

極低温電力ケーブルの開発

Development of Cryogenic Cable

深 沢 正 名* 隈 彰 二* 杉 山 耕 一*
Masana Fukasawa Shoji Kuma Koichi Sugiyama

小 石 原 進** 永 野 宏 郎***
Susumu Koishihara Hiroo Nagano

要 旨

液体窒素冷却極低温電力ケーブルを試作し、冷却システムを組み立てて課通電試験を行なった。線路の仕様は66kV, $1 \times 100\text{mm}^2$, 亘長(こうちょう)30m, 液体窒素加圧循環方式である。線路は38kV(1.0E)課電, 1,000A(10A/mm^2)通電の定格負荷に対して長時間、安定に運転され、液体窒素温度における電気絶縁、熱絶縁、冷媒循環システムに関する予備検討結果をケーブルに適用できることが実証された。なお電気絶縁としては液体窒素含浸ポリエチレン合成紙を、管路の断熱に関しては管路内発熱との関連で発泡(はっぼう)ポリウレタンを用いている。

1. 緒 言

電力需要の急激な増加に伴い送電線は大容量化し、近い将来には10GVA/cctの送電が必要になると言われている。現状架空線では10GVA/cct(500kV, 12,000A)が可能であるが、地中線では強制冷却OFケーブルでも1.5GVA/cct(500kV, 1,800A)程度にしかない。また、都市の美観、地価の高騰、さらに塩害などの点からも大容量地中線の早期開発が望まれている⁽¹⁾。

大容量地中線としては管路気中ケーブル、極低温ケーブル(Cryoresistive Cable)、超電導ケーブル(Superconductive Cable)などが提案されており、管路気中ケーブルに関しては500kV, 4,000A送電の実証試験の段階にはいりつつある。極低温ケーブル、超電導ケーブルはさらに大容量化、小形化をねらいとして検討されている^{(1)~(3)}。

われわれは昭和41年から極低温および超電導ケーブルの検討を行ってきたが、近年の電力事情にかんがみ、大容量送電方式の研究の一環として極低温ケーブルの開発に着手した。

極低温ケーブルの開発に際して問題となる点は、

- (1) 運転温度の選択
- (2) 極低温における高電圧絶縁法
- (3) 管路などの断熱技術
- (4) 冷却システムに関する低温技術

などである。

通電による導体損は超電導ケーブルが最小であるが、超電導ケーブルは5°K付近で運転され、冷却効率が0.1~0.2%と著しく低く、冷凍機の長時間運転および高電圧絶縁の点でも問題がある。これらの問題は20°K付近の極低温ケーブルにおいても同様である。これに対し80°K付近の極低温ケーブルは液体窒素の良好な電気絶縁特性を利用することにより高電圧絶縁に都合が良く、冷凍機もこの温度では長時間運転が可能である。この結果液体窒素を利用した80°K付近の極低温ケーブルは電気抵抗の低下はあまり大きくないが、現在最も実現性のあるケーブルと考え、今回の試作、試験を行なった。

2. 試験線路の概要

極低温ケーブルの問題点を把握(はあく)するために、液体窒素を循環しながら課電、通電を同時に行なう総合的な運転を第1目標とし、次の仕様の液体窒素冷却極低温ケーブル線路を試作した。

定格電圧	66kV
定格電流	1,000A
ケーブル	$1 \times 100\text{mm}^2$, アルミニウム導体
電気絶縁方式	液体窒素加圧含浸ポリエチレン合成紙絶縁
断熱方式	発泡ポリウレタン断熱
亘長	30m
端末	両端末とも気中引出し方式

総合的な運転を第1目標としているので、実際のケーブルの運転のモデル試験という点から電圧、電流階級、線路構造および亘長を決めた。試験線路の外観は図1に示すとおりである。

図2は管路部分のサンプル、表1は構造表である。なお課通電試験は試験の都合上単相で行なわれた。

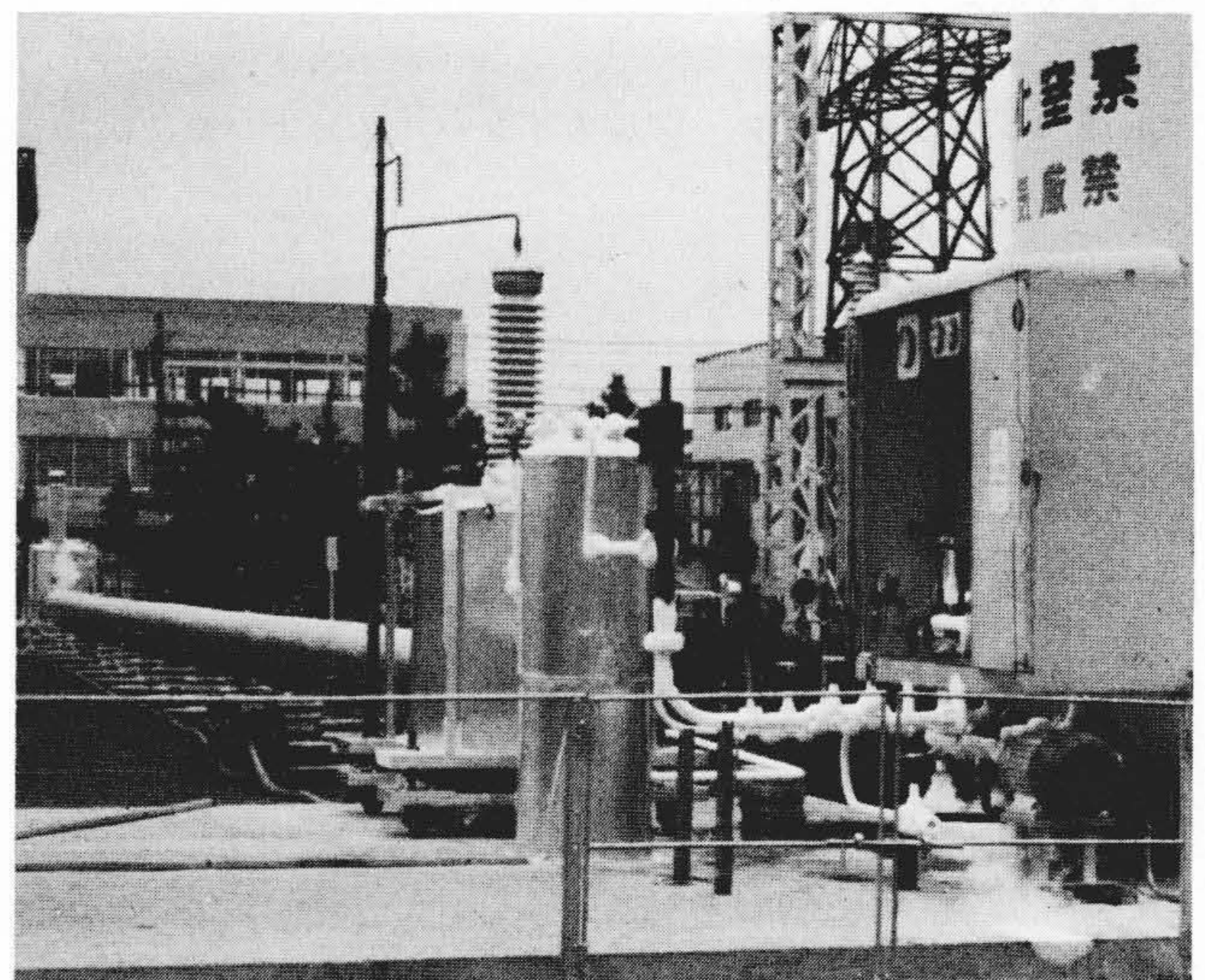


図1 試験線路の外観

* 日立電線株式会社 研究所
** 日立電線株式会社 日高工場
*** 日立電線株式会社 研究所 工学博士

表 1 66kV 100mm² 液体窒素冷却極低温ケーブル構造表

項 目	スパイラル	導 体	絶 縁 体	遮 蔽 層	補 強 層	スキッドワイヤ	管 路	断 熱 層
厚 さ	1.0		7.75	0.25	0.90	2.0	2.6	120
外 径	20.0	24.0	39.5	40.0	41.8	45.8	120.0	360
材 質	SUS	Al	ポリエチレン合成紙	Al	SUS	Bs	Cu	ポリウレタン
そ の 他	内径 18.0	33本/2.0φ	Gmax=6.4kV/mm					防湿層も含む

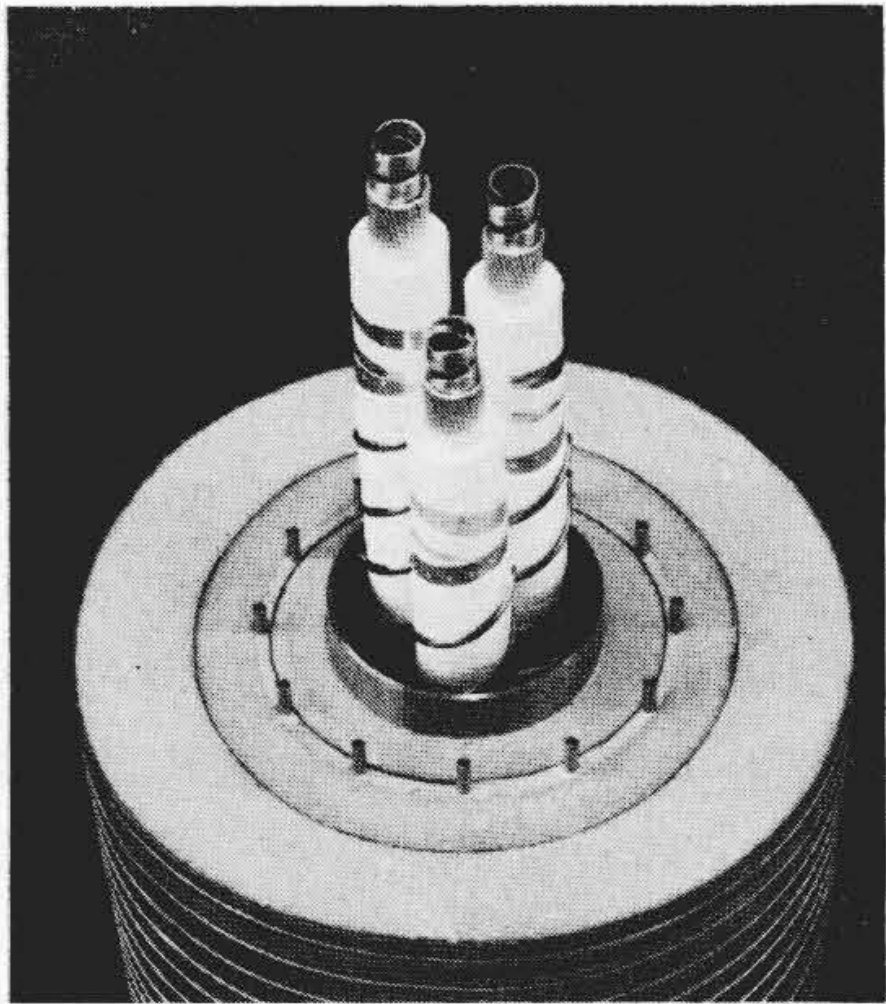


図2 試験線路のサンプル写真
注：実際の試験は課通電の都合上1心にて実施した。

2.1 導 体

導体は外径20mmのステンレス鋼製スパイラル上に径2.0mmのアルミニウム線を33本、1層により合わせたものであり、断面積は104mm²である。80°K付近ではアルミニウムの電気抵抗は純度に依存しないので、機械的強度の点から99.9%のものを使用した。電気抵抗は0.32μΩ・cm（常温の値の1/8）である。したがって表皮の深さは4mmとなり本導体では表皮効果は無視できる。

2.2 電 気 絶 縁

電気絶縁は液体窒素加圧含浸ポリエチレン合成紙絶縁である。合成紙はポリエチレン樹脂の長い繊維を熱と圧力で自己融着させたポリエチレン100%のものである。本絶縁方式に関して図3のような絶縁厚さ約1mmのモデルケーブル試料をつくり予備実験した結果次の結果が得られた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

交流破壊電圧	53kV/mm
インパルス破壊電圧	102kV/mm
誘電率	1.70
誘電正接	0.001%以下(印加電圧20kV/mm, カーボン遮蔽(しゃへい)なし)
コロナ開始電圧	20kV以上(検出感度1PC)

実験は6atm、77°Kの冷却、加圧液体窒素中に試料を浸せきして行なわれた。ポリエチレン合成紙はスーパカレンダ処理され1,500～8,400s/100cm³の気密度を持つものが用いられている。またカーボン遮蔽層があると誘電正接は0.023%(20kVにおいて)に増加するが、カーボン遮蔽層の有無による破壊電圧の差は認められなかった。

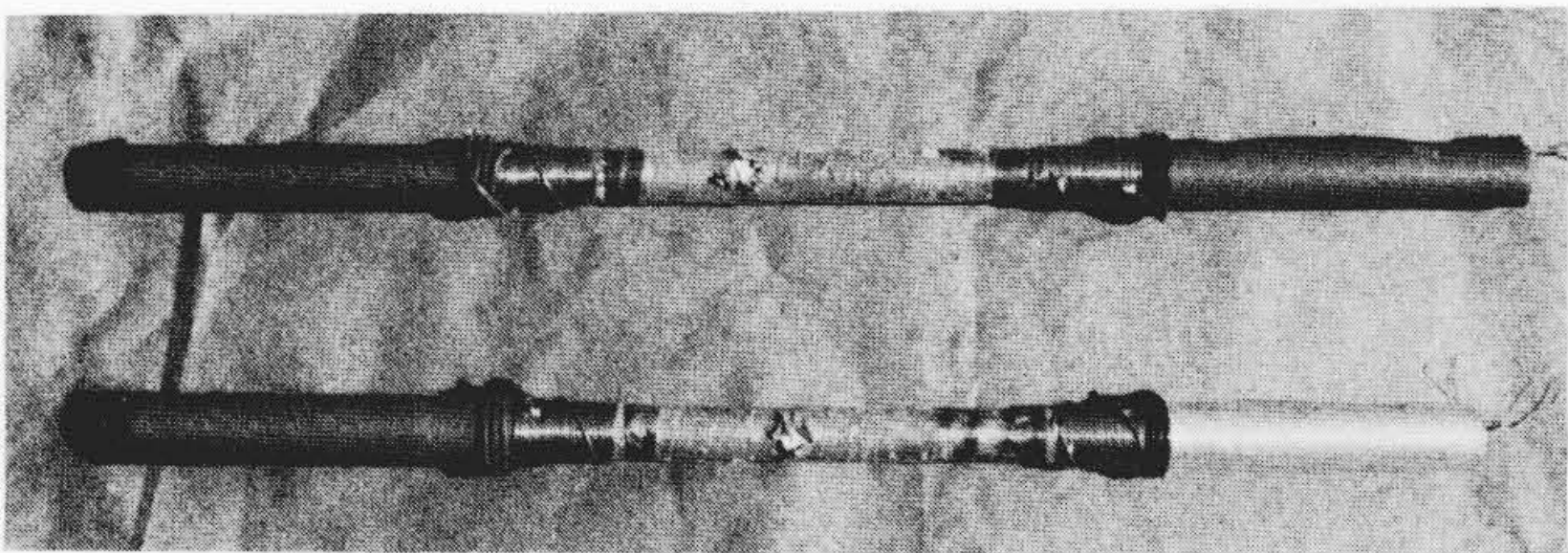


図3 液体窒素含浸絶縁の検討用モデルケーブル試料

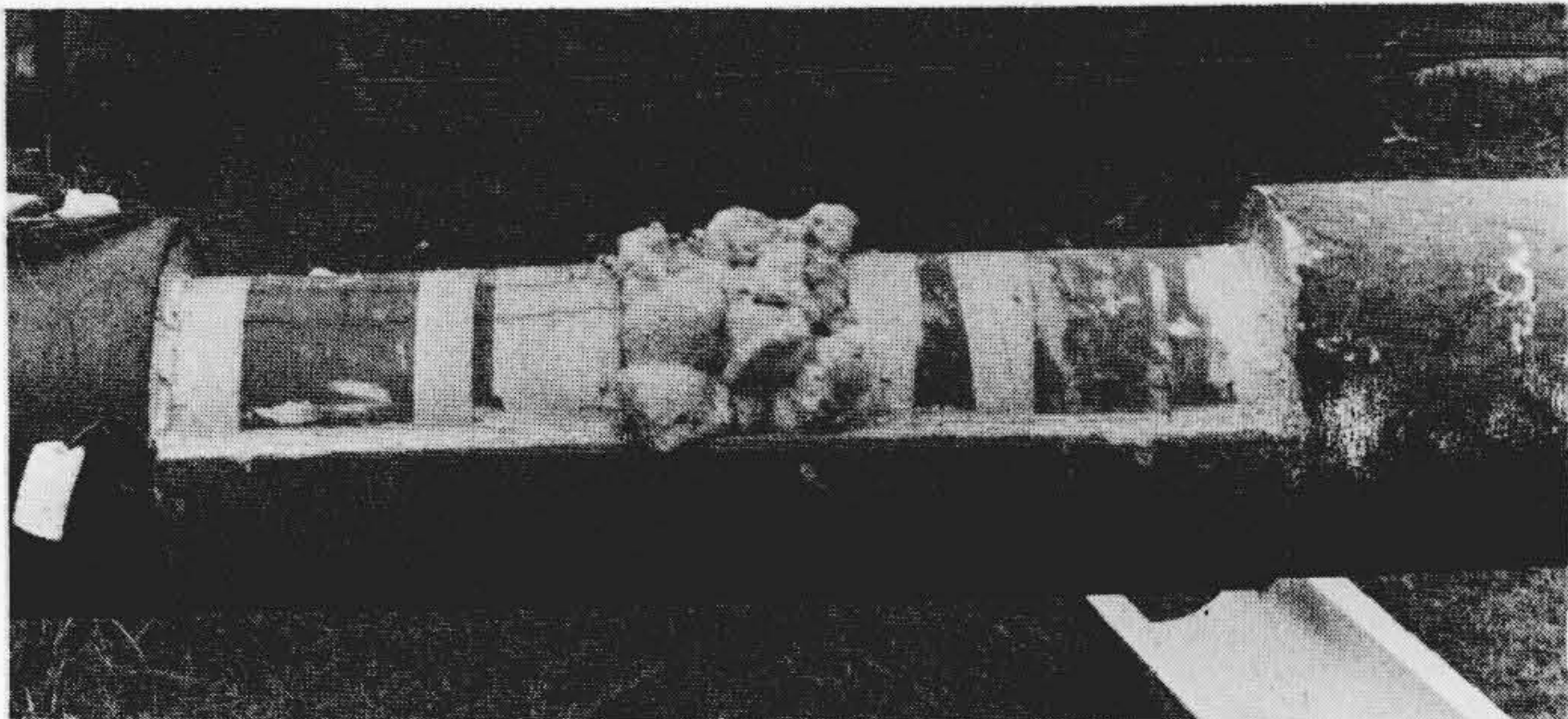


図4 管路接続部の断熱施工状況

この結果をもとに本試験用ケーブルでは絶縁厚さを7.75mm（最大電界強度6.4kV/mm）とし、カーボン遮蔽なしの絶縁構成とした。絶縁層の上には液体窒素の含浸を考慮して穴あきステンレステープ補強層とスキッドワイヤが巻かれている。

2.3 熱 絶 縁

管路、端末、配管部など試験線路の断熱はすべて発泡ポリウレタン断熱とした。発泡材断熱法は自己支持構造であり、真空排气も不要なことなど、保守および信頼性にすぐれている。断熱特性低下の要因は低温収縮のクラックと吸湿である。クラックに対しては断熱層を積層構造とし、吸湿に対しては防湿層を完全にするにより特性低下を押えることができる。ポリウレタンは発泡断熱材の中で最も熱伝導度の小さな材料であるが、成形発泡したものを組み上げるか、現場発泡かにより、また発泡のしかたによっても特性が異なる。発泡条件を種々検討した結果、われわれの施工によっても、常温から液体窒素温度までの平均熱伝導度が200μw/cm²°K程度の性能が得られた。これは発泡ポリウレタン固有の値に近い値である⁽⁶⁾。

試験線路の管路部の断熱厚さは、管路内部の導体発熱量約32W/m(1,000A通電時)と同程度の流入熱量となるように、防湿層、保護層まで含めて120mmとした。管路接続部の断熱施工状況は図4に示すとおりである。

2.4 端 末

両端末とも気中引出しとした。端末部においては冷媒の供給と課通電を同時に行なう必要があることおよび端末部とケーブル部を熱的に分離したいことなどから図5のような構造とした。管路部では電気絶縁上加圧冷却の液体窒素が必要なため、気密ブッシングを用いて管路部の加圧された液体窒素と端末部の大気圧、沸点の液体窒素とを分離している。端末部の液体窒素のほうが温度が低いので端末部から管路に流入する熱は全くない。ケーブル導体内への液体窒素の供給は絶縁性の配管を通して行なわれる。配管部の収縮を考慮して一部に可撓(かとう)性配管を用いている。課通電用リードは、周囲が断熱されているとき、1,000A通電時に流入熱と発生熱の和が最小となるように設計されたものであり、がい子内部に液体窒素の気化ガスを通してガス冷却もできる構造となっている。気密ブッシング内のストレスコーンケーブル絶縁体と同じ合成紙を用いた遮蔽ストレスコーンであり、誘電正接測定のためにガード電極が形成されている。図6は端末内部の写真である。端末部は内部組立て後、断熱施工される。

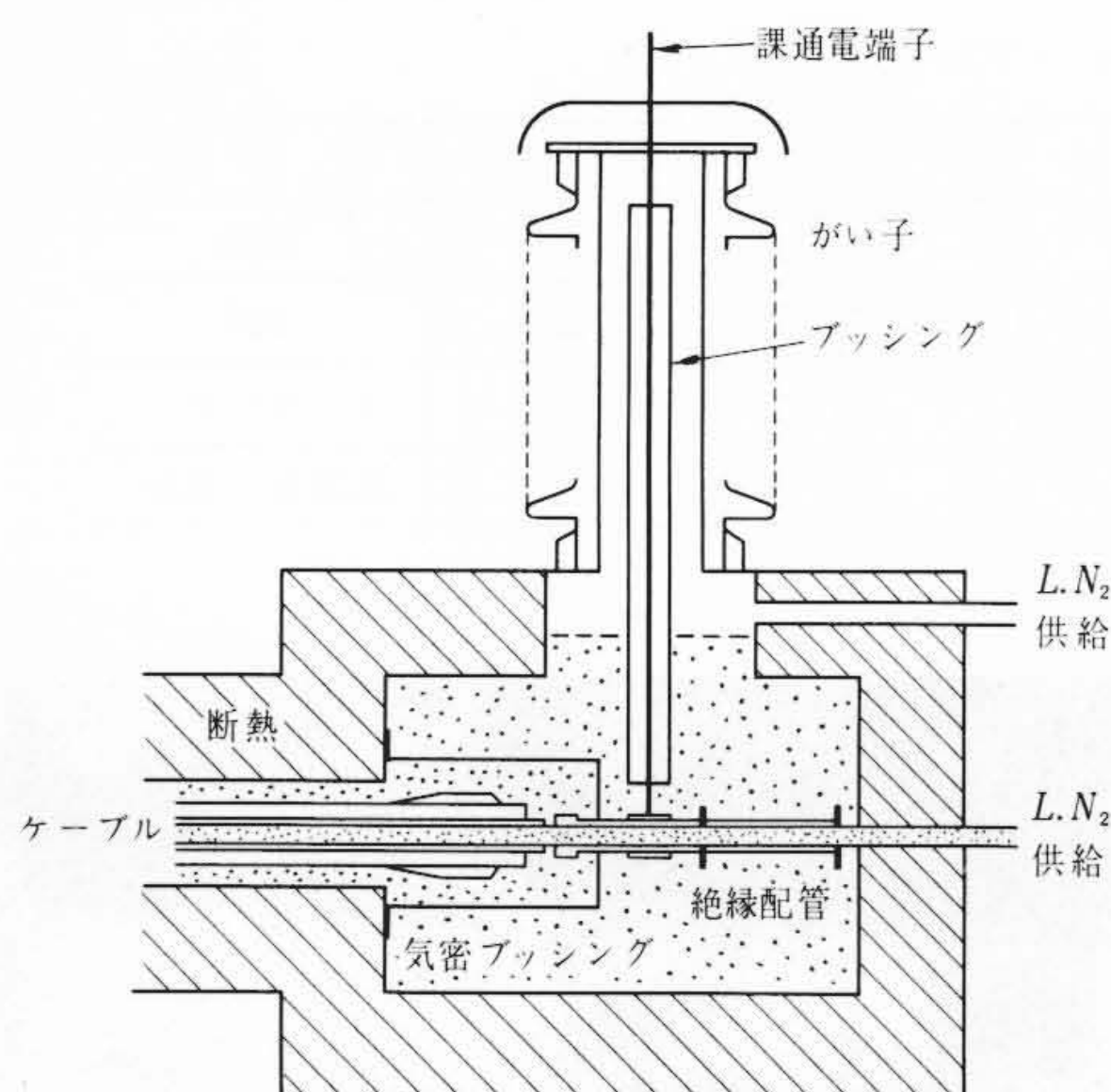


図5 端末部構造

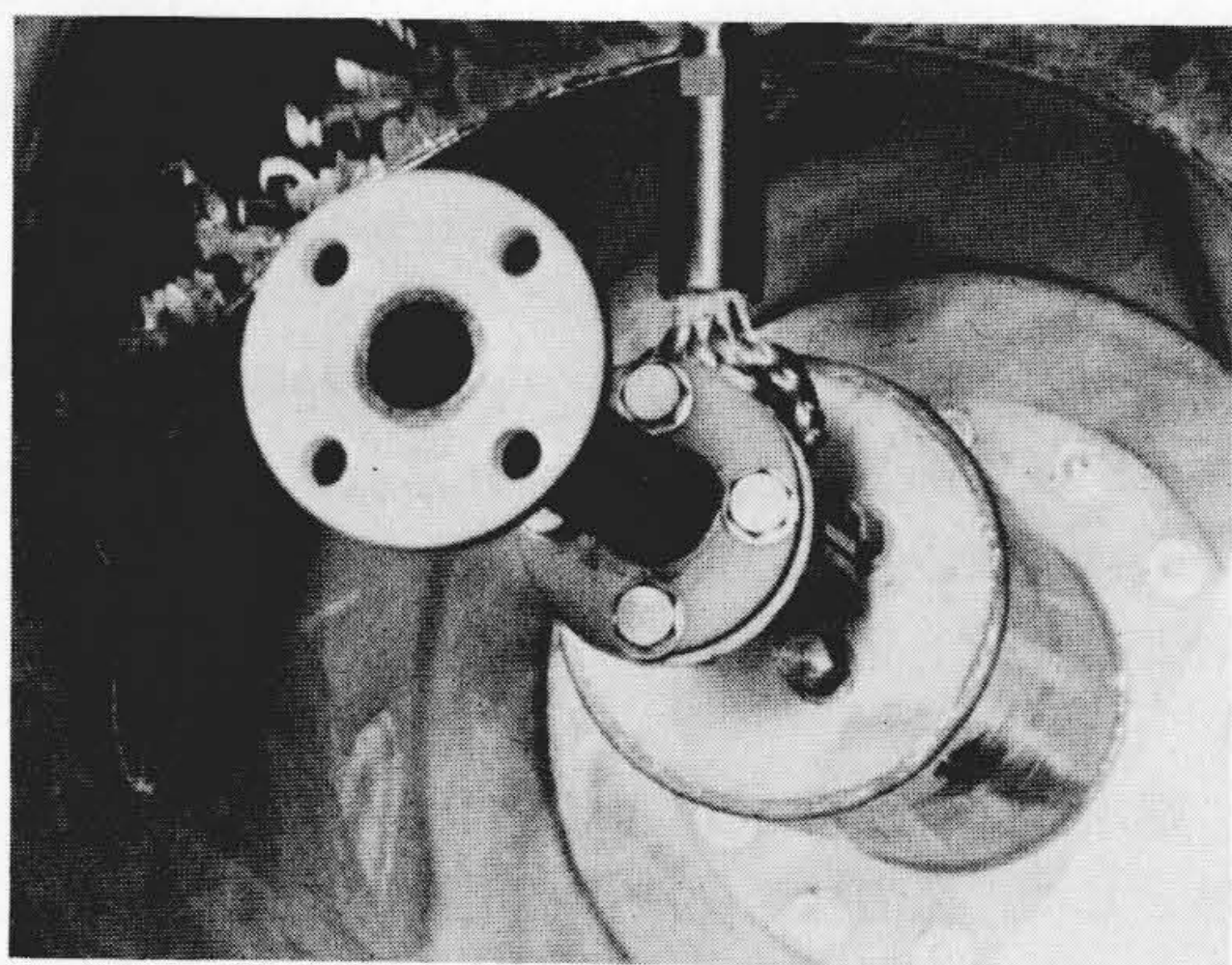


図6 端末内部

2.5 冷却システム

極低温ケーブルでは導体発熱、外部からの流入熱その他を汲み出して導体を設定温度に保つために冷媒の循環を行なう必要があり、さらに本試験線路では電気絶縁方式として液体窒素含浸絶縁を用いているので管路内のどの部分においても加圧冷却の状態を保持する必要がある。

本試験線路では液体窒素の閉回路完全循環方式とし、図7のような冷却システムとした。そして電気絶縁と系統の圧力降下の点から管路内最低圧力を5.0atm、導体最高温度を90°Kに設定した。すなわち図7において2atmの貯蔵タンクより出た液体窒素は加圧ポンプにて5atmに昇圧された後、大気圧沸点の液体窒素の熱交換器内で冷却され、ほぼ5atm、77°Kの加圧冷却状態となる。この液体窒素は片方の端末から導体内部の通路に送られ導体発熱、誘電体発熱を奪い、反対側端末で折り返し、帰りにはケーブルと断熱管路の間の空隙(くうげき)を通りシールド発熱、パイプ発熱および流入熱を奪ってタンクに戻る。系統の流量および圧力調整は深冷用ニードルバルブ1, 2, 3により行なわれる。帰りの回路の液体窒素も熱交換されているのは貯蔵タンク内圧力を下げて系統の流量および圧力調整を容易にするためである。

3. 実験結果

3.1 冷却試験

ケーブル、管路その他の予冷はすべて液体窒素の気化潜熱を利用して行なった。管路内および端末内に液体窒素を満たした時点でポンプを始動し、循環を開始した。ケーブル部の圧力を設定圧力5atmに保ちながら、ケーブル内の流量を300~1,400 l/hと可変にした。このときのケーブルおよび管路の圧力はいずれも5.0atm

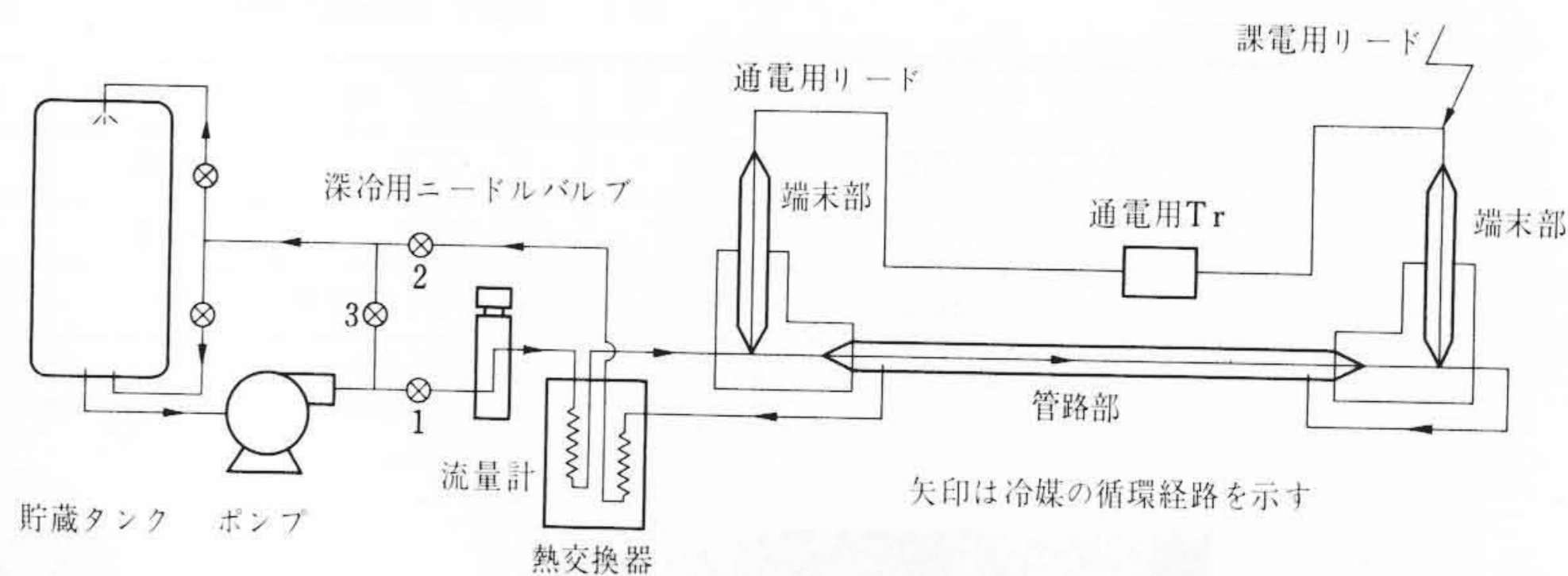


図7 冷媒循環系統図

であり、ケーブルおよび管路部分の圧力降下は非常に小さかった。

冷却による30m断熱管路の全収縮量は90mm、予備試験として行なった30.8mケーブルの全収縮量は123mmであった。したがって収縮率はそれぞれ0.30%, 0.40%となり、材料試験に関するデータと同じ値であった⁽⁷⁾。なお常温と液体窒素温度間の数回のヒートサイクルに対して管路の断熱層やケーブルの絶縁コアなどに外見上の異状はなかった。

3.2 通電試験

流量を400 l/h、ケーブル部圧力を5.0atmとして100, 300, 500, 700, 1,000 A各3時間の通電試験を行なった。このときの線路各部の温度を示したのが図8である。縦軸は大気圧沸点の液体窒素温度77°Kからの温度上昇を示している。熱交換後の液体窒素はほぼ77°Kとなり、系統全体が5atmの飽和液温度より低く過冷却状態であることを示している。流量、圧力、温度とも一定にすることができ、安定した定常運転が行なえた。

次に流量を変えたときの流量と導体の入口と出口の温度差の関係は図9に示すとおりである。温度差はほぼ流量に逆比例し、通電電流の2乗に比例している。

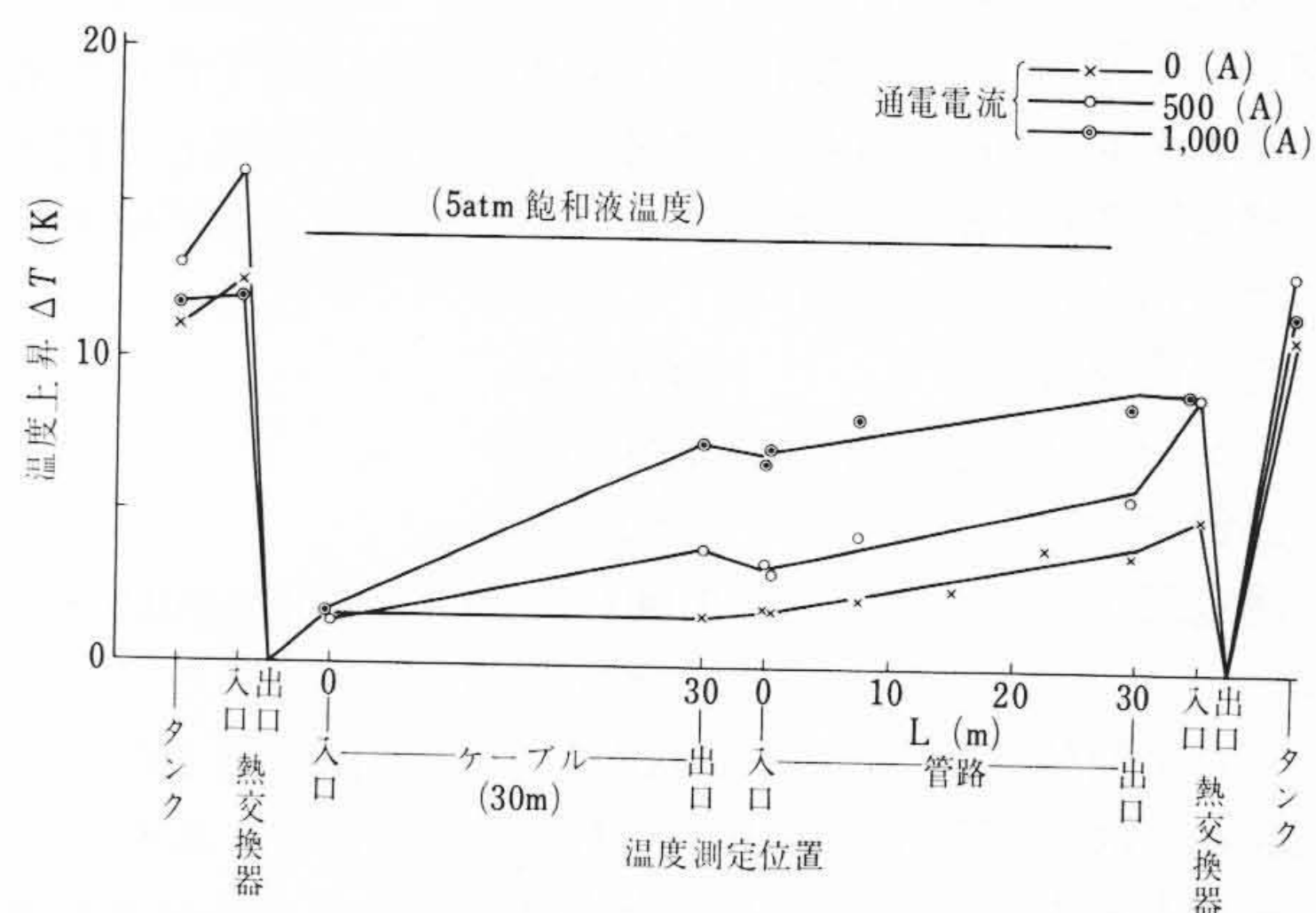


図8 通電試験時の線路各部の温度

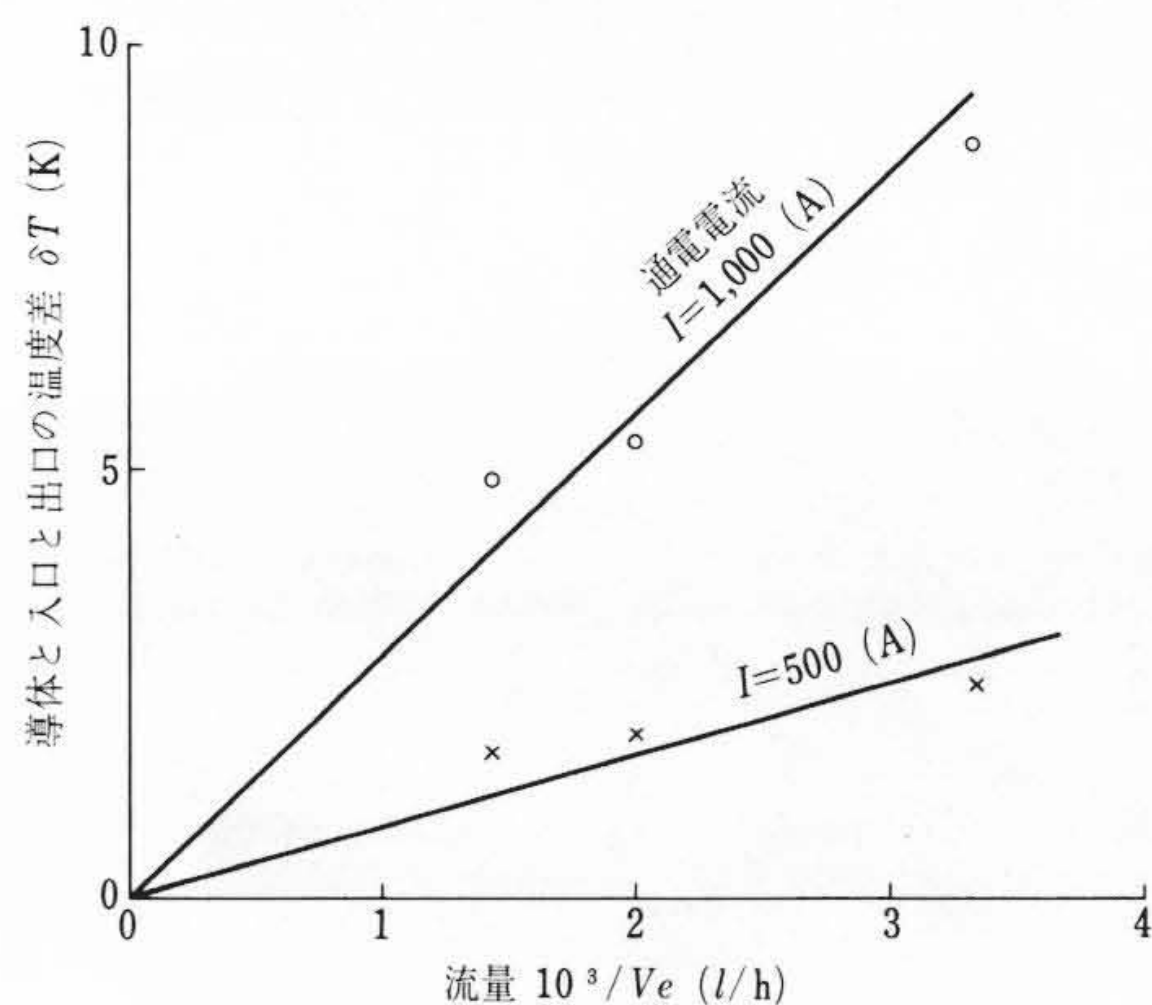


図9 通電試験時の導体の入口と出口の温度差と流量の関係

3.3 誘電正接測定

流量400 l/h, ケーブル部圧力を5.0 atmとして45kV ($1.2 E_0$) までの耐電圧試験を行ない, その後ケーブルの誘電正接の測定を行った。課電による各部の温度, 圧力および流量の変化は認められなかった。誘電正接は45kVまで0.001%以下であり, 材料試験結果と同様にシェーリングブリッジの最小測定値以下であった。

3.4 課通電試験

流量400 l/h, ケーブル部圧力を5.0 atmとして38kV ($1.0 E_0$) 課電しながら, 通電電流100, 300, 500, 700, 1,000A各3時間の課通電同時試験を行なった。電気絶縁, 熱絶縁, 冷却システムとも異状なく, 所期の第1目標である総合的な運転を安定に行なうことができた。

3.5 運転に当たっての問題点

次に線路の冷却, 運転上問題となった点につき述べる。

(1) 導体破断 本試験線路では管路に銅, 導体にアルミニウムを使用しており, 低温時の収縮量はケーブルのほうが管路より0.1%程度大きいと予想されたので, 最初ケーブル全長の0.1%以上のスネークをとって導体の両端を固定した。しかし冷却時に導体は片端の導体スリーブとの接続部で破断した。そこで導体の全収縮量を吸収できるような伸縮性導体スリーブに変えて運転した。

その後冷却時のケーブルおよび管路各部の温度測定によりケーブルのほうが管路よりも先に低温になることが確認された。すなわち0.1%という値はケーブルも管路も同時に液体窒素温度になったときの値であり, 冷却の過程では管路とケーブルの収縮量の差はケーブルの全収縮量に近い値をとることがわかった。

(2) 気密ブッシングの漏れ 極低温における絶縁性構造材料についてはあまり研究されておらず, われわれも試行錯誤で材料を選択した。最も問題となったのは端末部の気密ブッシングであった。種々の材料につき試みたが, フランジ部のクラック発生, 接着部の気密漏れ, 応力によるクリープ破壊など数回の失敗の後FRPにより気密漏れのない耐圧力, 耐電圧を満たすブッシングが得られた。

4. 本試験の特徴

本試験線路による試験には, 極低温ケーブルとしてこれまでに試験例のない, 新しい重要な試みが含まれている。これらの特徴をまとめると次のとおりである。

4.1 亘 長

線路亘長は30mである。端末からの熱的影響を除くことと冷媒の循環という点から亘長30mは必要であろう。これによりケーブルとしての特性を知ることができる。

4.2 冷媒循環システム

過冷却の液体窒素を循環させることにより長時間の連続運転を可能にした。本システムは熱交換器を冷凍機と取り換えるだけで実際のケーブル冷却システムと変わらないものであり, この実証および運転経験は極低温ケーブルの開発において貴重なものと考えられる。

4.3 発泡ポリウレタン断熱

従来の極低温ケーブルの概念設計においては真空またはスーパーインシュレーションによる断熱が一般的であった。しかし真空を用いる断熱方法には高真空 (少なくとも 10^{-4} Torr以下) を維持する必要があること, 内側管路支持用スペーサが必要なことなど長尺二重管路に適用するには現状では多くの問題があり, 信頼性に疑問がある。試験線路では液体窒素冷却極低温ケーブルをより現実的なものとするために保守, 信頼性にすぐれた発泡ポリウレタン断熱を採用した。

極低温ケーブルの流入熱は小さいのに越したことはないが, 実際には管路内での発熱に見合った流入熱は許容されうる。今回の実験の結果, 発泡ポリウレタン断熱は極低温ケーブルの利点を低めることなく断熱技術を容易にし, コスト低下にもつながることが判明した。

4.4 課通電試験

本試験線路のケーブルには液体窒素含浸合成紙を用いているので, この種の絶縁方式では導体発熱などの内部発生熱により含浸されている液体窒素が気化するとケーブルの電気性能がそこなわれる。したがって線路の設計にあたっては, 液体窒素は加圧冷却の状態で使用し, 運転中の発熱では気化しないように配慮したが, 実際規模の課通電同時試験でこれが実証されたのは今回初めてであり, この種の冷媒含浸絶縁方式を高電圧絶縁へ適用できる見通しを得たことは意義深い。

5. 結 言

以上, 液体窒素冷却極低温ケーブルの線路概要と試験結果について述べた。線路は38kV ($1.0 E$) 課電, 1,000A ($10\text{A}/\text{mm}^2$) 通電の定格負荷に対して長時間, 安定に運転され, 液体窒素温度における電気絶縁, 熱絶縁, 冷媒循環システムに関する予備検討結果をケーブルに適用できることが実証された。

今回の66kV試験線路の総合的な運転から500kV級線路の実用化への見通しは明るいものとする。今後は,

- (1) 大サイズ導体と高電圧絶縁の検討
- (2) 高電圧用端末部, 接続部の開発
- (3) 冷却および冷凍機の検討

などを行ない極低温ケーブルの実用化を図って行きたい。

終わりに臨み, 東京電力株式会社のご指導に感謝するとともに, 冷媒循環システムの検討および部品の調達に対しご尽力いただいた日立酸素株式会社遠藤敬生氏並びに研究の遂行全般に多大のご援助, ご協力をいただいた日立電線株式会社の関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 電気協同研究 26 (3) 1 (昭45-8)
- (2) R.L.Garwin, J.Matisoo: Proceeding of the IEEE 55 (4) 538 (Apr. 1967)
- (3) S.H.Minnich: 68C-EI-71 IEEE
- (4) 深沢, 永野: 昭46電学全大 No. 313 (昭46-4)
- (5) 深沢, 永野: 昭46電学東支大 No. 86 (昭46-11)
- (6) 音馬, 菊地: 工業材料 19 (8) 48 (昭46-8)
- (7) V.Arpsほか3名: Cryogenics 2 (6) 230 (June 1962)