

# 超電導主変圧器の実用化に向けた 交流損失低減と冷却特性向上

上條 弘貴\* 秦 広\* 池田 和也\*\*  
長嶋 賢\*\* 宮崎 佳樹\*\* 福本 祐介\*\*\*

## Ac Loss Reduction and Cooling Characteristic Improvement for Putting Superconducting Traction Transformer into Practical Use

Hiroki KAMIJO Hiroshi HATA Kazuya IKEDA  
Ken NAGASHIMA Yoshiki MIYAZAKI Yusuke FUKUMOTO

We had designed, fabricated and tested a prototype superconducting traction transformer of a floor-mount type for Shinkansen vehicle by 2004. As a result, we could verify that the transformer satisfied the requirement almost exactly as initially planned. However there have been raised some problems to be solved to put superconducting traction transformer into practical use such that the AC loss of the superconducting tape should be reduced and the capacity of the refrigerator should be larger. In this paper, we present a newly developed narrow type Bi2223 superconducting tape which reduces AC loss to less than 1/2 of that of the transformer fabricated previously in 2004, and a cooling system with 65K, 1kW class pulse tube refrigerator.

キーワード：超電導，主変圧器，交流損失，パルス管冷凍機，冷却システム

### 1. はじめに

鉄道総研では、超電導技術の在来鉄道への応用研究として、鉄道車両用主変圧器の超電導化の可能性について、検討を進めている<sup>1), 2)</sup>。2004年度までに、軽量化のための最適設計、巻線構造や冷却システムの検討などを行い、Bi2223系超電導線を用いた新幹線の架線電圧25kVに対応する超電導主変圧器を試作し、その基本特性の評価などを行った（以下、「2004年度試作器」と言う）<sup>2) - 6)</sup>。しかし、実用化に向けて超電導化のメリットである軽量化や効率向上のためには、交流損失を低減すること、大容量で軽量の冷凍機を含む冷却システムを確立することなどが、課題となっている<sup>4) - 6)</sup>。

本報告では、その課題への取り組みとして、巻線に発生する交流損失の低減対策、実用化に必要な1kW級の容量に対応する小型、軽量の冷却システムの開発について紹介する。

### 2. 交流損失低減

2004年度に試作、試験した超電導主変圧器では、使用したBi系超電導線の特性として、臨界電流値が設計より小さい、交流損失が大きいといった課題があった。

#### 2.1 交流損失低減対策

Bi系超電導線の交流損失を低減するためには、これまで一般的に使用されてきた仕様である幅約4.2mm、厚さ約0.2mmの線材に対して、

- (a) 超電導線の幅を狭くする
- (b) 超電導フィラメントにツイスト（ひねり）を加える
- (c) 各超電導フィラメントを囲うバリア（絶縁、高抵抗）を導入する

などの対策が考えられる。

上記の対策のうち(a)と(b)の効果を確認するため、表1のように超電導線の寸法（幅、厚さ、その比（幅/厚さ：アスペクト比）および構造（ツイストピッチ、フィラメント数）を変えた60種類以上の仕様のBi2223系超電導線サンプルを試作して、評価した<sup>7)</sup>。

試作した各種の超電導線について、77K液体窒素冷却下で、自己磁界中での臨界電流値および巻線で想定される印加磁界0.1T、0.2Tにおける交流損失を測定した。

\* 車両制御技術研究部

\*\* 浮上式鉄道技術研究部（低温システム）

\*\*\* 材料技術研究部（超電導応用）

特集：車両技術

表1 試作サンプルの仕様

項目	値
幅 (mm)	0.9 ~ 4.6
厚さ (mm)	0.13 ~ 0.9
アスペクト比	2 ~ 20
フィラメント数 (本)	19, 37, 55
ツイストピッチ (mm)	2 ~ 17, ∞

臨界電流値は、超電導線の幅に比例して増加する傾向が見られ、幅が2mm以上のサンプルで10kA/cm<sup>2</sup>を確保できるが、幅1mm程度では臨界電流密度の低下が大きいこと、超電導線の厚さに反比例する傾向が見られ、厚さ0.3mm以下のサンプルでは10kA/cm<sup>2</sup>を確保できるが、それより厚くなると臨界電流密度の低下が大きかった。そこで、超電導線のアスペクト比と臨界電流密度の関係を整理すると図1のようになり、臨界電流密度はアスペクト比に比例する傾向が見られ、アスペクト比14以上のサンプルで10kA/cm<sup>2</sup>を確保できた。一方、アスペクト比の小さいサンプルでは、臨界電流密度の低下が大きいことが分かった。なお、今回の試作では各サンプルとも1本ずつ製作しているため、製作工程の最適化が充分ではなく、今後さらなる向上の可能性がある。

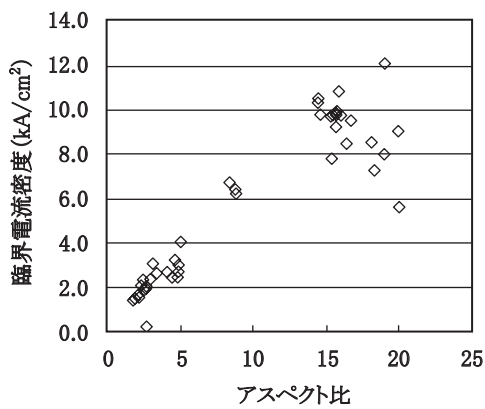
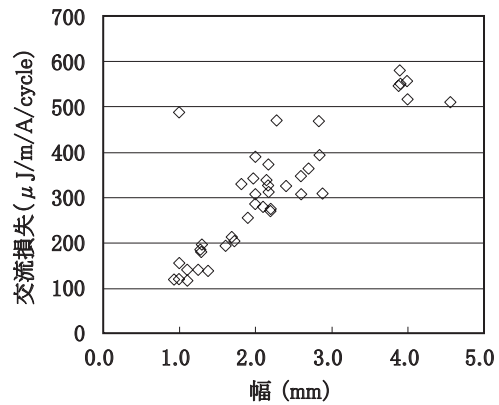
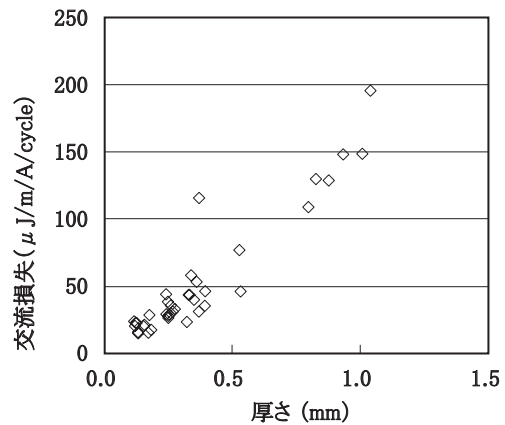


図1 臨界電流

図2に、印加磁界0.2Tにおける超電導線の幅と垂直磁界に対する交流損失および厚さと平行磁界に対する交流損失の測定結果を示す。交流損失は、垂直磁界に対して、幅にほぼ比例して減少して、幅を狭くした方が交流損失を減らすことができること、平行磁界に対しては、厚さにほぼ比例して減少し、厚さを薄くした方が交流損失を小さくできることが分かった。また、超電導線の幅を狭くして、厚さを薄くすることにより、短いピッチのツイストをきれいに施すことが可能となり、今回の試作では最短2mm程度のピッチでツイストを加えても、臨界電流密度の低下は少なく、ツイストの効果により、平行磁界に対する交流損失の低減効果が見られた。



(a) 幅と垂直磁界に対する交流損失



(b) 厚さと平行磁界に対する交流損失

図2 交流損失

2.2 低交流損失型超電導線

2.1の試作、評価の結果から、交流損失低減に関して一定の低減効果が見られ、高臨界電流密度を確保できて、機械的な特性低下が小さく巻線などへの影響が少ない実用的な表2のような仕様の低交流損失型Bi系超電導線を製作した（以下、「低交流損失型」という）。

図3に、開発した低交流損失型超電導線の66Kにおける、垂直および平行磁界に対する交流損失特性を示す。2004年度試作器に使用した超電導線の交流損失は、図3の破線に示す特性であり、幅を狭く、厚さを薄くして、超電導フィラメントに8mmピッチのツイストを加えたことで、交流損失は低減できた。

一方、低交流損失型超電導線では、幅が従来の4.2mm

表2 幅狭低交流損失型超電導線材の仕様（標準値）

	従来型 (2004年度)	低交流 損失型
幅 (mm)	4.2	2.3 - 2.6
厚さ (mm)	0.25	0.18
フィラメント数 (本)	61	19, 37
ツイストピッチ (mm)	—	8
臨界電流 (A) 77K, 自己磁界	120	47 - 48

から2.5mm程度、厚さが0.25mmから0.18mmと細く、薄くなって断面積が1/3程度まで減少したため、1本あたりの臨界電流が低下する。

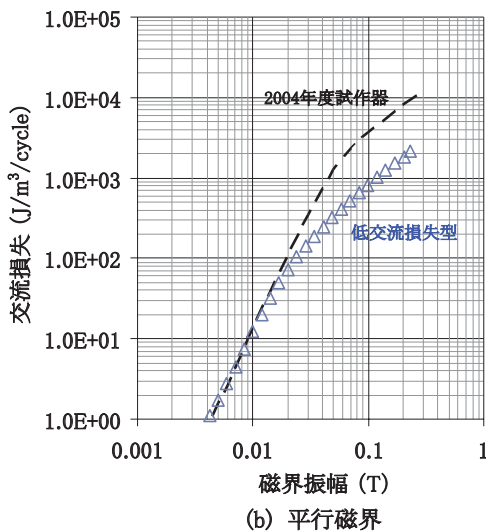
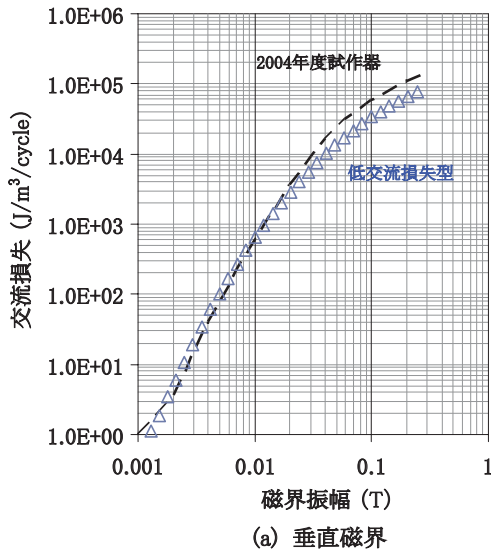


図3 交流損失特性 (66K)

2.3 低交流損失型超電導線を用いた巻線

2004年度試作器の定格容量，電圧，電流，ターン数，

寸法などの仕様を維持しつつ，各巻線に交流損失低減策を盛り込んだ幅の狭い低交流損失型超電導線を適用しようとした場合，幅狭化，ツイストの導入により臨界電流が低下してしまうため，通電容量を確保するためには導体を多並列化する必要がある。特に，二次巻線では24本もの素線で導体を構成しなければならず，従来の通り素線を必要枚数重ねる構造では巻線作業が困難となる，電流分流の均一化のため転位（重ねられた超電導線の上下位置を入れかえること）回数が増加するなどの問題が発生し，従来の巻線構造，方法が適用できない。そこで，巻線ごとに巻線構成，転位方法などの検討を実施し，従来の寸法に収まり所定の仕様が確保できると想定される表3のような導体構成，並列数の巻線を，それぞれ1台ずつ計4台製作した<sup>8)</sup>。

製作した巻線について，巻線構造や巻線時の劣化などの影響を確認するため，電流－電圧特性を測定し，臨界電流値を求めた。表4に，各巻線の臨界電流について，電流－電圧特性の測定結果をもとにした測定値と，超電導線の磁界－電流密度特性から算出した計算値を示す。各巻線とも，測定値と計算値はほぼ一致しており，巻線構成に問題はなく，巻線時の特性劣化などの影響がないことを確認した。

表4 巻線の導体構成，臨界電流

	臨界電流 (77K)	
	測定値 (A)	計算値 (A)
一次巻線	54	48
二次内側巻線	502	504
二次外側巻線	509	504
三次巻線	542	480

3. 冷却システムの開発

2004年度試作器では，市販の小型冷凍機に剣山方式の熱交換を取り付けた冷却システムを搭載したが，冷凍機の容量が小さく，冷媒である液体窒素を定格運転温度まで冷凍システムだけで下げることができないなどの課題

表3 巻線の仕様

	一次巻線	二次巻線		三次巻線
		内側	外側	
電圧	25kV	1.2kV	1.2kV	440V
電流	80A/1 コイル	750A	750A	454.5A/1 コイル
巻数	200回×10層=2,000回 (125回×16層=2,000回)	96回×1層=96回	96回×1層=96回	35回×1層=35回
並列数	3重 (1枚)	12重×2並列 (8重)	12重×2並列 (8重)	4重×2並列×2条 (3重×2並列)
転位	層内，内外1枚転位 (転位無し)	内外1枚転位 (全転位，内外1枚転位)	全転位，グループ転位 (全転位，内外1枚転位)	内外1枚転位

( ) : 2004年度試作器

特集：車両技術

があった。

3.1 冷却システム

超電導主変圧器の冷却システムは、図4のように圧縮機、冷凍機、熱交換器、クライオスタット、制御装置から構成される<sup>9) - 10)</sup>。冷媒である液体窒素は、自然対流により冷凍機に取り付けられた熱交換器と超電導巻線を循環して、クライオスタット内をサブクール状態（液体を沸騰が起きる温度より低い状態にすること）の66K程度に維持し、巻線を超電導状態に保持する。

冷却システムにおいて、重量が最も大きくなる機器は圧縮機で、効率向上のためだけでなく、軽量化のためにも冷凍機のエネルギー消費効率（（冷凍能力/入力電力）、以下、COPと記す）を向上して、圧縮機の重量を抑えることが重要である。

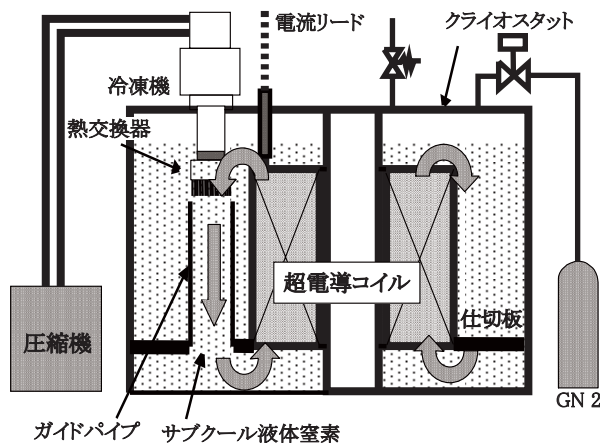


図4 冷却システム

3.2 冷凍機の開発

小型冷凍機には、GM冷凍機、スターリング冷凍機、パルス管冷凍機などの蓄冷器と流体の間の熱交換を利用する蓄冷器式冷凍機が多く用いられているが、超電導主変圧器に必要な温度 65K で 1kW 級の冷凍能力があり、小型、軽量の冷凍機は製作されていなかったこと<sup>11)</sup> から、COP0.05 以上、消費電力 20kW 以下、重量（圧縮機を含む）580kg 以下を目標に、開発を行った。

3.2.1 冷凍機の選定

普及している小型冷凍機について、消費電力、重量、騒音、開発進度、メンテナンス性、熱交換器とのインターフェースなどより評価した結果、大容量、高効率において実績のあるアクティブバッファ方式のGM型パルス管冷凍機が最も本開発に適していると判断した。

3.2.2 パルス管冷凍機の試作と改造

温度 65K、冷凍能力 1kW 級を目指して、軽量化を考慮した GM 型パルス管冷凍機を試作した。

試作した冷凍機について、操作温度、運転周波数、ガス充填圧力を要因として単体試験を行った結果、運転周

波数の最適値は 0.8 ~ 1.1Hz にあること、ガス充填圧力の最適値は 1.8 ~ 1.9MPa であることが分かった。

この結果をもとに、冷凍効率および効率向上を目指し、バルブユニットや配管部分などを中心に表5のような調整、改造を段階的に実施した。その結果、図5のように冷凍能力、COPは向上が見られ、最終的に冷凍能力 850W 強、COPを 0.037 まで向上した。試験用に複数の電磁弁で構成したバルブユニットをロータリーバルブに換えるなどの最適化により、冷凍能力、COPはさらに向上が期待できる。

表5 改造項目

改造No.	改造内容
RUN1	イニシャル
RUN2	アクティブバッファ側電磁弁追加 （アクティブバッファ側電磁弁のCv値増強）
RUN3	バッファ側マニホールド治具挿入 バッファ側冷凍機 - 電磁弁のデッドスペース削減
RUN4	圧縮機側マニホールド治具挿入 圧縮機側冷凍機 - 電磁弁のデッドスペース削減
RUN5	アクティブバッファ側電磁弁 Cv 値変更 （アクティブバッファ側電磁弁のCv値増強）
RUN6	圧縮機マニホールド間のフレキシブル管追加
RUN7	圧縮機マニホールド間のフレキシブル管さらに追加
RUN8	圧縮機吸入側にタンク追加
RUN9	圧縮機側電磁弁 Cv 値変更
RUN10	圧縮機吸入側のタンク容積を増量
RUN11	圧縮機吐出側にタンク追加

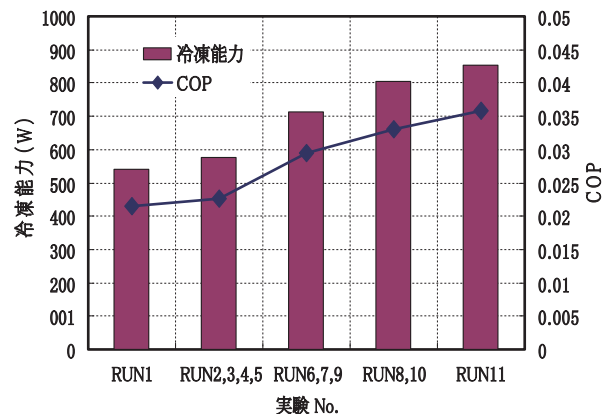


図5 冷凍機性能向上

### 3.3 冷却システムの製作

開発を進めたパルス管冷凍機の成果をもとに、クライオスタットに艤装が可能な大きさで、巻線をサブクール液体窒素温度領域に保持できる冷凍能力を有する冷凍機と、2004年度試作器で実績のある剣山方式の熱交換器を、新たに製作して、図6のような液体窒素の自然対流による冷却システムを構成した。

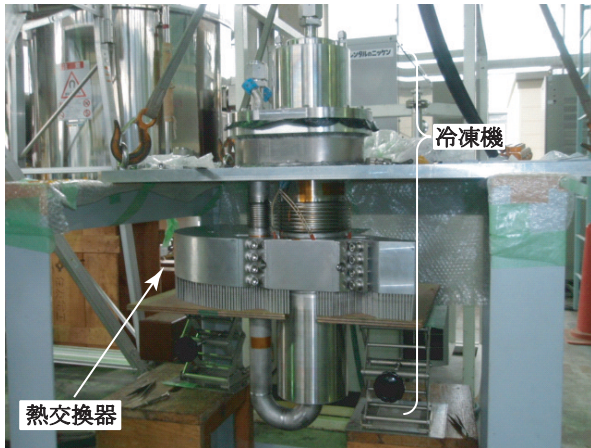


図6 冷却システム

## 4. 超電導主変圧器の組み立て、試験

低交流損失型超電導線を用いた巻線と、冷却システムを組み込んだ超電導主変圧器を組み立て、交流損失低減の効果と冷却特性について確認試験を行った。

### 4.1 超電導主変圧器の組み立て

2004年度試作器のクライオスタットを使用して、内鉄型二脚のうち片脚のみに、内側から2章で検討した低交



図7 超電導主変圧器

流損失型超電導線を用いた表2の仕様の二次内側巻線、三次巻線、一次巻線、二次外側巻線を設置し、他脚側の空間に3章で検討した図6のようなパルス管冷凍機に剣山熱交換器を取り付けた冷却システムを組み込んだ。組み立てた超電導主変圧器と圧縮機などの冷却システム用関連機器は、図7のように1つの台車にまとめて設置した。

### 4.2 冷却特性

クライオスタット内に液体窒素を注液して冷却後、搭載した冷却システムにより、液体窒素の温度を大気圧における沸点77Kから、設計の定格運転温度である66K以下のサブクール状態まで下げられることを確認するとともに、巻線を冷却できることを確認した。

### 4.3 交流損失特性

通電試験は、電源周波数60Hzの交流電流を通電し、電圧、損失などの測定を行った。図8に、一次-二次内側、外側巻線直列時の交流損失測定結果を示す。二次側定格電流の750Aまで損失の極端な増加はなく、超電導状態を維持できていることが確認でき、設計通り片脚分2MVAの容量が達成できた。

交流損失は、巻線間の組み合わせにより低減率は異なるが、2004年度試作器の1/2以下に低減できることを確認した。容量2MVAの定格電流を各巻線に通電した場合の全交流損失の解析値は、表6のように1.99kWと算出され、冷却効率を考慮した効率は、交流損失の低減効果により2004年度の96%台から98.2%程度に向上できることが分かった。

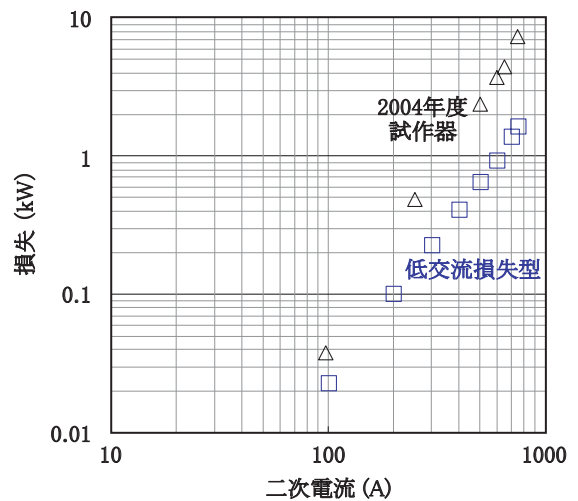


図8 交流損失特性

特集：車両技術

表6 交流損失（一脚分，2 MVA）

	容量 (MVA)	定格電流 (A)	交流損失 (kW) 解析値
一次巻線	2.0	80	1.15
二次内側巻線	0.9	750	0.31
二次外側巻線	0.9	750	0.41
三次巻線	0.2	455	0.12
合計	—	—	1.99

5. 結論

超電導主変圧器の特性を向上するため、交流損失の低減、冷却システム開発に取り組み、交流損失低減対策を取り入れた幅の狭い低交流損失型超電導線を用いた巻線の開発による効率の向上、さらに66K, 1kW級の大容量冷凍機を開発して軽量の冷却システムの見通しを得た。

実用化に向けては、交流損失のさらなる低減による効率99%以上の達成や、高効率な冷凍機、熱交換器による冷却システムの確立など、引き続き研究、開発が必要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご助言、ご協力いただいた、九州大学、富士電機システムズ(株)、富士電機アドバンストテクノロジー(株)、大陽日酸(株)、エア・ウォーター(株)、住友電気工業(株)の関係各位に謝意を表す。

なお、本研究は、国土交通省からの国庫補助金を受けて実施した。

文献

1) H. Hata, H. Kamijo, H. Fujimoto, K. Matsumura, M. Iwakuma, and K. Funaki, "Study of superconducting transformer for shinkansen rolling stock," *Railway traction systems conference, Italy*, pp. 87-98, 2001.  
 2) 上條弘貴, 秦広, 藤本浩之, 坊野敬昭, 井上亮二, 伊賀吾

朗, 岩熊成卓, 船木和夫: 鉄道車両用4MVA高温超電導主変圧器の設計, 電気学会静止器/超電導応用電力機器/リニアドライブ合同研究会資料, SA-03-30/ASC-03-13/LD-03-13, 2003

3) 秦広, 上條弘貴, 藤本浩之, 長嶋賢, 池田和也, 岩熊成卓, 船木和夫, 山田尚生, 上森賢悦, 吉田茂他: 車両用超電導主変圧器の試作, 鉄道総研報告, Vol.19, No.5, pp.5-10, 2005  
 4) 上條弘貴, 秦広, 藤本浩之, 長嶋賢, 池田和也, 讃岐育孝, 富岡章, 山田尚生, 上森賢悦, 吉田茂, 岩熊成卓, 船木和夫: 鉄道車両用超電導主変圧器の試作と試験, 平成17年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, P.47-11 ~ 12, 2005  
 5) 上條弘貴, 福本祐介, 秦広, 池田和也: 車両用超電導主変圧器の電気および機械特性試験, 鉄道総研報告, Vol.22, No.4, pp.53-58, 2008  
 6) 上條弘貴, 秦広, 池田和也, 福本祐介, 讃岐育孝, 富岡章, 山田尚生, 上森賢悦, 岩熊成卓, 船木和夫: 鉄道車両用超電導主変圧器の試験, 電気学会超電導応用電力機器研究会資料, ASC-06-38, 2006  
 7) 上條弘貴, 福本祐介, 秦広, 藤上純, 加藤武志, 岩熊成卓, 船木和夫: Bi2223 系超電導線の低交流損失化に関する検討, 平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp.52-17 ~ 18, 2006  
 8) 福本祐介, 上條弘貴, 坊野敬昭, 富岡章, 山田尚生, 岩熊成卓, 船木和夫: 低交流損失 Bi2223 超電導線を適用した巻線の特性評価, 第79回2008年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, pp.92, 2008  
 9) 池田和也, 岩松勝, 長嶋賢, 宮崎佳樹: パルス管冷凍機による超電導主変圧器用冷却システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.9, pp.41-46, 2007  
 10) 池田和也, 長嶋賢, 岩松勝, 宮崎佳樹, 三条大輔, 吉岡治夫, 高木直子: 65K, 1kW級アクティブバッファ方式パルス管冷凍機の開発, 低温工学, Vol.43, No.4, pp.143-149, 2008  
 11) 上岡泰晴: 冷却技術の開発～高温超電導機器実用化のための冷却技術～, 低温ジャーナル, Vol.1, pp.24-27, 2008