解 説

イットリウム系超電導電力ケーブルの開発状況

大熊 武*

Recent Progress in the Development of YBCO HTS Power Cables

Takeshi OHKUMA*

Synopsis: There are expectations for high-temperature superconducting (HTS) power cables as a compact cable with large capacity and low-loss power transmission. Recently, the stable manufacture of many long REBCO (RE = rare-earth element) tapes has been achieved. REBCO tapes have a high critical-current density, and the AC loss resulting from the parallel magnetic field is extremely small because of the thin-film structure of the superconducting layer. The basis of the M-PACC (Materials & Power Applications of Coated Conductors) project is to develop a process technology for fabricating REBCO tapes and promote development aiming toward the commercialization of superconducting cables using REBCO tapes. Two types of HTS cables are being developing as part of this project. These cables have superior transmission efficiency, lower loss and larger capacity than existing power cables. One is a 66 kV/5 kA three-core large-current cable and the other is a 275 kV/3 kA single-core high-voltage cable. There are several development targets. We examined factors such as AC loss, thermal characteristics of the cables under over-current and the optimum cable design. This paper provides an overview of the project and describes its progress.

Keywords: high-temperature superconductors, coated conductors, power cable, AC loss, over-current

1. はじめに

超電導電力ケーブルは、コンパクトな形状で大容量送電を可能にし、既存の電力ケーブルに比べて送電損失を低減することが可能であることから、省エネルギー、地球温暖化対策に貢献できることも期待されており、国内外において様々な検討・開発が行われている。

現在、(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) 内組織である超電導工学研究所 (SRL) では、近年、長尺化・高特性化等の性能向上が著しく、高電流密度・低損失などの特性を有し、コンパクトで更なる大容量送電を可能とするイットリウム系超電導線材 (以下Y系線材) を用いた超電導電力ケーブルの研究開発を新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) を通じて、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクト (2008~2012 年度) のなかで実施している¹⁾。

本報告では、このプロジェクトで実施している超電導電力ケーブルの開発状況について紹介する。

2. プロジェクト概要

本プロジェクトでは、66 kV/5 kA 級大電流ケーブルと 275 kV/3 kA 級高電圧ケーブルの 2 種類の開発を行っており、ISTEC、住友電工(株)、古河電工(株)、(株)フジクラ、昭和電線(株)、(株)前川製作所、(財)JFCC が連携して研究開発を推進している。本プロジェクト前期 3 ヶ年においては、「大電流・低交流損失ケーブル化」「高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化」「超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価」および「Y 系線材の安定製造技術」など実用化に重要な要素技術の研究開発を行うとともに「ケーブルシステム検証」に必要なシステム設計、試験条件の検討を行う。また、後期 2 ヶ年においては、これらの成果をもとに各ケーブルシステム検証試験を実施する。

3. 66 kV/5 kA 級大電流ケーブル

3.1 開発目標

大電流ケーブル開発においては、三相 66 kV、5 kA の電流を通電可能とする終端接続部を有する三心一括型超電導ケーブルの開発および 15 m 長ケーブルシステムにて検証試験を行う。Table 1 に大電流ケーブルの本プロジェクトにおける開発目標を示す。

ケーブル総損失は 2.1 W/m-相@5 kA 以下とし、その内訳は交流損失 2.0 W/m-相、誘電体損失 0.1 W/m-相程度を見込

Received March 17, 2011

* (財)国際超電導産業技術研究センター
〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13
International Superconductivity Technology Center (ISTEC),
1-10-13 Shinonome, Koto-ku,
Tokyo 135-0062, Japan
E-mail: ohkuma@istec.or.jp

Table 1 Target specifications of large-current HTS cable.

Voltage/Current	66 kV/5 kA (570 MVA)
Structure	Three cores in one pipe 15 m in length with terminal
Cable loss	2.1 W/m-phase @ 5 kA
Cable outer diameter	< ϕ 150 mm duct
Withstanding over-current	31.5 kA, 2 sec

んでいる。ケーブル外径は、既存のケーブル用管路に収納可能なサイズを想定し、直径 150 mm 以下とする。また、電力系統に導入した場合の系統事故に対して耐え得る構造とし、健全性維持を確認するため、31.5 kA の過電流を 2 秒間通電しケーブルに損傷のないことを確認する。

本プロジェクト前期 3 ヶ年の中間目標としては、ケーブル損失（交流損失）2.0 W/m-相@5 kA 以下とし、31.5 kA-2 秒の短絡試験でケーブル性能に劣化がないこと、および 5 kA 連続通電を行い異常のないことを確認する。

3.2 大電流ケーブルの構造

大電流ケーブルに使用する Y 系線材およびケーブルの構造を Fig. 1 に示す。Y 系線材は、配向金属基板、中間層、超電導層、Ag 保護層、Cu 安定化層から構成される。配向金属基板には、機械強度向上および交流損失低減のため、これまでの Ni 合金基板と比べ機械強度が強く低磁性の基板として、高強度の非磁性金属の表面を薄い配向性金属で覆ったクラッドタイプの配向金属基板を用いている。中間層は、30 mm 幅で厚さ 100 μ m 程度のクラッドタイプ配向金属基板上に RF スパッタリング法、もしくは電子ビーム蒸着（EB）法で $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ の 3 層構造の中間層を成膜する。この中間層上に、パルスレーザ蒸着（PLD）法で超電導層 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ を成膜し、安定化層 Ag を DC スパッタリング法で成膜する^{2,3)}。保護層まで作製した後、酸素アニールを行い、30 mm 幅から 4 mm 幅 6 本に切断して、電気めっき法により厚さ 20 μ m の銅安定化層を周囲に形成する。

ケーブル構造は Fig. 1 中に示すように、ケーブルの中心に銅より線のフォーマを用いる。フォーマは、ケーブルの機械的強度を担うとともに系統事故などにより発生した過

Fig. 1 Structure of the REBCO tape and large-current cable.

電流を通電するバイパスの役割をする。このフォーマの周りに Y 系線材をスパイラル状に配置し超電導導体層を形成する。その外側に電気的な絶縁材料、さらにその外側に Y 系線材と銅によるシールド層のよって 1 相分のケーブルコアを形成している。このコアを 3 本より合わせた後、三心一括として真空の二重構造となったコルゲートステンレス製の断熱管に収納する。液体窒素は、ケーブルとステンレス管の隙間を循環し冷却する。

3.3 交流損失の低減

超電導電力ケーブル開発において、交流損失を極力低減することが重要となる。Y 系線材の超電導層は数 μ m と非常に薄いため、平行磁場に対する磁化損失は非常に小さく、ケーブル化した場合の損失は、Fig. 2 に示すような線材間ギャップで発生する垂直磁場によって支配される⁴⁾。このため、線材幅を細くした線材を用いてケーブルを構成することにより、線材断面をできる限り円筒型に近づけて、線材間ギャップの垂直磁場を低減することによってケーブルの低損失化が期待できる。

これらのことから線材幅、線材間ギャップ幅、多層化による交流損失低減効果についてシミュレーションを行い、この結果をケーブル作製に反映した。また、多層化による交流損失を検証するため、4 層のケーブルコアを試作し交流損失を評価した⁵⁾。4 層ケーブルコアの諸元を Table 2 に示す。なお、ケーブルコア全損失に占める導体層損失の割合は 3/4 程度と見積もっており、導体サンプルの損失目標値は 1.5 W/m@5 kA とした。

77.3 K における導体の臨界電流値 (I_c) は 7000 A であり、使用した線材の I_c 総和と、通電時の磁場分布および線材の J_c -B 特性を考慮した計算値と一致することを確認した。77 K および 64 K における交流損失測定結果を Fig. 3 に示す。導体の損失は、冷媒温度の低下にともなって減少し、64 K（推定 $I_c=12400$ A）において導体層のみの損失目標値 1.5 W/m@5 kA（負荷率 I_{op}/I_c : 0.5）を達成した。

Fig. 2 Cross-sectional views of the conductors.

Table 2 Specifications of the four-layer HTS conductor.

Diameter of former	20 mm
HTS conductor	4 layers 4-mm ^w clad-type wires (57 pcs.)
Outer diameter	23 mm
Length	1.5 m

Fig. 3 Measured AC loss in the four-layer conductor.

今回は冷媒温度の低下により I_c 向上を模擬したが、今後は線材 I_c の向上およびシールド層を有するケーブルコアサンプルを作製して、最終目標の検証を行う。

3.4 耐過電流性能

電力系統に事故が発生し、超電導ケーブルに過電流が通電した場合の健全性を確認するためにケーブルコアを作製し短絡試験による検討を行った。ケーブルコアサンプルは、過電流が通電する銅撚り線フォーマおよび銅シールド層を最適化するため、超電導ケーブルに対する各相の銅の必要断面積についてシミュレーションを行い⁶⁾、この結果をケーブル設計に反映してサンプルを作製し、短絡試験によって過電流通電時のケーブルコアの温度上昇を測定した。過電流試験は、シールド層を有する構造の約 2.7 m のケーブルコアサンプル 2 本を開放断熱容器中に並列に設置し、各シールド層の端部は短絡して閉回路とした状態で液体窒素に浸漬し、導体層とフォーマに過電流を通電してシールド層に遮蔽電流が誘起される方式とした。なお、試験前後に直流臨界電流を測定し、導体層およびシールド層の臨界電流の変化の有無を確認した。

今回試作した過電流試験用の超電導ケーブルコアの諸元を Table 3 に、ケーブルコア構造を Fig. 4 に、過電流試験用ケーブルコアを Fig. 5 に示す。また、過電流通電時の超電導導体層と超電導シールド層の最大温度上昇の測定結果を Fig. 6 に示す。最大 31.5 kA、2 秒の過電流通電時には、超電導導体層で 100 K、超電導シールド層で 120 K の温度

Table 3 Specifications of the HTS cable core for over-current tests.

Item	Specifications
Former	Cu stranded (140 mm ²)
HTS conductor	4 layers, 4-mm ^w clad-type wires, 51 pcs.
HTS shield	2 layers, 4-mm ^w clad-type wires, 45 pcs.
Cu shield	Cu tape (100 mm ²)
I_c of cable core @ 77.3 K	Conductor: 3270 A Shield: 3650 A

Fig. 4 Structure of HTS cable cores.

Fig. 5 HTS cable cores for the over-current test (31.5 kA, 2 sec).

Fig. 6 Maximum temperature rise at over-current conditions (31.5 kA, 2 sec).

上昇を確認した。同図中には、シミュレーション結果も実線および破線で示しており、本過電流試験においてケーブルコア内部で発生した温度上昇は、想定される範囲内で設計が妥当であることが確認された⁶⁾。なお、31.5 kA、2 秒の通電でもケーブルコアには異常は認められず、試験前後において、2 本のコアの導体層およびシールド層すべてにおいて臨界電流特性に変化は見られなかった。これにより、過電流通電時のケーブルの健全性が確認された。

3.5 電流リードの開発

ケーブル終端接続部開発において、66 kV 級 5 kA 通電を可能とする大容量電流リードの最適なサイズや発熱量の設計を行い、断面積 3500 mm² 素線絶縁銅より線導体による電流リードを試作し、連続通電試験を行った。Fig. 7 に連続通電試験結果を示す。試験結果より 5 kA 通電時の熱的安定性の確認を行うとともに試験容器内の液体窒素蒸発量から算出した電流リードの熱損失量は 450 W@5 kA と設計に際して実施したシミュレーション結果と同等であり、設計の妥当性を確認した。

Fig. 7 Continuous current loading test of the terminal current leads.

Fig. 8 Completed three-core, 10 m cable (manufacturing process).

3.6 ケーブルコアの試作・機械特性試験

これまでの要素試験結果を反映して行ったケーブル設計に対して、ケーブル製造時のドラム曲げや三心撚りによってケーブルに機械的な応力（引張り、曲げ）が加えられるため、これらの応力に対してもケーブルの健全性が保たれることを検証するために、実際のケーブル撚り線・導体化の製造ラインを用いて Fig. 8 に示す 10 m 長の三心一括導体化型ケーブルコアを試作した。その結果、試作前後において、使用した Y 系線材の特性に劣化は見られず、電力ケーブル用線材として十分な機械特性を有することを確認した。

三心一括型ケーブルコアの曲げ試験においては、 $\phi 2300$ mm の曲げ試験に対しても超電導特性が低下しないことを確認した。また、ケーブルは室温から液体窒素温度に冷却すると約 0.3% の熱収縮を起こすが、このケーブル冷却時の熱収縮に対する強度について確認を行うために、液体窒素中で、0.3% の熱収縮に相当する引張試験を行い超電導特性が低下しないことを確認した。なお、0.3% 熱収縮に相当する張力は三心一括型ケーブルコアで約 3 トンであり、フォーマの機械特性から想定される値とほぼ同等であることを確認するとともに本値は終端接続部の強度設計に反映した。

4. 275 kV/3 kA 級高電圧ケーブル

4.1 開発目標

高電圧ケーブル開発においては、単相 275 kV、3 kA の電流を通電可能とする終端接続部と中間接続部を有する単心ケーブルの開発および 30 m 長ケーブルシステムにて検証試験を行う。Table 4 に高電圧ケーブルの本プロジェクトにおける開発目標を示す。

ケーブル総損失は、0.8 W/m-相@3 kA 以下とし、その内

Table 4 Target specifications of high-voltage HTS cable.

Voltage/Current	275 kV/3 kA (1420 MVA)
Structure	One core in one pipe 30 m in length with terminal
Cable loss	0.8 W/m-phase @ 3 kA
Cable outer diameter	< 150 mm ϕ
Withstanding over-current	63 kA, 0.6 sec

Fig. 9 Structure of the REBCO tape and high-voltage cable.

訳は交流損失を 0.3 W/m-相程度、誘電体損失を 0.5 W/m-相程度とする。ケーブル外径は、150 mm ϕ 以下とし、275 kV 級の電力系統で事故等が発生した場合の過電流に耐え得る構造とし、健全性維持を確認するため、63 kA の過電流を 0.6 秒間通電しケーブルに異常がないことを確認する。

本プロジェクト前期 3 ヶ年の中間目標としては、ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）0.8 W/m-相@3 kA 以下とし、63 kA-0.6 秒の短絡試験でケーブル性能に劣化がないことを確認するとともに、275 kV 連続課電を行い異常のないことを確認する。

4.2 高電圧ケーブルの構造

高電圧ケーブルに使用する Y 系線材およびケーブルの構造を Fig. 9 に示す。Y 系線材は、厚さ 100 μ m 程度の Hastelloy 基板上に IBAD 法等により中間層を、MOD 法によって超電導層 $\text{YB}_{1.5}\text{C}_3\text{O}_y$ を形成する。その上に DC スパッタリング法で Ag 安化層を形成する⁷⁾。その後、銅めっき等を施し、ケーブル用 Y 系線材を作製する。

フォーマは、銅丸撚りフォーマとする。ケーブルの基本構造は 66 kV ケーブルの単相コアと同様であり、超電導ケーブルを 2 重構造のステンレス製の管に収納し、ケーブルと管の隙間を流れる液体窒素で冷却する。

4.3 絶縁材料の選定

超電導電力ケーブル用の電気絶縁材料には、絶縁紙を用いた液体窒素含浸多層絶縁が用いられており、極低温での機械強度が優れ、高耐電圧、低誘電体損失である必要がある。特に高電圧ケーブルにおいて、誘電体損失は交流損失よりも大きくなる可能性がある。絶縁材料として、低誘電体損失で超電導ケーブル、低温機器、高電圧設備として実績のある材料（絶縁紙）として、PPLP[®]-A、PPLP[®]-C、Tyvek[®]、Normex[®] の 4 種類を電気絶縁材料候補と選定し、

Table 5 Electric properties of insulation materials.

Sample	ϵ	$\tan \delta$ (%)	Dielectric loss (W/mm)
PPLP [®] -A	1.9	0.077	0.62
PPLP [®] -C	1.9	0.061	0.46~0.49
Tyvek [®]	1.8	0.008	0.06
Normex [®]	2.2	0.22	2.03

電気特性・機械特性の把握を実施した。PPLP[®]-A、PPLP[®]-Cなどの半合成紙は、PP（ポリプロピレン）をクラフト紙でラミネート加工したもので、OF ケーブルや国内外の超電導ケーブルなどに広く使用されている。PPLP[®]-A は、PPの割合が 40%にしたもので、PPLP[®]-C は 60%にしたものである。Tyvek[®]は極低温線材の絶縁紙や海外の超電導ケーブルなどに用いられ、Normex[®]は変圧器などに実績のある絶縁紙である。これら絶縁材料の電気特性に関する試験結果を **Table 5** に示す。

それぞれの絶縁材料を用いて、絶縁厚 4 mm、長さ 2 m の絶縁モデルケーブルを製作して、比誘電率 ϵ と誘電正接 $\tan \delta$ を測定した。Normex[®]は、誘電損失に影響する $\tan \delta$ が大きく、ケーブル開発目標である誘電損失 0.5 W/m-相を達成できない。Tyvek[®]は、 $\tan \delta$ が小さく誘電損失を小さくできるが、電気絶縁特性は低い傾向にある。PPLP[®]-C は PPLP[®]-A に比べて $\tan \delta$ が小さく、誘電損失を低減が期待でき、さらに電気絶縁特性は PPLP[®]-A 以上が期待できる。

これらの絶縁材料を用いて短尺絶縁モデルケーブルを試作し、液体窒素中での AC 破壊試験、雷インパルス（IMP）破壊試験を行った結果、AC、IMP 試験ともに PPLP[®]-C の耐電圧特性の方が他の材料よりも良いことが確認された。一方、誘電特性においては Tyvek[®]の方が一桁程度小さくできるが、厚みが不均一なためカレンダー加工を施して厚みを均一にしても密度差があり機械強度が弱いいため、絶縁材料としては、PPLP[®]-C を選定した。

4.4 交流損失の低減

高電圧ケーブルの交流損失目標である 0.3 W/m-相を達成するため、Y 系線材の最適な線材幅、ギャップ幅および導体構造（2 層導体）、超電導線材の特性分布など考慮した交流損失シミュレーションを実施し、その結果を基に導体構造を検証した。試作した超電導導体仕様を **Table 6** に示す。

幅 5 mm の Y 系線材を Cu 撚り線フォーマにスパイラル状に 2 層構造で巻き付け超電導導体（5-C）を作製した。また、低損失化のために、臨界電流密度が低下していると考えられる線材の両端 1 mm をレーザーで取り除いて 3 mm 幅にし、同じく Cu 撚り線フォーマにスパイラル状に 2 層構造で巻き付け超電導導体（3-C）を作製した。なお、各々の超電導導体各層のテープ本数は周長（線材幅×本数）を同一として定め、外径をともに 25.5 mm とした。

各々の超電導導体を冷却し、交流損失を測定した結果、

Table 6 Specification of two-layer HTS conductors.

	5-C	3-C
YBCO tape width	5 mm (original)	3 mm (after laser slitting)
HTS conductor	2-layer, 28 tapes	2-layer, 46 tapes
Outer diameter	25.5 mm	25.5 mm
I_c of the conductor	3860 A (77.3 K)	4700 A (77.3 K)
AC loss at 3 kA	1.56 W/m (73.0 K) (I_{op}/I_c : 0.76)	0.297 W/m (70.0 K) (I_{op}/I_c : 0.50)

Fig. 10 AC loss characteristics of 3-C and 5-C.

5-C : 1.56 W/m@73.0 K、3-C : 0.297 W/m@70 K となり、3-C 導体では交流損失の目標である 0.3 W/m 以下を達成した⁸⁾。**Fig. 10** に I_c で規格化した 5-C および 3-C のサブクール温度別の交流損失を示す。これまでの検討の結果、3-C 導体は 5-C 導体に比べてギャップ数は多いが、線材幅を小さくすることで、より円筒型に近い構造となり、線材間ギャップの垂直磁場が小さくなった影響と、超電導線材特性の均一性の影響などにより 5-C 導体に比べて交流損失が小さくなったと考えられる⁹⁾。

3 kA 通電に対する交流損失は、サブクールにより超電導導体の通電容量が増加していくと、交流損失は低減でき、0.235 W/m@68.7 K (I_{op}/I_c : 0.46) の結果を得た。負荷率 (I_{op}/I_c) は超電導ケーブル導入において、重要であり、交流損失低減と負荷率および運転温度の最適化を図る必要があり、今後のケーブルシステムに反映する。

4.5 耐過電流性能

電力システムの事故時に超電導ケーブルに過電流が流れた場合の健全性を確認するため、最大 63 kA、0.6 秒の過電流を通電する銅撚り線フォーマおよび銅シールド層など、超電導ケーブルに対する各層の銅の必要断面積のシミュレーションを行い¹⁰⁾、この結果をケーブル設計に反映した。

この設計の妥当性を検証するため、**Table 7** に示す仕様の 2 m 長のケーブルコアサンプル 2 本を作製し、**Fig. 4** に

示すように並列に配置し、導体層とフォーマに過電流を通電し、シールド層は端部を短絡して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。このケーブルコアサンプルに短絡試験によって 63 kA-0.05、0.1、0.3、0.6 秒の過電流を通電した。試作した超電導ケーブルコアを Fig. 11 に、63 kA、0.6 秒の過電流通電時の超電導導体層と超電導シールド層の温度変化の測定結果を Fig. 12 に示す。図に示すように、超電導導体層の温度上昇がフォーマよりも大きくなっており、150 K 程度まで温度上昇しているが、過電流通電後に I_c 測定を実施し、試験前と同特性であり、試作した超電導ケーブルコアが健全であることを確認した。

Table 7 Specifications of the HTS cable core for over-current tests.

Structure	Specification	Diameter(mm)
Former	325 mm ² copper stranded	21.7
HTS conductor	2-layer, 28 tapes	26.8
Insulation	Thickness: 24 mm	75.3
HTS shield	1-layer, 43 tapes	75.8
Shield protection 1	310 mm ² copper tape	82.2
Shield protection 2	(2-layer)	
Protection	Insulation paper	84.0
YBCO tape	TFA-MOD YBCO 1.5 μ m 5 mm width, copper coating (0.025 mm-t) I_c : 150 A(300 A cm ⁻¹)

Fig. 11 HTS cable cores for the over-current test (63 kA, 0.6 sec).

Fig. 12 Temperature after an over-current of 63 kA-0.6 sec.

Fig. 13 Bushing for the high-voltage cable.

4.6 高電圧用ブッシングの開発

高電圧ケーブルの気中終端接続部の開発として、室温部（常温部）から低温部への低熱侵入を実現するための 275 kV 級の電流リードの開発を行い、熱侵入量を 120 W に抑える電流リードの設計を行った。275 kV 級の絶縁を有する材料としては、FRP（ガラス強化プラスチック）やエポキシ樹脂やポリミドフィルムなどがあり、低温および高電圧絶縁を有した絶縁材料を選定し、電流リードの設計結果を用いて、電気絶縁を担うブッシングの設計を行った。その結果、Fig. 13 に示すようなブッシングを試作し、AC、IMP 試験など電気性能試験を実施し、設計通りのブッシング性能を得ることに成功した。

5. まとめ

Y 系線材を用いた超電導電力ケーブル開発のうち、66 kV 級大電流ケーブルおよび 275 kV 級高電圧ケーブルに関するこれまでの前期 3 ヶ年においては、交流損失評価、過電流試験による熱挙動検証、電気絶縁材料特性などの要素技術について研究開発を行い、各中間目標を達成した。今後も交流損失の更なる低減、絶縁性能の特性評価などを引き続き行くとともに、これまでの研究成果をもとに、個々の超電導ケーブルシステムを開発し、過通電試験によるシステム検証を実施する。

本研究は、経済産業省の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの受託により実施したものである。

参 考 文 献

- 1) N. Fujiwara, H. Hayashi, S. Nagaya and Y. Shiohara: "Development of YBCO power devices in Japan", *Physica C* **470** (2010) 980-985
- 2) T. Nagaishi, Y. Shingai, M. Konishi, T. Taneda, H. Ota, G. Honda, T. Kato and K. Ohmatsu: "Development of REBCO coated conductors on textured metallic substrates", *Physica C* **469** (2009) 1311-1315
- 3) T. Yamaguchi, H. Ota, K. Ohki, M. Konishi and K. Ohmatsu: "Development of buffer layers on 30 mm wide textured metal substrates for REBCO coated conductors", *Physica C* **470** (2010) 1271-1274
- 4) N. Amemiya, Z. Jiang, M. Nakahata, M. Yagi, S. Mukoyama, N. Kashima, S. Nagaya and Y. Shiohara: "AC loss reduction of

- superconducting power transmission cables composed of coated conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 1712-1717.
- 5) M. Ohya, H. Yumura and T. Masuda: “Development of 66kV/5kA class “3-in-One” HTS cable with RE123 wires”, Abstracts of CSJ Conference **83** (2010) 270 (in Japanese)
大屋正義、湯村洋康、増田孝人：「66kV/5kA 級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発」、第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2010) 270
- 6) X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, M. Ohya, H. Yumura and N. Fujiwara: “Numerical simulation on fault current condition in 66 kV class RE-123 superconducting cable”, Physica C **470** (2010) 1580-1583
- 7) T. Koizumi: “Development of the low cost YBCO coated conductor using TFA-MOD process (8)”, Abstracts of CSJ Conference **80** (2009) 189 (in Japanese)
小泉 勉：「TFA-MOD 法による低コスト YBCO 線材の開発 (8)」、第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2009) 189
- 8) M. Yagi and S. Mukoyama: “AC loss reduction of 275kV-3kA YBCO HTS cable”, Abstracts of CSJ Conference **83** (2010) 266 (in Japanese)
八木正史、向山晋一：「275kV-3kA YBCO 高温超電導ケーブルの交流損失低減」、第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2010) 266
- 9) K. Ito and N. Amemiya: “Effect of decreasing tape width on AC loss reduction in two-layer superconducting power transmission cable”, Abstracts of CSJ Conference **79** (2008) 101 (in Japanese)
伊東薫、雨宮尚之：「2 層超伝導送電ケーブルの交流損失低減に対する細線化の効果」、第 79 回 2008 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2008) 101
- 10) M. Yagi and S. Mukoyama: “Over-current characteristics of 275kV-3kA YBCO HTS cable”, Abstracts of CSJ Conference **82** (2010) 30 (in Japanese)
八木正史、向山晋一：「275kV-3kA YBCO 高温超電導ケーブルの過電流試験」、第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2010) 30

大 熊 武 1963 年 4 月生。1988 年東京電機大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年東京電力(株)入社。1991 年より同社技術開発研究所にて超電導の電力機器への応用技術、主に限流器に関する研究に従事。2010 年より(財)国際超電導産業技術研究センターに派遣中。超電導電力機器開発に従事。低温工学・超電導学会、電気学会会員。工学博士。