

〈一般研究課題〉 環境調和型エネルギー輸送技術としての
超電導送電に関する研究
助成研究者 名古屋大学 早川 直樹



環境調和型エネルギー輸送技術としての 超電導送電に関する研究

早川 直樹
(名古屋大学)

Research on Superconducting Power Transmission as an Environment-friendly Energy Transmission Technology

Naoki Hayakawa
(Nagoya University)

Abstract:

From the viewpoints of environment-friendly benign electric power transmission system for next generation, high temperature superconducting (HTS) cables have been developed and demonstrated in Japan, USA, Korea, and so on. The cryogenic electrical insulation of HTS cables at liquid nitrogen (LN_2) temperature, 77K, has been regarded as one of key technologies to be established for the practical development of the HTS cables.

In this paper, based on the volume effect on PD inception electric field strength (PDIE) with a parameter called SSLV (Statistical Stressed Liquid Volume), we evaluated PDIE of a full-scale HTS cable sample. Experimental results revealed that PDIE of the full-scale HTS cable sample at atmospheric LN_2 pressure under ac voltage application was consistent with the minimum PDIE value in the previous experiments. These results verify that $15.4 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ obtained in this paper can be regarded as a criterion of PDIE in consideration of the volume effect for the practical insulation design of actual HTS cables.

1. はじめに

地球温暖化，地球環境保護が世界規模の社会問題となっている現在，その原因である二酸化炭素の排出量を削減するためには，エネルギー利用の効率化を可能とする次世代の環境調和型エネルギーシステムを構築することが必須である．そのためのブレイクスルー技術の一つとして，世界各国において実用化に向けた研究開発が進められている超電導送電技術がある．超電導送電は超電導導体を77K (-196℃)の極低温温度まで冷却することにより，電気抵抗0，すなわち電力輸送時のエネルギー損失を0とすることができる画期的な送電技術である．

超電導送電の実用化への障壁となっている共通技術課題の一つとして、極低温環境下における電気絶縁技術がある。そこで、本研究では、超電導ケーブルを対象として、その電気絶縁構造を模擬したサンプル電極において、部分放電（絶縁破壊の前駆現象、PD：Partial Discharge）の開始特性を評価するとともにそのメカニズムを考察し、超電導ケーブルの実用的かつ合理的な絶縁設計のための技術的指針を提示することを目的としている^{[1][2]}。本論文では、まず、世界における超電導ケーブルの開発動向と技術開発課題の一つである極低温環境下の電気絶縁技術の重要性について述べる。次に、超電導ケーブルの極低温電気絶縁技術として、実規模レベルの超電導ケーブルサンプルを用いて部分放電開始電界（PDIE：PD Inception Electric field strength）の体積効果について統計的手法を用いて定量的に評価した結果について述べる。

2. 超電導ケーブルの開発動向

超電導送電の実用化に向けた開発として、超電導発電機、超電導変圧器、超電導ケーブル、超電導限流器、超電導エネルギー貯蔵装置（SMES）などが世界中で研究されている。なかでも、超電導ケーブルは実用化に最も近いと考えられており、世界各国で実証試験やフィールド試験が行われている。国内外における超電導ケーブルの開発状況を表1に示し、以下に概要を述べる。

国内においては、定格電圧66kV、定格電流1kA、定格容量114MVA、全長100mの三心一括型超電導ケーブルが開発され、2001年～2002年にかけて実証試験が実施された^[3]。同試験では、敷設に関する評価や熱損失の評価、臨界電流の確認を行うとともに長期運転性能などが評価され、超電導ケーブルが実線路に適用可能な基本性能を有していることが確認された。また、2003年～2005年にかけて、経済産業省産業技術環境局による国家プロジェクト「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」（Super-ACE）の一環として、定格電圧77kV、定格電流1kA、全長500mの単心型超電導ケーブルが開発され、実証試験が行われた^[4]。各種試験結果から、今後視野に入れられている5kmの超電導ケーブルシステムの基本仕様が検討されている。さらに、2008年より、新しい国家プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」がスタートし、定格電圧275kVの高電圧超電導ケーブルの開発が目標とされている。

表1 国内外における超電導ケーブル開発状況

Country	Project	HTS material	I_c	Rated Voltage	Rated Current	Length
Japan	TEPCO /SEI	Bi2223	2.7kA	66kV	1kA	100m
	Super-ACE	Bi2223	1.57kA	77kV	1kA	500m
USA	Albany	Bi2223 (30m:YBCO)	1.8kA	34.5kV	0.8kA	350m
	LIPA	Bi2223	115A /tapes	138kV	2.4kA	610m
	AEP-Bixby	YBCO	-	13.2kV	3kA	200m
Korea	DAPAS	Bi2223	4730A	22.9kV	1.25kA	30m
	KEPRI	Bi2223	1800A (@5m cable)	22.9kV	1.25kA	100m

海外における超電導ケーブルの開発は、既に実システムでのフィールド試験が行われるなど、実用化に向けた段階が着実に進みつつある。アメリカでは、エネルギー省（DOE）による国家プロジェクトとして、3プロジェクト（Albany^[5]、LIPA^[6]、AEP^[7]）が立ち上がり、それぞれ異なるケーブル構造を用いて実用化への検討が行われている。特に、Albanyプロジェクトでは、34.5kV/800A、全長350mの超電導ケーブルが2006年7月に世界で初めて電力会社の保有する実線路に導入され、超電導ケーブルを含むトータルシステムとしての性能評価と運転試験が行われた。さらに、2008年2月より、超電導ケーブルの一部（30m）をイットリウム系線材に置き換えた運転試験が行われている。また、韓国では、国家プロジェクトDAPAS（Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies）計画^[8]およびKEPRI（Korea Electric Power Research Institute）プロジェクト^[9]により、22.9kV/1250A、30mおよび100mの超電導ケーブルが開発され、2010年の154kV/1GVA級のケーブルシステムの実現に向けて、実システム導入を視野に入れた各種試験が行われている。

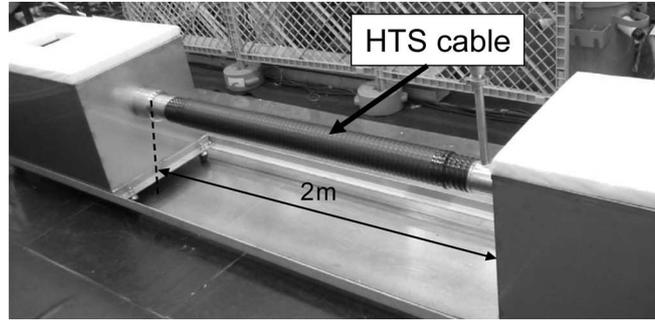
3. 極低温電気絶縁の意義

超電導電力機器の最大のメリットは、電気エネルギー輸送の低損失化、高密度・大容量化、機器サイズのコンパクト化にある。このため、超電導電力機器に関する研究開発は、超電導導体の低損失化、高電流密度化など、「電流」に視点が向けられる場合が多い。しかし、現代社会の根底を支えるエネルギー基盤である電気は、電流としてではなく電力（パワー）として消費されることを忘れてはならない。すなわち、電力・エネルギー分野に超電導技術を適用・活用するためには、電力＝電流×電圧より、「電圧」に対する視点が必要不可欠である。例えば、100MW級の電力を輸送するために1kA級の超電導導体を用いる場合、10～100kV級の高電圧が必要になる。超電導導体が低損失で大電流を通電することができたとしても、極低温環境下において高電圧に対する電気絶縁が確保されなければ、超電導電力技術は使い物にならないと言っても過言ではない。

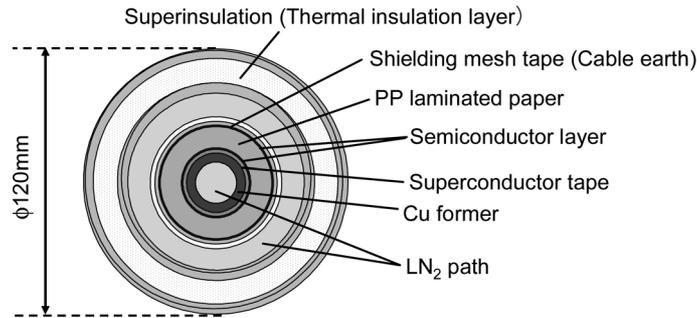
超電導ケーブルの電気絶縁構造は、一般的には高電圧導体に絶縁テープが積層された同軸円筒形状であり、絶縁テープに液体窒素が含浸された複合絶縁系である。この電気絶縁構造は、液体窒素を絶縁油に置き換えれば従来のOFケーブルと基本的に同様であることから、超電導ケーブルの絶縁設計においてOFケーブルの絶縁設計が適用されることがある。しかし、極低温電気絶縁を理解せず、超電導ケーブルの絶縁設計にOFケーブルなどの従来型ケーブルの絶縁設計を適用するのは危険であると言わざるを得ない。したがって、液体窒素／積層テープ複合絶縁系の放電基礎特性および超電導ケーブルの実運用状況を考慮した極低温電気絶縁に関する研究が必要不可欠である。

4. 実験サンプルおよび実験方法

実験サンプルの外観および断面図を図1に示す。供試サンプルは、全長3.2m、有効長2mの実規模レベルの超電導ケーブルであり、両端の冷却容器から液体窒素を注入し、電気絶縁層を含浸する構造となっている。有効長部分のケーブル構造は、中心から外径方向に向かって、液体窒素流路／銅フォーマ／超電導テープ／半導電層／電気絶縁層（ポリプロピレン積層テープ、絶縁厚さ：125 μ m／枚×64枚＝8mm）／半導電層／シールドメッシュテープ（ケーブルアース）／クレープ紙／液体窒素流路／スーパーインシュレーション（断熱層）となっている。



(a) 外観



(b) 断面図

図1 超電導ケーブルサンプル

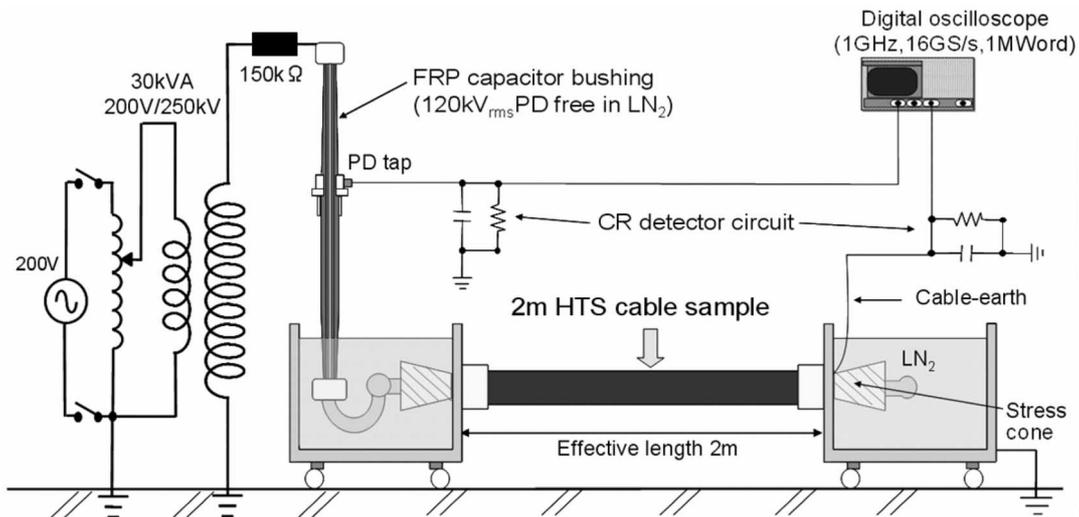


図2 実験回路

本実験において構築した実験回路を図2に示す。電圧印加には、液体窒素浸漬状態において交流電圧 $120\text{kV}_{\text{rms}}$ までコロナフリーであるFRP製のコンデンサブッシングを使用した。また、ブッシングと逆側の冷却容器のみから液体窒素を注入し、導体部を浸漬させることにより液体窒素/積層テープ複合絶縁系を形成した。含浸の評価としては、ケーブルの静電容量を測定することにより行った。大気圧環境下において、超電導テープに周波数 60Hz の交流高電圧を電圧上昇率 $3\text{kV}_{\text{rms}}/\text{s}$ でステップ的に昇圧し、ケーブルアースおよびブッシングPDタップからCR検出インピーダンスを介してPD信号をデジタルオシロスコープにて測定した。本実験におけるPD検出感度は 25pC である。また、液体窒素冷却時におけるケーブル両端の温度変化を測定した。測定点としては、両冷却容器内の2点(A,B)とした。同時に、液面計を液体窒素注入側冷却容器に設置し、液面変化を測定した。

5. 実験結果

5.1 冷却特性

冷却過程におけるケーブル両端の温度変化および液面変化を図3に示す。同図において、液体窒素注入開始30分後から150分後までは、液面の高さがほぼ一定になっていることがわかる。これは、ブッシング側冷却容器に液体窒素が流入している期間に相当する。初期冷却には、約4時間30分を要した。また、使用した液体窒素の総量は、蒸発分も含めて約900ℓ（LGC6.2本分）であり、ケーブルサンプルの内容積は約600ℓであるため、液体窒素の注入効率率は約67%であることがわかる。

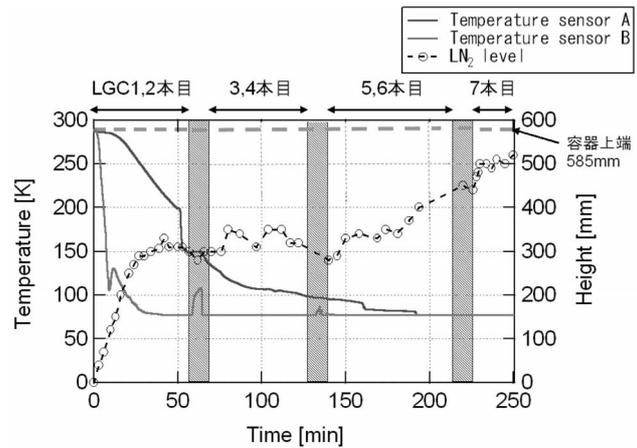


図3 冷却特性

5.2 部分放電開始特性

供試超電導ケーブルサンプルを大気圧液体窒素中に浸漬・含浸した後、交流高電圧を印加してPD信号を検出した。本実験では、検出された2つの信号（ケーブルアース、ブッシングPDタップ）に基づいて、図4に示す識別アルゴリズムにより、PD信号とノイズ信号を識別した。すなわち、2つの検出信号の印加交流電圧波形における発生位相と極性の両観点により、PD信号を抽出した。

供試超電導ケーブルサンプルにおいて得られたPD信号の一例を図5に示す。同図(a)はケーブルアースからのPD信号、同図(b)はブッシングPDタップからのPD信号である。両図およびそれらの拡大図より、PDは印加交流電圧のピーク位相付近で発生していることがわかる。同図における部分放電開始電圧（PDIV）は $97.6\text{kV}_{\text{rms}}$ であり、電気絶縁層に印加される最大電界に換算した部分放電開始電界（PDIE）は $15.2\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ となる。

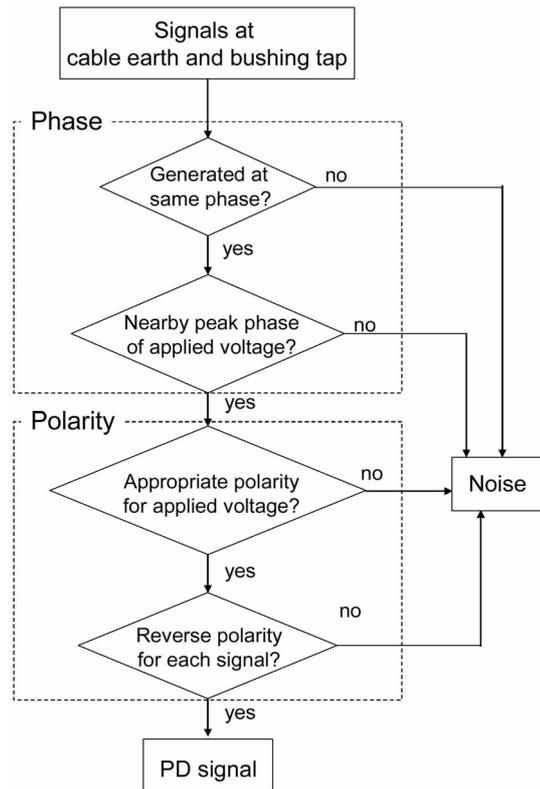
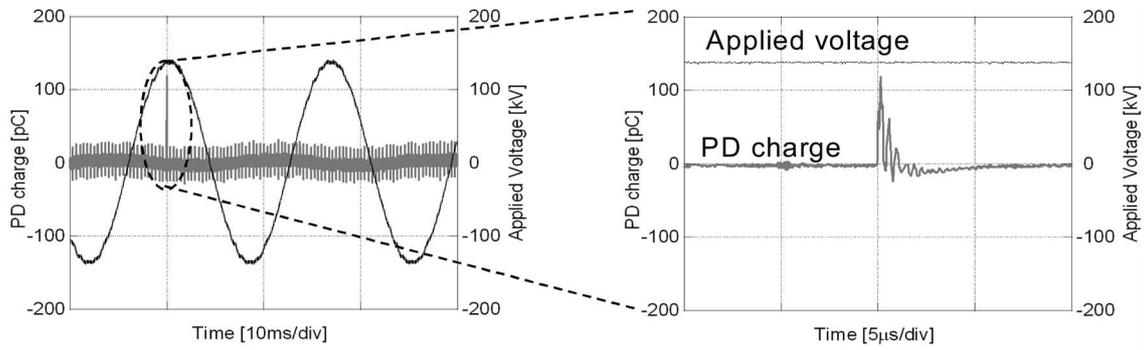
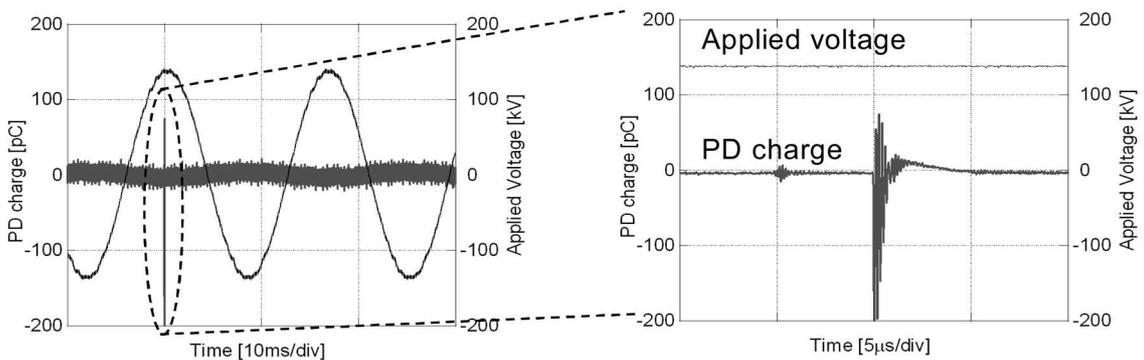


図4 部分放電信号識別アルゴリズム



(a) ケーブルアース信号



(b) プッシングPDタップ信号

図5 部分放電信号 (PDIV=97.6kV_{rms}, PDIE=15.2kV_{rms}/mm)

5.3 部分放電開始電界の統計的解析

前節の手順により、供試超電導ケーブルサンプルのPDIEを13回繰返し測定し、弱点破壊理論に基づくワイブル分布によって統計的に解析した。図6に示すように、PDIEのワイブルプロットは直線上にのっており、PDIEの統計的ばらつきがワイブル分布に従うことがわかる。また、ワイブルプロットから算出した累積確率50%のPDIE (PDIE₅₀)は15.8 kV_{rms}/mm、PDIEのばらつきの度合いを示す形状パラメータ (m値)は19.2であることがわかる。

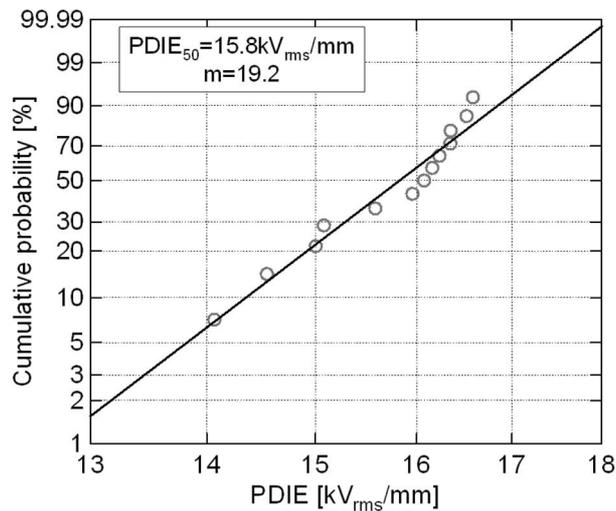


図6 部分放電開始電界のワイブルプロット

5.4 部分放電開始電界の体積効果

供試超電導ケーブルサンプルにおけるPDIEの体積効果について、統計的電界体積（SSLV）により評価した。SSLVは、絶縁材料の誘電率の違いから電界が集中する部分において、その微小ユニットの局所電界での重み付けを考慮した有効長全体の電界体積であり、次式で表される^[1]。

$$SSLV = \iiint_v \left(\frac{E_i}{E_m} \right)^m dv$$

ここで、 E_m は最大電界、 E_i は微小ユニットの局所電界、 m は統計的ばらつきを表すワイブル分布の形状パラメータであり、被積分項の $(E_i/E_m)^m$ は微小ユニットの放電発生確率を表している。今回の実験で取得した m 値（ $m=19.2$ ）を用いて算出された供試サンプルのSSLVは 1423mm^3 であった。

PDIEの体積効果を評価した結果を、これまでに取得したデータ（ $SSLV < 470\text{mm}^3$ ）^[2]とともに図7に示す。同図より、今回取得した実規模サンプルのプロット（図中●印）は $SSLV=1423\text{mm}^3$ において $15.8\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ にあることがわかる。すなわち、 $SSLV > 100\text{mm}^3$ の領域においてPDIEが一定値となる傾向にあり、PDIEの体積効果における下限値は $15.4\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ であると言える。

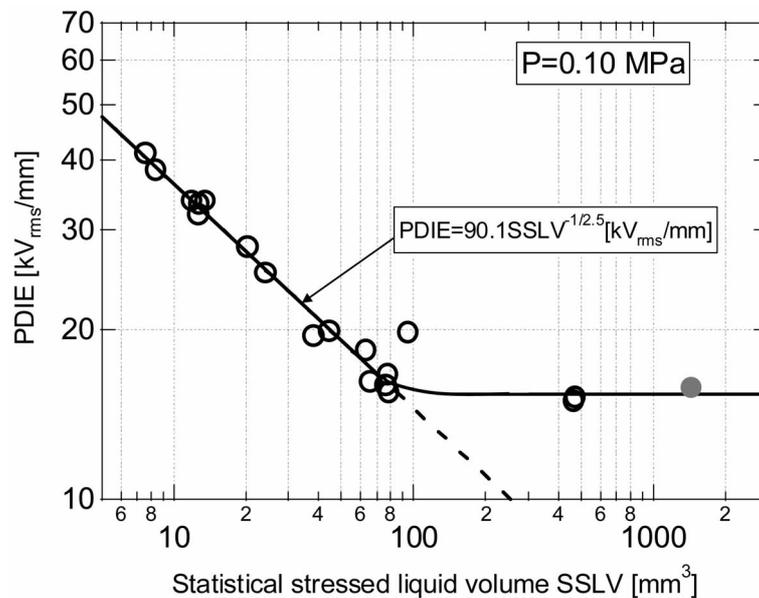


図7 部分放電開始電界の体積効果

6. あとがき

次世代の環境調和型エネルギー輸送技術の一つとして実用化が迫りつつある超電導ケーブルの絶縁設計に資する電気絶縁特性として、極低温環境下における部分放電開始電界（PDIE）の体積効果について定量的評価を行った。実規模レベルの超電導ケーブルサンプルにより、従来の統計的電界体積（SSLV） $< 470\text{mm}^3$ から $SSLV=1423\text{mm}^3$ まで拡大して実験・解析を行った結果、 $SSLV > 100\text{mm}^3$ の領域においてPDIEが一定値となる傾向にあり、PDIEの体積効果における下限値として $15.4\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ を得ることができた。

参考文献

- [1] N.Hayakawa, T.Kobayashi, M.Hazeyama, T.Takahashi, K.Yasuda and H.Okubo, "Partial Discharge Inception Characteristics of LN2 / Polypropylene Laminated Paper Composite Insulation System for High Temperature Superconducting Cables", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No.1, pp.166-174, 2005
- [2] N.Hayakawa, M.Nagino, H.Kojima, M.Goto, T.Takahashi, K.Yasuda and H.Okubo, "Dielectric Characteristics of HTS Cables Based on Partial Discharge Measurement", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1802-1805, 2005
- [3] O.Tsukamoto and S.Akita, "Overview of R&D Activities on Applications of Superconductivity to Power Apparatuses in Japan", Cryogenics, Vol.42, pp337-344, 2002
- [4] S.Mukoyama, M.Yagi, M.Ichikawa, S.Torii, T.Takahashi, H.Suzuki and K.Yasuda, "Experimental Results of a 500 m HTS Power Cable Field Test", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, pp.1680-1683, 2007
- [5] C.S.Weber, C.T.Reis, A.Dada, T.Masuda and J.Moscovic, "Overview of the Underground 34.5 kV HTS Power Cable Program in Albany, NY", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1793-1797, 2005
- [6] J.Maguire, F.Schmidt, S.Bratt, T.Welsh, J.Yuan, A.Allais and F.Hamber, "Development and Demonstration of a HTS Power Cable to Operate in the Long Island Power Authority Transmission Grid", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.17, No.2, pp.2034-2037, 2007
- [7] J.Demko, I.Sauers, D.James, M.Gouge, D.Lindsay, M.Roden, J.Tolbert, D.Willen, C.Tr_holt and C.Nielsen, "Triaxial HTS Cable for the AEP Bixby Project", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.17, No.2, pp.2047-2050, 2007
- [8] K.Ryu, Y.Jo and M.Park, "Overview of the Development of the Advanced Power System by the Applied Superconductivity Technologies Programme in Korea", Superconductor Science and Technology, Vol.19, pp.S102-S108, 2006
- [9] S.H.Sohn, H.S.Choi, H.R.Kim, O.B.Hyun, S.W.Yim, T.Masuda, K.Yatsuka, M.Watanabe, H.S.Ryoo, H.S.Yang, D.L.Kim and S.D.Hwang, "Field Test of 3 phase, 22.9kV, 100m HTS Cable System in KEPCO", Journal of Physics, Conference Series, Vol.43, pp.885-888, 2006