

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：15301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22414

研究課題名（和文）熱的安定性を有する高温超電導コイルを用いた鉄道用非接触給電システムの研究

研究課題名（英文）Study on the wireless power transmission system for the railway vehicles using the high-temperature superconducting coils with thermal stability

研究代表者

井上 良太（Inoue, Ryota）

岡山大学・自然科学学域・助教

研究者番号：80881127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：熱的に安定な超電導非接触給電システムの基礎技術の確立を目的として、kHz帯における高温超電導（High-temperature superconducting, 以下HTSと略す）コイルの発熱と冷媒間の伝熱特性が超電導非接触給電システムへ与える影響について検討した。その結果、HTSコイルの臨界電流値は周波数の増加と共に減少するため、HTSコイルを用いた鉄道用非接触給電システムは、数kHz周辺での動作が適していることを明らかにした。また、幅の狭いHTS線材をコイル径方向に並列配置させたコイル形状を提案し、熱的に安定となる鉄道用非接触給電システムに向けた基本的なコイル形状を明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、kHz帯におけるHTSコイルの発熱と冷媒間の伝熱特性が非接触給電システムへ与える影響について検討した。その結果、1 kHz以上の高周波電流通電時におけるHTS線材の焼損原因が交流損失の増加に伴う臨界電流の低下であることを明らかにした点に学術的意義がある。また、本研究課題で提案したHTSコイル形状により、熱的に安定な高温超電導コイルを用いた非接触給電システムの基本設計が可能となるため、非接触給電技術の鉄道への適用拡大を促す点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to design the WPT system using the HTS coil with thermal stability, we analyzed the frequency characteristics of the critical current in the HTS coil above 1 kHz using FEM analysis, and investigated the operating conditions considering thermal stability in the WPT system using HTS coil for the railway vehicles. As a result, we found that the thermally stable WPT system using the HTS coil for the railway vehicle capable of fast charging can be realized by operating current at the frequency of about 2 kHz. Also, the receiving power density of the WPT system for the railway vehicles was improved by the HTS coil structures using the narrow REBCO wires.

研究分野：電力工学

キーワード：非接触給電システム 高温超電導コイル 交流損失 熱的安定性 鉄道 冷却システム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国における鉄道路線は、JR6社だけで約20,000 kmであり、そのうち約4割が非電化区間である。非電化区間では、ディーゼル車が走行しているため、温室効果ガス削減の観点から、蓄電池車両へと置き換えることが求められている。一方、電化区間においては主にパンタグラフによる接触給電方式が使用されているものの、架線の放電や破断、メンテナンスの悪さなどの問題から、非接触給電システムへの転換が期待されている。その一方で、鉄道用非接触給電システムは、数100 kW級の電力を伝送するため、銅コイルを用いた場合には、送受信コイルの発熱により、急速充電および高効率伝送することが難しい。そこで、申請者はこれまでに高温超電導 (High-temperature superconducting, 以下 HTS と略す) コイルを用いた鉄道用非接触給電システムを提案し、電磁気的な振る舞いについて明らかにしてきた。しかし、これまでの検討の中で、1 kHz 以上の高周波電流通電時に、線材単体の臨界電流値以下においても、突然に HTS 線材が焼損する現象が発生した。そこで本課題では、HTS 線材の焼損の原因およびその対策方法を明確した上で、これまで実現できなかった熱的に安定な鉄道用非接触給電システムに必要な基盤技術の確立を目指す。

2. 研究の目的

本課題の目的は、kHz 帯における HTS 線材および HTS コイルにおける焼損の原因およびその対策方法を明確にし、熱的に安定かつ大容量送電が可能な鉄道用非接触給電システムの実現に繋げることである。また、HTS コイルを用いた鉄道用非接触給電システムを実現するには、冷却方法の検討や熱的安定性、機械的安定性の検討が必要となるが、本課題では、液体窒素冷却運転を想定し、熱的な安定性に焦点を当てた HTS コイル形状について検討する。

3. 研究の方法

(1) kHz 帯における HTS 線材および HTS コイルの熱特性の明確化

kHz 帯における HTS 線材および HTS コイルの交流損失を測定し、その結果を用いて有限要素法による HTS 線材と液体窒素間の伝熱解析を行うことで、高周波電流通電時における HTS 線材の焼損原因を明らかにする。そして、等価回路解析を用いることで、HTS コイルの焼損を避けることのできる鉄道用非接触給電システムの運転条件を明確にする。

(2) 熱的に安定かつ大容量送電可能な HTS コイル形状の提案

有限要素法による電磁場解析を用いて、HTS 線材の並列配置の違いが HTS コイルの交流損失特性に与える影響について検討し、低損失化かつ高エネルギー密度化が可能なコイル形状を提案する。そして、提案したコイル形状が非接触給電システムの電力伝送特性に与える影響について検討することによって、熱的に安定な鉄道用非接触給電システムの基盤技術を確立する。

4. 研究成果

(1) kHz 帯における HTS 線材およびコイルの熱特性の明確化

本課題では、地上側および車両側に8台の HTS コイルと液体窒素を循環させる1台の冷凍機(冷凍能力: 1 kW@77 K, 冷凍機動力: 10.8 kW)を設置した2両編成の蓄電池電車を想定した。また、駅停車中60 s間の充電時間において、約5 km走行するために必要な電力は、コイル1台あたり75 kWである。図1に HTS コイルの断面図を示し、表1に HTS コイルの諸元を示す。なお、Type Bは、コイル支持材の有無による熱的安定性の影響を明らかにするために、Type Aの径方向ギャップに GFRP を挿入した。また、本検討では、H法による電磁界解析 ($J_c(B, T)$ を考慮) により、HTS コイルの通電電流および表面温度に対する交流損失を求め、その結果を各ターンの発熱項として与える伝熱解析を行った。表2に伝熱解析の解析条件を示す。ここで、初期温度は77 Kとし、冷媒と HTS コイルの間の熱伝達係数には、液体窒素における沸騰熱伝達曲線を考慮した。

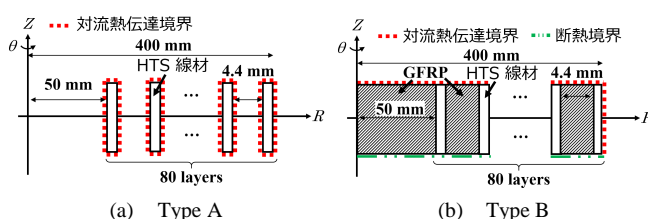


図1 非接触給電システム用 HTS コイルの断面図

表1. 非接触給電システム用 HTS コイルの諸元

超電導層 (μm)	2
線材幅 (mm)	5
ターン数	80
n 値	30
臨界電流密度 J_{c0} (A/m^2)	3.0×10^{10}
ターン間幅 (mm)	4.4
自己インダクタンス (mH)	2.3

表2. 伝熱解析の解析条件

	HTS 線材				
	Cu	Ag	SC	Sub	GFRP
厚み (μm)	75	6	2	75	4400
質量密度 d (kg/m^3)	8960	10490	5900	8890	1600
熱容量 C ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$) (77 K-100 K)	200-255	145-168	80-120	220-310	850
熱伝導率 k ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$) (77 K-100 K)	620-490	480-465	4-3	7.5-8	0.35-0.4

図2にHTSコイルにおける臨界電流値の周波数依存性を示す。図2より、HTSコイルの臨界電流値は、周波数の増加と共に減少した。これは、周波数の上昇と共に、交流損失の影響によりHTSコイルの表面温度が上昇したためと考えられる。また、Type Bは、Type Aに比べて、臨界電流の低下が大きく、10 kHz周辺では、直流通電時の臨界電流値の約40%まで低下した。これは、コイル支持材のGFRPによって、冷却特性が悪化したためと考えられる。以上より、熱的な安定動作を行うためには、10 kHz以下で低電流通電が求められることがわかった。図3に鉄道用非接触給電システムにおける受電電力の共振周波数依存性を示す。図3より、受電電力は動作周波数の上昇と共に増加した。これは、動作周波数の上昇と共に通電電流が低下し、交流損失が抑制されたためと考えられる。また、HTSコイルに熱的な安定性を考慮した場合は、熱的な安定性を考慮しない77 K一定の場合に比べて、HTSコイルの温度上昇により、交流損失が増加することから、共振周波数を上昇させる必要があることがわかった。なお、Type A(定常状態)および給電開始から60 s後のType Bにおいて、目標電力を達成できる動作条件は、ほぼ同様となった。これは、Type Bにおいて、GFRPの熱伝導率は低いものの、熱容量が大きいことから、給電開始から60 s間では温度上昇(最大78.5 K@2 kHz)が少ないためと考えられる。また、Type Bは、約300秒後に定常状態(最大表面温度79.4 K@2 kHz)となるが、Type Bにおける目標電力を達成できる動作条件は、Type Aとの差が少ないことがわかった。以上より、HTSコイルに熱的な安定性を考慮した場合、僅かに共振周波数を上昇させる必要があるものの、コイル支持材の有無に関わらず、2 kHz周辺の低周波領域において、低電流通電を行うことによって、目標電力(75 kW)を達成できることがわかった。

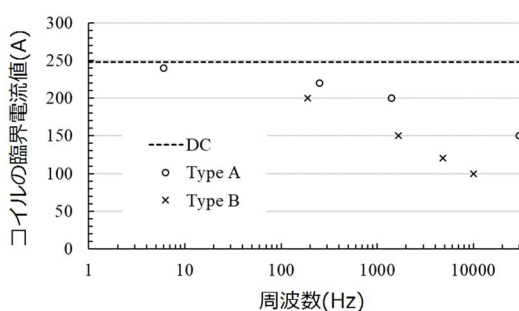


図2 HTSコイルにおける臨界電流値の周波数依存性

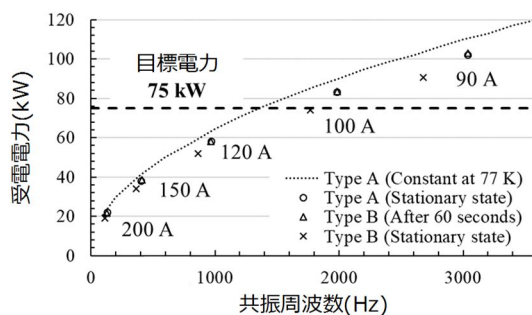


図3 鉄道用非接触給電システムにおける受電電力の共振周波数依存性

(2) 熱的に安定かつ大容量送電可能なHTSコイル形状の提案

本検討では、図4に示す蓄電池電車を想定し、熱的に安定かつ大容量送電可能なHTSコイル形状について検討した。図5にHTS線材を並列配置したコイル形状の断面図を示し、表3にコイルの諸元を示す。ここで、Type Iは、10 mm幅のREBCO線材を用いたシングルパンケーキコイルである。Type IIは、5 mm幅のREBCO線材を2並列に配置し、コイル上下で転置させたダブルパンケーキコイルである。Type IIIおよびType IVは、2.5 mm幅のREBCO線材を4並列に配置し、コイル上下で転置させたダブルパンケーキコイルおよび各ターンで転置させたシングルパンケーキコイルである。ここで、Type I, II, III, IVにおける線材合計の臨界電流値 I_{c0} は、600 A (0 T, 77 K) で統一した。なお、本検討では、並列化による電流の偏りを独立した電気回路から求め、薄膜近似を適用したTA法による電磁界解析を用いてHTSコイルの交流損失を計算した。なお、HTSコイルの侵入熱は、ステファン・ボルツマンの法則を用いて計算した。

図6にType IからType IVの1サイクルあたりの交流損失の電流依存性およびNorrisの計算結果を示す。図6より、幅広線材を用いた

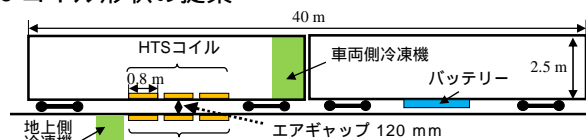


図4 想定した蓄電池車両

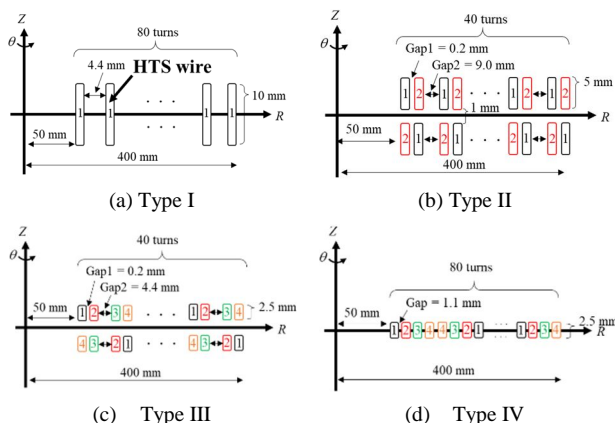


図5 HTS線材を並列配置したコイル形状の断面図

表3 図5に示したコイルの諸元

Type	I	II	III	IV
コイル高さ h (m)	10	10	5	2.5
線材幅 (mm)	10	5	2.5	2.5
HTS線材の並列数	1	2	4	4
ターン数		80		
n 値		30		
超電導層 δ (μm)		2		
臨界電流密度 J_{c0} (A/m^2)		3.0×10^{10}		
HTS線材合計の臨界電流値 (A)		600		
コイル外径 (m)		0.8		
コイル内径 (m)		0.1		
自己インダクタンス (mH)		2.3		

Type I の交流損失に比べて、線材幅を狭くし並列化させた Type II, III, IV の交流損失は、低減した。これは、幅狭線材を並列化することで、隣り合う巻き線間の磁界による磁化損失が低減するためと考えられる。なお、Type I および II の交流損失は、ほぼ同様になった。これは、Type II は、Type I に比べて 2 分の 1 幅の線材を用いているものの、ダブルパンケーキコイル形状であることから、Type II のコイル高さ h が Type I とほぼ同様となるためと考えられる。また、Type III および IV の交流損失は、Type I の交流損失よりも 2 ~ 3 分の 1 程度に減少した。これは、Type I の線材幅に比べて 4 分の 1 幅の線材を用いており、コイル高さ h が低くなるためと考えられる。

図 7 に Type I, II, III, IV を用いた場合における地上側コイルおよび車両側コイル間の結合係数の計算結果を示す。図 7 より、地上側コイルおよび車両側コイルのエアギャップが一定 ($g_a=120$ mm) の場合、コイル高さ h が低いほど結合係数が増加した。これは、コイル高さ h が高くなるほど、コイル間の有効エアギャップが増加し、コイル間の鎖交磁束が減少するためと考えられる。また、Type I と Type II の結合係数はほぼ同様となった。これは、Type I と Type II のコイル高さ h がほぼ同様であるためと考えられる。

以上より、シングルパンケーキコイル構造およびダブルパンケーキコイル構造において、同様のインダクタンスであれば、コイル高さ h が HTS 線材幅に等しいシングルパンケーキコイル構造の結合係数は、ダブルパンケーキコイル構造よりも増加することがわかった。

表 4 に HTS コイルを 2 台設置した場合における鉄道用非接触給電システムの電力伝送特性を示す。表 4 より、HTS 線材幅を狭くした上で並列配置することによって、受電電力が増加し、充電時間の短縮、電力伝送密度の向上が確認された。特に、Type IV を用いることで、冷凍機動力を含めても 96% 以上の高効率で、60 s 程度の急速充電ができる可能性がある。また、コイル 1 台あたりの電力密度は、Type IV を用いることで、Type I に比べて 1.5 倍程度、また銅コイルに比べて 15 倍以上に改善できることがわかった。以上より、高エネルギー密度化かつ低損失化を目指した非接触給電システムの HTS コイルは、コイル高さが線材幅の 2 倍必要となるダブルパンケーキコイル形状よりも、コイル高さが線材幅と同様となるシングルパンケーキコイル構造で、幅の狭い線材を径方向にツイストして並列化することが適していることがわかった。

表 4 HTS コイルを 2 台設置した場合における鉄道用非接触給電システムの電力伝送特性

	Type I	Type II	Type III	Type IV	Cu コイル ^[1]
受電電力 (kW)	366.0	396.0	460.0	586.0	232.2
充電時間 (s)	98.0	91.0	78.0	61.0	154.0
送電電力密度 (kW/m ²)	364.1	393.9	457.6	582.9	32.3
共振周波数 (kHz)	3.9	3.6	3.0	2.4	10.8
コイルの交流損失 (W/台)	250				-
コイルへの侵入熱 (W/台)	250				-
冷凍機を含んだシステム効率 (%)	94.3	94.7	95.4	96.4	85.2

< 参考文献 >

[1] K. Ukita, T. Kashiwagi, Y. Sakamoto, and T. Sasakawa, "Evaluation of a non-contact power supply system with a figure-of-eight coil for railway vehicles," *Proc. IEEE PELS Workshop Emerging Technol.: Wireless Power*, 2015, pp. 1-6.

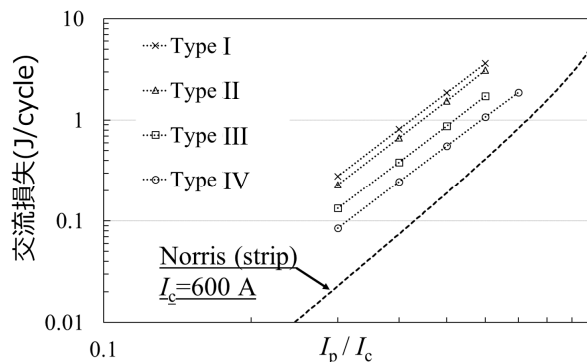


図 6 Type I から Type IV の 1 サイクルあたりの交流損失の電流依存性および Norris の計算結果

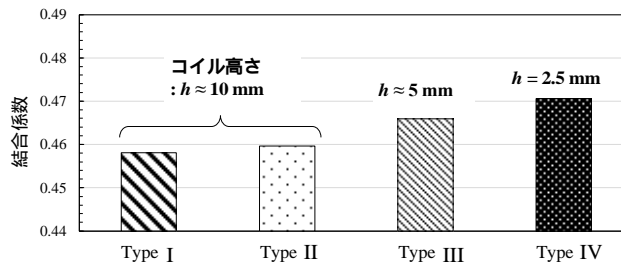


図 7 Type I, II, III, IV を用いた場合における地上側コイルおよび車両側コイル間の結合係数の計算結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inoue Ryota, Ueda Hiroshi, Kim SeokBeom, Tsuda Makoto	4. 巻 31
2. 論文標題 Thermal Characteristics of REBCO Coil in a Wireless Power Transmission System for the Railway Vehicle in Liquid Nitrogen	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3059234	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue Ryota, Ueda Hiroshi, Kim SeokBeom	4. 巻 32
2. 論文標題 Study on Low-Loss and High-Energy Density Coil Structure of a Wireless Power Transmission System Using High Temperature Superconducting Coils for Railway Vehicle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3169997	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ryota Inoue, Hiroshi Ueda, SeokBeom Kim, Makoto Tsuda
2. 発表標題 Thermal Characteristics of REBCO Wire by kHz-class AC Current in Liquid Nitrogen for a Wireless Power Transmission System
3. 学会等名 2020 Applied Superconductivity Conference（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範, 津田 理
2. 発表標題 HTSコイルを用いた鉄道用非接触給電システムの熱的安定性を考慮した運転条件の検討
3. 学会等名 2020年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上良太, 植田浩史, 金錫範
2. 発表標題 非接触給電システム用HTSコイルの高エネルギー密度化および低損失化のための基本構造に関する検討
3. 学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Inoue, Hiroshi Ueda, SeokBeom KIM
2. 発表標題 Study on Low Loss Coil Structure for High Energy Density of a Wireless Power Transmission System Using High Temperature Superconducting Coils for Railway Vehicle
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Inoue, Hiroshi Ueda, SeokBeom KIM
2. 発表標題 Fundamental research on development of 100 kW-class wireless power transmission system using high temperature superconducting coils
3. 学会等名 34th International Symposium on Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------