

# 三相同軸超電導ケーブルのための流路設計

## Design of flow path in tri-axial superconducting cable system

菅根 秀夫  
Hideo SUGANE

足立 和久  
Kazuhisa ADACHI

小林 公樹  
Hiroki KOBAYASHI

北村 祐  
Tasuku KITAMURA

塩原 敬  
Kei SHIOHARA

三堂 信博  
Nobuhiro MIDO

青木 裕治  
Yuji AOKI

長谷川 隆代  
Takayo HASEGAWA

三相同軸超電導ケーブルは、最内層のコルゲート管に冷媒の往路、外層の管に復路を持つ。この構造において、往路管と復路管の間で熱交換が生じる。循環流路内で交換される熱量はループ内の特定の部位に残り続けるため、冷媒の最大温度はこの影響を受けて増大する。我々はこの寄与を考慮し、圧力損失と温度分布の計算を行った。本報ではこれらの計算結果について報告する。

In the tri-axial superconducting cable, the most inner corrugated pipe (former) is the outward path of the refrigerant, and the outer pipe (inner corrugated pipe) is the returning path. In this structure, heat exchange occurs during outward and returning paths. Since the amount of heat exchanged in the circulation loop continues to remain in the specific part of the loop, the maximum temperature of the refrigerant rises. We calculated the pressure loss and temperature distribution of tri-axial cable with considering the contribution of heat exchange. In this paper, we report the result of the calculation.

### 1. はじめに

超電導機器の開発は、二酸化炭素排出量削減のための有効な手段の一つとして期待されている。超電導機器の中でも、近い将来実用化が期待されている機器の一つが超電導ケーブルである。

通常のケーブルを超電導ケーブルに置き替えた場合、ジュール損失が0となることから、送電の際に損失するエネルギーの量が削減される。ジュール損失が0であるという特徴は、超電導ケーブルが低電圧・大電流の送電ラインに適用されたときに大きなコストメリットが得られる事を意味している。一方、超電導状態を得るためにはシステムを超電導体の臨界温度以下となる液体窒素温度に維持しなければならない。今回我々が開発している三相同軸超電導ケーブルは、液体窒素の往路管、U、V、W相の超電導線材で形成される各超電導層を絶縁紙を介して同軸上に形成した導体、及び液体窒素の復路管を1条のケーブルの中に有しており、単芯や三芯一括のような他のタイプの超電導ケーブルに比べてコンパクトな構造を得ることができる。<sup>1)</sup>一方で、液体窒素の流路が狭い空間の中に2流路格納されていることから、流路断面積を確保することが難しく、その結果液体窒素の圧力損失が大きくなってしまふ点が課題である。

今回、我々は過去に開発した単芯超電導ケーブルシステ

ム<sup>2)</sup>の運転データを元に、コルゲート管の圧力損失を算出した。また、結果を計算値と比較し、コルゲート管の直管相当長さを算出した。この直管相当長さの傾向を元に、三相同軸超電導ケーブルの圧力損失を見積り、圧力損失が最小となる組み合わせを算出した。

### 2. 圧力損失計算方法

直管の圧力損失は下記に示す Darcy-Weisbach 則で求めることができる。

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d_e} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta P$ 、 $\lambda$ 、 $l$ 、 $d_e$ 、 $\rho$  および  $u$  はそれぞれ圧力損失、管摩擦係数、管長さ、等価直径、流体密度、および流体流速を表す。このとき、管摩擦係数は Blasius の式により算出した。圧力損失を計算する際、直管ではない部分の圧力損失計算には直管相当長さが利用される。本報では、超電導ケーブルの液体窒素流路に用いられるコルゲート管の圧力損失を、直管相当長さをを用いることによって算出した。このとき、圧力損失は下記により計算できる。

$$\Delta P = l' \lambda \frac{l}{d_e} \frac{\rho u^2}{2} \quad (2)$$

ここで  $l'$  は直管相当長さを意味し、 $\Delta P_{Data}$  を実験や公称値から得た圧力損失、 $\Delta P_{Calc}$  を(1)式による圧力損失の計算値として、 $l' = \Delta P_{Data} / \Delta P_{Calc}$  により算出した。

### 3. 単芯超電導ケーブルの圧力損失測定結果

当社は2015年度にAC35 kVの単芯超電導ケーブルシステムの開発を実施、CIGRE TB538に準拠した形式試験を実施した。この超電導ケーブルシステムの構成を図1、仕様及び使用した超電導ケーブルの寸法を表1に示す。

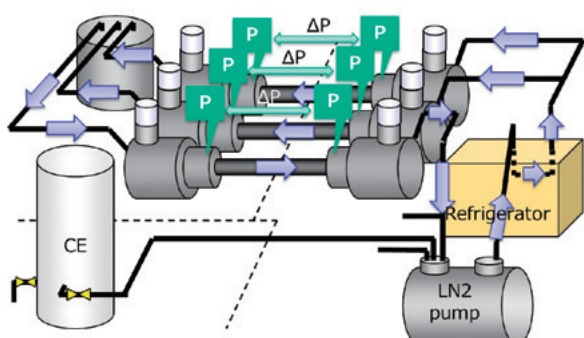


図1 AC35 kV 超電導ケーブルシステム形式試験構成

表1 35 kV 超電導ケーブルシステムの仕様

	仕様
定格電圧	35 kV
定格電流	600 A
臨界電流 ( $I_c$ )	1200 A
クライオスタット運転圧力	0.3 - 0.4 MPa・G
クライオスタット運転温度	65 - 70 K
ケーブル長	100 m
流路内径	61.0 mm
ケーブルコア外径	31.3 mm

この超電導ケーブルシステムでは冷凍機でシステムの運転温度まで冷却された液体窒素を、循環ポンプでケーブルシステム全体に循環させた。循環流量は約40 L/min.とし、超電導ケーブル両端の圧力差を測定することで超電導ケーブルの圧力損失を測定した。3条のケーブルのうち、2条を液体窒素の往路、1条を復路の配管として用いた。本測定では13日間に渡り、同一時刻のデータを測定し、その平均値を採用した。測定結果を表2に示す。圧力センサでの測定にばらつきが見られるが、得られた結果よりこの単芯ケーブルで使用したコルゲート管の直管相当長さは4~7であると考えた。

表2 単芯超電導ケーブルの測定結果

	$\Delta P_{Measurement}$ [kPa]	流量 [L/min.]	$\Delta P_{Calc}$ [kPa]	$l'$ [-]
1 往路	6.80	20.33	0.97	7.08
2 往路	3.89	19.28	0.88	4.44
3 復路	21.07	39.61	3.10	6.79

### 4. コルゲート管の直管相当長さ

流体が水の場合のコルゲート管の圧力損失のデータ<sup>3)</sup>を元に、コルゲート管の直管相当長さを算出した。計算結果を図2に示す。

コルゲート管の直管相当長さは配管サイズが小さなものほど大きな値を示した。この結果と、前項で示した液体窒素を用いた超電導ケーブルの圧力損失測定結果はよく一致していることから、水のデータから得られる直管相当長さを超電導ケーブルの圧力損失の見積りに採用した。

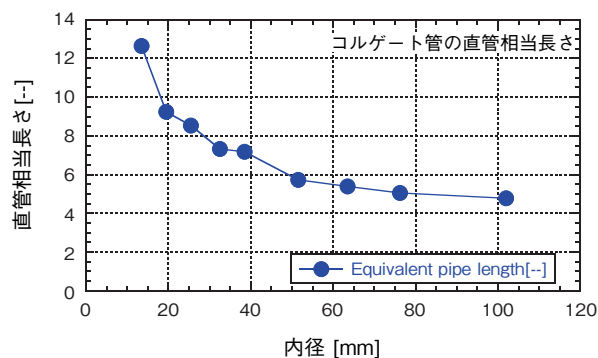


図2 コルゲート管の直管相当長さ

上記のデータより、水の圧力損失データから得られる直管相当長さに基づいて超電導ケーブルの圧力損失を計算した。三相同軸超電導ケーブルの構造は図3及び表3に示されたとおりである。

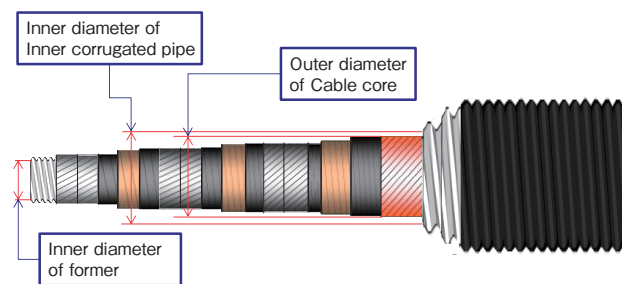


図3 三相同軸超電導ケーブルの構造

表3 三相同軸超電導ケーブルの構成

	材質及び形状
フォーマー	SUS304 コルゲート管
クッション層	不織布テープ
U層導体	YBCO 超電導テープ線材
絶縁層 (U-V)	ポリプロピレン半合成紙 & 半導電テープ
V層導体	YBCO 超電導テープ線材
絶縁層 (V-W)	ポリプロピレン半合成紙 & 半導電テープ
W層導体	YBCO 超電導テープ線材
絶縁層 (W-遮蔽)	ポリプロピレン半合成紙 & 半導電テープ
遮蔽層	銅テープ
保護層	不織布
内コルゲート管	Al コルゲート管

三相同軸超電導ケーブルの液体窒素流路は、外側流路用コルゲート管(内コルゲート),内側流路用コルゲート管(フォーマー)で構成されている。ここで、圧力損失の計算に関わる寸法は内コルゲートの内径、フォーマー上に形成されているケーブルコアの外径、およびフォーマーの内径である。ケーブルコアの外径は、フォーマーサイズとフォーマー上に形成される超電導層、絶縁層の厚みの和によって決まる。ここでは、十分な絶縁圧を想定して超電導層と絶縁層の厚さの和として14 mmを想定した。そのため、ケーブルコア外径をフォーマー外径 + 28 mmとして考えた。

5. 三相同軸ケーブルの流路設計

ケーブルを通過する液体窒素の流量  $W$  は、 $Q$  を熱負荷、 $\rho$  を流体密度、 $\Delta T$  を許容する上昇温度として、下記 (3) 式によって計算することができる。

$$W = \frac{Q}{\rho C \Delta T} \quad (3)$$

ここでは、熱負荷を熱侵入(外部からの伝熱及び内部発熱)とケーブルシステム内部で発生する熱交換量の和とした。熱交換量は図4のQSで表される通り、同一流路内で互いに接触している2地点の間で発生する熱交換の大きさである。冷却システムに要求される冷凍能力は(2)式より液体窒素の入り口と出口の温度差と流量から得られる。ここで、前述の単芯超電導ケーブルのように流路の上流と下流が熱交換しない場合、この温度差は熱侵入の温度上昇のみから構成され、システム内の温度分布は下流に位置するほど高くなるのが分かる。一方、熱交換が発生している場合、システムの最高温度点は熱交換が発生する2地点の間で発生し、熱侵入の温度分布に熱交換による温度上昇を加えた値になるのが分かる。

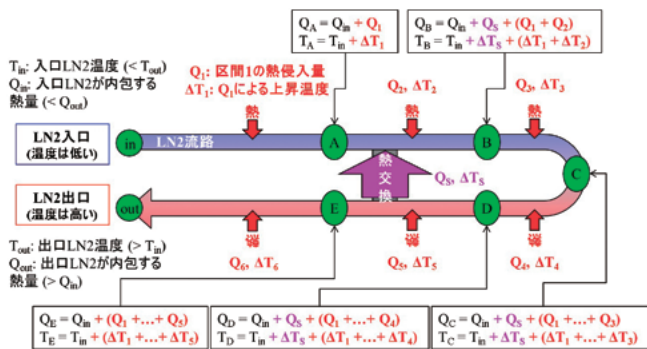


図4 熱侵入量と熱交換量の概念図

超電導ケーブルシステムに必要な液体窒素の流量と、必要流量を流し切るための流路構成を決定するため、我々は各構成部品の想定熱侵入量を積み上げ、裕度も考慮してシステムの熱侵入量を3000 Wと見積もった。また、熱交換量を単位長さ5.1 W/mとし、250 mで約1300 Wとして見積もった。ここで、熱交換量はMark.Sらによって報告さ

れている三相同軸超電導ケーブルの試験データ<sup>4)</sup>より仮に見積もった。また、これらの熱負荷を受けた際に許容する温度上昇を7 Kとして設定し、(3)式より必要な液体窒素流量を約25 L/min.として算出した。

得られた液体窒素流量を流すことができる寸法を検討するため、(2)式を用いて圧力損失計算を実施した。検討候補としたコルゲート管を表4、表5に示す。これらのコルゲート管を組み合わせて、液体窒素がケーブル内を往復する際に発生する圧力損失を計算した。ここでは、250 mのケーブル長を想定した。内コルゲート管サイズごとに、フォーマーサイズを変化させたときの圧力損失の変化を計算した結果を図5に示す。また、最も圧力損失の低い3つの組み合わせを表6に示す。

表4 計算に用いた内コルゲート管サイズ

サイズ名称	内径
Size 65	63.5 mm
Size 80	76.2 mm
Size 100	102.0 mm

表5 計算に用いたフォーマーサイズ

サイズ名称	内径	外径
Size 15	13.5 mm	19.0 mm
Size 20	19.5 mm	26.0 mm
Size 25	25.5 mm	33.0 mm
Size 32	32.5 mm	41.0 mm
Size 40	38.5 mm	47.6 mm
Size 50	51.5 mm	61.5 mm

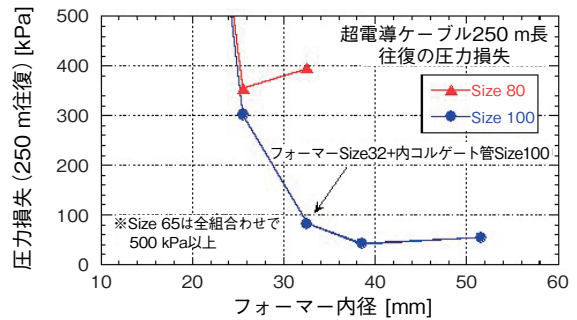


図5 フォーマー内径変化による圧力損失の変化

表6 圧力損失が低くなるコルゲート管の組み合わせ

No.	内コルゲート管	フォーマー	$\Delta P$ [kPa/250 m]
1	Size 100	Size 40	42.7
2	Size 100	Size 50	55.4
3	Size 100	Size 32	83.5

表6より、最も圧力損失が低くなる組み合わせは内コルゲート管がSize 100、フォーマーがSize 40のときで、圧力損失は42.7 kPaであった。次点はSize 100とSize 50の組み合わせで55.4 kPa。3番目がSize 100とSize 32で83.5 kPaであった。実ケーブルを想定して200 kPaの揚程力を持つポンプを使用することを仮定する事とし、ケーブ

## 参考文献

- 1) 大西浩樹他：昭和電線レビュー，Vol.62, No.1, p.9 (2016)
- 2) 菅根秀夫他：昭和電線レビュー，Vol.62, No.1, p.5 (2016)
- 3) Product catalogue of SHIN TOKYO FLEX CO.,LTD.
- 4) Mark S. et al., "Three years operation experience of the AmpaCity system installation in Essen", Eucas2017 3LO4-05

ルコアのサイズを最も小さくできる3番目の構成でシステムの設計を行った。

上記で採用した構成を元にケーブルの詳細設計を行い、実際の寸法に基づいてシミュレーションを行った。冷媒は25 L/min.の液体窒素が内部流路から流れ込み、250 m地点で折返して外部流路を通過して戻る条件とした。また、ケーブル部は合計2 W/mの熱侵入量とし、250 mの折返し部では終端部を構成する部材の熱侵入を積算し、1000 Wの入熱を与える条件とした。図6は結果として得られたケーブルの温度分布である。

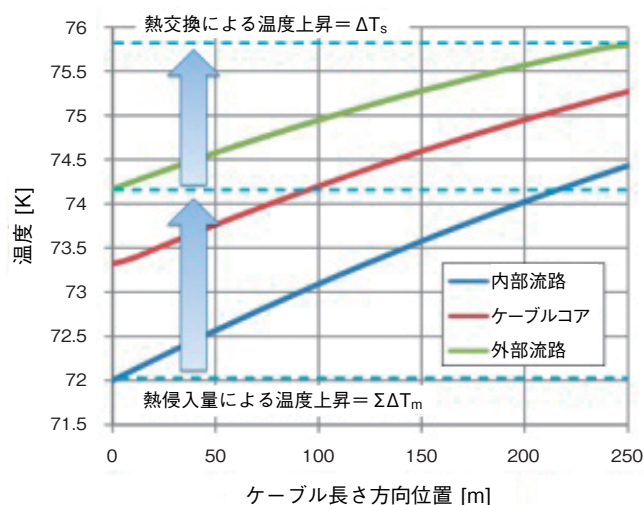


図6 三相同軸超電導ケーブル内の温度分布

ケーブルが全長に渡って熱交換をしているため、想定通り往路と復路が切り替わる折返し部が最高温度点となった。また、最高温度点の温度は前提条件とした $\Delta T = 7 \text{ K}$ 以下の条件を満たすものであった。

## 6. まとめ

本報では、過去の試験結果をもとにしてコルゲート管に液体窒素を流したときの圧力損失から得られる直管相当長さが、水を流した場合のデータから得られる直管相当長さ一致を確認した。この結果を元に、水のデータから各寸法のコルゲート管で直管相当長さを算出し、三相同軸ケーブルの圧力損失が低くなる構成を検討した。システムに必要とされる液体窒素流量を算出する際、過去の報告から超電導ケーブル内で発生する熱交換を仮定し、流量算出を行った。

上記によって得られた構成を元に詳細設計を行い、最終構造でシミュレーションを行ったところ、最高温度が許容できる温度を超えない構造であることを確認できた。

今後、三相同軸超電導ケーブルシステムの実証を視野に入れ、形式試験を実施する予定である。

昭和電線ケーブルシステム(株)

菅根 秀夫 (すがね ひでお)

先行商品開発センター

超電導応用製品開発グループ 主任

超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

足立 和久 (あだち かずひさ)

先行商品開発センター

超電導応用製品開発グループ 主査

超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

小林 公樹 (こばやし ひろき)

基盤技術開発センター

分析・評価グループ 主査

計算機を用いたシミュレーション業務に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

塩原 敬 (しおはら けい)

先行商品開発センター

超電導応用製品開発グループ 主任

超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

北村 祐 (きたむら たすく)

先行商品開発センター

超電導応用製品開発グループ 主幹

超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

三堂 信博 (みどう のぶひろ)

先行商品開発センター

超電導応用製品開発グループ 主幹

超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

青木 裕治 (あおき ゆうじ)

先行商品開発センター

超電導応用製品開発グループ グループ長

超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ホールディングス(株)

長谷川 隆代 (はせがわ たかよ)

取締役社長

兼 昭和電線ケーブルシステム(株)

プラント内超電導ケーブルプロジェクト プロジェクト長