

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

浮上式鉄道用推進コイルの絶縁性能を評価する

超電導磁気浮上式鉄道において、地上コイルは走行区間の全線にわたって敷設されることになるため、必要な個数は莫大なものとなります。中でも地上コイルの一種である推進コイルは、屋外、大きな電磁力による加振、高電圧といった環境のもとで長期間にわたって使用されることが前提となります。このような背景から、地上コイルの開発では、各種負荷に対する信頼性の確保が重要な課題とされてきました。ここでは、推進コイルの絶縁性能の評価について紹介します。



饗庭 雅之
Masayuki Aiba
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
上席研究員
[専門分野] 地上コイル



太田 聡
Satoru Ota
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
副主任研究員
[専門分野] 地上コイル



鈴木 正夫
Masao Suzuki
浮上式鉄道技術研究部
山梨実験センター
所長
[専門分野] 地上コイル

地上コイルの種類と役割¹⁾

地上コイルは、浮上式鉄道車両に推進力、浮上力、案内力を与えるために、ガイドウェイ側壁に取り付けられている電磁石です(図1)。地上コイルには推進コイルと浮上案内コイルの2種類があります。

推進コイルには、電力変換変電所から交流電流が通電され、車両の台車に搭載されている超電導磁石との間の電磁作用により車両に推進力を与えています。

浮上案内コイルには、車両の台車に搭載されている超電導磁石の通過ともなう電磁誘導によって電流が流れ、超電導磁石との間の電磁作用により車両に浮上力と案内力を与えています。

推進コイルに加わる負荷²⁾

推進コイルは車両走行区間の全線にわたって敷設されますが、推進コイルに通電される区間が、列車が存在する場所の周辺だけに通電できるように、一定の長さのき電セクションにより分割されています(図2)。き電セクション内では多数個の推進コイルがコイル間接続ケーブルを介して連続的に直列に接続されています。これは、ガイドウェイ内で向かい合った2個のコイルで電気回路が完結している浮上案内コイルとは大きく異なる点です。したがって、仮に推進コイルが1個だけ故障したとしても、その影響がき電セクション全体にまで及ぶことになります。

推進コイルには、車両走行時に車両に推進力を与えるために電流を通電することにより発生する電圧に、車上の超電導磁石の移動ともなう磁場変化による逆起電力が同じタイミングで重なります。そのため、き電セクション内の電力変換変電所側の推進コイルほど高い電圧が加わる

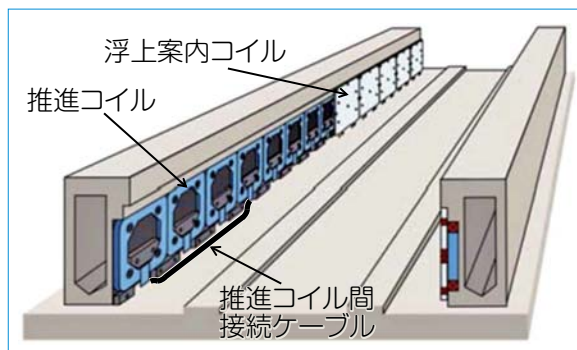


図1 地上コイルの種類

こととなります。このことから、推進コイルの運用にあたっては、屋外での使用、車両に与える力の反作用力に対する配慮に加え、高電圧に対する配慮が必要となります。

推進コイルに要求される絶縁性能³⁾⁴⁾⁵⁾

推進コイルの一種であるPLGコイル(☞参照)の主要諸元を表1に示します。表1に示す使用条件を考慮して、その性能を安定して発揮できるように運用する必要があります。

ところで、推進コイルの絶縁性能の検査の例として、以下があげられます。

- 電気定数測定
抵抗、インダクタンスの値から短絡、断線の有無を確認
- 非破壊偏肉測定
適正な樹脂モールド厚さであることを確認
- 絶縁抵抗測定
絶縁欠陥の有無を確認
- 耐電圧試験
実使用レベルの電圧に耐えることを確認
- 部分放電測定(☞参照)
絶縁劣化の有無を確認
- 誘電正接($\tan \delta$)測定(☞参照)
絶縁劣化の有無を確認

これらの検査は、推進コイルの成型不良や内部欠陥の評価手法として有効であり、地上コイル製造者における出荷前検査で実施されています。

推進コイルの耐久性検証⁶⁾

地上コイルの劣化プロセスを図3に示します。地上コイルの開発にあたってはこれを念頭に置いて、材料レベルから実コイルに至るまで、実使用を想定した種々の耐久性試験により、機械的および電気的な観点での信頼性を検証する必要があります。

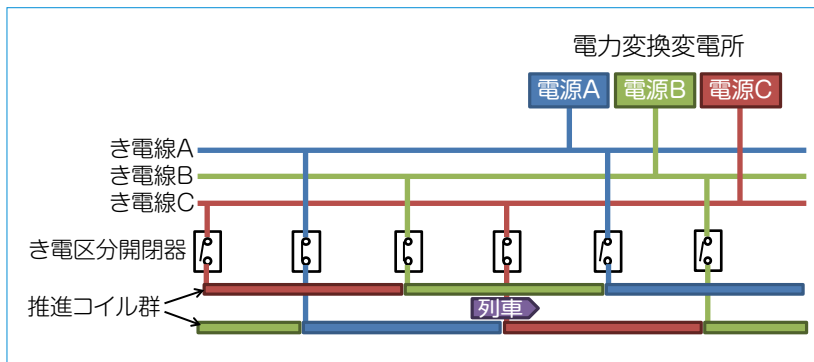


図2 キ電セクション

表1 PLGコイルの主要諸元

コイル本体	外形寸法	約0.9m × 1.1m × 0.07m
	絶縁方式	エポキシ樹脂モールド
	導体材質	電気用アルミニウム
	導体断面	約0.04m × 0.1m
	接続部数	3
コイル間接続ケーブル	絶縁方式	架橋ポリエチレン
	導体断面積	60mm ²
使用条件 (本体・接続ケーブル共通)	周囲温度	-30℃～50℃
	周囲湿度	最高100% (結露あり)
	天候	全天候
	公称電圧	33kV

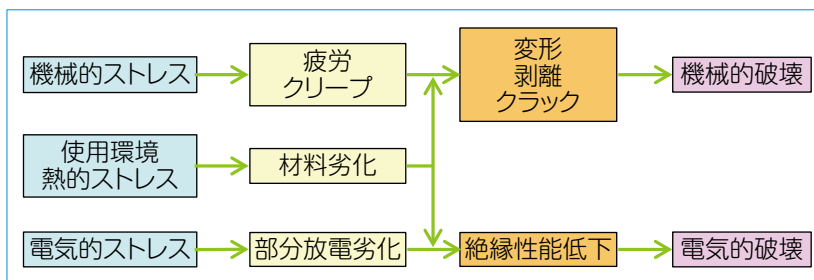


図3 地上コイルの劣化プロセス

☞ PLG コイル

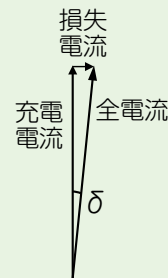
電力変換変電所からコイルに電流を流すと同時に、ガイドウェイ内で対向するコイルと電気的に接続することにより、1個で推進力、浮上力、案内力を発生させる地上コイルです。推進浮上案内兼用コイルともよばれます。

☞ 部分放電

絶縁体内部において発生する微小な絶縁破壊現象です。部分放電発生初期段階には軽微な放電であっても、それが繰り返されることで絶縁劣化が進展し、絶縁体全体の絶縁破壊の原因となります。部分放電を測定することにより、絶縁劣化の兆候をとらえることができます。

☞ 誘電正接

絶縁体に交流電圧を加えると、絶縁体を流れる充電電流のほかに損失電流などが流れるため、全電流は充電電流成分よりわずかに遅れた位相角をもちます。この遅れ角は誘電損角 δ とよばれ、 $\tan \delta$ (充電電流成分に対する損失電流成分の比)は誘電正接とよばれています。誘電正接は、絶縁材料固有の物性として知られており、経年による絶縁材料の汚損、吸湿、熱劣化などの進展や部分放電の発生により、その値が増加することから、劣化指標の一つとなっています。



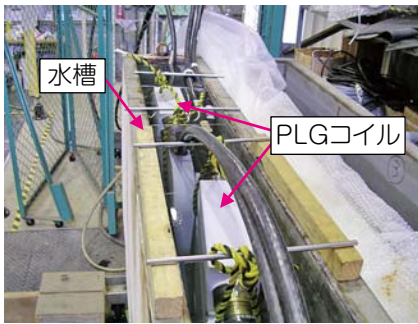


図4 複合負荷試験(吸水負荷)

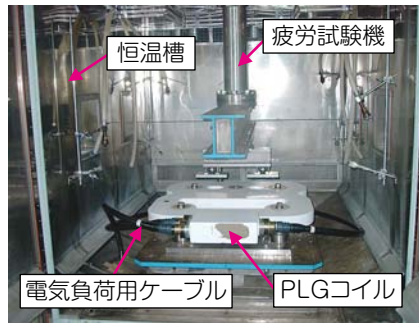


図5 複合負荷試験
(機械負荷+電気負荷)

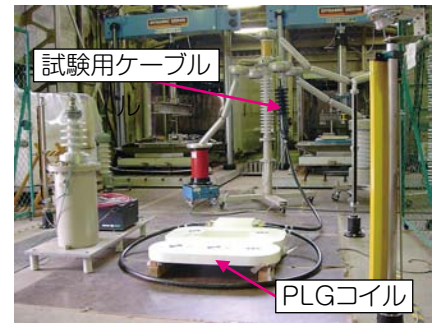


図6 部分放電測定

そこで、ここでは、地上コイルの耐久性検証を行った事例として、推進コイルの一種であるPLGコイルの耐久性検証について紹介します。

PLGコイルの耐久性検証は、降雨を想定した吸水負荷、機械負荷および電気負荷を、加速劣化(想定負荷よりも大きい負荷を与えて劣化を促進)として与える複合負荷試験と、屋外にて連続して高電圧を加えながら、通電(発熱)と通電休止(放熱)を繰り返すヒートサイクル負荷により熱的耐久性を検証する長期屋外課通電試験の2種類の試験により行いました。

複合負荷試験⁴⁾

17.5年相当の負荷試験を2回繰り返すことにより、実使用での想定使用期間である35年に対するPLGコイルの耐久性検証を、2個のコイルについて行いました。

使用環境の負荷として吸水負荷(図4)を与えた後、繰り返し荷重による機械負荷および高電圧の印加による電気負荷を同時に与えました(図5)。これを2回繰り返して通算35年相当としました。

評価試験として、負荷試験前、17.5年相当試験後および通算35年相当試験後に、外観検査、絶縁抵抗測定、部分放電測定(図6)、誘電正接(tanδ)測定および商用周波耐電圧試験などの絶縁特性試験を行いました。

評価試験結果の例として、部分放電

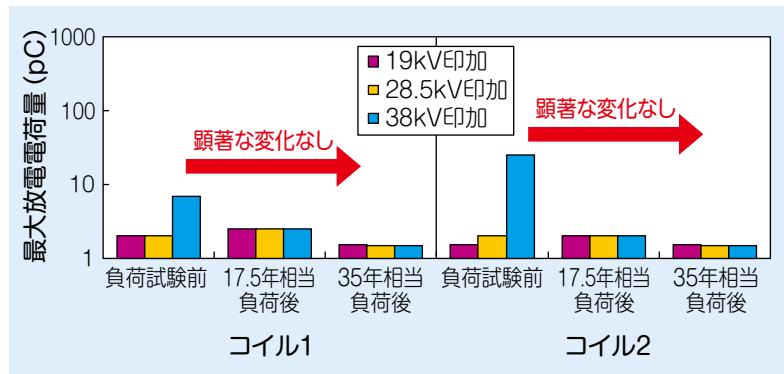


図7 部分放電測定結果

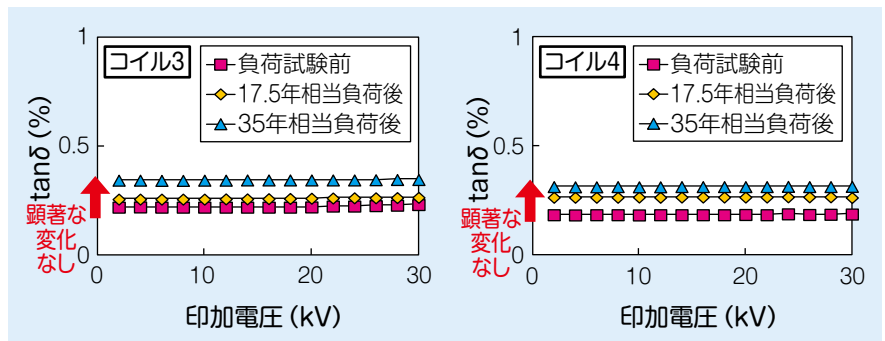


図8 誘電正接測定結果

測定結果を図7に、誘電正接測定結果を図8に示します。評価試験において、外観上の異状や、問題となるような絶縁特性の顕著な変化はみられませんでした。これより、PLGコイルの想定使用期間に対する健全性を確認することができました。

長期屋外課通電試験⁴⁾

PLGコイルの熱的耐久性の検証を、2個のコイルについて行いました。

屋外で180日の間、電気負荷として高電圧を加えながら、熱的負荷として通電18時間・通電休止6時間を繰り返

すヒートサイクル負荷を加えました(図9)。

評価試験として、負荷試験前、90日間の試験後および180日間試験後に、外観検査、絶縁抵抗測定、部分放電測定、誘電正接(tanδ)測定および商用周波耐電圧試験などの絶縁特性試験を行いました。

評価試験において、外観上の異状や問題となるような絶縁特性の顕著な変化はみられませんでした。これより、PLGコイルの屋外環境下でのヒートサイクル負荷に対する熱的耐久性を確認することができました。

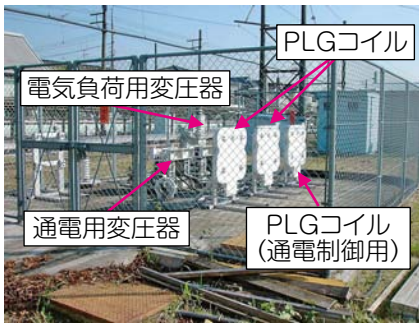


図9 長期屋外課通電試験

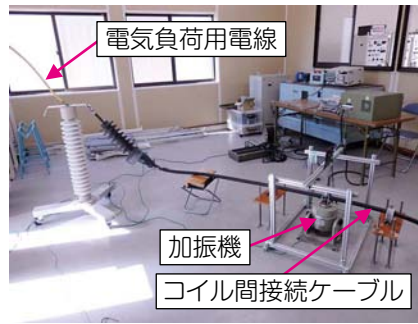


図10 コイル間接続ケーブルの複合負荷試験

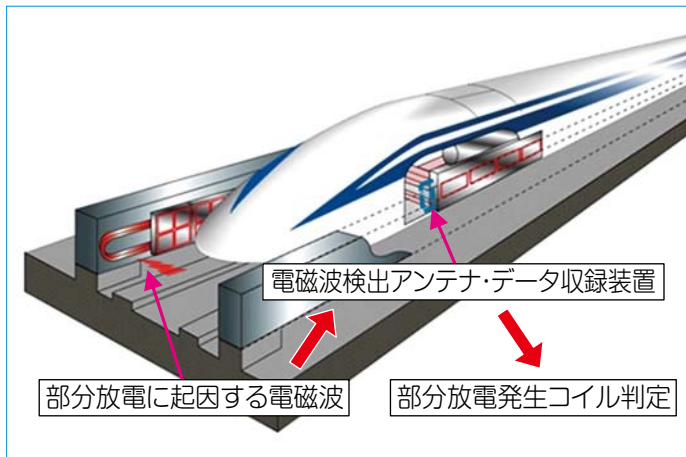


図11 推進コイルの効率的な検査手法

推進コイル間接続ケーブルの耐久性検証⁷⁾

推進コイル間接続ケーブルには、推進コイルと同様に、電気負荷として高電圧が加わります。さらに、機械負荷として、推進コイルへの通電のための電流と車上の超電導磁石の磁界との積に比例した電磁力が分布荷重として作用し、ケーブル固定部間では大きな変位が生じます。このような負荷は、既存の電力用ケーブルにはない、超電導磁気浮上式鉄道特有のものです。

そこで、このような使用環境を考慮した耐久性試験方法を考案し、実使用での想定使用期間である35年に相当する負荷条件で、電気負荷と機械負荷を同時に加える複合負荷試験を行いました(図10)。

評価試験として、負荷試験前および試験後に、外観検査、部分放電測定を行いました。評価試験において、外観上の異状や部分放電の発生はみられま

せんでした。これより、推進コイル間接続ケーブルの想定使用期間における電気と機械の複合負荷に対する健全性を確認することができました。

推進コイルの効率的な検査手法⁵⁾

絶縁劣化した推進コイル内部の部分放電は高電圧が加わっているときに発生します。このため、使用する現地で部分放電発生の有無を検査する場合には、推進コイルに高電圧を加える必要があります。

しかし、推進コイルはき電セクション内で多数個が接続されているため、高電圧を加える場合には、必要な電気設備容量が大きくなってしまいます。また、実走行で高電圧となる推進コイルは、き電セクション内の電力変換変電所側の端部付近にあるものに限られるため、そのほかの推進コイルに対しては、検査のために寿命を縮めることになる無用な高電圧を加えることに

なってしまいます。

そこで、効率的に推進コイルの絶縁劣化検査を行う手法として、車両走行にともない推進コイルに発生する電圧を検査用に活用し、車両にアンテナを搭載して、高速走行中に部分放電に起因する電磁波を検知する方法を考案しました。この検査手法の概念を図11に示します。

おわりに

浮上式鉄道用推進コイルの絶縁性能の評価について、事例を紹介しました。絶縁性能評価の中でも、とくに部分放電に関しては、絶縁劣化の指標として有効であると考えています。今後も、考案した推進コイルの効率的な検査手法に基づき、絶縁劣化検査システムの開発を進めていきます。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。[RRR]

文献

- 1) 太田聡：浮上式鉄道の地上コイル，RRR，Vol.74，No.1，p.28，2017
- 2) 黒部久名，川口育夫：山梨実験線における実用化技術（電力供給・運転制御システム），RRR，Vol.62，No.3，pp.14-17，2005
- 3) 饗庭雅之：日の字PLGコイルの開発，RRR，Vol.62，No.3，pp.26-29，2005
- 4) 饗庭雅之，鈴木正夫：推進・浮上・案内兼用地上コイルの耐久性検証，鉄道総研報告，Vol.19，No.6，pp.19-24，2005
- 5) 太田聡，依田裕史，池田遼平：多数個の推進系地上コイルを対象とした効率的な非接触絶縁診断手法の開発，鉄道総研報告，Vol.29，No.11，pp.23-28，2015
- 6) 鈴木正夫：地上コイル電磁加振試験による動的耐久性評価，RRR，Vol.64，No.12，pp.28-29，2007
- 7) 太田聡，饗庭雅之，鈴木正夫，高橋紀之：浮上式鉄道用推進コイル接続ケーブルの振動特性評価，鉄道総研報告，Vol.31，No.1，pp.17-22，2017