世界最長500 m超電導ケーブルのフィールド試験

Successful Field Testing Result of the World's Longest 500-m High- T_c Superconducting Power Cable

八木正史	* 向山晋	**	石 井	登* ²	佐藤 修*2
Masashi Yagi	Shinichi Mul	koyama	Nob	oru Ishii	Osamu Sato
市川路晴* ³ Michiharu Ichikawa	高橋俊裕 ^{*3} Toshihiro Takahashi	鈴木 Hiroshi	寛 ^{*3} Suzuki	木村昭夫 Akio Kimura	E ^{*4} 安田健次 ^{*4} Kenji Yasuda

概要 経済産業省のプロジェクトとして,新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が超電導 発電関連機器・材料技術研究組合 (Super-GM) に委託した「交流超電導電力機器基盤技術の研究」プロ ジェクトの中で,古河電工と財団法人電力中央研究所とSuper-GMは世界最長となる500 m超電導 ケーブルのフィールド試験についてすべての予定した試験を完了して,将来の高温超電導ケーブルの 実用化に向けた基本的な技術の確立に成功した。

高温超電導ケーブルを実用化するためには、延長数kmのケーブルを液体窒素で冷却しなければな らないことから、基本的な運転特性や液体窒素の長距離循環による問題について、詳細に確認する必 要があった。古河電工が製作した500 m長の高温超電導ケーブルを、電力中央研究所 電力技術研究 所(横須賀)に布設して、2004年4月より、基本特性試験、定常運転特性、負荷変動試験、過酷・限 界性能試験を進めてきた。この度、当該試験が成功裏に終了したのでその成果をまとめた。

1. はじめに

超電導電力ケーブルは、コンパクト・大容量送電が可能であり、将来の電力システムに対して「CO2排出抑制」、「環境調和 性の向上」、「安定度向上」、「コストダウン」のニーズに応える ことができ、大きな導入効果が期待できる。

一方で、超電導送電を実現させるためには、長距離超電導ケー ブルを液体窒素で冷却する必要があり、ケーブルの冷却特性、 液体窒素の長距離循環などのシステムとしての課題を解決する 必要がある。超電導ケーブルの冷却区間については、冷却区間 長が数kmである現用ケーブルの冷却設備を超電導ケーブルの 冷凍機に置き換えることを想定し、これと同等の冷却区間長と した。開発目標とする超電導ケーブルの区間長を5 kmに設定 し、ケーブルの冷却特性、熱機械特性を等価模擬できる最小単 位を500 m長とした。500 m長は、超電導ケーブルの布設時の ジョイント間隔(マンホール間隔)と考えることもでき、この 長さのケーブルを1ユニットと考えてジョイントでつないで 5 kmの長さとする。そのため、500 mケーブルでの挙動確認 によって、超電導ケーブルの全体システムへのスケールアップ が可能となる。

500 m超電導ケーブルの製造と布設は古河電工が担当し、試

- *2 株式会社 ビスキャス
- *3 財団法人 電力中央研究所
- *4 超電導発電関連機器·材料技術研究組合

験は電力中央研究所と古河電工が共同で電力中央研究所電力 技術研究所(横須賀)にて実施した。

2. 超電導ケーブルの構造

図1に高温超電導ケーブルの構造図を,表1にケーブルの諸 元を示す。単心構造,低温電気絶縁,超電導シールド層を有す る77 kV,1 kA級の送電ケーブルであり,150 mm φの管路内 に収納可能な133 mmの外径とした。中心部のフォーマ部はス テンレス製のスパイラル管と銅線のより線から構成され,その 表面にBi2223テープ線材から構成される導体層がある。その 外側に厚さ8 mmの電気絶縁層を介してBi2223テープ線材の シールド層が配置されている。シールド層の外周に保護層があ り,ここには全長の温度分布を測定するための光ファイバと交



Structure of HTS cable.

^{*} 研究開発本部 環境・エネルギー研究所

項目	構成		
	フォーマ	SUS スパイラル管 山空編 ト h 線道体	28
導体層		十三週より脉导体 (250 mm ²)	
	超電導導体層	Bi2223テープ線材	30
絶縁層	絶縁体 (8 mmt)	半合成紙	48
シールド層	超電導シールド層	Bi2223テープ線材	58
断熱管	断熱内管	SUSコルゲート管	92
	真空断熱層	SI (スーパーインシュ レーション)	
	断熱外管	SUS コルゲート管	124
	防食層	PVC	133

表1 高温超電導ケーブルの仕様¹⁾ Specifications of the HTS cable.

流損失校正用のヒータ抵抗線が巻き付けられている。断熱管は, 2重SUSコルゲート管の間に,スーパーインシュレーション (SI)を多層積層した真空断熱構造であり,1W/m以下の熱侵 入量を目指した構成となっている。最外層にはPVCの保護層 が被覆されている。重量は1mで14kgと従来のケーブルより 軽量となっている。その他,部分放電測定用の箔電極,ケーブ ル挙動確認用の鉛標識を組み込んでいる。

3. 超電導ケーブルの製造¹⁾

3.1 超電導コアの製造

超電導Bi2223テープ線材は、0.2 mmと非常に薄く、またも ろい材料であるために、極度の張力、極度の曲げにより臨界電 流(I.)の低下を引き起こす。そこで、多数のテープ線を巻き付 ける際の張力を個別に最適に制御し、線材に加わるひずみをご く微少に押さえながら、フォーマに巻き付けて1層の導体層を 形成した。電気絶縁層は、従来のOFケーブルの紙巻機を使用 して、半合成紙 (PPL紙) を多数層巻き付けて絶縁層を形成し た。超電導シールド層も同様に、超電導Bi2223テープを絶縁 層上に張力をコントロールして巻き付けた。ケーブル製造の工 程中、超電導ケーブルは何度もドラムに巻き取られて次の工程 に引き渡されるため、その度にケーブルに曲げひずみが加えら れる。そのため超電導テープの巻線時のひずみや、ドラム巻き のひずみによりケーブルの劣化が無いかの確認が必要であり, 主要な工程後に1 mのテストピースを,最終では20 mのテス トピースを、ケーブル端部より切り出して、Icの測定を行った。 図2にそれぞれの超電導テープのIcを積算した値を100%とし て、各工程での超電導層、超電導シールド層のIcの変化を示し た。この結果、ほとんど劣化が無く、500 m超電導ケーブルの 製造が完了できていることを確認した。

3.2 断熱管の製造

断熱管を構成するステンレスコルゲート管は、ステンレス板 を溶接してパイプ状にして、その後、波付け加工を行って形成 した。断熱内管と断熱外管の間の断熱層にあるスーパーイン シュレーションは、1 W/mの低い熱侵入を実現するために事 前に研究開発を行い、そこで得られた最適条件で施工された。 この最適条件を500 m全長にわたり実現するための工場製造技 術¹が、新たに確立された。また、高い断熱性能を実現するた



めには、断熱層は高い真空を維持することが必要である。その ために、断熱層の形成においては、断熱管表面の洗浄によるク リーン化、湿度管理等による除湿、更に溶接部での溶接割れや ピンホール等が無いようにする必要がある。そのため、ピンホー ルフリーの断熱管製造技術の確立と、製造中のピンホールなど の検査技術が重要となる。古河電工では、現用ケーブルのステ ンレス被製造のために、長尺ステンレスコルゲート管の製造技 術を確立しており、その技術の展開と、製造中における溶接部 のピンホールなどの検査技術として渦流探傷試験の確立によ り、信頼性の高い断熱管の製造を可能とした。製造後にも 10-9Pa・m³/s以下の検出感度でHeリーク試験を行い、リーク が無いことを、更に設計圧力(1.1 MPa)の1.5倍の圧力試験を 行い、気密漏れが無いことを確認した。超電導ケーブルの外観 を図3に示す。外観はPVCシースをかぶせているため従来の ケーブルと変わらない。

4. 超電導ケーブルの運搬²⁾

フィールド試験の実施のため,製作した超電導ケーブルを古 河電工(千葉県市原市)から電力中央研究所(神奈川県横須賀市) まで輸送する必要がある。運搬の間にケーブルコアと断熱管の 直径の違いにより断熱管の中で,コアが大きな振幅で振動する ことが予想され,それによるケーブルコアの損傷が心配された。 そこで,輸送による振動によってケーブルに及ぼされる影響を 調べるために,テストピースを用いて振動試験を事前に実施し



図3 500 m高温超電導ケーブルの出荷前撮影 Ceremonial photograph before shipment of the 500-m HTS cable.

た。テストピースには、すべて陸上輸送とした場合を考慮して、 3h、3G、7Hzの連続的な振動を加え、その前後のI_cの変化を 調査した。その結果、I_cの低下は無く、超電導ケーブルは全行 程を陸上輸送によっても問題無いことが確認されたが、より安 全性を考慮して海上輸送を実施した。市原ふ頭から横須賀港へ 船によって約50 km運ばれ、港からトレーラによって10 km運 ばれた(図4)。垂直及び水平の振動はケーブル・ドラムに付け られた加速度計によって輸送の間に測定された。この結果、水 平の振動は、ほとんど0Gであった。一方、海上輸送の間の垂 直振動は0.2G未満であった。また、陸上輸送の間の垂直振動 は1.0G未満であった。輸送の間の最大振動は、電中研構内で 生じた1.5Gが1回だけであり、振動試験からするとケーブル にはほとんど影響が無いレベルであった。

5. 気中終端部の組み立て

気中終端部は、中部電力と古河電工の共同開発品を本試験の ために提供したもので、その構造を図5に、外観を図6に示す。 内部温度こう配槽、フォーマ槽、コア外部槽と3槽に分割して おり、更に、レール上を可動できる構造として、熱収縮により 過大張力が印加されないよう配慮した。

真空は,超電導ケーブルと気中終端部で区画されており,気 中終端部の組み立ての間,超電導ケーブルの断熱層の真空引き を行った。また,組み立て時には,部分放電用の箔電極,光ファ イバ用の光コネクタ,各種計測線のハーメチックを配置した。

6. 試験線路と冷却システム

試験線路のレイアウト³を**図7**に示す。レーストラック上の 試験線路で,河川横断橋りょう部を模擬した10 m高低差部, 熱収縮の緩和を目的としたオフセット部,管路布設を模擬した 地中埋設部などで構成されており,気中終端部はレール上にあ



図4 500 m高温超電導ケーブルの輸送 Transportation of the 500-m HTS cable.



図5 気中終端部の構造³⁾ Structure of termination.



図6 気中終端部の外観 Appearance of termination.

り熱収縮によって動作可能である。実際の試験線路を図8と 図9に示した。

超電導ケーブル用冷却システムは,液体窒素を循環して冷却 するもので,電気絶縁(液体窒素含浸紙絶縁)の含浸材として の機能も有している。極低温電気絶縁の絶縁破壊の起点となる 絶縁体中での液体窒素のガス化を避けるために,加圧してサブ





図8 500 m 高温超電導ケーブル (曲がり部から撮影) Test line of the 500-m HTS cable photographed from the U bend section.



図9 500 m高温超電導ケーブル (気中終端部から撮影) Test line of the 500-m HTS cable photographed from the termination.

クール状態(沸騰が起きる温度より低い状態)で循環し,液体 窒素の熱容量でケーブルを冷却する。

500 m超電導ケーブル用冷却システムには、冷却能力 1 kW@77 Kのスターリング式冷凍機を6台配して、4台をケー ブル冷却に2台を気中終端部冷却に割り当てた。リザーバタン クに圧力を掛けることで、液体窒素をサブクール状態として、 2台の循環ポンプでそれぞれ超電導ケーブルと気中終端部へ液 体窒素を循環、冷却させた。気中端末部とケーブル部の循環系 を分離してそれぞれ循環ポンプ、冷凍機を持った2系統とした ことで、初期冷却時における端末からの熱侵入をケーブルと分 離して冷却でき、初期冷却時間の短縮ができる利点を持ってい る。また、リザーバタンクにベース圧力を掛けて系全体でサブ クール状態にすることで、循環ポンプでの吐出圧力を下げるこ とができ、ポンプ負荷が下がることで冷却効率を高めることが できた。更に、ポンプ停止事故時においてもケーブルが損傷す ることなく一定時間運転を継続できる効果もある。

7. フィールド試験結果

電力中央研究所で行われた試験スケジュールは,以下のとおりである。2003年11月に高温超電導ケーブルの布設施工試験, 2004年3月~6月に基礎特性試験,9月~12月に定常運転試験, 2005年1月~2月に負荷変動試験と限界性能試験を行い,2005 年2月~3月にケーブル撤去と残存性能試験を実施した。

布設施工性試験,基礎特性試験,定常運転試験,負荷変動試 験,過酷限界性能試験等の試験結果について,その概略を報告 する。

7.1 布設施工性試験

布設施工性試験では,従来のケーブルと同じように管路引き 布設ができるかを検討した。

ケーブルの布設は, 事前にケーブル先端に取り付けたプーリ ングアイを用いて,地中埋設部,5m半径曲がり部を含んだ約 170m部分の管路引きを行い,その後,ホーリングマシンとボー ルローラを用いて,500m全線にわたって布設した。布設スター ト時に,ケーブルの先端に設計許容張力の90%となる16kNの 張力を加えたが,布設履歴を受けたケーブル先口6mを布設終 了後にサンプリングして臨界電流を測定した結果,ケーブル運 搬布設前後において特性の低下はみられなかった(図2)。また, 製造時にケーブル内部に加圧封止した乾燥空気はケーブル布設 後も正圧を維持していたことを確認し,更にその後のアルゴン リーク試験でも断熱管にリークが発生していないことを併せて 確認した²。

7.2 基礎特性試験

基礎特性試験では,主に冷却・昇温時の熱挙動,冷却特性試 験(熱侵入量),電気特性(初期耐電圧特性,臨界電流特性,交 流損失特性等)を確認した。

7.2.1 冷却と昇温試験

超電導ケーブルを室温から液体窒素温度(-196℃)まで冷却 するのに、低温の窒素ガスを用いて徐冷を行い、冷却後半から 液体窒素による冷却を行った。温度分布は、超電導コアに巻き 付けた光ファイバで測定された。

冷却に要した時間は,ガス冷却に117 h,液体窒素冷却に 21 hでトータルの冷却は138 h(約6日間)であった。

昇温は、液体窒素戻り配管の放出弁より液体窒素を放出させ てから昇温を行った。地中埋設部はこの放出弁よりも低位に位 置するため液体窒素が残存し、他の部分より遅れた形で昇温さ れた。ケーブル全域が室温まで達するのに要した時間は211 h (約9日間)であった。この昇温時間は外気温と日射に大きく依 存し、外気温が低く日射も少ないと気中終端部からの熱流入が 大幅に低下し要する時間も長くなった。

7.2.2 熱損失の測定

断熱管の熱侵入を測定する方法としては、液体窒素を一定の 流速で流し、上流(0 m地点)と下流(500 m地点)の温度差と 圧力差を測定して算出した。その結果,500 m超電導ケーブル の粘性損失を含んだ熱損失は1.23 W/mであり、断熱管外部よ り侵入する熱損失は1.21 W/mであった。

また、直線部に比較し曲がり部は約4~6倍の熱侵入が見ら れた。これは、曲がり部でケーブルコアの熱収縮によりケーブ ルコアが断熱配管内管を圧迫して断熱層の距離が縮まっている ため、断熱性能が低下したと考えられる。図10に曲がり部と 直線部の超電導ケーブルのX線撮影結果を示す。超電導ケーブ ルを垂直方向から撮影したもので、曲がり部では超電導コアが 熱収縮によって断熱層が押し付けられ、熱侵入が大きくなり、 かつ、機械的にも側圧が発生している。直線部においては、当 初の目標どおり,今回開発した超電導ケーブルは1 W/m以下の断熱性能を有することが確認された。

7.2.3 冷却の加圧について

液体窒素が循環中に,地上より10 m高さ部でのX線撮影結 果から,気相部と考えられる影が見つかった(図11)。今回の 冷却システムでは,ポンプ停止時においても,内部の圧力が維 持され,絶縁破壊が起きないようにリザーバタンク内をガス加 圧してある。当初,加圧ガスとして液体窒素の温度より沸点の 低いHeガスを用いたため,Heガスが液体窒素に溶解して, 10 m高さの低圧力で液体窒素の温度が上がったところでガス 化していることが分かった¹⁾。このHeガスが存在することに より,ケーブルコアの電気絶縁性能の大幅な低下が危惧される。 そこで,Heガスを加圧手段として用いず,加圧ガスとして窒 素ガスを効率的に使用する方法を考案して安定に循環できるこ とを確認した。

7.2.4 熱機械挙動

常温から液体窒素温度に冷却した時に、熱収縮のため導体部 であるコア部分が約0.3%収縮する%。この収縮がスムーズに行 われなければ応力が発生するため、熱収縮時の応力を緩和する 目的でケーブル線路の一部にスネーク状のオフセットを設けて いる。オフセットの構造を図12に示す。

500 m全線の動きをX線で確認したところ、ケーブルは冷却、



(a) 直線部



(b)U字部

図10 冷却中のX線写真

X-ray photograph of cable sections during LN₂ cooling. ((a) Straight section, (b) U bend section)



図11 10 m高部での X線写真³⁾ X-ray photograph taken at the 10 m-high rising and falling section.





図12 オフセット部の構造⁴⁾ Structure of cable offset.

昇温によってよく動き,オフセット部は冷却前後で約690 mm の収縮を吸収した。これは,約200 mの直線部のほとんどの熱 収縮を分担した計算で想定値に合致しており,機械応力緩和が 十分に機能していることが確認された。また,昇温時には,最 終的なケーブルの戻りは490 mmにとどまった。これは,昇温 時に温度上昇が遅れた地中埋設部側へケーブルが送り出された ためである4)。

7.2.5 電気特性試験(耐電圧,超電導特性)

超電導ケーブルが設計どおりの耐電圧性能と超電導特性を持 つかは、フィールド試験中に確認された。

(1) 耐電圧試験

耐電圧試験の試験条件は、10分間耐電圧値として、30年相 当の試験電圧を考慮し95 kVrmsとした。印加電圧値を 5 kVrms/minで95 kVrmsまでステップ的に上昇させた。この 時,電気絶縁層の健全性を把握するため、気中終端部の両端に 設置した箔電極を用いた同調法による部分放電測定を行った。 なお、ノイズレベルは100 pC相当であった。

課電した結果, 95 kVrms 10 min印加時に100 pC以上の部 分放電は検出されなかった。これにより,今回の超電導ケーブ ル絶縁設計手法のの妥当性を確認できた。

(2) 超電導特性

図13は超電導性能を示している。図13(a)では、直流 1000 Aを通電しても電圧は発生していない、すなわち電気抵 抗が0となっている。超電導の評価には、臨界電流が使われて おり、これは超電導の発生電圧が1 µV/cmとなった時の電流 値で定義される。今回のケーブルは500 m長なので、直流電流 を流して電圧が50 mV(0.05 V)となった時が臨界電流値とな る。図13に示すように平均液体窒素温度73 K(-200℃)では 導体コア層1910 A,シールド層1620 Aであった⁴⁾。これにより、 今回の超電導ケーブルは、当初の仕様である臨界電流1000 A 以上を満足している。**表2**に各温度時の臨界電流データを示す。 温度が低くなると、超電導の臨界電流は増加するのが分かる。

一方, 超電導ケーブルを交流で使用する場合, 磁場の変動に より交流損失が発生する。ケーブルの交流損失は平均液体窒素 温度73 Kで電流1000 Armsの時1.3 W/mで, 900 Armsを超





表2 500m 高温超電導ケーブルの臨界電流 Critical current of the 500-m HTS cable at different positions and temperatures.

温度	69 K (−204℃)	73 K (−200℃)	77 K (−196℃)
超電導導体(A)	2290	1910	1570
超電導シールド(A)	1965	1620	1350

える電流から交流損失が急増した4。この結果から今回製作し た超電導ケーブルの1000 Arms時の交流損失は断熱管の熱侵 入とほぼ同レベルであることが分かった。

7.3 定常運転試験結果4)

冷却システムの運転特性と電気絶縁特性を検証するために, 平均液体窒素温度73 K,液体窒素流量30 ℓ/min, 圧力03 MPa·abs で通電電流1000 Arms,対地間電圧70 kVrmsを1ヶ月連続で 印加した。これは絶縁劣化30年を想定したものである。

今回の超電導ケーブルは,超電導シールド層を持ち,超電導 特有の完全反磁性の特性により通電電流とは逆相の電流が流れ て磁場を外に漏らさない。図14に示すように,導体層1000 A



図14 500 m高温超電導ケーブルの電流波形⁴⁾ Current waveforms of the 500-m HTS cable.

通電時にシールド電流は980 Aで,遮へい率は98%であり,低 漏えい磁場ケーブルの性能を合わせて確認した。

更に、1ヶ月間課通電実施後に耐電圧試験(95 kVrms課電) を実施し、部分放電の発生が無いことを確認した。これにより、 電気絶縁性能に劣化の無いことを確認した。

7.4 負荷変動試験結果4)

実系統の日負荷変動を模擬して,電流を変動させて冷却の追 従を確認した。電流上昇時の冷却の追従は,若干のオーバー シュートが見られたが,3h程度で安定状態に落ち着いた。

7.5 過酷·限界性能試験結果⁴⁾

過酷・限界性能試験では,課通電継続の限界時間を見極める ために温度,圧力,部分放電の発生を指標に,冷凍機の故障を 想定して冷凍機を停止し定格の課通電を継続した。その結果, 初期の平均液体窒素温度が73 Kで液体窒素流量30 ℓ/minの条 件では,3.5 hで圧力が限界に達した。これにより,冷凍機故 障の発生後,特に慌てることなくケーブルでの送電を停止して 故障対応すれば良いということで,運用する上では満足できる 結果である。

その他, 冷凍機故障を想定した冷凍機停止試験, 冷却システムの停止試験(冷凍機, ポンプ停止), オーバカレント試験(*I*c の130%通電1h), 異常電圧を想定した過電圧試験(150 kV)を行った。

それぞれの試験後,臨界電流を測定したが,臨界電流の低下 は認められなかった。

7.6 ケーブル撤去及び残存性能試験

オフセット部, U字部, 10 m高低差部,地中埋設部,及び 端末部の曲げの履歴の加わった箇所でケーブル6 mをそれぞれ 採取して,臨界電流測定と外観検査を行った。また,比較のた めに直線部6 m×6本をサンプリングした。その結果,超電導 導体側の臨界電流は全く劣化が無く,超電導シールド側は局所 的に低下が見られた。この低下については,性能向上のための 更なる課題となるが,低下の大きさは5%程度と小さく実用上 は許容できる範囲内である。解体調査の結果においても,特に 線材の巻き乱れ,断線や折れなどが無いことが確認されている。

8. おわりに

本フィールド試験で超電導ケーブルは破壊せず,すべての試 験項目を終了した。その結果,超電導ケーブルが全長にわたり 健全であることを確認し,更に過酷・限界性能などの各種試験 に耐えて信頼性が高いことを確認した。また,一連の試験によ り,超電導ケーブルの設計,試験法,布設施工法,運用に対し て実用化に資する大きな成果が得られた。

現在,米国,韓国,中国等で超電導送電ケーブルの開発が進 行中である。それらの計画に先行して超電導ケーブルの実用化 に向けた種々のデータを入手できたことは意義が大きいと考え る。

なお,今回の試験期間には過去例を見ないほど多くの台風が 日本に上陸し,試験場も大型台風の直撃を3回受けた。超電導 ケーブルはその時,強風,大雨にさらされたが,損傷すること なく無事試験を継続することができた。その点でもケーブルの 堅牢さを検証できたと考えている。

謝辞

本研究は経済産業省のプロジェクトとして,新エネルギー・ 産業技術総合開発機構 (NEDO) が超電導発電関連機器・材料技 術研究組合 (Super-GM) に委託した「交流超電導電力機器基盤 技術の研究」プロジェクトの中で実施したものである。プロジェ クト関係者の皆様に感謝申し上げる。

参考文献

- 向山,八木,市川,高橋,鈴木:「500 m長超電導ケーブルの開発」, 平成17年電気学会全国大会,5-S15-3.
- 2) 八木,丸山,向山,石井,鈴木,市川,木村:「500 m高温超電 導ケーブルフィールド試験(2)ケーブル布設施工性」,平成16 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,354.
- 3) 木村,安田,向山,八木,市川,高橋,鈴木:「500m長超電導ケー ブルの全体システム」,平成17年電気学会全国大会,5-S15-2.
- 4)市川,高橋,鈴木,向山,八木,木村:「500 m超電導ケーブル フィールド試験結果」,平成17年電気学会全国大会,5-S15-4.
- S. Mukoyama, H. Hirano, M. Yagi, H. Kimura, and A. Kikuchi: "Test Results of a 30 m High-Tc Superconducting Power Cable," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 13 (2003), 1926.
- 6) T. Takahashi, H. Suzuki, M. Ichikawa, S. Akita, S. Maruyama, and A. Kimura: "Dielectric Properties of 500 m High-Tc Superconducting Cable," Applied Superconductivity Conference 2004, no. 1LJ05, (2004).