

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)

# 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

岡本 聡

物質・材料研究機構 / 東北大学



吉田 栄吉  
(東北大学)



大久保 忠勝  
(物質・材料研究機構)



和田 圭二  
(東京都立大学)



TOKIN



磁気デバイス  
研究所

# 研究実施体制

物材機構/東北大 テーマリーダー 岡本 聡

## A 磁性材料Gr



物材機構

サブリーダー 大久保忠勝



岡本 聡, H. Sepehri-Amin, 間宮広明, 袖山慶太郎

- インフォマティクス駆動型材料開発
- マルチスケール組織・磁区解析
- 中性子解析



東京理科大 小嗣真人

- トポロジカル解析



産総研 田丸慎吾

小笠原 剛

- 動的損失挙動可視化

## C デバイス・システム評価Gr



東京都立大 サブリーダー 和田圭二



- 高精度評価手法開発
- 実駆動環境下評価手法確立
- 国際標準化提案



名工大 松盛裕明

- 自動計測プラットフォーム
- 高精度評価手法開発



秋田大 高橋 翔太郎

- フィルタ設計・モデリング



京大 松尾哲司

- マクロ数理解析モデル
- デバイス設計

## B デバイス作製Gr



東北大 サブリーダー 吉田栄吉



岡本 聡, 遠藤 恭, 菊池伸明

- データベース構築
- 微視的損失機構解析
- 極薄鋼板・極小磁粉作製



トーキン 及川英彦

- ナノコンポジット粉末開発
- 扁平磁粉開発



青山学院大 佐藤佑樹

- 実駆動環境下デバイス解析
- デバイス設計



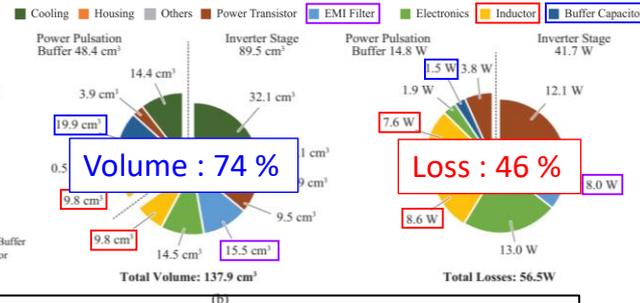
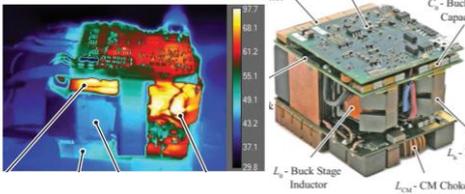
東北マグネット 宮武孝之

インスティテュート

- ナノ結晶薄帯開発
- バルク化検討

## 背景と目的

Google Little Box Challenge (2015)



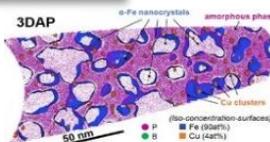
達成目標

次世代小中電源用(100kHz, 1kW-100kW)に対応する超低損失磁性材料および磁性素子開発

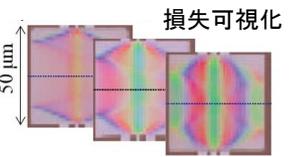
- トランス & インダクタ  
FINEMETと比較し、**体積50%減**で同程度の鉄損
- インダクタ  
既報圧粉磁心と比較し、**トータル損失50%減**

パワエレ用受動素子、中でも**磁性素子の小型化・低損失化が重要**

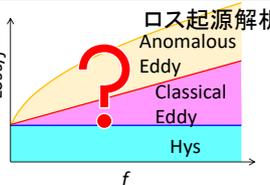
## 研究実施内容



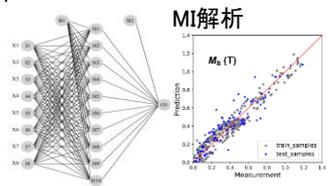
マルチスケール組織解析



損失可視化



ロス起源解析



MI解析



ハイスループット計測プラットフォーム

### 磁性材料

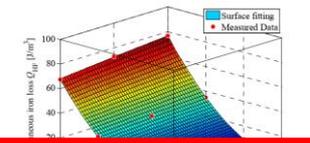
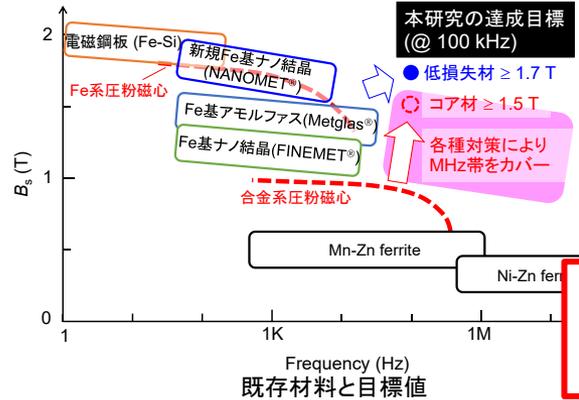
- ロス解析&データベース構築
- 100 kHzでの低損失-高Bs材
- 磁気物性・特性制御
- 微細組織・磁化状態制御

### デバイス作製

- 極薄薄帯、微粒子化 ≤ 10 μm
- 熱処理(応力, 組織, 異方性制御)
- 積層プレス、積層接着プロセス
- モデリング
- デバイス設計(新規)
- デバイス試作(強化)
- 小型・軽量化デバイス試作(強化)

### デバイス・システム評価

- 実駆動環境下での特性評価・損失解析(強化)
- 回路システム・駆動方式に対するデバイス最適化(強化)
- システム連携でEMC対策(強化)
- 国際標準化提案



ノーカットコアトランス (WBトランス)

**高 $B_s$  ( $\geq 1.5$  T) 低損失軟磁性材料の開発**  
 $P_{cv} \leq 70 \text{ kW/m}^3$  ( $B_m = 0.1 \text{ T}, f = 100 \text{ kHz}$ )



評価装置開発

# パワエレ用軟磁性研究の課題 (プロジェクトスタート時)

## 学術基盤が脆弱

- ✓ 鉄損理論を含む基礎研究において、30年ほど大きな進展が無い。
- ✓ 新規低鉄損材料の開発も停滞。

## 鉄損計測・評価手法が十分に確立されていない

- ✓ 岩通BHアナライザーが標準測定機として認知される一方、学術的な課題や精度などの理解が不十分。
- ✓ 任意波形における課題抽出なども不十分。

## パワエレ研究者との連携は殆ど無い

- ✓ パワエレにおける重要な点などについて連携は殆ど無かった。

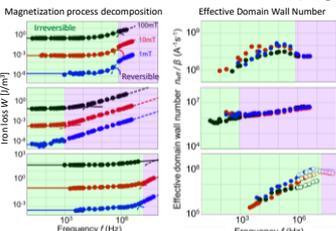


# 5年間の成果まとめ

## 学術基盤の構築

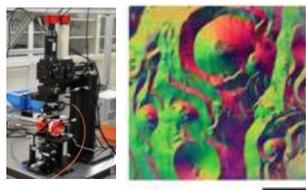


### ■ ブロードバンド鉄損解析



[Ono, JMMM (2024)]

### ■ ベクトル動的磁区測定

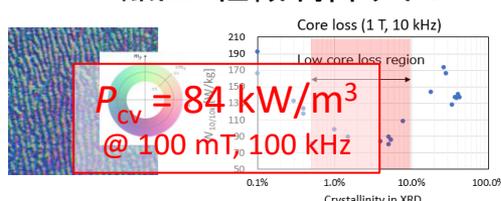


[Ogasawara, JJAP (2022)]

## 高 $B_s$ 低鉄損材料の新規開発

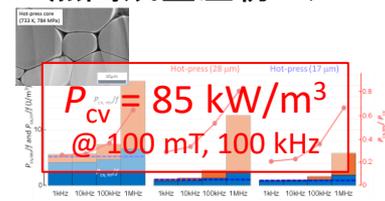


### ■ 磁区・組織制御リボン



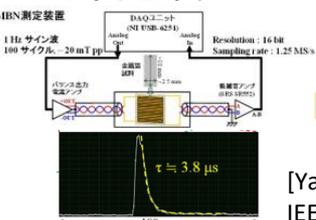
[Ravi, Nat Comm (2025)]

### ■ 熱間成型圧粉コア



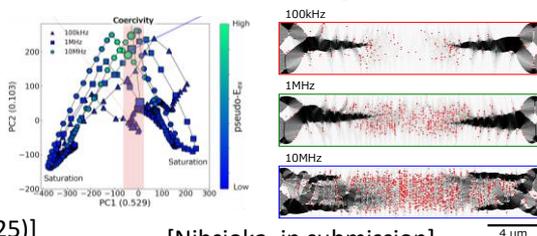
[Kuno, Acta Mater. (2025)]

### ■ 超高感度MBN測定



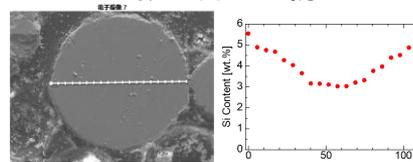
[Yamazaki, IEEE Mag (2025)]

### ■ データ駆動型解析



[Nihsioka, in submission]

### ■ Fe-Si傾斜組成紛



[Yoshida, unpublished]

## 鉄損計測・評価手法の開発



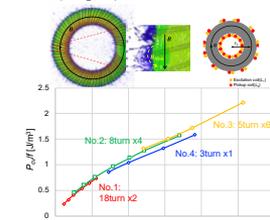
磁気デバイス研究所



## パワエレ回路・実装評価

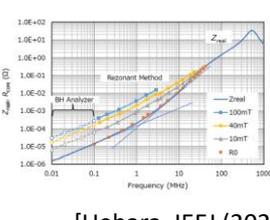


### ■ 鉄損補正手法



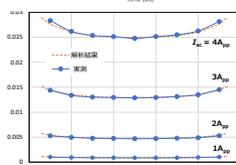
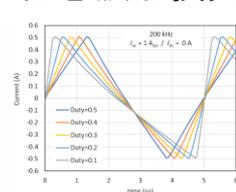
[Sato, IEEE Magn (2023)]

### ■ 鉄損精度検証



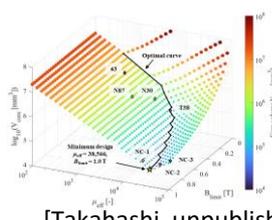
[Uehara, IEEJ (2023)]

### ■ 任意波形損失推定



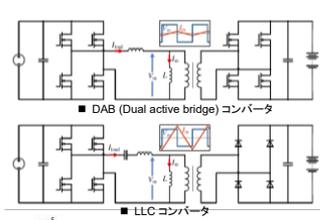
[Uehara, unpublished]

### ■ 最適設計手法

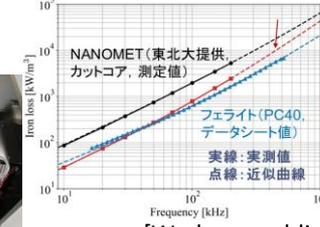


[Takahashi, unpublished]

### ■ 試作コア実装評価

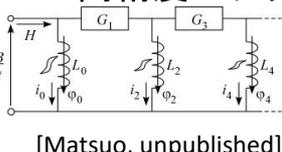


### ■ 実駆動評価装置



[Wada, unpublished]

### ■ 高精度モデリング



[Matsuo, unpublished]

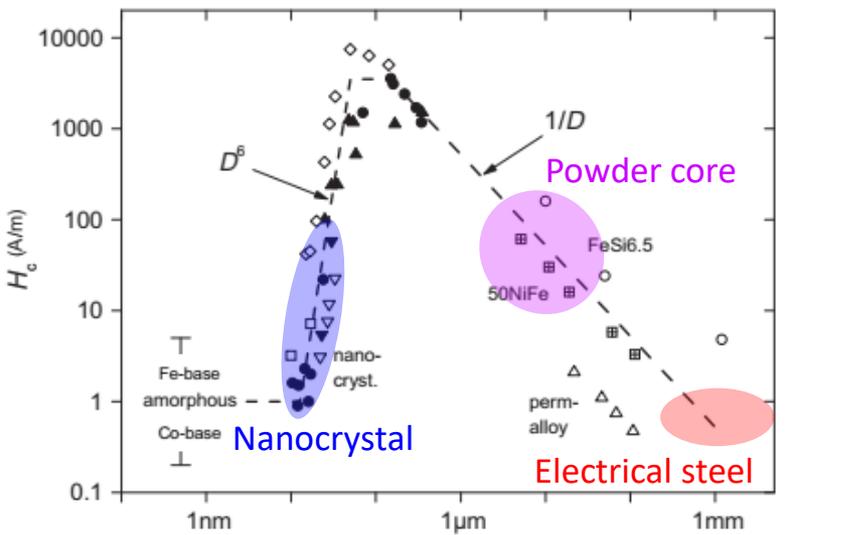
[Ravi, Nat Comm (2025)]

## ナノ結晶材料

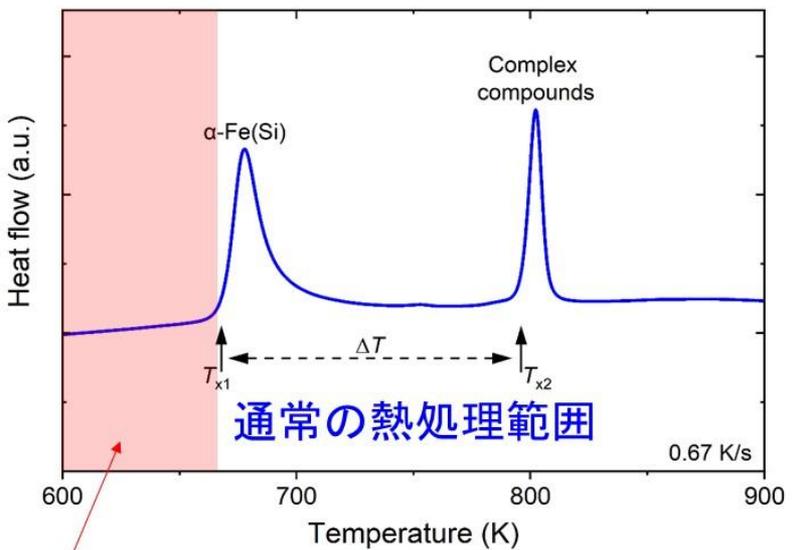
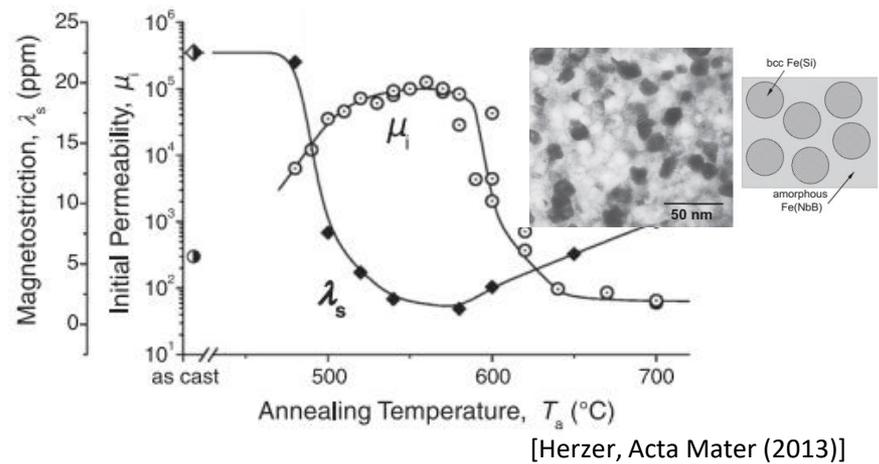
## 技術的課題

- ナノ結晶化により、優れた軟磁気特性と引き換えに著しい脆化
- 高 $B_s$ ナノ結晶では急速加熱が必要

## 本開発材



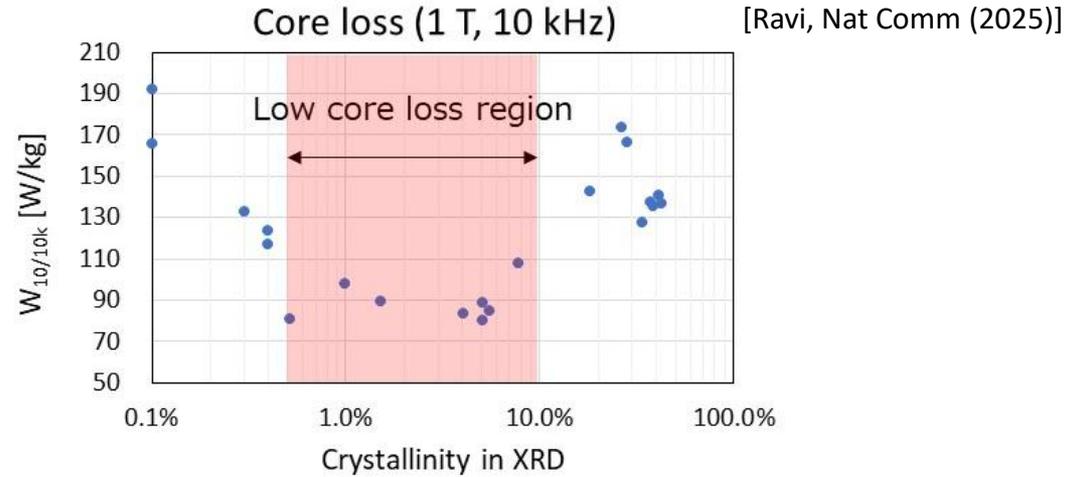
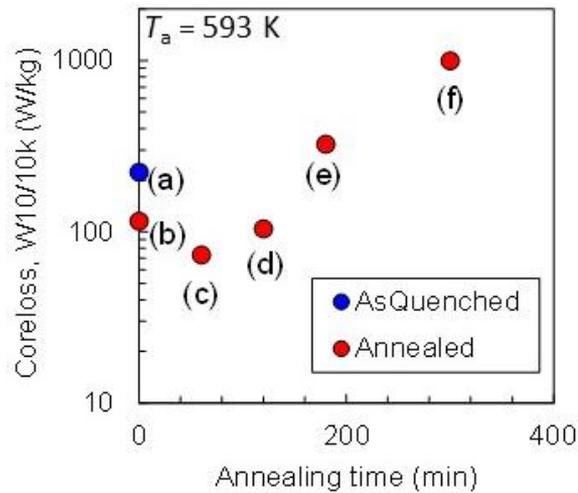
$Fe_{84.8}Si_{0.5}B_{9.4}P_{3.4}Cu_{0.8}C_{1.1}$  amorphous precursor ribbon



通常は結晶化度50%で最適特性

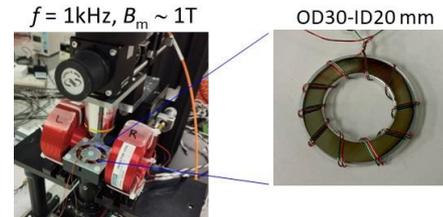
今回の熱処理範囲

[Herzer, Acta Mater (2013)]



■ 低温-長時間熱処理において、低結晶化度(10%以下)で超低損失が発現

ベクトル動的磁区測定

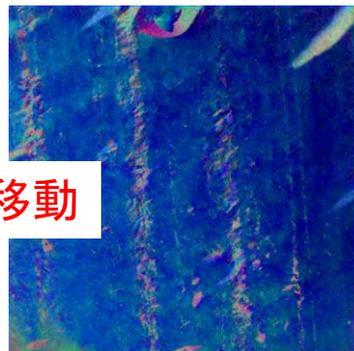
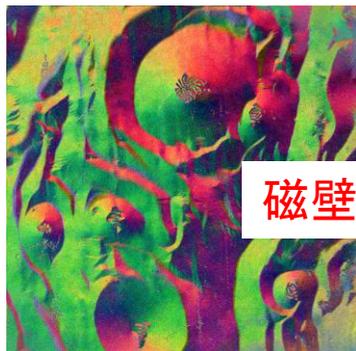


(a) AsQ

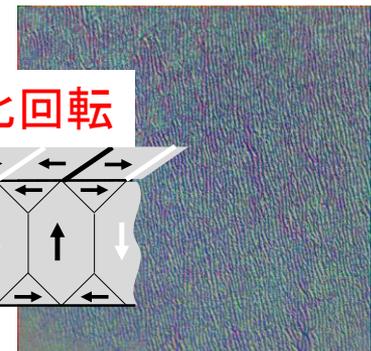
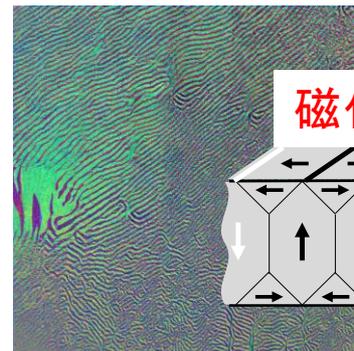
(b) 0 min

(c) 60 min

(d) 120 min

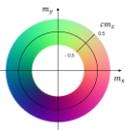


磁壁移動

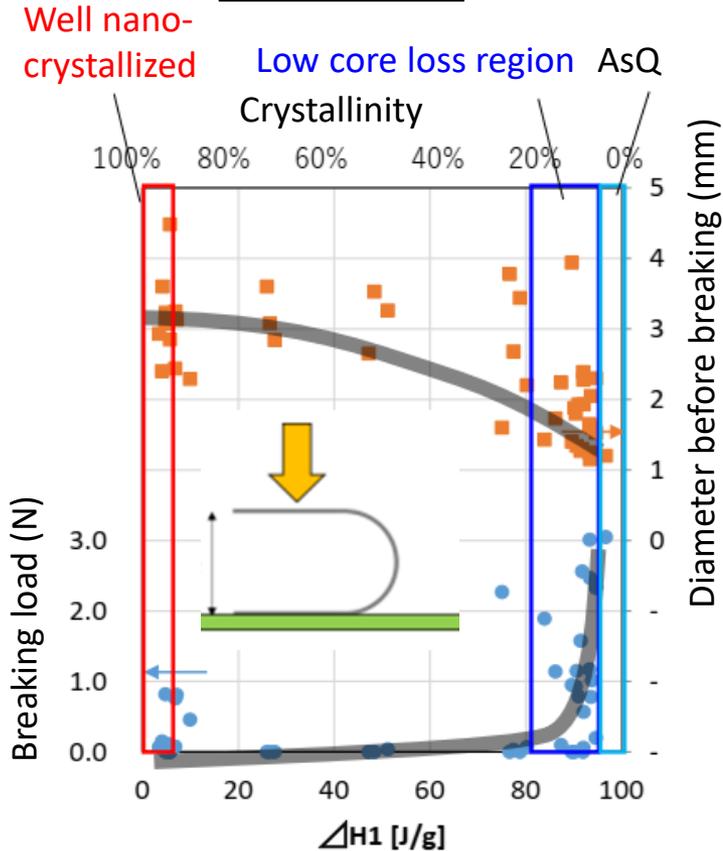


磁化回転

250  $\mu\text{m}$

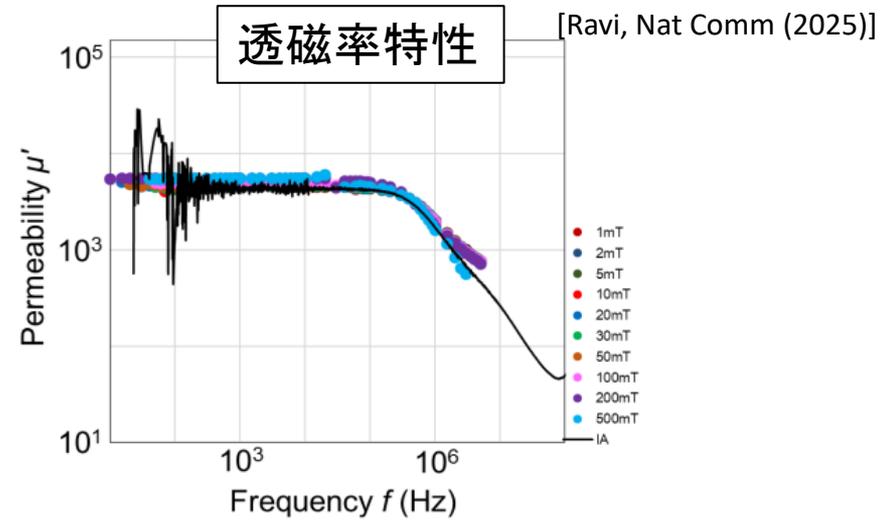


## 曲げ試験



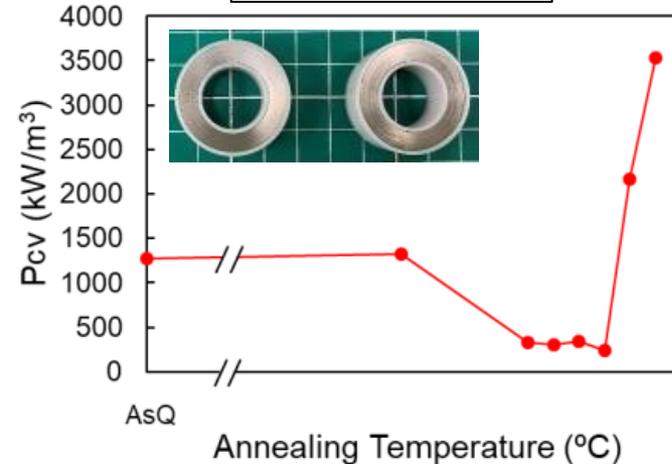
■ 脆化抑制と低損失化に成功

## 透磁率特性



■  $B_m$  に対して  $\mu$  は一定の特性を示す

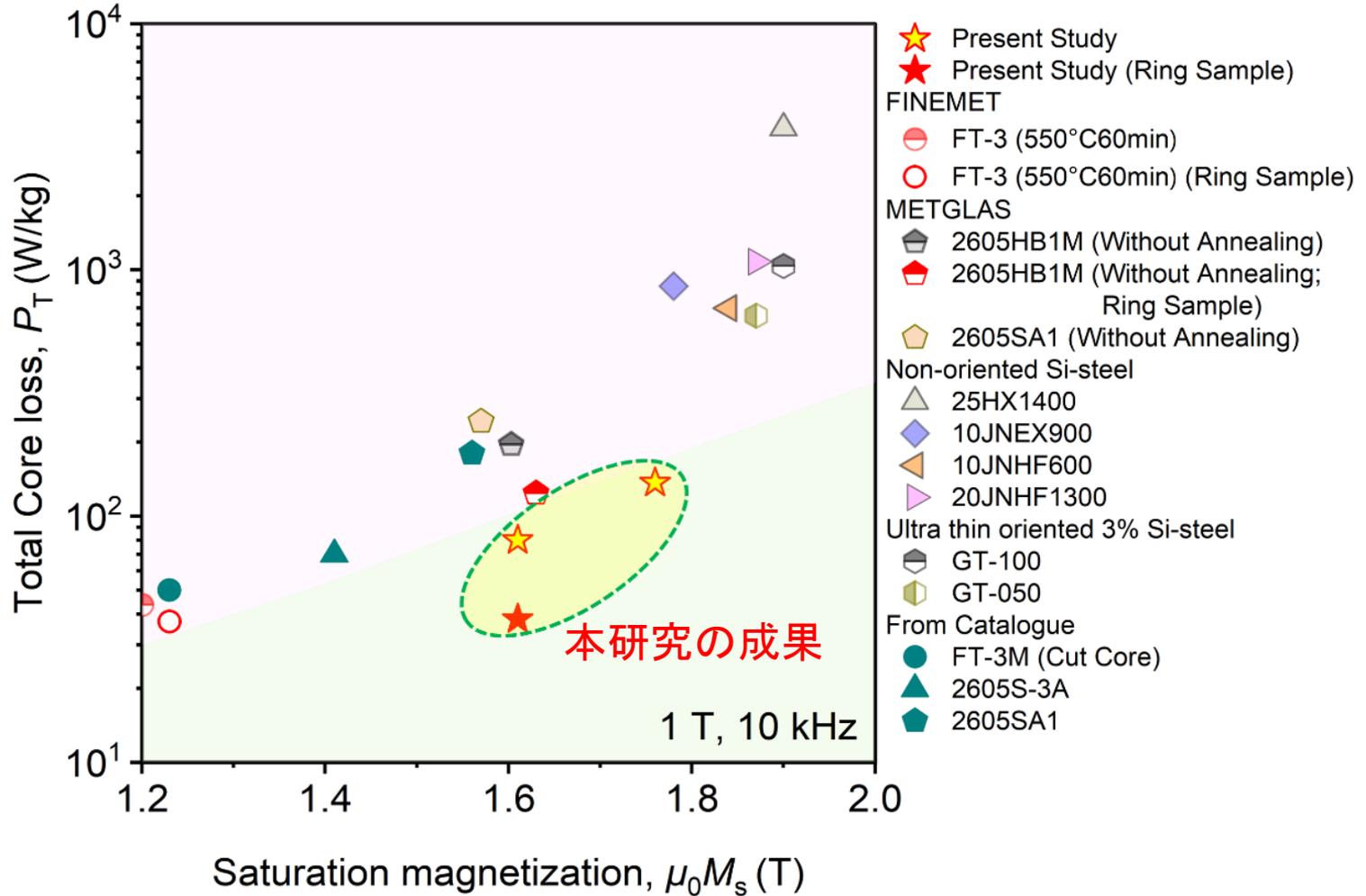
## 巻回コア試作



■ 巻回コアでも低損失化を確認

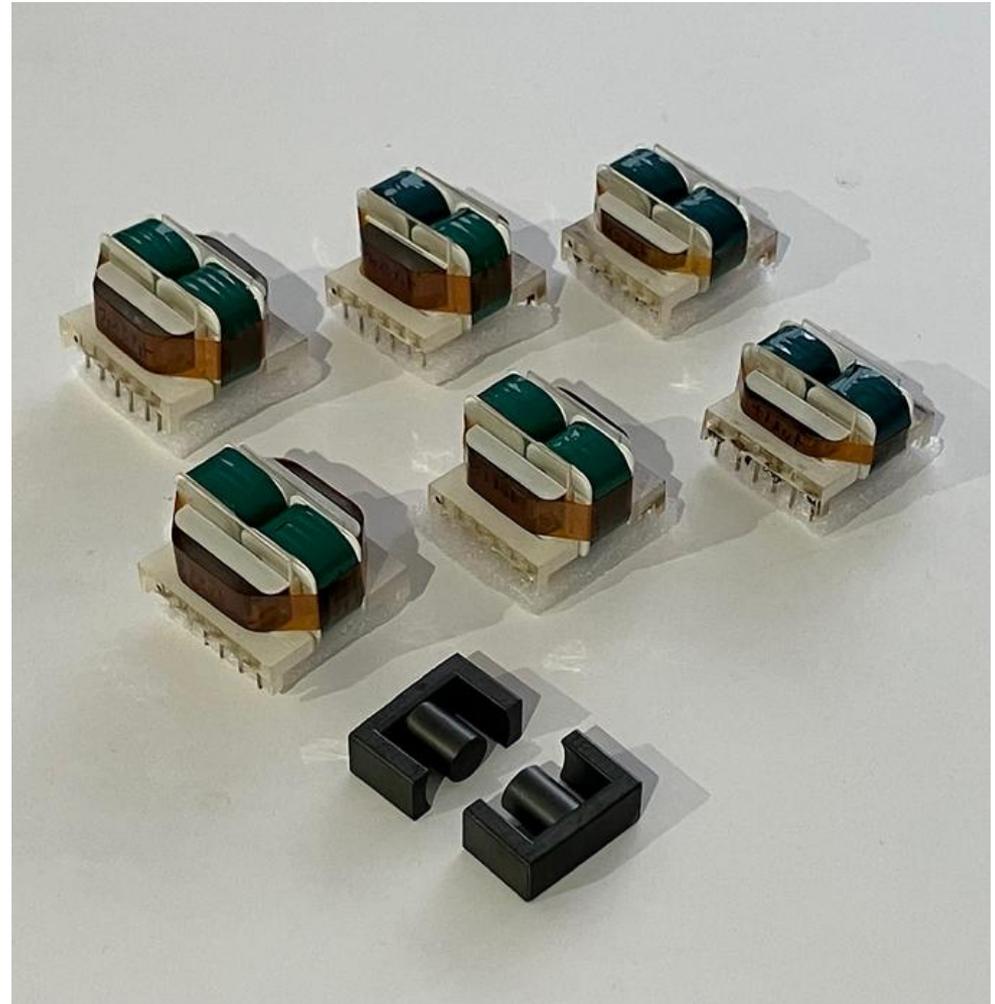
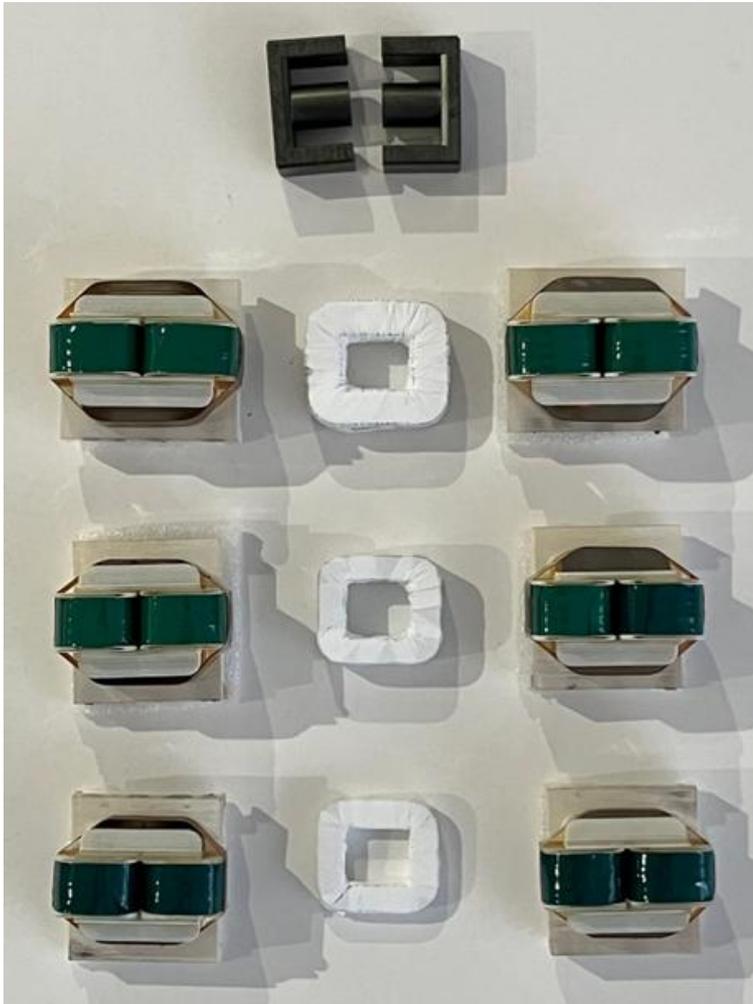
[Ravi, Nat Comm (2025), Addendum]

## ベンチマーク(既存商用材料)比較



■ FINEMETと同程度の低損失かつ高 $B_s$ を達成

## トランス試作

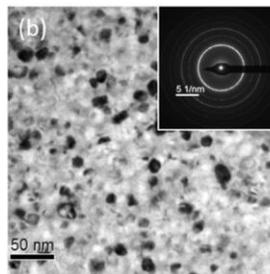


## 高 $B_s$ ナノ結晶材料

2007 nc-Fe-Si-B-Cu (1.84 T), Ohta

2011 nc-Fe-Si-B-P-Cu (1.8 T), Urata

2017 nc-Fe-B (1.9 T), Suzuki



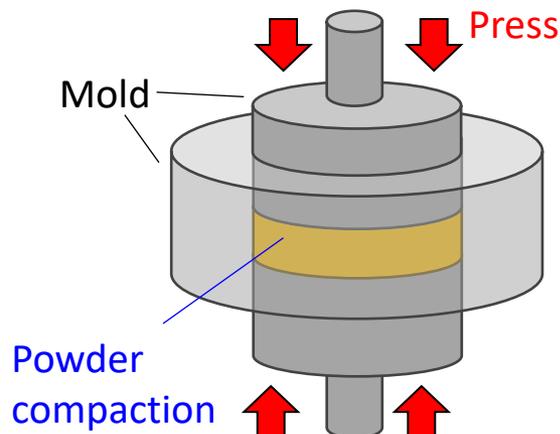
[Zang, Scripta Mater. 132, 68 (2017)]

## 圧粉コアにおける技術的課題

- ナノ結晶化した後では非常に高い硬化と脆化のため、充填率が低い
- プレス成型後のナノ結晶化は熱暴走の恐れ



## 圧粉コアの高充填率化手法



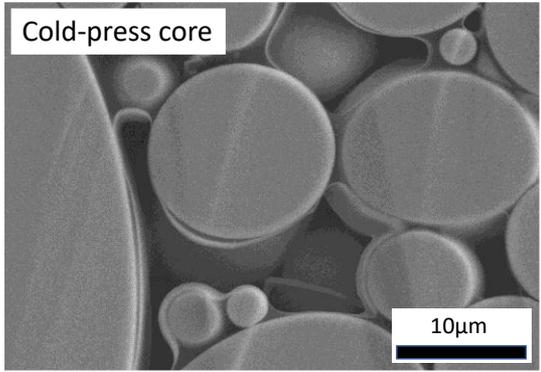
■ 通常プレス : 冷間成型

■ プレス + ⚡ : スパークプラズマ焼結 (SPS)

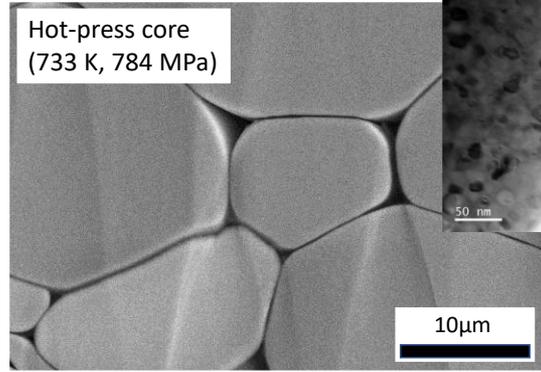
■ プレス + 🔥 : 熱間成型

## 組織構造

[Kuno, Acta Mater. (2025)]



充填率 70 %

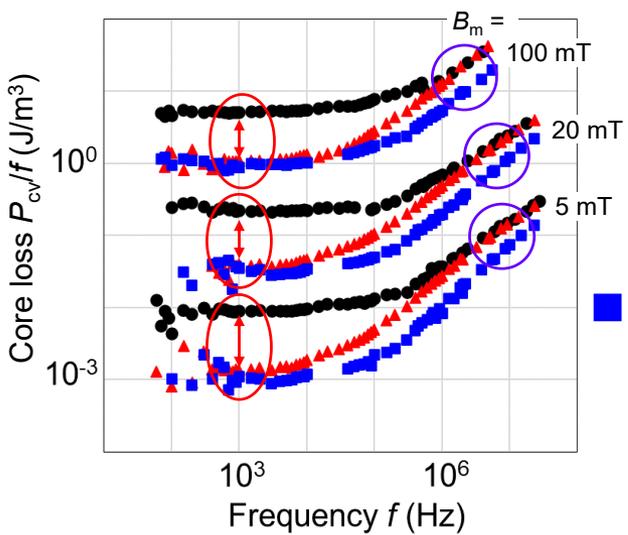
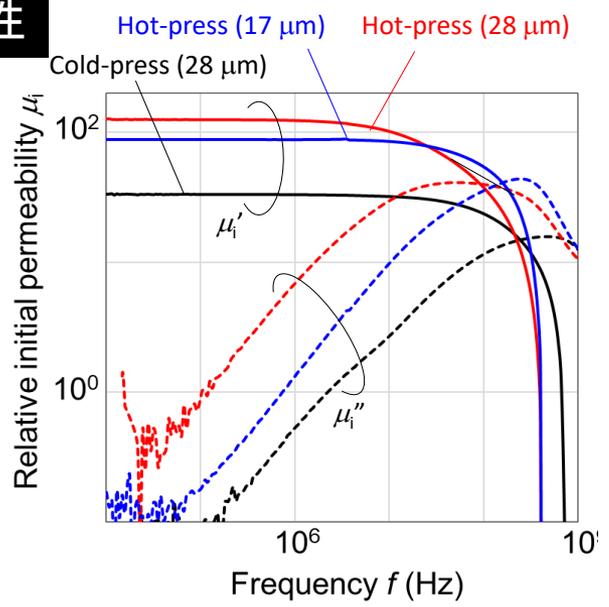


充填率 89 %

■ 粒子形状は球形を保ったまま

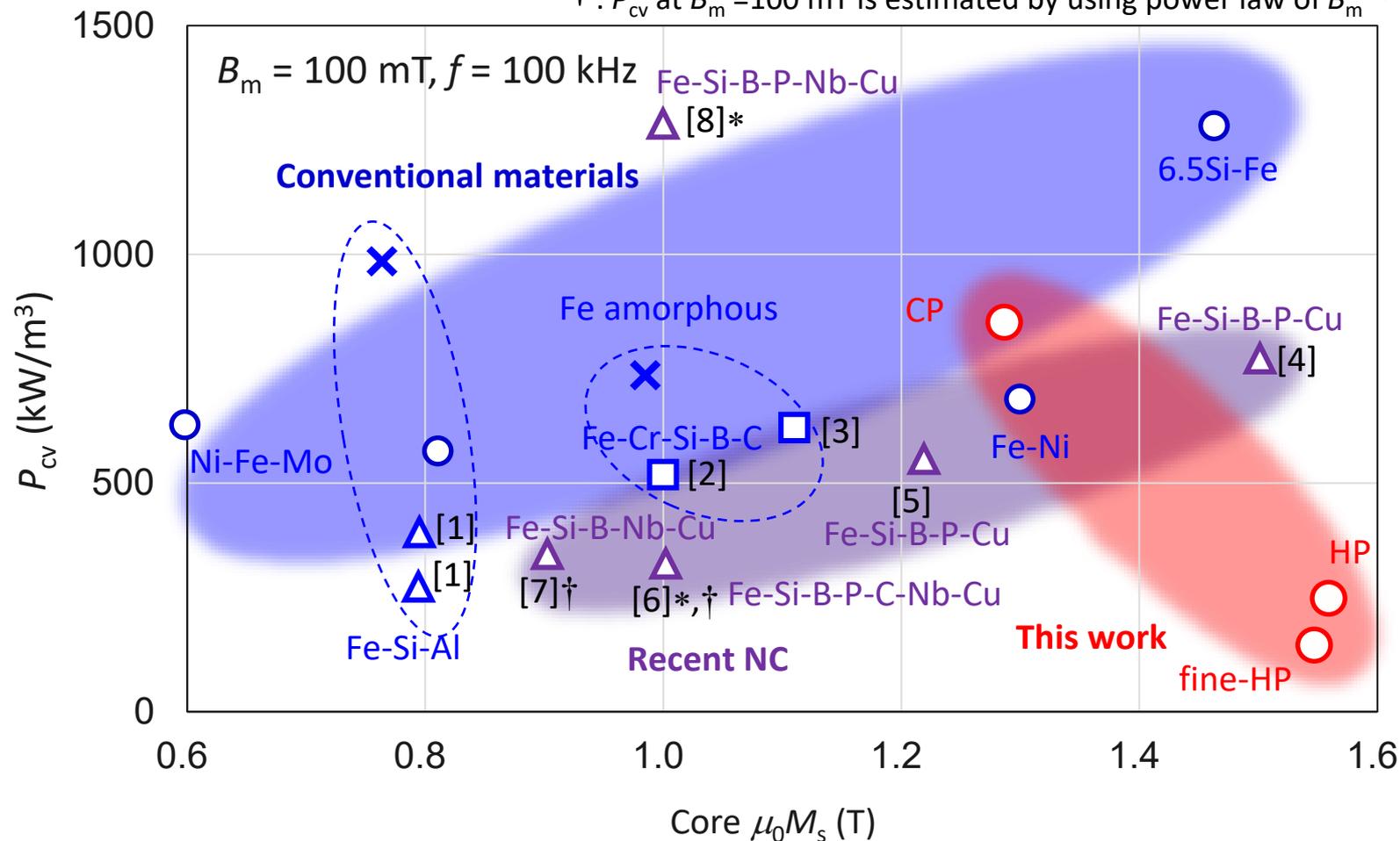
■ 塑性変形とナノ結晶化が同時に進行

## 磁気特性



■ 熱間成型により高透磁率と低損失を実現

\* : core  $\mu_0 M_s$  is estimated by assuming packing density of 0.7 [Acta Mater. (2025)]  
 † :  $P_{cv}$  at  $B_m = 100$  mT is estimated by using power law of  $B_m^{1.6}$



■ センダスト(Fe-Si-Al)と同程度の低損失かつFe-Siと同程度の高 $B_s$ を実現

[1] Tsuruta, J. Jpn. Soc. Powder Powder Metal. (2016), [2] Yagi, JMSJ (2002), [3] Yagi, JMMM (2000), [4] Zhang, IEEE Trans. Magn. (2014), [5] Luan, AIP Adv. (2016), [6] Zhang, J. Mater. Sci. (2024), [7] Wang, JMMM (2024), [8] Lia, Intermetallics (2018).

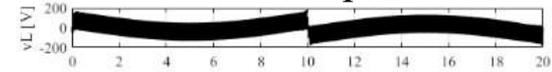
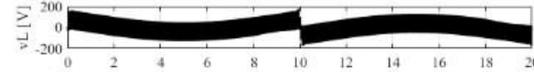
## PWMインバータによる評価

$f_o=50\text{Hz}$ ,  $f=100\text{kHz}$ ,  $m=0.8$ ,  $V_{dc}=160\text{V}$ ,  $i_{Rmax}=8.1\text{A}$

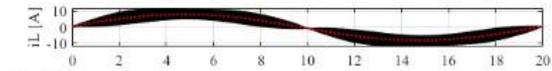
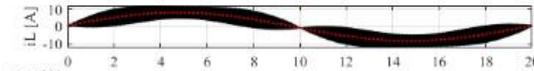
◆ Tokin ur=90

◆ POCO npX60

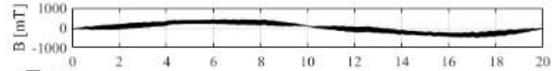
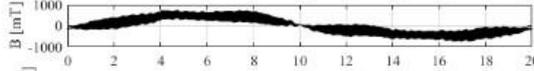
インダクタ電圧



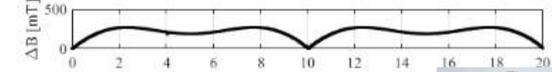
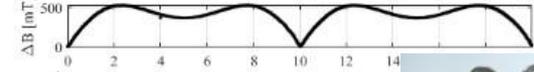
インダクタ電流



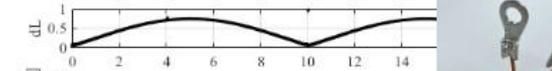
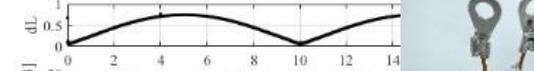
磁束密度



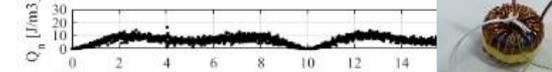
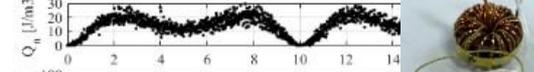
磁束密度リップル



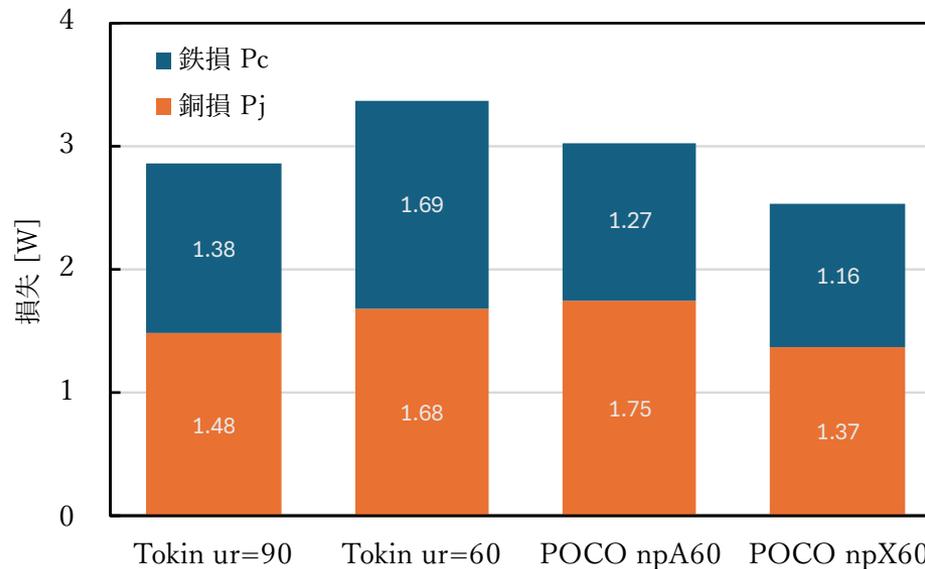
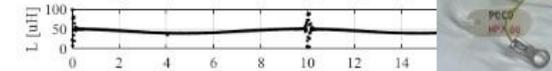
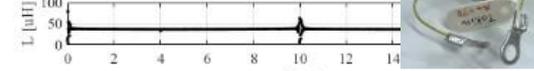
デューティ比



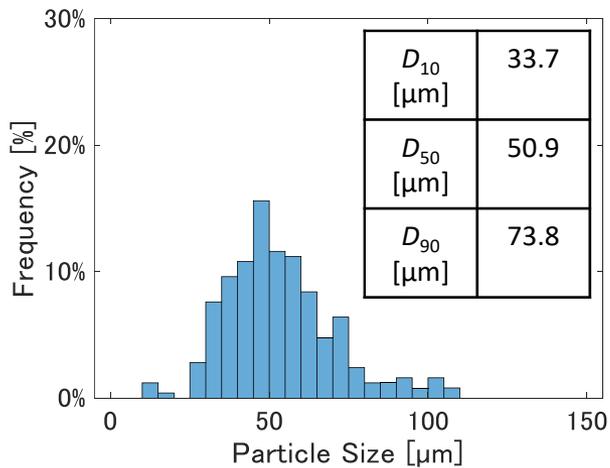
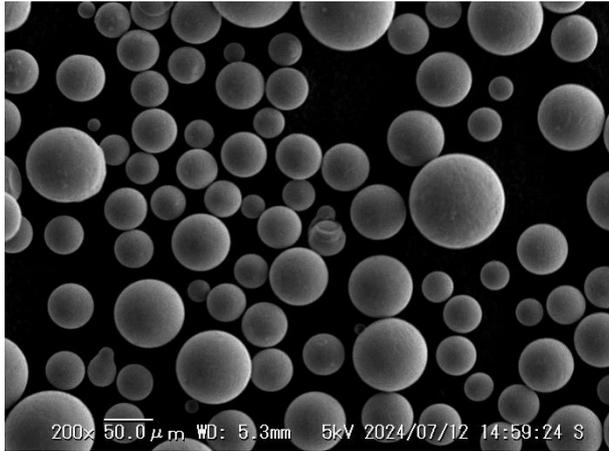
高周波鉄損



インダクタンス



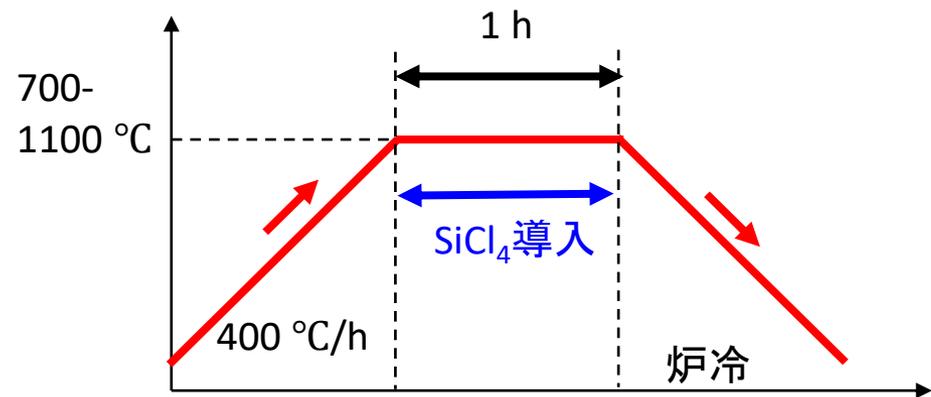
出発粉末 PREP Fe-3%Si



自作回転CVD侵珪装置

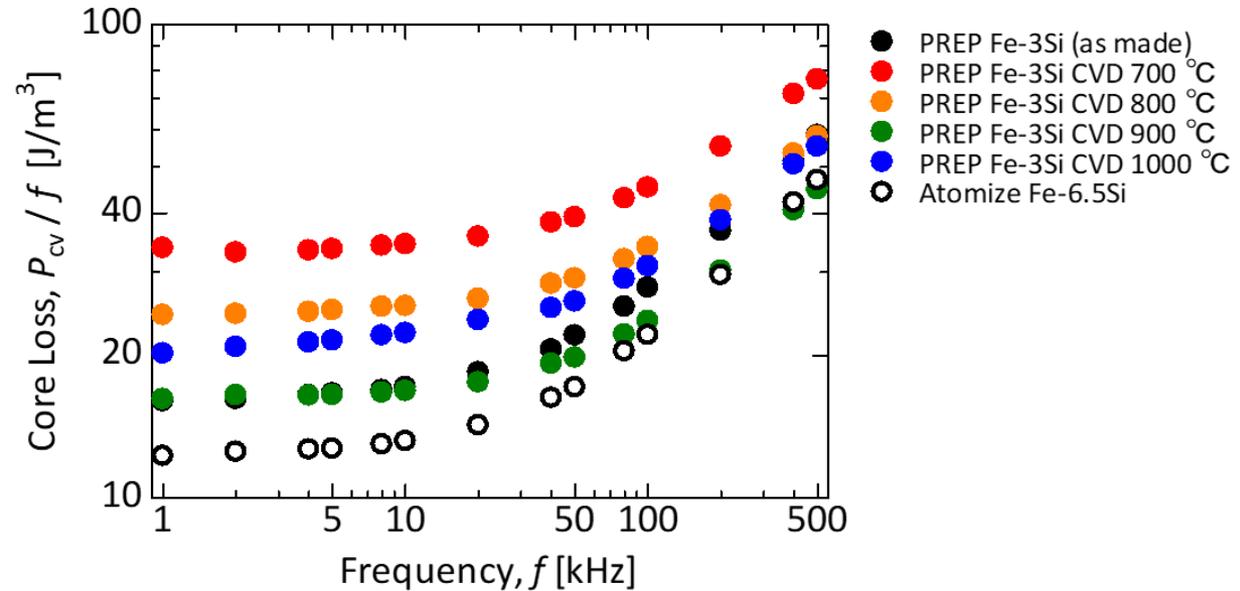
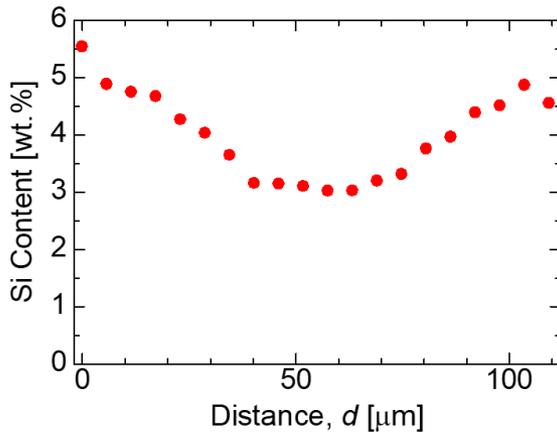
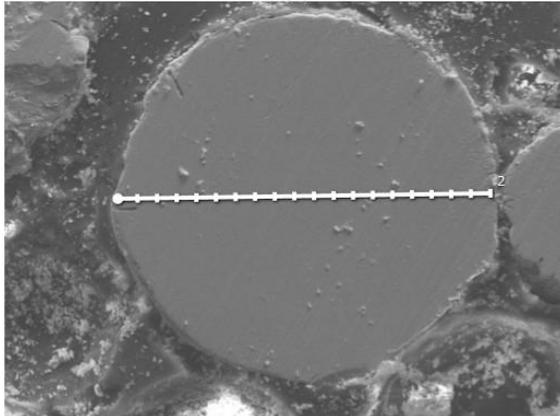


浸珪プロセス



# 傾斜組成Fe-Si粉の開発

電子線像 7



- 組成傾斜Fe-Si粉末(表層5-6%,内部3%)の作製に成功
- 出発粉(Fe-3%Si)よりも低鉄損かつ、ベンチマーク(Fe-6.5%Si)粉と高周波領域で同程度の鉄損を実現

# パワエレ用軟磁性研究の課題 (プロジェクトスタート時)

## 学術基盤が脆弱

- ✓ 鉄損理論を含む基礎研究において、30年ほど大きな進展が無い。
- ✓ 新規低鉄損材料の開発も停滞。



## 鉄損計測・評価手法が十分に確立されていない

- ✓ 岩通BHアナライザーが標準測定機として認知される一方、学術的な課題や精度などの理解が不十分。
- ✓ 任意波形における課題抽出なども不十分。



## パワエレ研究者との連携は殆ど無い

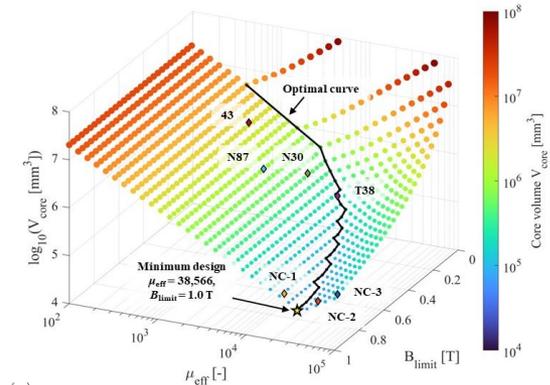
- ✓ パワエレにおける重要な点などについて連携は殆ど無かった。



# 今後の課題

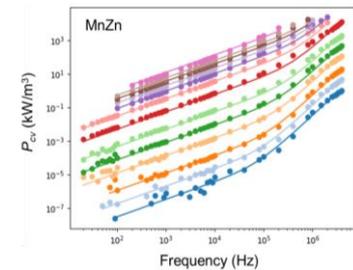
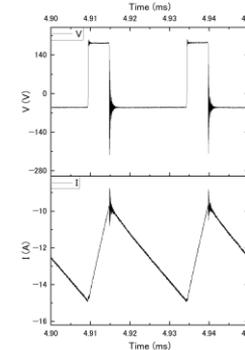
## 低損失材料開発

- ✓ 高周波領域での鉄損機構の更なる理解と制御
- ✓ 駆動条件における磁気特性( $\mu$ ,  $B_s$ )、鉄損、プロセスの最適化



## 計測・モデリング技術

- ✓ リンギングなども含む実駆動環境下の任意波形における高精度な計測
- ✓ シミュレーション・モデリング技術の統合



回路設計と材料設計の高度な統合

磁性デバイスは選ぶものから、設計するものへ

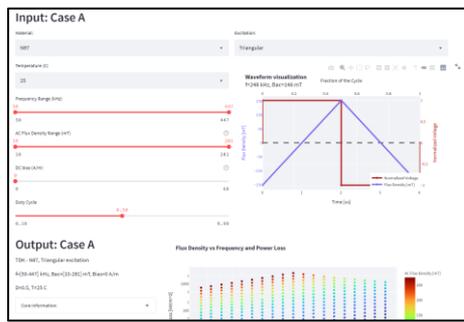
AI駆動型の研究展開



# AI駆動研究の現在の取り組み

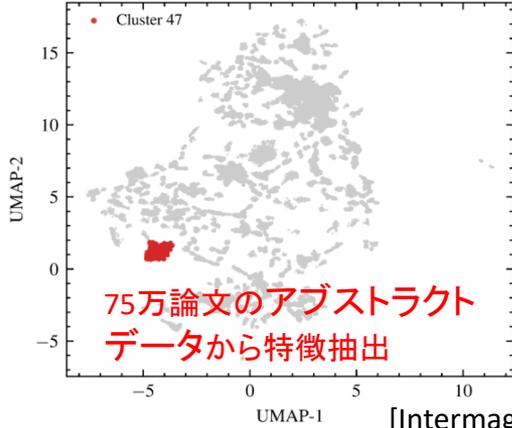
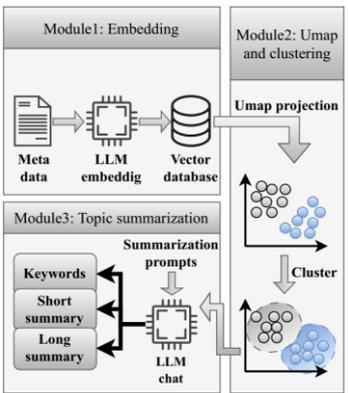
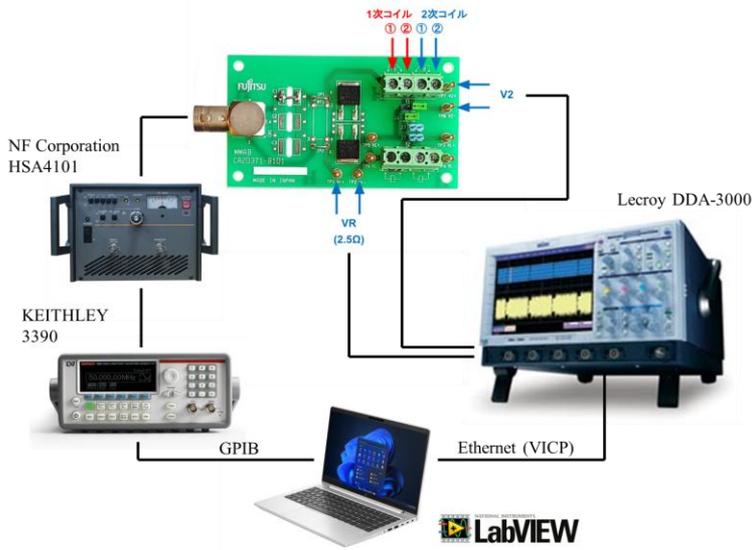


[<https://mag-net.princeton.edu/>]

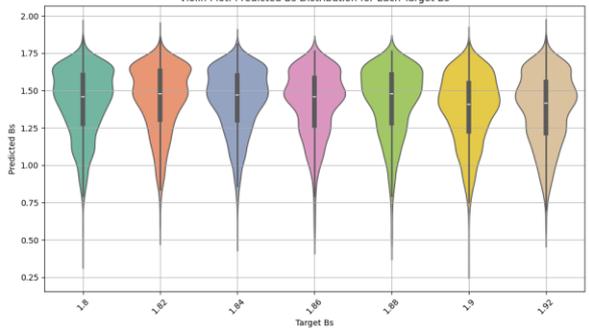


## 日本版MagNETの構築

- 鉄損自動計測
- 軟磁性AIプラットフォーム



[Intermag2026で発表予定]



各ターゲット $B_s$ に対して、1,500組成データを生成