノイズフィルタなど
特徴	・鉄損低い ・駆動可能温度範囲が狭い (車載用85°C(AEC基準))	・ソフトサチュレーション ・ギャップレス化が可能 ・透磁率が低い(対他コア)	・高飽和磁束密度(磁性材料) ・ギャップ挿入時の対策が必要

電力変換回路で使用される磁性材料の種類(一部抜粋)

構造	フェライト				粉末コア				積層コア		
	Mn-Zn	Mn-Zn	Mn-Zn	Ni-Zn	Fe-Si-B	Fe-Si-Al	Fe	Fe-Si	Fe-Si-B-Cu-Nb	Fe-Si-B	Fe-Si
組成	Mn-Zn	Mn-Zn	Mn-Zn	Ni-Zn	Fe-Si-B	Fe-Si-Al	Fe	Fe-Si	Fe-Si-B-Cu-Nb	Fe-Si-B	Fe-Si
比透磁率 μ_r	2300	800	900	290	60	60	60	60	16000	45000@DC	4100@DC
キュリー温度 T_c	>220°C	>280°C	280°C	>150°C	395°C	500°C	-	700°C	570°C	399°C	700°C
鉄損 $P_{\text{鉄}}$ (@20kHz, 100mT)	-	-	-	-	108 kW/m ³	44 kW/m ³	725 kW/m ³	201 kW/m ³	2.2 kW/m ³ FF-3に印刷されている 密度7.8kg/cm ³ より換 算	35.4 kW/m ³ 密度7.8kg/cm ³ より換 算	150 kW/m ³ 7.5kg/cm ³ 密度より換 算
鉄損 $P_{\text{鉄}}$ (@100kHz, 100mT)	60 kW/m ³ (@100°C)	-	-	1000 kW/m ³ (@25°C)	646 kW/m ³	530 kW/m ³	6103 kW/m ³	1464 kW/m ³	36.5 kW/m ³ 密度7.8kg/cm ³ より換 算	1107 kW/m ³ 密度7.8kg/cm ³ より換 算	1957 kW/m ³ 7.5kg/cm ³ 密度より換 算
鉄損 $P_{\text{鉄}}$ (@1MHz, 50mT)	-	180 kW/m ³ (@100°C)	134 kW/m ³ (@100°C)	3700 kW/m ³ (@25°C)	-	-	-	-	-	-	-
飽和磁束密度 B_{sat} [mT]	470mT (@25°C)	480mT (@25°C)	530mT (@23°C)	330mT	1500mT	1050mT	1760mT	1600mT	1230mT	1560mT	1880mT
鉄損データ 記載範囲	25kHz~ 200kHz	700kHz~3 MHz	500kHz~ 3MHz	100kHz~ 5MHz	25kHz~ 200kHz	5kHz~ 300kHz	60Hz~ 500kHz	5kHz~ 300kHz	1kHz~ 100kHz	60Hz~ 100kHz	50Hz~ 100kHz
構造	-				-				14μmの磁性箔	25μmの 磁性箔	100μmの 磁性箔
用途	高周波インダクタ、トランス、 ノイズフィルタなど				直流通電流が重畳するPFCコンバータや 非絶縁/絶縁DC/DCコンバータのインダクタなど				低周波から中周波での大容量トランス 広帯域でのフィルタなど		

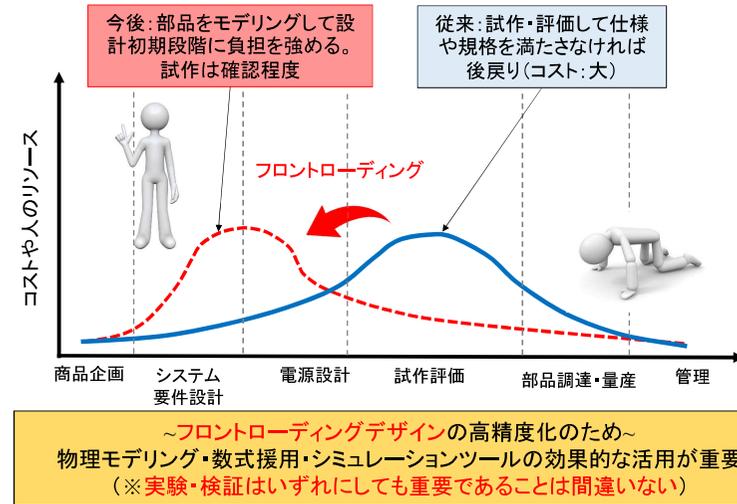
応用や動作周波数・バイアス条件より材料を選定

アジェンダ

1. パワーエレクトロニクスに関する社会動向・技術動向(業界俯瞰)
 - パワーエレクトロニクスの基本と貢献領域
2. パワーエレクトロニクスで利用される磁性材料・磁気部品の基本
 - パワエレ回路・磁性材料・部品の基本
3. 複合物理・分野領域で拓く磁気部品の応用技術
 - フロントローディングデザイン技術(電気・磁気・構造・計算機技術)
 - 磁気部品の統合化(回路・磁気・材料連携領域)
 - 高周波駆動を可能とする磁気部品の高放熱化・低ノイズ化(磁気・熱)
4. まとめ

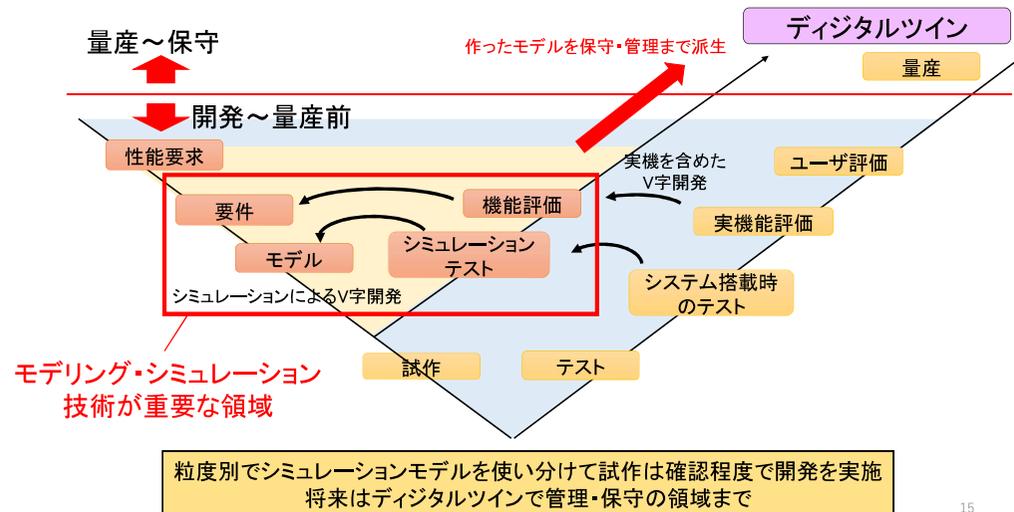
13

開発領域における変化



14

開発フローとその未来



15

パワーエレクトロニクスに求められるCAEの現状 -解析ツール-

	物理モデル	数式(等価回路)モデル	理想スイッチモデル
図			
例	Maxwell(電磁場), HFSS(電磁場) Q3D(寄生パラメータ), TCAD(半導体)など	Twin builder, LT SPICE, Q SPICEなど	Twin builder, PLECS, Scideamなど
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 材料物性情報(透磁率や損失, キャリア移動度など)によるモデル 構造情報(縦・横・長さ)によるモデル 素子エンジニア用 	<ul style="list-style-type: none"> 理論式に基づいたあるいはフィテイングもしくは経験則に基づく 回路設計者向け 	<ul style="list-style-type: none"> スイッチング時の電圧電流値により与えられたテーブルまたは数式で表現
利点	<ul style="list-style-type: none"> 物理的定数、寸法を用いることでデバイス開発へ寄与 	<ul style="list-style-type: none"> 粒度の細かいモデルを作成することが可能 	<ul style="list-style-type: none"> 高速計算でシステムシミュレーション向け 1時間などの短応答を推定に対応可能
欠点	<ul style="list-style-type: none"> デバイスの物理的定数が必要 システムシミュレーションへは計算時間の面で厳しい 	<ul style="list-style-type: none"> 出来上がったデバイスに対して数式によるモデルを作成するのでデバイス側へのフィードバックは困難 システムシミュレーションへは計算時間の面で厳しい 	<ul style="list-style-type: none"> 詳細な回路の詳細な動作解析(サージ、dv/dt, di/dtなどを含む)には不適

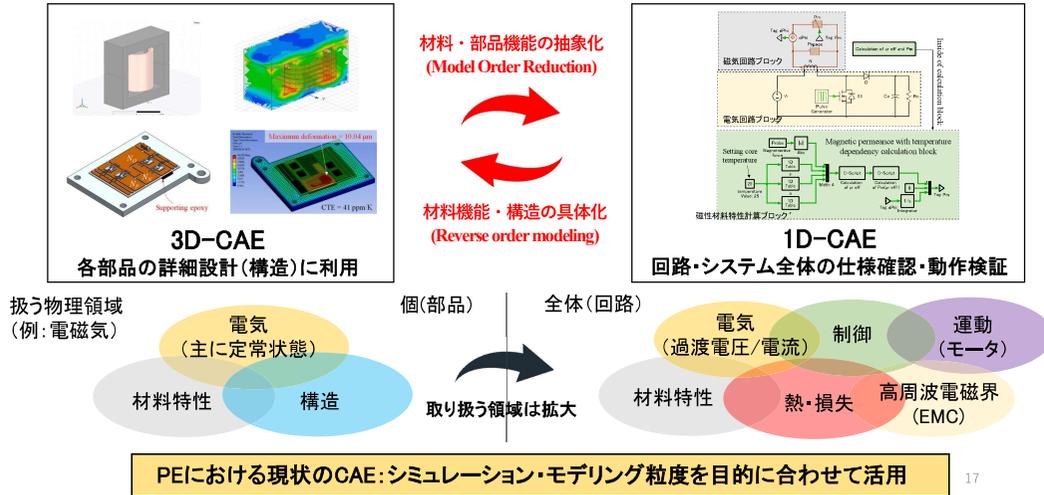
デバイスより(個・単一分野) 回路側 システムより(複合分野)

現状:システム全体のフロントローディングに向けては各ツールを使い分けることで対応

16

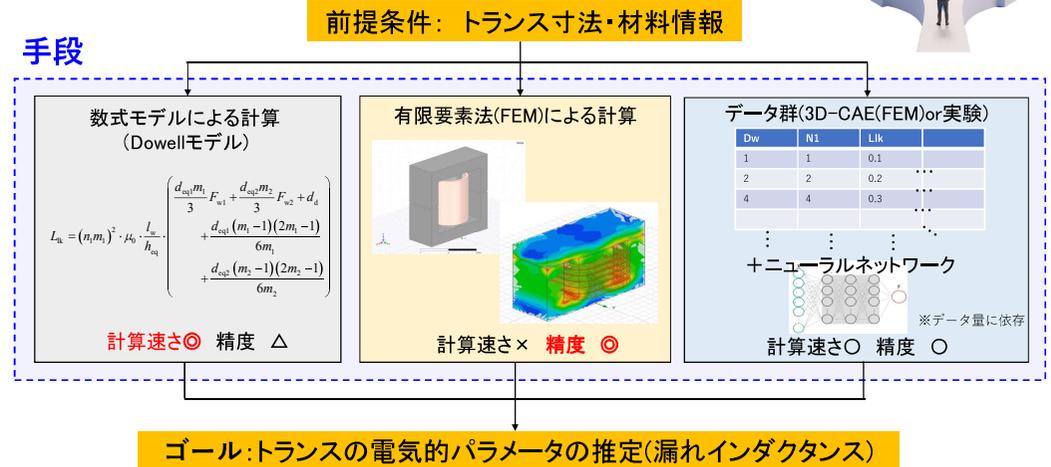
パワーエレクトロニクスに求められるCAEの現状 -モデルの粒度-

■パワーエレクトロニクス回路で使用される磁気部品の例



17

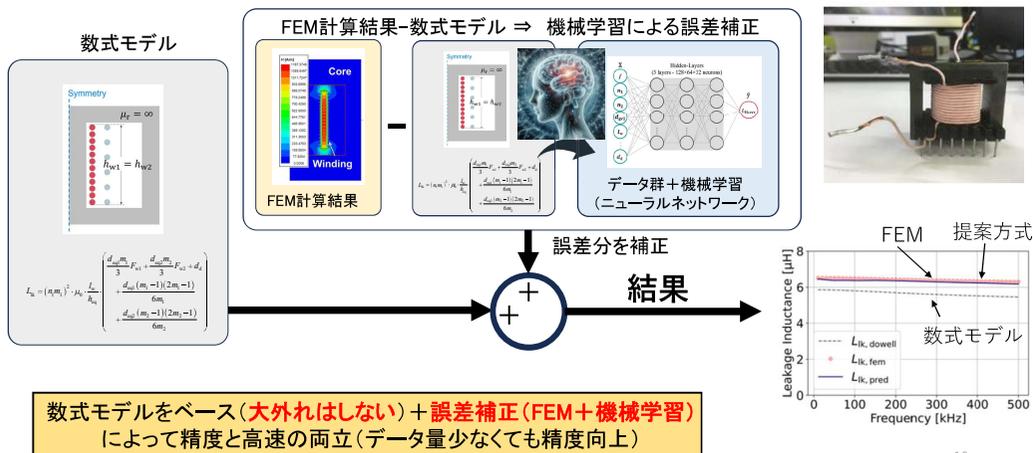
最近の研究例の紹介 -構造から部品のパラメータ推定まで-



18

最近の研究例の紹介 -数式-FEM-機械学習の組み合わせ-

提案: 理論(数式) + 誤差補正(FEMシミュレーション結果 + 機械学習の組み合わせ)



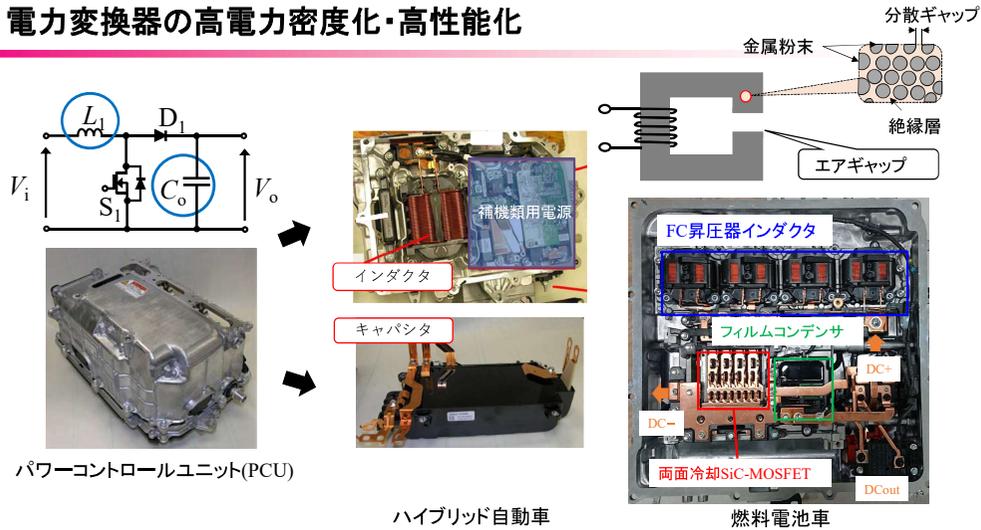
19

アジェンダ

1. パワーエレクトロニクスに関する社会動向・技術動向(業界俯瞰)
 - パワーエレクトロニクスの基本と貢献領域
2. パワーエレクトロニクスで利用される磁性材料・磁気部品の基本
 - パワエレ回路・磁性材料・部品の基本
3. 複合物理・分野領域で拓く磁気部品の応用技術
 - フロントローディングデザイン技術(電気・磁気・構造・計算機)
 - 磁気部品の統合化(回路・磁気・材料連携領域)
 - 高周波駆動を可能とする磁気部品の高放熱化・低ノイズ化(磁気・熱)
4. まとめ

20

電力変換器の高電力密度化・高性能化



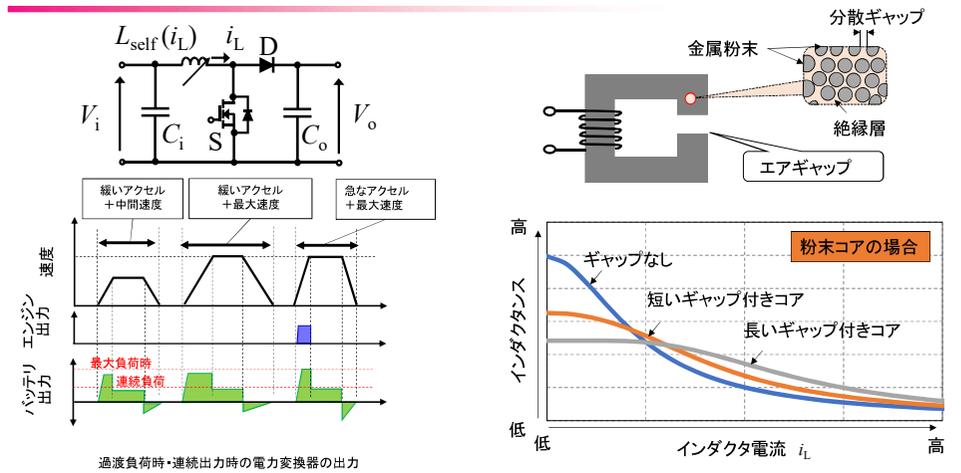
パワーコントロールユニット(PCU)

ハイブリッド自動車

燃料電池車

インダクタ・キャパシタが体積・重量の3~4割を占有！ → 高電力密度化が必要

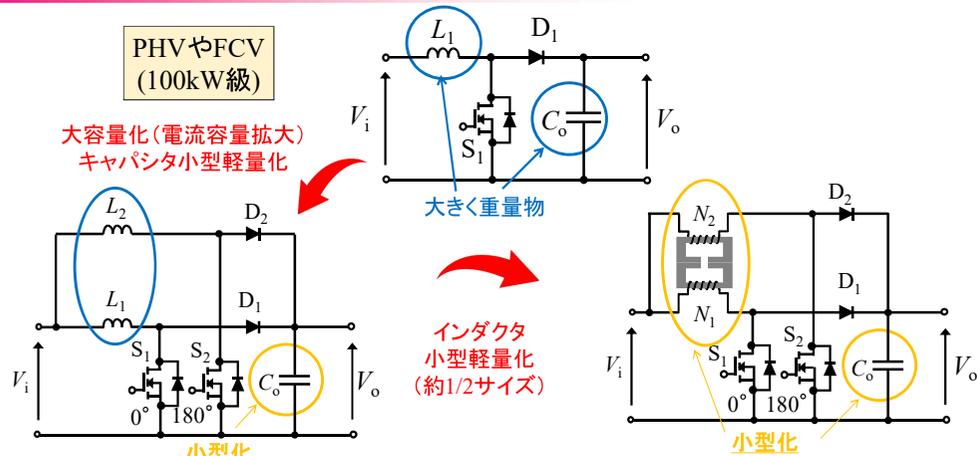
電動化車両の中身(HV, PHV, FCV)



過渡負荷時・連続出力時の電力変換器の出力

エアギャップ挿入の目的: 高電流状態でも高いインダクタンスを維持するように設計 (半導体での損失・過渡な発熱も低減させるため)

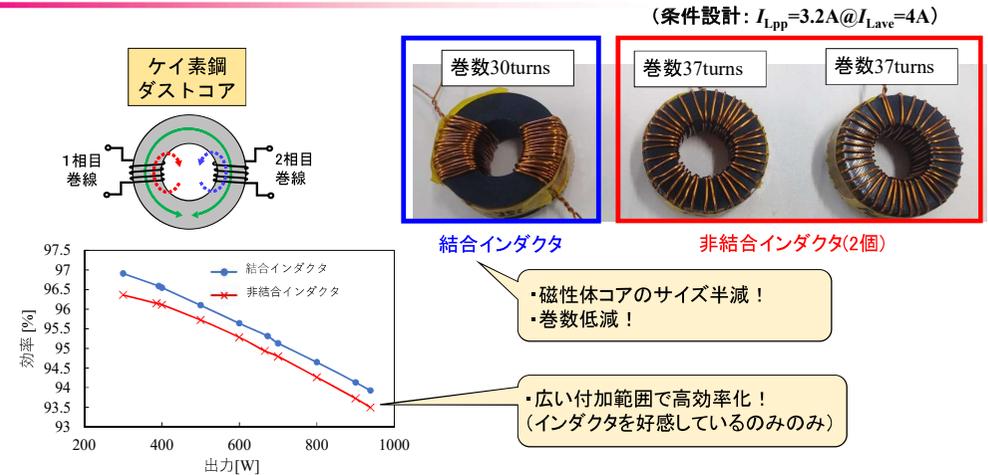
多相化と磁気部品の統合化(結合インダクタの適用)



磁気部品の応用設計を実施することで高電力密度化

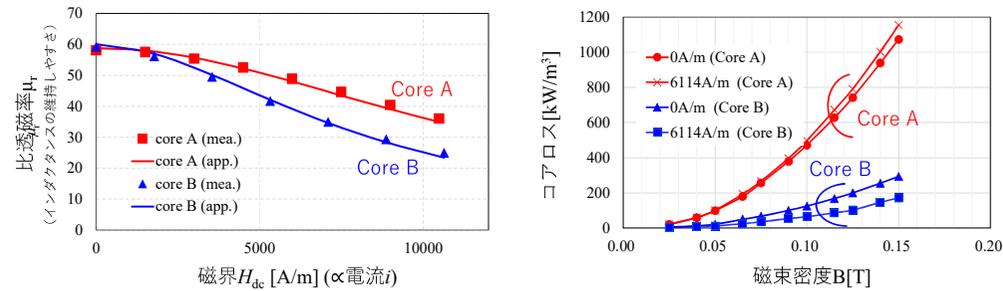
MHEV, HEV, PHEV, EV, FCVで既に実用化

結合インダクタの利点 (評価結果)



小型軽量・効率向上 (どんな磁性材料がいいのか?)

粉末コアの特性 (比透磁率・鉄損特性)



磁性材料の相反事項

トレードオフ

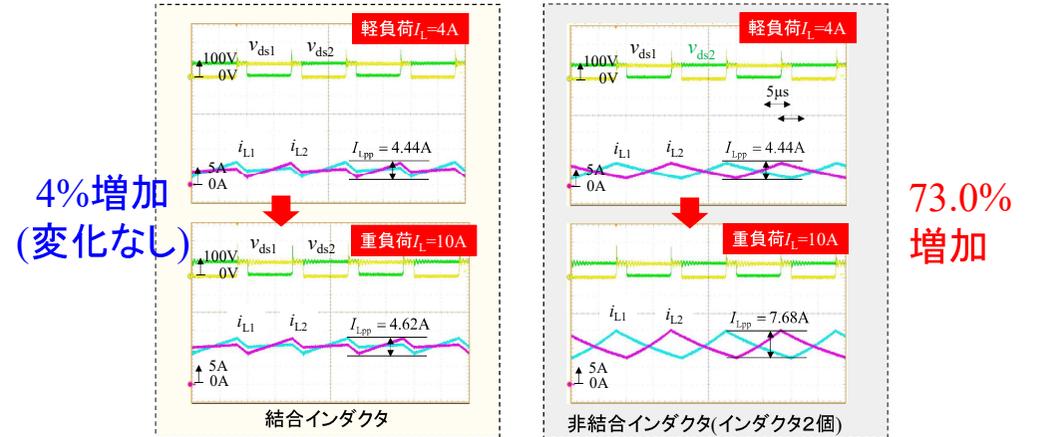
- ☺ コアA: インダクタンス低下しにくい
- ☹ コアA: 鉄損が増加
- ☹ コアB: インダクタンス低下しやすい
- ☺ コアB: 鉄損 (損失) 低減可能

全てを満たす材料はない? 材料特性を使う側が把握することが大切
 コアB: 低鉄損が魅力! では、高電流時のインダクタンス改善はできない?

25

多相化と磁気部品の統合化(結合インダクタの適用)

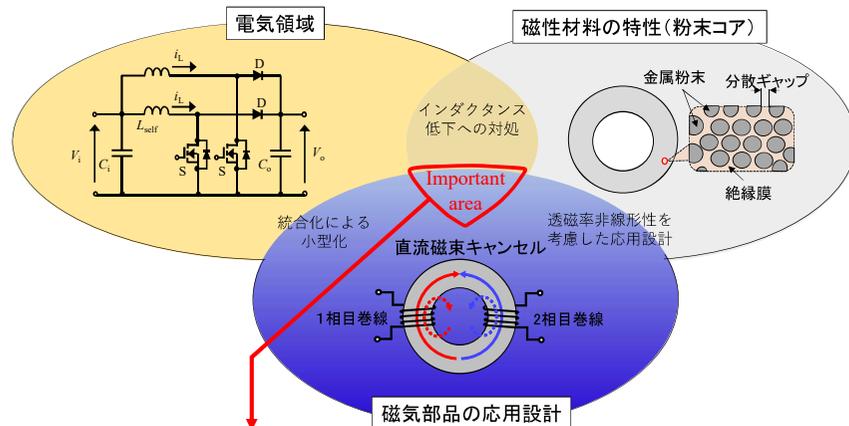
※低鉄損低Bs材 (センダストコアの場合: 低Bsのためインダクタンスが低下しやすい材料)



結合インダクタを適用することでインダクタンスの低下を大きく抑制することが可能

26

材料・磁気素子・回路領域からの改善



磁性材料 ⇒ 素子(構造) ⇒ 回路など様々な要素が連動
 (材料の苦手な領域については別の次元(回路・磁気設計)からカバーすることが可能)

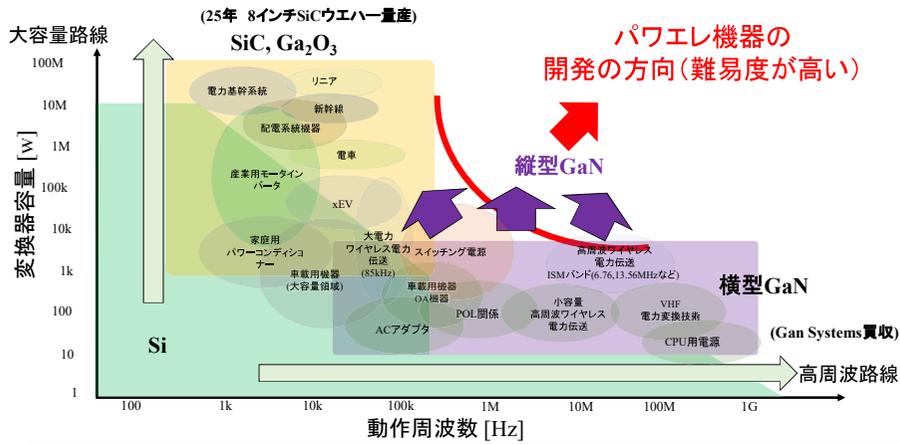
27

アジェンダ

1. パワーエレクトロニクスに関する社会動向・技術動向 (業界俯瞰)
 - パワーエレクトロニクスの基本と貢献領域
2. パワーエレクトロニクスで利用される磁性材料・磁気部品の基本
 - パワエレ回路・磁性材料・部品の基本
3. 複合物理・分野領域で拓く磁気部品の応用技術
 - フロントローディングデザイン技術 (電気・磁気・構造・計算機)
 - 磁気部品の統合化 (回路・磁気・材料連携領域)
 - 高周波駆動を可能とする磁気部品の高放熱化・低ノイズ化 (磁気・熱)
4. まとめ

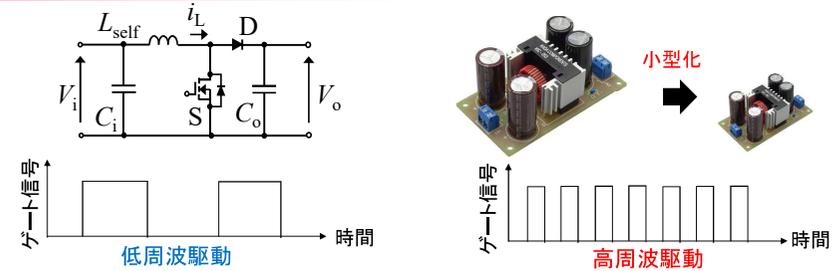
28

化合物半導体デバイスとその応用領域



化合物半導体: Si系デバイスと比較すると高周波 or 大容量領域で進展
半導体応用側から見た時の課題は? → 「熱」と「ノイズ」も重要な課題

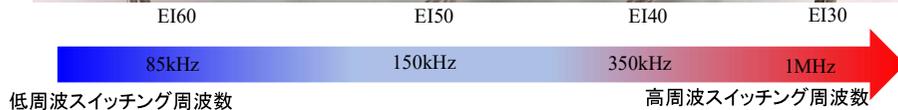
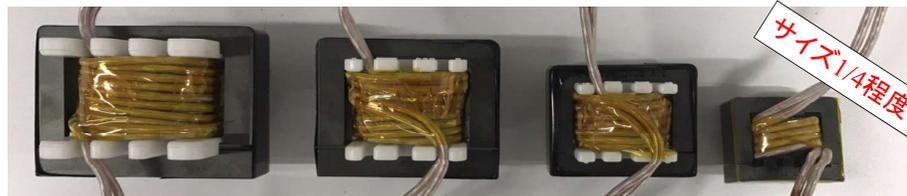
高周波動作の恩恵と弊害(1kWクラスでの課題)



入力電圧	V_i	100 V
出力電圧	V_o	200V
スイッチング周波数	f_s	85kHz, 150kHz, 350kHz, 1MHz
デューティ比	d	0.5
インダクタ平均電流	I_{Lave}	10A
インダクタリプル電流	I_{Lpp}	15A(@ $I_{Lave}=5A$)
最大磁束密度(直流+交流/2の磁束密度)	B_{max}	0.175T

インダクタの外観と試作器

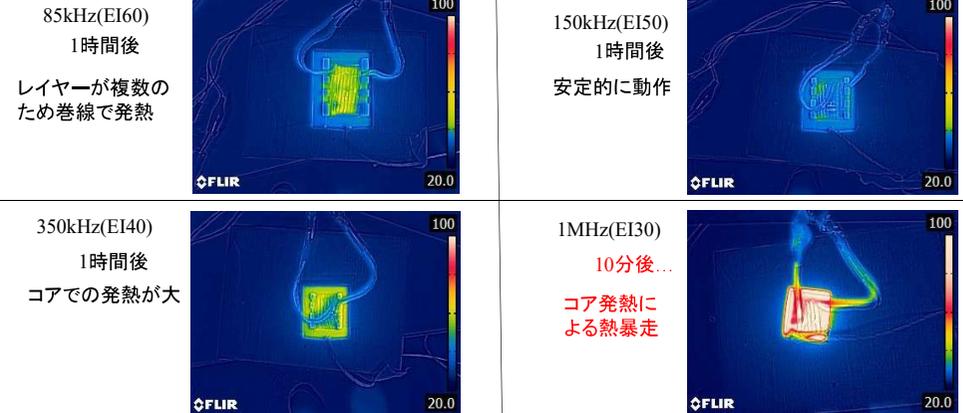
磁性材料	Mn-Zn フェライト			
サイズ	EI60	EI50	EI40	EI30
巻数[turns]	14	9	6	3
測定したインダクタンス [H]	38.4μH	23.1μH	10.33μH	2.9μH
エアギャップ長 [mm]	1.75mm	0.85mm	0.5mm	0.35mm



高周波動作により大幅に小型軽量化実現:ただし、温度上昇が大きな課題

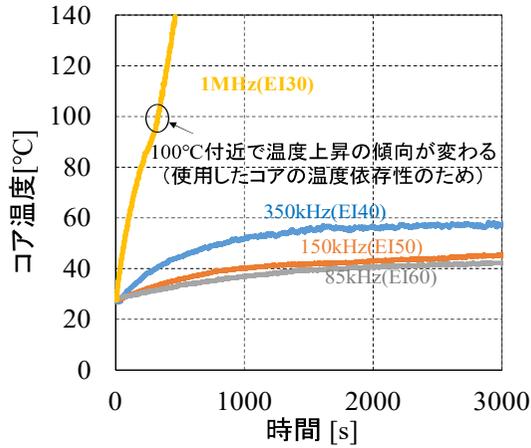
発熱評価(室温から連続通電時、自然空冷)

※昇圧コンバータで評価: 入力電圧100V, 出力電圧200V, 出力電力1kW



駆動周波数が上昇していくにつれてコアの温度上昇が露見

実験評価結果(熱評価)

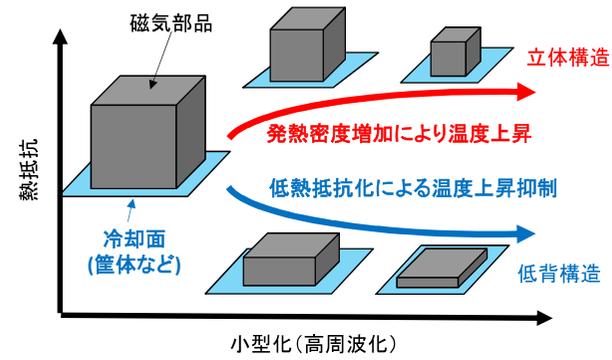


高周波動作⇒コア温度上昇に伴い過剰な発熱(温度上昇抑制が必要！)

33

磁気部品の冷却化技術(半導体以外も)

電動化⇒求められる電力容量増加(サイズは小さく)

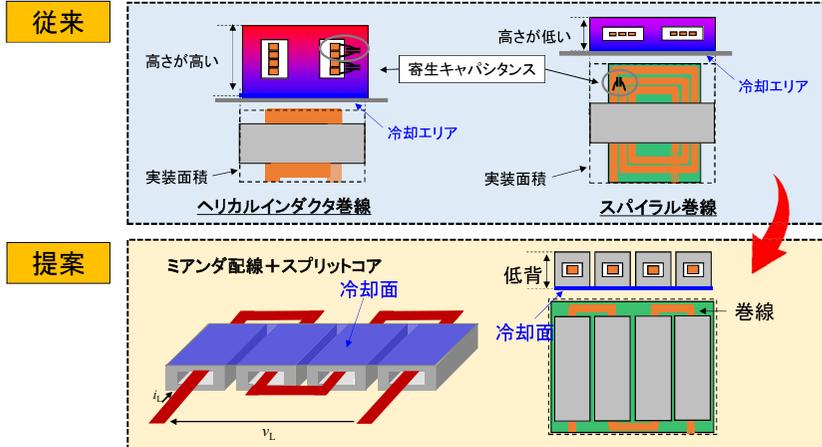


冷却面(筐体)

磁気部品の構造的な工夫により放熱性を高めることも重要

34

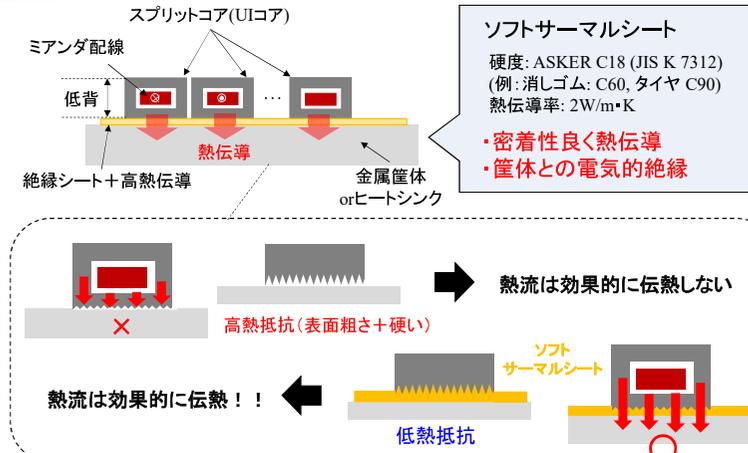
提案インダクタ構造+実装技術(高放熱化)



コアの表面積を拡大・巻線もコアを通して面で冷却

35

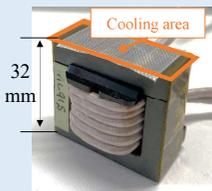
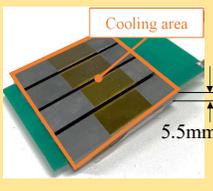
提案インダクタ構造+実装技術(高放熱化)



ソフトサーマルシートを利用することで効果的に熱伝導・容易な実装!!

36

試作結果(磁性体コアの体積を統一)

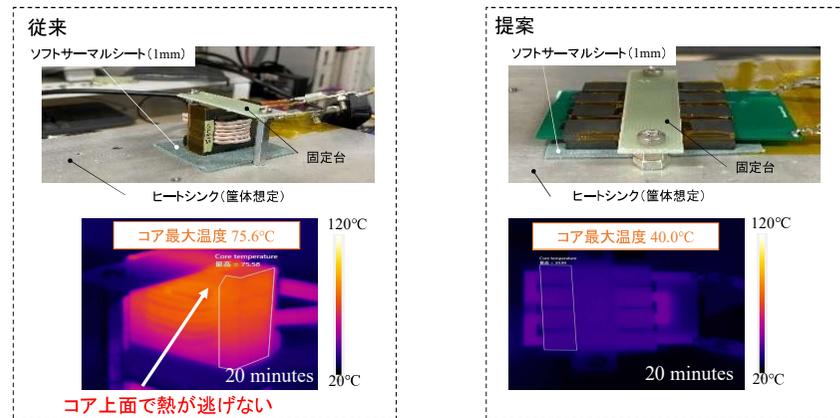
Mn-Zn ferrite (PROTERIAL ML91S for MHz applications)		
磁性材料	Mn-Zn ferrite (PROTERIAL ML91S for MHz applications)	
インダクタ構造	従来インダクタ構造 (EI30コア)	提案構造
試作器		
コア体積 Vol_{core}	6440 mm ³	6440 mm ³
コアの断面積 A_{total}	111 mm ²	333 mm ²
コア磁路長 l_{core}	58.0 mm	19.3 mm
巻数 N	3 turns (2 parallel winding)	1 turn
最大磁束密度 B_{max}	0.175 T	0.175 T
コア合計冷却エリア $A_{cooling}$	321 mm ²	1280 mm ²

コアの冷却エリア: 4倍に増加

37

実験結果(連続通電・コア温度上昇飽和時の結果)

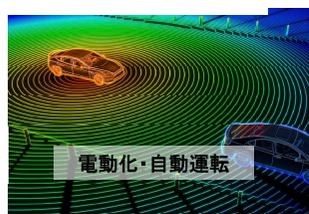
※昇圧コンバータで評価: 入力電圧100V, 出力電圧200V, 出力電力1kW, スイッチング周波数1MHz



提案インダクタは温度上昇せず(部品も冷やす時代・実装も大事)
⇒高周波駆動により部品の発熱で回路性能が律速した場合の制約を解放

38

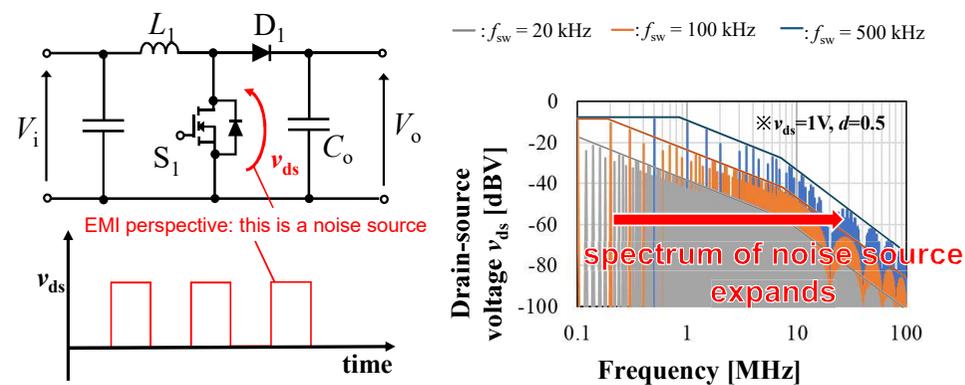
ノイズ対策(EMI対策)の重要性



より安全で安心な社会を実現するためには、高度なEMI対策が重要
要求: 高効率・高電力密度・高EMC性能

39

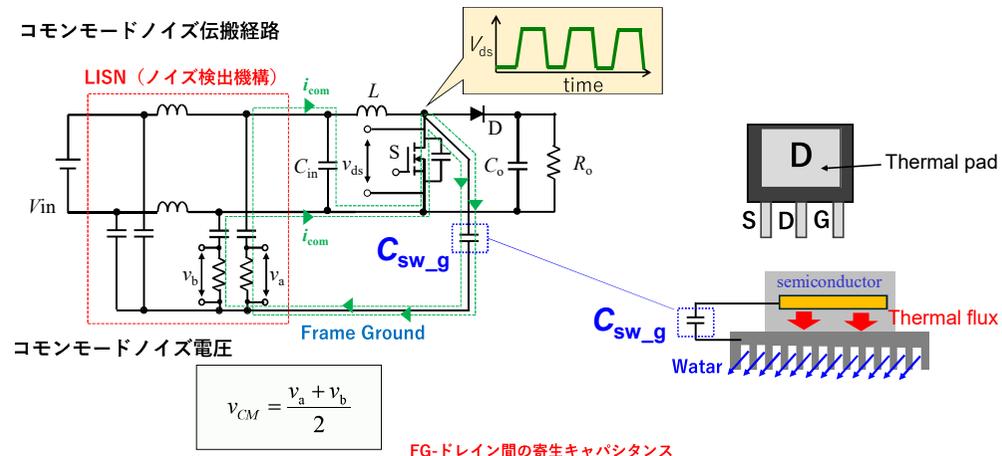
ノイズ(エミッション)の種類



☹️ パワー半導体デバイスの高周波駆動はスペクトルの高周波域への拡大

40

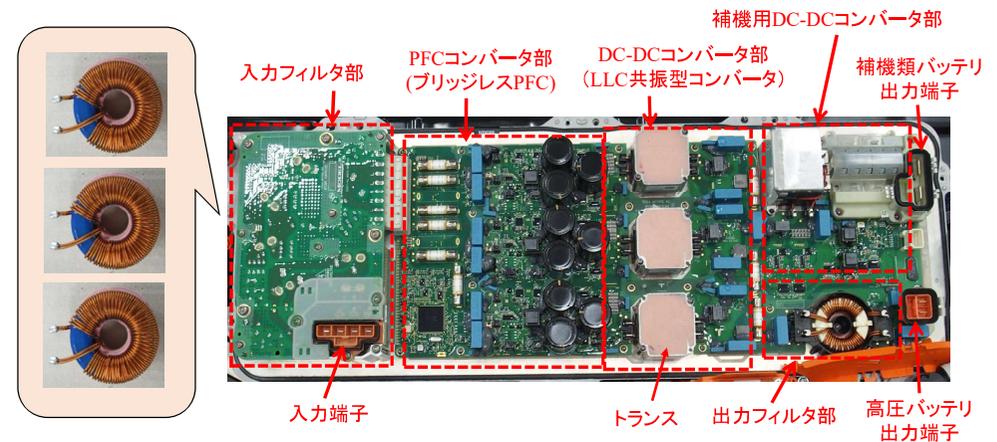
コモンモードノイズ(銅線間を伝搬するノイズ) 昇圧コンバータを例として



スイッチング周波数の高周波化⇒ノイズが高周波対帯域にシフト(要対策)
CISPR等で制定されたノイズ規格を満たさなければ製品化不可能

41

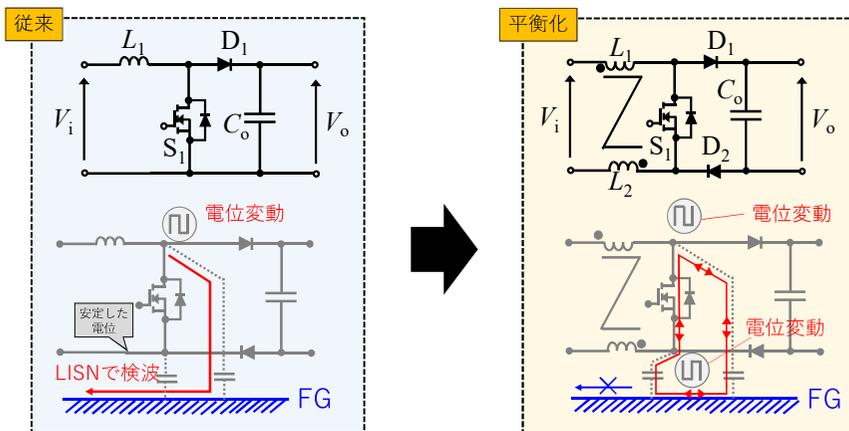
実際に搭載されている車載用充電器



ノイズを抑制するため数多くのノイズフィルタを搭載することは
 電力密度を上げにくい...

42

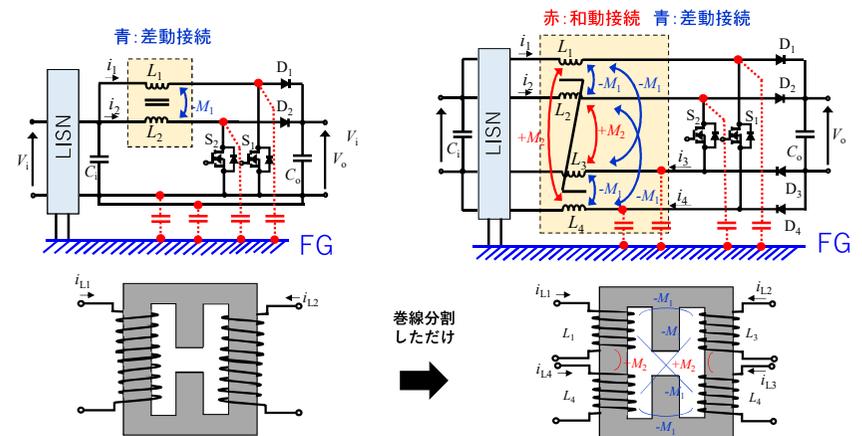
変換器内部でのフィルタ: 回路平衡化技術



M. Shoyama, Ge Li and T. Ninomiya, "Balanced switching converter to reduce common-mode conducted noise," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 6, pp. 1095-1099, Dec. 2003.

43

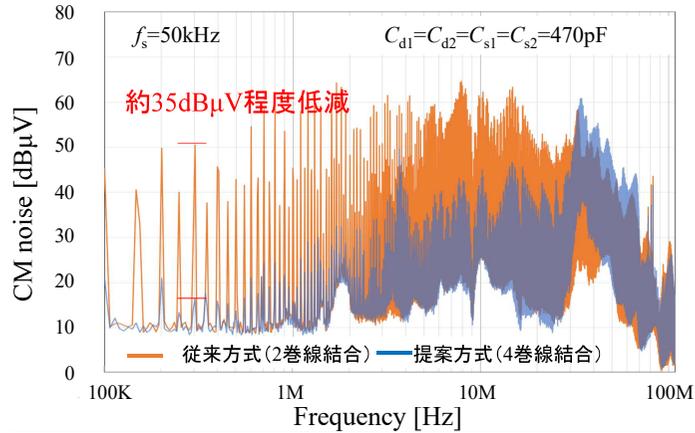
ノイズ低減技術(マルチフェーズコンバータ+結合インダクタ)



大容量化+小型軽量化+ノイズ低減の付加価値を付与

Tomotaka Nagai, Mamoru Sasaki, Jun Imaka, Masayoshi Yamamoto, Akira Nakano, "Balanced Two-phase Interleaved Boost Converter with Integrated Magnetics for Common-Mode Noise Reduction," *IEEE Journal of Industry Applications*, 2023, vol. 12, no. 4, pp. 664-676.

変換器内部でのフィルタ: ノイズ低減効果(小型化と低ノイズ化)



ノイズ低減技術を適用した結合インダクタ搭載で付加価値創出

Tomotaka Nagai, Mamoru Sasaki, Jun Imaoka, Masayoshi Yamamoto, Akira Nakano, "Balanced Two-phase Interleaved Boost Converter with Integrated Magnetics for Common-Mode Noise Reduction," IEEJ Journal of Industry Applications, 2023, vol. 12, no. 4, pp. 654-675.

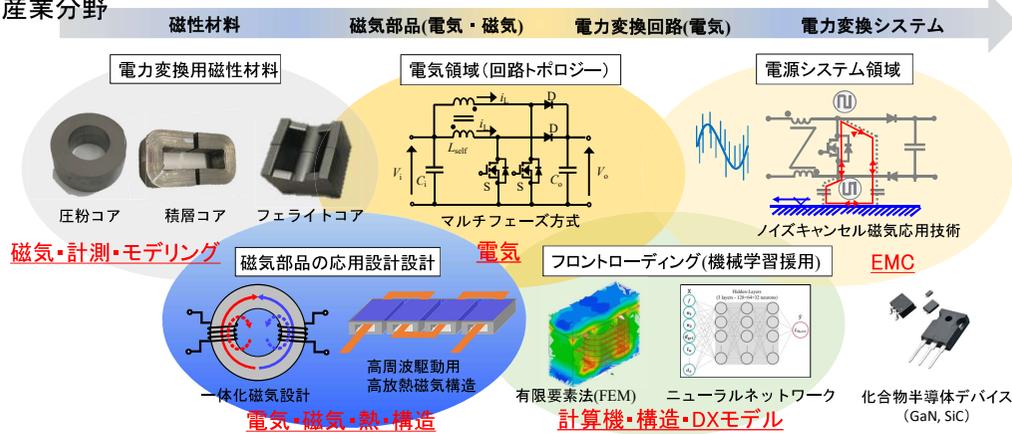
アジェンダ

1. パワーエレクトロニクスに関する社会動向・技術動向(業界俯瞰)
 - パワーエレクトロニクスの基本と貢献領域
2. パワーエレクトロニクスで利用される磁性材料・磁気部品の基本
 - パワエレ回路・磁性材料・部品の基本
3. 複合物理・分野領域で拓く磁気部品の応用技術
 - フロントローディングデザイン技術(電気・磁気・構造・計算機)
 - 磁気部品の統合化(回路・磁気・材料連携領域)
 - 高周波駆動を可能とする磁気部品の高放熱化・低ノイズ化(磁気・熱)
4. まとめ

46

まとめ

産業分野



磁気系部品がパワエレに対して貢献できる領域は極めて幅広い

47