

建築・都市の熱融通への応用を見据えた長尺真空断熱管による熱輸送

Heat transportation using long vacuum insulated pipe for smart cities

古河電気工業株式会社 情報通信・エネルギー研究所
Furukawa Electric, Telecommunication and Energy Laboratories

八木 正史
Masashi Yagi

キーワード：超電導ケーブル (High Temperature Superconducting (HTS) cable)、高温超電導線材 (HTS wire)、真空断熱管 (vacuum insulated pipe)

1. はじめに

古河電工は超電導技術の研究開発と事業を 50 年以上継続している^[1]。超電導の世界では極低温状態を如何に維持するかが大きな課題であり、高性能の真空断熱容器や断熱管が必須となり、いままで開発を進めてきた。今回紹介する真空断熱管は一般の断熱管の 1/100 以下の低熱侵入、数 100 m 以上の長尺、軽量、コンパクト、曲げ耐性を有している。製造方法、性能、およびその適用性について紹介する。

2. 超電導ケーブルの構造

真空断熱管の紹介をする前に、まず、超電導ケーブルの紹介から始めたい。通常、電力ケーブルの导体には、銅やアルミニウムといった電氣的な良导体が使われている。超電導ケーブルでは銅やアルミニウムに変わってテープ状の高温超電導線材を用いている。

図 1 では銅より線からなるフォーマ上にテープ状の高温超電導線材を複数本スパイラルに巻いて、多層にしてある。高温超電導線材は、例えば幅 4 mm、厚さ 0.1 mm で、大気中の液体窒素温度 77 K (-196 °C) で 1 本あたり 100 A の電流を抵抗なしで流すことができる。集合化して、本数を多くすることで、大電流容量を持つことができる。大電流により大きな磁場が生じるが、超電導シールドによって、磁場を完全に遮蔽し、通信障害を発生させない。以上のように超電導ケーブルは大容量、低損失、コンパクトで送電でき、さらに通信障害を与えないなどの利点を有している。

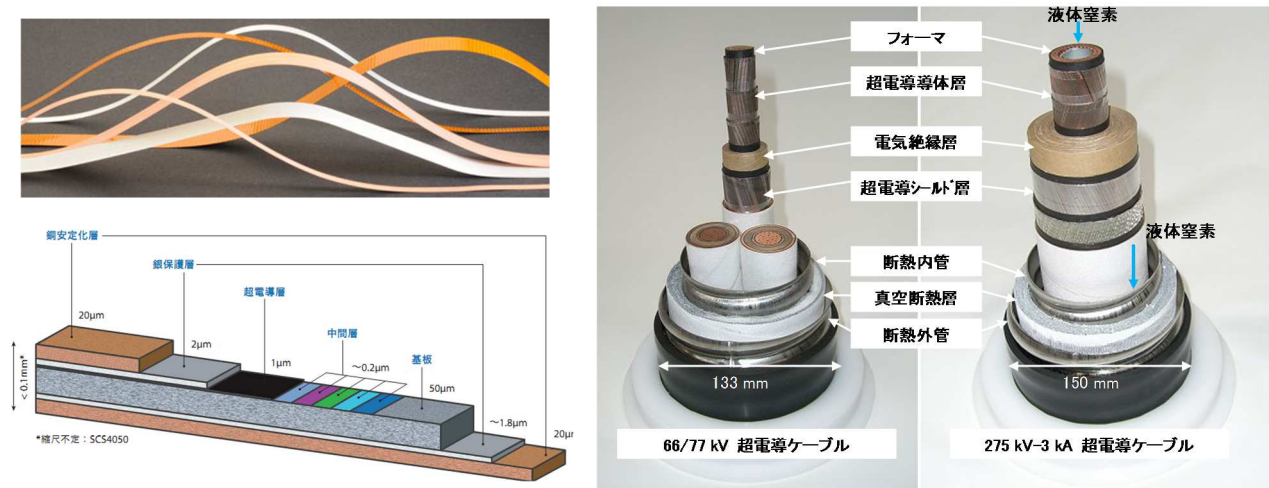


図 1 高温超電導線材^[2] (左) と超電導ケーブルの構造^{[3][4]}

超電導状態を発現させるには、超電導の周囲温度を臨界温度以下にする必要があり、現在使用している高温超電導線材では、臨界温度は 90 K (-183 °C) である。超電導ケーブルでは、冷媒として液体窒素 (大気圧での沸点 77 K (-196 °C)) を使用し、循環冷却している。この液体窒素の循環に必要なのが、真空断熱管である。真空断熱管は、SUS コルゲート 2 重管と断熱層 (SI : Super insulation, 金属箔と不織布を多層

化したもので MLI : Multi-Layer Insulation と呼ばれる) から構成されている。2 重管の間の空隙を真空引きすることにより、気体分子による熱伝導をなくし、さらに SI の金属箔が熱輻射をカットし、熱侵入を極小にしている。

3. 真空断熱管による長距離循環試験

長距離の冷却試験実績として、500 m の超電導ケーブル試験がある。図 2 に示すようにそのレイアウトは、レーストラック上の試験線路であり、線路には河川横断橋梁部を模擬した 10 m 高低差部、熱伸縮の緩和を目的とした、オフセット部、管路布設を模擬した地中埋設部を含んでいる。

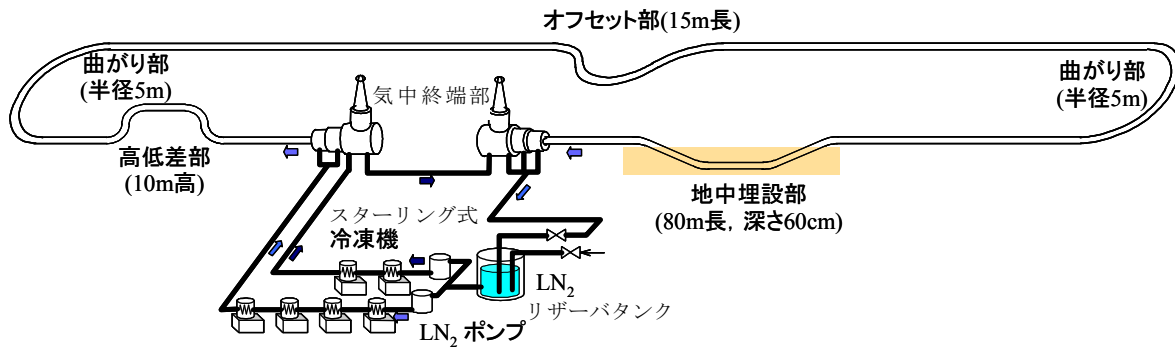


図 2 500 m 超電導ケーブルの長尺冷却試験 [5]

液体窒素は蒸気圧曲線よりも安定したサブクール状態で液の状態のまま循環され、例えば、平均循環温度 73 K、最低圧力 0.3 MPa-abs、流速 30 L/min の状態で循環した。この流速は、超電導ケーブルの液体窒素の流路を考えると、500 m を一周するのに 1 時間を要するゆっくりとした流れである。試験データから侵入熱を含む損失を測定した結果、

$$\text{損失全体} = (c \cdot m / L) \cdot \Delta T \text{ [W/m]}$$

c : 液体窒素比熱 [J/kg/K] = 2020 [J/Kg/K], m : 質量流量 [kg/s], 液体窒素の密度は 0.826×10^3 [kg/m³], 流量は 30.0 L/min, L : 断熱管全長 [m] = 493 [m], ΔT : 温度差 [K] = 0.747 [K] となり、1.27 W/m と算出された (実際のヒータ入熱量との補正により公表値は 1.23 W/m^[5])。この値には、液体窒素の粘性損失も含まれるが、断熱管の熱侵入よりも 2 桁小さく、ほぼ全て、侵入熱と考えてよい。一方、真空が壊れた場合の損失は 180 W/m と 100 倍以上になる。

断熱配管表面からの熱侵入を評価した結果、直線部に比較し曲がり部は約 4~6 倍の熱侵入があった。図 3 にケーブルの直線部と曲がり部の X 線写真を示す。X 線写真から分かるように、曲がり部 (図 3 右では上部が曲がり部の内側である) では、断熱内管とケーブルコアの熱収縮により、曲がり部の内側断熱層の距離が縮まっている。このため、曲がり部は直線部に対して断熱性能が低下している。

液体窒素と外気温の温度差は約 220°C であり、中に通す冷媒の温度が上がれば、温度差が小さくなるので、侵入熱は小さくなり、さらに曲がり部での熱伸縮も小さくなることから、さらに侵入熱は低減する。



図3 曲り部と直線部の X線写真 (左が直線部、右が曲がり部) [5]

4. 真空断熱管の製造

超電導ケーブルの製造を通して、真空断熱管の特徴を述べる。

- ① 超電導線材をフォーマに巻き付けて、絶縁紙を巻き付けて超電導コアを作る。
- ② 超電導コアを引き込みながら、断熱内管をフォーミング、溶接して、波付け加工、洗浄をする。
- ③ 断熱内管の耐圧・気密試験、He リーク試験をおこなう。
- ④ 絶縁紙を巻く要領で、断熱内管に積層断熱材を巻き付ける。
- ⑤ ④を引き込みながら、断熱外管をフォーミング、溶接して、波付け加工、洗浄をする。
- ⑥ 断熱内管の耐圧・気密試験、He リーク試験をおこなう。
- ⑦ 断熱外管上にポリ塩化ビニルによる被覆加工をおこなう。
- ⑧ 端部を真空封じ切り可能な構造にして、熱処理と真空引きを施す。

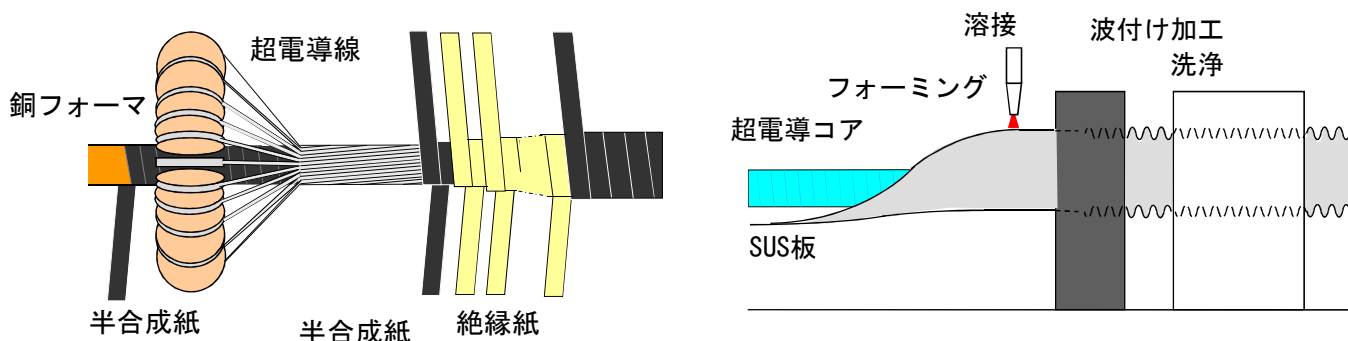


図4 真空断熱管の製造 (製造工程①と②)

大きな特徴として製造長に制限がないことが挙げられる。製造長の制約となるのはドラム巻きつけ可能量と陸上輸送の可否になる。通常は 500 m までを製作可能長としている。

5. 真空断熱管による熱輸送

現在、真空断熱管として考えているコルゲート管の代表的な寸法を表 1 に示す。設計耐圧力は 1.1 MPa である。材質として SUS304 であるが、Al、Cu なども可能である。また、表以外に $\Phi 150$ までの管も作製可能である。

表 1 から $\Phi 14$ 、 $\Phi 27.5$ 、 $\Phi 46.5$ 、 $\Phi 65$ を組み合わせて、真空断熱管を作製可能である。

表 1 SUS コルゲート管 (単位は mm、値は参考値)

サイズ	板厚	コルゲート内径	外径	ピッチ	波高さ
14.0 Φ	0.3	15.2	18.4	6.0	1.3
27.5 Φ	0.4	29.0	33.1	8.0	1.7
46.5 Φ	0.4	47.3	53.9	11.6	2.9
62.0 Φ	0.5	62.0	69.4	14.0	3.2

5. 1 従来技術との比較

真空断熱管は既に市場にある技術であり、超電導ケーブルシステムにおいても、トランスファーチューブとして、冷凍機と冷凍機、冷凍機と容器をつなぐ配管として使用されている (図 5)。長さを正確に把握する必要があることから、現地の測量、敷設工事に時間を要する。その他には、インターネット検索によ

ると、食品や半導体製造などにも使われている例がある。いずれも、数 m 長の短尺での使用実績であった。



図5 真空断熱管の使用例（トランスファーチューブ）

5. 2 長尺化による適用例の考察

長尺・フレキシブルな真空断熱管を適用することでどのような適用例ができるかを考察した。

第一の適用例として、従来の用途である液化ガスの輸送が考えられる。液化ガスの輸送管として、長尺、軽量、フレキシブルであれば、設置の融通性が上がる。昨今、LNG や液化水素が取り出されているが、液化ガスの貯蔵タンク同士をつなぐ用途は今後、大きくなると考えている。

第二の適用例としては、LNG をガス化する際の冷熱の利用である。現在、LNG からガスに戻す際の冷熱はほとんど捨てられているが、冷熱を利用して、冷房に使用する、という考えである。急増するデータセンターは大きな熱源であり、常に冷却を必要とする。LNG の基地に液化ガス輸送と冷熱利用のインフラを整備すれば、データセンターを誘致可能になる。液化ガスの輸送管、冷房の冷気の輸送管として、真空断熱管の適用が大いに期待される。

第三の適用例としては、第二の適用例をさらに発展させ、LNG 基地にスマートシティを構築する構想である。極低温の液化ガスと冷熱利用を考えるならば、超電導機器の技術がマッチする。瞬時にエネルギーを充放電する SMES やフライホイール、再生可能で発電したエネルギーを系統に繋ぐ際の系統保護としての超電導限流器などがある。さらに、設置済みの真空断熱管の中に、電力ケーブルを引き込めば（ここではあえて超電導ケーブルコアではなく）、電力ケーブルの銅が冷やされて大電流を送電できる。電力需要が上がれば、冷気も多くなり、それに伴い、送電容量が上がる。電力ケーブルに磁場遮蔽として超電導シールドをつけて、臨界温度まで下がれば、磁場を完全に遮蔽できる。冷却が常に完備されれば、導体も超電導化できる。LNG の沸点は約 111 K (-162 °C) であり、現在の高温超電導線材の臨界温度に達していないが、冷熱利用により、超電導用の冷凍機の効率向上や熱侵入の低減により超電導機器の経済性を向上できる。LNG から LN_2 を生成して、 LN_2 を利用すれば、超電導ケーブルも可能となる。また、LNG の代わりに LH_2 であれば、その沸点が 20 K (-253 °C) であり、その温度のまま、超電導機器が利用できる。

第四の適用例としては、地域冷暖房へ適用である。冷水の循環により高層ビル群の地冷だけでなく、高温水やオイルの熱輸送が考えられる。現状はコスト面から厳しいが、第一から第三の適用例が増えて、コストが下がれば十分に検討に値する。

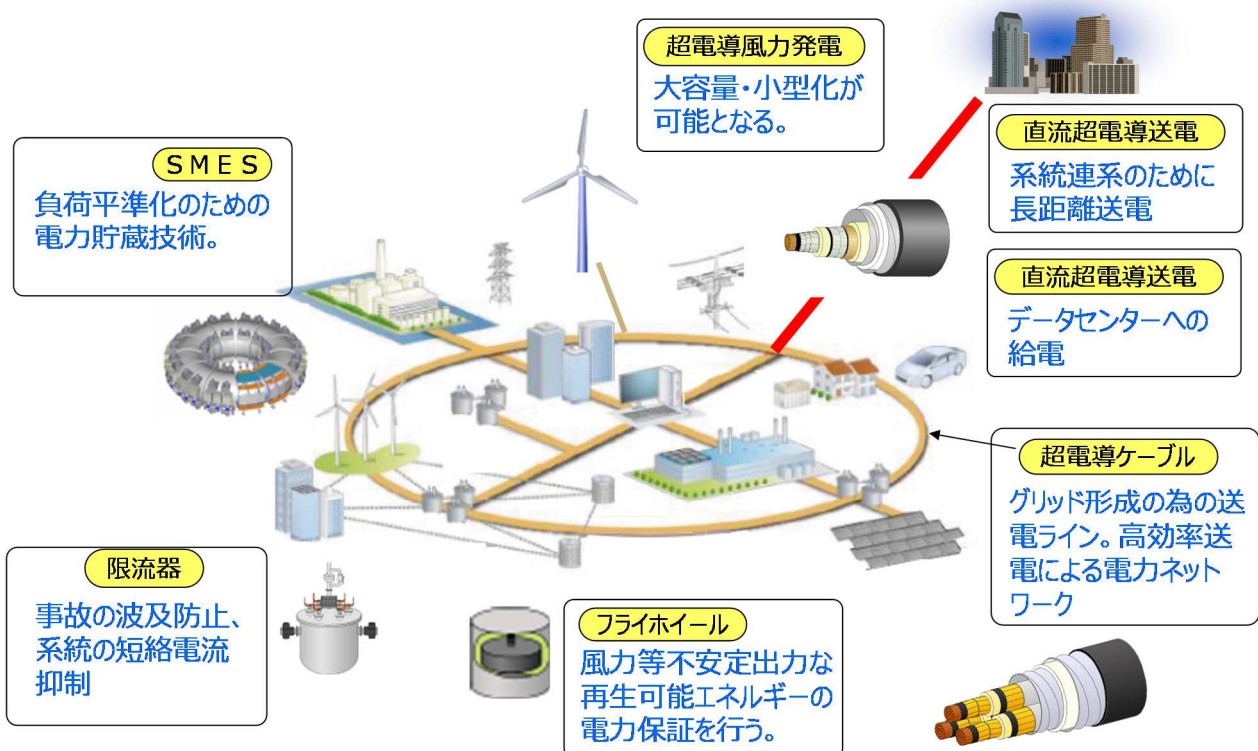


図6 超電導機器を使用したスマートシティ構想^[6]

6. まとめ

超電導ケーブルの開発の中で、真空断熱管の開発を進めてきたが、その用途について探索した。真空断熱管は液化ガスを遠方にロスなく輸送できるため、液化ガスの貯蔵基地に輸送管として利用できる。さらに、冷熱利用により、スマートシティの省エネルギー化に貢献できるのではないかと期待している。真空断熱管の早期整備は超電導機器の技術的、経済的なハードルを下げて、超電導のメリットを享受できるものと考えている。

参考文献

- [1] 古河電工の超電導の歴史 <http://furukawa.co.jp/kenkai/superconduct/history.htm>
- [2] <http://www.superpower-inc.com>
- [3] 古河電工時報 第123号「イットリウム系高温超電導電力ケーブルの開発」
http://www.furukawa.co.jp/jiho/fj123/fj123_05.pdf
- [4] 古河電工時報 第131号「世界最高電圧の275kV-3kA高温超電導ケーブルの開発」
http://www.furukawa.co.jp/jiho/fj131/fj131_06.pdf
- [5] 古河電工時報 第116号「世界最長500m超電導ケーブルのフィールド試験」
http://www.furukawa.co.jp/jiho/fj116/fj116_11.pdf
- [6] 古河電工時報 第131号「スマートグリッド分野における超電導技術の展開」
http://www.furukawa.co.jp/jiho/fj131/fj131_05.pdf