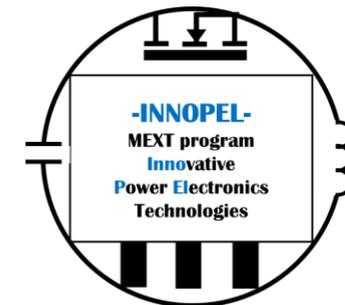


革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業

Innovative Power Electronics Technologies (INNOPEL)



文部科学省



## 磁気異方性軟磁性材料を用いた高周波・電力変換用 トランス・インダクタの開発

日時： 2026年1月28日(水) 10:00-10:20

水野 勉<sup>※1</sup>、佐藤 敏郎<sup>※1</sup>、宮地 幸祐<sup>※1</sup>、舟木 剛<sup>※2</sup>、  
井瀧 貴章<sup>※2</sup>、福永 崇平<sup>※2</sup>、曾根原 誠<sup>※1</sup>、佐藤 光秀<sup>※1</sup>

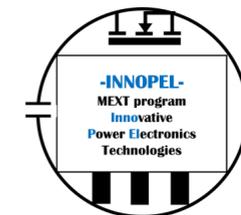
※1：信州大学、※2：大阪大学



# 目次



文部科学省

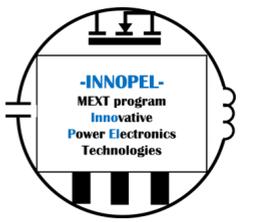


1. パワーエレクトロニクスにおける課題	3
2. ボトルネックとなっている磁気素子の低損失化を目指して	4
3. 異方性軟磁性材料（薄帯・圧粉）の開発	7
4. 交流銅損低減巻線の開発	11
5. チョッパ用インダクタの開発	12
6. フルブリッジ・トランスの開発	16
7. 磁気素子のモデリングと磁気素子設計技術の確立	20
8. まとめ	22

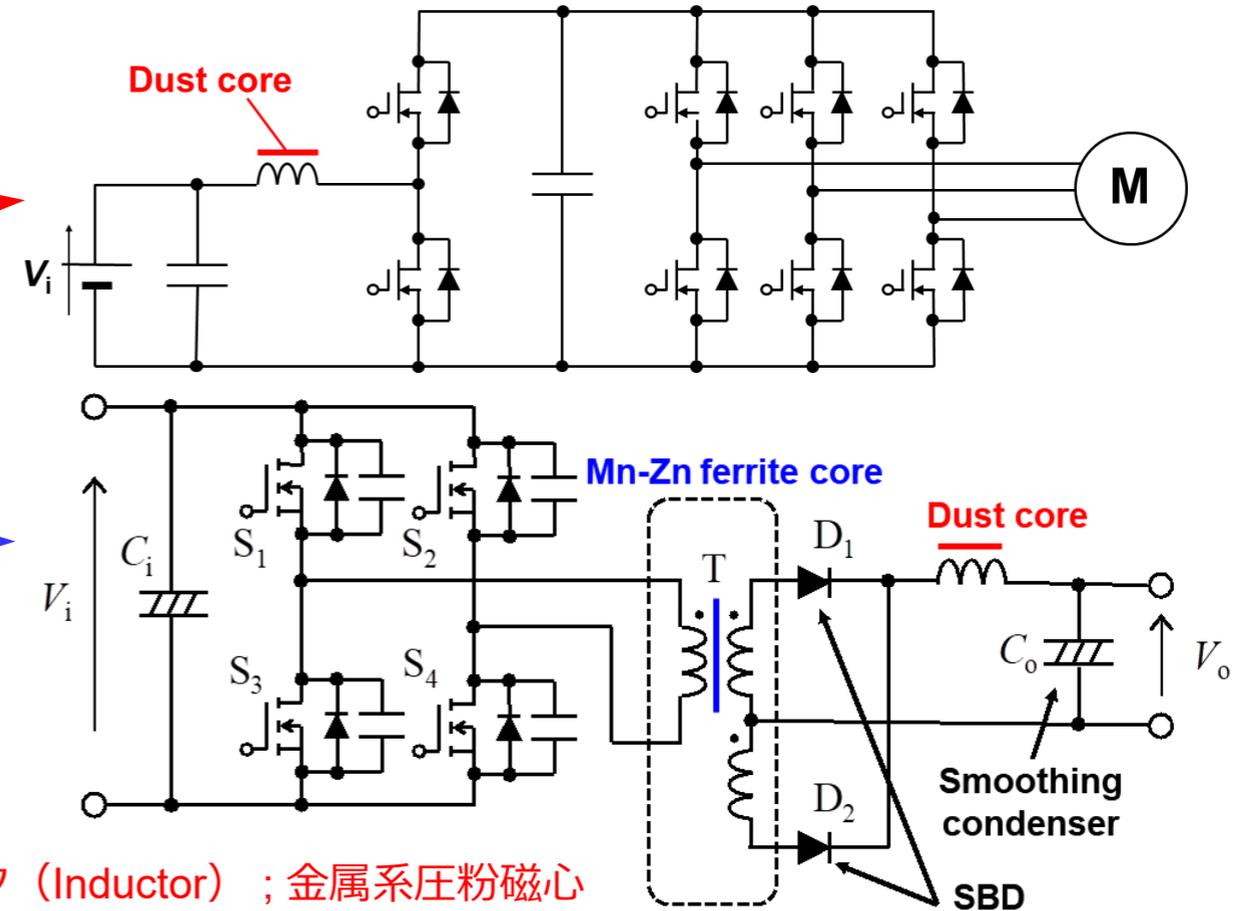
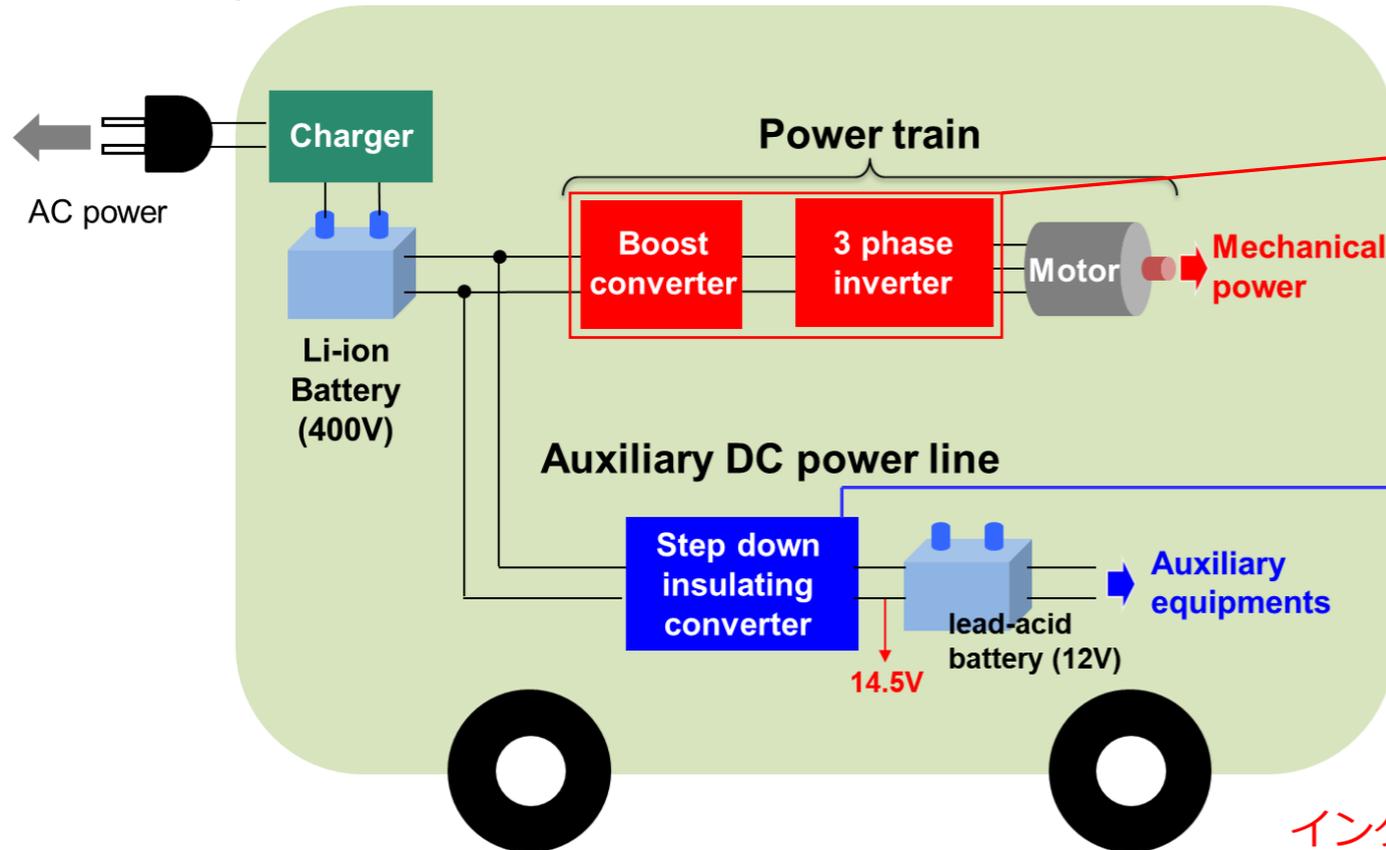
# 1. パワーエレクトロニクスにおける課題



文部科学省



パワエレは電力インフラ, 産業応用, 輸送, IT, 民生など幅広い分野で利用されている。  
 例えば, 電気自動車では・・・



インダクタ (Inductor) ; 金属系圧粉磁心  
 変圧器 (Transformer) ; Mn-Znフェライト磁心が主流

図1 電気自動車におけるパワエレ

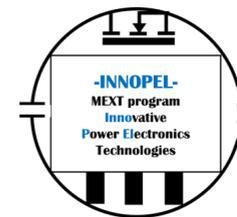
SiC, GaNパワー半導体の登場 ⇒ パワエレ機器の小型化, 軽量化, 高効率化の期待!

⇒ 磁気部品の課題が大きく浮上, 革新的低損失の実現によりパワエレシステムのさらなるパフォーマンス向上へ  
 磁気部品の鉄損と銅損の低減が必須

# 2. ボトルネックとなっている磁気素子の低損失化を目指して



文部科学省



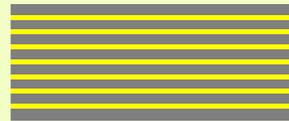
## I. 磁性材料の開発

## II. 材料の使いこなし (設計技術)

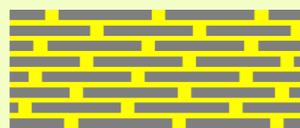
## 最終目標

### (1) 異方性軟磁性材料の開発

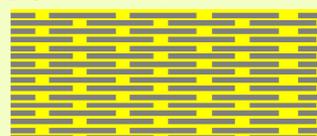
#### ◆ 薄帯リボン巻磁心



#### ◆ 板状粉末圧粉磁心

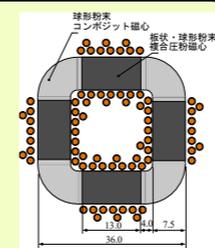


#### ◆ 扁平粉末圧粉磁心

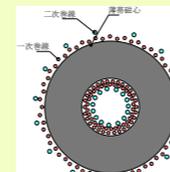


### (3) インダクタ・トランスの開発

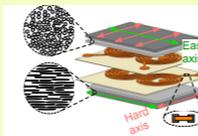
#### ① インダクタ



#### ② トランス



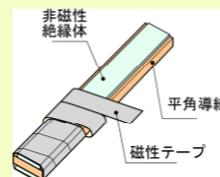
#### ③ 高周波絶縁トランス



#### ④ 実動作におけるインダクタ・トランスの損失の高精度測定法の開発

### (2) 交流銅損低減技術の開発

#### ◆ 磁性テープ



#### ◆ スキージ法

### (4) 磁気素子のモデリングと磁気素子設計技術の確立

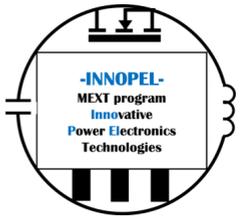
◆ トランス・インダクタ  
異方性軟磁性材料/交流銅損低減巻線によって現状の磁気素子の小型化と低損失化

◆ 高周波絶縁トランス  
10MHz帯高周波絶縁トランスを用いた絶縁コンバータ：1.5W、60%以上の効率

◆ 磁気素子のモデリングと磁気素子設計技術の確立  
LLG方程式による磁化反転の物理モデルと電磁界解析による磁気素子モデリングを統合した磁気素子設計技術を確立

図2 研究開発の概要と分担体制

# 2. ボトルネックとなっている磁気素子の低損失化を目指して



文部科学省

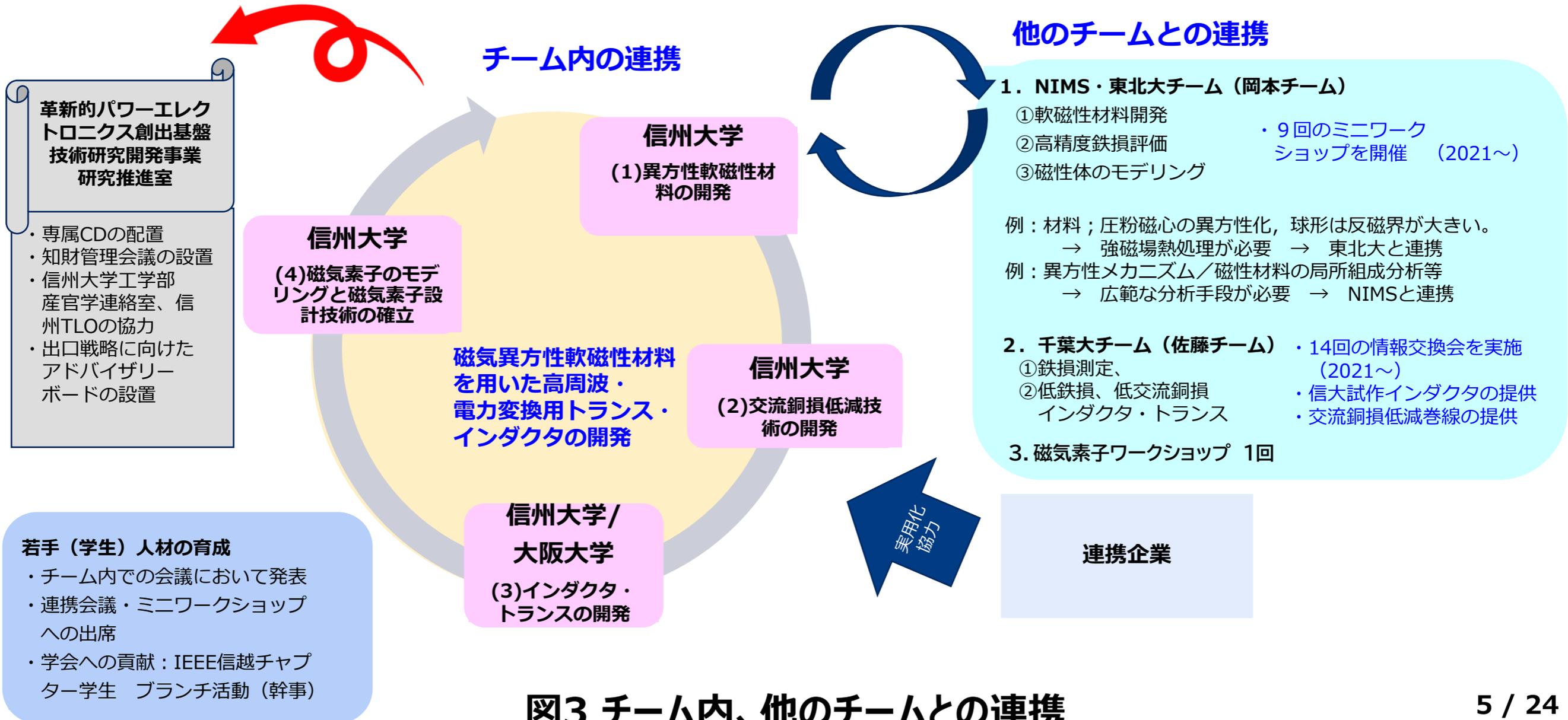
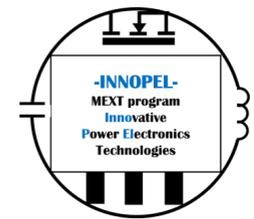


図3 チーム内、他のチームとの連携

# 2. ボトルネックとなっている磁気素子の低損失化を目指して



文部科学省



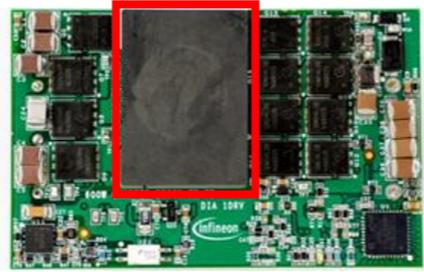
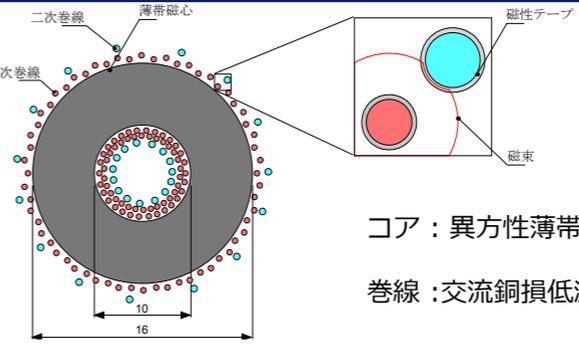
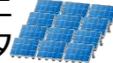
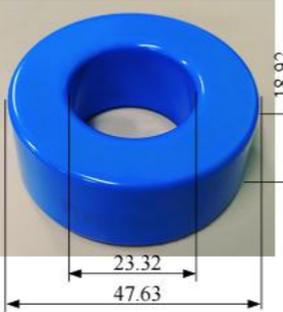
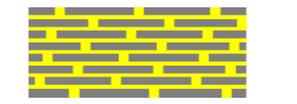
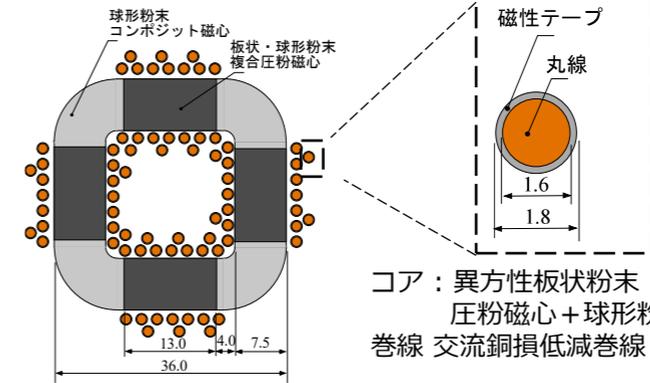
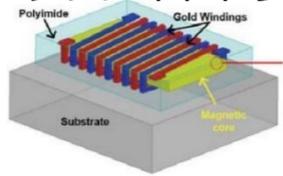
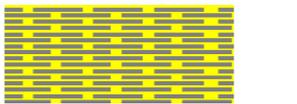
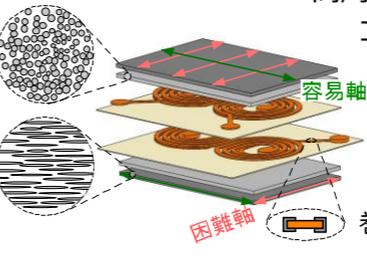
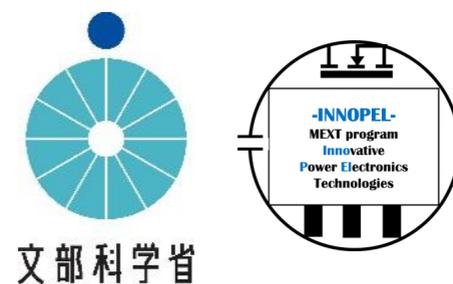
ターゲットコンバータ	ベンチマーク	異方性磁心材料	最終目標 (インダクタ・トランスの構造は一例) 磁気素子の小型化と低損失化
<p>データセンタ用 降圧コンバータ</p>  <p>入力電圧 : 48 V 出力電圧 : 12 V 出力電力 : 1 kW程度 周波数 : 1 MHz以下</p>	<p>Mn-Znフェライト(EEコア)</p> 	<p>異方性薄帯積層磁心</p> <p>飽和磁束密度: 1.2 T 周波数: 50k-500k Hz 比透磁率: 1,000-10,000</p> 	 <p>コア : 異方性薄帯巻磁心 巻線 : 交流銅損低減巻線</p>
<p>太陽光パネル用昇圧 チョップコンバータ</p>  <p>入力電圧 : 100 V 出力電圧 : 320 V 出力電力 : 1 kW程度 周波数 : 1 MHz以下</p>	<p>ダストコア</p>  <p>コア : Fe-Si-Al系圧粉磁心</p>	<p>異方性板状粉末圧粉磁心</p> <p>飽和磁束密度: 0.8-1 T 周波数: 50k-500 kHz 比透磁率: 20-100</p> 	 <p>コア : 異方性板状粉末圧粉磁心 + 球形粉末磁心 巻線 : 交流銅損低減巻線</p>
<p>ゲートドライバ用電源</p>  <p>入力電圧 : 12 V 出力電圧 : 12 V 出力電力 : 1.5 W程度 周波数 : 10 MHz帯</p>	<p>Z. Yue et al., ISSCC2019 ソレノイドトランス</p>  <p>コア : 積層磁心 巻線 : ビア + 基板パターン</p> <p>スイッチング周波数: 10-40 MHz</p>	<p>異方性扁平粉末圧粉磁心</p> <p>飽和磁束密度: 0.5-0.7T 周波数: 0.5M-20M Hz 比透磁率: 100-300</p> 	<p>高周波絶縁トランス</p>  <p>コア : 異方性扁平粉末圧粉磁心 + 等方性球形粉末磁心 巻線 : 磁性皮膜パターン配線</p>

図4 ターゲットとするモチーフコンバータ、本研究開発の要素技術

# 3. 異方性軟磁性材料（薄帯・圧粉）の開発



## 異方性軟磁性薄帯・板状粉末／扁平粉末圧粉磁心の開発仕様とベンチマーク

### 材料開発の指針

高い飽和磁化を持っていても、利用可能な磁束密度は鉄損によって制限される

### FINEMET系ナノ結晶材料

磁歪と結晶磁気異方性が小さく低保磁力の特徴を有する



### Co-Pd元素置換による異方性

磁化回転を利用して渦電流損失の低減を目指す

表1 開発磁心材料とベンチマーク

開発磁心材料	ベンチマーク磁心材料	磁心開発の概要
50kHz～500kHz帯トランス用薄帯巻磁心	Mn-Znフェライト 100 kHz帯鉄損最小の市販品	単ロール法Co-Pd置換FINEMET組成急冷薄帯
50kHz～500 kHz帯インダクタ用板状粉末圧粉磁心	Fe-Si-Al圧粉磁心 100 kHz帯鉄損最小の市販品	板状粉末異方性圧粉磁心／球形粉末等方性コンポジット磁心 によるハイブリッド磁心（異方性磁心の有効活用）
500kHz～20MHz帯高周波トランス用扁平粉末圧粉磁心	Ni-Znフェライト Beyond 10 MHz帯鉄損最小の市販品	扁平粉末コンポジットシート磁心

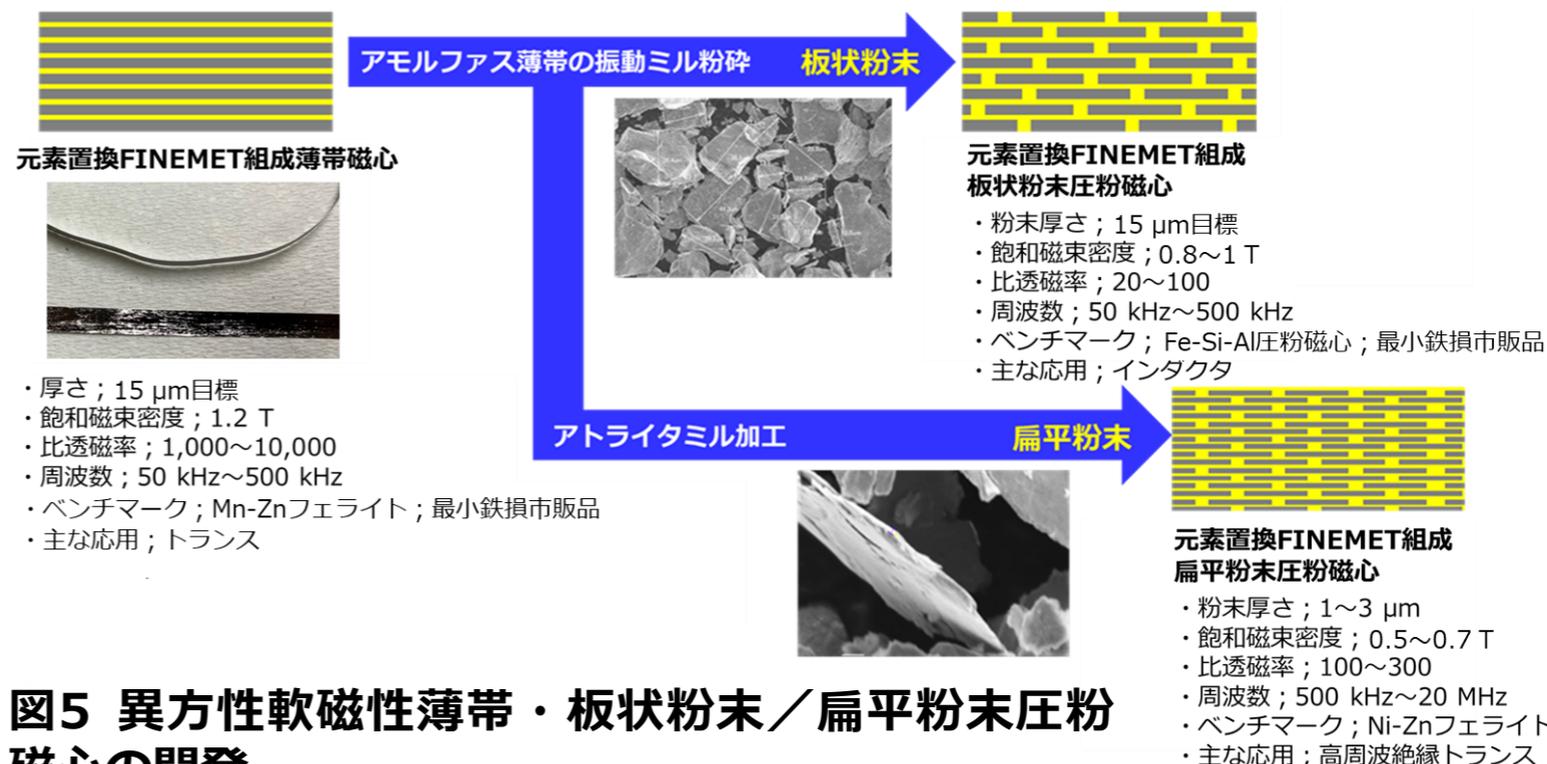
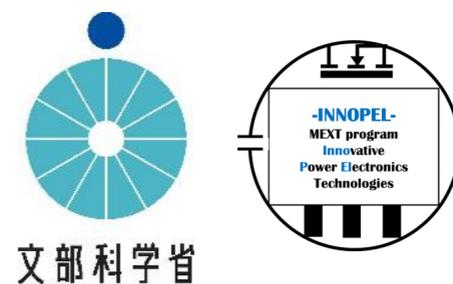


図5 異方性軟磁性薄帯・板状粉末／扁平粉末圧粉磁心の開発

# 3. 異方性軟磁性材料（薄帯・圧粉）の開発



## 50kHz～500kHz帯トランス用異方性軟磁性薄帯

- ◆ **Co-Pd置換組成の探索** ;  $\text{Fe}_{73.5-x-y} \text{Co}_x \text{Pd}_y \text{Si}_{16.5} \text{B}_6 \text{Nb}_3 \text{Cu}_1 \text{ at.}\%$ 
  - ・ 広範なCo : Pd置換量で磁気特性（飽和磁化, 保磁力, 異方性磁界, 鉄損）を評価  
⇒ 最適組成 ; Co : Pd = 3 : 1 at.%, 置換量最小組成 (Co ; 1.11 at.%, Pd ; 0.37 at.%)  
 $M_s \cong 1.2 \text{ T}, H_c \cong 5.8 \text{ A/m}, H_k = 90 \text{ A/m}$
- ◆ **薄板化の条件探索** ; 単ロール急冷条件を探索
  - ・ 18  $\mu\text{m}$ から15  $\mu\text{m}$ へ
- ◆ **薄帯間絶縁** ; リン酸 / 塩酸二段階浸漬
  - ・ 約200 nm厚の $\text{Fe}_2\text{O}_3$  /  $\text{SiO}_2$ 混相被膜
- ◆ **磁界中ナノ結晶化熱処理条件の最適化** ; 保磁力最小
  - ・ 温度プロファイル / 熱処理温度 / 時間
- ◆ **ベンチマーク** ; Mn-Znフェライトとの鉄損比較
  - ・ 100 kHz以下では同程度 (FINEMETに対し1/2以下)
  - ・ 500 kHzでは35%減の鉄損

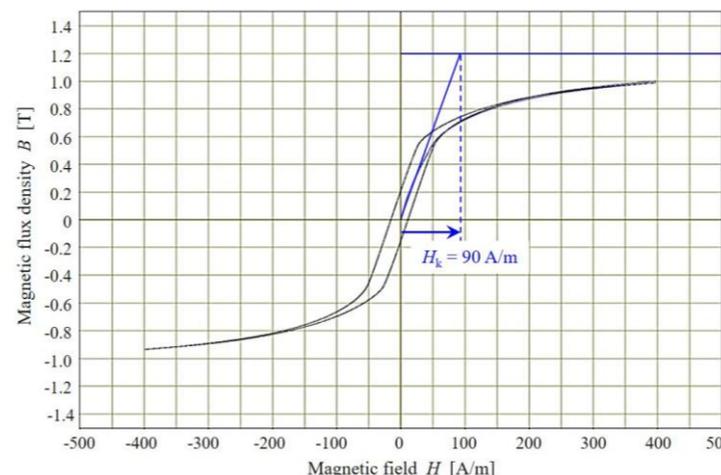


図6 異方性薄帯の直流B-H特性

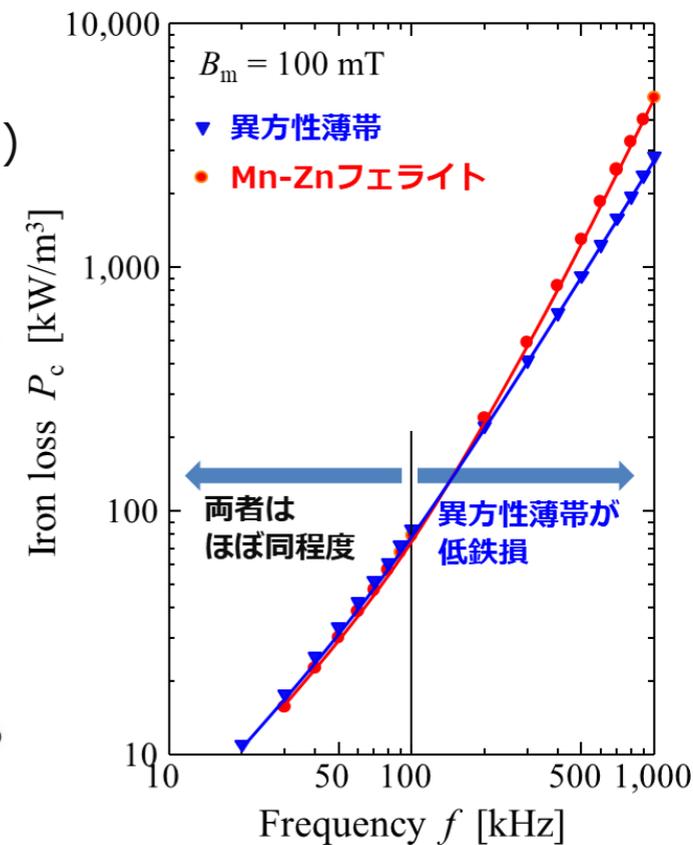
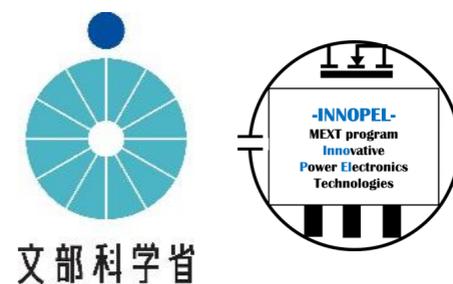


図7 異方性薄帯の鉄損特性

表2 ベンチマークとの特性比較

磁心材料	飽和磁化	保磁力	比透磁率 ( $B_m = 100 \text{ mT}$ )		鉄損 ( $B_m = 100 \text{ mT}$ )	
			100 kHz	500 kHz	100 kHz	500 kHz
$\text{Fe}_{72.02} \text{Co}_{1.11} \text{Pd}_{0.37} \text{Si}_{16.5} \text{B}_6 \text{Nb}_3 \text{Cu}_1 \text{ at.}\%$ 薄帯	1.2 T	5.8 A/m	8,491	4,685	83 kW/m <sup>3</sup>	900 kW/m <sup>3</sup>
ベンチマーク ; Mn-Znフェライト	0.5 T	9.5 A/m	4,384	4,250	79 kW/m <sup>3</sup>	1,400 kW/m <sup>3</sup>

# 3. 異方性軟磁性材料（薄帯・圧粉）の開発



## 50kHz～500kHz帯インダクタ用板状粉末圧粉磁心

- ◆ 15 μm厚Co-Pd置換組成異方性板状粉末
  - ・ 急冷直後のアモルファス薄帯を脆化熱処理後に振動ミル粉碎，フットプリント100～300 μm
- ◆ シリコン溶液造粒後に**固体潤滑剤**とともに冷間プレス（約800 MPa）
- ◆ 磁界中ナノ結晶化熱処理；熱処理条件／時間の探索
- ◆ 圧粉磁心作製の詳細検討
  - ・ 板状粉末の水平配向／垂直積層，磁性体充填率の向上
    - ⇒ 18 μm厚FINEMET粉末で検討
    - ⇒ 板状粉末と微細球形粉末の混合
    - ⇒ 飽和磁化；0.84 T，比透磁率；78
  - ・ ベンチマークのFe-Si-Al粉末圧粉磁心との鉄損比較
    - ⇒ 50 kHz以下で低鉄損，100 kHzでほぼ同程度
    - ⇒ 15 μm厚異方性粉末の採用，固体潤滑剤溶融工程の導入でさらなる低鉄損化

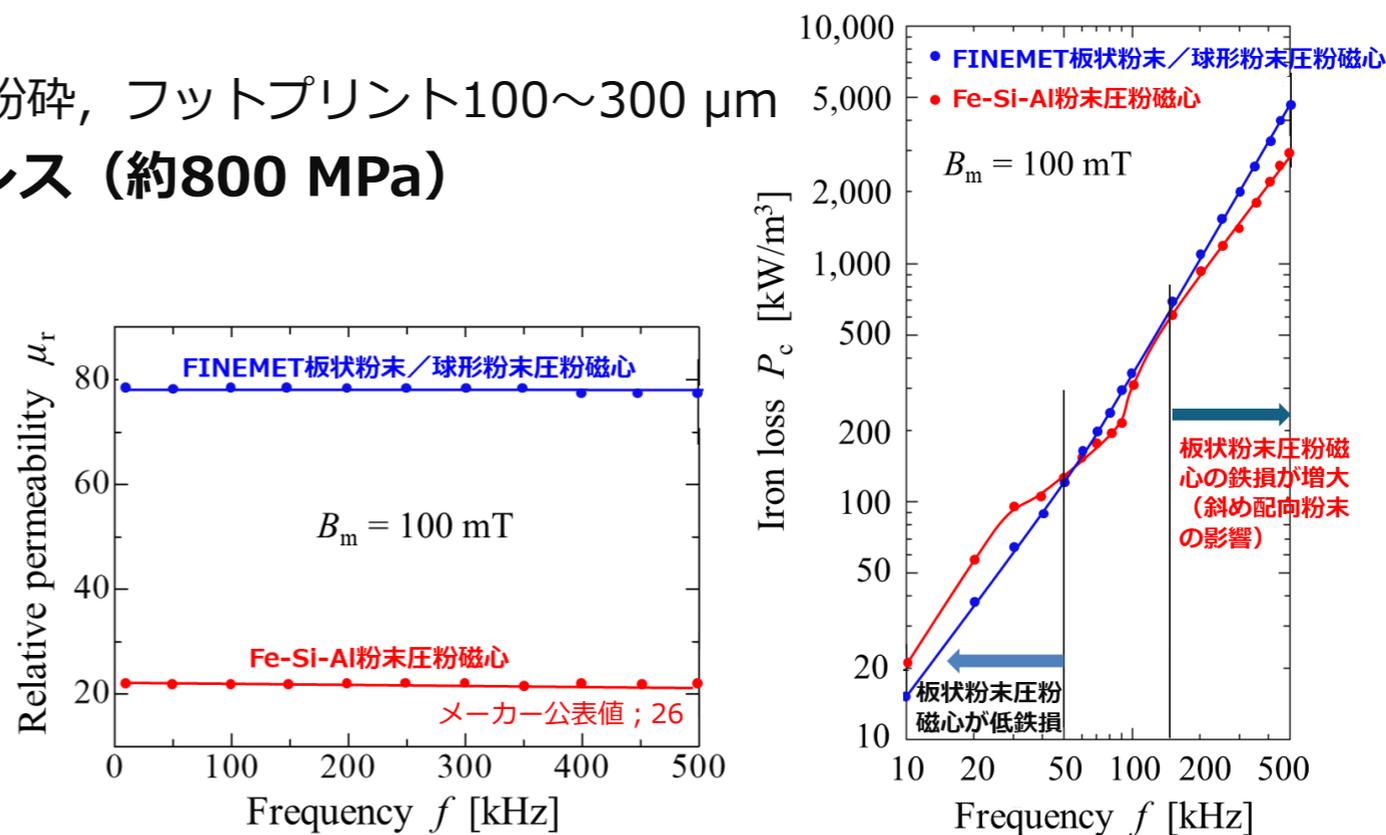
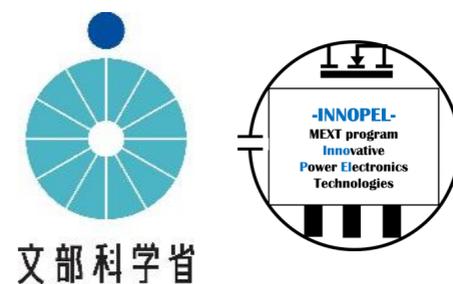


図8 板状粉末／球形粉末混合圧粉磁心の比透磁率，鉄損特性

表3 ベンチマークとの特性比較

磁心材料	飽和磁化	保磁力	比透磁率 ( $B_m = 100$ mT)		鉄損 ( $B_m = 100$ mT)	
			100 ~ 500 kHz		100 kHz	500 kHz
18 μm厚FINEMET板状粉末／3.5 μm球形粉末ナノ結晶混合圧粉磁心	0.84 T	40 A/m	78		367 kW/m³	4,750 kW/m³
ベンチマーク；Fe-Si-Al粉末圧粉磁心	0.9 T	—	26 (実測22)		314 kW/m³	2,950 kW/m³

# 3. 異方性軟磁性材料（薄帯・圧粉）の開発



## 500kHz～20MHz帯高周波絶縁トランス用扁平粉末圧粉磁心

### ◆ 絶縁コンバータ用高周波絶縁トランス

- ・パワーデバイスのゲート回路用パッケージ内蔵絶縁電源がターゲット
- ・プレーナ構造, フットプリント; 5 mm角, 高さ; 1.4 mm
- ・球形粉末コンポジット磁心と扁平粉末圧粉磁心のハイブリッド構成
- ・動作周波数; 10 ~ 30 MHz

### ◆ 球形粉末コンポジット磁心

- ・5 μm径Fe-Si多結晶球形粉末/エポキシ樹脂コンポジットシート
- ⇒ 味の素FTと共同開発 (チップインダクタ, 磁性ビルドアップフィルムなど)

### ◆ 扁平粉末圧粉磁心

- ・1 ~ 3 μm厚Fe系ナノ結晶扁平粉末圧粉磁心
- ⇒ 印刷法+熱間プレス, ナノ結晶化熱処理

### ◆ ベンチマークNi-Znフェライトとの比較

- ・高い飽和磁化, 高透磁率, 低保磁力, 低鉄損

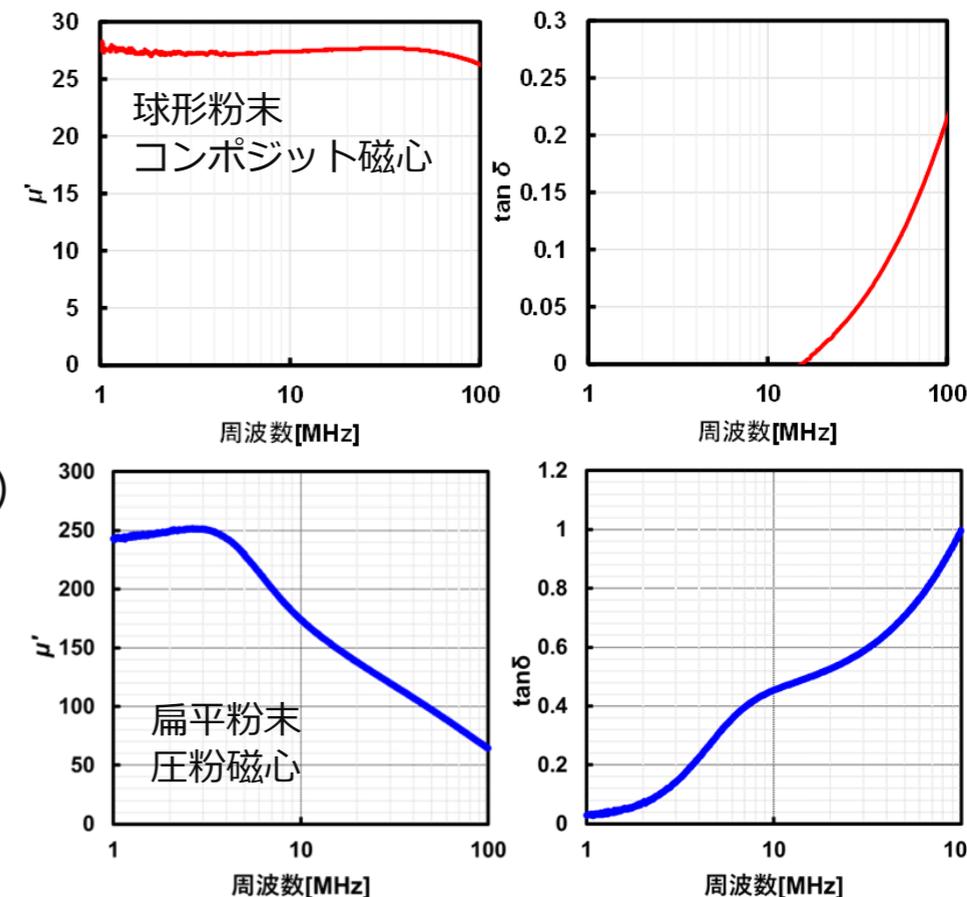
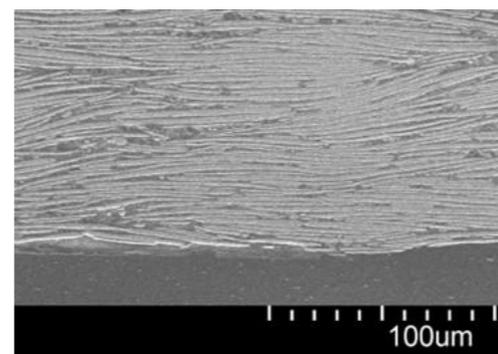


表4 ベンチマークとの特性比較

磁心材料	飽和磁化	保磁力	比透磁率	鉄損 $f = 10 \text{ MHz}, B_m = 20 \text{ mT}$
			10 MHz	
1 ~ 3 μm厚Fe系ナノ結晶扁平粉末圧粉磁心	0.55 T	160 A/m	175	7,650 kW/m <sup>3</sup>
ベンチマーク; Ni-Znフェライト	0.23 T	240 A/m	40	22,500 kW/m <sup>3</sup>

図9 開発磁心材料の複素比透磁率

# 4. 交流銅損低減巻線の開発

## 巻線の交流銅損の低減の原理と効果

表5 交流銅損低減の原理

	丸線	平角線
表皮効果	<p>磁性テープ 磁束 <math>\phi</math> 電流 <math>I</math> 効果なし</p>	<p>PET フィルム 磁束 <math>\phi</math> 電流 <math>I</math> 磁性テープ</p>
近接効果	<p>磁性テープ 磁束 <math>\phi</math> 電流 <math>I</math></p>	<p>PET フィルム 磁束 <math>\phi</math> 電流 <math>I</math> 磁性テープ</p>

交流銅損は、漏れ磁束が導線を貫くことで生ずる  
 →漏れ磁束を誘導する，補助磁性体(磁性コンポジット材)の探索，屈曲性に優れた磁性テープの開発

3種類の磁性テープを製作→周波数ごとに使い分け

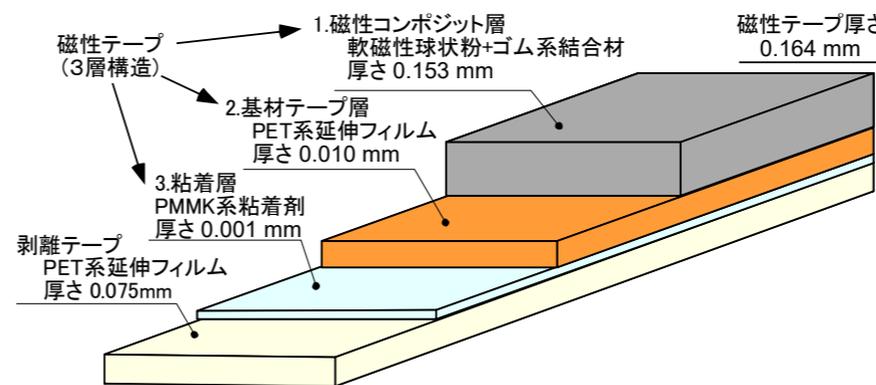


図10 磁性テープの構造

例：4MHz駆動共振形コンバータのトランス・インダクタの交流抵抗の低減

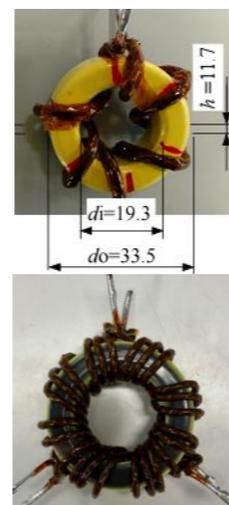


図12 インダクタ・トランス外観

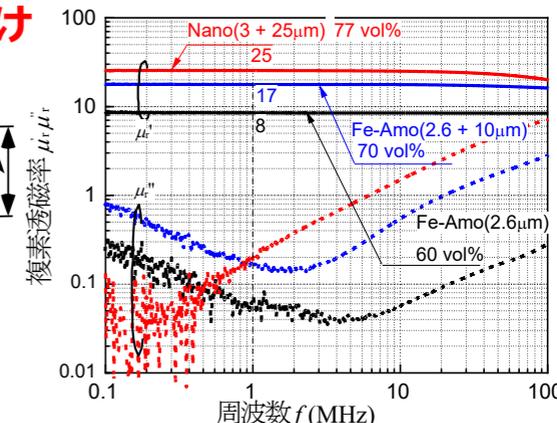
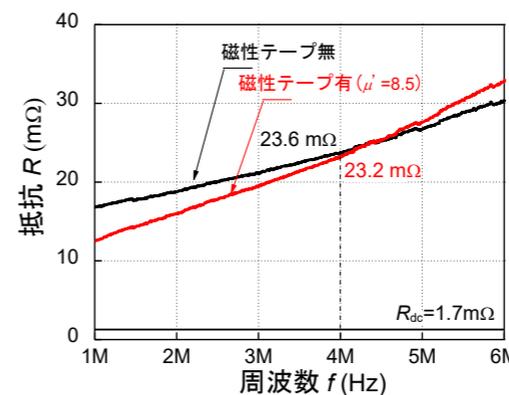
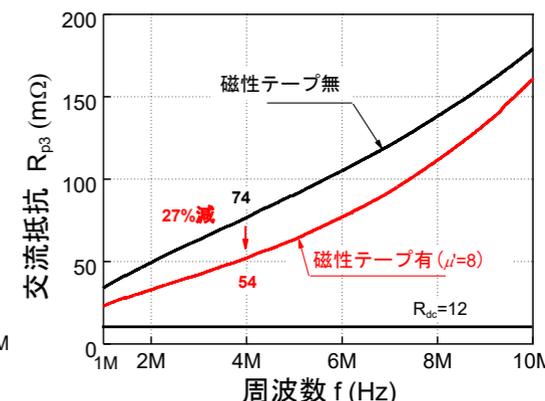


図11 磁性テープの複素比透磁率

励振周波数4MHzでトランスの抵抗は27%低減



(a)インダクタ



(b)トランス<sub>11/24</sub>

図13 抵抗-周波数特性

# 5. チョッパ用インダクタの開発

## 異方性圧粉磁心を有効活用するハイブリッド磁心

### ◆ 応用を想定している昇圧チョッパコンバータ

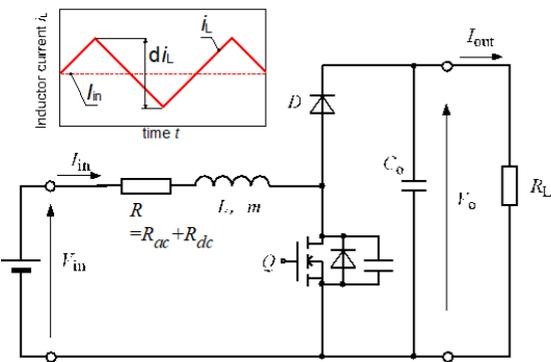


表6 コンバータの仕様

項目	仕様
入力電圧	100 V
出力電圧	320 V
出力電力	800 W
駆動周波数	300 kHz

表7 開発インダクタの目標仕様

項目	目標仕様
比透磁率	26 (目標)
磁路断面積	0.975 cm <sup>2</sup>
磁路長	10.3 cm
外形磁心体積	16.1 cm <sup>3</sup>
電流リップル率	50 %
インダクタンス	57 μH @ 300 kHz

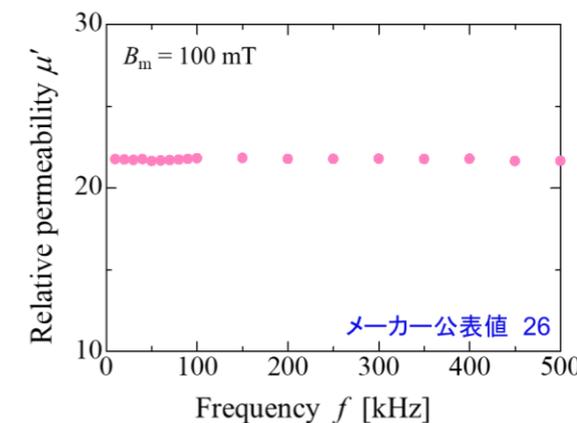


図15 ベンチマークFe-Si-Al球形粉末圧粉磁心の透磁率の周波数特性

### ◆ 一方向励磁が必要な異方性圧粉磁心を用いて閉磁気回路を構成するには？

#### 異方性圧粉磁心と等方性球形粉末コンポジット磁心によるハイブリッド磁気回路構造を考案

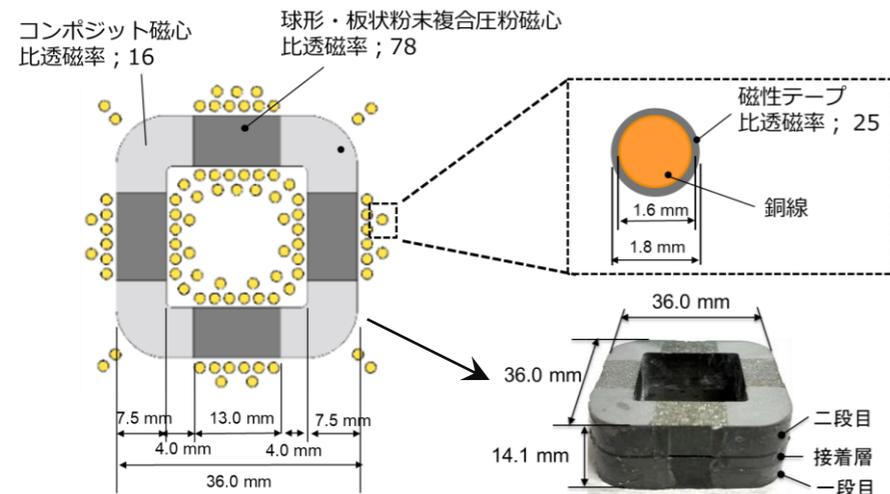


図16 ハイブリッド磁心インダクタの構成

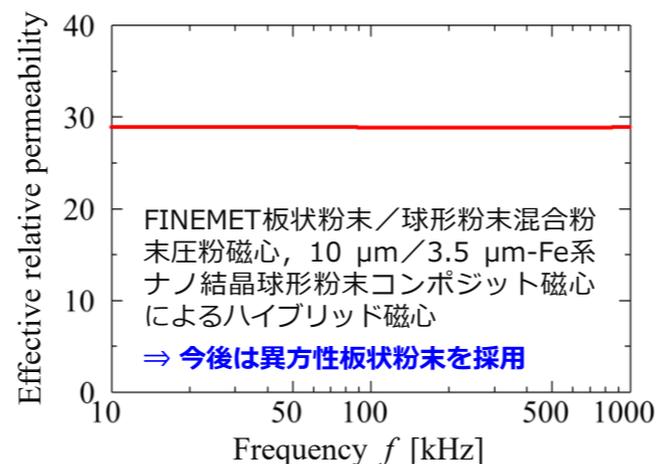
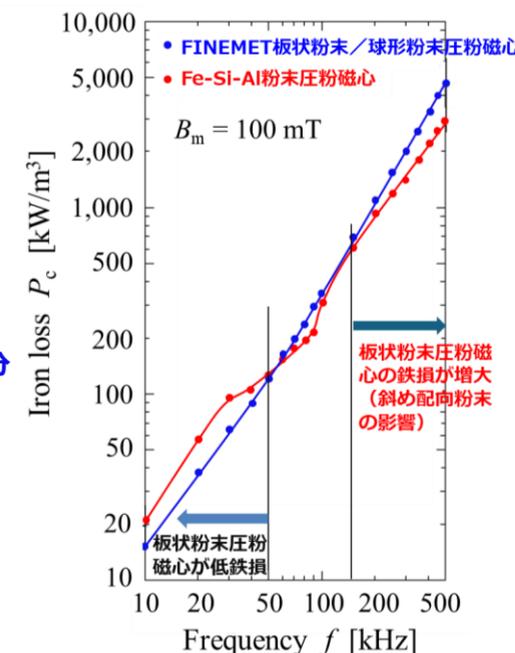
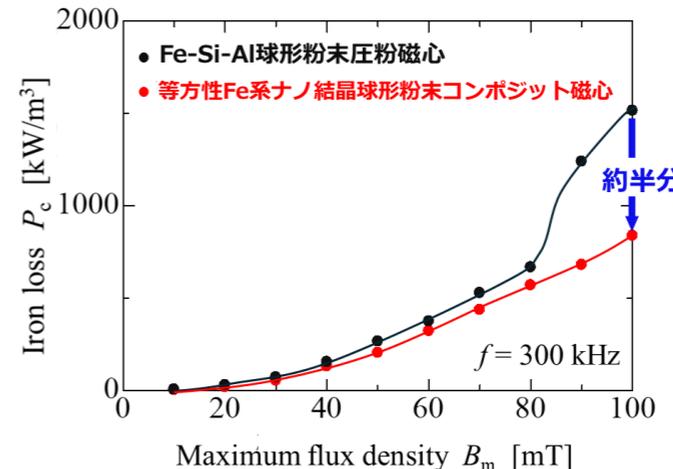


図17 ハイブリッド磁心の実効比透磁率, 二つの開発磁心の鉄損特性



# 5. チョッパ用インダクタの開発

## ハイブリッド磁気回路インダクタの開発

### ◆ハイブリッド磁心インダクタ

- ・ FINEMET板状粉末／球形粉末混合粉末圧粉磁心, 10 μm／3.5 μm-Fe系ナノ結晶球形粉末コンポジット磁心によるハイブリッド構成

⇒ 今後、異方性板状粉末の採用を予定

- ・ 磁性テープ巻線, 通常巻線の2種類

### ◆ベンチマークFe-Si-Al球形粉末圧粉磁心

ハイブリッド磁気回路インダクタに対して

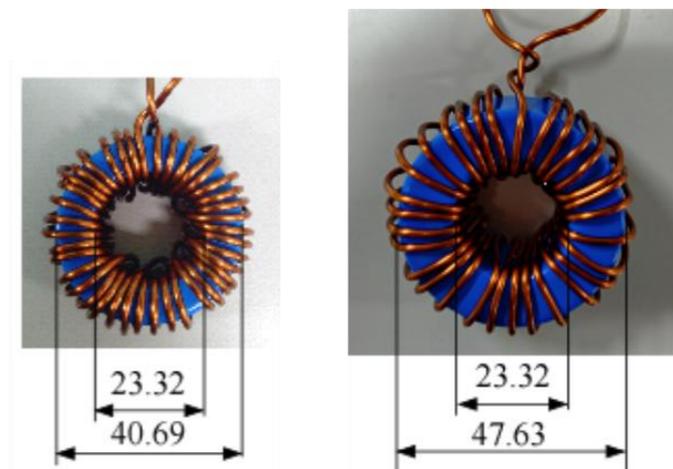
- ・ 磁心外形体積等倍
- ・ 磁心外径体積2倍

を用意



(a) 磁性テープ巻線 (b) 通常巻線

図18 ハイブリッド磁心インダクタ



(a) 体積等倍 厚さ:15.37mm  
(b) 体積2倍 高さ:18.92mm

図19 ベンチマークインダクタ(寸法:mm)

表8 開発インダクタとベンチマークインダクタの巻線仕様 (磁性テープの付加によりインダクタンス増加 ⇒ 巻数を減少)

項目	ハイブリッド磁気回路インダクタ		ベンチマーク ; Fe-Si-Al球形粉末圧粉磁心	
	磁性テープ巻線	通常巻線	外形磁心体積等倍	外形磁心体積2倍
巻数	38	39	40	30
導体径	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm
直流抵抗	20.2 mΩ	20.2 mΩ	19.9 mΩ	18.6 mΩ
コンバータ800W出力時の直流銅損	1.29 W	1.29 W	1.27 W	1.19 W
自己共振周波数	5.46 MHz	4.73 MHz	5.13 MHz	8.37 MHz

# 5. チョッパ用インダクタの開発

## ハイブリッド磁気回路インダクタの開発

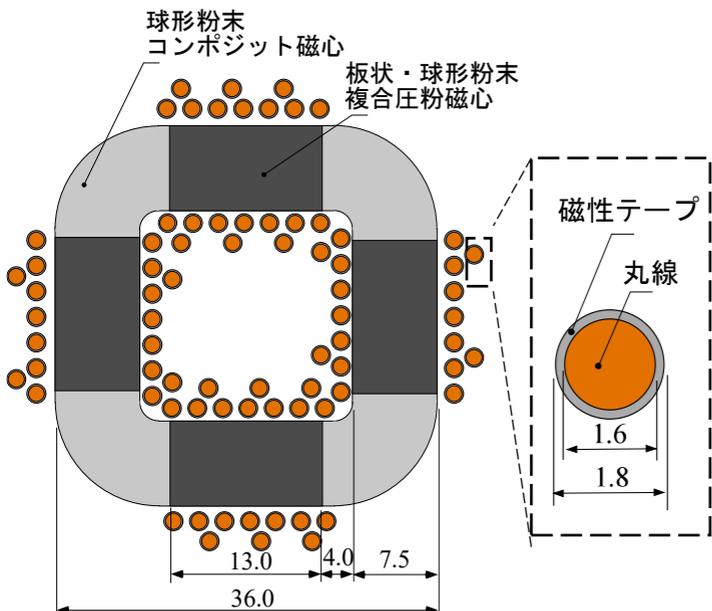
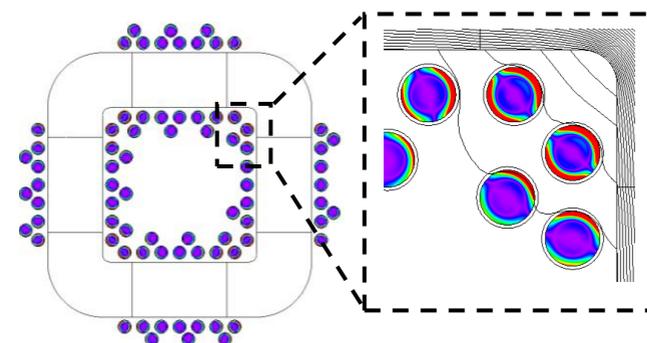


図20 インダクタ構造図  
(厚さ:14mm, 単位:mm)

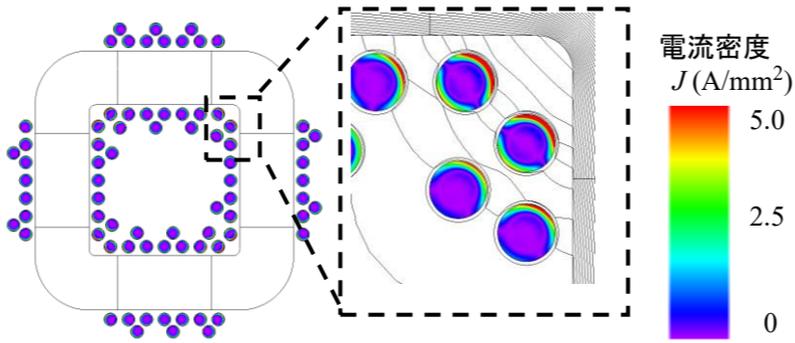


(a) 磁性テープ無



図21 インダクタの外観

磁性テープの採用により  
導体内電流密度の集中を緩和



(b) 磁性テープ(μ<sub>r</sub>=25.4)

図22 電流密度コンター図( $f=300\text{kHz}$ , 振幅 $I=10\text{A}_{\text{peak}}$ )

磁性テープ巻線の適用により交流抵抗を22%低減  
→ 磁心の損失低減を行いベンチマークよりも低損失を実現

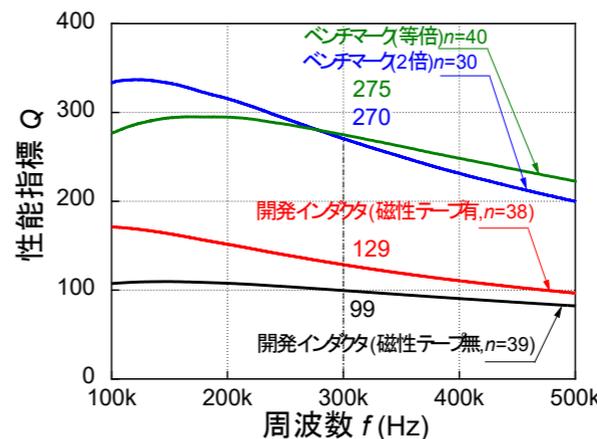


図23 Q値-周波数特性

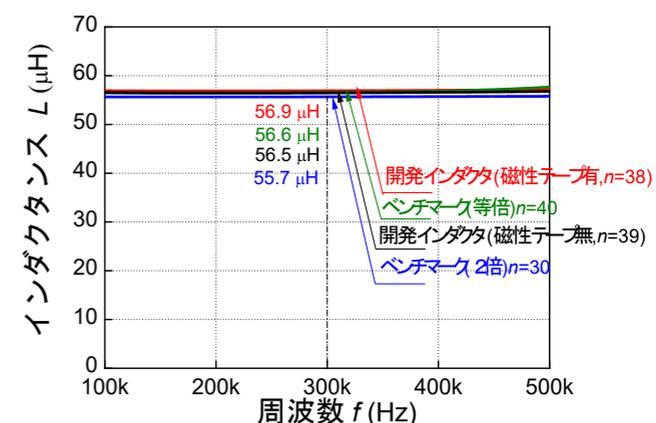


図24 インダクタンス-周波数特性

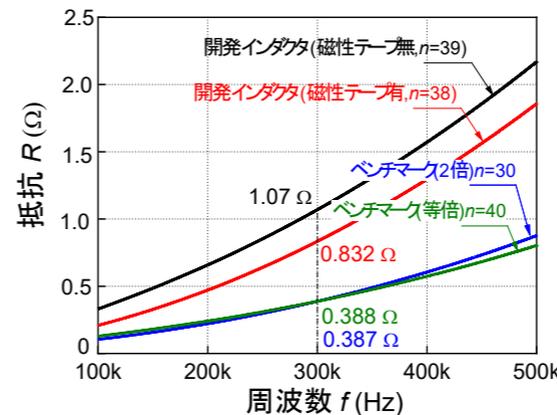


図25 巻線抵抗-周波数特性

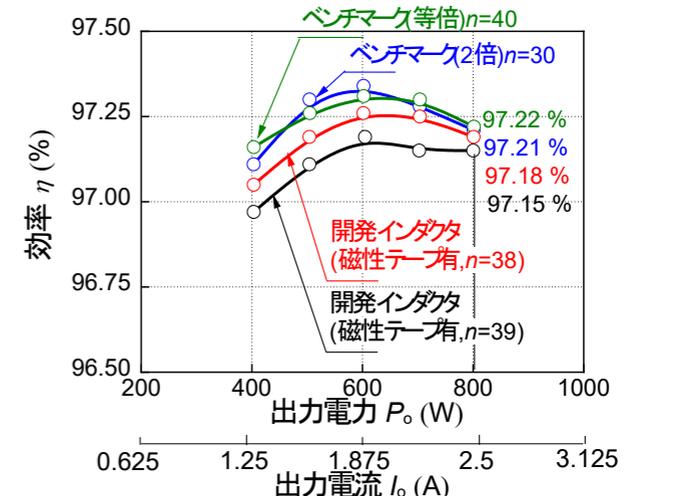
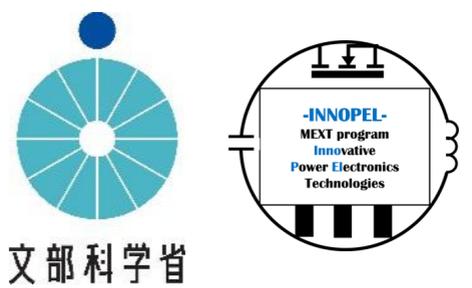


図26 コンバータDC-DC間効率  
(100V-320V,  $f_{\text{sw}} = 300\text{kHz}$ )

# 5. チョッパ用インダクタの開発

## 実回路動作における磁気素子損失の高精度測定法開発(大阪大学)



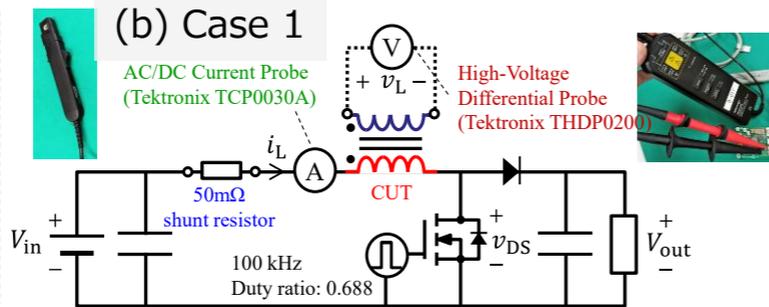
文部科学省

ベクトルネットワークアナライザを用いて電圧・電流測定系のゲイン・位相-周波数特性取得・補正量決定

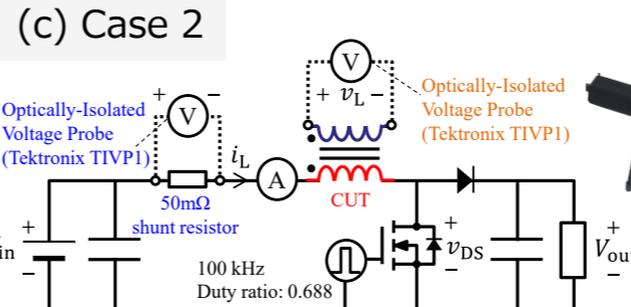
⇒ 2種類の測定系により、鉄損評価精度(特性補正有無の影響)・提案手法の妥当性を検証



(a) 評価回路



(b) Case 1



(c) Case 2

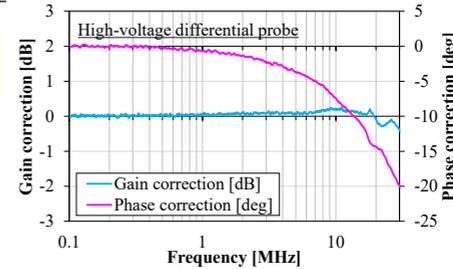


図28 ゲイン・位相補正量の周波数特性 (高電圧差動プローブ)

鉄損計算

$$P_{c(\text{Gain\&Phase corr.})}$$

$$= \sum_{n=1}^{20} [v'_n i'_n \cos(\theta'_{v,n} - \theta'_{i,n})]$$

$$\theta'_{v,n} = \theta_{v,n} + \theta_{v,n(\text{corr.})}$$

$$\theta'_{i,n} = \theta_{i,n} + \theta_{i,n(\text{corr.})}$$

位相補正

$$v'_n = v_n \times 10^{\frac{(v_{n(\text{corr.})} [\text{dB}])}{20}}$$

$$i'_n = i_n \times 10^{\frac{(i_{n(\text{corr.})} [\text{dB}])}{20}}$$

図27 昇圧チョッパ (100V→320V) におけるインダクタ損失評価系

電圧・電流測定 (時間領域): 2巻線法

鉄損計算 (周波数領域): 電圧・電流のDFT (駆動周波数高調波の振幅・位相角を算出)

実回路動作におけるインダクタ損失の高精度測定法を確立→信大開発インダクタのベンチマーク評価

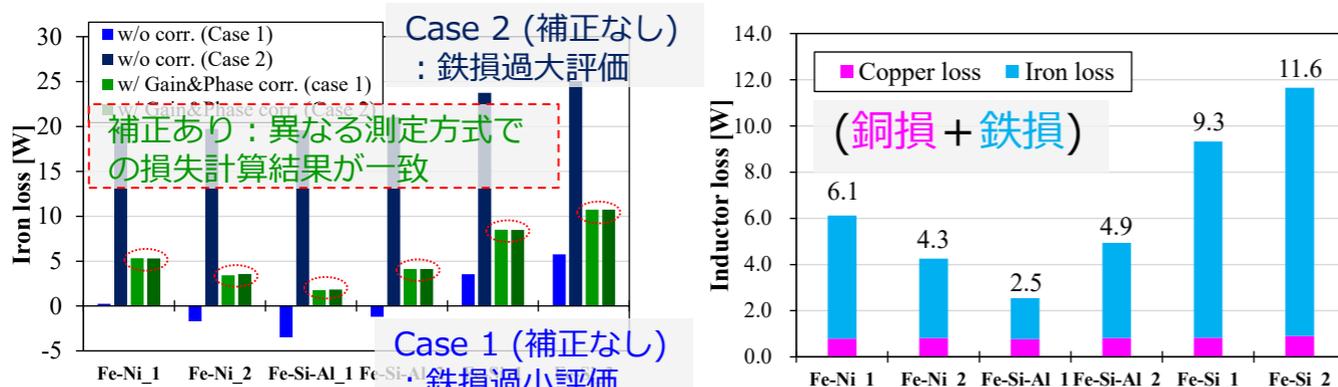


図29 インダクタ損失評価結果(Fe-Ni, Fe-Si-Al, Fe-Si)

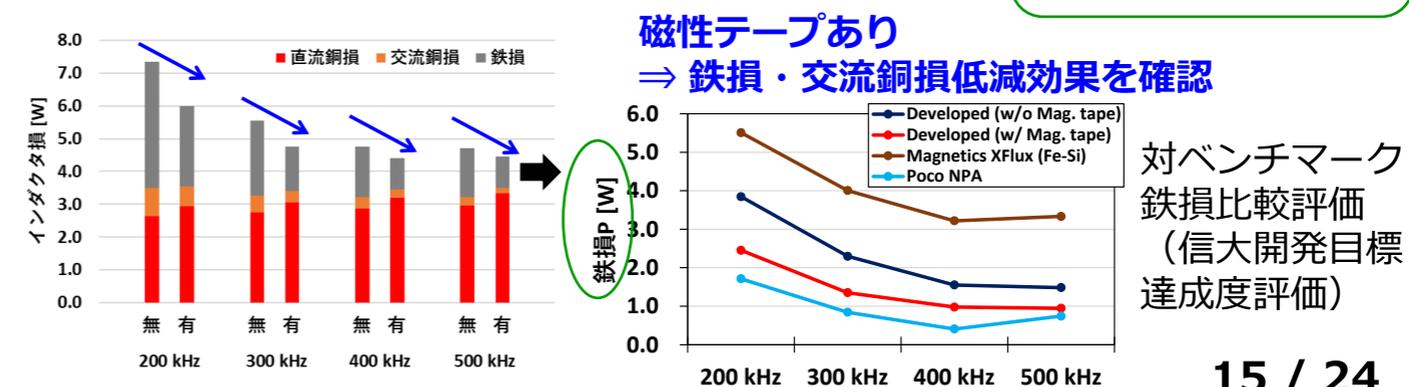
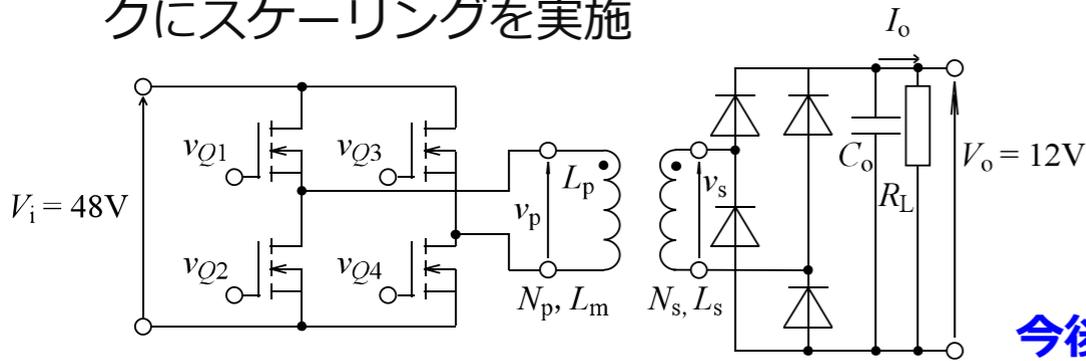


図30 信大開発インダクタの損失評価 (駆動周波数依存性)

# 6. フルブリッジ・トランスの開発

## ◆ 応用を想定しているフルブリッジコンバータ

- ベンチマーク ; データセンター用絶縁コンバータ  
⇒ 60 Wの縮小モデルを対象
- 600 W出力のInfineon製コンバータをベンチマークにスケールングを実施



今後、薄帯の磁路断面積でトランスの再設計を予定

図31 フルブリッジコンバータの回路図

表9 コンバータの仕様

項目	値
入力電圧	48 V
出力電圧	12 V
出力電力	60 W
駆動周波数	100 kHz

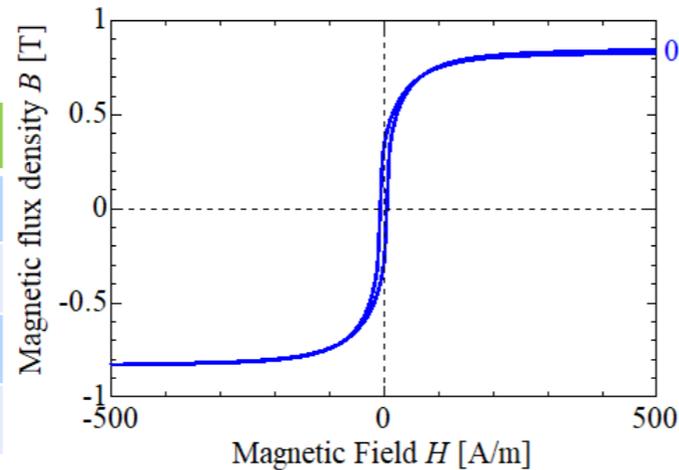


図32 巻磁心の直流B-H特性

## ◆ 異方性薄帯巻磁心

### ・ 巻磁心試作

- ⇒ 張力制御機械巻きにより薄帯180層の巻磁心を試作
- ⇒ 薄帯フリー面の凹凸により薄帯占積率が68%に低下

### ・ 占積率低下の影響

- ⇒ 飽和磁化 ; 1.2 Tから0.82 T
- ⇒ 実効比透磁率 ; 8,491から5,800 (100 kHz)
- ⇒ 鉄損 ; Mn-Znフェライトに対し  
100 kHzで2倍に, 500 kHzで43%増

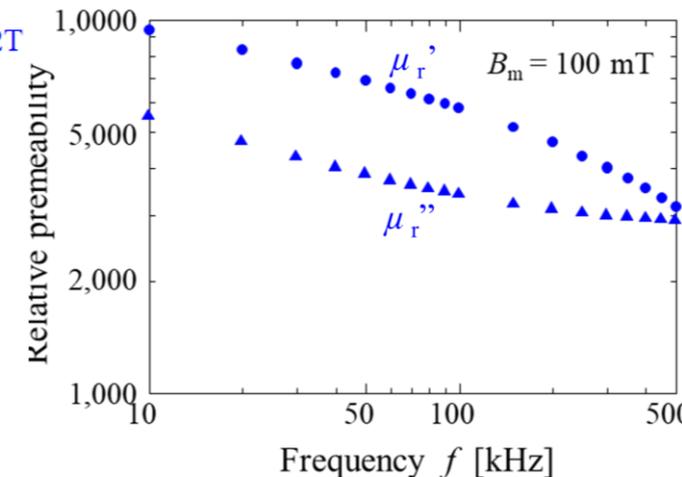


図33 巻磁心の実効透磁率

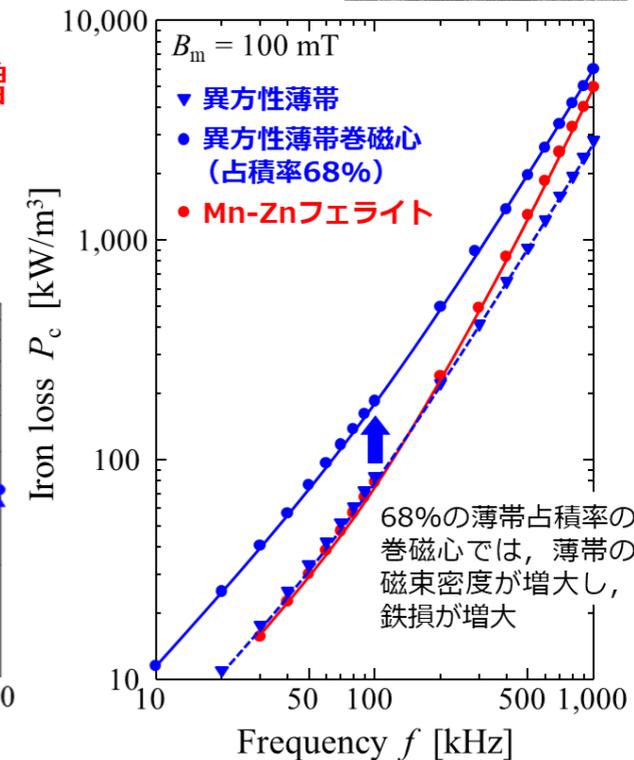
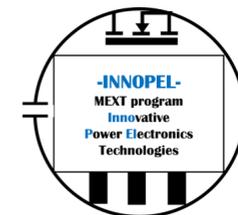


図34 巻磁心の鉄損特性

# 6. フルブリッジ・トランスの開発



文部科学省

## 巻磁心トランス, ベンチマーク ; Mn-Znフェライトトランス

### ◆ 絶縁型コンバータ用トランス

- EE型Mn-Znフェライトの採用が主流
  - ⇒ フルブリッジ型ではギャップレス磁心
  - ⇒ EE型, トロイダル型の両方をベンチマークに
  - ⇒ 通常巻線を採用

### ◆ 巻磁心トランス

- EE型構造の実現は難しい
  - ⇒ トロイダル巻磁心トランスを採用, 磁性テープ巻線で交流銅損を低減

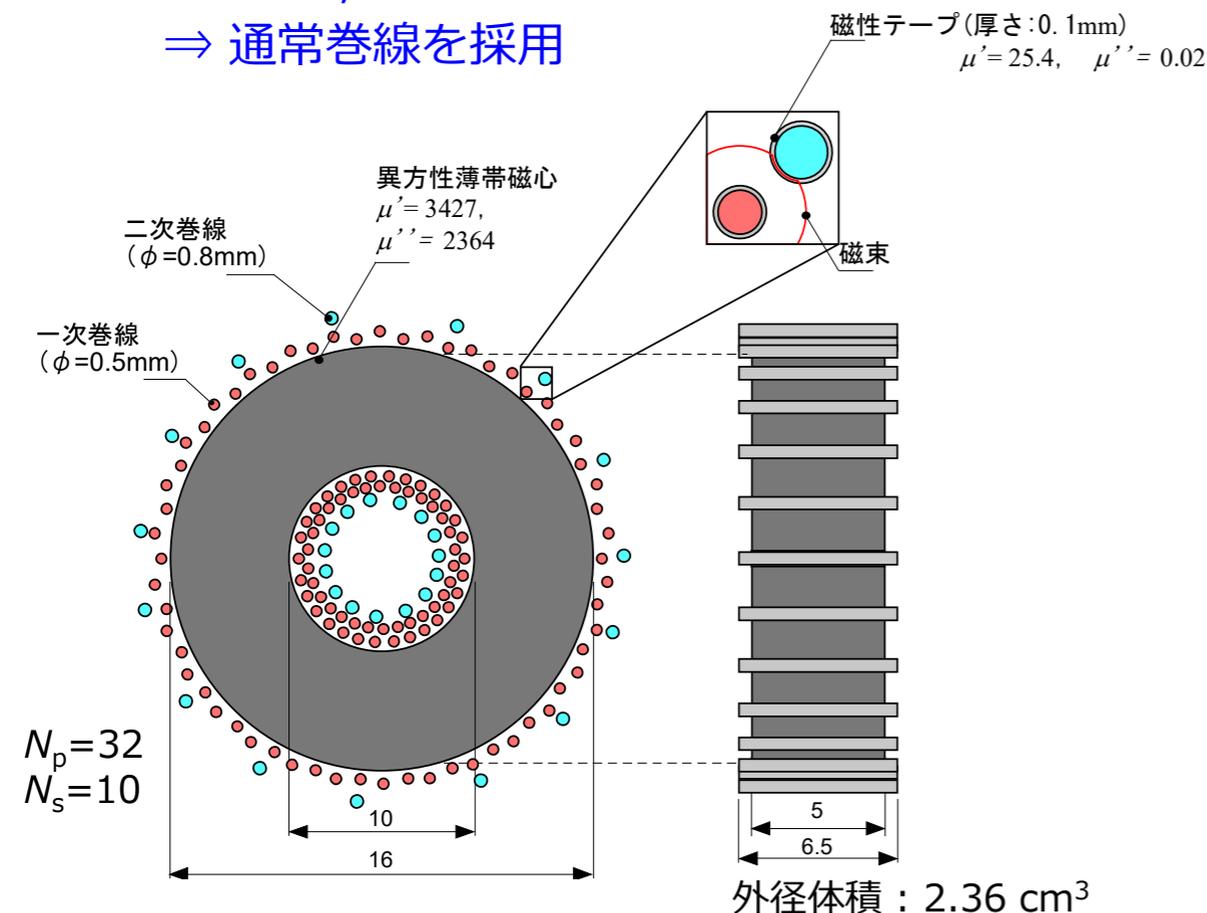


図35 異方性薄帯巻磁心トランス (寸法 ; mm)

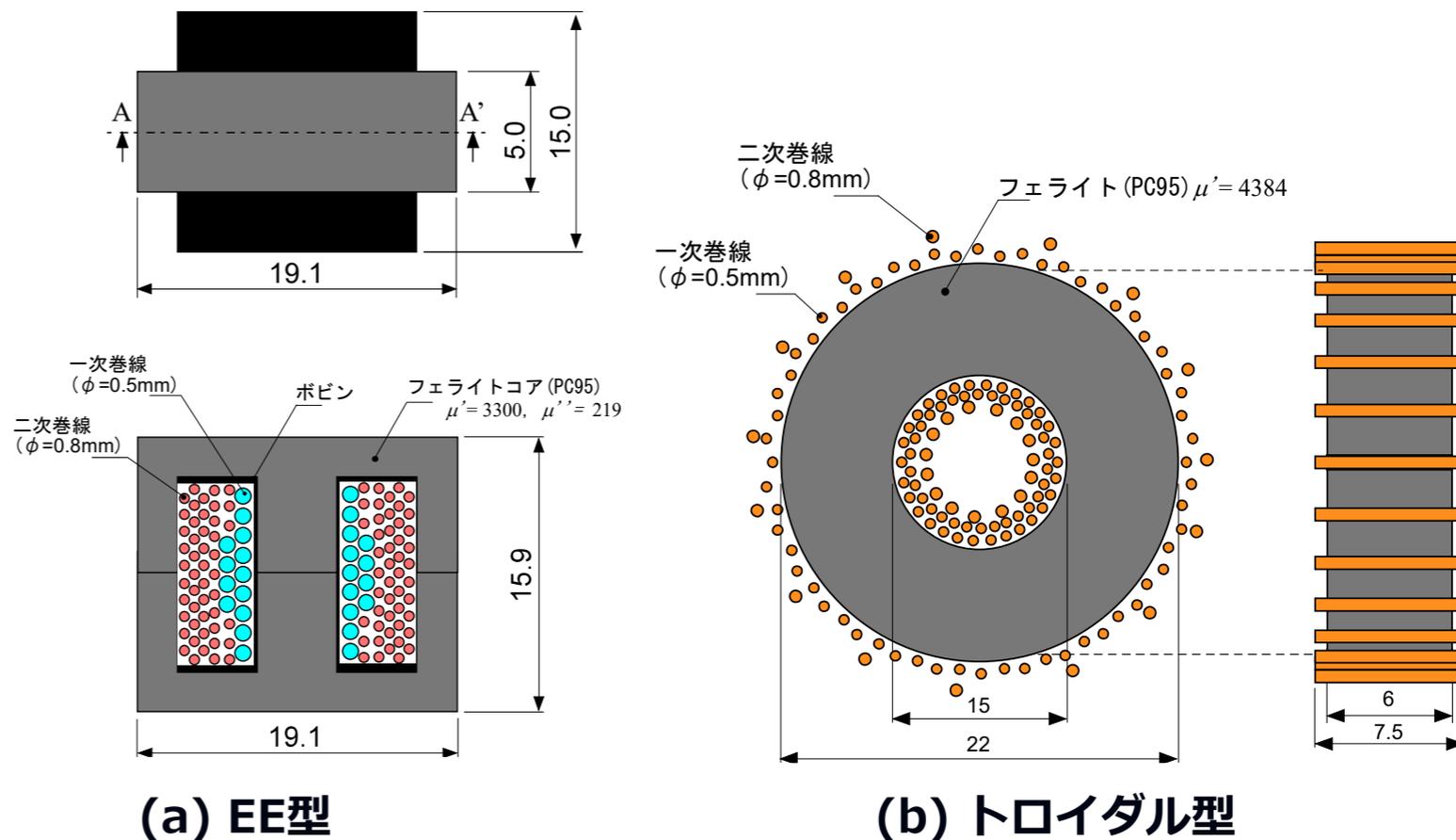
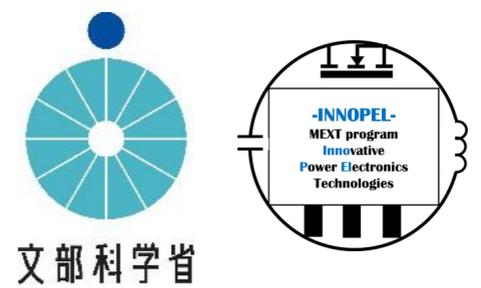


図36 ベンチマーク ; Mn-Znフェライトトランス (寸法 ; mm)

# 6. フルブリッジ・トランスの開発

## 巻磁心トランス, ベンチマーク; Mn-Znフェライトトランス



文部科学省

磁性テープを用いることで銅損低減  
 全体の損失はベンチマークと比較して7%の差でほぼ同程度

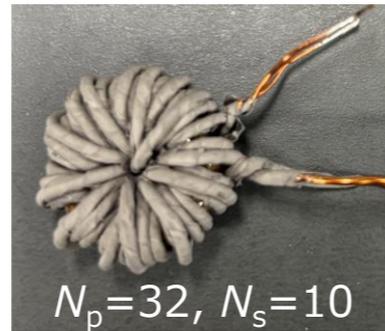
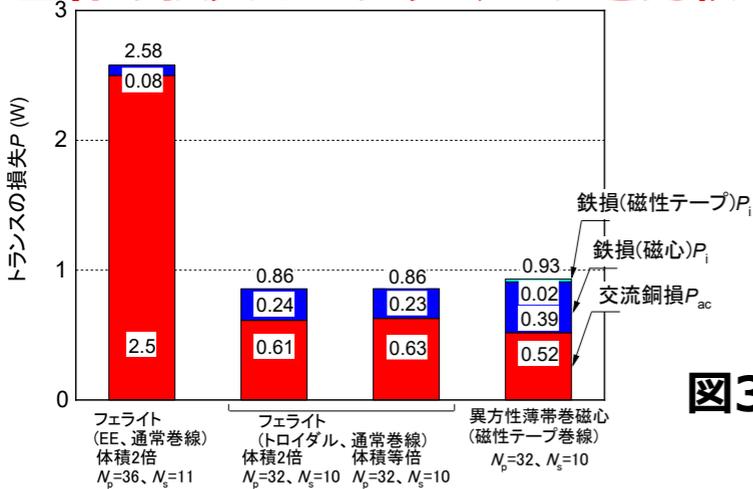
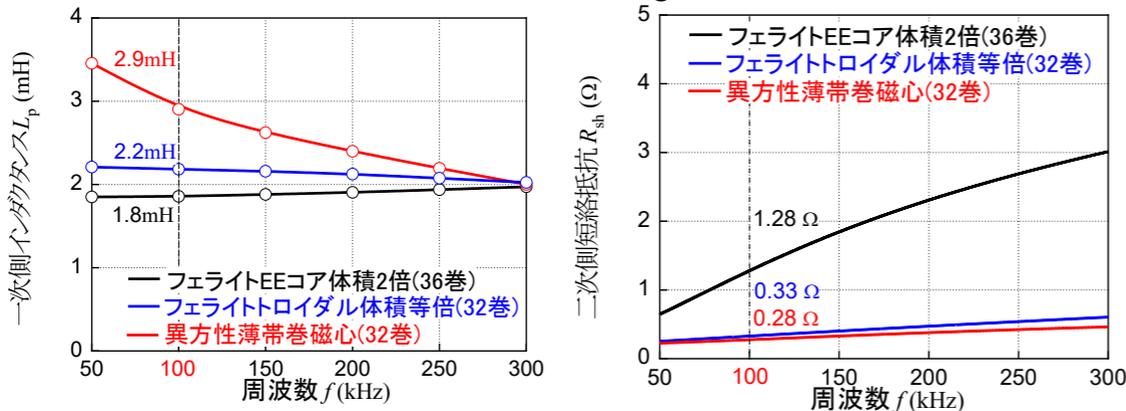


図38 巻磁心トランス外観 (体積: 2.36 cm<sup>3</sup>)

図37 トランスの損失特性 (P<sub>0</sub>=60W)



(a) インダクタンス (b) 二次側短絡抵抗

図39 インピーダンス特性

今後, 薄帯の磁路断面積でトランスの再設計を予定

## 60 Wから600 Wコンバータ用トランスへのスケーリング

600Wのコンバータをトランス一台で駆動  
 入出力電圧、周波数を変えずに出力を変更  
 → 電流が増大、巻線径の変更  
 → 巻線径に合わせた磁心サイズを変更



図40 ベンチマーク外観 600 W 出カコンバータ(Infineon)

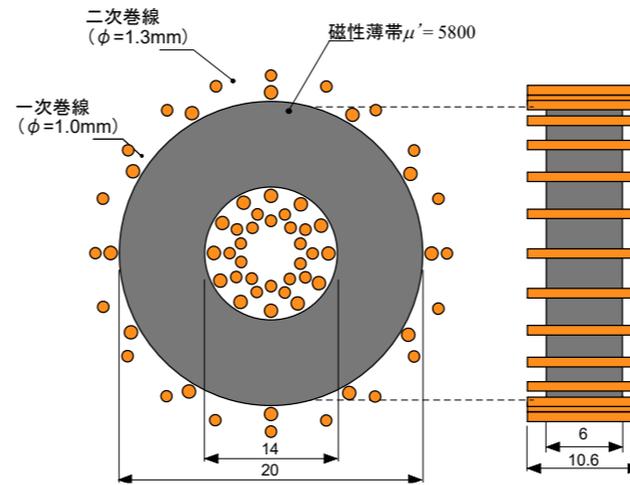


図41 トランス構造図 (寸法:mm)

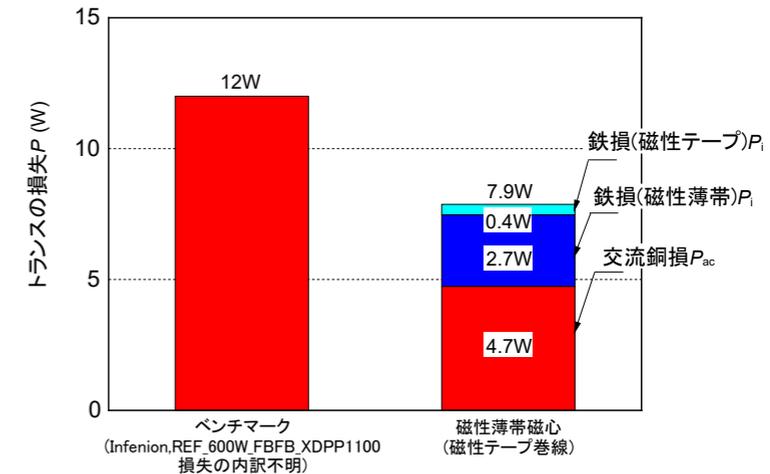


図42 トランスの損失特性 (P<sub>0</sub>=600W)

ベンチマーク(体積2倍)と比較して損失は34%減少 18 / 24

# 6. フルブリッジ・トランスの開発

## 実回路動作における磁気素子損失の高精度測定 (大阪大学)

表10 巻磁心トランスとMn-Znフェライトトランスの仕様

	巻磁心トランス	ベンチマーク
材料	異方性薄帯	Mn-Znフェライト
巻線磁性テープ	あり	なし
$N_1:N_2$	42:13	42:13
1次巻線 ( $R_{DC1}$ )	$\phi = 0.5 \text{ mm}$ (78.3 m $\Omega$ )	$\phi = 0.5 \text{ mm}$ (66.4 m $\Omega$ )
2次巻線 ( $R_{DC2}$ )	$\phi = 0.8 \text{ mm}$ (20.2 m $\Omega$ )	$\phi = 0.8 \text{ mm}$ (15.5 m $\Omega$ )

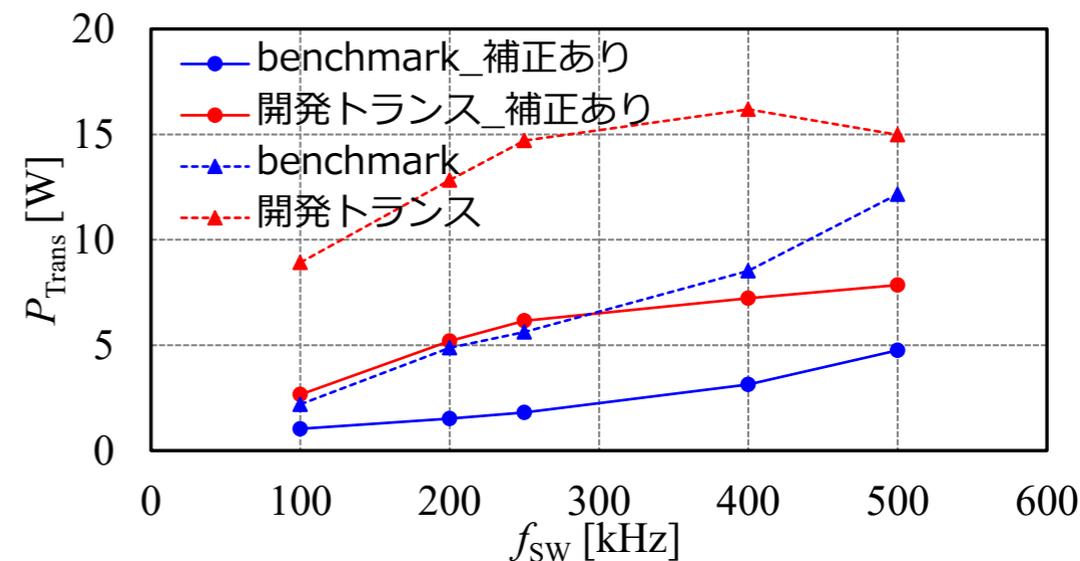


図44 トランス損失評価結果 (駆動周波数依存性)

- 測定プローブのゲイン・位相-周波数特性を補正
- 対ベンチマーク損失比較評価

今後、薄帯の磁路断面積でトランスの再設計を予定  
⇒ トランス作製, 実回路動作による評価

フルブリッジコンバータ  
Input : 48 V/1.25 A  
-> Output : 12 V/5 A (60 W)

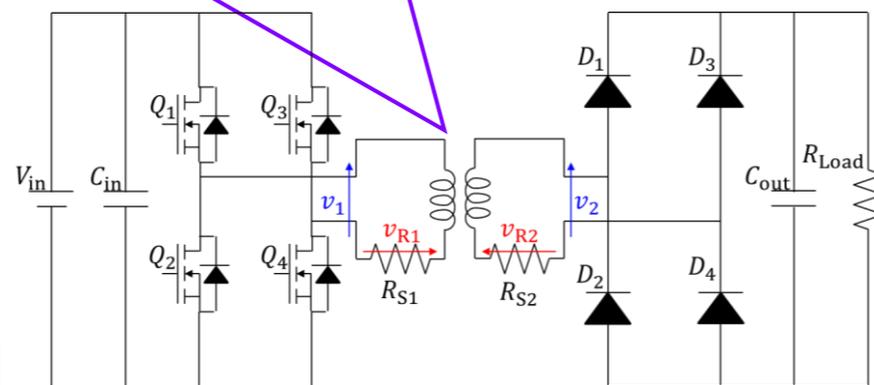
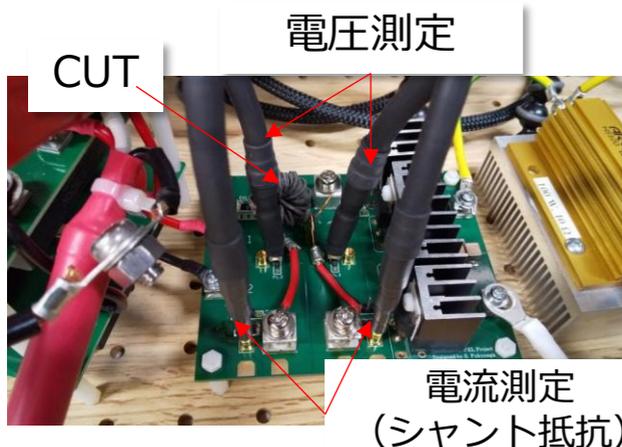
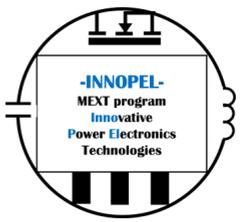
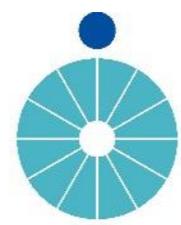


図43 トランス損失評価系



# 7. 磁気素子のモデリングと磁気素子設計技術の確立



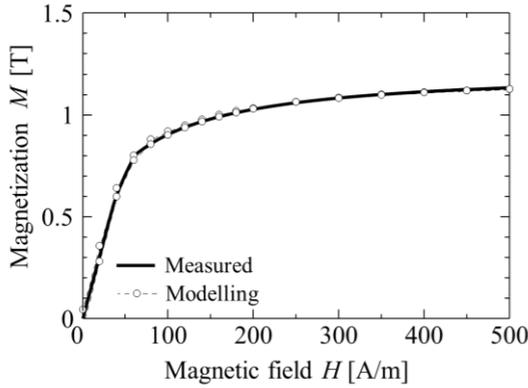
文部科学省

## LLG/Maxwell疑似連成解析と等価回路モデリング

### ◆ 巻磁心トランスを対象に実施

#### ・LLG解析

⇒ 異方性薄帯の実測B-H曲線をフィッティングして異方性分散を推定



⇒ 異方性分散を考慮してスピンドamping損失を含む動的B-H曲線を取得

#### ・Maxwell解析

- ⇒ 巻磁心/通常巻線をモデリング
- ⇒ 薄帯占積率を考慮
- ⇒ 磁化困難軸方向励磁渦電流損失

R-L並列ラダー型等価回路モデリング  
LT-SPICEによるトランス動作解析

**LLG 方程式** EXAMAG

磁気モーメントのダイナミクスを物性値として解析

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2} M \times H_{\text{eff}} - \frac{\gamma \alpha}{(1+\alpha^2)M_s} M \times (M \times H_{\text{eff}})$$

$$H_{\text{eff}} = \frac{\partial E}{\partial M}, \quad E = K_u \sin^2 \theta - M_s H_{\text{DC}} \cos(\pi/2 - \theta)$$

$\alpha$ ; スピンドamping定数,  $\gamma$ ; ジャイロ磁気定数

動的  
B-H 曲線  
周波数  
磁界振幅  
直流バイアス

**Maxwell 方程式** JMAG

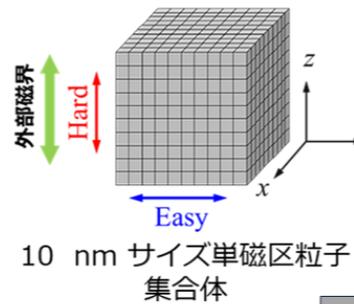
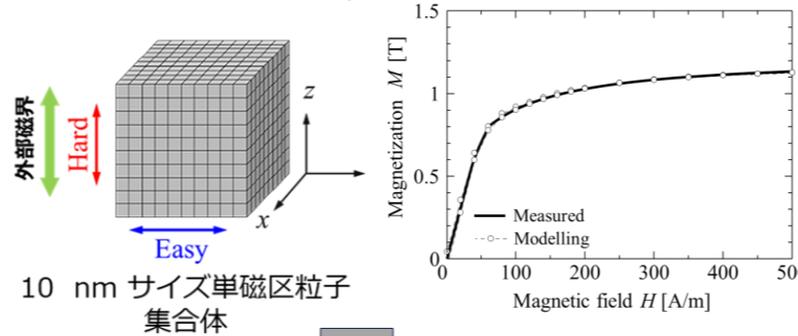
材料中の電磁気現象を解析  
(金属磁性材料を対象; 変位電流を無視, 渦電流, 反磁界)

$$\text{rot } j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial B}{\partial t}, \quad \text{rot } H = j, \quad \text{div } B = 0, \quad \rho; \text{ 抵抗率}$$

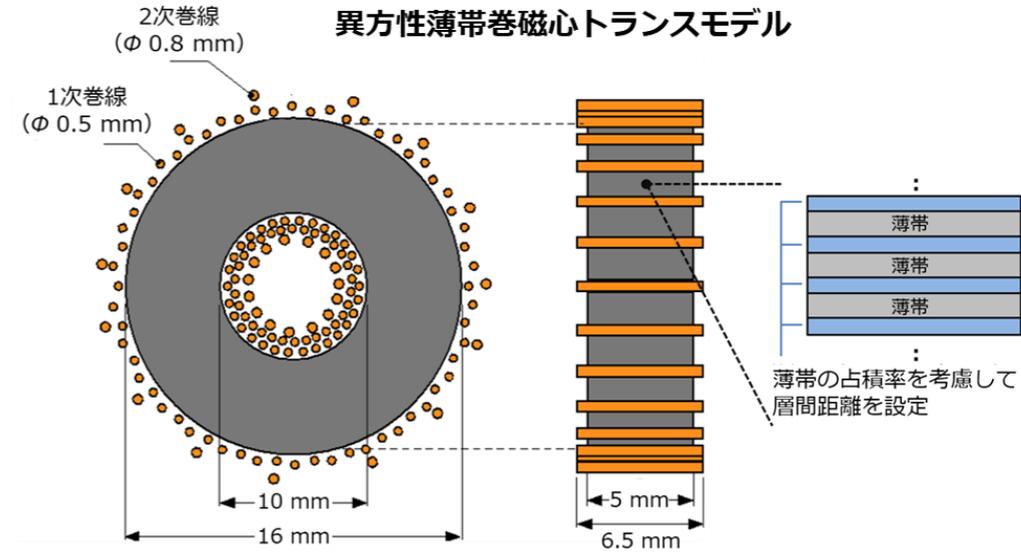
透磁率・鉄損の磁束密度振幅/周波数/直流バイアス磁界依存性  
⇒ LT-Spiceに適用可能な等価回路モデルへ展開

#### 一軸磁気異方性単磁区モデル

- ・飽和磁化  $M_s$ ; 1.2 T
- ・異方性分散  
⇒ エネルギー計算により, 異方性磁界  $H_k$ , 方位  $\theta$  の分散をモデリングして直流 B-H曲線を再現
- ・スピンドamping定数  $\alpha$ ; 0.1



動的B-H曲線



等価回路モデル; R-L並列ラダー回路で表現  
フルブリッジコンバータ回路; LT-SPICEでシミュレーション

図45 LLG/Maxwell疑似連成解析, 等価回路モデリング

# 7. 磁気素子のモデリングと磁気素子設計技術の確立

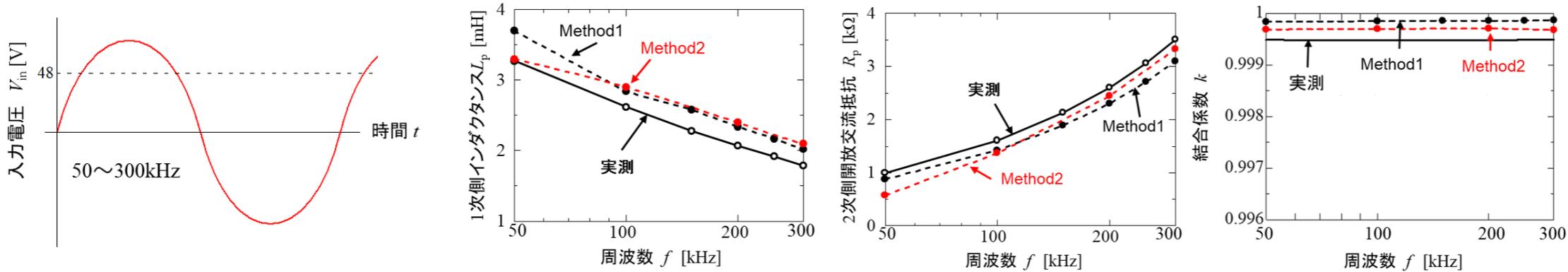
## LLG/Maxwell疑似連成解析と等価回路モデリング

### ◆LLG/Maxwell疑似連成解析

- 実効値48 V正弦波電圧駆動条件で解析

⇒ Method 1 ; Maxwell解析では実測データを入力, Method 2 ; Maxwell解析では抵抗率のみ設定

⇒ トランス特性の実測値をほぼ再現



磁壁移動による異常渦電流損失  
磁歪による動的損失

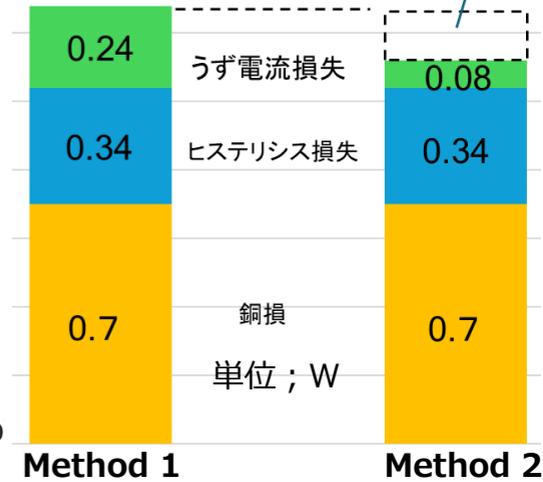


図46 48 V 正弦波電圧入力条件における巻磁心の特徴パラメータ, 損失@100kHzの解析結果

### ◆等価回路モデリングとLT-SPICEによるコンバータ回路でのトランス動作解析

- 周波数依存するトランスの等価回路パラメータをR-L並列ラダー回路でフィッティング, LT-SPICEによる動作解析が可能に

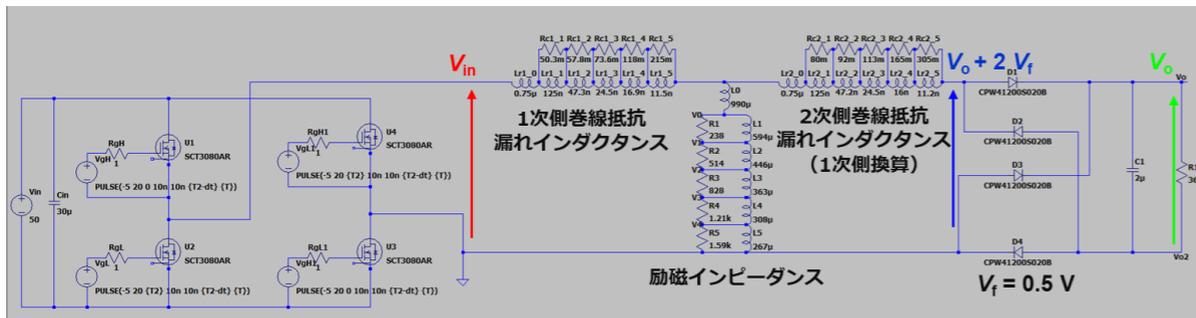


図47 巻磁心トランスの等価回路

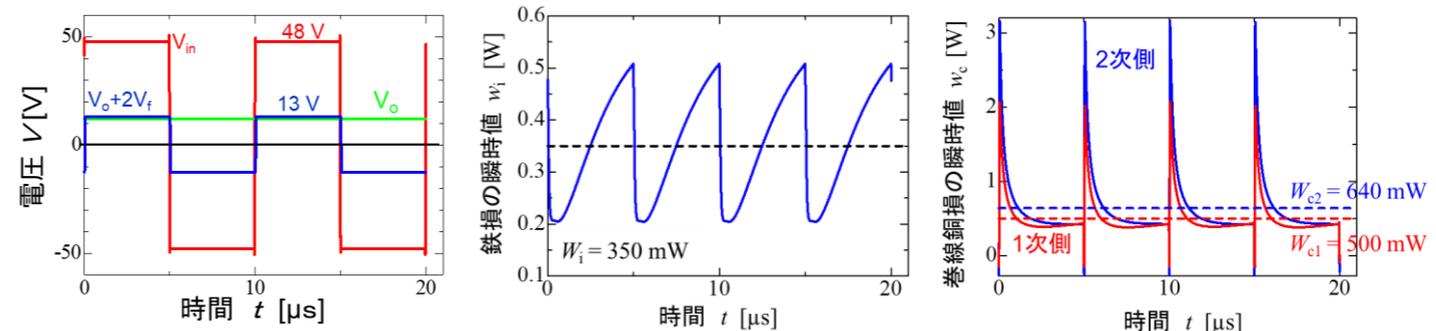
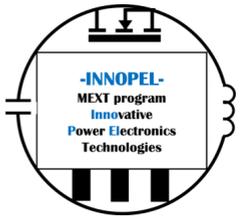


図48 コンバータ実装時のトランス入出力電圧波形, 鉄損と銅損

# 8. まとめ



文部科学省

## (1) 磁性材料の開発

- ・トランス用異方性軟磁性薄帯
  - Mn-Znフェライトとの鉄損比較; 100 kHz以下では同程度、500 kHzでは35%減
- ・インダクタ用ハイブリッド磁心
  - Fe-Si-Al圧粉磁心との鉄損比較; 同程度(ただし、板状粉末圧粉磁心; FINEMET系)
  - 板状粉末の異方性化でさらなる低鉄損化へ

## (2) インダクタ・トランス

- ・昇圧チョッパ用インダクタ; 磁性テープ巻線の適用により交流抵抗を22%低減
- ・フルブリッジコンバータ用トランス; フェライトEEコアトランスと比較して損失64%低減
- ・高周波絶縁トランスを用いた絶縁型コンバータ; 効率70%を達成

## (3) コンバータにおける磁気素子の損失評価

- ・評価方法を確立

## (4) 磁気素子のモデリング

- ・LLG/Maxwell疑似連成解析による等価回路モデルの導出とLT-SPIICEへの適用が可能に