

令和 2 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03215

研究課題名（和文）超伝導限流器の実用化に向けた高信頼度化と合理的設計・運用に関する研究

研究課題名（英文）Reliable and Rational Design and Operation of Superconducting Fault Current Limiters for Practical Use

研究代表者

早川 直樹（Hayakawa, Naoki）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20228555

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、安価で停電の少ない次世代の送電システムの構築を目指し、電気抵抗0の超伝導技術の活用方法を検討した。特に、落雷等による停電を防止するための「超伝導限流器」の新規開発と実用化に向けて、超伝導状態を維持するための液体窒素の電気的特性を解明し、信頼性が高く合理的な超伝導限流器の設計方法を提示した。また、送電システムへの超伝導限流器の効果的な導入・運用方法を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導限流器を運用するためには、沸点-196の液体窒素で冷却する必要がある。しかし、超伝導限流器の内部で発熱が起こると、液体窒素中に大量の気泡が突発的に発生し、超伝導限流器の機能が破壊される危険性がある。本研究では、液体窒素中の気泡が超伝導限流器の機能を破壊させるメカニズムを実験によって解明し、その対策を提示した。さらに、落雷等による停電を効果的に防止するためには、送電システムのどの位置に何台の超伝導限流器を配置すればよいかについて、モデルを用いて解析した。これらの研究により、安価で停電の少ない次世代の送電システムの構築が期待される。

研究成果の概要（英文）：This research investigates the application techniques of superconductivity with zero resistance toward a future electric power transmission system with low cost and low possibility of blackout. In particular, superconducting fault current limiters (SFCL) are expected to be developed and actually introduced in order to protect the system from blackout due to lightning and so on. Then, electrical characteristics of liquid nitrogen to maintain SFCL in superconducting state have been elucidated, and the highly reliable and rational design method of SFCL has been proposed. In addition, the effective introduction and operation methods of SFCL in the system have been proposed.

研究分野：電力工学

キーワード：超伝導限流器 液体窒素 クエンチ 気泡 絶縁破壊 電力システム 故障解析 過渡安定度解析

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、研究者個人に帰属されます。

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導限流器は、図1に示すように、平常時は超伝導の特長を活かして電気抵抗ゼロの超伝導状態、電力システムの短絡等による過大な故障電流の発生時には突発的に高抵抗状態に遷移(クエンチ)して故障電流を第1半波から限流・抑制するものであり、超伝導技術によって初めてもたらされる革新的・高機能型電力機器である。しかし、諸外国の超伝導限流器の技術動向と比較して、日本の超伝導限流器開発は遅れている。東日本大震災を経験した日本の将来の電力システムを考える場合、平常時の電力融通・広域連系および故障時の故障電流の抑制・波及防止などの観点から、日本での超伝導限流器開発は重要であると考えられる。特に、超伝導限流器の高信頼度化と合理的設計(ハード的アプローチ)、超伝導限流器を含む電力システム全体としての安定性・協調運用(システマ的アプローチ)について、超伝導限流器の実用化に向けた技術課題の克服が必要である。

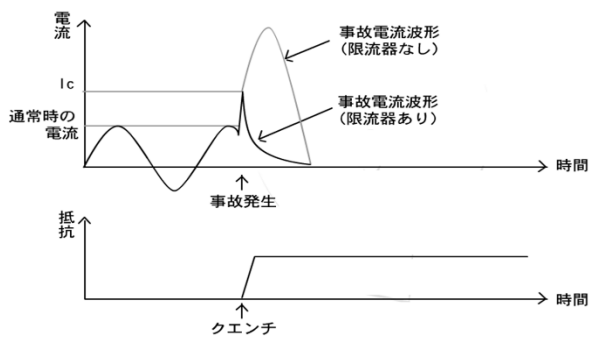


図1 抵抗型超伝導限流器の動作原理

### 2. 研究の目的

- (1) 次世代の革新的・高機能型電力機器として期待されている超伝導限流器について、実用化の要である高信頼度化と合理的な設計・運用に資する技術的指針を提示することを目的とする。特に、動作原理が明確な抵抗型超伝導限流器に特化し、限流動作時の熱/電界複合ストレス環境下の放電・絶縁破壊現象を学術的に解明し、限流器コイルの高信頼度化・合理的設計に反映する。
- (2) 超伝導限流器が導入された電力システムを想定し、限流・復帰動作に伴う電力システムの安定性を評価し、機器とシステムとの協調的な運用指針を提示する。

### 3. 研究の方法

- (1) 超伝導限流器の高信頼度かつ合理的な限流・絶縁設計指針を得るために、超伝導限流器コイルの基礎モデルおよびパンケーキコイルモデルにおいて、超伝導テープのエッジ構造や限流動作時の突発的な気泡擾乱が液体窒素(LN<sub>2</sub>)の絶縁性能に及ぼす影響を実験的に評価するとともに、放電開始・絶縁破壊メカニズムを学術的に解明した。
- (2) 超伝導限流器と電力システムとの協調的な運用指針を得るために、超伝導線材の発生抵抗の電界・温度依存性を考慮し、超伝導限流器が導入された電力システムの過渡安定度解析を行った。

### 4. 研究成果

#### ① 超伝導限流器の高信頼度・合理的な絶縁設計

抵抗型超伝導限流器のクエンチ・限流動作時には、LN<sub>2</sub>は突発的な気泡擾乱状態となり、絶縁性能の著しい低下が予想される。本研究では、抵抗型超伝導限流器のクエンチ・限流動作時の絶縁環境を模擬し、LN<sub>2</sub>の絶縁破壊特性について検討した。

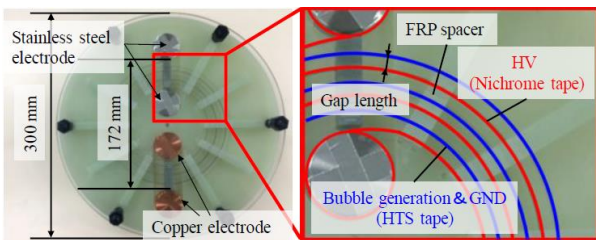


図2 超伝導パンケーキコイルモデル

#### ① 超伝導パンケーキコイルモデル

図2に超伝導パンケーキコイルモデルの構造を示す。超伝導テープおよびニクロムテープのターン間のギャップ長を  $g=6\text{ mm}$  とし、FRPスペーサを介して螺旋状に各3ターン巻いた。高電圧側にニクロムテープを、接地側に超伝導テープを接続し、LN<sub>2</sub> (0.1-0.15MPa, 77 K) 中に浸漬した。交流高電圧(60 Hz)を1 kV<sub>rms</sub>/sで昇圧して印加し、静的絶縁破壊電界(BDE<sub>sta</sub>)を測定した。次に、BDE<sub>sta</sub>未満の印加電界下で、臨界電流以上の大電流で超伝導テープをクエンチさせ、ジュール熱によって突発的に気泡を発生させることで動的絶縁破壊電界(BDE<sub>dyn</sub>)を測定した。通電期間は5 cycle、超伝導テープのクエンチに伴う第1半波の熱流束  $Q$  は0-80W/cm<sup>2</sup>とした。

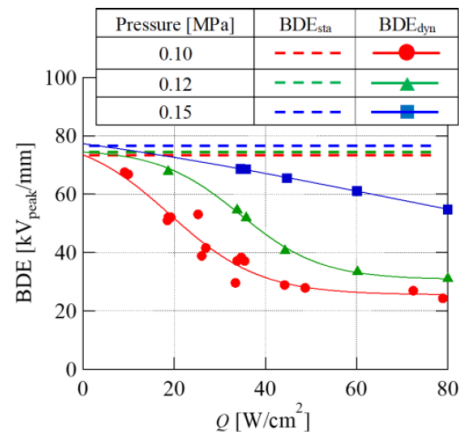


図3 BDE<sub>dyn</sub>の熱流束・圧力依存性

#### ② BDE<sub>dyn</sub>の熱流束・圧力依存性

図3に超伝導パンケーキコイルモデルにおけるBDE<sub>sta</sub>およびBDE<sub>dyn</sub>の熱流束依存性および圧力依存性を示す。同図より、熱流束の増加に伴いBDE<sub>dyn</sub>は著しく低下して

いることがわかる。これは、熱流束の増加に伴い気泡量が増加したことによるものと考えられる。また、圧力の増加は $BDE_{dyn}$ の低下を緩和できることがわかる。これは、圧力の増加に伴い、同熱量注入時の気泡量が減少したことによるものと考えられる。

さらに、0.10MPaでは $Q>40W/cm^2$ 以上において、0.12MPaでは $Q>60W/cm^2$ において、 $BDE_{dyn}$ がほぼ一定値になることがわかる。これは熱流束の増加に伴い、ターン間に気泡が十分充満することで $BDE_{dyn}$ が下限値に達したと考えられる。なお、下限値の差は圧力による気泡密度の差によるものと考えられる。

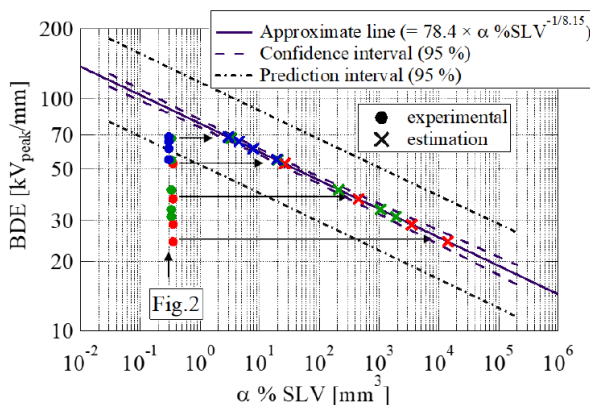


図4  $BDE_{sta}$  および  $BDE_{dyn}$  の体積効果

### ③ $BDE_{dyn}$ の体積効果

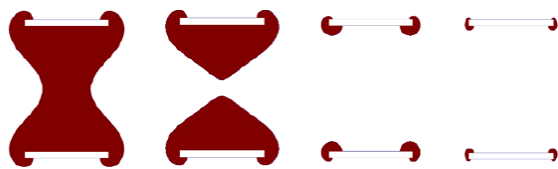
準平等電界下における $LN_2$ の $BDE_{sta}$ の体積効果のグラフ<sup>(1)</sup>に図3の実験結果を追加したものを図4に示す。同図において、横軸は最大電界に対してある割合( $\alpha$ )を超えた高電界領域の体積 ( $\alpha$  %SLV) であり、大気圧沸騰状態の $LN_2$  (0.1 MPa, 77 K) では $\alpha = 81\%$ である。 $BDE_{sta}$ は $\alpha$  %SLVの増加とともに両対数グラフ上において直線上を低下しており、 $LN_2$ における $BDE_{sta}$ の体積効果を意味している。 $LN_2$ の絶縁破壊は、 $LN_2$ 中の高電界領域に存在するマイクロバブルの大きさおよび数に依存するため、高電界体積が絶縁上の弱点として影響していると考えられる。この高電界体積は、 $LN_2$ の加圧・冷却に伴い減少する。図3における熱流束の増加に伴う $BDE_{dyn}$ の低下は絶縁上の弱点の増加、すなわち $BDE_{dyn}$ に寄与する $\alpha$  %SLVの増加と同義であると考えられる。

一方、パンケーキコイルのような不平等電界下における $\alpha$  %SLVはテープエッジ周辺の微小領域のみである<sup>(2)</sup>。図5にパンケーキコイルのテープ間断面における高電界領域を $\alpha$ の値をパラメータとして示す。また、図6に $\alpha$ と高電界体積 $\alpha$  %SLVの関係を両対数グラフで示す。これらの図から、 $\alpha$ の低下に伴い、 $\alpha$  %SLVが急激に増加し、 $\alpha = 10\%$ では動的絶縁破壊に寄与する等価的な電界体積がテープエッジ周辺からギャップ全体に広がっていることがわかる。

したがって、 $BDE_{dyn}$ を考える場合、 $BDE_{sta}$ に対応する $\alpha$  %SLVの定義を拡張( $\alpha$ の値を低下)することにより、動的絶縁破壊特性を体系的に評価することができると考えられる。すなわち、図4の $BDE_{dyn}$ のプロットが $BDE_{sta}$ の体積効果のグラフにフィッティングするような $\alpha$  %SLVを求め、電界解析によって $\alpha$ の値を逆算した。

### ④ 動的絶縁破壊特性と体積効果との体系化

図7に $\alpha$ と熱流束 $Q$ との関係を示す。同図より、熱流束の増加に伴い $\alpha$ が減少し、約10%まで低下していることがわかる。すなわち、クエンチに伴う突発的気泡の発生により、テープエッジ周辺の微小領域のみではなく、ギャップ全体で動的絶縁破壊が発生し得ると考えられる。これにより、図7における $BDE_{dyn}$ の低下は、絶縁上の弱点である気泡を考慮した電界体積の増加によるものであり、動的絶縁破壊特性における体積効果として評価することができると考えられる。



(a)  $\alpha = 10\%$  (b)  $\alpha = 10.6\%$  (c)  $\alpha = 15\%$  (d)  $\alpha = 20\%$

図5 高電界領域の $\alpha$ 依存性

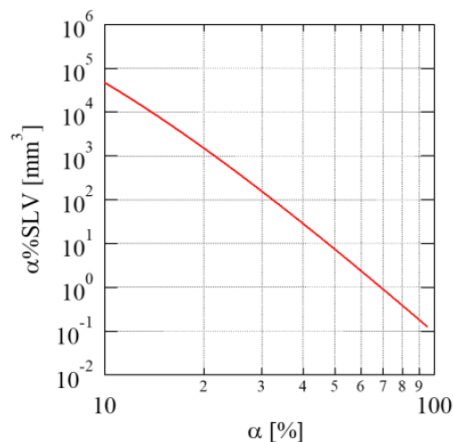


図6  $\alpha$ と高電界体積 $\alpha$  %SLVの関係

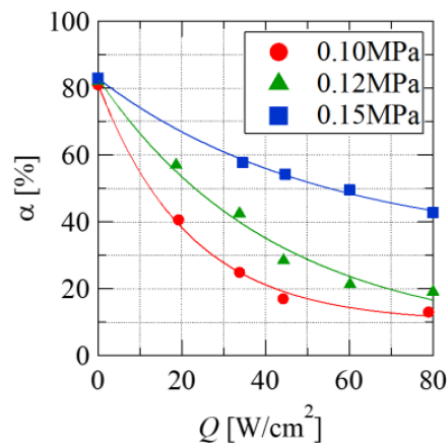


図7  $\alpha$ と熱流束 $Q$ の関係

以上より、抵抗型超伝導限流器のパンケーキコイルモデルにおいて、 $LN_2$ の動的絶縁破壊特性の体積効果を体系的に評価することができた。この結果は、超伝導限流器の絶縁設計の高信頼度化・合理化に寄与するものと考えられる。

## (2) 超伝導限流器と電力システムとの協調運用

超伝導限流器 (SFCL) が導入された電力システムにおいては、SFCL 間および SFCL 背後の電力システムとの限流協調が重要である。また、複数の SFCL を導入する際、電力システムの構成や規模に適した SFCL の導入箇所および導入台数の検討が不可欠である。本研究では、IEEE14 母線モデルにおいて、複数の SFCL の限流協調について検討した。

### ①シミュレーション条件

図 8 に示す IEEE14 母線モデル系統 (5 機, 14 母線, 20 線路) <sup>(3)</sup> に SFCL の導入を想定した。発電機母線以外の 9 母線における三相地絡故障 (5 サイクル) 時の限流特性と電力システムの過渡安定度 (発電機の内部相差角動揺) を PSCAD/EMTDC を用いて解析した。超伝導テープの実測ベースの電界—電流—温度 ( $E-I-T$ ) 特性<sup>(4)</sup>により、SFCL の抵抗発生特性を模擬した。SFCL の動作パラメータである平常時負荷電流  $I_{op}$  に対する臨界電流  $I_c$  の割合は全て  $I_c/I_{op}=2[\text{p.u.}]$  とした。

### ②シミュレーション結果および考察

一例として、図8の8線路にSFCLを導入したケースについて、母線14の地絡における (a)line6-11の電流波形と (b)発電機G5の内部相差角 $\delta$ を図9に示す。SFCLの導入によって故障電流と発電機の内部相差角動揺が抑制されていることがわかる。

図10は、図8の各線路・各故障母線ごとに故障電流 $I_{pro}$  (計180通り) を求め、当該線路の平常時負荷電流  $I_{op}$  に対する割合  $I_{pro}/I_{op}[\text{p.u.}]$  に換算し、各線路ごとに集約・平均化した期待値をSFCL導入有無について示したものである。同図より、SFCLの導入によって全ての線路において限流効果が得られていることがわかる。

図11は、各線路の故障電流と同様に、各発電機の内部相差角動揺 $\Delta\delta$ を集約・平均化した期待値をSFCL導入有無について示したものである。同図より、SFCLの導入によって全ての発電機において過渡安定度向上効果が得られていることがわかる。

すべての故障点に対して SFCL が限流効果と過渡安定度向上効果を発揮すること (限流協調) を目指して、図 8 の計 20 線路への SFCL 導入パターンをパラメータとして解析を行った。その結果として得られた最適な SFCL 導入パターンが図 8 の 8 線路であり、IEEE14 母線モデルにおいて SFCL の限流協調が検証された。

### <得られた成果の国内外における位置づけとインパクト>

本研究では、超伝導限流器のクエンチ環境を模擬した突発的な気泡擾乱状態における「動的絶縁破壊電界」をベースとした絶縁設計を提案しており、コンパクト化という抵抗型超伝導限流器の特長を活かした合理的な絶縁設計を目指している点において、独創的であると言えることができる。また、本研究の成果は超伝導限流器のみならず、超伝導ケーブル、超伝導変圧器、超伝導発電機、超伝導エネルギー貯蔵装置 (SMES) など、各種の超伝導電力機器の設計や運用に波及し得る。これにより、国の科学技術イノベーション総合戦略における「革新的エネルギー変換・貯蔵・輸送技術の高度化」に貢献し、現代および次世代の社会におけるエネルギーインフラ構築に対するインパクトを与えることが期待される。

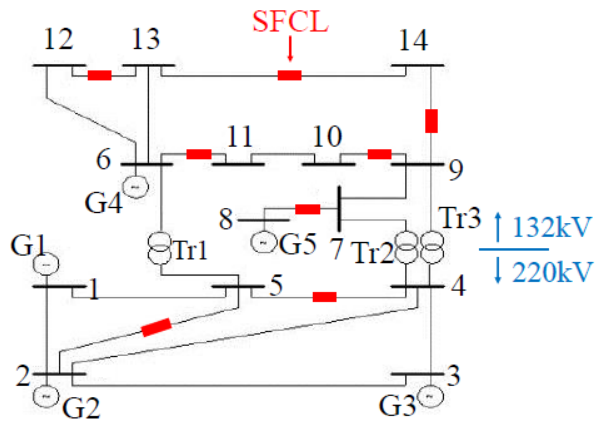
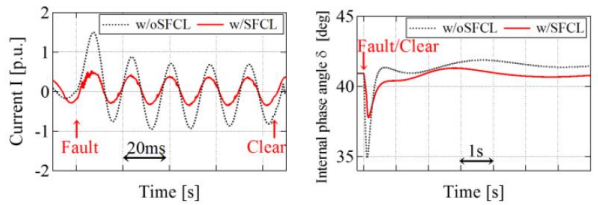


図 8 IEEE14 母線モデル系統



(a) Current waveform (line 6-11) (b) Internal phase angle waveform G5

図 9 母線 14 地絡時の Line6-11 の電流波形 および G5 の内部相差角動揺

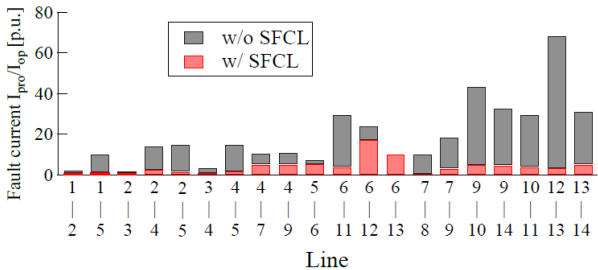


図 10  $I_{pro}/I_{op}$  の期待値

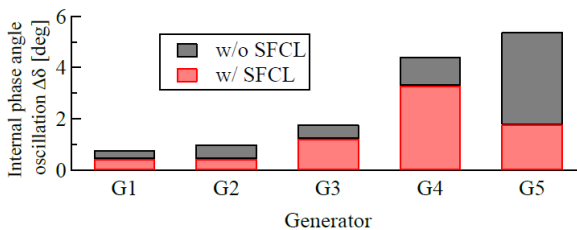


図 11  $\Delta\delta$  の期待値

<今後の展望>

本研究では、交流送電システムにおける超伝導限流器の導入を想定して研究を遂行したが、再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、直流送電システムにおける超伝導限流器の導入が期待されている。そこで、本研究の交流送電システムに関する成果・手法を直流送電システムに適用・拡張し、直流送電システムにおける故障解析、直流電流に対する超伝導限流器の限流特性、直流電圧に対する液体窒素の静的／動的絶縁性能を評価する予定である。

<引用文献>

- (1) N. Hayakawa, et al.: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.22, No.5, pp.2565-2571 (2015)
- (2) N. Hayakawa, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.29, No.5, 5603106 (2019)
- (3) P. Demetriou, et al.: IEEE System Journal, Vol.11, No.4, pp.2018-2117 (2017)
- (4) N.Hayakawa, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.28, No.4, 5602304 (2018)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 N.Hayakawa, M.Mimbu, H.Kojima, S.Isojima, M.Kuwata	4. 巻 29
2. 論文標題 Dynamic Breakdown Characteristics of Pancake Coil Model for Resistive type Superconducting Fault Current Limiters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 5603106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 N. Hayakawa, M. Mimbu, Y. Mori, H. Kojima, S. Isojima, M. Kuwata	4. 巻 -
2. 論文標題 Quench-induced Dynamic Breakdown Characteristics of HTS Pancake Coil Model in Liquid Nitrogen for Resistive SFCL	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 N. Hayakawa, Y. Mori, H. Kojima	4. 巻 -
2. 論文標題 Fault Current Limitation Coordination of Multiple SFCLs in IEEE 14-Bus Test System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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10件（うち招待講演 3件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 N.Hayakawa, M.Mimbu, H.Kojima, S.Isojima, M.Kuwata
2. 発表標題 Dynamic Breakdown Characteristics of Pancake Coil Model for Resistive type Superconducting Fault Current Limiters
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Hayakawa, M. Mimbu, Y. Mori, H. Kojima, S. Isojima, M. Kuwata
2. 発表標題 Quench-induced Dynamic Breakdown Characteristics of HTS Pancake Coil Model in Liquid Nitrogen for Resistive SFCL
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Hayakawa, Y. Mori, H. Kojima
2. 発表標題 Fault Current Limitation Coordination of Multiple SFCLs in IEEE 14-Bus Test System
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Hayakawa
2. 発表標題 Electrical Insulation Techniques for Superconducting Fault Current Limiters
3. 学会等名 10th Asian-ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究 分担者	小島 寛樹  (KOJIMA HIROKI)  (00377772)	名古屋大学・工学研究科・准教授    (13901)	