

イットリウム系高温超電導電力ケーブルの開発

Development of a YBCO High-Tc Superconducting Power Cable

向山 晋一*
Shinichi Mukoyama

八木 正史*
Masashi Yagi

平田 平雄*
Hirao Hirata

鈴木 光男*
Mitsuo Suzuki

長屋 重男*²
Shigeo Nagaya

鹿島 直二*²
Naoji Kashima

塩原 融*³
Yuh Shiohara

概要 高温超電導電力ケーブルは大容量送電、コンパクト、低損失及び低コストを同時に実現できる送電ケーブルであり、将来の送電ケーブルとして実用化が期待されている。特にイットリウム系超電導線材は、高い臨界電流と低コスト化が見込まれることより、適用線材として有望である。古河電工では、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「超電導応用基盤技術研究開発(第二期)」を、(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)を通じて受託し、イットリウム系超電導ケーブルの開発をスタートした。この中でイットリウム系超電導線材の超電導ケーブルへの適用性について調査し、イットリウム系超電導線材の有効性を確認した。更に高温超電導電力ケーブルの開発上重要な交流損失低減技術と、ケーブル構造及び中間接続部の開発を行い、10 m長の超電導ケーブルを試作し評価実験を実施した。その結果良好な特性を有することを確認した。

1. はじめに

現在世界を取り巻く環境問題の1つとして、地球温暖化がある。これまで人類発展の歴史の中で多くの温暖化ガス(CO₂)を排出してきており、そのために地球の温度も上昇していることは知られているところである。特に近年においてその排出量も急激に増加しているため、その対策について世界規模で話し合われ地球温暖化対策が行われている。

超電導はある物質を低温に冷やすことで電気抵抗がゼロとなる現象で、特に1986年に発見された高温超電導は、従来液体ヘリウム温度(-269℃)まで冷やさなければ発現しなかった超電導現象を、それより高温の液体窒素温度(-196℃)で実現できることから、冷却コストを低減でき広範な応用が期待されている。この高温超電導をケーブルや変圧器などの電力機器に適用することで消費電力を低減し、更に機器のコンパクト化と軽量化により、省エネ化を図ることができると期待されている。

古河電工グループは銅やアルミニウムを用いた送電線で、発電所から家庭やオフィスなど需要地までの安定したエネルギー伝送のために、高電圧化と大容量化を実現するケーブルの超高压技術や電力ロスを削減する技術、信頼性向上技術の開発を進め、その製品を世界各地に供給している。このような技術背景より、次世代の送電線として高温超電導を適用した超電導電力ケーブルの開発もいち早く実施している。特に高温超電導のうち、薄膜系超電導と呼ばれているイットリウム系線材(YBCO

線材)は、高い電流密度が得られること、高磁場においても電流低下が少ないことなどの特性上のメリットに加えて、コスト面でも線材コストを電流値で割った値では、銅線に匹敵する低価格を将来実現できるとして期待されている。

本論文では、超電導ケーブルの開発上重要な交流損失低減技術と、ケーブル構造及び中間接続部の開発について良好な成果が得られたことから、研究成果について述べる。

2. 交流損失低減に関する基礎研究

2.1 交流損失低減技術

超電導ケーブルに交流電流を流すと、経時的に反転する磁界により超電導体内に侵入した磁力線は移動しようとするが、一方超電導体内では磁力線を拘束する「ピン止め力」の存在により交流損失(ヒステリシス損失)が発生する。交流損失は超電導ケーブルを冷却する冷凍機の負荷となるため、経済性の観点からも交流損失低減が重要である。

図1に超電導ケーブル用に用いた薄膜構造のYBCO線材を示す。YBCO線材は基板上に中間層と超電導層を成膜して、更にその上に超電導層の保護を目的とした銀層と、過電流での焼損防止のための安定化層として銅テープを貼り合わせた構造となっている。超電導ケーブルの導体はこの超電導線材をフォーマ(巻芯)に螺旋状に巻きつけた構造となっている。テープ形状のYBCO線材の場合、線材の端部に生じるテープ面に対して垂直な磁界成分(図2(a))により、大きな交流損失が発生することが筆者らの研究で分かった¹⁾。YBCO線材で超電導ケーブルを作る場合、線材に加わる垂直磁場成分をいかに減らすかがキーポイントとなり、その対策として線材幅を狭くして図2(b)に示すように導体の形状を円筒形状に近づけ、更にギャッ

* エネルギー研究所 環境技術開発部

*² 中部電力株式会社

*³ (財)国際超電導産業技術研究センター

プを狭めて線材を巻くことで線材の端部でも垂直な磁界が低減できることが確認された¹⁾。

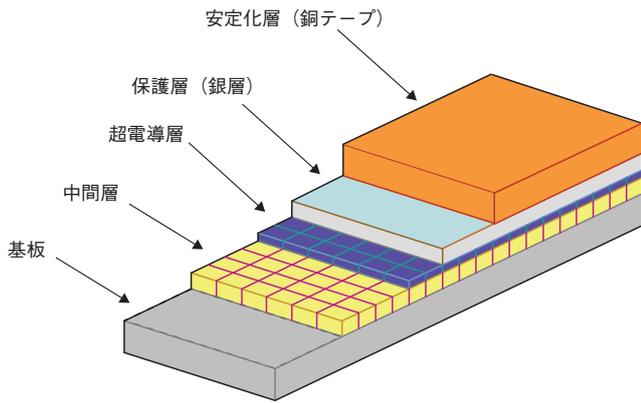


図1 YBCO線材の構造
Structure of YBCO tape.

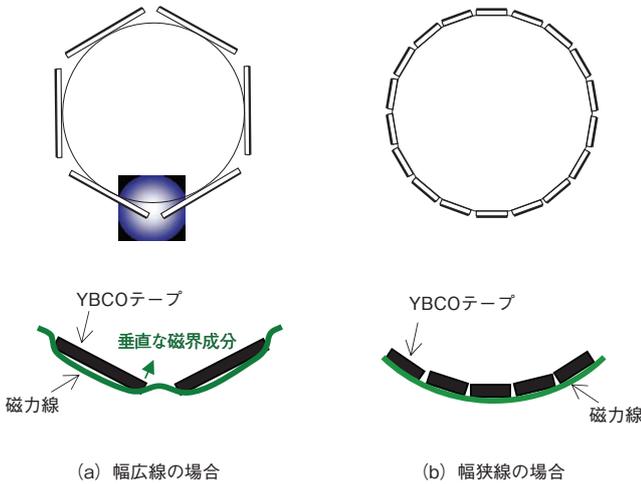


図2 巻線形態による磁界
YBCO tape winding form and magnetic field generation.

2.2 線材の幅狭化技術

YBCO線材を用いた超電導ケーブルの交流損失低減には、線材を幅狭化して断面真円状に配置することが効果的であることが分かった。線材の幅狭化の方法としてレーザーによる切断を開発した。レーザー切断は集光したレーザーを試料に直接照射して溶融させ、溶融金属をアシストガスで吹き飛ばすことによって切断する加工法である。レーザー切断はレーザーの照射によって溶けた部分だけを除去するため、切断幅がレーザーの集光径とほぼ同じ微小な幅で切断でき、熱影響が少なく線材の性能低下(臨界電流低下)を抑えることが可能である。またレーザー切断は銅テープを貼り合わせた線材でも銅テープとYBCOテープとを同時に切断することができ、銅複合した線材も細線化が可能である。図3にYBCOテープを切断するためのレーザー切断装置と、図4に10 mm幅の線材を5分割にした状態の写真を示す。実際に

レーザーにより1回の切断を行い、YBCO線材の切断後の臨界電流の低減率を測定した結果、切断前の臨界電流と切断後の2本の線材の臨界電流の合計の差は2~5%程度であった。これは切断部における熱的、機械的な性能低下への影響が限定されていることを示している。超電導ケーブル用のYBCO線材については、銅複合化した線材を本法で幅狭化を行っている。

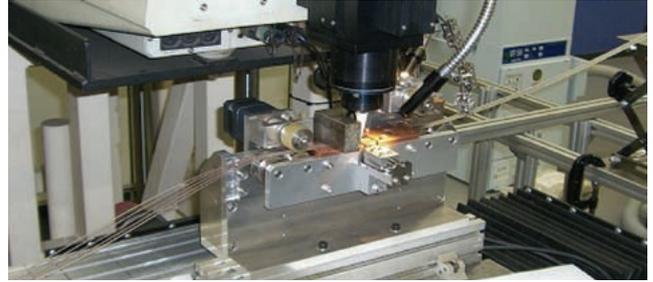


図3 YBCOテープを切断するためのレーザー切断装置
Laser cutting machine for YBCO tape.



図4 2 mm幅に分割したYBCOテープ
YBCO tape cut to 2-mm in width.

2.3 銅複合技術

超電導ケーブルの場合短絡事故が送電系統で起ると、ケーブルに通常流れている送電電流より10倍以上の大きな電流が数秒間流れる。短絡事故対策としては、フォーマに銅より線を用いて過電流をバイパスさせる方法がとられるが、フォーマとYBCO線材の抵抗比により短絡電流の一部がYBCO線材にも分し、臨界電流を超える電流が短時間流れる。一般のYBCO線材は高い電気抵抗をもつ基板と、絶縁体の中間層、超電導層及び薄い銀の保護層で構成されているため、臨界電流を超える大電流が流れると、薄い銀層だけでは電流を流しきれずに線材が燃えてしまうことがある。そこで対策としてYBCOテープに銅テープを複合し(図1, 図5), 過電流を銅テープ側にバイ

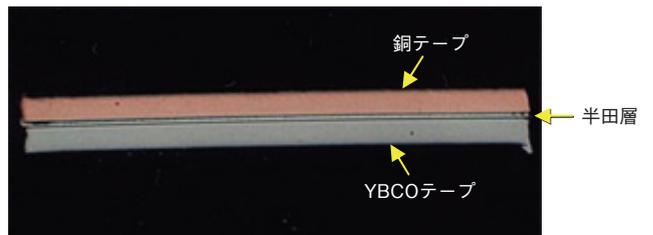


図5 銅複合テープ(幅 10 mm) 断面写真
Copper-composite YBCO tape of 2-mm in width (cross-section).

パスして焼損を防ぐ方法を考えた。銅複合の方法としては、YBCOテープと同じ幅で厚さが50 μmから100 μmの銅テープを半田で貼り合わせる方法を採用した。図6にはYBCOテープと銅テープを連続的に接合する装置を示している。500 m級のテープを200 m/hの速度で接合することが可能であり、更に環境を考慮した鉛フリー半田での接合に成功している。

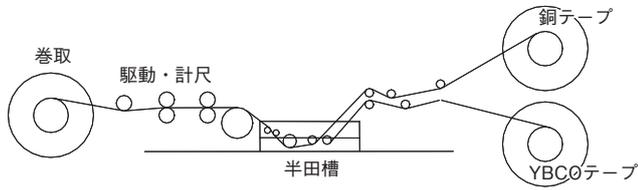


図6 YBCOテープの銅接合装置
Laminating machine for copper-composite YBCO tape.

3. 66/77 kV級三相一括超電導電力ケーブル

3.1 ケーブル構造

高温超電導ケーブルの構造は図7に示すように、フォーマと呼ばれる銅製のより線を巻芯として、テープ状の高温超電導線を多数本螺旋状に1層もしくは複数層巻きつけ超電導層を形成し、更にその上に半合成紙を巻きつけて形成した電気絶縁層、超電導線を巻きつけた超電導シールド層そして銅テープや絶縁テープを巻きつけて形成した保護層からケーブルコアが形成されている。このケーブルコアを液体窒素が流れる断熱管の中に、3本収納することで三相交流を流すことができる三相一括ケーブルとなる。超電導ケーブルを冷却するため、液体窒素を断熱管の内管と三本のケーブルコアの隙間に流すことになる。表1に66/77 kV級三相一括超電導電力ケーブルの仕様を示す。このケーブルは外径が133 mmと細いことから、150 mm管路に布設することが可能なケーブルとなる。更に66/77 kV級電力ケーブルの短絡電流容量31.5 kA 2 secに耐える必要があり、線材の銅複合化に加えて、フォーマに過電流を分流させるため

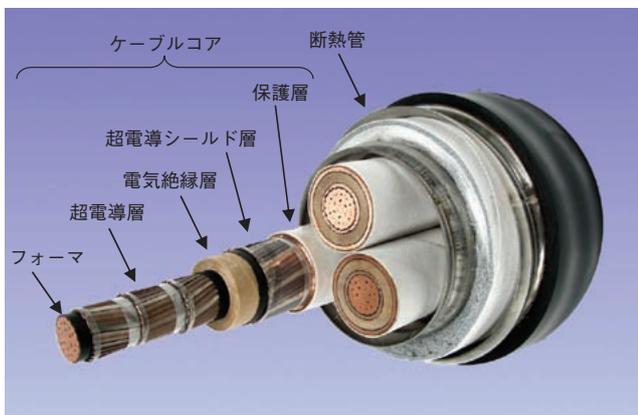


図7 66/77 kV級高温超電導電力ケーブル構造図(三相一括型)
66/77 kV High-Tc superconducting power cable (triplex type).

断面積200 mm²の銅より線導体を採用した。設計では短絡電流が流れても140 Kの温度上昇に抑えることができる²⁾。

表1 66/77 kV級イットリウム系高温超電導電力ケーブルの仕様
Specifications of 66/77 kV YBCO high-Tc superconducting power cable.

| 項目 | 構造 | 外径 |
|----------|------------------------------------|---------|
| フォーマ | 銅より線導体 断面積 200 mm ² | 18.3 mm |
| 導体層 | 3層-YBCOスパイラル巻き 2 mm幅YBCOテープ 82本 | 21.1 mm |
| 絶縁層 | 液体窒素含浸-半合成紙積層絶縁 | 35.5 mm |
| 超電導シールド層 | 単層-YBCOスパイラル巻き 2 mm幅YBCOテープ 50本 | 36.2 mm |
| 保護層 | 銅テープ層+絶縁テープ層 | 40.0 mm |
| 断熱管 | 真空断熱管 | 133 mm |

3.2 中間接続部の開発

超電導ケーブルは都市部の地中管路等に布設されて使用される。輸送や引入張力の制限上から長距離のケーブル線路においては、数百mのケーブル同士を地下マンホール内で接続していく必要があり、そのための中間接続部の開発が必要である。中間接続部の構造を検討するに当たっては、ケーブル全長にわたる送電において、通電上、課電上、液体窒素の流動上及び機械特性上弱点にならないようにする必要があり、そのために超電導線材同士を低抵抗で接続すること、十分な絶縁耐力を持つ補強絶縁体、十分な引張り強度を有するためのフォーマの接続、そして液体窒素が漏れることなく、またスムーズに流れる断熱管の接続が必要となる。図8に中間接続部の概略断面を、また図9には試作した中間接続部を示した。超電導線材の接続においては接続用の10 mm幅のYBCO線材を図10に示すように、ケーブルコア側の超電導線の上に、安定化層同士を向き合わせて半田接続する方法で低抵抗化を図った。

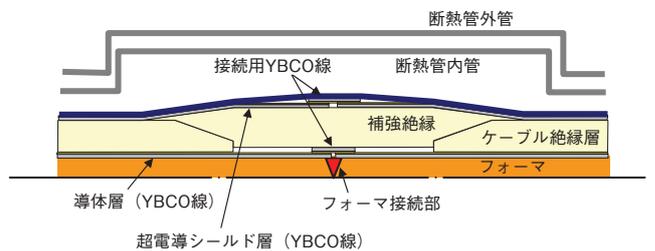


図8 超電導ケーブル中間接続部 概略断面図(2相分のケーブルコアは省略)
Schematic cross-section of normal joint for superconducting power cable. Cable cores for other two phases not shown.



図9 超電導ケーブル中間接続部
Normal joint for superconducting power cable.

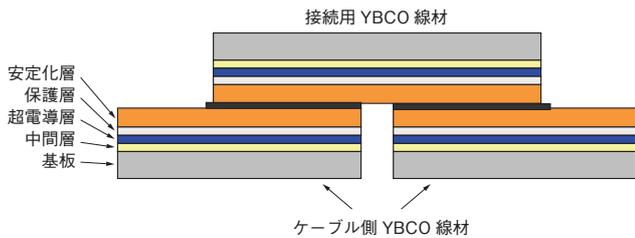


図10 中間接続部 YBCO 線材の接続構造模式図
Schematic of YBCO tape jointing for normal cable joint.

4. 10 m 超電導ケーブル試験

4.1 交流損失測定

銅テープとの複合とレーザによる幅狭化を行った200 m長の YBCO 線材を用いて10 m長の超電導導体を作製し、臨界電流と交流損失を評価した。YBCO 線材はハステロイテープに IBAD (ion beam assist deposition) により GZO ($Gd_2Zr_2O_7$) を中間層とし、更に PLD (pulsed laser deposition) 法により CeO_2 を酸化物キャップ層として形成したものに MOCVD (metal organic chemical vapor deposition) で YBCO 膜を成膜した IBAD-MOCVD 線材で、2本の200 m長線材を中部電力殿より提供していただいた³⁾。線材仕様と10 m長超電導導体の仕様を表2に示す。

表2 10 m長 YBCO 超電導導体の仕様
Specifications of 10-m long YBCO superconductor.

| 仕様 | |
|----------------------|---|
| フォーマ | 種類 : 銅より線導体 断面積 : 200 mm ² |
| 長さ | 10 m |
| YBCO 線材 (中部電力殿提供) | 種類 : IBAD-MOCVD 線材 構造 : 基板 : ハステロイ 0.1 mm 厚 中間層 : IBAD-GZO/PLD-CeO ₂ 超電導層 : MOCVD-YBCO 保護層 : Ag 25 μm 厚 安定化層 : 銅テープ 0.1 mm 厚 製造長さ : 200 m × 2本 テープ幅 : 10 mm 臨界電流 : I _c =100 A/cm |
| 導体構造 | テープ幅 : 2 mm 本数 : 82本 層数 : 3層 導体外径 : φ 21.1 mm |

作製した10 m長イットリウム系超電導導体の臨界電流 (I_c) 測定を、液体窒素の温度を変えて実施した。また交流損失を68 Kで測定し、1 kA 通電時0.090 W/mであることを確認した。臨界電流測定及び交流損失測定の結果をそれぞれ図11及び図12に示す。

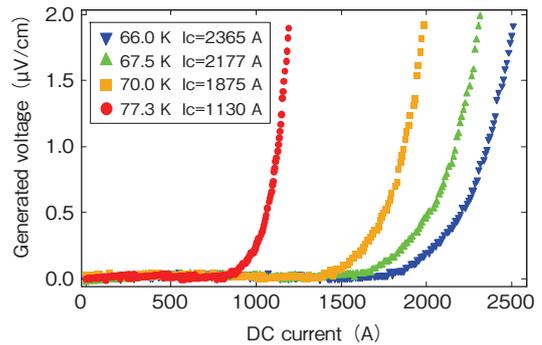


図11 10 m長 YBCO 超電導導体の種々の測定温度における臨界電流 (I_c) 測定結果
Measurement results of critical current (I_c) of 10-m long YBCO superconductor at different temperatures.

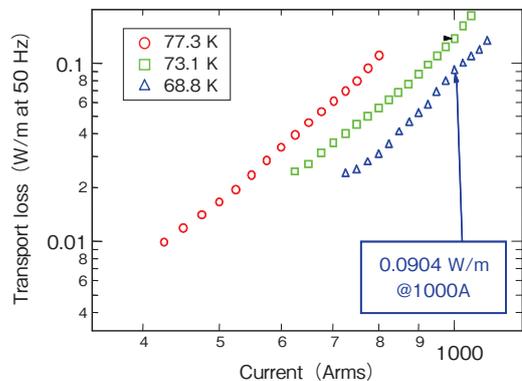


図12 10 m長 YBCO 超電導導体の種々の測定温度における交流損失測定結果
Measurement results of AC loss of 10-m long YBCO superconductor at different temperatures.

4.2 中間接続部の接続抵抗測定及び短絡電流試験

この10 m長ケーブルを開発した中間接続部を用い、住友電工殿が試作した10 m長ケーブルと接続して20 m長ケーブル(図13)とし、全長を液体窒素(77.3 K)に浸漬して試験を行った。試験項目としては接続部の接続抵抗と、31.5 kA 2秒の短絡電流を流した時の超電導ケーブルの耐性についての評価である。中間接続部の接続抵抗は導体の最外層上に電圧端子を40 cmの間隔で立て、直流電流と発生電圧から測定した。その時の電流-電圧特性を図14に示す。600 Aまでの発生電圧が線形な領域においては、接続抵抗は $0.005 \mu\Omega$ であり、発生電圧が $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ となる臨界電流相当の1.2 kAにおいても $0.034 \mu\Omega$ と非常に小さいことが確認できた。更に中間接続部を有する20 m長超電導ケーブルに、送電系統において事故時に想定される短絡電流(31.5 kA 2秒)を流したところ、導体直上ではほぼ設計値と同等の最大約80 Kの温度上昇となり、臨界電流の低下などのダメージが無い事が確認された。



図13 20 m長超電導ケーブルの短絡電流試験
Fault current test of 20-m long superconducting cable.

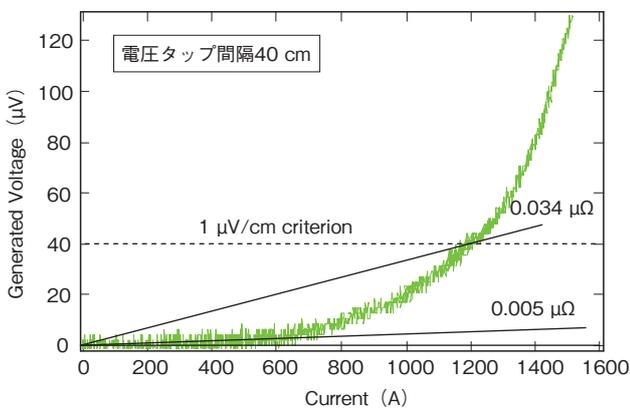


図14 中間接続部の抵抗測定結果
Measurement results of resistance of intermediate joint.

5. おわりに

高温超電導を用いた超電導ケーブルの開発においてより低損失、低コストの要求に応えるために、イットリウム系超電導線材を用いた超電導ケーブル開発に取り組んできた。イットリウム線材の適用性の確認を目的として、交流損失の低減、短絡電流への健全性、中間接続の要素技術確立のための開発を行った。交流損失低減に関してはレーザによる線材の細分化による縦磁界低減による交流損失低減を見出し、1 kA 通電で $0.09 \text{ W}/\text{m}$ の低交流損失を達成した。短絡電流対策としては線材への銅複合化やフォーマの銅より線導体の適用による安定化により、31.5 kA 2秒の短絡電流を線材にダメージなく流すことができた。そして66/77 kV級の中間接続部の開発においては、超電導ケーブルの低損失特性と遜色のない低抵抗接続の開発ができ、実用化に向けた見通しを明らかにすることができたと考える。

今後は超電導を利用することのメリットをより鮮明にするため、超電導ケーブルの機器開発をより具体化し、ケーブル必要性能及び線材要求仕様的目標値を明確にした開発が必要と考えている。そのために古河電工は、2008年よりスタートしたNEDOの「イットリウム系電力機器開発」プロジェクトに参画して、その中で世界最高の電圧階級となる275 kV級の超高圧超電導ケーブルの開発研究⁴⁾を実施していく予定でいる。

謝辞

本研究は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の超電導応用基盤技術研究開発(第II期)として、(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)を通じて実施されたものであり、10 m長超電導ケーブルの短絡通電試験の一部は、住友電工殿と共同で実施したものです。また本研究にあたり、京都大学の雨宮尚之教授及び早稲田大学の石山敦教授には、解析等において有益な助言をいただき感謝申し上げます。

参考文献

- 1) N. Amemiya, J. Zhenan, 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," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions*, **17** (2007), 1712.
- 2) A. Ishiyama, X. Wang, H. Ueda, M. Yagi, S. Mukoyama, N. Kashima, S. Nagaya and Y. Shiohara; "Over-current characteristics of superconducting model cable using YBCO coated conductors", *Physica C: Superconductivity*, **468** (2008), 2041.
- 3) M. Mori, T. Watanabe, N. Kashima, S. Nagaya, T. Muroga, S. Miyata, Y. Yamada, T. Izumi and Y. Shiohara: "Development of long YBCO coated conductors by multiple-stage CVD," *Physica C: Superconductivity*, **445-448** (2006), 515.
- 4) 藤原 昇: 超電導高効率送電技術, *電気評論*, **7** (2008).