

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）

荒木 智 勇*・齊藤 拓 海**・山下 淳 史**・小松原 裕 太**
増田 孝 人***・湯村 洋 康***・瀬戸口 忠***・斎藤 高 廣***・西村 崇***

Vacuum-Adiabatic Characteristic of High Temperature Super-Conducting Cable (Part 3)

Tomoo Araki, Takumi Saito, Atsushi Yamashita, Yuhta Komatubara
Takato Masuda, Hiroyasu Yumura, Tadashi Setoguchi, Takahiro Saito
and Takashi Nishimura

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. 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. We experimented with various Super Insulation (*SI*) which interrupt radiant heat and studied heat transfer characteristic of the cryostat in following the article part 1⁽¹⁾ and part 2⁽²⁾.

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放射伝熱を遮断する種々のスーパーインシュレーション(以下 *SI*) を巻き付け、その真空断熱特性について実験を行った。その研究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生 *** 住友電気工業株式会社

2. 高温超電導ケーブル

表 1 に低温超電導体と高温超電導体の代表例を示す。高温超電導体は冷媒に液体ヘリウム代わりに容易に入手可能で安価な液体窒素(以下 LN_2)を使用することができるので低温超電導体よりも有利である。

表 1 低温超電導体と高温超電導体の比較

	低温超電導体	高温超電導体
代表物質	Nb-Ti ニオブ-チタン (金属合金)	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ ビスマス系酸化物
臨界温度	10K(−263℃)	110K(−163℃)
使用冷媒 (沸点)	液体ヘリウム (4K=−269℃)	液体窒素 (77K=−196℃)
冷媒の単価	約 2000 円/ℓ	約 200 円/ℓ

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。

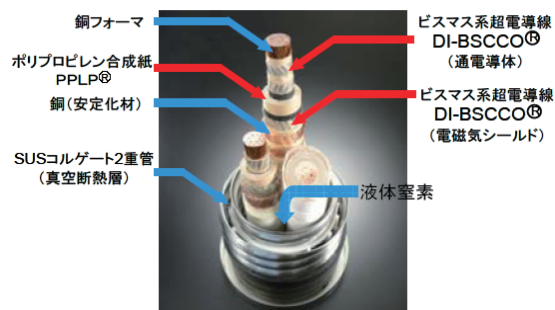


図 1 高温超電導ケーブルサンプル

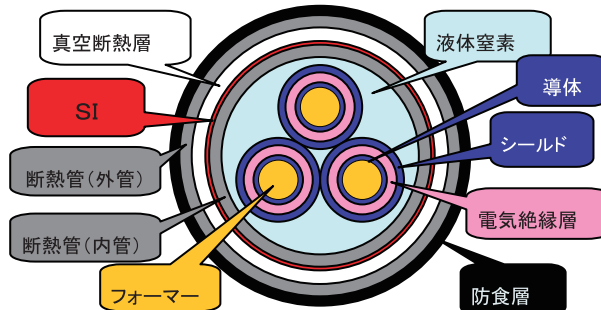


図 2 高温超電導ケーブル断面構造図

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し、順調に運転されている⁽³⁾。

また、国内では 2011 年に我が国初の高温超電導ケーブル実線路が東京電力にて建設中である。

一方、現在、図 3 に示すようなスマートグリッドが検討されているが、その中の太陽光発電の電力の引出し用として直流超電導ケーブルの適用が考えられている⁽⁴⁾。

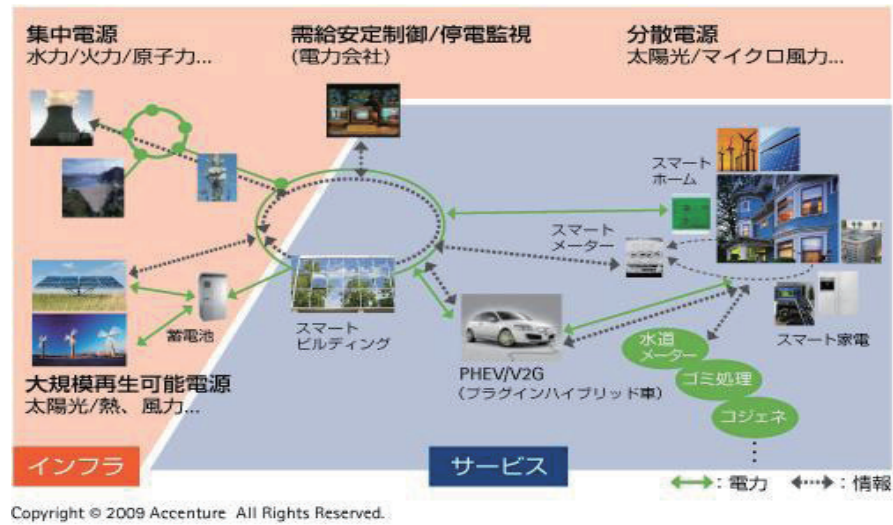


図3 スマートグリッドの概念図

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) 各種 SI についてのベーキング特性
- (2) 各種 SI についての真空断熱特性
- (3) 各種 SI についての LN_2 冷却時の真空特性

4. 実験方法

4.1 実験系統

実験系統図を図4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繋ぎ行う。ベーキングを行う際は、スライダックの電圧調整により外管表面に巻き付けたベルトヒーターに流す電流を変化させ断熱管の温度を決定する（図4(a)参照）。 LN_2 で冷却を行う際は、液体窒素ポンプと内管をステンレス管で繋ぎ、内管内部に LN_2 を注入する（図4(b)参照）。

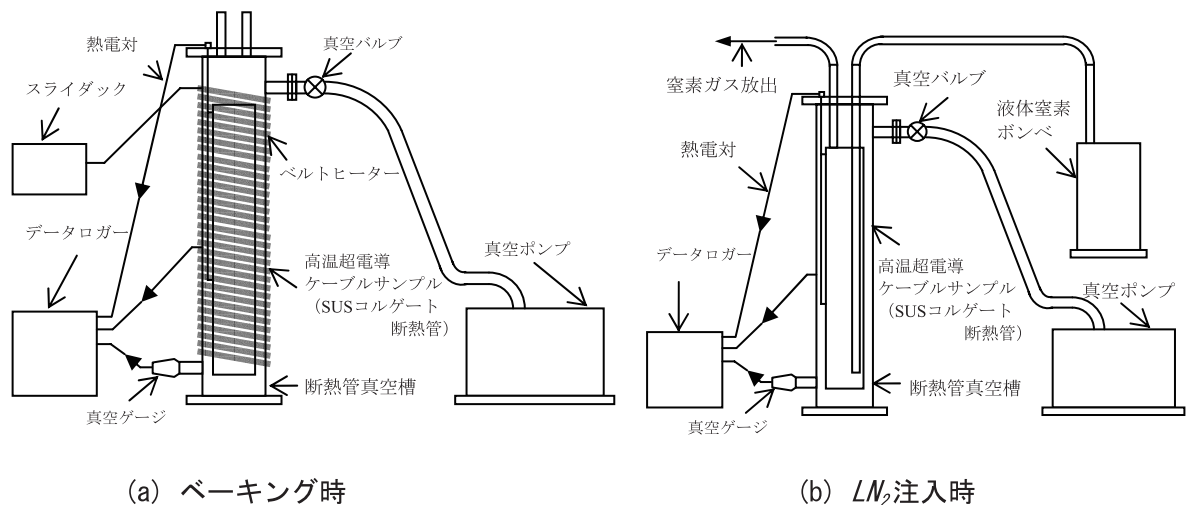


図4 実験系統図

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。流量はデジタル式流量計で測定した。

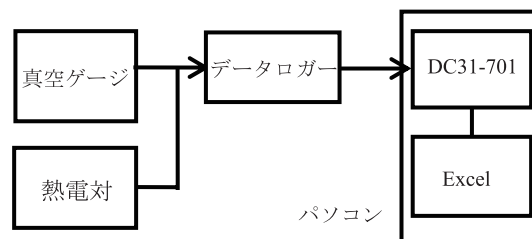


図5 測定系統図

図5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 SIの種類と層数

真空引きを行う前に放射伝熱量を遮るため表2に示す3種類のSIをそれぞれ断熱管の内管に巻き付けた。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3、12層とした。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1層、3層、6層とした。

表2 SIの種類

型式番号	KF-6B	KC-25S	KC-12BE
構造	両面アルミニウム蒸着 ポリエステルフィルム +ネットスペーサ	片面アルミ蒸着 ポリイミドフィルム	エンボス加工 両面アルミ蒸着 ポリイミドフィルム

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、 LN_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6参照)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、金属の分子吸着により真空度は元の値まで良くなる^{(4), (5)}。



図6 バリアブルリークバルブ

金属表面の分子吸着現象が弱まった段階でバリアブルリークバルブで更に微量の空気を入れ、そのときの真空度と LN_2 蒸発量を調べた。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^{(2), (6), (7)}。

図7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を示している。

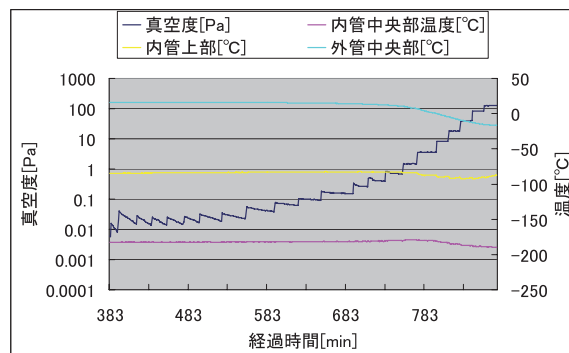


図7 侵入熱量測定時の真空度の変化

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、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4(a)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。図8に断熱管サンプルを示す。



(a) ベルトヒーター



(b) 保温材

図8 断熱管サンプル

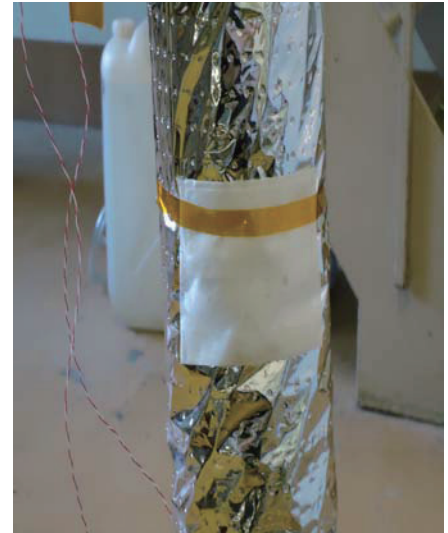


図9 吸着剤取付け状況

4.6 吸着剤取り付け

吸着剤として、モレキュラーシーブを使用し、封入量はそれぞれ0.1, 0.3, 0.6g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。

5. 実験結果

5.1 LN_2 冷却による真空特性

図10に LN_2 冷却時の真空特性を示す。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少なくなったためであると考えられる。

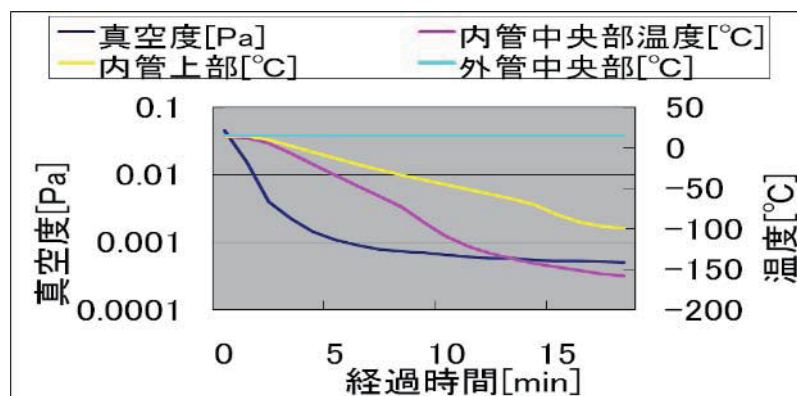


図10 LN_2 冷却時の真空特性

5.2 LN_2 冷却時の吸着特性

表3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2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なしに比べてSIを使用したときの方が吸着量は多かった。

表3 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	288.8	1.02×10^{-2}	157.2	5.31×10^{-4}	1.49×10^{21}	2.47×10^{-3}
SI (KC-12BE)	285.9	3.72×10^{-1}	130.1	5.65×10^{-4}	5.50×10^{22}	9.13×10^{-2}

5.3 金属表面の限界分子吸着量

図11に真空度の経時変化を示す。これを用いて計算した限界吸着分子量を表4に示す。SIなしに比べてSIを使用した時の方が限界吸着分子量は多い。これは、断熱管内管に加えてアルミ蒸着されたSIの表面にも分子が吸着したためであると考えられる。

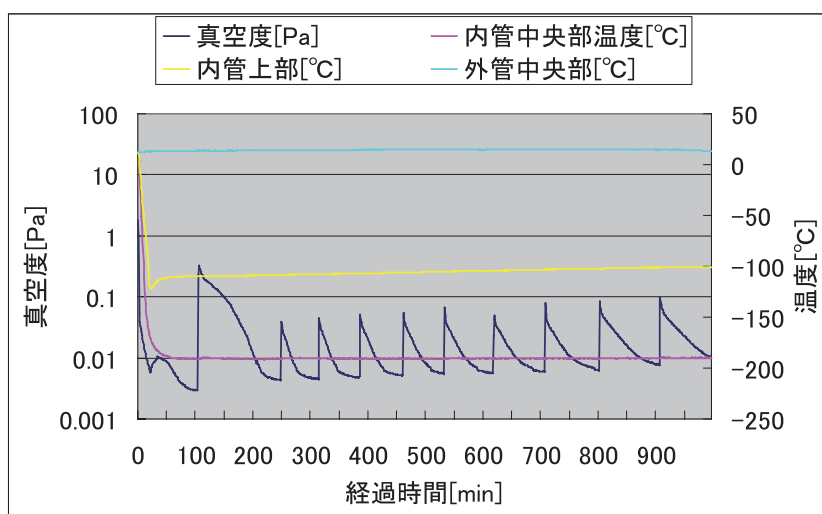


図11 限界吸着分子量測定時の真空度の経時変化の代表例

表4 限界吸着分子量

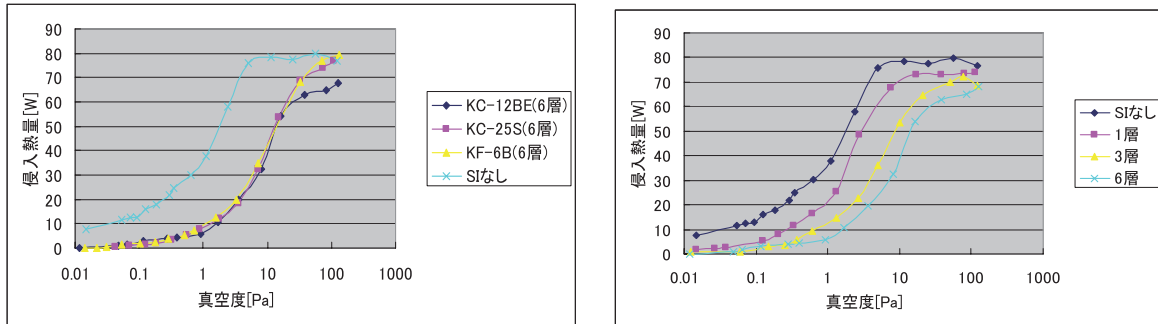
SI の種類	吸収モル数[mol]
SI なし	6.22×10^{-2}
SI (KC-12BE)	1.2×10^{-1}

5.4 各種 SI/ 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12に示す。同図(a)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* の種類を変えても侵入熱量にほとんど差がないことが分かる。これは、各 *SI* とともに放射率が 0.04 で相違がないためであると考えられる。

巻き付け層数と侵入熱量の関係を同図 (b) 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ことが分かる。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。



(a) 各種 *SI* / 6 層

(b) *SI* / (KC-12BE)

図 12 真空度と侵入熱量の関係

5.5 *SI* 巻き付け時のベーキングの真空特性に及ぼす影響

図 13 にベーキング及び真空引きのパターンを示す。同図に示すとおり真空引きとベーキングを同時に 4 時間行い、その後ベーキングと真空引きを止め、4 時間の止め試験を行った。図 14 にベーキングによる真空度の変化の代表例を示す。

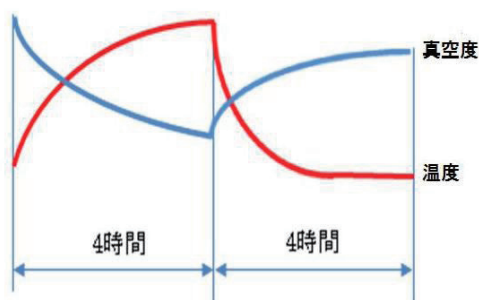


図 13 ベーキング及び真空引きのパターン

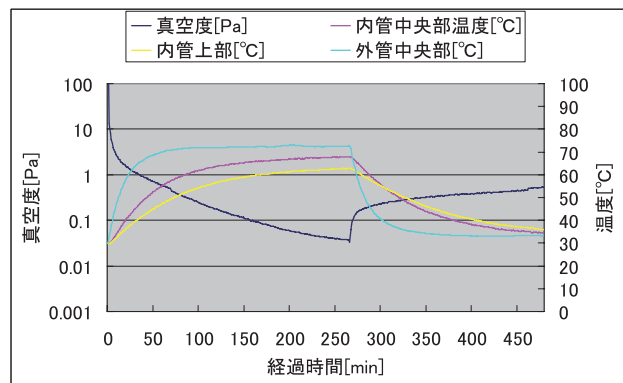


図 14 ベーキングによる真空度の変化の代表例

図 15 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。

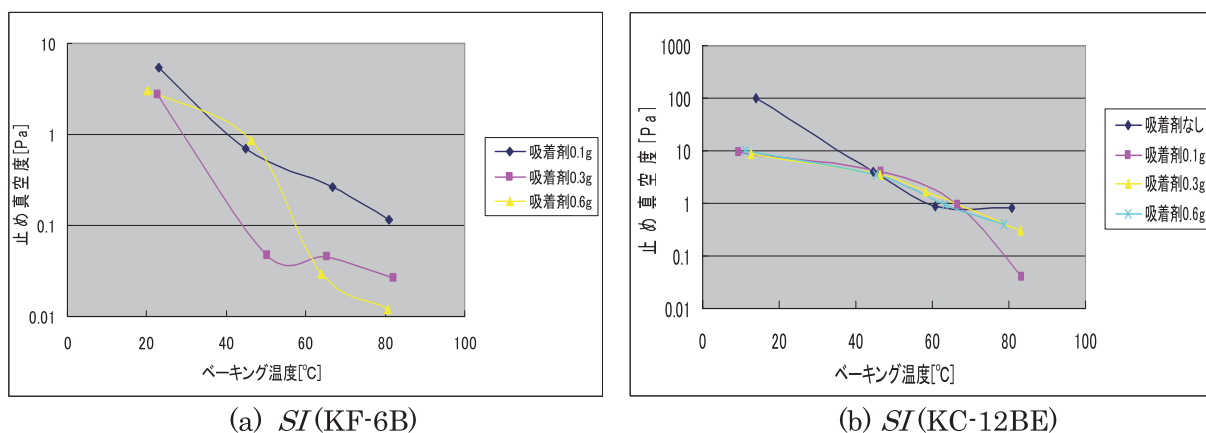


図 15 ベーキング温度と止め真空度の関係

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の種類による断熱性能の有意差はほとんどなく、その巻き層数、ベーキング及び吸着剤の真空特性に及ぼす効果があることが明らかとなった。

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) 湯村, 増田, 渡部, 滝川, 芦辺, 伊藤, 廣瀬, 八束, 佐藤, 畑: “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, pp. 40-48 (2007)
- (4) 石橋, 井元, 木村, 清水, 畑野, 山崎, 山崎: “スマートグリッド革命の衝撃”, 洋泉社, pp. 74-79 (2010)
- (5) 辻泰: “吸着と脱離”, 共立出版, pp.43 (1985)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (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 23 年 3 月 31 日受理)