

**Techno Scope**

# 実用化が目前に迫る 高温超電導直流送電システム



石狩プロジェクトでは、太陽光発電所からデータセンターへ送電する500 mの「回線1」(写真左)と、将来の長距離化に向けた冷却循環やケーブル接続技術の検証をする1,000 mの「回線2」(写真右)が建設された。  
(写真提供: 石狩超電導・直流送電システム技術研究組合)



極低損失で長距離送電が可能な高温超電導ケーブルを用いた直流送電システムは世界的に関心が高まっており、各国で実証試験が進められている。将来的には、地球規模の電力ネットワーク構築の基礎技術になると期待される高温超電導直流送電システムの技術開発の動向と未来を展望する。

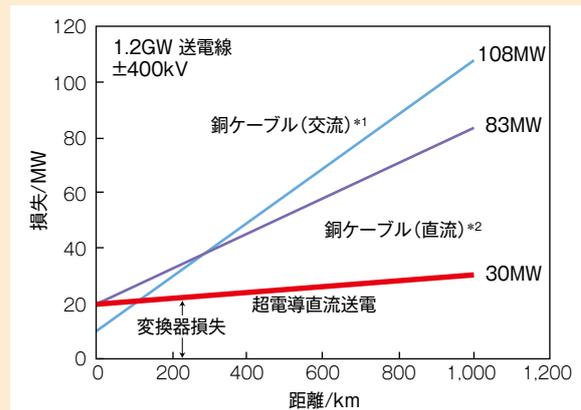
## 注目が高まる直流送電技術

電気事業連合会によれば、日本で発電される電力の約5%が送電ロスにより失われているとされている。これは、110万kW級の原子力発電所で約6基分の年間発電量に相当する。この送電ロスを抑えるために、発電所で発電された電力は27万5,000Vから50万Vの超高電圧に変電されて、送電されている。また、いっそうの送電ロスの低減と大電力需要に応えるために、日本の110万Vの超高電圧送電技術を国際標準化しようという動きもある。

この送電ロスの低減に効果を発揮すると期待されているのが、電気抵抗がゼロになる超電導現象を利用した超電導送電技術である。特に、高温超電導材料を用いる場合は、液体ヘリウムを使用せず、液体窒素温度(-196℃)での運用が可能のため、実用化に向けた研究が進められている。

通常の送電方式と同様に、超電導送電にも交流方式と直流方式がある。交流による超電導送電では、2007年度から2013年度まで行われた新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」が、既存の電力系統と連系した実証試験を行っている。

●送電方式による送電ロスの比較例(図1)



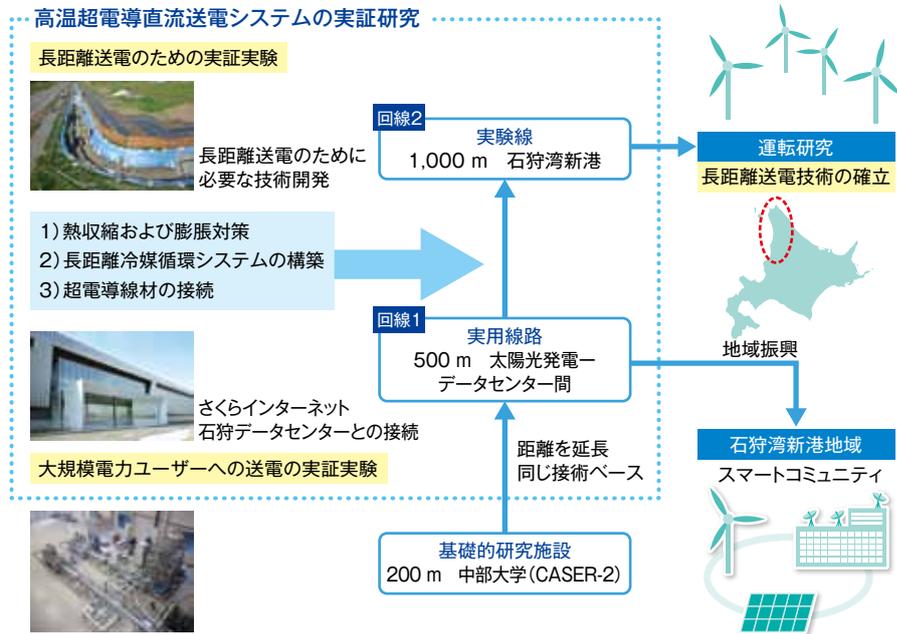
\*1: 銅裸線 6条、1,200 mm<sup>2</sup>/本の場合  
\*2: 銅裸線 2条、1,620 mm<sup>2</sup>/本の場合

大型の原子力発電所の定格出力に相当する1.2 GWの電力を1,000 km送電する際の損失は、銅ケーブル(交流)で108 MW、銅ケーブル(直流)で83 MW、超電導直流送電では30 MWと見積もられている。

(ABB社のデータを元に、中部大学が作成)

しかし、交流を使用する場合、原理的に避けることのできない損失が発生する。いわゆるヒステリシス損などに由来する交流

## ●石狩プロジェクトの概要(図2)



石狩プロジェクトでは、2つの実証システムが建設された。回線1(実用線路)は、500 mの地下埋設線で、太陽光発電所とデータセンターを直結して、送電を行う。

地上に設置された回線2(実験線)は1,000 mで、2カ所の接続部を持つ。気温の変動などによる、超電導ケーブルの接続部の健全性評価も、石狩プロジェクトの目的の一つになっている。

(写真提供: 石狩超電導・直流送電システム技術研究組合)

損失である。交流損失を低減するためには、超電導線材の細線化が有効であることが知られている。しかし、Bi系超電導材料の場合には、超電導材料と銀シースの間に絶縁層が必要なため、構造が複雑になり、細線化が難しいという課題がある。テープ線材として利用されるY系超電導材料の場合は、テープの切断面が劣化するため、やはり細線化には課題がある。

これに対して、交流損失の発生しない直流方式(図1)では、現在、実用化されている超電導マグネット用の超電導線材を使用することが可能である。また、電圧降下がないため、直流電源施設と直流需要施設を直結することが可能になり、送電の際の昇圧降圧による変換ロスを原理的にゼロにすることも可能である。

また、電力利用の面でも、直流電流は使いやすいというメリットもある。超高压で送電された電力は、変電所などを通じて徐々に降圧され、最終需要設備で直流に変換されて使用されることが多い。しかし、直流送電であれば、直交変換による変換ロスの削減も可能になる。

さらに、発電所から需要地までは、架空線による送電が行われる例が見られるが、鉄塔の建設などで大規模な自然破壊と莫大な工事費が必要になる。これに対し、埋設が可能な超電導送電であれば、鉄塔などの設備は不要になる。さらに送電設備の用地面積も架空線と比較して50分の1に抑えることが可能になる。交流送電でも共同溝を利用した送電などで、送電線の埋設は可能であるが、直流超電導ケーブルを使用した場合、必要となるケーブルの断面積は交流ケーブルよりもコンパクトであり、設置コストを抑えることが期待できる。

## 世界初の試みが行われている石狩プロジェクト

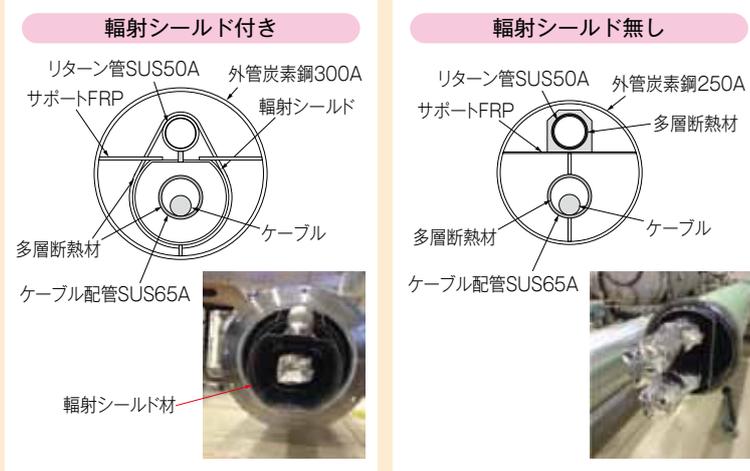
経済産業省の委託事業として平成24年度から「高温超電導直流送電システムの実証研究(通称:石狩プロジェクト)」が開始されている(図2)。このプロジェクトでは、北海道石狩市の石狩新港地域に高温超電導直流送電システムを建設して、直流需要施設と直流電源施設を結び、直流送電の実運用システムの構築と今後の課題抽出を行うことが目的である。すでに、送電距離が500 mの「回線1」と、1,000 mの「回線2」が敷設され、2015年9月には送電実験に成功している。

回線1は、直流電源施設である太陽光発電設備と、直流需要施設であるデータセンターを結ぶもので、実際のユーザーと連携することで、実運用システムに関する有益な知見を得る狙いもある。

回線1が国内で例のない公道への埋設により敷設されているのに対し、回線2は地上に敷設されている。これは、超電導ケーブルを冷却・保護する断熱管の状態と、途中2カ所に設置されたケーブルの接合部を確認するためである。

2016年には、韓国電力の済州島プロジェクトが直流ケーブル500 m、交流三相ケーブル1,000 mの超電導送電システムを完成させている。また、ロシアのサンクトペテルブルクでは2,500 mの超電導送電プロジェクトが計画中である。石狩プロジェクトはこれらに匹敵する世界でも最長級の規模である。これに加えて、石狩プロジェクトではそのほかにも随所で世界初の試みが行わ

●断熱二重管の構造の模式図(輻射シールド付きと輻射シールド無し)(図3)



超電導ケーブルの冷却には液体窒素が用いられ、冷却に用いられた後は、断熱二重管内の「リターン管」により冷却機に戻される。

断熱二重管への熱の侵入は、冷却コストを押し上げるため、超電導直流送電の実用化のためには、効果的な断熱機構が不可欠になる。従来まで、液体窒素が流れる配管には、その表面に人工衛星にも使用されている多層断熱材を使用していた。石狩プロジェクトでは、超電導ケーブルを納めた配管をアルミニウム製の輻射シールドで覆い、さらに多層断熱材を使用することで、断熱効果を向上させている。輻射シールド無しの場合の1.3~1.5 W/mだった熱損失は、この工夫により0.7~1.0 W/m(性能試験結果より)に低下している。従来の同サイズのケーブルにおいては、熱侵入は少なくとも2 W/m以上であり、輻射シールド無しの場合でも損失はかなり抑える構造になっている。

(資料提供: 中部大学)

れている。超電導ケーブルの熱収縮対策、断熱管の熱侵入防止、ケーブル長距離化など、さまざまなテーマで実証が行われているが、それぞれの詳細は連携記事に譲り、ここでは、断熱管と超電導ケーブルに施された新しい試みについて紹介する。

超電導送電を行う場合、超電導ケーブルを冷却する必要がある。そのため、超電導送電による送電ロス、ケーブルによる損失ではなく、超電導状態を維持するための冷却に必要なエネルギーがそのほとんどを占める。そのため、熱侵入を防ぐことは、送電ロスの削減に直結することになる。石狩プロジェクトでは、断熱管に直管式断熱二重管を採用することで熱侵入を抑えることに成功している(図3)。亜鉛めっきされた炭素鋼の外管の中には、2本のステンレス鋼製の内管が納められている。一方の内管(ケーブル配管)には超電導ケーブルが納められ、液体窒素で冷却されており、液体窒素は再利用するために循環されている。もう一方の内管(リターン管)は冷却機へ液体窒素を戻すために使用され、こちらには超電導ケーブルは納められていない。外管と内管の間の空間を $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5}$  Pa程度

まで減圧することによって、熱侵入を抑えている。石狩プロジェクトではさらに、アルミニウム製の輻射シールドを用いることで、輻射シールドの無い従来タイプと比較して、熱侵入を約半分まで抑えている。なお、多層断熱材は、人工衛星などで使用されているものと同等の製品が用いられている。

液体窒素温度で運用される超電導送電の場合、ケーブルの熱収縮・熱膨張に対する対策も重要である。超電導ケーブル1 kmについて、約3 mの熱収縮があるといわれ、高温時と低温時では最大で約3 tの引張荷重がかかると見積もられている。これはケーブル性能の低下や、最悪は断線に繋がる荷重である。

これを避けるために石狩プロジェクトでは、ヘリカル変形とよばれるケーブルコアを螺旋状に変形させる処理を行うことにより熱収縮・熱膨張を吸収させている(図4)。またケーブルの終端が前後に移動できるようにしている。これらの工夫により、超電導ケーブルへの荷重は1 t以下にまで抑えられている。(詳細については、連携記事を参照)

究極のグローバル送電システムへの期待

●超電導ケーブル(回線1)の構造(図4)

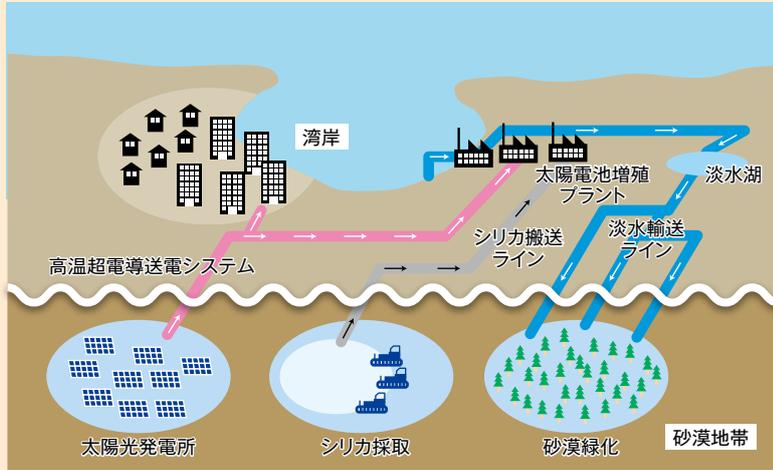


同軸ケーブルの構造を採っており、中心に支持体である銅製の「フォーマ」があり、クッション層、3層の超電導体層、絶縁層、2層の超電導体層、と層状の構造になっている。(資料提供: 中部大学)

石狩プロジェクトは現在、順調に実証試験が進められているところであるが、今後はさらに送電距離を延伸する計画もある。北海道には風力発電や太陽光発電の適地があるが、都市部に送るための基幹線が十分整備されていないという実情がある。そこで風力発電所のある稚内方面に200 km延伸し、超電導直流送電を行おうというものである。

また、北海道には、LNG(液化天然ガス)パイプラインの敷設が計画されている。超電導送電の実用化のためには冷却コスト

●超電導直流送電が計画されているサハラソーラーブリーダー計画(図5)



「サハラソーラーブリーダー計画」は砂漠地帯に太陽光発電所を建設して、発電するだけではなく、砂漠資源であるシリカ(SiO<sub>2</sub>)を活用した産業育成も含めた壮大なプロジェクトである。太陽光発電による電力エネルギーにより、砂漠からシリコンを合成することで、シリコン工場と太陽光発電所を2年ごとに倍増させていく計画で、アルジェリア、チェンジアなどとの国際共同研究がスタートしている。

(サハラソーラーブリーダー計画のウェブサイトを元に作成)

の低減が不可欠であるが、冷却の目的でこのLNGを利用するというアイデアもある。例えば、-140℃のLNGは、使用時には気化させる必要があり、それを安価な液体窒素の製造に利用することなどが検討されている。さらに、将来的には、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーと電力需要施設を超電導直流送電で結んだスマートグリッドの構築も計画されている。

また、超電導直流送電は、従来のエネルギー輸送コストと比較しても有利であるとの試算もある(表1)。世界的には既存ケーブルによる直流送電は既にも実績があり、中国やカナダ、ドイツなどで、水力発電所や洋上風力発電所と需要地を結んだり、系統連系などが行われている。今後も直流送電の市場は拡大すると予想されている。

超電導直流送電システムを利用すれば、地球規模の電力ネットワーク構築も可能で、太陽光発電などの再生可能エネルギーの課題である昼夜・天候による不安定さ解決にも期待されている。

例えば、日本学術会議が提案している「サハラソーラーブリーダー計画」では、サハラ砂漠に太陽光発電所を建設し、高温超電導直流送電により、電力を需要地まで送電するという計画である(図5)。

日本の超電導ケーブルの性能は、世界トップレベルにあり、海外プロジェクトでも採用されている。また、冷凍機技術などの周辺技術についても、世界トップレベルの技術力である。しかし、ロシアや韓国は国を挙げて超電導直流送電システムの開発に取り組んでおり、超電導ケーブルなどの国産化を目指した研究開発が行われている。特に韓国では数kmの超電導直流送電プロジェクトを計画しているといわれ、今後、日本の強力なライバルとなる可能性がある。

●各種エネルギー輸送のコスト比較(表1)

	損失 (%)	設備コスト (MUS\$)	備考
ガスパイプライン	~120	2,700	世界で広く利用されているが、極めて損失が大きいエネルギー輸送
LNG発電所	16	1,900~2,660	タンカーによる輸送コストを除く
銅ケーブル送電	7.5~12	2,200	400~500kVの海底ケーブルを想定
超電導送電	~3	-	200 kVの定電圧送電、ただし10年程度の開発期間を見込む

ここでの「損失」とは、1単位のエネルギーを2,000 km輸送するために必要なエネルギー量を%で示したものである。例えば、ガスパイプラインでの損失120%とは、1 m<sup>3</sup>のガス輸送のために1.2 m<sup>3</sup>のガスが必要であることを意味する。したがって、ガスパイプライン終端で1 m<sup>3</sup>のガスを使用するためには、2.2 m<sup>3</sup>のガスが必要となる。(編集部注:1 m<sup>3</sup>×120%=1.2 m<sup>3</sup>は損失代と考える。1 m<sup>3</sup>+1.2 m<sup>3</sup>=2.2 m<sup>3</sup>)

(見積もり条件)  
 ・アルジェリアの海岸地区から、欧州電力ハブであるスイスまでの2,000 kmを想定。  
 ・エネルギー輸送は電力、パイプラインとも、半分を海底ケーブル、残りを地下ケーブルとした。  
 ・発電所の熱効率は40%、発電出力は1 GWである。  
 ・超電導送電については、現状、このような長距離送電を行う技術は無いが、比較のために損失のみをのせた。  
 (山口、日揮(株)、ABB Japanによる見積もり)  
 (山口ら、「低炭素化社会のための超伝導直流送配電システムの研究開発」研究成果報告書、平成27年を元に作成)

現在、技術的に優位にある日本であるが、世界に先駆けた実証試験を推進し、実運用のノウハウを蓄積することで、アドバンテージを維持する必要がある。

●取材協力 中部大学  
 ●文 石田亮一