押出しポリエチレン絶縁超電導ケーブルの開発

正員 小崎 正光 (豊橋技科大)

正員 長尾 雅行 (豊橋技科大)

正員 水野 幸男 (豊橋技科大)

正員 清水 教之 (名古屋大)

正員 堀井 憲爾 (名古屋大)

1. ま え が き

高度情報化社会の到来と共に、電力供給システムは量と共に質の向上が強く求められる一方、大都市周辺においては環境調和や通信・電波障害などの観点から架空送電線の地中化が時代の要請となってきている。21世紀の大容量地中送電方式としてガス絶縁ケーブルや強制冷却 OF ケーブルと並んで超電導ケーブルが有力候補と考えられている。超電導ケーブルの利点は、一回線あたり送電容量が大きく、OF ケーブルやガス絶縁ケーブルに比べて、大容量になるほど有利になることが挙げられる⁽¹⁾。更に、近い将来にその実用化が期待されている超電導同期発電機や超電導変圧器などと組合せて、超電導電力システムを構築するうえで重要な位置を占めると考えられる。

超電導ケーブルの開発は、1961年に最初の提案がなされて以来、各国で多くの取組みがなされ⁽¹⁾、1979年にはオーストリアで実線路に組込んだ実証試験の例も見られた⁽²⁾。現在は、電力需要の伸び率低下などの理由により開発研究は停滞気味であるものの、我が国では著者らを含めて二箇所研究が続けられている。また、アメリカでもブルックヘブン国立研究所において推進された超電導送電プロジェクトでは、138 kV、4 kA、三相 1 GVA 相当の容量をもつ 100 m のケーブ

ルを試作し、課通電試験やインパルス耐圧試験を行って目覚ましい成果をあげた⁽³⁾。

しかしながら、これまでに開発された超電導ケーブルの絶縁方式は、著者らのものを除いてほとんどすべてが液体または超臨界ヘリウムと高分子フィルムや絶縁紙との複合絶縁方式である。しかるに、ヘリウムの電気絶縁特性は必ずしも十分なものではなく、特に複合絶縁方式においては部分放電劣化などが問題となって長期信頼性に課題が残る。更に、複合絶縁方式においてはケーブルの構造も複雑なものとなる。これに対して、著者らは押出しポリエチレンによる固体絶縁方式を提案してきた⁽⁴⁾。この方式では、ポリエチレンの極低温における優れた電気絶縁性能を発揮させ得ると共に、電気絶縁構成からヘリウムを排除してケーブル構造を簡略化できる。また、我が国の押出しポリエチレン絶縁ケーブルの製造技術は他国の追従を許さない状況にあるので、これらの利点を生かせば経済性と信頼性のいずれにも卓越した超電導ケーブルの作製が期待できると考えられる。

これまでも、極低温領域で押出しポリエチレンケーブルの電氣的、機械的特性を調べた報告は見られるが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、いずれも冷媒である液体窒素や液体ヘリウムに浸漬した状態における実験である。現在、実用可能な超電導体は液体ヘリウムを冷媒とせざるを得ないが、ヘリウムが電気絶縁部に介在することは問題である。押出しポリエチレンケーブルをパイプ形状の導体で設計し内部冷却を行えば、冷媒と電気絶縁の機能を切離すことができるばかりでなく、冷媒が気・液二相流になっても絶縁の観点からは支障はなく、長期信頼性の高い電気絶縁を保証することができる。更に、冷媒は冷却の役割を担うのみであるから、1986年末に登

Development of Extruded Polyethylene Insulated Superconducting Cable. By Masamitsu Kosaki, Member, Masayuki Nagao, Member, Yukio Mizuno, Member (Toyohashi University of Technology), Noriyuki Shimizu, Member & Kenji Horii, Member (Nagoya University).

小崎正光：正員、豊橋技術科学大学電気・電子工学系
長尾雅行：正員、豊橋技術科学大学電気・電子工学系
水野幸男：正員、豊橋技術科学大学電気・電子工学系
清水教之：正員、名古屋大学工学部電気工学科
堀井憲爾：正員、名古屋大学工学部電気工学科

場した高温超電導体がケーブル導体として開発されても、電気絶縁に関しては何ら設計上の変更を加えることなく、超電導体の作動温度に見合う冷媒に変更するだけで、本ケーブルをそのまま使用できる。

本論文においては、このような特長を有する押出しポリエチレン絶縁超電導ケーブルを開発し、冷却、通電、課電など、各種試験を行い、液体ヘリウム温度までのケーブル構造の冷却と超電導電流の通電および液体窒素温度までの課電試験に成功した結果を報告する。

2. 超電導ケーブルの基本構造

著者らが現在開発中の超電導ケーブルの構造を図1および表1に示す。また、ケーブルの仕様は以下のとおりである。

(i) 対地電圧 20 kV (相当線間電圧 35 kV)

(ii) 試験電圧

交流耐電圧 100 kV : 33 kV 架橋ポリエチレンケーブルの JEC-208 に準拠

雷インパルス電圧 200 kV : 同上、ただし BIL に掛ける裕度として $k=1.0$ とした

(iii) 通電電流 2 kA : ほかに参考のために常電導への転移電流を求める。

(iv) ケーブル長 15 m : 付設条数 1 条、端末数 2 個

本超電導ケーブルは、図2に示すように豊橋技術科

図 1 超電導ケーブルの構造

Fig. 1. Configuration of superconducting cable.

図 2 ケーブルシステム布設状況

Fig. 2. Installation of cable system.

表 1 超電導ケーブルの仕様

Table 1. Specification of superconducting cable.

銅パイプ	外径 30.0 mm
遮へいテープ	外径 30.1 mm
超電導平角線	外径 31.8 mm
半導電テープ	外径 33.0 mm
内部半導電層	外径 34.0 mm 厚さ 0.5 mm
P E 絶縁層	外径 38.0 mm 厚さ 2.0 mm
外部半導電層	外径 40.4 mm 厚さ 1.2 mm
半導電テープ	外径 42.4 mm
ワイヤシールド	外径 44.8 mm
P E コルゲートパイプ	内径 50.0 mm 外径 65.0 mm
スーパーインシュレーション	外径 130.0 mm
アルミコルゲートパイプ	内径 130.0 mm 外径 152.0 mm

学大学極低温実験棟内に U 字形に設置されている。以下、ケーブルの各部について説明する。

〈2・1〉導体 導体は銅安定化材の上にニオブを被覆した平角線とし、中心銅パイプ内に磁界を発生させないように二らせん構造⁽⁷⁾を採用している。超電導体は銅パイプ内を流れる液体ヘリウムにより間接冷却される。本ケーブルにおいてはニオブ被覆平角線に主電流を流すが、電流により生じる磁界を遮へいするための外部超電導層は用いておらず、一般的な室温ケーブルの構造と同じである。従って、断熱に用いたスーパーインシュレーション (SI) 層やアルミコルゲートパイプに渦電流損が発生するが、本試作ケーブルの場合は単相であるため磁界は円周方向のみとなり、渦電流は小さく抑えられる。また、実用を考慮した三相ケーブルの場合には、現在広く用いられている CV ケーブルと類似した構成とすれば、シース損は主に室温に面した金属コルゲートパイプ部分に生じることになり、十分対策はなされる。更に SI 層に発生する渦電流損に対しては、SI のアルミ蒸着部にスリットを導入するなどの対策を講じることにより、十分に低減することが可能である。

上記のように、本超電導ケーブルの構造は、従来提案されている超電導ケーブルと比べて、はるかに簡単になっている。

〈2・2〉電気絶縁 電気絶縁は本ケーブルの特色をなすものであり、ポリエチレンを内外半導電層と共に同時押出しており、従来の CV ケーブルと同じ構造となっている。液体ヘリウムは中心銅パイプ内を流

図 3 端末ブッシングの構造

Fig. 3. Configuration of terminal bushing.

れ、冷媒としてのみ機能し電気絶縁には関係しないので、ポリエチレンの極低温における優れた電気絶縁特性⁽⁸⁾を十分に生かした設計が可能となる。設計電界は約 10kV/mm である。また、誘電正接は 5×10^{-5} Torr 以下⁽⁹⁾ となり、ケーブルの導体損失に見合う値となっている。問題点としては、熱収縮と低温脆性による割れが挙げられる。

〈2・3〉 熱絶縁 熱絶縁には真空とスーパーインシュレーション層を用いており、真空度を 10^{-5} Torr 以下に保つことにより、液体窒素層なくしても有効な熱絶縁を行うことができる。液体窒素層がないため熱的特性は若干悪くなるが、構造を単純化し得る利点がある。

〈2・4〉 端末ブッシング 端末ブッシングの構造を図 3 に示す。導体は銅編組線を主体とし、発生したジュール熱を蒸発したヘリウムガスとの熱交換により取去的構造になっており、理論的検討も加えた⁽¹⁰⁾。超電導磁気遮へい層（外導体）がないため簡単な構造であり、電気絶縁設計は主絶縁であるエチレンプロピレンゴム (EPR) と真空浴面耐圧で行っている。EPR の外部や導体接続部には、電気絶縁の立場からスーパーインシュレーションを施すことができないので、侵入熱が大きくなる点が問題となり得るが、この侵入熱はふく射伝熱であることから、ブッシングケーブルを外部から冷却するなど、適当な熱シールド層を設置することにより侵入熱を大幅に低減させることが可能である。なお、冷却時におけるケーブル部分の収縮は、ブッシング上端に設けた耐真空ベローにより吸収する構造となっている。

3. 冷却および課電試験

〈3・1〉 冷却装置 冷却システムの概略を図 4 に示す。本システムはケーブル実験装置、窒素ガスによる徐冷装置および液体ヘリウム供給装置の三つの部分から構成される。

ケーブル実験装置は、前章で述べたケーブルとその

図 4 ケーブル冷却システム概略図

Fig. 4. Scheme of cable cooling system.

両端に端末ブッシングを配したもので、便宜上図に示すように A 端、B 端と名付ける。ケーブル実験装置各所に設置してある温度センサとひずみゲージについて簡単に触れる。

ケーブル内部（銅パイプ内および外部半導電層表面）および冷却ガス排出口には、温度計測を行うため総計 9 個の温度センサが配してある。ケーブル内部の温度センサには、液体ヘリウム温度まで測温可能なシリコン温度センサ（Scientific Instruments 社製 Si-400）を、比較的溫度の高い冷却ガス排出口には銅-コンスタンタン熱電対をそれぞれ使用した。銅パイプ内の温度をモニターし、液体ヘリウムの有無を確認するために銅パイプ内にも温度センサや液体ヘリウム液面センサを配置しているが、長期課電試験時には、電氣的に弱いセンサに高電圧がかかるため、センサを電氣的に絶縁する必要がある。そこで、高電圧部にあるセンサからの信号を電氣的に浮かせた状態にあるチャンネルセレクトを介して、デジタルマルチメータにより計測し、その情報を光ファイバにより電氣的に絶縁された GPIB バスを通してパーソナルコンピュータへ導き処理することを計画している。このシステムの高電圧印加状態での動作はまだ確認していないが、今後行う予定である。

一方、ケーブルの外部半導電層上の三箇所には、それぞれ円周方向および軸方向に低温用ひずみゲージ（東京測器研究所製 CFLA-6.350-11）をはり付け、冷却時の各温度においてひずみの測定を行った。ひずみゲージからの信号はチャンネルセレクトを介してデジタルマルチメータで計測し、GPIB を通してパソコンに導かれ、ゲージの抵抗値からひずみが計算される。

窒素ガスによる徐冷装置は、ケーブル冷却時におけるポリエチレンの割れを回避すべく徐冷を行う必要上導入されている。パソコンによりケーブル各部の温度をモニタしつつ、これに応じて PID 制御により任意の温度設定が可能な温度コントローラを用いて室温から液体窒素温度付近までの徐冷を行う。デューワーに注入される液体窒素をいったんヒータで蒸発させ、所望の温度の冷却ガスとしてケーブル中心銅パイプ内へ B 端ブッシング上部から送り込む。窒素ガスはケーブルを冷却した後、A 端ブッシングより排気される。

液体ヘリウム供給装置は、100l のヘリウムコンテナとトランスファチューブより構成されており、液体ヘリウムを A 端ブッシングよりケーブル中心銅パイプ内に注入する。課電試験中にも液体ヘリウムの供給を可能にするため、真空断熱を施した二重円筒ガラス管をステンレス鋼製トランスファチューブの一部に挿入してある。ケーブル内の液体ヘリウム量は、B 端ブッシング導体と超電導ケーブルの接続部付近に装着してある液体ヘリウムレベルメータによりモニタされる。また液体ヘリウムの消費量は、コンテナの重量およびガス流量計の読みから求められる。

〈3・2〉 冷却・課電試験の結果 冷却にあたっては、断熱真空層の真空度を 10^{-5} Torr 程度に保った状態で、温度制御された窒素ガスを B 端から送り込み、ケーブル各部の温度差が大きくならないように留意しつつ 0.2 K/min の降温速度で徐冷を行う。ケーブルの温度が 100 K 程度に達した後中心銅パイプ内をヘリウムガスで置換し、液体ヘリウムを A 端から供給した。

当初に試作した低密度ポリエチレン絶縁ケーブルでは、約 170 K まで徐冷した段階で絶縁体にクラックが生じた⁽¹¹⁾ため、新たに低温での引張強度に優れた架橋ポリエチレン絶縁を施したケーブルを試作し、冷却試験を行った。この場合、冷却時の熱収縮応力に対する強度を高めるために絶縁厚さを 4.5 mm とした。

冷却過程におけるケーブル各部の温度変化を図 5 に、絶縁体のひずみの変化を図 6 に示す。B 端から低温窒素ガスが供給されているので B 端銅パイプ内の温度が最も低い、中央および A 端銅パイプ内の温度とそれほど大きな差はなく、徐冷プログラムが十分に作動していることがわかる。一方、ポリエチレン絶縁体のひずみについては、温度の低下につれて徐々に収縮しているが、円周方向のひずみが大きいのに対し軸方向のそれは小さく、軸方向の収縮が抑制されていることがわかる。低温窒素ガスによる徐冷を終え、液体ヘリウムを注入してケーブルの温度が約 40 K に達

図 5 冷却時におけるケーブル各部の温度変化
Fig. 5. Variation of cable temperature during cooling.

図 6 冷却時におけるひずみの変化
Fig. 6. Variation of contraction of polyethylene during cooling.

したときに、ひずみゲージの信号が消失した。電圧印加の結果、絶縁部に割れが発生したことが明らかになった。

絶縁部に割れが発生する原因としては、絶縁部と導体部の間に滑りがなく密着しているため、絶縁部の収縮が妨げられて残留ストレスが蓄積されることが考えられる。残留ストレスを回避させるために、絶縁部と導体部の間にテフロンクッションテープを巻いて滑りの向上を図ること、ケーブルの配置を U 字形から直線状にすることなどを試みたが、残留ストレス緩和に大きな改善はみられなかった。この問題を解決するには更に検討を要するが、絶縁体の厚さを厚くすれば残留ストレスが小さくなることが計算によりわかっており⁽¹²⁾、絶縁体厚を増加すること、あるいは常温で絶縁部と導体部の間にすき間を設け、極低温に冷却したときに静電シールドの接触がなされるケーブル構造⁽⁶⁾を採用することなどにより改善されと考えている。

ケーブル冷却の過程で課電試験を二度実施した。同調式部分放電測定器と論理制御雑音弁別器による部分放電計測も同時に行った。 140 K で $10\text{ kV}_{\text{rms}}$ 、 110 K で定格電圧の $20\text{ kV}_{\text{rms}}$ を課電したが、部分放電は一切観測されず良好な電気絶縁特性を示した。

本ケーブルでは 40 K で絶縁部に割れが生じたが、高温超電導体の動作温度である液体窒素温度は大きくクリアしており、部分放電試験の結果にみられるように、極低温における電気絶縁特性も良好である。加えて、本ケーブルは電氣的に弱点となりやすい冷媒を電気絶縁設計に入れない構造のため、超電導体の作動温度に関連して各種冷媒の使用が可能で、高温超電導体が実現されれば比較的容易に対応できると考えている。

(3.3) 熱解析 冷却試験においてケーブルを安定した状態に保つためには、断熱性能は重要な問題となる。ケーブルに充填した液体窒素の自然蒸発によるケーブル中央部の温度上昇から、断熱管路のスーパーインシュレーション (SI) を通したケーブルへの熱流入は、真空度 1×10^{-5} Torr においてケーブル 15 m あたり約 3 W と求められ⁽¹³⁾、断熱管路は優れた断熱性能をもつことが確認された。また、SI の平均熱伝導率は $1.1 \mu\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K}$ と計算でき、標準的な値 $1.3 \mu\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K}$ ⁽¹⁴⁾ とほぼ一致した。

一方、端末ブッシングは図 3 に示したように、電気絶縁の観点から SI など断熱のための特別な配慮は施されておらず、真空による断熱のみである。しかも、室温に近いステンレス鋼製カバーと極低温のケーブルの温度差が大きいと、ふく射による熱流入が存在する。ステンレス鋼製カバーを液体窒素で間接冷却した場合としない場合のブッシング内の温度差より、ブッシングでのふく射熱を評価すると⁽¹⁵⁾、片側で約 25 W と大きく、ふく射熱を低減するためブッシング部に適当な熱シールドの設置が望ましいことが判明した。

4. 通電試験

(4.1) 通電装置 通電回路を図 7 に、機器の仕様を表 2 に示す。基本的には超電導ケーブルのインダクタンス L とコンデンサ C との通電用変圧器 T_2 を介した並列共振回路である。そのため、ケーブルが冷却されて共振回路の抵抗が下げられると、小さな電源でもケーブルに大電流を通電することがができる。通電用変圧器 T_2 はインピーダンス変成器の役割を果たしており、共振の相手となるコンデンサ C の値を低減させている。通電用変圧器には超電導ケーブルと同じ大きさの電流が流れるため、電流量の大きい変圧器が必要となるが、従来の変圧器でこの仕様に見合うものは高価なものとなる。

そこで、通常の小形配電用変圧器を絶縁油中より取出し、絶縁性能が良く比較的安価な液体窒素中に浸漬させることによって冷却を行い、変圧器の電流量の

図 7 通電試験回路

Fig. 7. Circuit for current test.

表 2 通電試験用機器の仕様

Table 2. Specifications of apparatuses for current test.

	機 器			ケーブル	編 組 線	
	電源	誘導電圧調整器	昇圧用変圧器 (kVA)	状態	断面積 (mm ²)	冷却方法
第 1 回通電試験	100 V 50 A	100 V 30 A	5	室温 冷却中	80 192	自然空冷 自然空冷
第 2 回通電試験	200 V 200 A	200 V 60 A	15	冷却中 冷却中	288 288	自然空冷 液体窒素冷却

図 8 第 1 回通電試験の結果

Fig. 8. Results of first current test.

増大を図った⁽¹⁶⁾。変圧器の液体窒素冷却には、共振回路の抵抗を下げる目的もある。この回路で通電を行うためには、コンデンサ C の両端に高電圧を印加しなければならない、そのために昇圧用変圧器 T_1 がある。通電用変圧器とケーブルブッシングとの接続には編組線を用いた。

(4.2) 試験結果 図 8 に第 1 回目の通電試験のときの通電電流、A 端および B 端ブッシング導体内の温度、リードおよびブッシングを含めたケーブル全系の抵抗の時間変化を示す。通電は液体ヘリウムが充填しているときと、していないときの二度行った。なお、ケーブル内の液体ヘリウム残量は、ケーブルと B 端ブッシングの接続部付近に設置したレベルメータで確認しているため、ケーブル全系の残量を示すものではない。

一度目には、1,260~1,290 A の電流を約 15 分間通

図 9 第2回通電試験の結果

Fig. 9. Results of second current test.

電することに成功した。A 端ブッシング導体内の温度が上昇し始めたため通電を一時中断したが、その直後に温度が下がり始めていることから、ケーブル内にはまだ液体ヘリウムが充満していたと考えられる。抵抗はリードおよびブッシングの導体温度の上昇によって増加し、10 分程度で平衡状態になっていることがわかる。

ケーブル内の液体ヘリウムがなくなった後に、極低温での常電導状態で二度目の通電試験を行った。通電電流の増減に対応し、ケーブルの温度、特に A 端ブッシング導体内の温度上昇の様子が変わり、ケーブル導体の常電導部での発熱の影響が大きいくことがわかる。ケーブル温度の上昇につれて抵抗値の上昇が観測される。

第2回目の通電試験の結果を図9に示す。まず、ケーブル内に液体ヘリウムが充満している状態で、定格の 2,000 A を約 15 秒間通電した。通電の間、液面の急激な変化は認められず、また排出ガス流量も若干増加した程度であった。これらのことを考慮すると、超電導状態で定格電流の通電に成功したと言える。

続いて、通電電流を 2,000 A から上昇させると、液体ヘリウムレベルは徐々に下がり始め、通電電流を 2,500 A に保持した約 5 秒後から排出するヘリウムガス流量が急増したため、35 秒間通電した後通電を中止した。このとき、ケーブル各部のその後の温度上昇から判断して、銅パイプ内の液体ヘリウムはほとんど蒸発していたと考えられる。これらの状況から、通電電流を 2,000 A から 2,500 A に上げる途中、もしくは 2,500 A を保持している間に常電導転移が起これ、液体ヘリウムが蒸発したものと推測される。

常電導転移の原因としては、端末ブッシングでのジュール発熱による侵入熱の増大、常電導状態にある導体部でのジュール発熱、超電導平角線での磁界の増強などが考えられるが、いまのところ特定はできていない。

5. ま と め

定格 20 kV_{rms}, 2 kA の押出しポリエチレン絶縁超電導ケーブルを試作し、15 m 分を極低温断熱管路に組込んで冷却試験、通電試験および課電試験を行い、以下の結果を得た。

(1) 温度制御装置により液体窒素を蒸発させた窒素ガスの温度制御を行い、ケーブル全体を 100 K 付近まで均等かつ緩やかに予備冷却することができた。

(2) 予備冷却終了後、液体ヘリウムをケーブル中心銅パイプ内に流し、ケーブル全長にわたり液体ヘリウムを貯めることができた。

(3) ケーブルの熱的特性を評価を行い、断熱管路が優れた特性をもつことが判明した。また、侵入熱源についてもほぼ把握することができた。

(4) 超電導状態にあるケーブルの通電試験を行い、定格電流 2,000 A の通電に成功した。

(5) ケーブル温度約 40 K で絶縁部に割れが生じ液体ヘリウム温度での課電試験は行うことができなかったが、高温超電導体の作動温度である液体窒素温度で定格電圧 20 kV_{rms} を印加しても部分放電の発生など異常は認められなかった。

(6) 冷却時におけるケーブルの割れを回避するには、絶縁厚を厚くする、導体と絶縁体の間に軸方向に滑りやすい構造を採用するなどの対策が考えられる。

最後に、本ケーブルの試作にあたって多大なる御協力をいただいた古河電工を始め藤倉電線、昭和電線電纜および三菱電線工業の関係各位、ならびに本研究に種々の御支援をいただいた中部電力、愛知電機、愛知時計電機および日新電機に謝意を表します。また、実験の中心となって御協力いただいた豊橋技術科学大学および名古屋大学の大学院生・学部学生の皆様に感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省科学研究費エネルギー特別研究(エネルギー)およびエネルギー重点領域研究の援助を受けて行われた。

(昭和 63 年 3 月 25 日受付)

文 献

- (1) C. Kaplan: "Superconducting Power Cables", *IEEE Spectrum*, 17, 61 (1980)
- (2) P. A. Klaudy & J. Gerhold: "Practical Conclusions from Field Trials of Superconducting Cables", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-19, 656 (1983)
- (3) E. B. Forsyth & R. A. Thomas: "Performances and Summary of the Brookhaven Superconducting Power Transmission System", *Cryogenics*, 26, 599 (1986)
- (4) M. Kosaki & K. Horii: "A Design of Polyethylene Insulated SubGVA Superconducting Cable", *ICEC 9*, p. 146 (1982)

- (5) 木下・霜村・稲見:「極低温抵抗 CV ケーブルの開発」, 大日本電線時報, No. 65, 26 (昭 54)
- (6) M. Sosnowski, G. Bahder & G.S. Eager: "Development of Cross-linked Polyethylene Insulated Cable for Cryogenic Operation", Electric Power Research Institute Report, EL-3907 (1985)
- (7) 清水・安藤・堀井:「交流超電導ケーブルの電流および磁界分布」, 電学論 B, **107**, 457 (昭 62)
- (8) 小崎・香月・清水・堀井:「極低温におけるポリエチレンのトリッキング現象」, 同上 A, **95**, 292 (昭 50)
- (9) H.J. Hongoke, N. Shimizu, M. Kosaki & K. Horii: "The Dielectric Loss Tangent of Extruded Polyethylene Cables at Cryogenic Temperature", *Trans. IEE Japan*, **105**, 31 (1985)
- (10) 高橋・清水・堀井:「超電導ケーブル用ブッシング導体の最適設計」, 低温工学, **20**, 211 (昭 60)
- (11) 小崎・長尾・水野・清水・堀井:「押出しポリエチレン絶縁超電導ケーブルの電氣的・機械的特性」, 電気学会絶縁材料研究, EIM-86-117 (昭 61)
- (12) N. Shimizu, T. Nagata, K. Horii, K. Fukushima, M. Nagao & M. Kosaki: "Thermal Contraction and Cracking of Extruded Polyethylene Electrical Insulation at Cryogenic Temperature", *Cryogenics*, **26**, 459 (1986)
- (13) 宮崎・水野・長尾・小崎・清水・堀井:「押出しポリエチレン絶縁超電導ケーブルの流入熱の評価」, 昭 62 東海支部連大, No. 93
- (14) K. Mikoshiba, F. Sone, Y. Shimohori & S. Kuma: "Superconductive Coaxial Cable as a Communication Medium with Enormous Capacity", *IEEE Trans. Commun.*, **Com-24**, 874 (1976)
- (15) 宮崎・水野・長尾・小崎・清水・堀井:「押出しポリエチレン絶縁超電導ケーブルの流入熱の評価」, 昭 61 電気学会全大, No. 1372
- (16) 米田・水野・清水・堀井・長尾・小崎:「交流超電導ケーブルの通電試験」, 電気学会静止器研究, SA-86-2 (昭 61)