

## 高温超電導ケーブルの真空断熱特性に関する研究 (その4)

荒木 智 勇\*・齊藤 修 一\*\*・河内 貴 寛\*\*増田 孝 人\*\*\*  
湯村 洋 康\*\*\*・広田 博 史\*\*\*・斎藤 高 廣\*\*\*・稲垣 芳 宏\*\*\*

### Vacuum-Adiabatic Characteristic of High Temperature Super-Conducting Cable (Part 4)

Tomoo Araki, Syuichi Saito, Takahiro Kawauchi,  
Takato Masuda, Hiroyasu Yumura, Hiroshi Hirota, Takahiro Saito  
and Yoshihiro Inagaki

The hot temperature super conducting cable (HTS cable) cooled by the liquid nitrogen has many merits, for example, large power capacity, compact size, low loss and no leakage of magnetic field. First HTS cable in Japan is constructed now in a substation of Tokyo Electric Power Company. As the liquid nitrogen of which temperature is 77 [K] is used as the coolant, the thermal heat load transferred between the 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 and Super Insulation (SI) is wound on the surface of the inner pipe in which three cable cores and liquid nitrogen are installed. We studied heat transfer characteristic of the cryostat in following the article part 1<sup>(1)</sup>, part 2<sup>(2)</sup> and part 3<sup>(3)</sup>.

Keywords : superconductor, cable, heat transfer

#### 1. 序論

液体窒素(以下  $LN_2$ )冷却により容易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低損失での大容量送電が可能なことから、地中送電線路への適用が考えられている。現在、我国で最初の高温超電導ケーブル線路が東京電力(株)変電所構内で建設中である<sup>(4)</sup>。温度 77 [K]の  $LN_2$ により冷却されたケーブルにおいて、万一断熱層の断熱特性が良くないと、外気からの熱の侵入量が増え、冷却効率が著しく低下する。断熱性能を向上させることは高温超電導ケーブルにとって、非常に重要な開発要素の一つであることから、前回に引き続いてケーブルコア3本と  $LN_2$ を収納した断熱管内管の表面に放射伝熱を遮断するスーパーインシュレーション(以下 SI)を巻き付け、更に水分吸着剤を封入し、それぞれの真空断熱特性について実験を行った。その実験結果について報告する。

---

\* 電気電子情報工学科    \*\* 電気電子工学科卒研    \*\*\* 住友電気工業株式会社

## 2. 高温超電導ケーブルの構造

超電導ケーブルサンプルの外観を図1にまた、断面構造を図2に示す。電力ケーブルはほとんどが地下に水平に布設されることから、図3(a)に示すように断熱管（内管）が自重により落ち込み、断熱管（外管）と接触する。その状態では接触部分より熱伝導による熱の侵入が考えられる。その対策として図3(b)に示すように断熱層の内管と外管の間にロッドスペーサを巻き付けている。ロッドスペーサの外観とケーブル断熱管に巻き付けた状況を図4に示す。

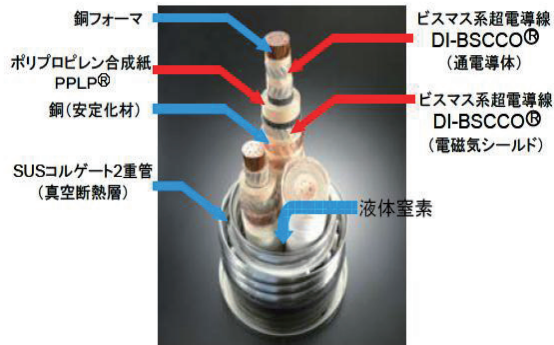


図1 高温超電導ケーブルサンプル

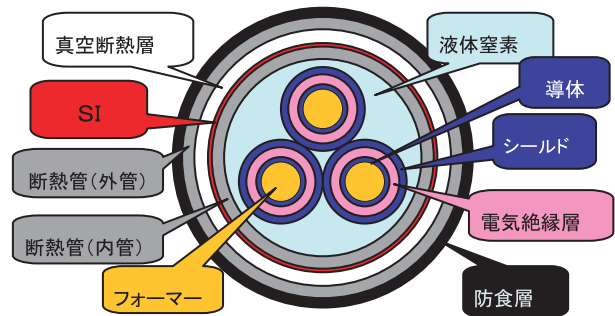
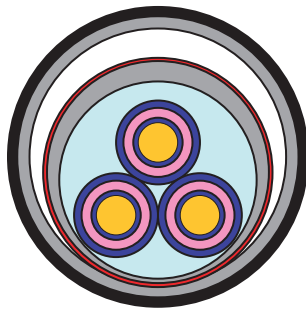
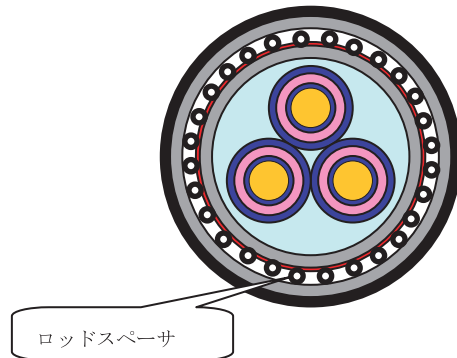


図2 高温超電導ケーブル断面構造図

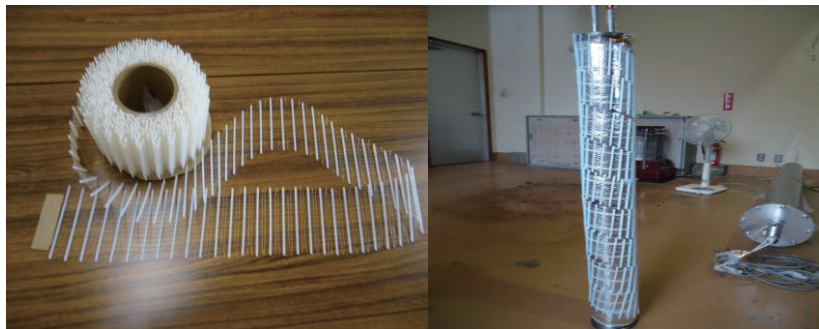


(a) ロッドスペーサなし



(b) ロッドスペーサあり

図3 水平布設したときの高温超電導ケーブル断面形態



(a) ロッドスペーサの外観 (b) ロッドスペーサ巻き付け状況

図4 ロッドスペーサ

### 3. 本研究における実施内容

本研究では、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うこととした。

- (1) ロッドスペーサ有無についてのベーキング特性
- (2) ロッドスペーサ有無についての真空断熱特性
- (3) ロッドスペーサ有無についての  $LN_2$  冷却時の真空特性
- (4) 水分吸着剤の真空特性に及ぼす効果

### 4. 実験方法

#### 4.1 実験系統

実験系統図を図5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連結し、ベーキングを行う際は、図5(a)に示すように外管表面にベルトヒーターを巻き付け、スライダックの電圧調整により流す電流を変化させ断熱管の温度を調整した。侵入熱を測定する際は  $LN_2$  を内管内部に注入・充填するために、図5(b)に示すように  $LN_2$  ボンベと内管をステンレス管で連結した。断熱管サンプルの外観を図6に示す。

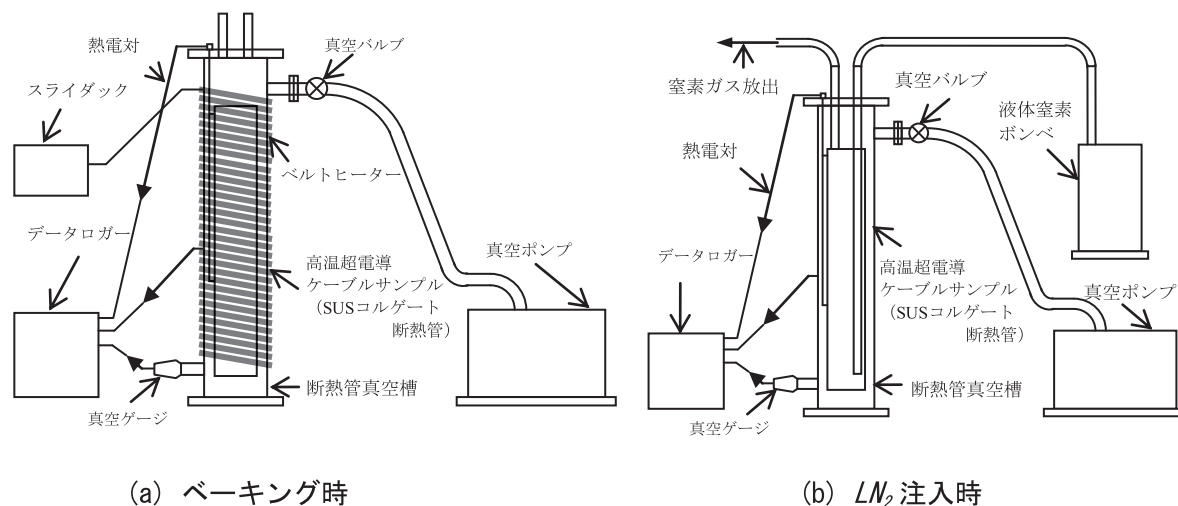


図5 実験系統図



(a) ベルトヒーター巻付け (b) 保温材巻付け

図6 断熱管サンプル

## 4.2 測定回路と測定方法

主な測定項目は真空度、温度及びガス流量であり、真空度は断熱管内部 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。流量はデジタル式流量計で測定した。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、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 SIの種類・層数とロッドスペーサの有無

真空引きを行う前に放射伝熱を遮るため SI(両面アルミニウム蒸着ポリエステルフィルム)を断熱管の内管に巻き付けた。その表面に巻き付けたロッドスペーサの有無について特性の比較を行った。ベーキング及び吸着剤の真空特性の測定を行う際には、SIの層数を 6 層とした。真空度と侵入熱量の測定時には SIの層数を 6 層および 12 層とした。

## 4.4 ベーキング方法

図 7 に示すように真空引きとベーキングを同時に約 4 時間行い、その後約 4 時間封じ切りの状態で放置し真空度と温度を測定した。真空引き停止直前の真空度を到達真空度、封じ切り後の真空度を止め真空度と称する。

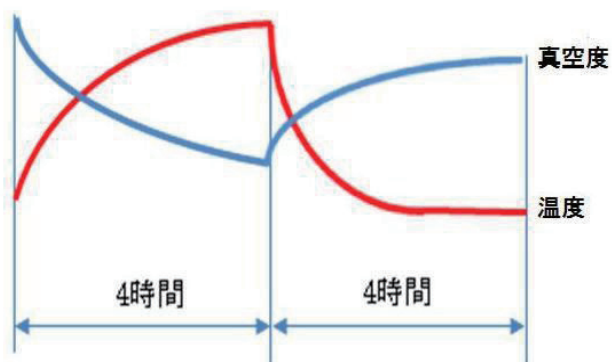


図 7 ベーキング及び真空引きのパターン



図 8 吸着剤取付け状況

## 4.5 吸着剤取り付け

吸着剤として、モレキュラーシーブ（合成ゼオライト）を使用し、封入量はそれぞれ 0.2, 0.5g とした。真空引きを行う前に、ポリエステルの袋に吸着剤を入れ、図 8 に示すとおり断熱管の内管の中央部に取り付けた。SIを巻き、ロッドスペーサを取り付ける場合にはその外表面に吸着剤を取り付けた。

## 4.6 真空度と侵入熱量の測定

真空ポンプにより断熱管内の真空引きを行い、真空度が十分に良くなった状態(1[Pa]以下)で止め試験を 2 時間程度行った。その後、 $LN_2$ を断熱管内に注入・充填した。

断熱管内の真空度が程度飽和した時点でバリアブルリークバルブ(図 9 参照)を使を用いて、手動

で微量の空気を断熱管内に注入した。そのとき一時的に真空度が悪くなるが、金属の分子吸着により真空度は元の値まで良くなる<sup>(5)</sup>。

金属表面の分子吸着現象がほぼなくなった段階でバリアブルリークバルブから更に微量の空気を入れ、真空度を徐々に変化させ、真空度が大気圧付近になるまで繰返した。その蒸発量を侵入熱量に換算し、真空度との関係を求めた<sup>(2), (6), (7), (8)</sup>。図10は微量空気を断続的に注入しているときの真空度の変化の代表例を示している。



図9 バリアブルリークバルブ

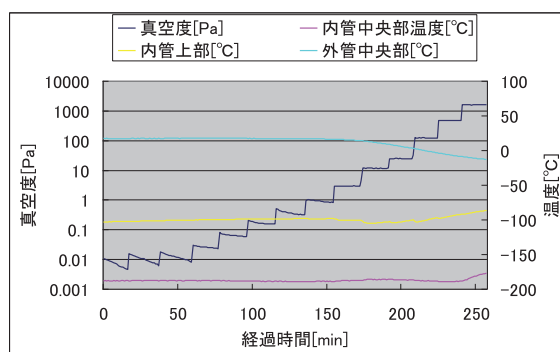


図10 侵入熱量測定時の真空度の変化

## 5. 実験結果

### 5.1 SI巻き付け時のベーキングの真空特性に及ぼす影響

図7に示したとおり真空引きとベーキングを同時に4時間行い、4時間の止め試験を行った。

図11にベーキングによる真空度の変化の代表例を示す。

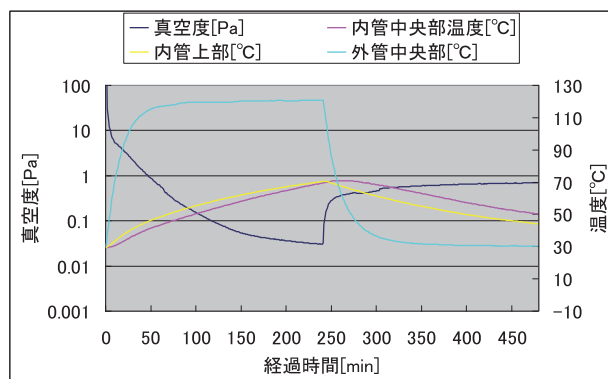
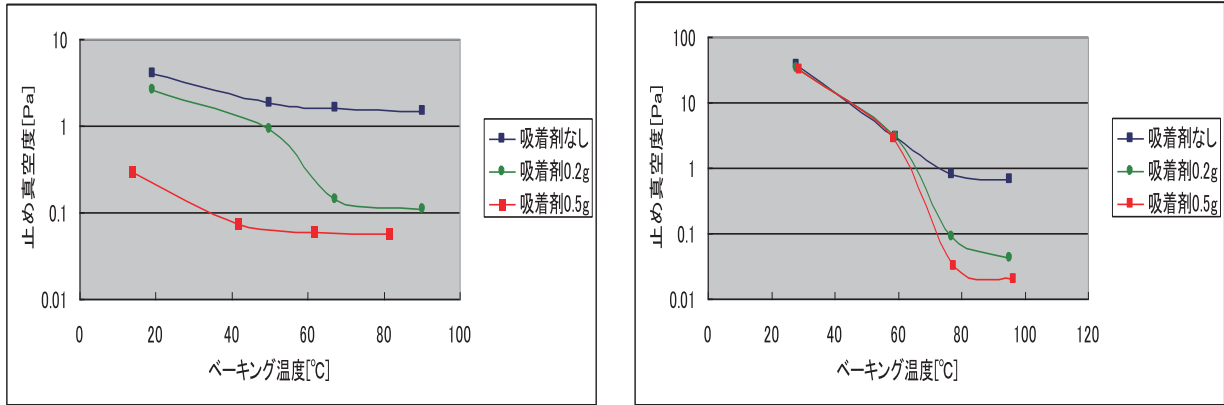


図11 ベーキングによる真空度の変化の代表例

図12にベーキング温度と止め真空度の関係を示す。同図に示すように、ベーキング温度を高くするほど、止め真空度が良くなっていることが分かる。これは、ベーキング中に真空引きを行った結果、断熱管表面に吸着された水分子が除去され、その結果、止め試験時にその脱離量が減少したためと考えられる。また、ロッドスペーサの有無による止め真空度への影響を比較すると、ロッドスペーサ有りの方が、無しに比べて低温領域では悪いが、高温領域ではやや良くなっていることが分かる。このことから、ロッドスペーサを取付けたことによる真空特性への悪影響はほとんど無いと考えられる。一方、水分吸着剤の封入量を増やすほど、ロッドスペーサ有り、無しとも止め真空度は良くなっている。これは、真空中の水分子を水分吸着剤が吸着したためと考えられる。





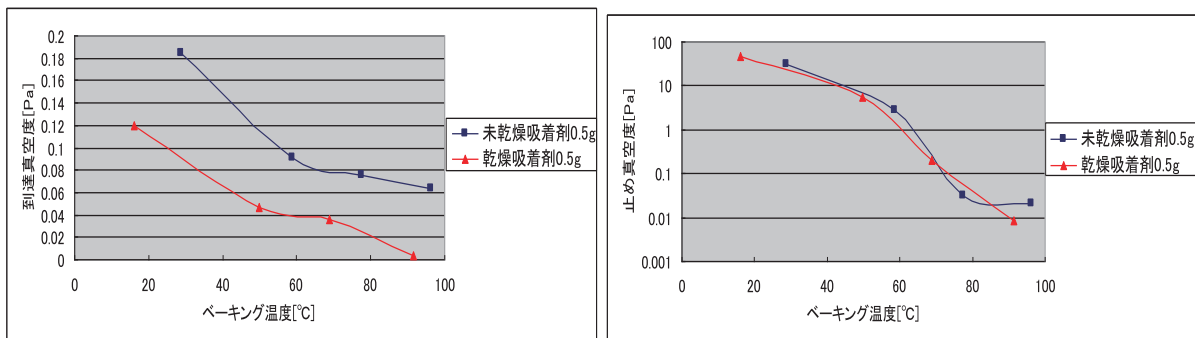
(a) ロッドスペーサなし

(b) ロッドスペーサあり

図 12 ベーキング温度と止め真空度の関係

## 5.2 水分吸着剤の予備乾燥による真空度特性への影響

水分吸着剤それ自体が水分を含有していることが考えられることから、加熱による予備乾燥を行い、その有無による真空特性に及ぼす影響の相違を調べた。図 13 に吸着剤の予備乾燥による真空特性の影響を示す。到達真空度は同図 (a) に示すように、吸着剤を予備乾燥させた方が到達真空度は良くなっていることが分かる。これは、吸着剤に吸着されていた水分子が予備乾燥させることによって蒸発し、到達試験時にその放出量が減少したためと考えられる。一方、同図 (b) に示すように止め真空度は予備乾燥しない場合と比べてあまり差がないことが分かる。このことから、実用上は必ずしも吸着剤を予備乾燥しなくてもよいと考えられる。



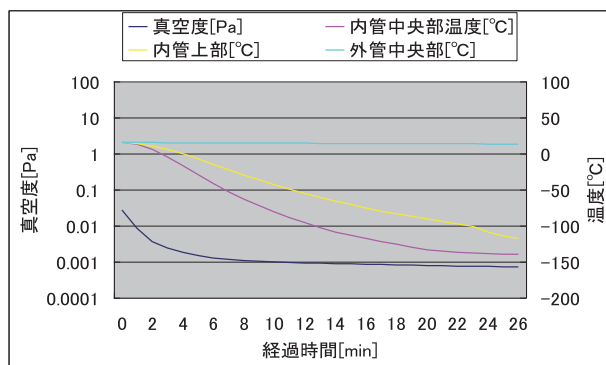
(a) ベーキング温度と到達真空度の関係

(b) ベーキング温度と止め真空度の関係

図 13 吸着剤の予備乾燥による真空特性の影響

## 5.3 $LN_2$ 冷却による金属表面の分子吸着特性

図 14 に  $LN_2$  冷却時の真空特性の代表例を示す。内管に  $LN_2$  を充填すると、真空度が急激に良くなっていることが分かる。これは、 $LN_2$  冷却時に断熱層の真空中の分子が内管の表面に吸着されなくなったためであると考えられる。表 1 に  $LN_2$  による冷却時の分子吸着量を示す。冷却前と冷却後では真空度はともに 1 桁以上良くなっていることが分かる。また、吸着分子量は SI 及びロッドスペーサの有無による大きな差はなかった。

図 14  $LN_2$ 冷却時の真空特性の代表例表 1  $LN_2$ 冷却時の分子吸着量

	冷却前		冷却後		吸着分子の 個数[個]	吸収モル数 [mol]
	温度[K]	真空度[Pa]	温度[K]	真空度[Pa]		
SI なし	288.5	$2.78 \times 10^{-2}$	125.8	$5.67 \times 10^{-4}$	$4.76 \times 10^{16}$	$7.90 \times 10^{-8}$
SI 6 層	286.7	$6.05 \times 10^{-3}$	90.0	$1.35 \times 10^{-4}$	$1.02 \times 10^{16}$	$1.69 \times 10^{-8}$
SI 12 層	129.7	$3.04 \times 10^{-2}$	91.4	$3.55 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{17}$	$1.68 \times 10^{-7}$
SI 12 層+ロッドスペーサ	290.7	$2.53 \times 10^{-1}$	166.9	$3.67 \times 10^{-4}$	$4.50 \times 10^{17}$	$7.47 \times 10^{-7}$

#### 5.4 金属表面の限界分子吸着量

バリアブルバルブを使用して、金属表面の分子吸着が限界に近づき、真空度がほぼ飽和するまで繰り返して微量の空気を断熱層に注入返した。そのときの真空度の経時変化を図 15 に示す。これより計算で求めた限界吸着分子量を表 2 に示す。SI 及びロッドスペーサの有無による差はほとんどなかった。

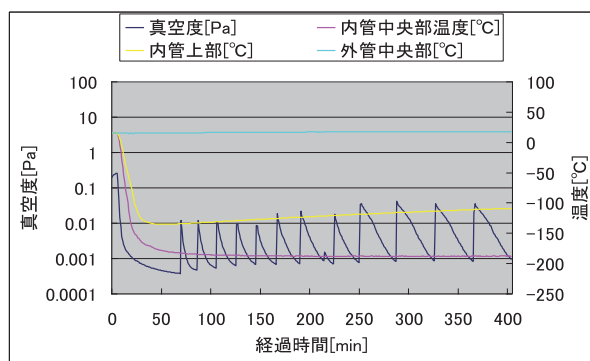


図 15 限界吸着分子量測定時の真空度の経時変化

表 2 限界吸着分子量

SI の種類	吸収モル個数[mol]
SI なし	$4.08 \times 10^{-6}$
SI 6 層	$1.50 \times 10^{-6}$
SI 12 層+ロッドスペーサ	$3.24 \times 10^{-6}$

### 5.5 SI 層数とロッドスペーサの有無と侵入熱量の関係

真空度と侵入熱量の関係を図 16 に示す。同図 (a)、(b) より真空度が約 1 [Pa] より悪くなると侵入熱量が急激に増加することが分かる。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 なしに比べて SI ありの方が侵入熱量は少ないが、ロッドスペーサの有無については大きな差はないと言える。

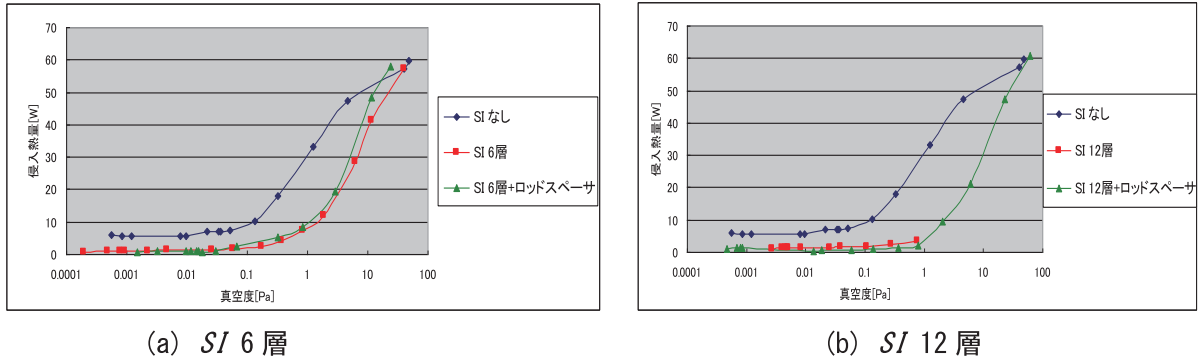


図 16 真空度と侵入熱量の関係

## 6. 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いて、ロッドスペーサの有無による断熱性能の有意差はほとんどなく、そのときベーキング温度、水分吸着剤および SI 巻き層数の真空特性に及ぼす効果があることが分かった。

## 参考文献

- (1) 荒木, 津波, 谷口, 林, 栗塚, 渡部, 増田: “高温超電導ケーブルの真空断熱特性に関する研究”, 福井工業大学研究紀要, 第 37 号, pp. 33-40 (2007)
- (2) 池邑, 荒木, 本井, 渡部, 増田: “高温超電導ケーブルの真空断熱特性に関する研究(その2)”, 福井工業大学研究紀要, 第 39 号, pp. 31-38 (2009)
- (3) 荒木, 齊藤, 山下, 小松原, 増田, 湯村, 瀬戸口, 斎藤, 西村: “高温超電導ケーブルの真空断熱特性に関する研究(その3)”, 福井工業大学研究紀要, 第 41 号, pp. 17-24 (2011)
- (4) 晝谷, 増田, 広田, 中西, 湯村, 渡部, 芦辺, 斎藤, 大屋, 本庄, 三村, 原: “高温超電導ケーブル実証プロジェクト—実証試験向け超電導ケーブル製造—”, 平成 23 年電気学会エネルギー部門大会, 316, (2011)
- (5) 辻泰: “吸着と脱離”, 共立出版, pp43 (1985)
- (6) 荒木, 栗塚, 谷口, 津波, 林, 渡部, 増田: “高温超電導ケーブルの真空度と熱侵入量の関係”, 平成 19 年電気学会全国大会, 5-010 (2007)
- (7) 池邑, 荒木, 渡部, 増田: “高温超電導ケーブルの真空に及ぼす液体窒素冷却の影響”, 平成 20 年度電気関係学会北陸支部連合大会, A-54 (2008)
- (8) 山下, 荒木, 小松原, 齊藤, 増田, 湯村, 瀬戸口, 斎藤, 西村: “高温超電導ケーブル断熱管の真空度と熱侵入量との関係(その2)”, 平成 22 年度電気関係学会北陸支部連合大会, A-45 (2010)

(平成 24 年 3 月 31 日受理)