

世界最大 5 kA_{rms} 級・低損失イットリウム系高温超電導ケーブル

新規事業推進センター 吉田 学¹・永田 雅克²・明石 一弥³・渡辺 和夫⁴・日高 輝⁵
菊竹 亮⁶・大保 雅載⁷・飯島 康裕⁸・伊藤 雅彦⁹・斉藤 隆¹⁰

The World's Largest 5 kA_{rms}・Extremely-Low-Loss High-Tc Yttrium-based Superconducting Power Cable

M. Yoshida, M. Nagata, K. Akashi, K. Watanabe, H. Hidaka, R. Kikutake, M. Daibo, Y. Iijima,
M. Itoh, and T. Saitoh

超電導ケーブルは、高電流密度、低交流損失という特長とともに、省エネ、CO₂削減効果、漏れ磁界なし等、環境面でのメリットも有し、大容量（大電流）送電コンパクト型電力ケーブルとしての適用が期待されている。大電流・低交流損失ケーブル化技術を開発するに当たってのキーテクノロジーは導体化技術である。当社では1991年にイットリウム系高温超電導線の製法に関する当社独自のIBAD法の開発に成功して以来、精力的にイットリウム系超電導線の開発を行ってきた。2011年には臨界電流（I_c）572 A、長さ（L）816.4 mの超電導線の製作に成功し、臨界電流（I_c）と長さ（L）の積であるI_cL値が466,981 Amという世界記録を更新した。今回、この世界最大級のI_c=500 A/cm-w (@ 77 K, s.f.)以上のイットリウム系IBAD線を初めてケーブルに適用し、期待される高特性が検証されたのでその概要を報告する。

Yttrium-based coated conductors are expected to be adapted to the various superconducting applications. They have a high current density and show high performance in liquid nitrogen, which is much cheaper than helium. In 1991, Fujikura succeeded in development of the key original technology to fabricate yttrium-based coated conductors, which was named ion-beam-assisted deposition (IBAD) method. An 816.4 m long wire with end-to-end critical current (I_c) of 572 A/cm-width, corresponding to the world record I_c×L value of 466,981 Am/cm, was achieved by Fujikura.

In a new project reported in this paper, yttrium-based IBAD wires with high I_c= 500 A class/cm-width (@ 77 K, s.f.) are applied to an HTS power cable for the first time in order to take advantage of the merits of large current capacity and extremely low loss. The current loading test of the cable has proved that the measured AC loss of the cable was sufficiently less than the target value of 2 W/m/phase@ 5 kA_{rms} at 77 K.

1. ま え が き

超電導とはある温度以下で物質の電気抵抗がゼロとなる現象である。1911年にオランダのオンネスによって超電導現象が発見されて以来さまざまな物質で確認され、1986年以降になると液体窒素中（77 K = -196 °C）でも超電導特性を示す酸化物超電導体が発見された。これら酸化物超電導体は従来の超電導体に比べ超電導を示す

温度（＝臨界温度）が飛躍的に高いため高温超電導体と呼ばれ、従来の超電導体は低温超電導体または金属超電導体と呼ばれている。

高温超電導体の中でもイットリウム系超電導体は磁場中でも高い性能を示し、広範囲に应用可能な高温超電導線材として期待され、日米を中心に精力的に線材開発が行われてきた。当社では1991年に当社独自のIBAD法の開発に成功して以来、精力的にイットリウム系超電導線の開発を行い、過去20年間、イットリウム系超電導線開発で世界をリードしてきた。2011年には超電導に流すことができる電流（＝臨界電流（I_c））572 A、長さ（L）816.4 mの超電導線の製作に成功し、臨界電流（I_c）と長さ（L）の積であるI_cL値が466,981 Amという世界記録を更新した。

この高性能線材開発と並行して機器への応用として、当社ではマグネット応用に向けて積極的にコイル開発も

1 超電導事業推進室 技術部長兼品質保証部長
2 超電導事業推進室 製造部長
3 超電導事業推進室 研究開発部主席研究員
4 超電導事業推進室 研究開発部主席研究員（博士（工学））
5 超電導事業推進室 研究開発部
6 超電導事業推進室 製造部係長
7 超電導事業推進室 研究開発部グループ長
8 超電導事業推進室 研究開発部長（博士（工学））
9 超電導事業推進室 室長、執行役員
10 超電導事業推進室 超電導事業推進シニアコーディネーター

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
臨界温度	Critical Temperature	超電導状態を維持できる上限の温度
イットリウム系超電導線	Yttrium-based Superconducting Wire	超電導層にイットリウム (Y) やカドリウム (Gd) など希土類系元素を含む酸化物超電導。希土類系を総称してRE (Rare Earth) 系とも呼ぶ。他の高温超電導に比べて液体窒素付近の比較的温度的の高い領域で磁場中の臨界電流密度 (J_c) が高い特徴がある。
臨界電流, A/cm-w (@ 77 K, s.f.)	Critical Current, A/cm-wide (at 77 K, self-field)	超電導状態で流しうる最大の電流値を臨界電流 (I_c) といい、電流値は温度、磁場に依存する。 なお、テープ線材の I_c の表記はテープ幅 1 cm 線材の 77 K 自己磁場における値としている。
IBAD 法	イオンビームアシスト蒸着法 Ion Beam Assisted Deposition	イットリウム系線材を作製するキーとなる技術で、超電導特性を左右する結晶配向性を金属テープ上にて高度に制御する手法で、金属テープと超電導体の間の中間層の作製に適用される。基本特許を 1991 年フジクラが発明。高特性のイットリウム系線材の多くにこの IBAD 法が用いられている。
PLD 法	パルスレーザ蒸着法 Pulse Laser Deposition	イットリウム系超電導層の作製に使われる方法で、エキシマレーザを用いて紫外パルス光を真空中の超電導体に集光して超電導膜の蒸着を行う方法である。超電導薄膜を成長させる領域全体を電気炉のように断熱的に囲う「ホットウォール方式」を新たに開発して極めて安定した成膜条件を実現することに成功し、世界記録線材の開発につながった。

行ってきた。そして、2012年に「 ϕ 20 cm 室温ボア世界最大級イットリウム系 5 T 高温超電導マグネット」の開発に成功し注目を集めている¹⁾。さらに、このような高 I_c 線材が最も効果を発揮できる応用例として、大電流・低損失超電導ケーブルへの適用が強く望まれていた。超電導ケーブルは、高電流密度、低交流損失の特長とともに、省エネ、CO₂削減効果、漏れ磁界なし等、環境面でのメリットも有していることから、大容量（大電流）送電コンパクト型電力ケーブルとして期待されている。直流ケーブルの場合は電気抵抗がゼロのため原理的に電力損失は生じないが、交流の場合、超電導内部の磁気ヒステリシスなどによる交流損失が発生する。イットリウム系線材は単位断面積当たりの臨界電流密度が非常に高く、低交流損失を実現できる可能性も有していることから、NEDO プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環においてケーブルへの適用が活発に行われてきた。

この大電流・低交流損失ケーブル化技術を開発するに当たってのキーテクノロジーは導体化技術である。今回、このプロジェクトで開発した世界最大級の臨界電流 500 A/cm-w (@ 77 K, s.f.) 以上を有するイットリウム系線材のケーブルへの適用が、プロジェクト最終年度 (2012年度) に実現されるに至った。その中で、ケーブルでの高臨界電流線材からなる導体に期待される高特性を検証することができたのでその概要を報告する。

2. イットリウム系超電導線材の実用化に向けた開発

2.1 イットリウム系超電導線材の構造

当社のイットリウム系超電導線材の構造と外観写真を図1に示す。厚さ75または100 μ mの金属基板上にIBAD法により2軸配向中間層を複数積層し、Pulsed Laser Deposition (PLD) 法により超電導層を積層する。超電導層上にはAg保護層を成膜し、用途に応じた金属テープ (50 ~ 100 μ m厚) を安定化層としてラミネートする。最後に絶縁層としてポリイミドテープ (12.5 μ m厚) を2枚重ね巻きする構造となっている。このような構造の線材のトータルの厚さは150 ~ 300 μ mである。当社のイットリウム系超電導線材の製品ラインアップを表1に示す。現時点での標準品の液体窒素中 (77 K) における臨界電流 (I_c) は10 mm幅当たり500 A以上 (5 mm幅では250 A以上) である。

2.2 イットリウム系超電導線材の長尺化と高特性化

イットリウム系超電導は他の高温超電導と同時期に発見されながらも、その線材化は長年困難であるとされてきた。それは超電導線材長手方向に亘って超電導の結晶を3次的に配向させる高度な技術開発が必要であったためである。当社では早い時期からイットリウム系超電導材料による線材開発を開始しており、1991年には特定の角度からArイオンを照射させながらスパッタ蒸着することで無配向の金属テープ上に3次的に配向制御された薄膜中間層を成膜するイオンビームアシスト蒸着 (Ion Beam Assisted Deposition : IBAD) 法を独自開発²⁾

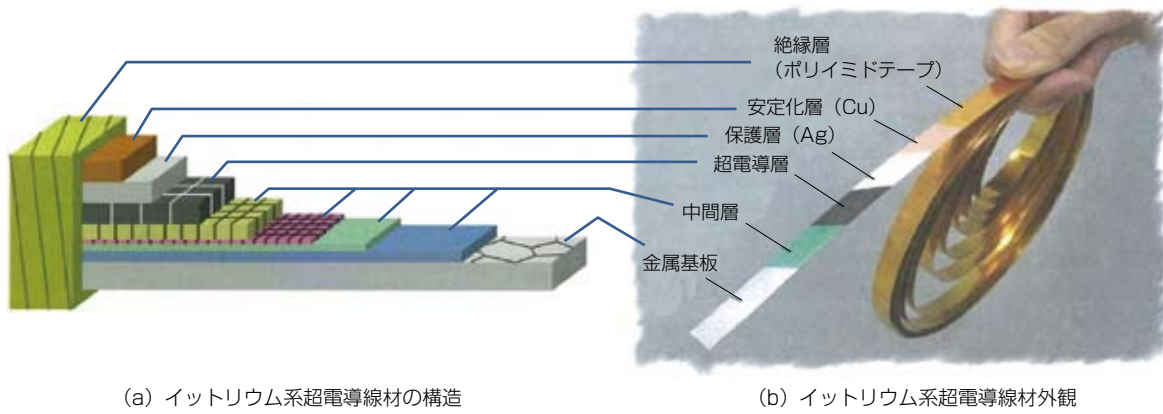


図1 イットリウム系超電導線の構造と外観
Fig. 1. Schematic drawing of the structure and photograph of a yttrium-based coated conductor.

表1 イットリウム系超電導線の製品ラインナップ
Table 1. Product lineup of yttrium-based coated conductors.

型番	線材幅 (mm)	金属基板 (μm)	銅安定化層 (μm)	I _c (A) (77 K, s.f.)
FYSC-S05	5	75, 100	-	> 250
FYSC-S10	10	75, 100	-	> 500
FYSC-SC05	5	75, 100	75, 100	> 250
FYSC-SC10	10	75, 100	75, 100	> 500

した。また、超電導層の成膜プロセスとしてPLD法を採用した。その特性が薄膜形成時の雰囲気温度に大きく影響されないよう成膜領域をいわゆる電気炉のように高温の壁で囲ったホットウォール型PLD装置を独自に開発して、大面積領域で極めて安定した温度環境を再現可能とした。これにより成膜速度が速くても均質な超電導膜を形成できるに至っている。図2に当社で作製されてきたイットリウム系超電導線の開発進捗を示す。2011年には816.4 m長において全長通電でI_c = 572 Aが得られ、線材開発の指標であるI_cと線材の長さLの積I_c × Lの値は466.981 Amとなり、2010年に当社が樹立した世界記録を更新した。図3に市販用線材の長手方向のI_c分布特性例を示す。単長500 m以上においてI_c 500 A以上が得られており、長手方向にも非常に均一なI_c分布であることが見て取れる。

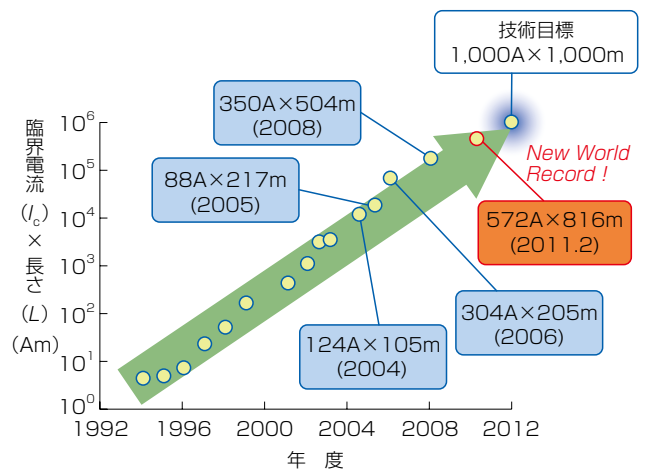


図2 フジクラで作製されたイットリウム系超電導線の開発進捗
Fig. 2. Progress of I_c × L value of yttrium-based coated conductors in Fujikura.

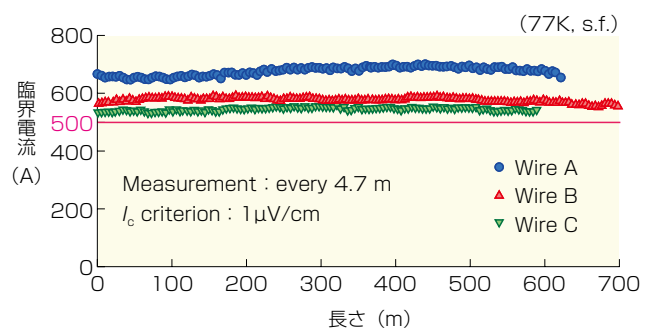


図3 市販用線材の長手方向のI_c分布
Fig. 3. Longitudinal I_c distribution of manufactured wires (typical examples).

3. 大電流・低交流損失ケーブルの試作・評価

2章で述べた、高I_c = 500 A/cm-w (@ 77 K, s.f.) 以上のIBAD-PLD線材を用いた66 kV/三心一括/5 kArms, 20 m級ケーブル1相分を作製し、終端接続部・冷却システムを有する試験設備を構築して、高I_c 線材によるケーブルの交流通電特性を検証した。

3.1 ケーブル構造・試作

ケーブルコア設計の目標は、「定格容量：66 kV/5 kArms級 三心一括構造の1相分、交流損失：2 W/m-相@5 kArms以下、コア外径：150 mm φ管路に収納可

能な三心一括構造のコア外径」とした。ケーブル構造はNEDO「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の成果³⁾に準拠して設計した(図4, 表2参照)。超電導体とシールドの目標臨界電流値は、負荷率をそれぞれ50%, 55%とし14 kA, 12.7 kA (@ 77 K, s.f.)と設定した。導体、シールドの線材は全て4 mm幅とし、

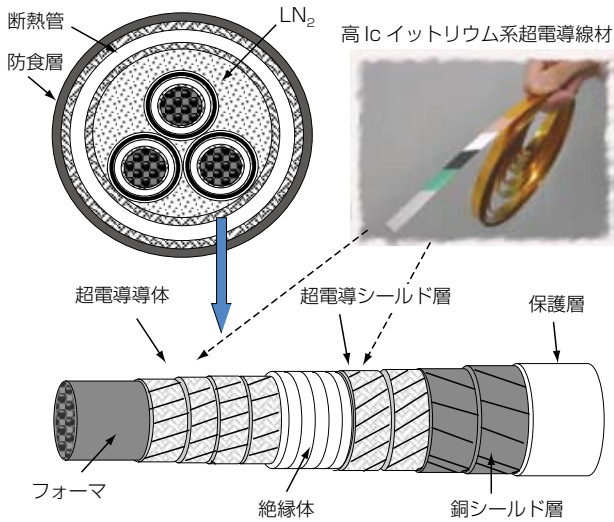


図4 超電導ケーブルの構造 (3心一括型)

Fig. 4. Structure of a high I_c yttrium-based HTS cable.

表2 超電導ケーブルの設計
Table 2. Specifications of the cable.

項目	仕様
フォーマ	銅より線 (140 mm ²) 20 mm φ
超電導導体 (I _c = 14 kA)	4層, オール4 mm 幅線材 I _c = 240 A / 4 mm 幅
絶縁体	クラフト紙 (6 mm 厚さ)
超電導シールド層 (I _c = 12.7 kA)	2層, オール4 mm 幅線材 I _c = 240 A / 4 mm 幅
銅シールド層	銅テープ (100 mm ²)
保護層	不織布 45 mm φ
断熱管	二重ステンレスコルゲート管 真空断熱方式
防食層	PE 114 mm φ

1本当たりの平均I_cはそれぞれ260 A / 4 mm-w, 243 A / 4 mm-wで, 1 cm幅換算でそれぞれ650 A/cm-w, 610 A/cm-wとなり, これまでに類のない高I_c線材の初適用となった。

ケーブル単心コア約25 m 製作し (図5参照), 製作前後でのトータル線材I_cの変化を測定した。その結果を図6に示す。製造前の初期の値は線材全数全長の値の総和である。ケーブルコア製造後の値は製造余長から切り出した短尺サンプルの値で, その設計諸元・I_c値は20 m級と同様である。超電導導体層, 超電導シールド層ともにケーブルコア製造前後において各線材のトータルI_cの変化は確認されなかった。これは超電導導体層及び超電導シールド層を構成する超電導線材ともにケーブルコア製造履歴を受けても初期特性を維持していることを示している。

3. 2 短尺品での事前評価

製造余長の短尺サンプルで導体・シールドの各層電流分布の周波数依存性を測定し, 実証線路長相当の周波数

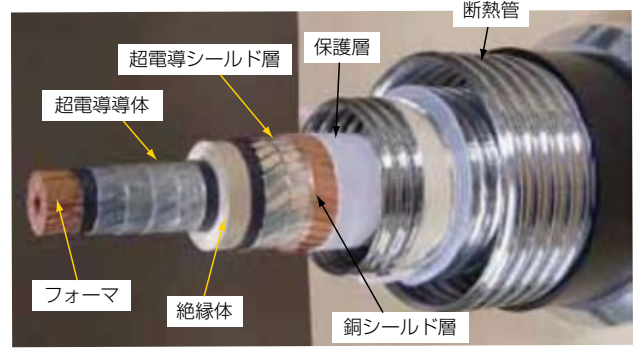


図5 今回作製したイットリウム系超電導ケーブル外観 (単心型)

Fig. 5. Photograph of a yttrium-based HTS cable.

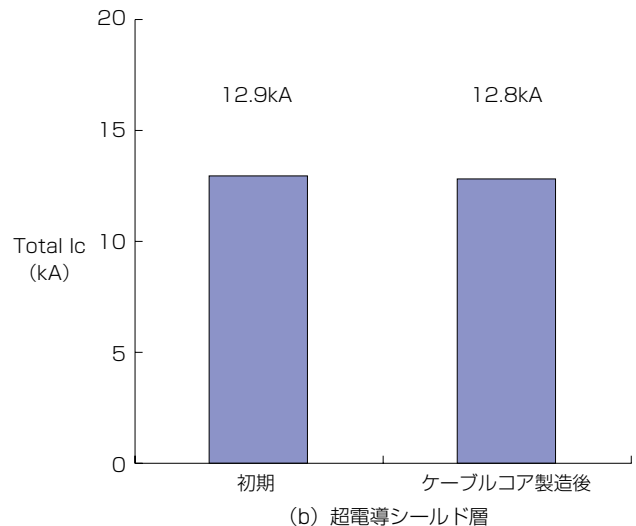
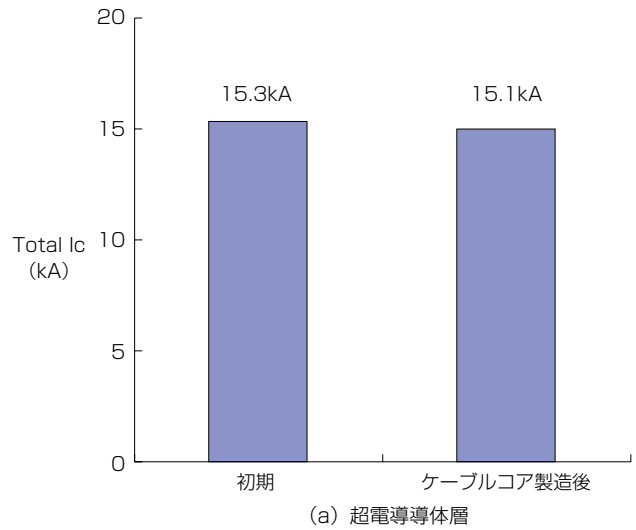


図6 ケーブルコア製造前後のトータル線材I_c測定結果
Fig. 6. Measurement results of the total I_c of all tapes before and after manufacturing cable core.

で各層ほぼ均流化されていることを確認した。また, 交流損失測定を77 Kにて行い, 目標損失2.0 W/m (@5 kArms) 以下を確認した (図12中の●印で示す)。

4. 交 流 通 電 特 性 の 検 証

4. 1 検証システム構成

ケーブル通電用終端接続部・冷却システム試験設備を有する約22 m長の試験線路を構築し、交流通電特性を検証した。図7に示す試験設備と線路を当社佐倉事業所内に構築し実施した。検証システムの全景を図8に、冷却システムの構成を図9に示す。

(1) 線路形態の特徴 線路形態の特徴としては、ケーブルに直径3 mの円弧部を設け、二つの通電末端を一つの断熱容器内に納める構造としたことである。これまで他所における試験実施例では、線路形態は通常二つの末端を独立した容器内に納めた構成となっている。今回このような一つ末端の線路設計を行った主な理由は次の三つである。①まず、超電導ケーブルのメリットの一つに、超電導シールド層には導体電流と逆位相のほぼ同

じ大きさの電流が誘導されケーブルコアの外部への漏れ磁界がないことがあげられる。この状態での導体・シールド損失を正確に把握する必要がある。そのためにはシールド回路のインピーダンスを支配する線路両端での超電導シールド層の短絡部を液体窒素中で極力短くし、インピーダンスを極力抑制することができた。②また、交流損失をあらかじめケーブル製造時に導体上に取り付けた電圧リードを容器外に引き出し、電気的交流四端子法にて測定した(図11参照)。図11の①と②の測定用電圧リードを容器外に取り出す際、極力同じルートで、極力短く取り出し、リード線への外部からの影響を少なくなるよう考慮した。③更に、二つの末端から一つの末端にすることで、システムのコストダウンと工期の短縮が図られた。

(2) 冷却システムの特徴 図9に示すようにケーブル線路を冷却するシステムは、液体窒素サブクール方式と

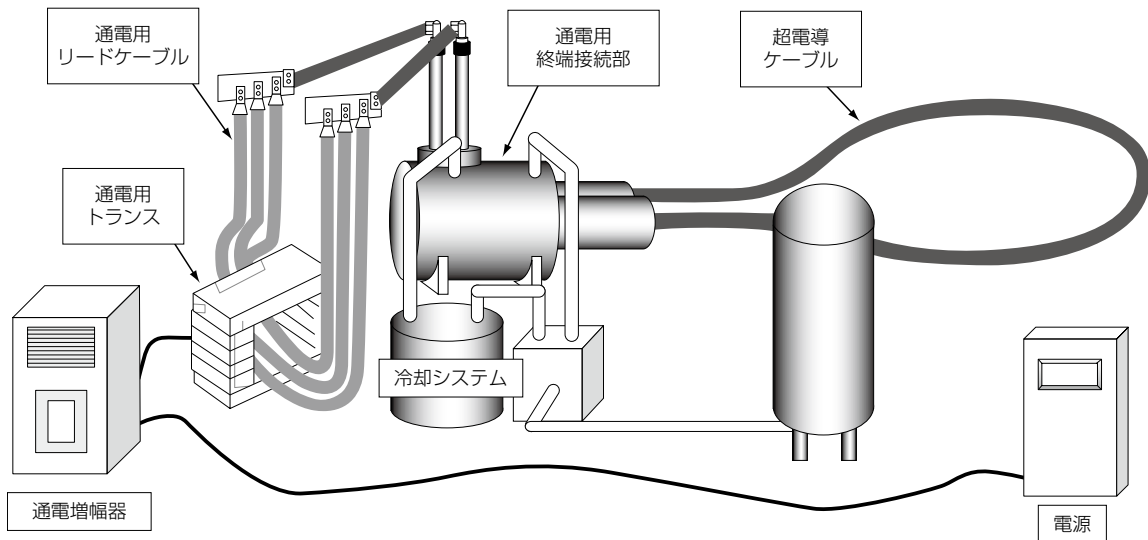


図7 通電試験線路レイアウト
Fig. 7. Layout of current the loading test line of HTS cable.

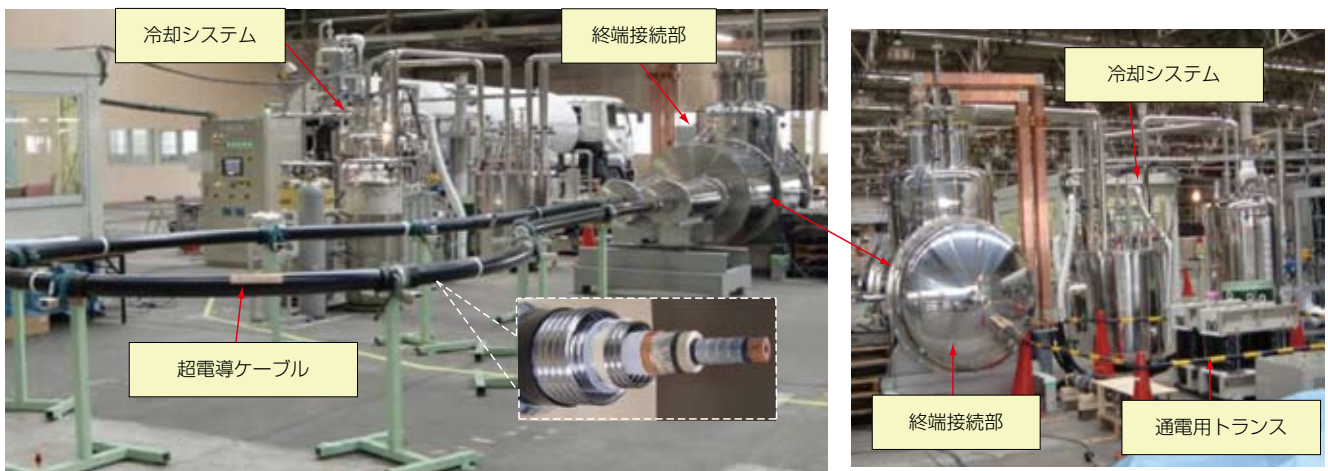


図8 検証システムの全景
Fig. 8. The whole view of verification system.

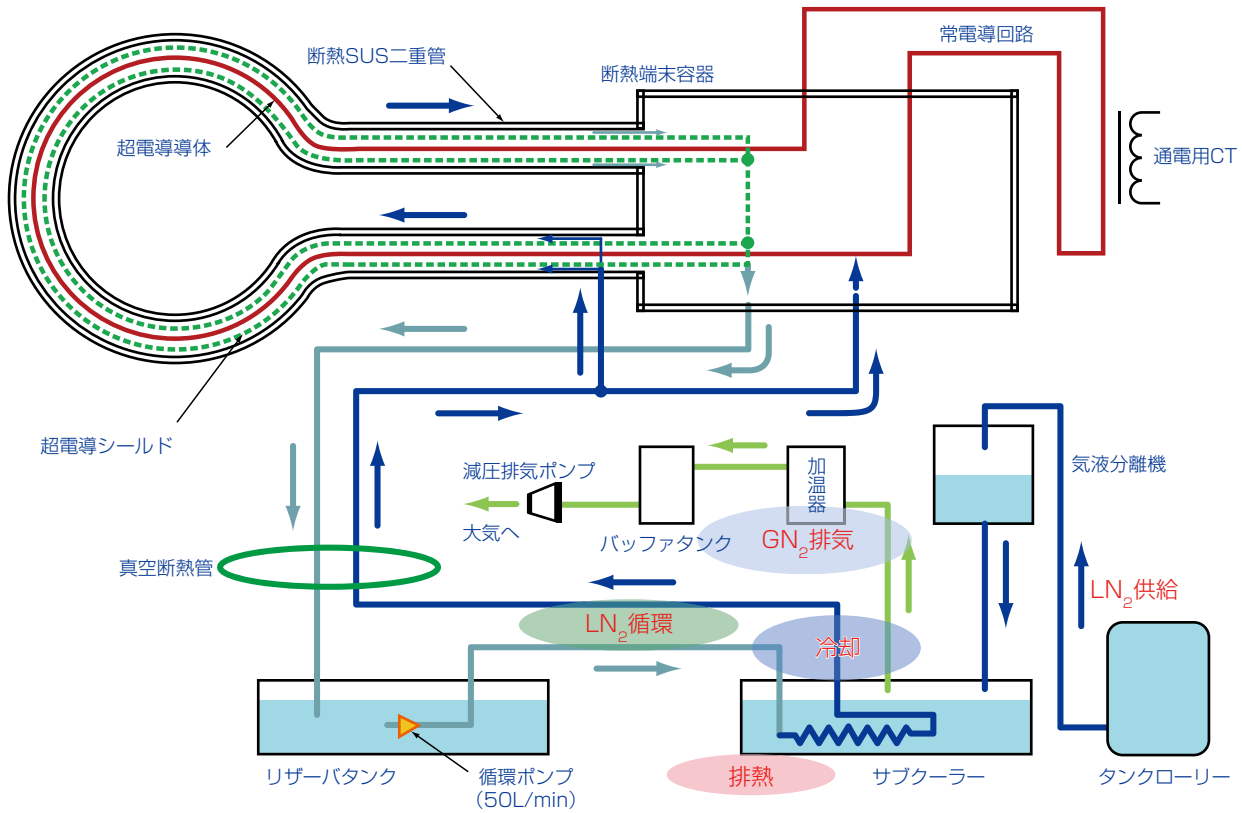


図9 冷却システムの構成
Fig. 9. Configuration of cooling system.

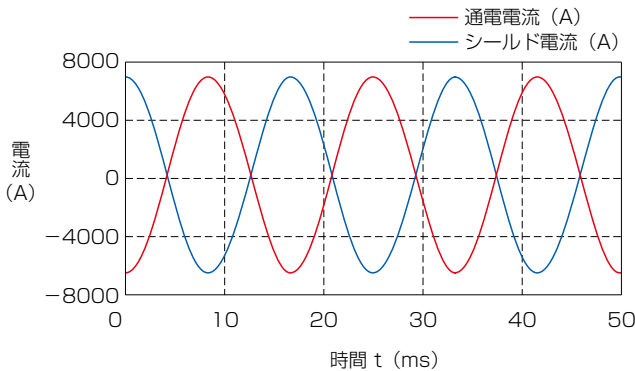


図10 導体電流とシールド誘導電流波形 (5kA 通電時)
Fig. 10. Conductor current and shield induced current (@ 5kA_{rms}).

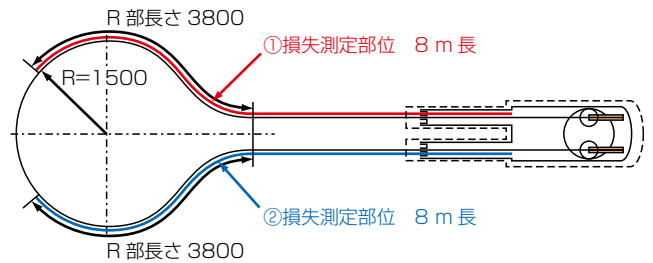


図11 交流損失測定部位
Fig. 11. Measurement portion of AC loss of HTS cable.

した。減圧排気で冷却したサブクーラ内の一次液体窒素によって、線路を冷却する二次液体窒素冷媒を冷却した後、線路に送り込み、循環した。超電導ケーブルと通電末端を確実に冷却するため、二次液体窒素は、流量を制御してケーブルと末端へ個別に供給した。更に、ケーブル側への供給口ではケーブル側と末端側の左右へ分流させるため、冷媒の左右への分流の流量比が最適になるよう流路抵抗を設計した。冷却仕様は「液体窒素温度 67 K ~ 77 K, 循環流量 最大 50 L/min, 最大冷却能力 2 kW」である。

ケーブル線路は、真空引き・窒素ガス充填を数回繰り返した後、蒸発冷却した窒素ガスにて徐冷した。そし

て、ケーブル線路からの排出ガス温度が -190 °C 前後になったとき、液体窒素を導入した。冷却開始から液体窒素温度に達するまでに要した時間は約 50 時間であった。

4. 2 交流通電特性

試験条件は、「交流通電試験 (非課電) 20 サイクル (1 サイクル = 8 h 通電 / 16 h 非通電), 通電電流 1 kA ~ 3 kArms, 運転温度 73 K」とし、初期は ~ 3 kArms, 20 サイクル後は ~ 5 kArms の交流損失を測定した。この導体通電時には超電導シールド層には導体電流の約 98 % の電流が誘導され、設計通りであることが確認された (図10参照)。このもとの損失測定部位は図11に示すように、8 m × 2箇所 (①と②) = 16 m とした。なお、

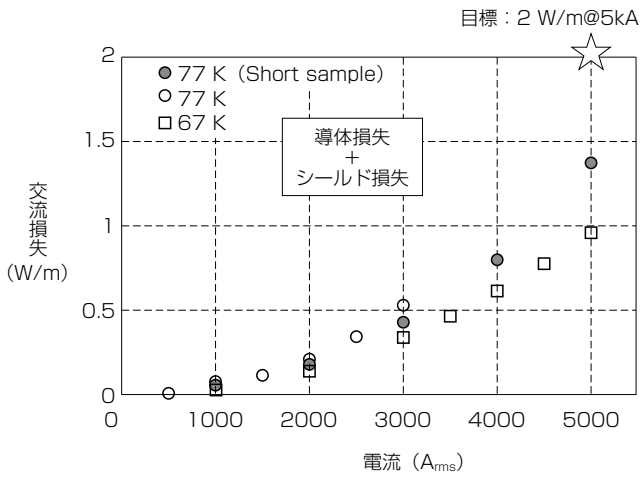


図12 交流損失測定結果

Fig. 12. Measurement result of AC loss of HTS cable.

測定部位8 m長は、測定器入力電圧制限を考慮したものである。交流損失測定結果を短尺コアの結果とともに図12に示す。77 Kにおいて今回の目標である2.0 W/m (@5 kArms) に対し十分小さいことを確認した。更に、67 Kにおいて目標損失値の半減を達成した。

5. むすび

当社の開発した世界最大級の $I_c = 500 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, s.f.) 以上のイットリウム系IBAD-PLD線材を用いて、66 kV級設計仕様の高温超電導ケーブルを作

製、全長22 mのケーブル試験線路を構築して、交流通電特性を検証した。液体窒素温度が実用的な77 Kにおいて、目標の大電流化・低損失化に世界で初めて成功した。これにより、高 I_c に伴う負荷率低減により損失低減が可能であることが実証されただけでなく、実線路の冷却システム設計における温度条件設定が可能となった。今後、これらの成果を生かし、超電導ケーブルのメリットである低電圧大電流化（大容量化）と低損失化をさらに進め、ケーブルシステムのコンパクト化を実現する所存である。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 大保ほか:「φ 20 cm室温ボア世界最大級イットリウム系5T高温超電導マグネット」, フジクラ技報, 第124号, pp. 37-45, 2013
- 2) Y. Iijima, et al.: "In-plane aligned YBa2Cu3O7-x thin films deposited on polycrystalline metallic substrates," Applied Physics Letters, Vol. 60, No. 6, pp. 769-771, 1992
- 3) M. Ohya, et al.: "Development of 66kV / 5kA Class "3-in-One" HTS Cable with RE123 Wires," Abstract of CSJ Conference, Vol. 84 (2011), p. 189