

## 高温超電導ケーブルの真空断熱特性に関する研究

荒木 智 勇\*・津波 亮\*・谷口 清 貴\*・林 裕次朗\*  
栗塚 一 喜\*・渡部 充 彦\*\*・増田 孝 人\*\*

### Vacuum-Adiabatic Characteristic of High Temperature Super-Conducting Cable

Tomoo Araki, Ryo Tsunami, Kiyotaka Taniguchi, Yujiro Hayashi  
Kazuyoshi Kurizuka, Michihiko Watanabe, Takato Masuda

The hot temperature super conducting cables (HTS cable) are cooled by the liquid nitrogen and the super conducting condition of the cable is achieved. The HTS cable has many merits, for example, large power capacity, compact size, low loss and no leakage of magnetic field. So it is thought that the cable is applied to the ducts in a narrow underground space. As the liquid nitrogen of which temperature is 77(K) is used as the coolant, the thermal heat load transferred between environment and the cable must be interrupted. The thermal insulating space, that is, cryostat is installed at outer part of the cable. The space is kept in high vacuum condition. We experimented at various vacuum condition and studied heat transfer characteristic of the cryostat.

#### 1. 序論

液体窒素冷却により容器に超電導状態が達成可能な、高温超電導材料を使用した高温超電導ケーブルはコンパクトで大容量送電が可能なことから将来、地中送電線路への適用が考えられている。本ケーブルの重要な基礎特性の一つとして、真空による断熱特性等がある。液体窒素により冷却されたケーブルにおいて、万一断熱層の真空特性が良くないと、外気からの熱の侵入が増え、冷却効率が著しく低下することが考えられる。

従って、断熱技術(熱絶縁)は高温超電導ケーブルにとって、非常に重要な要素であることから、ケーブル断熱管部における真空断熱特性について実験を行い、その研究結果を取り纏めたものである。

#### 2. 高温超電導ケーブル

超電導の電力応用の代表的なものとして超電導ケーブルがある。そのサンプルの外観を図1に、

\* 電気電子工学科 \*\* 住友電気工業株式会社

断面構造を図2に示す。これは超電導のもつ高電流密度によってケーブルサイズをコンパクトにし、既設の管路を有効利用することで、地中送電線建設費のコストダウンが図れることである。

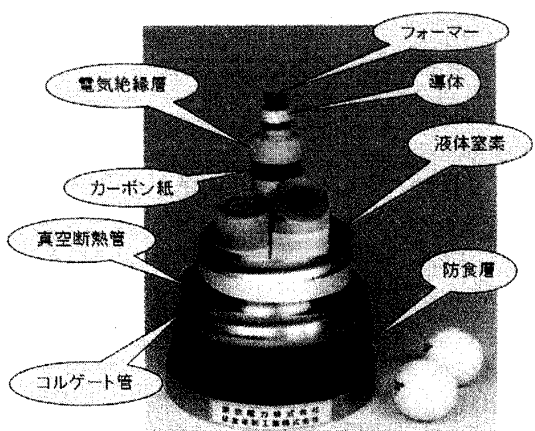


図1 高温超電導ケーブルサンプル

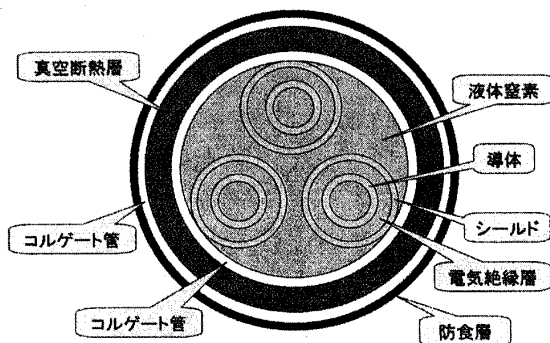


図2 高温超電導ケーブル断面構造

高温超電導ケーブルでは、図3に示すように従来の超高圧ケーブルと同等以上の送電容量が数分の1の大きさのケーブルで可能となるため、既設の管路を利用でき地中送電線建設の期間と費用を大幅に削減できる<sup>(1)(2)</sup>。このような背景のもと、現在、日米欧を中心に活発な研究開発が展開されている。Southwireのグループは、自社構内の工場給電用に30mのケーブルを布設し実験を実施した。日本では、東京電力と住友電工が平成13年度から14年度にかけ電力中央研究所横須賀研究所において、66kV-1000A、長さ100mの3相一括ケーブルの課通電試験を実施した<sup>(1)(3)</sup>。一方、ヨーロッパでは、都市近郊におけるEMF(電磁波障害)等の環境対策として超電導ケーブルの開発が進められており、アメリカやフランスでは、架空送電線の代替えとして大容量(1GV)送電ケーブルの開発を目指している。

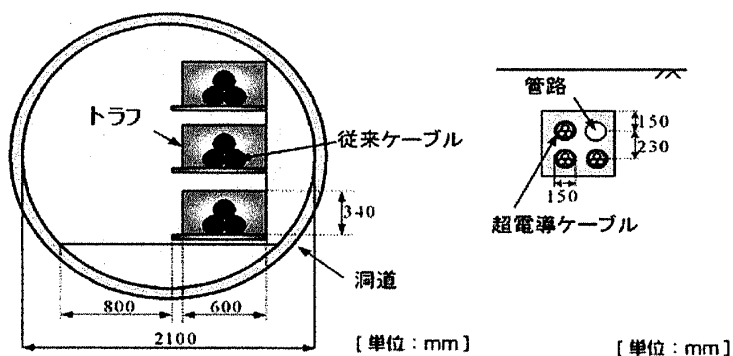


図3 従来ケーブルと超電導ケーブルの布設イメージ

住友電工は2006年に韓国電力

公社電力研究院(KEPRI)の試験場に図4に示すような高温超電導ケーブルシステムを納入、竣工した<sup>(4)</sup>。超電導ケーブルシステムは、端末、冷却システムを含み、

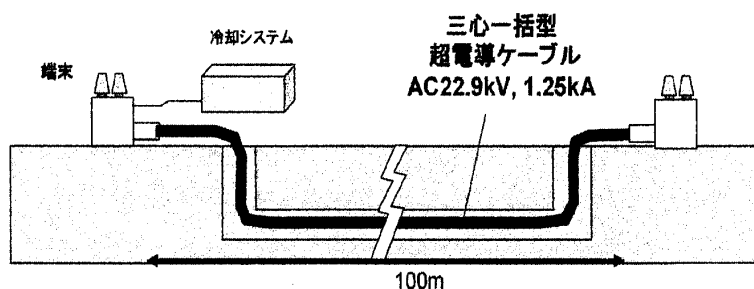


図4 KEPRI 高温超電導ケーブル線路

納入するケーブルの仕様は、長さ 100m、電圧 AC22.9kV、電流 1250A、三相一括で、新しい製法(加圧焼成法)で製造されたビスマス系超電導線材を用いられている。更に 2006 年 5 月、同社は世界初の高温超電導ケーブルシステムを、米国ニューヨーク州、Albany 市の実用地下送電線路として納入、完成した(図 5 参照) (5) (6)。

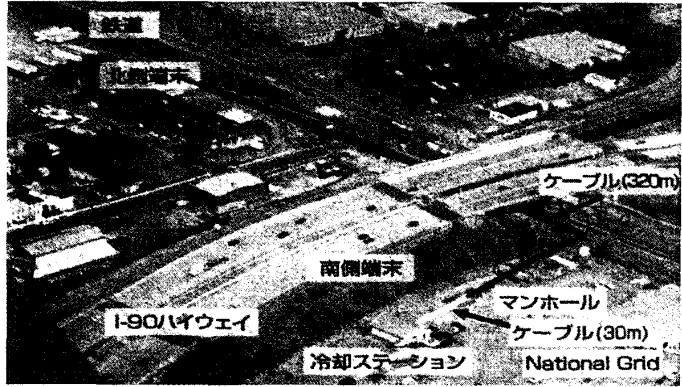


図 5 米国ニューヨーク州高温超電導ケーブル線路

これは、全長 350m、電圧 34.5kV、電流 800A の 3 相が一体となった三心一括型高温超電導ケーブルと、三心一括型気中端末、超電導三心一括型ケーブルジョイント、およびそれらの計測、冷却システムから構成されている。超電導ケーブルは、内径約 150mm の地下管路に布設され、片側から 30m の地点にジョイントを設けている。

また、超電導ケーブルには、住友電工が独自開発した加圧焼成法で製造された「革新的ビスマス系超電導線」が 70km 使用されている。

### 3. 本研究における実施内容

研究では、高温超電導ケーブル断熱管の短尺モデルを用いて、以下の項目について調査ならびに実験を行なうこととした。

- (1) ベーキング(予備加熱)の真空特性及ぼす効果
- (2) ガス放出量の測定
- (3) 真空引き時間と真空特性の関係
- (4) 真空配管の流体抵抗と真空特性の関係
- (5) 真空度と侵入熱量の関係
- (6) 液体窒素冷却と真空特性の関係
- (7) SI の真空特性に及ぼす効果

### 4. 実験方法・実験結果

#### 4.1 実験系統

実験系統図を図 6 に示す。真空引きは外管と真空ポンプをステンレスフレキシブルホースで接続する。冷却の際は液体窒素ボンベから液体窒素を内管内部にパイプを通じて送り、蒸発した窒素ガスはパイプを通じて放出される。

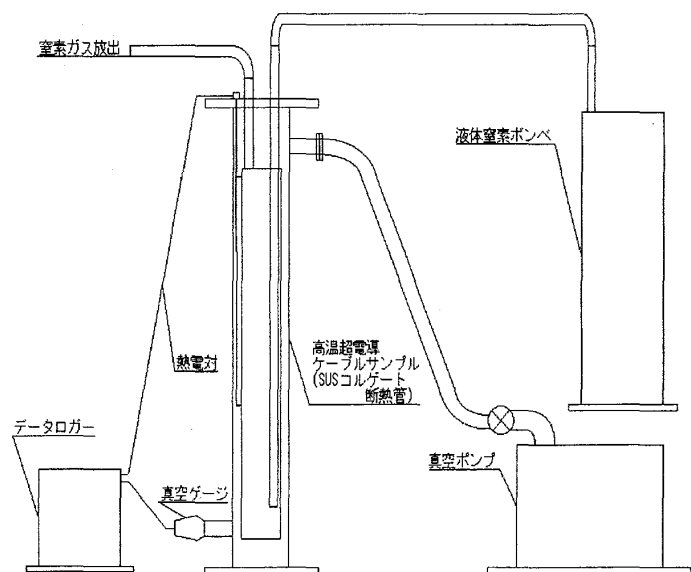


図 6 実験系統図

#### 4.2 測定系統と測定方法

主な測定項目は真空度と温度であり、真空度は断熱熱管内部 1 点、温度は内管の中央部および上部、外管の中央部の 3 点とし、真空度は真空ゲージで、温度は熱電対で測定した。図 7

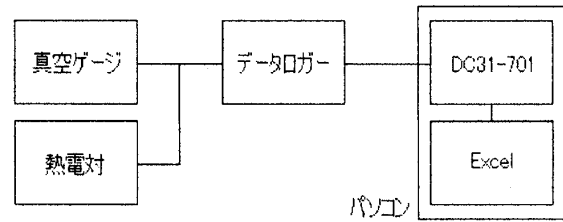


図 7 測定系統図

の測定系統図に示すように、真空ゲージと熱電対からの出力電圧をデータロガーで読み取りパソコン内の DC31-701 というソフトで数値化し Excel グラフを自動表示した。

#### 4.3 初期状態確認実験

##### (1) 実験方法

1 回真空引きを行う毎に断熱管表面に吸着されている水分子が除去される。この状態で次の実験を行うと、真空度が良くなるため正しい評価が得られないことが考えられる。断熱管内部を一旦外気に開放し、一晚(16 時間)放置し金属表面に改めて水分子を吸着させた。この実験を 3 日繰り返し、初期状態に戻ることの確認実験を行った。ベーキング温度は公称温度 90[°C]に設定し、ベーキング時間および真空引き時間はそれぞれ 4 時間とした。

##### (2) 実験結果

初期状態確認実験結果を表 1 に示す。到達真空度および止め試験値とも各実験回数毎の有意差は無く、一晚外気に開放すれば初期状態になると言える。

表 1 初期状態確認実験結果 (S/無し)

|      | 到達真空度 [Pa] | 止め試験値 [Pa] | 初期雰囲気温度 [°C] |
|------|------------|------------|--------------|
| 1 回目 | 0.0427     | 2.37       | 26.0         |
| 2 回目 | 0.0438     | 2.96       | 24.0         |
| 3 回目 | 0.0412     | 2.93       | 25.5         |

#### 4.4 ベーキング温度による真空特性への影響

金属表面には、図 8 に示すように水分子が吸着されていることが知られている。金属表面の温度が高くなるほど水分子に与えられる活性化エネルギーは大きくなり、その結果水分子は容器内に放出され、金属表面の滞留時間  $\tau$  は(1)式に示されるように短くなると考えられる。このように金属表面を加熱し水分子を放出させる加熱処理をベーキング、またはベークアウトという。加熱処理した金属表面は、一度大気にさらしてしまえば、加熱前の放出量に戻ってしまう。そこで真空度の向上を狙った加熱処理は真空排気のプロセスの途中で行う必要がある。

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \text{ [s]} \quad (1)$$

ここで

$\tau$  : 表面での粒子の平均滞留時間 [s]

$\tau_0$  : 定数

$E$  : 脱離の活性化エネルギー [kJ/mol]

$T$  : 壁の温度 [K]

$R$  : 気体定数

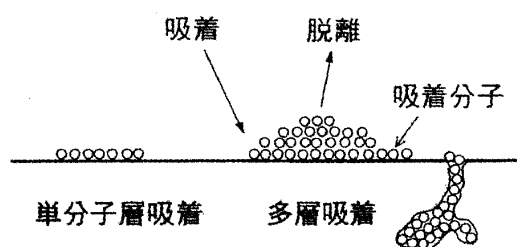


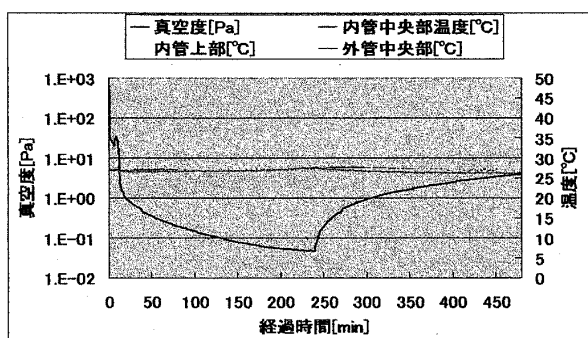
図8 金属表面の分子の吸着と脱離

### (1) 実験方法

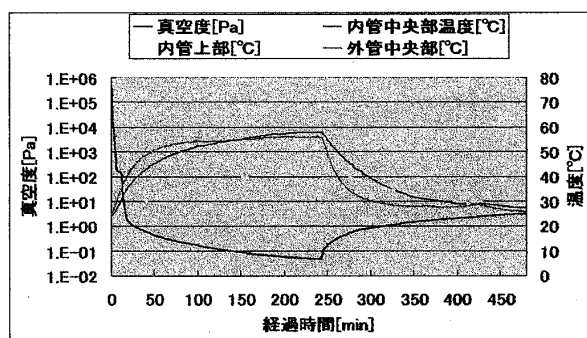
ベーキングは、断熱管の表面にベルトヒーターを巻き付け、交流通電により加熱した。また真空引きは、ベーキングと同時に4時間連続して行った。

### (2) 実験結果

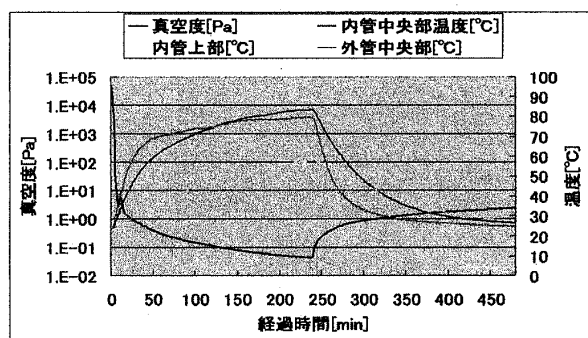
断熱管の平均温度を常温並びに 53[°C]、75[°C]、95[°C]に加熱したときの各部温度と真空度の変化を図9に示す。平均温度としては、まず内管中央部温度と内管上部温度の平均温度を求め、更にその平均温度と外管中央部温度の平均温度を用いた。



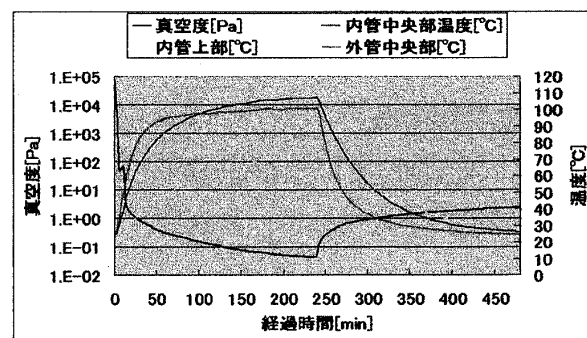
(a) 常温の場合



(b) ベーキング温度 53[°C]の場合



(c) ベーキング温度 75[°C]の場合



(d) ベーキング温度 95[°C]の場合

図9 ベーキング温度による影響

ベーキング温度と真空度の関係を図10に示す。同図より明らかなようにベーキング温度が高くなるほど、止め試験時の真空度は良くなっていることが分かる。これはベーキング中の真空引きにより水分子が除去され、止め試験時に放出量が減少したためと考えられる。

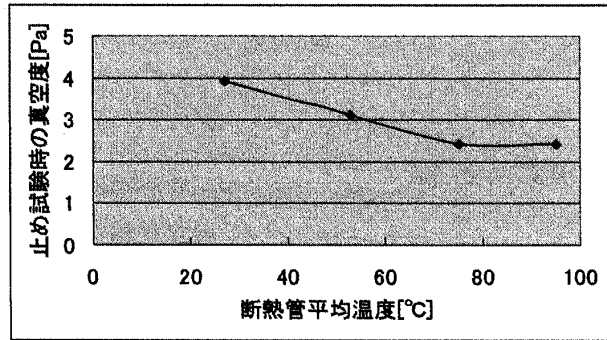


図10 ベーキング温度と真空度の関係

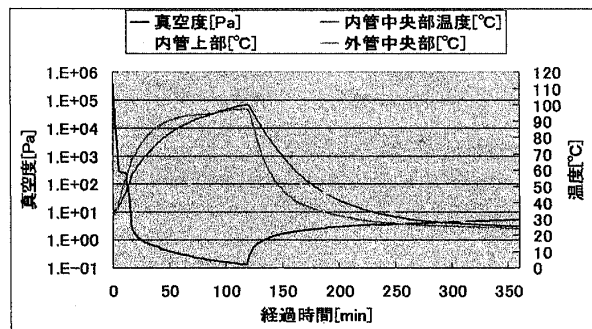
#### 4.5 真空引き時間による真空特性への影響

##### (1) 実験方法

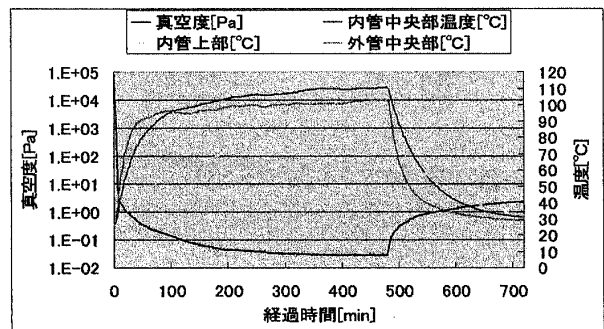
真空引き時間を2時間、4時間、8時間に変え、止め試験時間はすべて4時間、ベーキング(公称温度 90[°C])の条件で実験を行った。

##### (2) 実験結果

各真空引き時間に対する各部温度と真空度の経時変化を図11に示す。



(a) 真空引き時間 2時間



(b) 真空引き時間 8時間

図11 真空引き時間による真空度への影響

真空引き時間と真空度の関係を図12に示す。

真空引き時間を増すことにより、止め試験時の真空度がよくなっていることが分かる。これは、断熱管表面に吸着されている水分子がより多く除去されたため、止め試験時にその放出量が減少したためと考えられる。

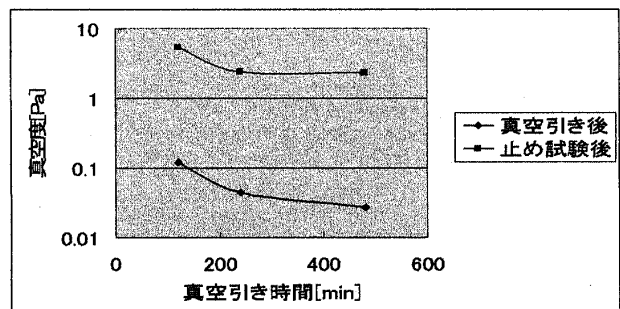


図12 真空引き時間と真空度の関係

#### 4.6 流体抵抗の影響

##### (1) 実験方法

配管に貫通孔が2mmΦ及び4mmΦのオリフィスを装着し、またオリフィス無しの場合について実験を行った。常温状態で真空引きをした後止め試験を行い、時間は各々4時間とした。

(2) 実験結果

流体抵抗と真空度の関係を図13に示す。同図よりオリフィスの貫通孔を2mmΦから4mmΦ、また、オリフィス無しと条件を変えることにより、真空引き後の真空度がよくなることが確認できた。これはオリフィスの貫通孔が広がることにより、流体抵抗が減少し、排気量が増加したためと考えられる。ただし、止め試験後の真空度については大きな変化はなかった。

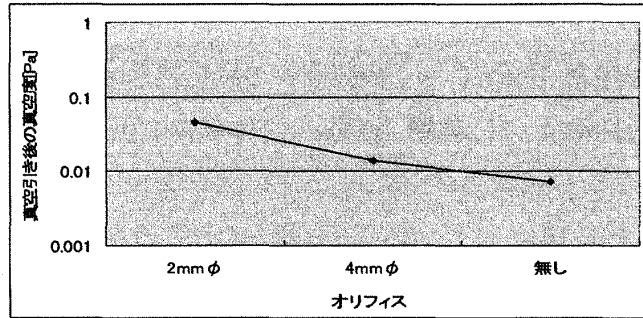


図13 流体抵抗と真空度の関係

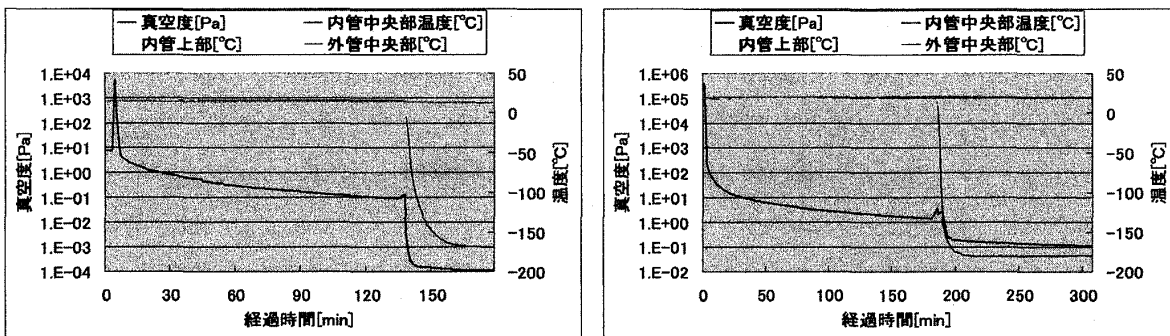
4.7 液体窒素冷却による真空度の変化

(1) 実験方法

常温状態で真空引き後止め試験を行い、真空度が飽和に達したのちにLN<sub>2</sub>を内管内に充填した。

(2) 実験結果

各部温度と真空度の変化を図14及び表2に示す。図14及び表2より明らかなように、LN<sub>2</sub>冷却後は真空度が急激によくなっている。これは真空中の水分等の気体分子がステンレス管の表面に吸着したことによると考えられる。また、SI 有りの場合、LN<sub>2</sub>冷却後の内管中央部温度がSI 無しに比べて下がっていることが分かる。これは、SI による断熱効果があるためと考えられる。



(a) 初期真空度 0.13[Pa]の場合 (SI / 3層) (b) 初期真空度 3.6[Pa]の場合 (SI / 10層)

図14 LN<sub>2</sub>冷却による真空度への影響

表2 LN<sub>2</sub>冷却による真空度の変化

| SIの層数 | 内管中央部温度[°C] |           | 初期真空度<br>[Pa] | LN <sub>2</sub> 冷却後の真空度<br>[Pa] |
|-------|-------------|-----------|---------------|---------------------------------|
|       | 初期温度[°C]    | 冷却後温度[°C] |               |                                 |
| 3層    | 15.5        | -169.0    | 0.13          | 1.1×10 <sup>-4</sup>            |
| 10層   | 19.6        | -179.2    | 3.6           | 1.1×10 <sup>-1</sup>            |

### 4.8 真空度と侵入熱量

#### (1) 実験方法

真空引きを止め、止め試験の状態で  $LN_2$  を内管内部に充填し、 $LN_2$  の蒸発量を流量計により測定した。侵入熱量は、測定した  $LN_2$  蒸発量より(2)式を用いて求めた。

$$Q = \frac{q \cdot h \cdot m}{V} \quad [\text{cal/min}] \quad (2)$$

ここで  $q$ : 液体窒素の蒸発量 [l/min]  $h$ : 液体窒素の気化熱 [cal/g]

$Q$ : 侵入熱量 [cal/min]  $V$ : 体積 [ $m^3$ ]  $m$ : 液体窒素 1 [mol] 当たりの質量 [g]

#### (2) 実験結果

真空度と侵入熱量の関係を図 15 に示す。同図より明らかなように真空度が約 0.5 Pa より悪くなると侵入熱量は急に増加する。これは対流による伝熱量が増加するためであると考えられる。また、 $SI$  有りの場合、無しに比べて侵入熱量が小さく真空度が約 0.5 Pa 以下のとき熱侵入量は約 3W 以下となる。これは  $SI$  により放射伝熱が抑えられたためである。このとき、気体の対流の影響が相対的に小さくなり、 $SI$  部の放射及び伝導による熱伝達が支配的になるためである。

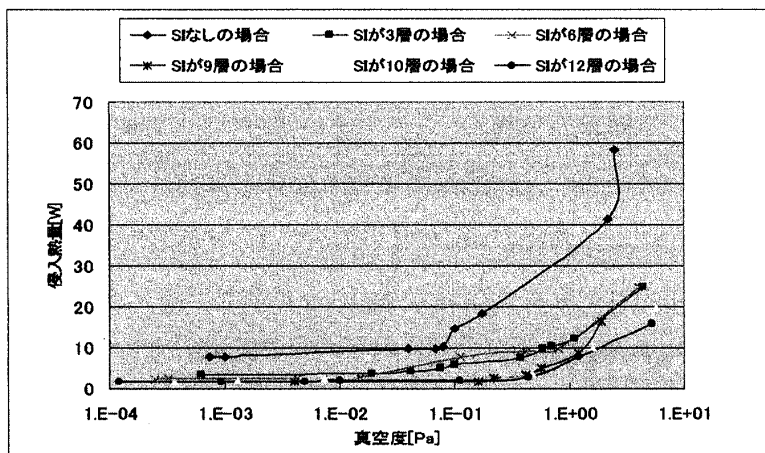


図 15 真空度と侵入熱量の関係

### 5. 結言

本研究により高温超電導ケーブルの真空断熱層における真空度と侵入熱量の関係、ベーキングの効果ならびに  $LN_2$  冷却時の真空度の上昇特性が明らかとなった。

#### 参考文献

- (1) 増田・広瀬他：“高温超電導ケーブルの実用化検証試験”，電気材料技術雑誌第 12 巻第 1 号(2003 年)
- (2) 植田・中司：“電気エネルギー分野における超伝導技術の開発動向”，電気論文 B 122 巻 11 号(2002 年)
- (3) 林・増田：“高温超電導線材および超電導ケーブル開発の現状と動向”，電気評論(2004 年)
- (4) 渡部他：“韓国 KEPCO 向け 22.9kV 高温超電導ケーブルの竣工”，SEI テクニカルレビュー第 169 号(’06 年)
- (5) 増田他：“Albany 計画用超電導ケーブルの開発”，H16 年電気学会電力エネルギー部門大会 No.358(’04 年)
- (6) 湯村・増田他：“長尺三心一括型高温超電導ケーブルによる世界初の実線路建設と商用運転(米国 ALBANY プロジェクト)”，SEI テクニカルレビュー第 170 号(2007 年)

(平成19年 3 月 24 日受理)