

中部大学 や 超伝導・持続可能エネルギー研究センター **リ** 教授 No

□ 筑本知子 [※] Noriko Chikumoto

し はじめに

超伝導ケーブルは抵抗損失がゼロであり、高電流密度で電 力輸送が可能という特徴をもつことから、世界各国で開発が 行われている。しかしながら、従来の送電網の大部分が交流送 電であるため、今まではほとんどの実証研究が交流送電につ いてであった。実は、超伝導を交流で用いた場合には、その性 質上、どうしても誘導磁場などの複雑な物理プロセスによる 交流損失が発生する。超伝導ケーブルは超伝導状態とするた めに液体窒素等で冷却する必要があるため、この交流損失に よる発熱はそのまま冷却系統への負荷となり、大型冷凍機が 必要になる他、冷凍機の電力消費の増大につながる。したがっ て交流損失の低減化のため、素線である超伝導線を細線構造 にしたり、また、ケーブル構造そのものを工夫したり、と各メー カーによって様々な技術開発がなされてきているものの、原理 的に交流損失を完全にゼロにすることは不可能である。

一方、超伝導直流送電では交流損失の問題がないため、通 電損失が原理的にゼロになる。つまり超伝導は直流で用いた 方が、より大きなメリットがあるということである。

しかし、直流の場合においても、超伝導ケーブルの冷却に おいて環境からの熱侵入量が問題となり、それをいかに抑え るかが超伝導直流送電の実用化の鍵を握っている。

さて、ここで、その直流送電をどこに用いるかということ について考えてみる。例えば、現在導入が進められている太 陽光発電や電池は直流発電である。また、家庭内の多くの電 気機器(テレビ、パソコン、電話…)は交流のままでは使えな いことが多く、交流を直流に変換して給電している。2015年 11月には、電気メーカーが直流で稼働する家庭用エアコンの 販売を始めるなど、直流給電機器はさらに増える可能性があ る他、産業用としてもデータセンターや金属精錬など直流用 途は多岐にわたっている。つまり、電力の供給も需要も直流 の占める割合が高くなりつつある現状において、距離の大小 に限らず、発電側と消費側の双方を直接直流で結ぶことが出 来れば、交流/直流変換ロスがなくなるため、より効率的な ネットワークが構築できることが期待できる。

中部大学

センター長・教授

超伝導・持続可能エネルギー研究センター

山口作太郎

Satarou Yamaguchi

一方、高温超伝導体の発見から約30年が経過し、液体窒素 温度(77.3K、常圧)を超える臨界温度(T_c)をもつイットリ ウム系超伝導材料(T_c~90K)やビスマス系超伝導材料(T_c ~110K)についての線材化開発が進み、送電ケーブル応用 に使用可能な、高臨界電流、高強度で、均一性の高い長尺線 材が比較的容易に入手できるようになってきている。

以上のような背景から、ここ数年の間に、世界各国でも超 伝導直流送電に注目が集まり、実証試験の計画が相次いで立 てられている。中部大学では、2006年に直流超伝導送電シス テムとしては世界初となる、20m超伝導直流送電実験装置 (CASER-1)を作ったのを皮切りに、2010年1月には200m級 の超伝導直流送電実験装置(CASER-2)を完成させ、実用 化に向けた実証試験を行ってきた。

さらに、2013年度から経済産業省の委託により、「高温超電導 直流送電システムの実証研究」(通称:石狩プロジェクト)が開 始された。そこで、本稿では石狩プロジェクトでの超伝導直流 ケーブルシステム技術開発状況を中心に紹介させていただく。

2 石狩プロジェクトの概要

石狩プロジェクトは平成24年度経済産業省の委託による、 「高温超電導直流送電システムの実証研究」(平成25年度は「高 温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」とし て、中部大学、住友電気工業株式会社、千代田化工建設株式会 社、さくらインターネット株式会社の四社によるコンソーシア ム方式で開始された。その後、平成26年1月に四社は石狩超電 導・直流送電システム技術研究組合 (I-SPOT) を設立したため、 現在は技術組合が主体となり本プロジェクトを推進している。

本プロジェクトでは、石狩市石狩新港地域に回線1と2の2 つの回線からなる高温超電導直流送電システムを建設し、直 流送電の実証実験をおこなってきている。それぞれの回線の レイアウトを図1に示す。これらの回線には、ビスマス系超 伝導体 (T_c~110 K) の銀シース線材 (BSCCO線材:住友電 工製)を用いたケーブルコア(同軸ケーブル構造)(図2、表1) を用いた。回線1はさくらインターネットが保有する太陽光 発電所 (PV) とデータセンター間を繋ぐ500 mのケーブルシ ステム(地下埋設線路)であり、線路には、二カ所の曲がり部、 ーカ所のケーブルジョイントを有し、また、端末A側に冷却 システムを設置している。この発電(太陽光発電)から給電 (データセンター)までオール直流で繋ぐというのは、世界初 の試みである。一方、回線2は日本初となる二カ所のケーブ ルジョイント部を含む全長1kmの地上敷設線路で、将来の 長距離送電システム実現に向けた長距離液体窒素循環システ ムの検証や実用に求められる信頼性試験等に供する。この、 単長で1km、トータルで1.5kmの超伝導ケーブルシステムと いうのは、世界最長級の規模である。

これらの試作システムを実際に設置し、冷却・通電等の検 証試験を行うことにより、設置に係り蓄積した知見や実測 データ等を用いて、高温超電導ケーブル単体のさらなる低損 失化や低コスト化といった課題だけではなく、線路建設、冷 却、通電などの送電システムとしての運転・保守・管理、コ



図2 ケーブルコア構造



さて、将来の長尺ルートの布設を念頭におくと、①冷却時 のケーブルコアの熱収縮対策、②長距離冷媒循環システムの 構築、③ケーブルコアの接続の3つが重要な技術課題である。 そこで、これらの課題のうち、我々中部大学のグループが担 当した①と②について、次にもう少し詳細に述べる。

<□ 3 冷却時のケーブルの熱収縮対策

ケーブルコアは一旦冷却してしまうと温度変動を受ける ことはほとんどないが、最初の冷却過程で室温から約70Kま で、約200度という大きな温度変化にさらされ、その時の熱 収縮率は約0.3%となる。つまり、1 kmの線路においては、3 m ほど縮むことになり、その熱収縮応力は本プロジェクトのケー ブルコア仕様では約2.6tとなる。事前の引張り試験において、 この熱収縮応力に相当する力がかかっても、ケーブルコアの 健全性が保たれることは確認されているものの、実際の線路 においては摩擦等の影響等があることを考えると、安全のた

表1 ケーブルコア仕様

	回線 1	回線2
コア設計電流	5kA	2.5kA
電圧	20kV	20kV
lc值	≥6.6kA(内導体) ≥6.3kA(外導体)	≥4.3kA(内導体) ≥3.3kA(外導体)
内導体本数	12本+12本+13本	12本+12本
外導体本数	17本+18本	15本
超伝導線 DI-BSCCO [®]	TypeHT-CA (Ic≥180A)	内導体:TypeHT-CA(lc≧180A) 外導体:TypeHT-CA(lc≧220A)
絶縁層	PPLP	PPLP
外径	42mm	40mm



図1 回線1・2レイアウト図

めに熱収縮対策をきちんととっておく必要がある。

そこで、本プロジェクトでは、この熱収縮対策として、「可 動式端末容器」¹⁾と「ヘリカル変形法」²³⁾を採用した。可動式 端末容器とは端末に車輪をつけて前後に移動できるように したものである。ケーブル端末にロードセルを取付けて常に ケーブルに働く力を監視し、管理値を超えたら容器を移動し て力の低減化をはかる方法であり、中部大学の200mの実証 設備で実証済みの技術である。しかしながら、ケーブルシス テムの長距離化を念頭においた場合、可動式クライオスタッ トのみで熱収縮の影響を吸収しようとすると容器の移動距離 が長くなりすぎる上、長尺になるとケーブルコアと断熱二重 管との摩擦等のため端末移動だけでは全長の熱収縮・膨張に 対応しきれない可能性がある等の問題が出てくる。そこで、 ケーブルの各部で熱応力を吸収する方法として、今回、「ヘリ カル変形法」を開発し採用した。

「ヘリカル変形法」はケーブルを管路に敷設後、一旦液体 窒素にて冷却、熱収縮させた状態で両端固定後、昇温伸長さ せる方法で、伸長の過程でケーブルコアが自発的にヘリカル (螺旋)状に変形するような構造を採用することにより、その 後の冷却時の熱収縮の縮みしろを稼ごうというアイディアで ある(図3)。図4にヘリカル変形後の室温でのケーブルの状 態のX線撮影像を示すが、目論見通りヘリカル変形している ことが分かる。この原稿の執筆時点までに、すでに、回線1、 2で冷却試験を合計3回実施しており、このヘリカル変形法 が冷却・昇温時の線材の収縮・伸長の吸収に非常に有効であ ることが確認されている。

超伝導ケーブルシステムにおいては、超伝導性能の維持の ために全長にわたり冷媒の温度上昇を抑え、安定に循環させ ることが求められており、配管での熱侵入と循環冷媒の圧力 損失をいかに低くできるかが、今後の長距離化において非常 に重要な鍵となる。

さて、超伝導ケーブルの配管としてコルゲート管が広く用 いられているが、本プロジェクトでは、中部大学での実績を 踏まえて、侵入熱、圧力損失ともに小さいことが期待できる 直管断熱二重管を採用した²⁴⁾。図5に回線1の冷却系統図を 示す。液体窒素タンクに貯められた液体窒素はポンプにて ターボブレイトン式冷凍機(2kW)に送られ所定の温度(70 ~75Kの任意の温度)に冷却された後、端末容器Aを経てケー ブル管を流れる。そして端末容器B側で折り返し、リターン 管を流れて液体窒素タンクに戻される。本システムではター ボブレイトン冷凍機の他、スターリング冷凍機(1kW)も設備 したが、これは、補助的に用いることとした。このような冷却 系統のため、ケーブル管とリターン管の両方を同じ断熱配管 に入れる構造とした。回線1で用いた断熱二重管の写真を図 6、断面図を図7(左)に示す。上側が液体窒素を返すリターン



図3 ヘリカル変形法の手順。①ケーブルコア布設後片端を把持。②液体窒素を ケーブル管に導入し冷却。③液体窒素温度に達したらもう一端を把持。④液 体窒素を排出、全長を常温まで昇温。



図4 ヘリカル変形後のケーブルコアのX線写真。上はX線を地面に対して水平方 向に入射、下は垂直方向に入射して撮影した。数字は距離関係(cm)を示す。

管(ステンレス製、50A)、下側がケーブルを入れ液体窒素に て浸漬冷却するケーブル配管(ステンレス製、65A)であり、2 本の内管をもつ断熱二重管構造(内管と外管の間が真空断熱 層)となっている。これら内管の外側には断熱効率を高める ために多層断熱材(SI)を取り付けた。外管(250A)は亜鉛めっ き鋼管を用いることによってコストを抑えており、防食のた めポリエチレンライニングを表面に施している。回線2にお いては、さらに断熱効果を高めるため、アルミ製の輻射シー ルドを付けたタイプ(図7(右))を区間1に採用した。

これらの新断熱管構造を採用した結果、石狩の回線1、2で の断熱配管での熱侵入量(実測値)はシールド無しのタイプで は1.28~1.47W/m(リターン管:0.44~0.52W/m、ケーブル管: 0.81~0.98W/m)⁵⁾、シールド有りのタイプでは0.88 W/m(リ ターン管:0.85W/m、ケーブル管:0.03W/m)となっており、 シールド有はシールド無しタイプの約2/3まで侵入熱が削減 されている。またこれらは従来の同サイズの断熱配管の約半



図5 回線1の冷却系統図。図中のTBはターボブレイトン冷凍機、 STはスターリング冷凍機である。模擬ヒーターは冷却系の試 運転試験のみに用いる。



図6 断熱二重管の外観写真



図7 断熱二重管の構造

分以下となっている。ここで、特に注目すべきは、シールド付 きではケーブル管での熱侵入が非常に抑えられており、回線2 区間1の約470mの両端での温度差はわずか約19mK(液体窒 素の循環速度:30L/min、非通電時)となっていることである。 この数字から、仮に超伝導ケーブルコアの温度上昇の許容範 囲を1K以内とすると、温度計の誤差を考えても単純計算で冷 凍機を10~20kmぐらいの間隔で設置すれば良いことが示唆 され、実用可能性が一気に高まったといえる。

一方、液体窒素循環における圧力損失は、回線1 (500m) と 回線2 (1km) でそれぞれ、ケーブル配管について約9kPa、約 11kPa、リターン配管について約9kPa、約18kPaであった(液 体窒素の循環速度:30L/min)⁵⁾。この数字は従来の同サイズ のコルゲート管での値の約1/4となっている。ところで、ケー ブル長Lに対するポンプの吐出圧を ΔP 、冷媒の流速をv、配管 入口出口温度差を ΔT 、単位長さ当たりの熱侵入量をqとする と、 ΔP は v^2 Lに比例する量となり、また必要冷媒流量はv =AqL/ ΔT (Aは定数) となるため、 $\Delta P \propto L^3$ となる⁶⁾。我々のシス テムでは吐出圧0.1MPaのポンプで循環をおこなっているが、 このスケール則による議論から、10km~20km程度の超伝導 ケーブルの冷媒循環が技術的に可能であることが示唆される。

以上の他、安定な冷媒循環に関わることに冷凍機の選定が あげられる。従来、液体窒素の冷却に用いる冷凍機として、 スターリング冷凍機が広く用いられてきたが、メンテナンス 間隔が1年(又は8,000時間)と短くその期間冷凍機を停止し なければならないことが課題であった。そこで、本システム においては、メンテナンス間隔が3年程度と長いターボブレ イトン冷凍機を採用し、スターリング冷凍機を補助的に用い る構成とした。ターボブレイトン冷凍機は本プロジェクト開 始直前に販売開始されたもので、今回世界で初めてケーブル システムに採用することになった。

5 低熱侵入型電流リードの開発

さて、超伝導ケーブルは常温環境にある電源及び負荷に接 続する際、必ず端部で常温のケーブルと電流リードを介して



209

接続する必要がある。ここで、問題になるのは、この電流リー ドを通じての熱侵入である。電流リードには良導体である銅 などの金属材料が使われるのが一般的である。電流リードで の抵抗損失をできるだけ抑えるためには電流リードの径を大 きく、また長さを短くして抵抗を下げる必要があるが、その一 方で、良導体は一般に高い熱伝導度を有するため、熱侵入の 抑制の観点からは、径は小さく、長さはできるだけ長い方が 望ましい。この二つの観点から電流リードの長さと断面積を 最適化した場合には、1kAの通電あたりの熱侵入量は約50W 程度になる。回線1においてこの最適化された銅電流リード を用いた場合には、定格電流値5kAを通電した時の端末の熱 侵入量は合計で約1000 Wとなる。これは、配管全体の熱侵入 量が約700Wであることを考えると無視できない量である。

この端末部からの熱侵入の低減のため、中部大学のグルー プではペルチェ素子を用いた低熱侵入型電流リード(以下、 PCLと略記)の開発を長年行ってきた^{7,8)}。PCLの構成を図8 に示すが、ビスマステルル化合物からなるペルチェ素子を上 部の銅リードと下部の銅リードの間に挟んだ構造となってい る。ペルチェ素子にはキャリアの種類によりn型とp型があ り、n型に電流を流すと電流と逆方向に熱流が生じるのに対 し、p型に電流を流すと電流方向に熱流が生じる。従って、入 力側にn型PCL、出力側にp型PCLを用いることにより、低 温側(超伝導ケーブル側)から高温側(常温側)に熱を汲み上 げることが出来、侵入熱の低減化が図れる。

そこで、本システムにおいては、電流導入部にPCLを採用 し)、端末部からの熱侵入の低減を図った。図9に回線1に用 いたPCLについて、N型PCL-P型PCL一対あたりの熱侵入 量Qの電流依存性を評価した結果を示す。Qは、低電流領域 ではほとんど変化はないが、さらに電流を増加するとQは 増大する。これはPCLでの抵抗損失(ジュール発熱)が電流 の二乗で増大するのに対し、ペルチェ効果によるペルチェ熱 (吸熱)が電流に比例して増大することを考えると定性的に 説明できる。

さて、実際のケーブルシステムにおいては、PCLを複数対 組み込むことになり、その数はシステムの設計電流によるた



図8 ペルチェ電流リードの構造

め、最適設計を行う上で、1kAあたりの熱侵入量を検討する ことが有効である。システムとして流すトータルの電流量が 決まっている場合、1本あたりに流す電流量を小さくすれば、 その分必要となるPCLの本数は多くなる。そこで、PCL一対 あたりの熱侵入量Q(i)(i[kA]はPCL1本に流れる電流値) とシステムの設計電流の効果を加味し、全電流量に対する kAあたりの熱侵入量(PCL1本あたり)Q(i)/i/2を計算し、 図9に規格化熱侵入量としてプロットした。図よりPCL一本 あたりの電流値が125Aあたりで最小値30.9W/kAとなる。 回線1では定格電流5kA通電時には、内導体については一本 あたり約135A、外導体では約142A流れることから、全端末 で約620Wの熱侵入量となり、銅の電流リードよりも約4割 熱侵入が低減化されていることがわかる。

6 工事と運転試験の状況

ケーブルシステムの敷設にあたって、断熱二重管は約12 m 長を1ユニットとして工場製作し、各ユニットを現地で溶接 により連結・敷設を行った。(工事の様子は石狩市のwebサ イト (http://benri.i-eris.tv/chodendo/chodendo.html) にて 公開中。)回線1については2015年4月末、回線2については 2015年10月末までに工事は完了し、今までに冷却試験を回線 1では2回、回線2では1回実施している。回線1では通電試験 も実施済みで、設計電流5 kAの通電確認、臨界電流試験(*I*_c >6kAを確認)、定格電流通電試験(600 A×8日間)、PVデー タセンター間送電試験(12日間)等を実施し、いずれの場合 も超伝導状態で安定に通電できることを確認している³⁵⁾。回 線2については2016年度に通電試験を計画中である。

2 世界の高温超伝導直流送電の 開発状況と今後の展開

図10に現在までの超伝導直流送電に関する世界各国の開 発状況をまとめるが、石狩プロジェクトがスタートしたのと



前後して、国内では鉄道総研で鉄道き電用直流ケーブルの試 験が開始され、海外ではロシアのサンクトペテルブルグや韓 国の済州島において、電力会社を中心に実証施設の建設が開 始されている。ここに記載した以外にもヨーロッパや米国に おいて、データセンター内の配線への超伝導応用が検討され ている。さらに、2016年度より開始予定のNEDO(新エネル ギー・産業技術総合開発機構)プロジェクト「高温超電導実 用化促進技術開発」にも超電導直流送電に関して、送電技術 の実証や鉄道き電線用のシステム開発などが盛り込まれてお り、実用化に向けた研究開発がさらに加速されると思われる。

一方、電力送電や鉄道以外の応用として、最近、航空機へ の応用が注目されつつある。というのは、航空機の電化が急 速に進んでいる中、例えばボーイング787では従来の同規模 の航空機に比べて10倍近い電力を消費するため、航空機内の 配線の重量が無視できない状況となっており、今後の軽量化 が求められているためである。このような用途に、高電流密 度が得られ、コンパクト化が可能な高温超伝導直流ケーブル は適していると考えられる。その際冷却が問題となるが、電 源重量のある冷凍機は用いず、液体水素を搭載し、燃料電池 によって電力に変換すると同時に超伝導機器の冷却も行うと いったことも検討されている。

8 おわりに

高温超伝導発見から30年。高温超伝導線材の量産技術も 確立しつつあり、今回の実証試験を経て、直流超伝導送電シ ステムの実用化まであと一歩まで来たと実感している。特に 実用化の鍵を握る冷却システムに関しては、10年以上にわた る中部大学における研究開発がようやく実を結び、今回の石 狩プロジェクトにおいて、従来と比較して格段に低い熱侵入 量および液体窒素循環の圧力損失のデータを得ることがで き、実用レベルとなる数10kmクラスのケーブルシステム実 現の見通しがたったといえよう。しかし、世の中に出てイン フラの一端を担えるようになるためには、システム、信頼性、



図10 世界の超伝導直流送電システムの開発状況

コスト、制度面等まだまだ沢山の課題があり、本システムの ような大型のシステム開発においては、あらゆる分野の知識 を総動員してすすめる必要があると常々考えている。この記 事を機に、是非多くの方に超伝導技術に興味をもっていただ き、それぞれの専門分野からのお知恵をいただければ幸甚で ある。

謝辞

本稿で紹介した石狩プロジェクトについての内容は、経済 産業省の委託により石狩超電導・直流送電システム技術研究 組合のメンバーとの共同研究として実施したものであり、千 代田化工の腰塚博美、田中昌司、大石前次、石山功太郎氏、住 友電工の林和彦、増田孝人、湯村洋康氏、さくらインターネッ トの田中邦裕、澤村徹氏、中部大学の渡邉裕文、浜辺誠、イワ ノフ・ユーリ、高野廣久、井上徳之氏の他多くの関係者の方々 のご協力とご支援をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) S.Yamaguchi, T.Kawahara, M.Hamabe, H.Watanabe, Y.Ivanov, J.Sun and A.Iiyoshi : Physica C, 471 (2011), 1300.
- 2) S.Yamaguchi, H.Koshizuka, K.Hayashi and T.Sawamura: IEEE Trans.Appl.Supercond., 25 (2015), 5402504.
- 3) N.Chikumoto, H.Watanabe, Y.V.Ivanov, H.Takano, S.Yamaguchi, H.Koshizuka, K.Hayashi and T.Sawamura: IEEE Trans.Appl.Supercond., to be published. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2016.2537041
- 4) H.Watanabe, Y.V.Ivanov, M.Hamabe, N.Chikumoto, H.Takano and S.Yamaguchi : Physics Procedia, 67 (2015), 239.
- 5) H.Watanabe, Y.V.Ivanov, N.Chikumoto, N.Inoue, H.Takano, S.Yamaguchi, K.Ishiyama, Z.Oishi, H.Koshizuka, M.Watanabe, T.Masuda, K.Hayashi and T.Sawamura : submitted to Proceeding of ICEC26-ICMC2016 conference, Conference Series : Materials Science and Engineering, (MSE)
- 6) Y.Ivanov, H.Watanabe, M.Hamabe, T.Kawahara, J.Sun and S.Yamaguchi : Physics Procedia, 36 (2012) 1372.
- 7) S.Yamaguchi, T.Yamaguchi, K.Nakamura, Y.Hasegawa, H.Okumura and K.Sato : Rev.Sci.Instrum., 75 (2004) 1, 207.
- S.Yamaguchi, M.Hamabe, I.Yamamoto, T.Famakinwa, A.Sasaki, A.Iiyoshi, J.Schultz, J.Minervini, T.Hoshino, Y.Ishiguro and K.Kawamura : J.Phys., Conf.Ser., 97 (2008), Art.ID.012290.

(2016年3月22日受付)