

275kV 極低温電力ケーブルの開発

Development of a 275kV Cryoresistive Cable

将来の大容量送電ケーブルのひとつとして液体窒素冷却極低温ケーブルの開発が進められている。極低温ケーブルの技術的検討は、既に66kV級極低温ケーブルの実負荷試験により実証されており、これをベースに実用線路に近い規模の275kV級極低温ケーブルの開発を行なった。

試験線路のケーブルコアは2,040mm²、12分割アルミより線導体と液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁から成り、表皮効果、誘電正接に関して低損失化が図られている。この可とう性ケーブルコアを亘長24mのウレタン断熱管路に引き込み、気中及び液中終端箱を組み立てて試験を行ない、6atm、77Kの過冷却液体窒素の強制循環冷却下で所定の性能が得られることを確認した。

深 沢 正 名* Fukasawa Masana
杉 山 耕 一* Sugiyama Kōichi
酒 井 泉* Sakai Izumi
隈 彰 二* Kuma Shōji
小石原 進** Koishihara Susumu
永 野 宏 郎*** Nagano Hiro'o

1 緒 言

我が国の電力需要の伸びはここ数年一時的に停滞しているが、電力が利用しやすいクリーンエネルギーであるためその増加の基調は変わらず、今後も着実に増加するものと思われる。電力需要の増加に伴い送電線の大容量化が必要となり、このため地中送電線では在来ケーブルの超高压化、大導体化、及び強制冷却化が図られるとともに、新たに管路気中送電¹⁾、極低温送電、超電導送電²⁾などが検討されている。

日立電線株式会社は将来の大容量送電ケーブルのひとつとして、液体窒素冷却極低温ケーブルの開発を進めている。このケーブルは、極低温での金属の電気抵抗の低下を利用して大容量送電を行なうもので、在来ケーブルの大容量化では1回線当たり2GVAの送電が限度であるのに対し、3~10GVAの送電が期待されている。

極低温ケーブルの開発に関しては、1972年に長さ30mの66kV級ケーブルの実負荷試験³⁾を行ない、冷媒の温度上昇と圧力降下、通電状態での電気絶縁性能、断熱管路の流入熱などを検討し、大容量送電が可能であることを実証した。引き続き各部の構造と材料につき詳細な検討を行ない、500kV、10GVA級の極低温ケーブルが実現可能であるとの見通しを得るとともに、その実現のためには超高压低損失ケーブルコアと終端接続部の性能の確認が急務であることが認識された。そこで、500kV級ケーブルの前段階として、同一設計の適用可能な275kV級ケーブルを用いてその性能を確認した。

2 試験線路

極低温ケーブルの電流容量は、ケーブルサイズと冷却区間長から決まる。液体窒素温度では導体抵抗が常温の値の約1/5になり、導体内強制冷却効果も大きい。現用ケーブルの数倍の電流容量とするのが適当である。したがって、3~10GVAという大容量送電のためには、極低温ケーブルといえども275kV級以上の超高压送電となる。このような超高压、大容量ケーブルのひとつとして、275kV、6,000A級液体窒素冷却極低温ケーブルを取り上げ、表1に示すような仕様の試験線路により絶縁性能の把握を主目的に検討を実施した。試験線路の概要及び試験場は、図1及び図2に示すとおりである。次に各部の詳細について述べる。

2.1 ケーブルコア

(1) 導 体

極低温ケーブルの導体設計上最も問題となるのは、直流抵抗の低下に伴う表皮効果の増大である。例えば、OFケーブル用2,000mm²、6分割銅導体の表皮効果による交直抵抗比は、液体窒素温度では3以上にもなる。

表皮効果を小さくするには素線を細線化するとともに、素線間を絶縁して撚架を施せばよい。しかし、これらを完全に行なうと交直抵抗比は小さくなるが、導体の占積率が低下し、直流抵抗自体が増加してしまう。したがって、決められた寸法内で交流抵抗を最小にする導体構造を求める必要がある。ところが、従来の交流抵抗計算式⁴⁾には導体内、外径、素線径などのパラメータが含まれておらず最適構造が求められない。そこで、銅及びアルミについて各種の導体を試作し、液体窒素温度での交流抵抗を実測するとともに、その理論的検討を行なった。その結果、

(a) 分割導体の表皮効果を各セグメント自身の表皮効果とセグメント間の近接効果の和として表わすことができ、素線径や導体内外径、分割数などをパラメータとする交流抵

表1 試験線路の仕様 超高压・大容量送電ケーブルのひとつとして、275kV、6,000A級液体窒素冷却極低温ケーブルの開発を行なった。なお断熱管路だけは500kV級である。

項 目	仕 様
線路定格	275kV, 6,000A, 2,860MVA
導 体	12分割, 2,040mm ² アルミより線導体 内径34mm, 外径68mm
絶 縁 体	液体窒素含浸PE合成紙絶縁, 絶縁厚21.5mm ケーブルコア外径119mm
断熱管路	ステンレス鋼管・発泡ウレタン断熱管路 内径390mm, 外径718mm
端 末	気中端末及び液体窒素中端末
冷 却	過冷却液体窒素強制循環冷却
線 路 長	24m

* 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

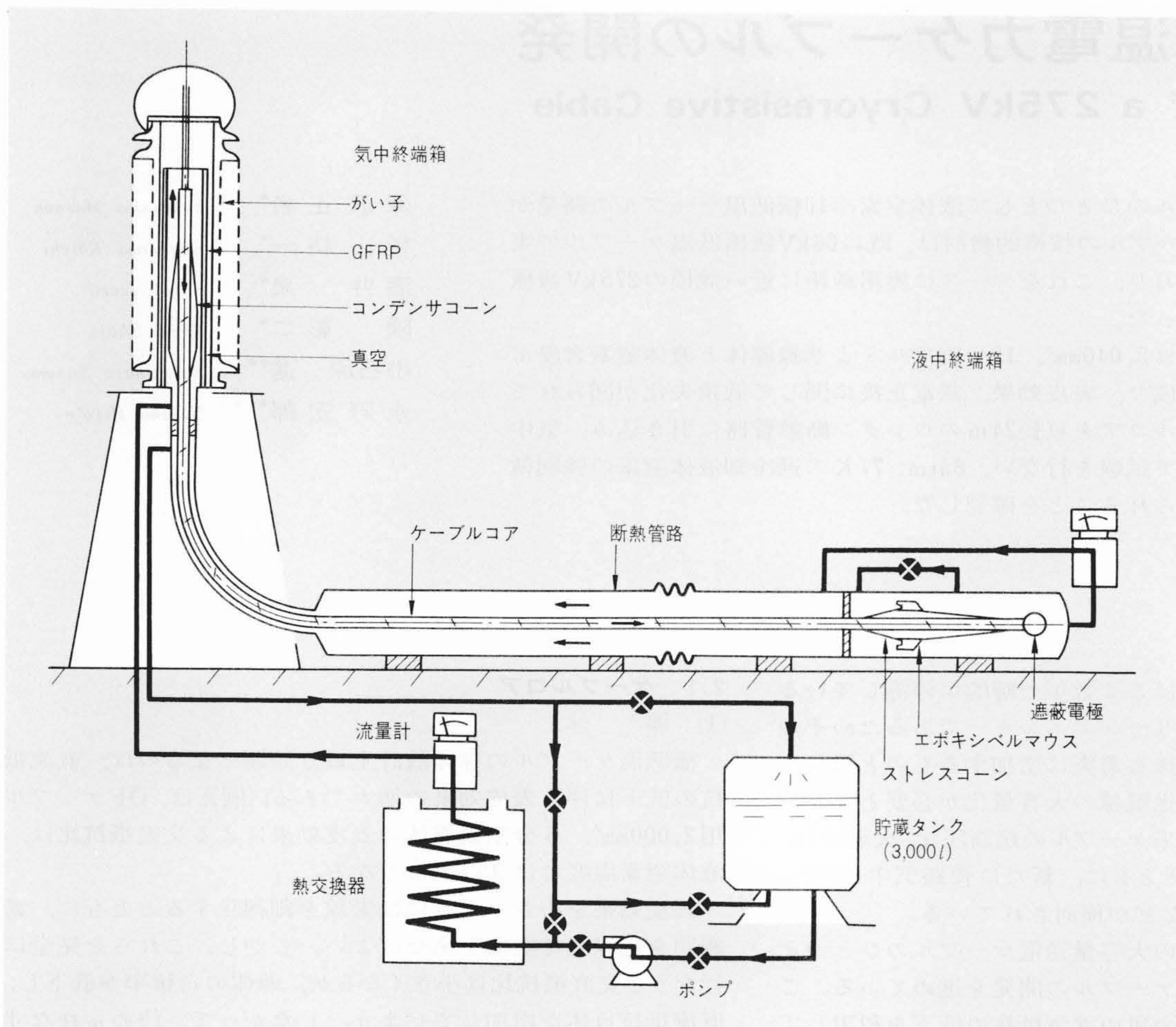


図1 試験線路の概要

線路の構成と気中及び液中終端箱の概略構造を示す。ポンプと熱交換器により作られた過冷却液体窒素は、矢印の向きに流れ線路内を循環する。

抗計算式を導き、素線絶縁した導体については理論値と実験値が良く合うこと。

(b) 大サイズの極低温ケーブル用導体に関しても分割数を増すことにより所期の交流抵抗を得ることができ、現用技術で製造可能であること。

(c) アルミの表面酸化膜は素線間の渦電流に対して完全な絶縁体とみなせるが銅のそれは不十分であること。

が確認された。極低温ケーブル用導体として、液体窒素温度では銅とアルミの電気抵抗がほぼ同じであることから、安価で軽いアルミが提案されているが表皮効果の点からもアルミが優れている。

これらの検討を基に、 1.6mm^{ϕ} の素線による $2,040\text{mm}^2$ 、12分割アルミより線導体を試作した。この導体の占積率は86%、交直抵抗比は1.21で実験値と理論値は全く一致した。

(2) 電気絶縁

常温下の布設と液体窒素温度下での運転の両者を考慮してケーブルコアの絶縁体として液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁が選ばれた。この絶縁方式は絶縁厚1mmのモデルケーブル試料による検討結果から⁵⁾、交流、インパルスの破壊強度及び誘電正接がそれぞれ53kV/mm、102kV/mm、及び0.001%であり、OFケーブル用油浸紙と同程度の絶縁耐力と極めて小さな誘電正接を持っていると言える。

液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁によるケーブルコアは、乾紙の状態で作製、布設された後、そのまま液体窒素により冷却、含浸される。モデルケーブル試料では真空乾燥などの特別な前処理を行わなくても所期の性能が得られており、寿命試験でも交流長耐試験では、35kV/mmの電界に対

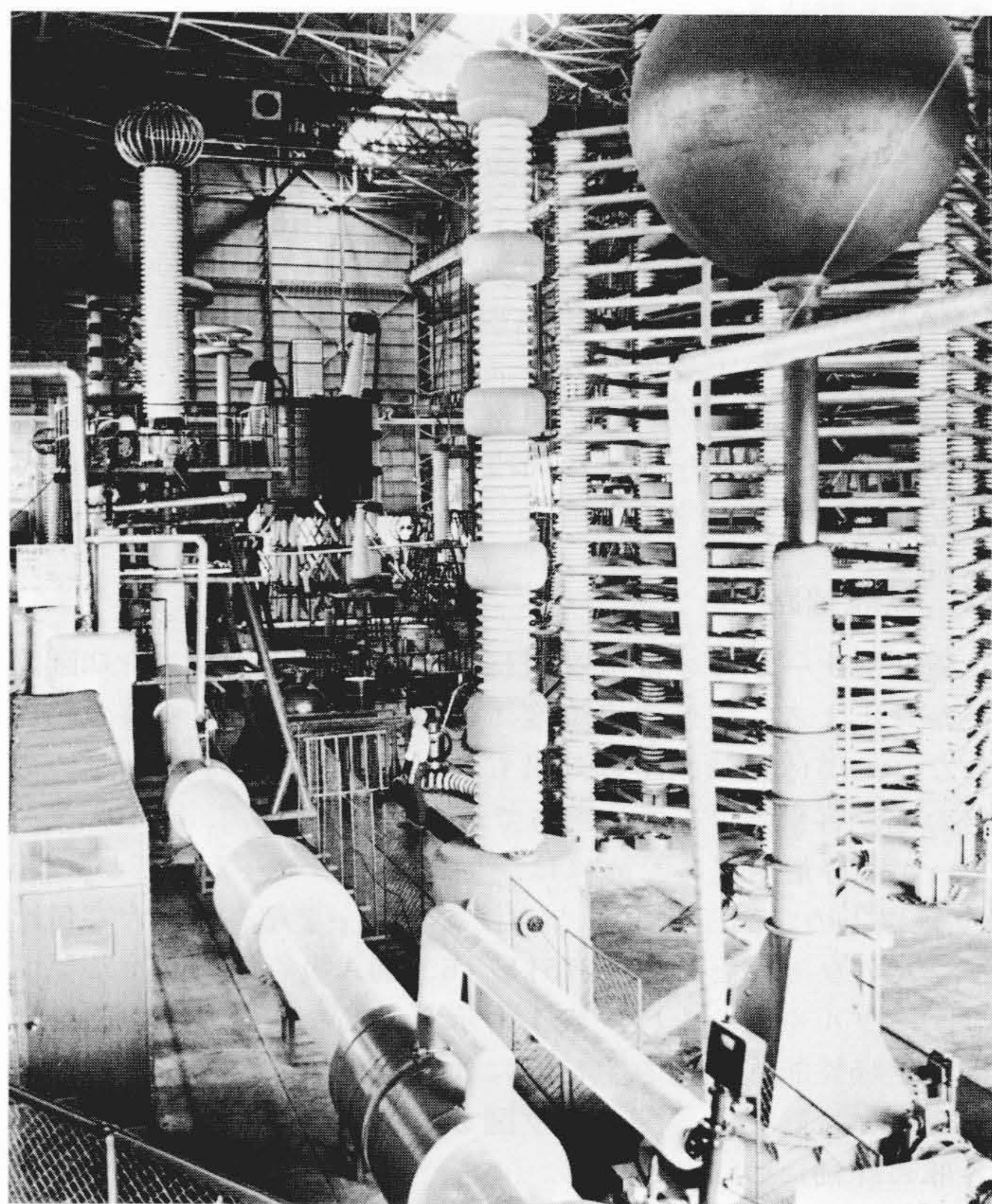


図2 275kV極低温ケーブル試験場 課電試験は単相で行なわれた。線路の断熱には施工性、信頼性、及びコストの点で優れた発泡ウレタンが使用されている。

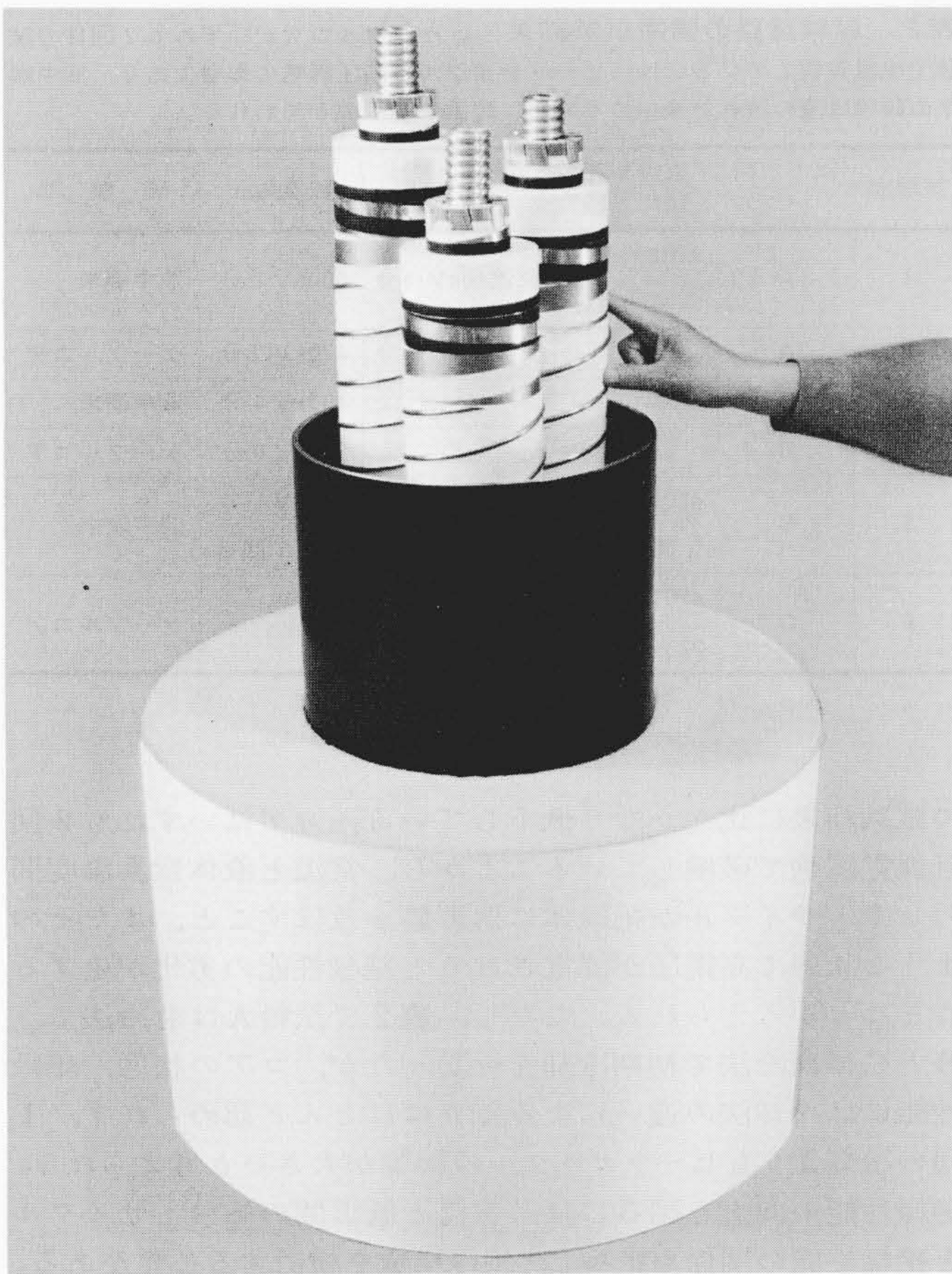


図3 ケーブル外観 2,040mm², 12分割アルミより線導体により表皮効果の低減を図り、ポリエチレン合成紙絶縁により低誘電損化を図っている。外径は119mmである。

して3,000時間以上良好であり、インパルス繰返し課電試験では90kV/mmの電界に対して10,000回以上良好であるなど優れた特性を示した⁵⁾。

この絶縁方式は66kV, 1×100mm²極低温ケーブルにも採用され、実負荷試験後の破壊強度が交流44～47kV/mm、インパルス89～104kV/mmであり、この絶縁が過負荷通電中の課電下でも何らの損傷を受けないこと、及び破壊強度の厚さ効果も非常に少ないことが確認された。

これらの試験結果から、液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁により超高圧絶縁も可能と考え、275kVケーブルコアを21.5mmの絶縁厚で構成した。線路の断面写真を図3に示す。絶縁遮蔽には表面処理を施したカーボン紙を用いた。運転電圧時の誘電正接は0.0045%で、遮蔽のない試料(0.001%)に比べて若干増加したが、この程度の損失は超高圧極低温ケーブルにとって十分許容できるものである。

2.2 冷却

(1) 冷却系統

このケーブルでは、電気絶縁にも液体窒素を用いていることから、線路内全体にわたりバブルが発生しないように、過冷却液体窒素を強制循環する方法が採用された。図1に示した試験線路で冷媒は矢印の向きに流れる。すなわち、貯蔵タンクより取り出された冷媒は低温ポンプにより17atmに昇圧され、熱交換器内で大気圧沸騰状態の液体窒素により77Kまで冷却される。この過冷却冷媒は気中終端箱の上部で導体内に導入され、液中終端箱で折返して貯蔵タンクにもどる。電気絶縁性能を確保するために冷媒の最低圧力を6atmに設定

した。実線路ではこの冷却系統中の熱交換器の代わりに冷凍機を使用することになる。

(2) 圧力管路

圧力管路としては、低温で高圧力に耐えるとともに、漏れ磁束に対するパイプ損の小さな材料が望まれる。試験線路ではパイプ損の点では不十分であるが、耐圧強度の点からステンレス鋼管を用いた。管路内径は500kV級ケーブルの試験をも考慮して390mmとした。

(3) 熱絶縁

極低温ケーブルでは、超電導ケーブルと異なり、相当量の導体発熱があるので、これに応じたある程度の流入熱は許容される。この考えから発泡ウレタン断熱とした。ウレタン断熱は断熱性能が真空断熱などよりも劣るが、施工性、信頼性及びコストの点で非常に優れており、既に66kV極低温ケーブルの実負荷試験に使用してその有用性を実証している。断熱層の厚さは周囲温度30℃、相対湿度85%で結露しない条件で計算し150mmとした。

2.3 終端箱

極低温ケーブルは終端部からの流入熱を少なくするために、極低温変圧器などの低温機器に直結するのが望ましいが、架空線に接続する場合もあり得る。この研究では架空線と接続するための気中終端箱、及び低温機器に直結するための液中終端箱について試作、試験した。

(1) 気中終端箱

高電圧・大電流を常温部から低温部へ導くために真空絶縁を用いた。すなわち、図1中の気中終端箱のように、コアの終端部を液体窒素含浸絶縁のコンデンサコーンにより補強し、ガラス繊維強化プラスチック(以下、GFRPと略す)パイプとがいで覆い、GFRPパイプとがいの間を真空にして断熱と電気絶縁空間としている。

真空による電気絶縁の沿面距離は約3mになり、このような長沿面の性能を検討するために、図1でケーブルコア、及びコンデンサコーンのない状態で予備試験を行なった。常温での交流課電の初期には真空絶縁部でのフラッシュオーバーが生じたが、フラッシュオーバー後、絶縁性能はすぐに回復して直前のフラッシュオーバー電圧よりも高い電圧に耐えるようになり、しだいにフラッシュオーバー電圧は上昇した。真空絶縁部でのフラッシュオーバーを数回繰り返した後、真空絶縁は交流630kVに耐え気中終端箱は大気中でフラッシュオーバーした。インパルス課電では1,580kVで大気中をフラッシュオーバーした。次に、GFRP内部に液体窒素を満たして低温での試験を行なった。低温時には、真空絶縁部でのフラッシュオーバーは全く発生せず、常温時と同じ値で大気中をフラッシュオーバーした。常温時 10^{-6} Torrのオーダであった真空絶縁部の圧力は、GFRP内へ液体窒素を充填することにより 10^{-7} Torrのオーダに低下した。低温時でもがいの表面の結露は見られなかった。

(2) 液中終端箱

液中終端箱は図1に示すように、ケーブルコアの端部を広幅の絶縁紙とエポキシベルマウスとで補強し、先端に絶縁された遮蔽用電極を設置する構成で試作した。エポキシベルマウスは液体窒素中でもクラックの発生はなく、常温の油中と同等の絶縁性能を持ち液体窒素自身も優れた絶縁体である。しかし、冷却時の熱収縮の差によりストレスコーン部の絶縁遮蔽部やエポキシベルマウスと下巻補強層間などにギャップが生ずると性能低下に結びつくことが懸念されたため、特に組立上の注意を払った。

3 線路の運転及び絶縁破壊試験結果

3.1 冷却試験

(1) 初期冷却

線路各部の冷却による影響を調べるために、初期冷却方法として最初から線路内に液体窒素を導入して、なるべく短時間で冷却する急冷法と、冷媒の線路入口温度を徐々に下げ長時間かけて冷却する緩冷法とを検討した。

24m長の試験線路で、急冷法では約12時間を要した。緩冷法では窒素ガスの線路入口温度を1時間に2℃の割合で下げ、線路全体が-30℃(ポリエチレンのガラス転移温度)以下になってから液体窒素を導入し、ガス冷却に5日、液冷却に1日を要した。

なお、緩冷法では冷却前に約60℃の乾燥窒素ガスを吹き流して線路内部の乾燥を行なった。これはコア表面や管内面の乾燥を目的としており、絶縁層内部の乾燥は期待していない。モデルケーブルの絶縁性能は乾燥しなくても変わらないが、実線路では布設時の気象条件が悪いと管内面に水滴が付くこともあり、これらは液体だけの絶縁部分に悪影響を及ぼすと思われるので、線路内の状況確認のために乾燥ガスの吹流しなどが必要と思われる。

冷却時、断熱管路が上に凸に弓なりになるボーイング現象が見られたが、線路全体が液体窒素に満たされた状態では直線状にもどった。数回の冷却試験に伴うボーイングに対して断熱性能の低下は認められなかった。断熱管路の熱収縮量は0.3%でステンレス鋼の物性に一致した。

(2) 定常冷却

線路内を液体窒素で満たした時点でポンプを始動し、線路内圧力を6~17atm、冷媒流量を500~3,000l/hの間で変化させて循環試験を行なった。試験線路は短尺であり電流負荷もないため、冷媒の圧力降下や温度上昇はほとんど検出されなかった。また、耐圧、気密、流入熱などに関する異常は見られなかった。

3.2 課電試験

(1) 耐電圧試験

6atm、77K、2,000l/hの条件で3時間の冷媒循環の後、交流課電試験を行なった。液体の絶縁性能は圧力が高いほど高いので、実線路での最低圧力である6atmの状態で行った。まず、印加電圧を420kVまで徐々に昇圧し、420kVで3時間の耐電圧試験を行ない、線路が課電に対して安定に運転されることを確認した。

(2) 絶縁破壊試験

耐電圧試験の後、印加電圧を更に上昇させて破壊試験を行なった。1回目の試験では交流500kVで液中終端箱が破壊した。ケーブルコアには外見上異常が認められなかったので、同一試料につき再試験を行なったところ470kV25分でコア部で絶縁破壊を生じた。3本のケーブルコアにつき計6回の試験を行ない表2に示すような結果を得た。

1回目及び3回目の液中終端箱の破壊は、液体窒素中の不純物及び液の流れに起因するものと思われたので、4回目以後の試験ではエポキシベルマウスや遮蔽電極などをすべて含浸絶縁で覆い、液体だけの部分に電圧が加わらない構造の液中終端箱を用いた。なお、気中終端箱での破壊は全く生じなかった。

ケーブルコアの絶縁性能は、275kV級ケーブルとしての要求を満たしているが、交流、インパルスの破壊強度はそれぞれ約30kV/mm、60kV/mmであり、材料及び66kV級ケーブル

表2 試験線路の課電試験結果 ケーブルコアがいずれも2回目の試験で絶縁破壊しているのは、ヒートサイクルと高圧課電の影響であり、液中端末の破壊は液の流れと液中の不純物に起因するものと思われる。

試験No.	試料 ケーブル	交流耐圧 試験	昇圧方法	破壊電圧	破壊部
1	A	420kV, 3時間良好	交流10kV/5分	500kV 2分	液中端末
2	A	"	交流10kV/30分	470kV25分	ケーブルコア
3	B	"	"	450kV 4分	液中端末
4	B	"	"	510kV 9分	ケーブルコア
5	C	420kV, 1時間良好	インパルス 20kV/3回	960kV 1回目	液中端末
6	C	420kV, 22分破壊	—	—	ケーブルコア

の試験結果に比べかなり低下している。コアはいずれも2回目課電試験で破壊していることから、常温と液体窒素温度間のヒートサイクルが絶縁体に悪影響を及ぼすこと、またそのような状態で高電圧が課電されると絶縁性能の劣化が生ずることなどが考えられる。ただし、表2で試料Aは急冷法で、BとCは緩冷法で初期冷却を行なったが、コアの状態、絶縁性能には冷却法の違いによる差異はほとんど認められず、1回の冷却よりもヒートサイクルの影響が大きいと考えられる。絶縁性能の向上を図るには、常温と低温間のヒートサイクルと絶縁性能の関係を把握し、絶縁構成を検討する必要がある。

4 結 言

超高圧・大容量極低温ケーブル開発の一環として、275kV大サイズ極低温ケーブルを開発した。試験線路によりケーブルコアと終端箱の諸特性を検討し、表皮効果の小さな導体、真空を用いた気中終端箱及び液体窒素中の終端箱についてはいずれも所期の性能を持っているものを得ることができた。一方、液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁から成り、20mmを超える厚さのケーブル絶縁体の特性については、275kV級としての耐圧性能を持っているが、破壊強度が材料の特性より低くなることが確認された。この原因としてヒートサイクルの影響が挙げられるので、絶縁構成を改良することにより更に性能は上昇するものと期待できる。

今回の開発により、最終目標である500kV級極低温ケーブルの可能性はいっそう明確となった。今後は冷凍機を含む長尺線路で実用化を目指した検討を行ないたいと考えている。

終わりに、研究の遂行に多大の御指導をいただいた東京アルミ線材株式会社 常務取締役 木村鐘治氏に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

1) 宅間：ガス絶縁電力機器の現状と課題，電学誌，92，140(1972)
2) 山村ほか：特集・電気工学における極低温技術，電学誌，94，353 (1974)
3) 深沢ほか：極低温電力ケーブルの開発，日立評論，54，374 (昭47-4)
66kV，1×100mm²液体窒素冷却極低温ケーブルで，38kVの課電下で1,000Aの通電試験を行ない，極低温ケーブルにより大容量送電が可能であることを述べている。
4) J. H. NEHER, M. H. MCGRATH：The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable System, Trans. AIEE (PAS) 76, 752 (1957)
5) 深沢，永野：高電圧極低温ケーブル用液体窒素含浸絶縁の開発，日立評論，56，355 (昭49-4)