

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）

池 邑 繁 樹*・荒 木 智 勇**

本 井 見 二***・渡 部 充 彦***・増 田 孝 人***

Vacuum-Adiabatic Characteristic of High Temperature Super-Conducting Cable (Part 2)

Shigeki Ikemura*, Tomoo Araki**

Kenji Motoi***, 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 transfered 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. We experimented at various vacuum condition and studied heat transfer characteristic of the cryostat in following the article part 1.⁽¹⁾

1. 序論

液体窒素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がある。温度 77[K]の液体窒素(以下LN₂)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量が増え、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、前回に引き続いて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。

2. 高温超電導ケーブル

超電導ケーブルサンプルの外観を図1に、断面構造を図2に示す。

* 電気工学専攻院生 ** 電気電子工学科 *** 住友電気工業株式会社

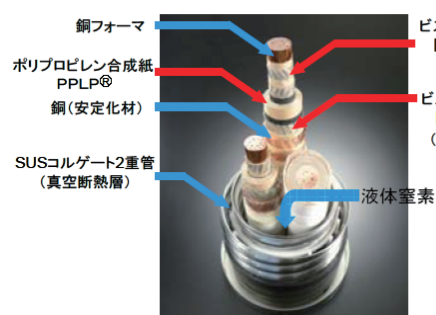


図1 高温超電導ケーブルサンプル

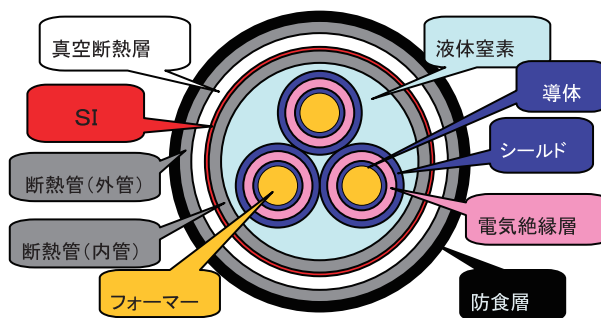


図2 高温超電導ケーブル断面構造図

高温超電導ケーブルは、従来の超電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、既設のケーブル管路を利用でき、地中送電線建設時に土木建設の期間と費用を大幅に削減できる。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。

2006年5月、住友電工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市の実用送電線路として納入、完成した⁽²⁾。

一方、国内では我が国初の高温超電導ケーブル実線路計画が東京電力と住友電工で共同して進められている。

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) SI(スーパーインシュレーション)巻き付け張力及びその層数と侵入熱量の関係
- (2) SI巻き付け時の真空特性に及ぼす影響
- (3) 吸着剤の種類とベーキングによる真空特性への影響
- (4) 吸着剤の種類とその量による真空特性への影響

4. 実験方法

4.1 実験系統図

実験系統図を図3に示す。真空引きは断熱管真空槽と真空ポンプを真空バルブを介しステンレスフレキシブルホースで接続する。冷却の際は LN_2 ボンベから LN_2 を内管内部に送り、貯液を行う。蒸発した窒素ガスはパイプを通じて大気に放出される(図3(a)参照)。ベーキングを行う際は、ベルトヒーターを断熱管の表面に巻き付け、その上に断熱材としてガラステープを巻きつけた。ベルトヒーターを通电加熱し、スライダックによりヒータ量を調節した(図3(b)参照)。

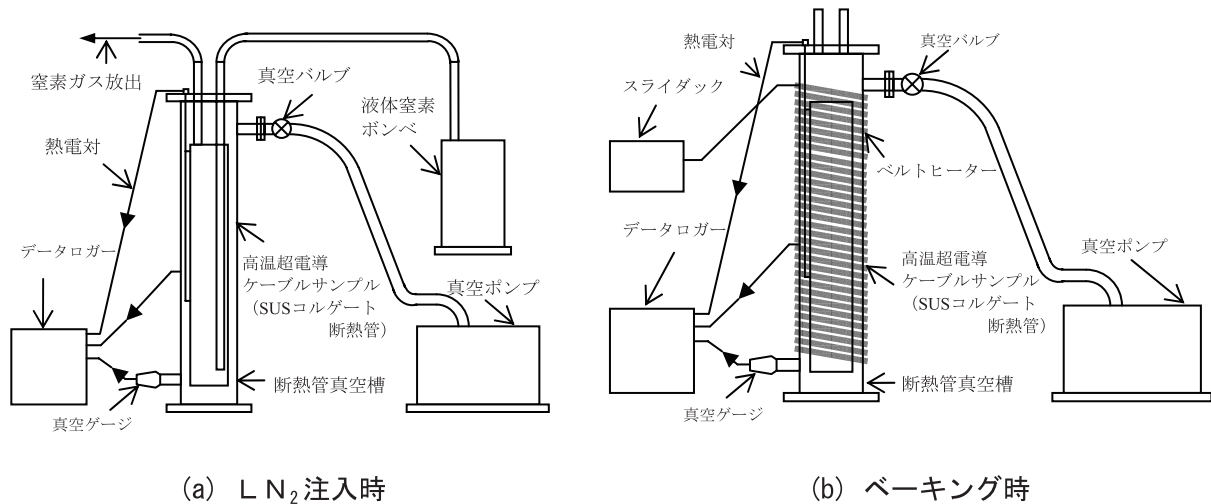


図3 実験系統図

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。流量はデジタル式及びフロート式流量計で測定した。

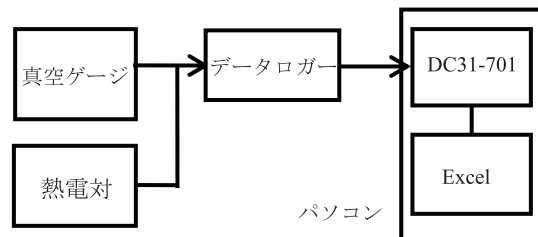


図4の測定系統図に示すように、真空ゲージと熱電対からの出力電圧をデータロガーで読み取り、パソコン内のDC31-701というソフトで数値化しExcelグラフを自動表示した。

図4 測定系統図

4.3 SI 巻き付け

真空引きを行う前に放射伝熱量を遮るためSIを断熱管の内管に巻き付けた(図5参照)。

真空度と侵入熱量の測定時にはSIの層数の影響を調べるため、SIの巻き数を6層、12層、18層とした。次にSIの層密度の影響を調べるため、SIの巻き張力を変化させた。以下より張力大を「きつく」、張力小を「ゆるく」と表記する。

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3層とした。



図5 SI 巻き付け状況

4.4 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、 $L N_2$ を断熱管の内管内に充填した。

断熱管内の真空度が十分に良くなり、ある程度飽和した時点でバリアブルリークバルブ(図 6)を使い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、図 7 及び(1)式に示すように真空中の分子が物理吸着により金属表面に吸着されるため、ある時間経過すると空気注入前の真空度に近づく⁽³⁾⁽⁴⁾。(1)式から、金属表面の温度 T が下がると、平均滞留時間 τ が大きくなり、これにより真空度は良くなる。

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

ここで

τ : 表面での粒子の平均滞留時間 [s]

τ_0 : 定数

E : 脱離の活性化エネルギー [kJ/mol]

T : 金属表面の温度 [K]

R : 気体定数

まず、バリアブルリークバルブで微量の空気を入れ、そのときの真空度と LN_2 蒸発量を調べ、真空度が大気圧付近になるまで繰返した。そして、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⁽⁵⁾。

図 8 は微量空気を断続的に注入しているときの温度と真空度の変化を示している。

4.5 ベーキング

真空引きとベーキングを同時に約 4 時間行い、図 8 侵入熱量測定時の真空度の変化その後約 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。ベーキング温度は図 3(b)に示したようにスライダックによりベルトヒーターに流す電流を調節し、ベーキング温度を変化させた。

4.6 吸着剤取り付け

吸着剤として、吸着剤 A、吸着剤 B の 2 種類を使用し、質量を電磁式はかりで量り、ポリエステルの袋に吸着剤を入れ、封入量はそれぞれ 1, 3, 5g とした。真空引きを行う前に、図 9 に示すとおり断熱管の内管の中央部に取り付けた。SI を巻く場合には SI の外表面に吸着剤を取り付けた。



図 6 バリアブルリークバルブ

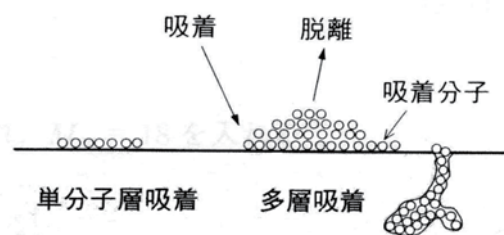


図 7 金属表面の分子の吸着と脱離

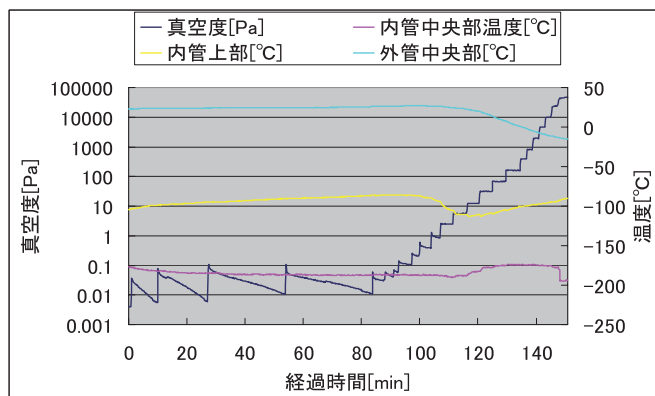


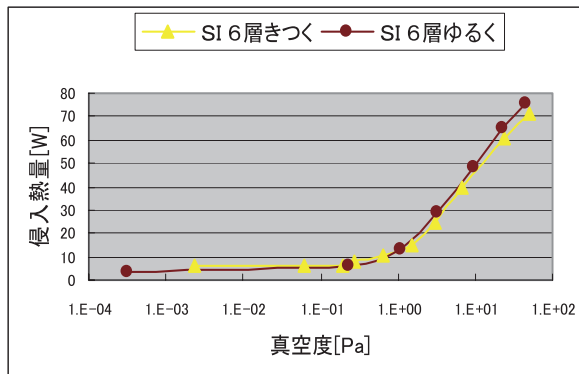
図 9 吸着剤の取り付け

5. 実験結果

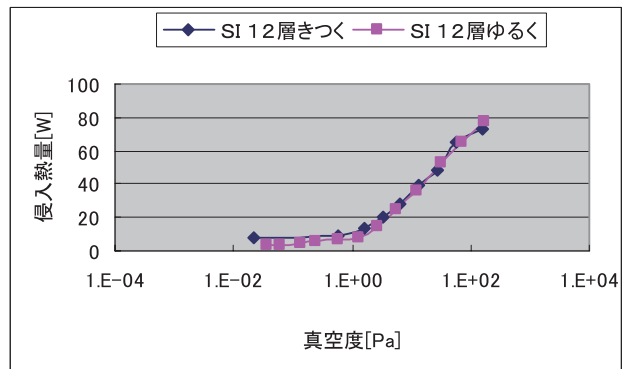
5.1 SI 巻き付け張力及びその層数と侵入熱量の関係

真空度と侵入熱量の関係を図 10 に示す。同図より真空度が約 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、図 10 に示すように巻き張力の違いによる侵入熱量の差異は真空度が約 1[Pa] より悪い場合はほとんど差がないが、一方、図 11 に示すように 1[Pa] より真空度が良い場合は、巻き張力がゆるい場合はきつい場合に比べて侵入熱量が小さいことが分かる。これは、巻き張力がゆるいと SI 間の固体熱伝導が小さくなるためである。

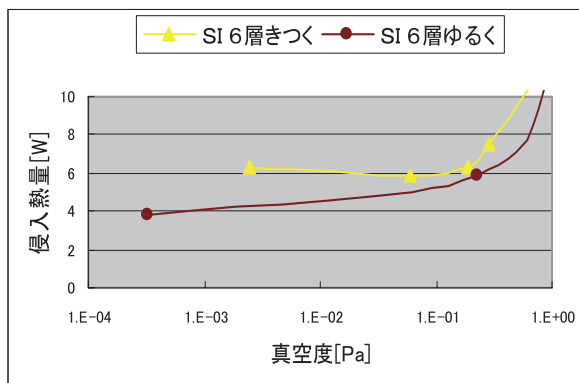


(a) SI 6 層

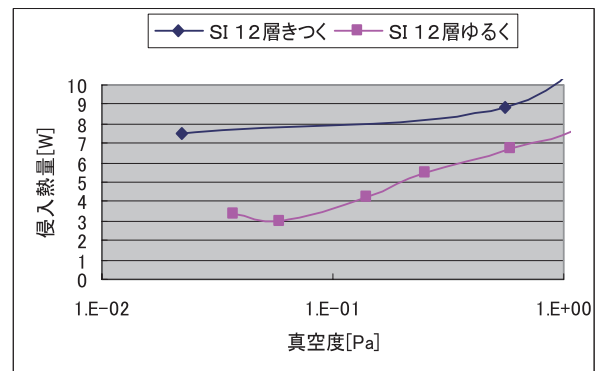


(b) SI 12 層

図 10 真空度と侵入熱量の関係(SI 巻き張力の違い)



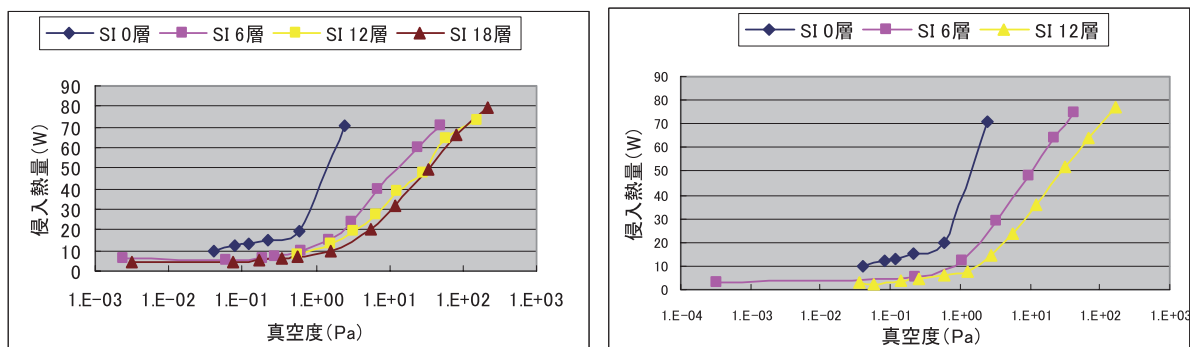
(a) SI 6 層



(b) SI 12 層

図 11 真空度と侵入熱量の関係(真空度が 1[Pa] より良い範囲)

巻き付け層数と侵入熱量の関係を図 12 に示す。同図より SI の層数を増やすほど侵入熱量は小さくなる事が分かる。これは、SI の層数が増えることにより、SI の放射伝熱に対する断熱効果がより高まると考えられる。巻き付け張力の大小に関わらずこの傾向にある。



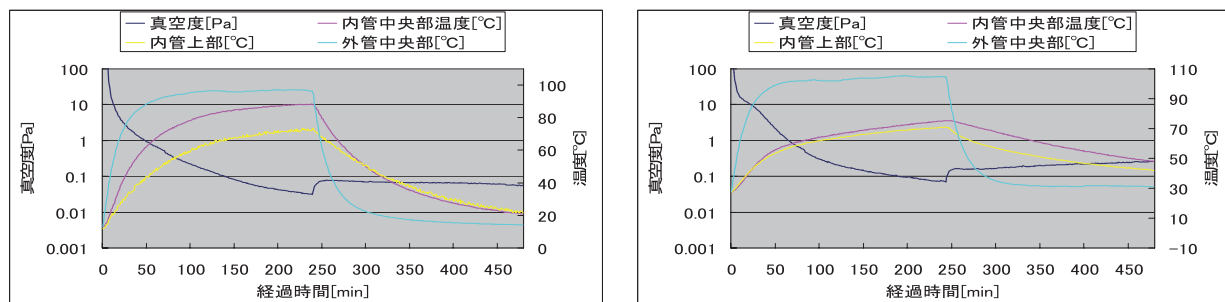
(a) きつく

(b) ゆるく

図 12 巻き付け層数と侵入熱量の関係

5.2 SI 巻き付け時のベーキングの真空特性に及ぼす影響

真空引きとベーキングを同時に 4 時間行い、その後ベーキングを止め、4 時間の止め試験を行った。SI 有り無しの際の各部温度と真空度の変化を図 13 に示す。同図より SI 有りの方が無しに比べて到達真空度及び止め真空度値も良くない。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として求めた。



(a) SI 無し ベーキング (77℃)

(b) SI 有り (3 層) ベーキング (80℃)

図 13 SI 有無及びベーキングによる真空度への影響

SI の有無とベーキング温度の止め真空度との関係を図 14 に示す。

同図よりベーキング温度を高くすると止め真空度は良くなるものの、SI を巻き付けることで SI 無しに比べ止め真空度が悪くなっていることが分かる。また、SI 有りの場合は無しに比べてベーキングによる真空度の向上の割合が大きい。これはベーキングを行うことにより、SI の水分を除去できるが、完全には除去できないため、その分の水分が止め真空度を悪くしていると考えられる。

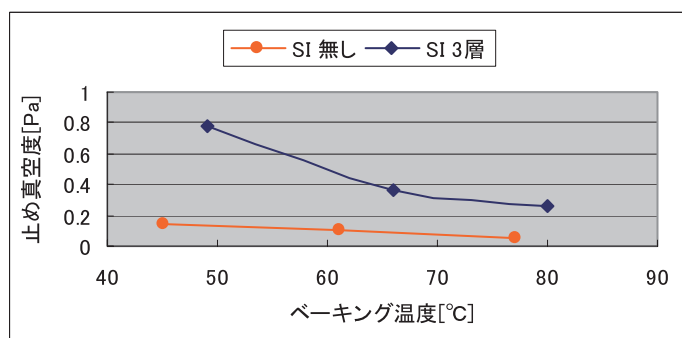


図 14 SI の有無とベーキング温度の関係(吸着剤無し)

5.3 吸着剤の種類（A，B）とベーキングによる真空特性への影響

ベーキング温度と各種吸着剤(A，B)に対する各部温度と真空度の変化例を図15に示す。なお、SIは3層である。

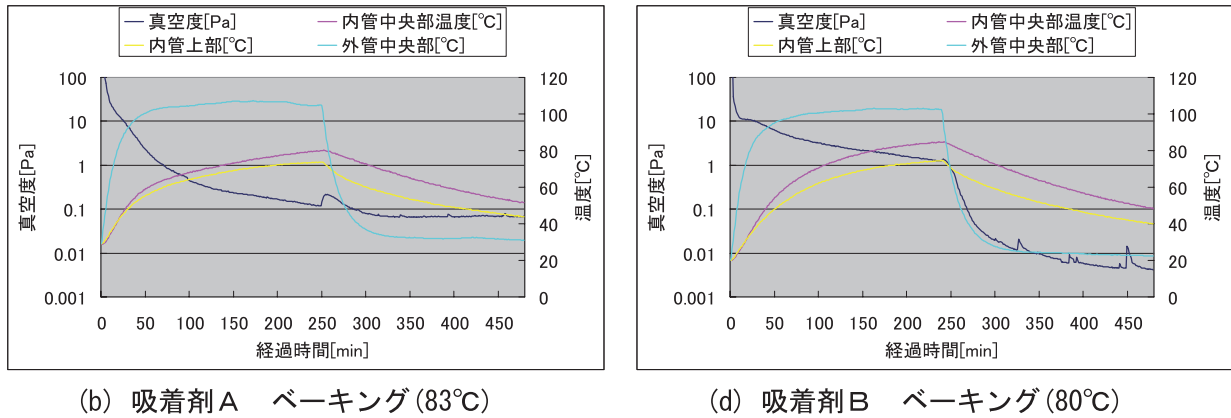


図15 各種吸着剤のベーキング温度による真空度への効果(SI 3層)

ベーキングによる各種吸着剤と真空度の関係を図16に示す。

同図より明らかなように、吸着剤の封入によって止め真空度が良くなり、また吸着剤Aよりも吸着剤Bの場合が、より真空度が良いことが分かる。また、ベーキング温度を高くすることによって、吸着剤を封入した場合も吸着剤を封入しない場合と同様、真空度は良くなっている。

これらのことは吸着剤が断熱管内の水分を吸着していると考えられ、吸着剤とベーキングを組み合わせることによって、真空度が更に向上すると考えられる。

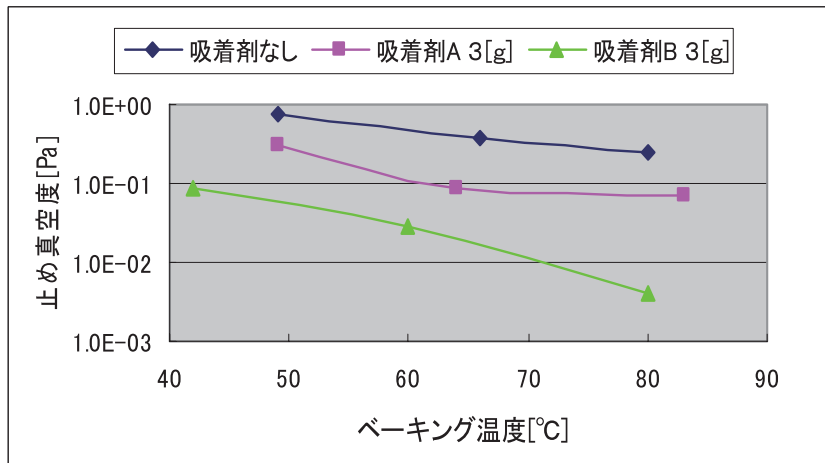
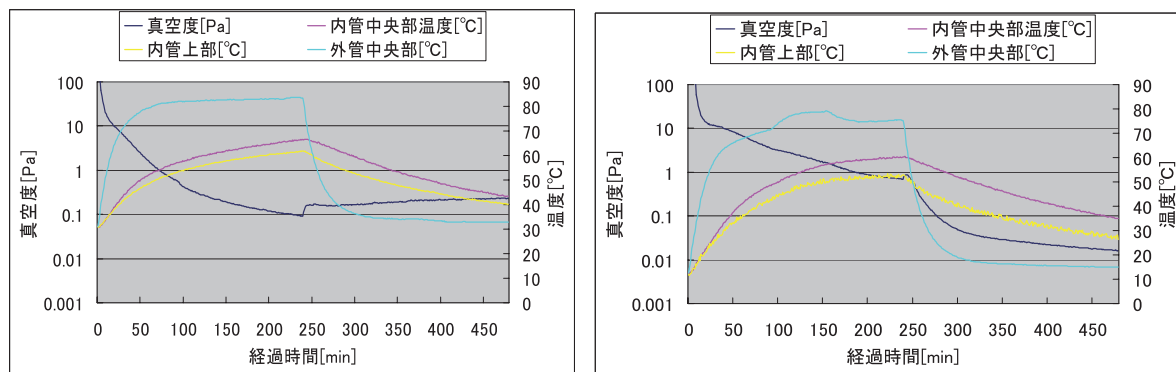


図16 各種吸着剤についてのベーキングと止め真空の関係(SI 3層)

5.4 吸着剤の種類（A，B）とその量による真空特性への影響

ベーキング温度を一定とした場合の各種吸着剤とその量に対する各部温度と真空度の変化を図17に示す。なお、SIは3層巻きである。



(a) 吸着剤 A (1 g)

(b) 吸着剤 B (1 g)

図 17 各種吸着剤の量と真空度への影響

図 18 に各種吸着剤量と真空度の関係を示す。同図より明らかなように、吸着剤 A は量を増やすことにより真空度が良くなり、吸着剤 B は 1 g と少量でも急激に止め真空度は良くなるがそれ以上増やしてもあまり変化しないことが分かる。また、吸着剤 B は吸着剤 A より、真空度が良いことが分かる。吸着剤 B が吸着剤 A よりも吸着能力が高いと考えられる。

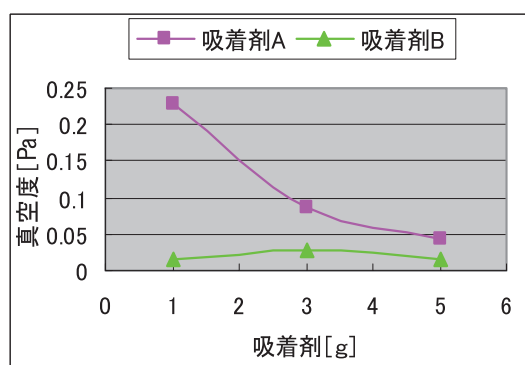


図 18 各種吸着剤量と真空度の関係

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、SI の巻き付け張力及び層数、並びにベーキング及び吸着剤の真空特性に及ぼす影響、効果が明らかとなった。

参考文献

- (1) 荒木他：“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 (2007)
- (2) 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)
- (3) 辻泰：“吸着と脱離”， p43, 共立出版 (1985)
- (4) 池邑・荒木他：“ 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)
- (5) 荒木他：“ 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， No.5-010 (2007)

(平成 21 年 3 月 31 日受理)