

極低温環境下における超電導非接触給電システム向け 軟磁性材料の磁気特性評価

岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域 助教

井上 良太

1. はじめに

近年、脱炭素社会の実現へ向けて、電気自動車（EV）が注目されている¹⁾。その一方で、EVの普及率は非常に低い。その原因の一つとして、バッテリーへの充電時間が長いことが挙げられる（ガソリン車の給油時間の10倍以上）。そのため、安全かつ簡便な大容量非接触給電システムの検討が進んでいる²⁻⁴⁾。しかし、銅コイルを用いた場合、電気抵抗による発熱から送電容量が制限される欠点があった。そこで、申請者は、低損失で大電流通電できる高温超電導コイルを用いた大容量非接触給電システムの検討を進めている⁵⁻⁶⁾（図1）。本システムにおいて、高効率で大電力伝送するためには、送受信コイルの背面に軟磁性材料を配置する必要がある。特に、超電導コイルを用いる場合は、軟磁性材料を含めて冷却することも考えられることから、「極低温下（77 K 以下）」で、高透磁率（低損失化）かつ高飽和磁束密度（小型軽量化）の軟磁性材料」を選定する必要がある。その一方で、軟磁性材料を販売する企業では“常温”における磁気特性は明確にされているものの、“極低温下”における磁気特性は、国内外において正確に測定された報告例は非常に少ない状況である。そのため、超電導非接触給電システムに適した軟磁性材料が不明確であった。そこで、本研究では、液体窒素下（77 K）で磁気特性評価が可能な小型単板磁気試験器を用いて、図2で示した様々な軟磁性材料の磁気特性を評価することで、超電導非接触給電システムに適した軟磁性材料を明確にした。さらに、小容量の超電導非接触給電システムを構築し、軟磁性材料の配置位置および冷却有無が電力伝送効率に与える影響について検討した。

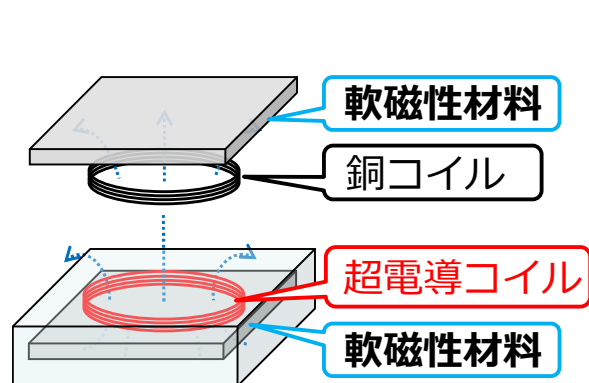


図1. 軟磁性材料を用いた
超電導非接触給電システム

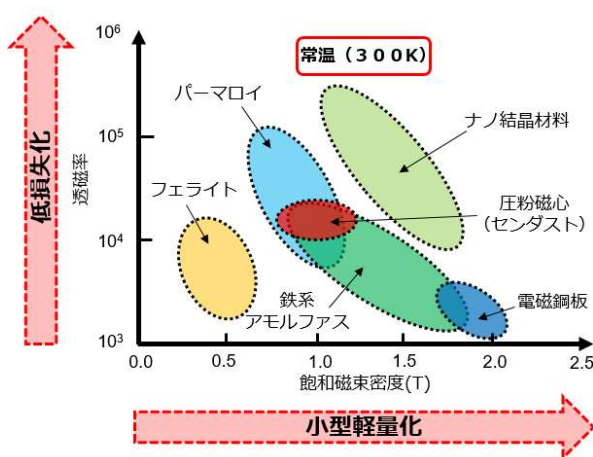


図2. 常温（300 K）における軟磁性材料の
飽和磁束密度に対する透磁率

2. 液体窒素下における軟磁性材料の磁気特性評価⁷⁾

本検討では、常温(RT: Room Temperature)および液体窒素温度(77 K)下において、ナノ結晶材料およびアモルファス、パーマロイ、電磁鋼板、フェライトにおける磁気特性の評価を行った。

磁気特性の測定には、図 3 に示す小型単板磁気試験器(SST: Single Sheet Tester)を用いた。なお、測定周波数は 50 Hz である。ここで、高磁場下における磁気特性測定では、B コイルの電圧波形制御（B コイルの電圧波形が正弦波となるように励磁電流波形を制御）を行った。

図 4 に、RT および 77 K におけるナノ結晶材料、アモルファス、パーマロイ、電磁鋼板、フェライトの鉄損の比較結果(0.5 T, 50 Hz)を示す。図 4 より、77K における各軟磁性材料の鉄損は、フェライト、電磁鋼板、パーマロイ、アモルファス、ナノ結晶材料の順に低減した。ここで、一般的な非接触給電システムの磁気シールドとして用いられるフェライトの鉄損は、77 K では常温と比べて 10 倍以上に増加した。そのため、フェライトは低温環境下での使用に適していないと考えられる。一方で、77 K におけるナノ結晶材料、アモルファス、パーマロイの鉄損は、常温におけるフェライトの鉄損に比べて低いことがわかった。特に、ナノ結晶材料は常温、77 K のいずれにおいても最も低損失であることが明らかとなった。これは、ナノ結晶軟磁性材料の微細構造により、保持力が極めて小さくなるためと考えられる⁸⁾。以上より、超電導非接触給電システムにおける超電導コイルの背面には、ナノ結晶材料を用いたコアが適していることが明らかになった。

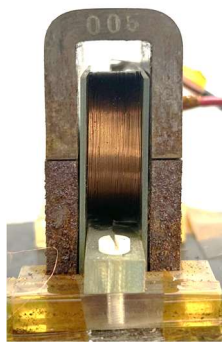


図 3. 小型単板磁気試験器

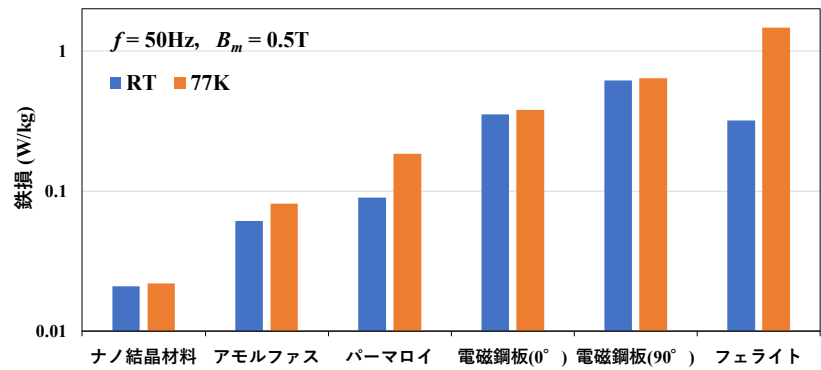


図 4. 軟磁性材料の鉄損比較

3. 軟磁性材料を用いた超電導非接触給電システムの構築および電力伝送実験⁹⁻¹⁰⁾

液体窒素下において様々な軟磁性材料の磁気特性を測定した結果、ナノ結晶材料が低周波領域（50 Hz）で低損失であることが明らかになった。その一方で、ナノ結晶材料は金属系であるため、10 kHz 以上の高周波領域で運用する非接触給電システムに適用するためには渦電流対策が必須である。そこで、本研究ではまず、一般的な非接触給電システムに用いられる渦電流損の少ないフェライトに着目し、フェライトの配置位置および冷却有無が電力伝送効率に与える影響について検討した。

表 1 に実験に用いた超電導非接触給電システムの諸元を示す。Type A は、1 次側高温超電導（HTS）コイルおよび 2 次側銅コイルにフェライトを設置していない基準のタイプである。また、Type B は、HTS コイルの背面にフェライトを設置し、HTS コイルおよびフェライトを液体窒素(77 K)で冷却した。さらに、Type C は銅コイルの背面にフェライト（常温）を設置した。また、図 5 および図 6 に、各タイプの概要図および Type C の外観図を示す。なお、本実験では、厚さ 5 mm、縦 25 mm、横 25 mm のフェライトコアを 400 mm×400 mm の面積に敷き詰め

表 1. 実験に用いた超電導非接触給電システムの諸元

		Type A	Type B	Type C
コイル外径 (mm)		400		
コイル内径 (mm)		50		
コイル間ギャップ (mm)		50		
負荷 (Ω)		10	3.5	14
共振周波数 (Hz)		4852	5020	4872
結合係数		0.485	0.531	0.529
1 次側 コイル	線材	REBCO 線材		
	自己インダクタンス $L_1(\mu\text{H})$	232	297	255
	キャパシタ $C_1(\mu\text{F})$	4.50	3.60	4.05
2 次側 コイル	線材	リッツ線材		
	自己インダクタンス $L_2(\mu\text{H})$	236	248	394
	キャパシタ $C_2(\mu\text{F})$	4.50	4.05	2.55

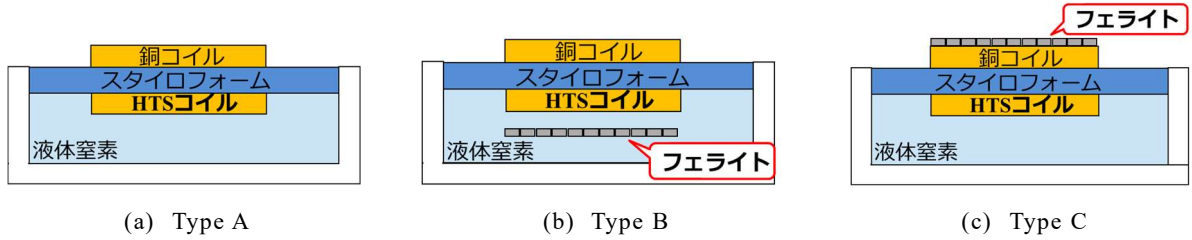


図 5. 軟磁性材料を用いた超電導非接触給電システムの概要図

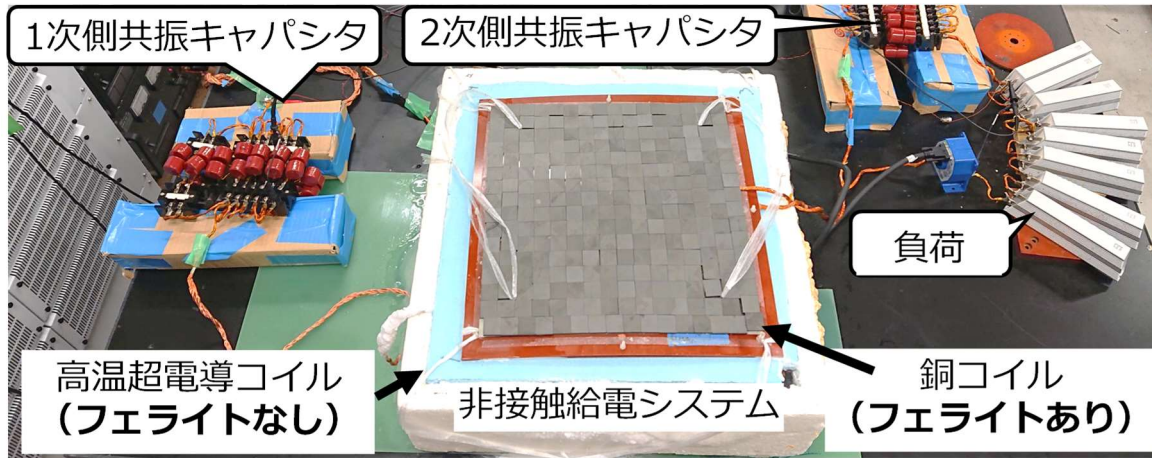


図 6. 軟磁性材料を用いた超電導非接触給電システムの外観図 (Type C)

た。また, Type A, B および C の動作周波数は 5 kHz とし, 送受信コイルの形状は, 1 kW 級超電導非接触給電システム⁶⁾を参考にした。また, 電力伝送効率 $\eta_{t,all}$ は以下のように定義した。ここで, P_{11} , P_{22} は配線抵抗による損失, P_{L1} , P_{L2} は HTS コイルおよび銅コイルの損失, P_{C1} , P_{C2} はコンデンサの損失, P_{RL} は受電電力を示している。

$$\eta_{t,all} = \frac{P_{RL}}{P_{11} + P_{22} + P_{L1} + P_{L2} + P_{C1} + P_{C2} + P_{RL}} \quad (1)$$

図 7 に, Type A, B および C における電力伝送効率の実験結果を示す。図 7 より, Type B の電力伝送効率は, Type A および C に比べて著しく低下した。これは, フェライトを 77 K に冷

却することでフェライトの鉄損が増加し、1次側 HTS コイルの損失が増加したためと考えられる。その一方で、Type C の電力伝送効率は Type A に比べて増加した。これは、銅コイル側にフェライト（常温）を用いる事で、銅コイルの Q 値が増加したためと考えられる。

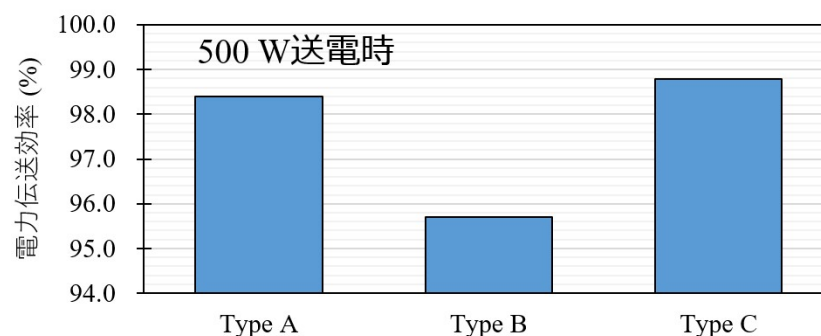


図 7. 軟磁性材料を用いた超電導非接触給電システムの電力伝送効率（500 W 送電時）

以上より、超電導非接触給電システムの電力伝送効率は、常温の銅コイル側に軟磁性材料を使用することによって上昇することが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、液体窒素下（77 K）で磁気特性評価が可能な小型単板磁気試験器を用いて、様々な軟磁性材料の磁気特性を評価した。また、小容量の超電導非接触給電システムを構築し、軟磁性材料の配置位置および冷却有無が電力伝送効率に与える影響について検討した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- （1）液体窒素下において、フェライトおよび電磁鋼板、パーマロイ、アモルファス、ナノ結晶材料の磁気特性を測定した結果、ナノ結晶材料が低損失であることを明らかにした。
- （2）フェライトコアを銅コイルの背面のみに設置した超電導非接触給電システムの電力伝送効率は、フェライトを設置しない場合に比べて高効率であった。

以上の結果から、軟磁性材料を銅コイル側のみに設置することで、高効率な超電導非接触給電システムを実現できることが明らかになった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 経済産業省, “2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”, 2025
- 2) V. Ramakrishnan et al., "A Comprehensive Review on Efficiency Enhancement of Wireless Charging System for the Electric Vehicles Applications," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 46967-46994, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3378303.
- 3) A. Mahesh, B. Chokkalingam and L. Mihet-Popa, "Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles—A Review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 137667-137713, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116678.
- 4) J. Rahulkumar. et al., "An Empirical Survey on Wireless Inductive Power Pad and Resonant Magnetic Field Coupling for In-Motion EV Charging System," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 4660-4693, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3232852.

- 5) Y. Inoue, R. Inoue, H. Ueda and S. B. Kim, "Basic Study of a Wireless Power Transmission System Using Superconducting Coil as a Ground-Side Coil for Electric Vehicles," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2023, doi: 10.1109/TASC.2023.3247685, Art. no. 5400605.
- 6) R. Inoue, T. Iwamoto, H. Komoda, H. Ueda and S. B. Kim, "Basic Experimental Study on a 1 kW-Class WPT System Using HTS and Copper Coils for EVs," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, pp.1-5, May 2024, doi: 10.1109/TASC.2024.3354669
- 7) 白石 智也, 川原 健太郎, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範, "液体窒素温度における磁気シールド用軟磁性材料の磁気特性評価," 2025 年度春季低温工学・超電導学会 講演資料, vol. 109, p.73, 2025.
- 8) M. Konuma: *Magnetic Materials*, Engineering books, p.99-100,1996.
- 9) 岩本 貴大, 塩崎 琉登, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範白, "EV 用超電導非接触給電システムにおけるフェライト板の配置による電力伝送効率," 2024 年度秋季低温工学・超電導学会 講演資料, vol. 108, p.71, 2024.
- 10) R. Inoue, T. Iwamoto, H. Ueda and S. Kim, "Electric Power Transmission Characteristics of WPT System Using HTS and Copper Coils Coupled With Magnetic Material," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2025, Art no. 5500205, doi:10.1109/TASC.2025.3532930.