

【隔月連載記事】

超電導送電事始（その 1）

住友電気工業株式会社
電力・エネルギー研究所
主幹 廣瀬正幸

2006 年 7 月 20 日米国ニューヨーク州都 ALBANY 市に於いて、超電導ケーブルによる地中送電が世界で初めて開始された。この米国プロジェクトに適用された超電導ケーブルは、住友電工と東京電力とが共同で開発した三心一括型高温超電導ケーブルを基本としたもので、超電導送電線の今後の実用化に向けての礎となるものと注目されている。ここに、6 回にわたり超電導ケーブルに関して連載する機会を得、第 1 回目として、超電導送電事始①「一石＊鳥」と称して、超電導ケーブルのメリットについて解説する。引き続き、②「餅は餅屋」、③「引いても駄目なら押してみな」、④「無事、これ名馬なり」、⑤「郷に入れば郷に従え」、⑥「論より証拠」と題しましての連載を予定しますので、ご期待下さい。

第 1 回：「一石＊鳥」超電導ケーブルのメリットを中心に

高温超電導ケーブルは、送電ロスの無い夢の送電線として 20 世紀後期に注目されたものの、液体窒素温度での運用「所謂、強制冷却電力ケーブル」に対する信頼性検証、実製品となり得る超電導線材の実現（価格、高性能化）開発課題、ならびに電力需要面での大容量低損失送電線路への NEEDS、ともに熟成せず、これまで実用化には至っていなかった。その後、京都議定書の発効に伴う低損失化への期待、超電導線材の高性能化、低損失化の展開、米国の大停電に代表される大容量低損失送電線への NEEDS 等、超電導ケーブル送電線への期待が再度高まり、内外でデモプロジェクトが進められている。

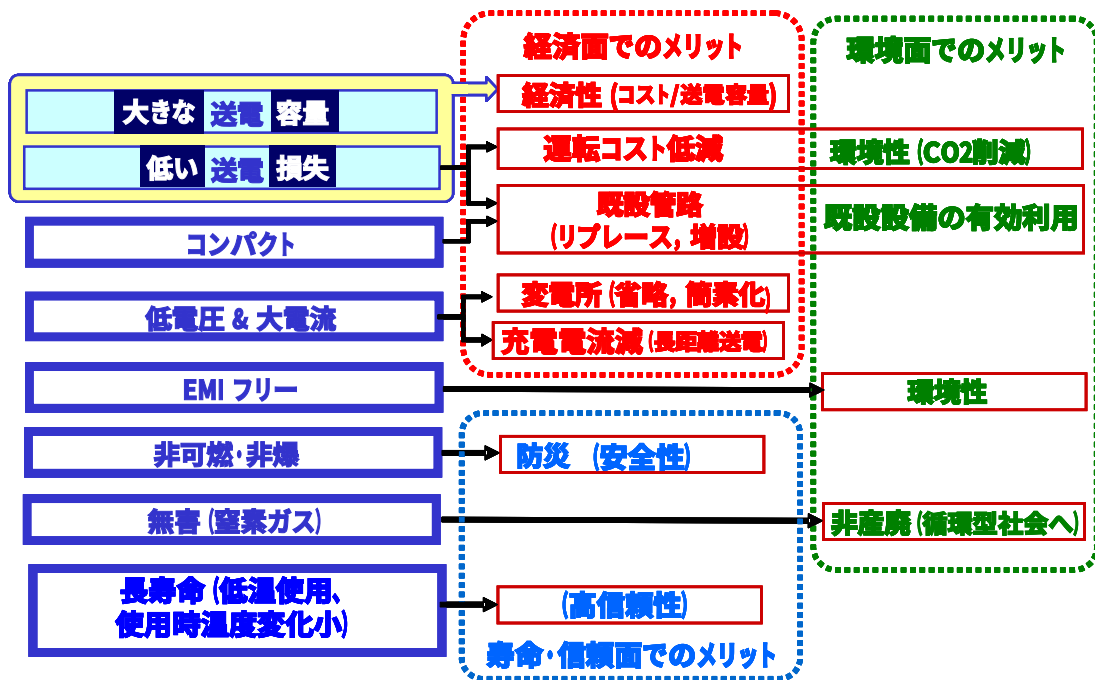


図 1 超電導ケーブルのメリット

超電導ケーブルに期待されるメリットは、図 1 に示す通り、経済面、環境面、信頼面に大別される。信頼面については、④「無事、これ名馬なり」の稿に記す予定であり、ここでは経済面、環境面について整理して取り纏める。

超電導ケーブルの適用用途において、低損失であることに起因する効果、現状のインフラ設備の簡素化やコンパクト性に起因する効果が経済面として、CO₂ 削減、EMI フリー等が環境面でのメリットとして挙げられる。

(1) 経済面でのメリット

経済面について、現用ケーブルと超電導ケーブルとを比較した事例を図 2 に示す。¹⁾

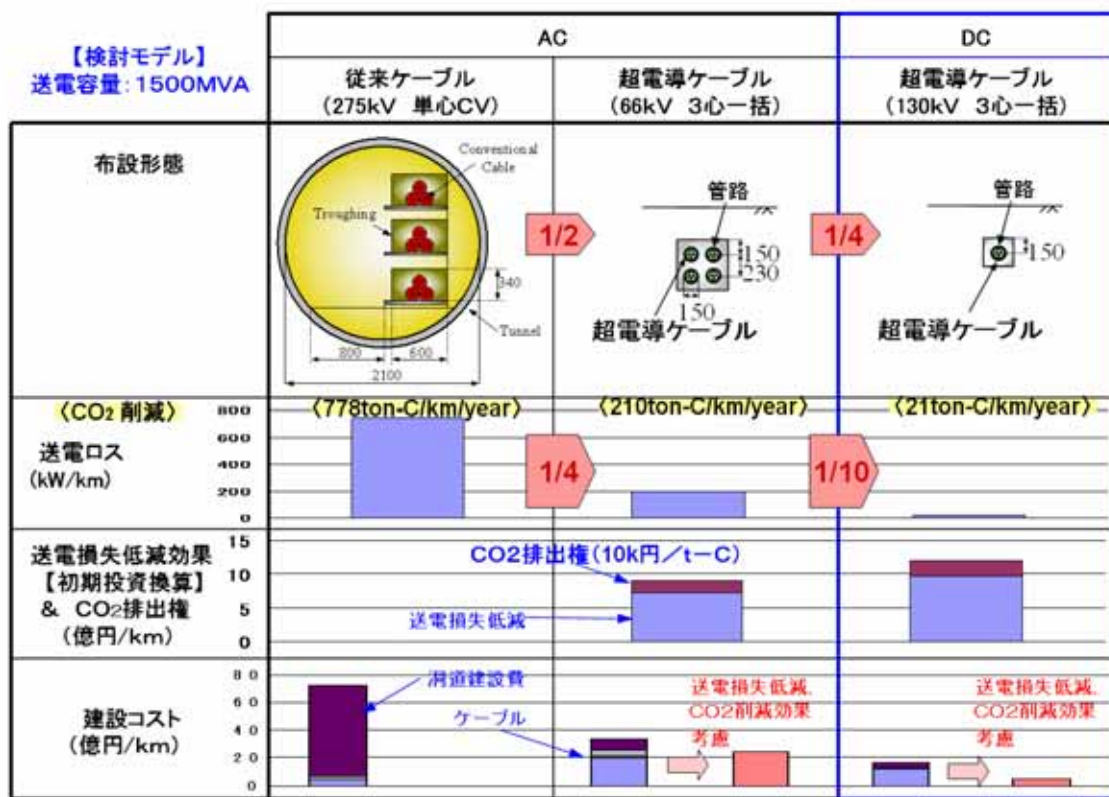


図 2 高温超電導ケーブルの経済性評価例

(超電導線材の検討諸元) I_c (臨界電流@77K): 200A、線材価格: \$ 20/m
(線路検討条件) 負荷率 (損失率): 1.0、初期投資換算: 30 年 5%複利

大容量送電の場合、超電導ケーブルの適用によりケーブルルート建設費用が大幅に低減されるとともに、管路の新設、増設による増容量が容易になる等の効果が期待される。一方、送電ロスについては送電路の運用形態によるものの、送電ロスの低減に伴う省エネ効果に加え、排出権取引面での効果 (炭素排出権取引価格は将来ますます上昇するものと考えられる。) も期待される。この効果は、超電導線材の今後の高性能化 (高臨界電流、低交流損失、低価格化)、冷却設備の高効率化に期待するところが大きく、さらなる向上が超電導ケーブルの実用展開にとって (信頼性確認とともに) 今後の重要課題といえる。このような運用面でのメリットは、大電流用途であればあるほど超電導の効果が絶大となる。そのため、現状の性能および価格レベルでも十分効果の得られるケースも想定されており、超電導ケーブルシステムが安心して運用されるために必要な信頼性検証を線材

開発と並行して進めることが重要である。さらに、低電圧大容量送電は、高電圧送電に比して充電電流（送電電圧に比例）が大幅低減でき、長距離送配電が可能となる特徴があり、都市近郊の中間変電所の省略や開閉所の簡素化に有効である。

一方、現状、電力系統として構築されている交流送電用途が主に検討されているのに対し、図 2 に示す通り、高温超電導は直流用途（特に、低電圧大電流用途）において、その能力を最大限に発揮できる。従って、自然エネルギーの活用を地球規模で展開する GENESIS 計画や低電圧大容量が要求されるデータセンター向け電力供給などが検討されている。尚、現在検証されている交流用超電導ケーブル技術はそのまま直流用途にも展開できることが示されている。²⁾

(2) 環境面のメリット

3 心一括型高温超電導ケーブルの構造を図 3 に示す。導体およびシールドに超電導線を適用し、誘導により導体電流とほぼ同じ電流が逆位相でシールドに流すことができることから完全な磁気シールドが形成できる。これは、渦電流損失や導体交流損失の大幅な低減が寄与するのみならず、ケーブルの外側に電磁波を漏洩さない、EMI (Electro- Magnetic Interference) フリーのケーブルである。また、超電導ケーブルの絶縁材料は、従来の OF ケーブルの絶縁に



図 3 3心一括型超電導ケーブル

採用されている PPLP® と液体窒素の複合絶縁構造であり、絶縁油を使用しない非可燃・非爆ケーブルである。すなわち、高温超電導ケーブルは、無害で廃棄面での心配もない、「クリーン」で「グリーン」なケーブルであると言える。

このように高温超電導ケーブルは、経済面、環境面を中心とした様々なメリットを兼ね備えた「一石二鳥」以上の効果が期待され、特に電力系統の脆弱な米国において、実線路に適用する複数のプロジェクトが進められる背景となっている。もちろん、超電導ケーブルが社会に大きく貢献するためには、今後クリアすべき課題も明確化されており、超電導線材の高性能化と合わせ、信頼性評価も含めて取り組む必要がある。

次回は「餅は餅屋」と題し、現存ケーブルの基本技術の重要性について述べる予定です。

参考文献

- 1) 廣瀬、山田、増田、佐藤、畑、「高温超電導の実製品化検討」、SEI テクニカルレビュー、第 168 号（2006 年 3 月）
- 2) 廣瀬、増田、佐藤、畑、「高温超電導直流ケーブルについて」、SEI テクニカルレビュー、第 167 号（2005 年 9 月）

【隔月連載記事】

超電導送電事始（その 2）

住友電気工業株式会社
電力・エネルギー研究所
主幹 廣瀬正幸

2. 「餅は餅屋」 ケーブル基本技術の重要性

超電導線材が開発されれば超電導ケーブルができると思われがちであるが、超電導線材は超電導ケーブル固有の必要性能を有する必要がある、超電導ケーブルシステムは超電導線材の性能、特徴を有効に引き出す必要がある。従って、超電導線材の開発と超電導ケーブルシステムとしての開発とのマッチングが実用化にとって重要である。また、超電導ケーブルシステムの実用化においては、電力ケーブルの特殊性を良く理解し、これまでに培われた既存ケーブル技術、実績、経験などの知見を活用しつつ超電導ケーブル固有技術の開発を進めなくてはならないことから、超電導ケーブルの開発は既存ケーブルの歴史の重みを実感する取り組みとも言えよう。

2.1 電力ケーブル技術の特殊性

電力ケーブル製造の特徴の一つに長尺製造が挙げられる。一般的な多くの製品は、欠陥部、不良部を除去されることで管理され、その不良確率の低減が進められる。一方、電力ケーブルの場合、長尺品の中の 1 箇所でも不良箇所が存在すると製品全体が不良となることから、その品質管理には欠陥部の撲滅を目指した一般製品には類を見ない高度な管理レベルが要求される。また、電力ケーブルはエネルギー供給の基幹を構成する製品であり、かつ、交換そのものが容易でないこと、30 年を超える寿命が要求されること等、電力ケーブルに求められる要求品質は極めて高い。もちろんこれまでに設備事故が皆無であることは無く、これまでの長期間に亘る実績や経験が設計や製造面にフィードバックされる等、事故率を下げるための様々な努力により現状の電力ケーブルの高信頼性が実現している。尚、万が一事故が発生した場合を想定した運用が、電力会社において検討、実施されていることは言うまでも無い。

このような電力ケーブルとして設計～製造～施工～運用に亘り培かわられて形成された DNA が超電導ケーブルにも引き継がれることで、既存電力ケーブルと同等またはそれ以上の機能を有する超電導ケーブルシステムを実現することができる。

超電導ケーブルシステムを構成する要素技術を図 1 に

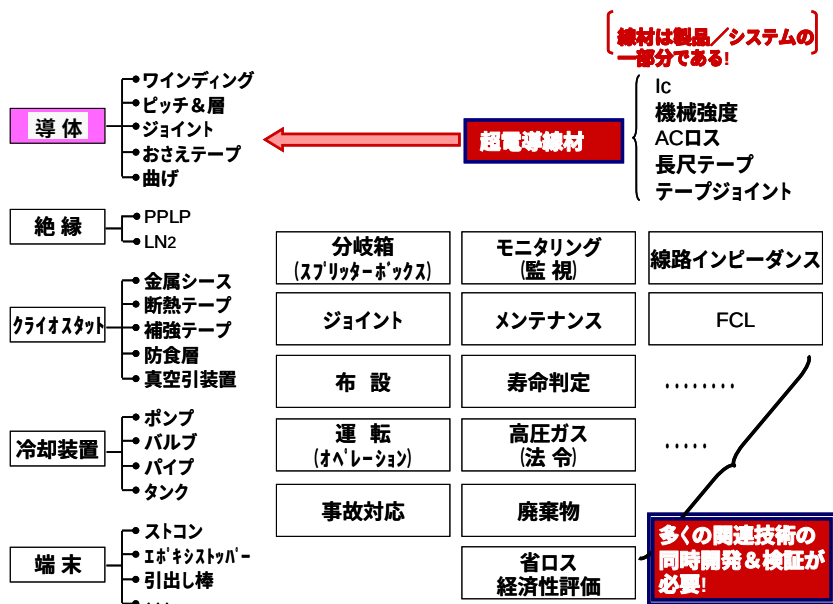


図 1 超電導ケーブルシステム構成要素

まとめて示す。これらの要素は、超電導ケーブル本体およびそれに付帯する構成機器、超電導ケーブルシステムの布設、施工、保守・運用に必要な技術、経済性や環境に対する評価技術、超電導ケーブルシステムを導入することによる系統への影響など、多岐多様な技術分野で構成されており超電導線材や超電導導体に直接関係する要素はその一部に過ぎない。

一方、電力ケーブルの基盤技術は一朝一夕に構築されたものではなく、永年の経験、実績が現状の高信頼性の糧となっている。図 2 に示す CV ケーブルの事例では、電力ケーブルは極めて低い絶縁破壊発生率であるとともに、10 年以上経過した劣化型の故障 (22kV) および初期故障的な故障 (66kV) とに分類され、寿命評価に加え、初期故障を如何に撲滅するかが新規製品の市場導入時に重要であり、実運用の過程で更に高信頼性が確立していった経緯が電気学会技術報告等にまとめられている。¹⁾ 超電導ケーブルは非劣化型のケーブルと考えられているものの、その適用用途が大容量であることから、超電導ケーブルの信頼性は現状ケーブルと同等以上の高レベルが要求されることとなり、既存ケーブルで確立されている高信頼性を超電導ケーブルシステムでも実証するデモンストレーション試験は非常に重要で、その意義は大きい。むろん、適用線路（仕様）や適用目的、運用形態によって実証レベルが変わることもあり、内外で複数の試験が実施あるいは計画されている。（超電導ケーブルの寿命評価を含む信頼性は「超電導送電事始④」に掲載の予定）

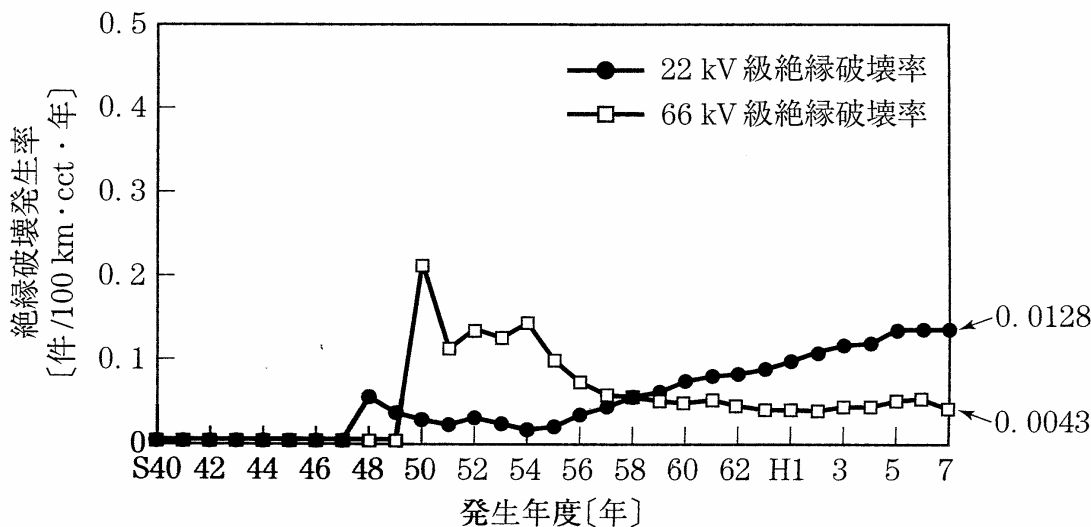


図 2. 22kV、66kV 級ケーブル部絶縁破壊発生率¹⁾

2.2 住友電工の取り組み

住友電工では 1990 年以降超電導ケーブルの開発を進め、構成要素個別の検討・開発からシステムとしての検証まで、堅実かつ着実に実用化に向けての検討を行ってきた。これらの長年に亘る開発成果と既存ケーブルで培った経験・実績を融合し、現在の実用線路検証に至っている。

超電導ケーブルは、既存ケーブルと同様に、「電圧」を印加するための「絶縁」と、「電流」を流す「導体」とで構成され、製造、布設、施工、運用に至る全履歴を対象とした電氣的、熱的、機械的評価をケーブル状態で行う必要があり、少なくとも 30～50m 級ケーブルとしての基礎的評価は重要である。また、2004 年に実現した加圧焼成技術によるビスマス系超電導線材の電氣的、機械的性能向上および長尺安定製造は、超電導ケーブルシステムの早期実用化に大きく貢献すると考えられ、線材開発と超電導ケーブル開発の連携が超電導ケーブル実用化および超電導線材の用途拡大にとって極めて重要でかつ有効である。（加圧焼成技術については「超電導送電事始③」に掲載の予定）

すなわち、①ケーブルとしての評価を可能にする長尺超電導線材の早期実現とその高性能化、②その線材を適用した超電導ケーブル（システム）の実線路を想定した開発・検証、③そして何よりも、超電導ケーブルシステムの実用化により 21 世紀の環境社会に貢献するという使命（信念）、が超電導ケーブルシステムの早期実用化にとって重要であると考えられる。米国での超電導ケーブルによる世界初の中送電が、その一助となれば嬉しいところではあるが、今後、解決すべき課題、検証すべき性能をより明確化し、超電導線材の高性能化、低価格化とともに、より一層ケーブルシステムとしての完成度を高めてゆかなければならない。これまでが超電導ケーブルシステムが実現できることを示す開発であったのに対し、これからは「使える、使っていただける」製品（システム）への開発・実証に軸足を移してゆくことになると考えられる。

今回は「引いても駄目なら押してみな」と題し、発想を変えて取り組んだ超電導線材および超電導ケーブル技術をトピックス的に紹介する予定です。

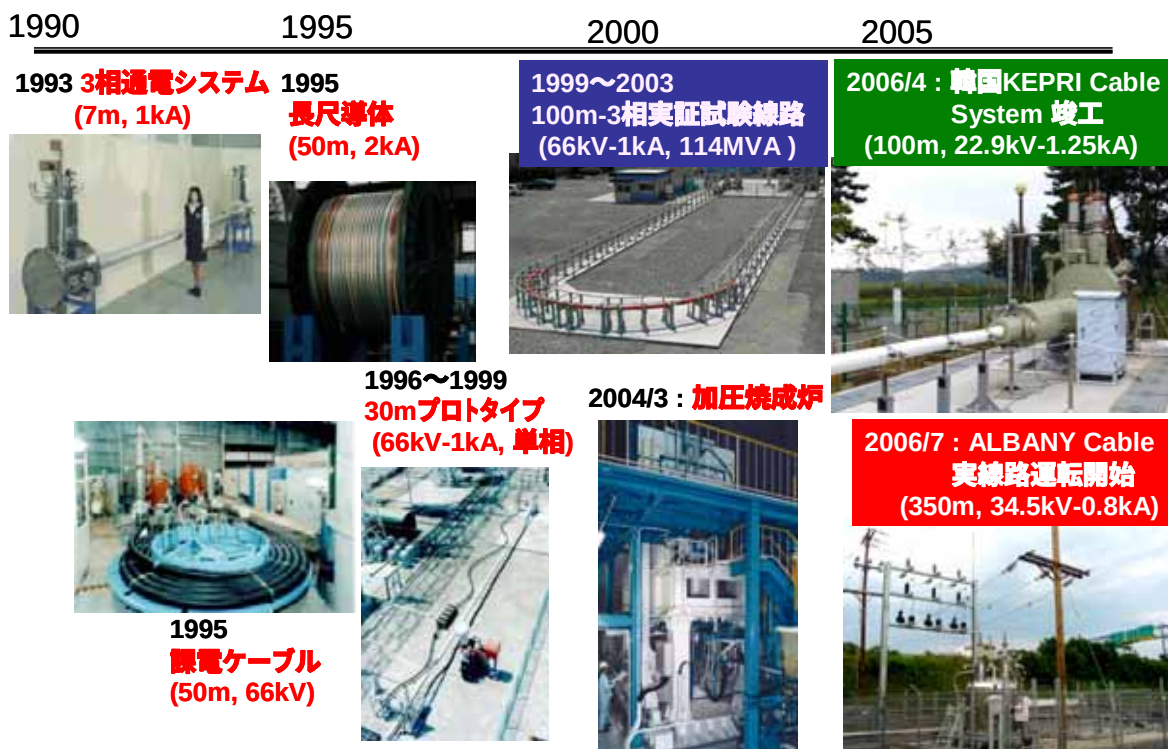


図 3. 住友電工の超電導ケーブル開発の流れ

参考文献

- 1) 電気学会：特別高圧CVケーブル絶縁劣化形態と絶縁診断技術の動向、電気学会技術報告第 668 号（1998 年 2 月）

【隔月連載記事】

超電導送電事始（その 3）

住友電気工業株式会社
超電導・エネルギー技術開発部

主幹 廣瀬正幸

3. 「引いても駄目なら押してみな」発想の転換

超電導ケーブルと従来ケーブルとの最大の相違点は、超電導ケーブルが液体窒素の環境下（約 -200°C ）で使用されることにある。これは、常温において気体である媒体を液状で使用するという状態変化、ならびに -200°C という温度そのもの、あるいは温度変化が及ぼす各種性能への影響が、従来ケーブルには無い検討課題である。

これらの課題は、超電導ケーブルの開発当初より、低温ケーブル固有の問題点として取り上げられ、①液体窒素下での絶縁特性、②常温～ -200°C 間の温度変化に伴う熱挙動対策、③超電導線材や絶縁体の熱機械的長期信頼性（劣化特性）、④断熱性能、等が検討されており、特に①の絶縁特性や③の長期性能は超電導線材やケーブルの各種設計に関わることから、これまでに多くのデータが蓄積されてきている。

一方、住友電工が長尺製造を実現したビスマス系超電導線材、ならびに米国での世界初の地中送電線路となった 3 心一括型超電導ケーブルの開発においても、超電導線材の高性能化（品質向上、性能安定化）、超電導ケーブルの熱収縮対策を実現する新技術などが適用されている。ここでの新技術においては、新たな試みや発想の転換が適用されており、その一例として、「ビスマス線材の加圧焼成技術」、「3 心一括型超電導ケーブルの 3 心弛み構造」を取り上げ紹介する。

3.1 ビスマス線材加圧焼成技術（DI-BSCCO®）

住友電工では約 20 年前から第 1 世代高温超電導線とも呼ばれるビスマス系超電導線 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) の開発、実用化を進めており、そのビスマス系超電導線（以下 Bi 線）の「臨界温度 (T_c)」と「臨界電流 (I_c) × 線材長 (L)」を高性能化の変遷として図 1 に示す。「臨界温度 × 線材長」の指標は、高温超電導線材が長尺で安定して供給する使命を有し、この指標が超電導線材および超電導応用機器の実用化展開に大きく関係することから重要視されている。また、ここで特筆すべき事項は、性能を大幅に向上させ、世界最長レ

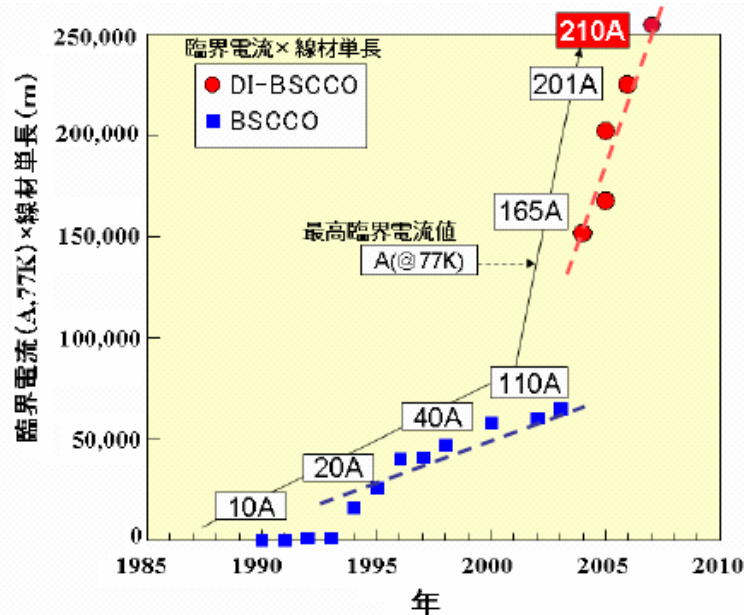


図 1 ビスマス高温超電導線の性能の変遷

ベルの高性能高温超電導線を商用ベースで供給することを実現した「加圧焼成技術の適用」であり、この革新的ビスマス系超電導線を DI-BSCCO® (Dynamically-Innovative BSCCO) と称している。

それまでの Bi 線は、臨界電流、強度などの性能面、生産面（歩留り）で、実用化レベルに到達するには課題が多く、特に液体窒素中での使用において温度が急上昇した際に発生する Bi 線のバルーニングが問題視されていた。バルーニングに対しては、その原因となる線材への液体窒素の侵入をブロックすることを目的とした金属テープによるハーメティック処理等、Bi 線のシースに相当する部材や加工の検討が主であった。ここで、「超電導部の密度をほぼ 100%とする究極の状態」を実現することで、バルーニングの要因である液体窒素の超電導線材への侵入が抑制されるばかりか、臨界電流の向上、高強度化にも好結果が得られることが新しい試みとして提案された。むろん、このような技術開発および製品化においては、大型設備導入の決断、最適焼成技術（条件）の見極め等、多くの課題をクリアする必要がある事は言うまでもない。

加圧焼成技術の適用による性能向上を図 2 にまとめて示す。臨界電流が 200A を越え、機械強度、単長ともに大幅な向上が図れ、特に歩留の向上は Bi 線の低価格化に大きく寄与する。住友電工は、2007 年 4 月、臨界電流 180A の「DI-BSCCO」のサンプル供給を開始し、200A 級の市販が視野に入ってきた。また、さらなる高性能への取り組みが進められている。

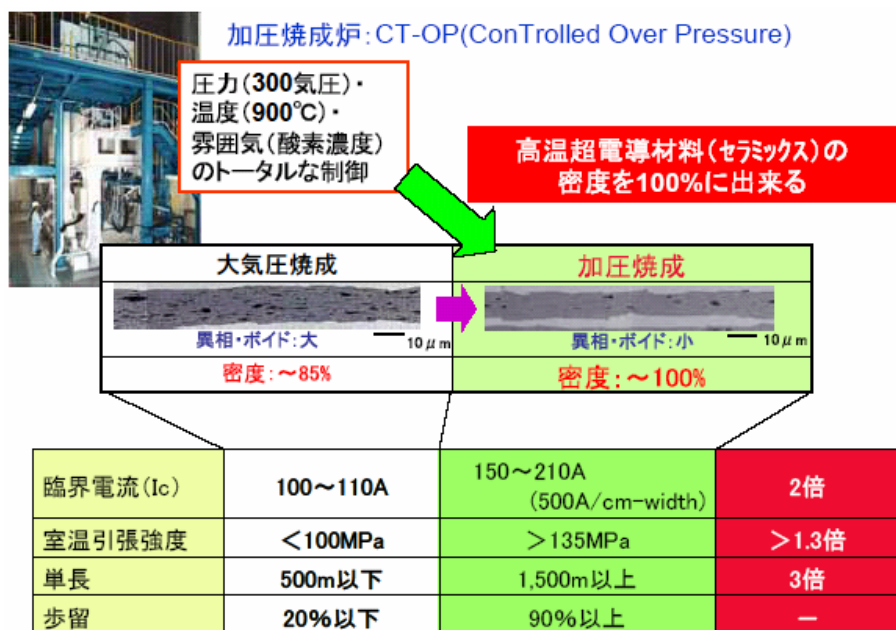


図 2 加圧焼成技術によるビスマス高温超電導線の性能向上

3.2 超電導ケーブルの冷却時収縮対策（3 心弛み構造）

既存の電力ケーブルは送電により発熱し、温度が上昇し、その温度変化によってケーブルが伸縮する。そのため、地中送電線ではマンホール内において伸縮を吸収するオフセットの形成、ケーブル全長をスネーク状に布設する方式、などが採用されている。いずれも温度変化により生じる応力を利用してケーブル自身を変形させて吸収する方式である。また、ケーブルの使用最高温度は、使用する絶縁体の耐熱性能、絶縁性能で決まり、概ね 80~90℃である。

一方、高温超電導ケーブルは液体窒素 (-197℃) に冷却して使用され、使用中の温度変化は非常に小さいものの、常温~冷却時の温度差は 200℃を越える。この温度差は、既存ケーブルの 3

倍に相当し、既存ケーブルと同様の布設形態においてこの温度変化に伴うケーブルの伸縮を吸収することは困難である。また、高温超電導ケーブル固有の問題として、①既存ケーブルが温度上昇であるのに対し、超電導ケーブルは温度下降であること、②超電導ケーブルの主構成部材である 2 重断熱管において、内管は液体窒素で冷却されるものの、外管は常温のまま保持されること、③超電導コアに引張り張力が加わると、曲り部で断熱管にコアから側圧が加わるため、断熱性能への影響が生じること、等が挙げられる。

従来の電力ケーブルはケーブルを弛ませる必要が無く、引張った状態で製造、布設されるのが一般的であるのに対し、超電導ケーブルは冷却時の収縮を吸収させるために、これまでに例の無い「3 心コア弛み構造」を適用した。すなわち、「押しても駄目なら引いてみな」とは逆に、ケーブルコアを引張らずに（製造時に）押し込み、ケーブルコアを弛めた状態にすることでその収縮代を確保したことから、まさしく「引いて駄目なら押してみな」の試みである。この方法は東京電力殿と共同で実施した 3 心一括型高温超電導ケーブル実用性検証試験（2001 年）に適用され、その後、韓国 KEPRI 向け、米国 ALBANY プロジェクトの 3 心一括型超電導ケーブルにも採用されている。3 心弛み構造への適用により、3 心一括型高温超電導ケーブルはケーブル自身が熱伸縮吸収機構を有し、かつ端末およびケーブルコア、超電導線に加わる機械的応力を軽減させるとともに、断熱管の断熱性能維持にも寄与している。3 心一括型高温超電導ケーブル実用性検証試験における 3 心弛み構造の伸縮吸収の状況は図 3 に示す通りであり、熱収縮対策を講じない場合の張力 50kN に対し 9kN と冷却時の張力を低減することが確認されている。3 心コア弛み構造はケーブルのさらなるコンパクト化を指向して最適化の検討が望まれるものの、この方式が 3 心一括型高温超電導ケーブルの実用において有効かつ有用であると言える。

以上の通り、超電導線材の抜本的な性能向上を目指した取り組み、超電導ケーブルの従来のケーブルとは異なる（というより真逆の）発想による取り組みの

事例について紹介した。これまでの経験や実績に基づく検討に加え、新たな発想や試みにより超電導線材の性能向上や、超電導応用機器の実用化技術の開発を進めることも重要である。

次回は「無事、これ名馬なり」と題し、超電導ケーブルの信頼性について紹介する予定です。

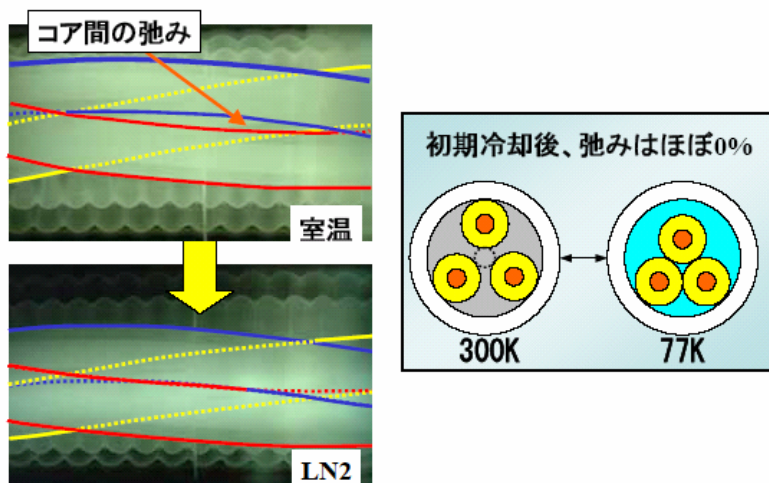


図 3 3 心一括型高温超電導ケーブルの 3 心コア弛み効果

【隔月連載記事】

超電導送電事始（その 4）

住友電気工業株式会社
超電導・エネルギー技術開発部
主幹 廣瀬正幸

4. 「無事、これ名馬なり」超電導ケーブルの信頼性

電力ケーブルの開発の歴史は、高電圧化、大容量化の歴史であり、大容量化するほど（システムの重要度が増すことから）要求される信頼度は高くなる。超電導ケーブルにおいても、（高電圧か大電流かの相違はあるものの）既存ケーブルと同様に 30 年を越える寿命とともに高信頼度が要求される。それは、電力ケーブルが社会のライフラインとして非常に重要なインフラであることに加え、設備新設や更新が容易でないことにも関連する。

具体的に超電導ケーブルシステムに要求される機能を整理すると、

- ①30 年以上の電氣的、熱機械的寿命を有すること
- ②電力系統からの要求性能（短絡電流他）を満足すること
- ③高信頼運転を可能にする冷却システムを備えること

に大別され、それぞれの視点から様々な信頼性検討がなされている。

また、停電が殆ど無い現代社会において、電力を安定して供給できることを実証することが何よりも重要であることは言うまでも無く、米国 ALBANY プロジェクトにおいて実施された約 9 ヶ月の実系統運転（phase1）のような実績を積み重ねることが、超電導ケーブルの高信頼運用に向けて何よりも重要である。

4.1 ビスマス系超電導線の信頼性

住友電工では約 20 年前からビスマス系超電導線の開発を行っており 1990 年代初より超電導機器に採用され、多くの実績を有している。冷却サイクル、繰り返し歪み・応力、長時間通電、繰り返し励磁・消磁、化学組成変化（酸素など）などが、超電導線の劣化要因として挙げられるが、これまでの長期使用実績からは、超電導線の劣化傾向は認められていない。これらの多くは、前回（超電導送電事始③）紹介した加圧焼成超電導線（DI-BSCCO®）を適用する前であり、加圧焼成による機械強度の向上、バルーニング対策の実現により、信頼性のさらなる向上が図られている。品質保証面では、超電導線出荷時に全長臨界電流特性試験を採用しており、製品の信頼性を全長に亘って保証している。

4.2 超電導ケーブルの寿命評価

従来ケーブルの劣化の主要因として、課電や通電による絶縁性能の低下、および負荷変動や気温の変化に伴う熱機械的劣化が挙げられる。超電導ケーブルは、保守などに伴う昇温を除き、断熱管の中はほぼ一定の温度に保持されているのが特徴的であり、従来ケーブルに比して非劣化型ケーブルとして位置付けることができよう。

①絶縁性能長期寿命特性

超電導ケーブルは、その運用温度が約 -200℃と非常に低く、いわゆる絶縁材料の熱劣化は生じないとされ、課電劣化（V-t 特性）について、検討、評価が実施されている。超電導ケーブルの絶

縁は「絶縁テープ+液体含浸絶縁」で構成され、OF (Oil Filled) ケーブルファミリーと言える。また、液体窒素は OF ケーブルの合成油と電気強度が類似していることから、超電導ケーブルは OF ケーブルと同様の絶縁特性を示し、OF ケーブルの設計に準じて、AC 絶縁破壊、Imp 絶縁破壊等の電気性能試験や $V-t$ 試験結果などが報告されている。液体窒素含浸 PPLP (Polypropylene Laminated Paper) ®の部分放電発生ストレスでの $V-t$ 試験結果を図 1 に示す。30 kV/mm のシート試験において、7000 時間課電後でも絶縁破壊には至っていないものの、仮にこの時点で絶縁破壊したと仮定した場合の $V-t$ 寿命係数 n 値は 20 以上となり、非常に安定した長期性能を有していることが確認されている。

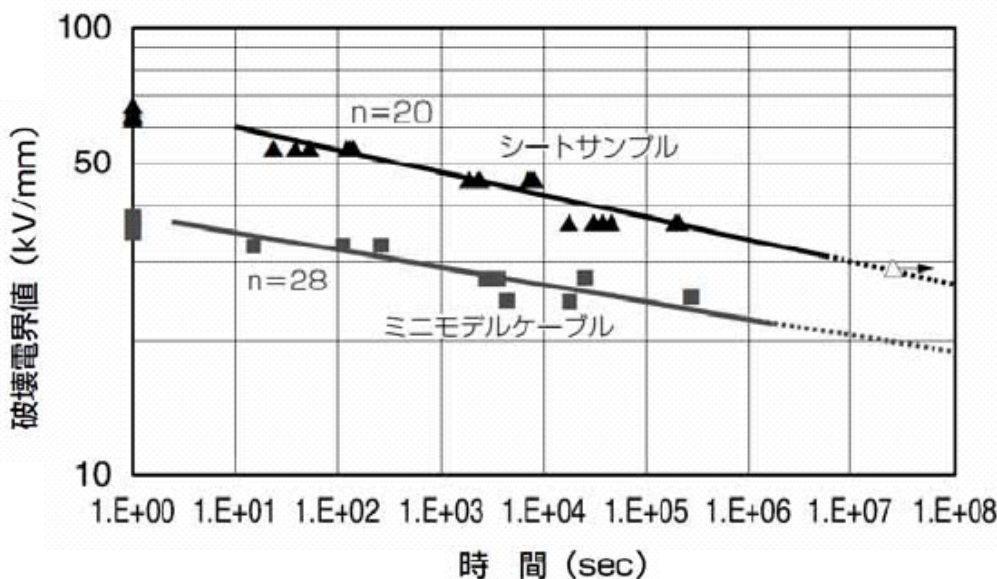


図 1 液体窒素含浸 PPLP®の $V-t$ 特性

②機械的劣化

超電導ケーブルは運用中の温度変化が無い場合、常温から -200°C への冷却、またはその逆の昇温時の熱機械履歴のみ考慮すればよい。この温度変化に伴う歪履歴 0.3% (歪緩和対策を講じない場合) でも超電導線材 (DI-BSCCO® (高強度仕様)) は劣化が生じず、かつケーブルは熱収縮吸収機能を持たせた設計が可能であり、断熱管 (SUS 管) は S-N 特性において十分な裕度を有していることから、基本的な問題は無いと言える。尚、ジョイント、端末に代表される特異点 (ケーブル線路の不連続点) については、熱機械的挙動を考慮した設計、評価、実証が必要であり、それが実証試験の主目的の一つになっている。3 心一括型超電導ケーブルについては、2002 年の実用性検証試験、韓国 KEPCO プロジェクト、米国 ALBANY プロジェクト等、超電導ケーブル性能を評価しつつ着実に信頼度を高めている状況にある。

4.3 冷却システムの信頼性

超電導ケーブルの冷却システムにおいて、メンテナンスの必要な機器は、回転、摺動部を有するポンプ、冷凍機である。超電導機器の長時間連続運転の事例は少ないものの、延べ数千時間を越えて安定して運転、運用できることがこれまでに実証され、消耗品の調査状況も合わせると 1 年程度の連続運転は十分可能であることが分っている。今後、運用実績を積み重ね、長期連続運転に向けての検討、実証が重要である。

超電導ケーブルシステムの運用において、最も多い質問は、「冷凍機やポンプが停止した場合の対応」であり、この背景には冷凍機やポンプの停止が送電停止に瞬時に直結するとの誤った認識

が存在する。

冷却システムを緊急停止した場合、超電導ケーブルによる送電がどの程度継続できるかどうかは重要な設計事項である。冷却システムが停止する状態としては、①冷凍機が停止し循環ポンプが稼動している場合、②両装置ともに停止した場合、の 2 ケースが想定され、これらを模擬した試験がこれまでに実施されている。実用性検証試験（2002 年 66 kV・1000 A 3 心一括型・100 m 線路）では表 1、図 2（温度上昇測定結果例）に示す通り、いずれも 5 時間程度の送電が継続できることを示している。この送電継続時間は実線路の設計条件および運用条件によって個別の対応が必要であるが、特に、温度上昇要因である「超電導ケーブルの AC ロス」の低減が冷却設備停止時の送電継続時間を延伸する上でも重要であり、さらに、AC ロスに相当する損失が無い DC 超電導ケーブルが、事故時送電時間継続の面でも極めて有利となる。

表 1 冷却システム故障模擬試験結果（66kV 1000A 3 心一括型・100m 実用性検証試験）

ケース	実験結果
冷凍機故障、ポンプ運転の場合	ケーブル液温は 1.4K/h の割合で上昇 この時定格電流 1000A を 5 時間通電することができた。
冷凍機故障、ポンプ故障の場合	液が循環していないので、ケーブル端末付近で局所的な温度上昇が見られた。この時、定格 1000A を 5.5 時間通電することができた。

超電導線材については、既に高性能化と量産化が図られて材料サイドの準備が整い、超電導ケーブルは開発段階から実適用検討段階になってきた。超電導ケーブルシステムが、従来のケーブルシステムと同等もしくはそれ以上の高信頼性を有するタフな送電システムとして認知されるためには、何事もなく安定して超電導ケーブルシステムを運用することが何よりも重要であり、かつ難しい課題でもある。

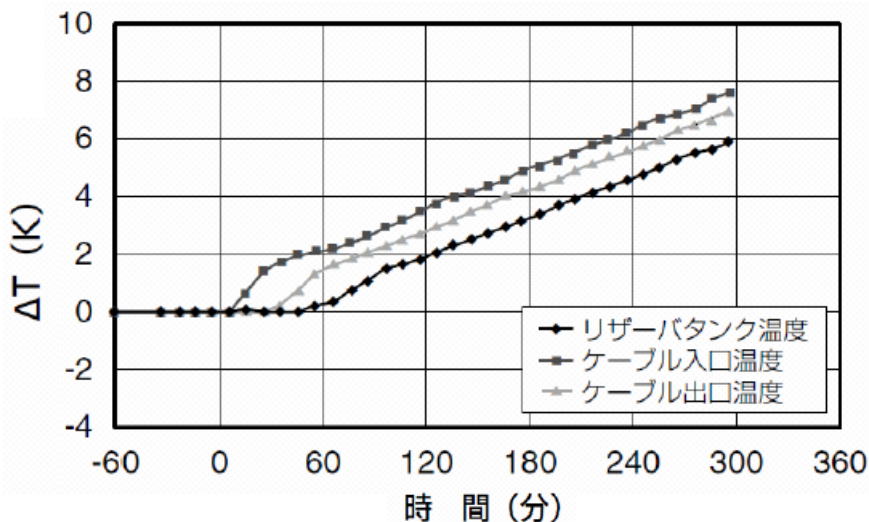


図 2 冷却システム故障模擬試験結果「冷凍機故障、ポンプ運転のケース」（66kV 1000A 3 心一括型・100m 実用性検証試験）

次回は「郷に入れば郷に従え」と題し、超電導ケーブルのニーズについて紹介する予定です。

【隔月連載記事】

超電導送電事始（その 5）

住友電気工業株式会社
超電導・エネルギー技術開発部
主幹 廣瀬正幸

5. 「郷に入れば郷に従え」超電導ケーブルのニーズ

超電導送電事始①に示した通り、超電導ケーブルシステムは経済性、信頼性、環境面を中心に様々なメリットを有している。また、その目的、期待する効果が最も発揮できる超電導ケーブルシステムが求められる。

世界の超電導ケーブルシステムの開発および取り組み状況を整理すると、電力需要が急増中の中国、送電網再整備、増強が必要な米国、送電網の簡素化を図る韓国、既存ケーブルの大容量リプレースを想定する日本など、各国の電力事情を反映したものとなっていることが分かり、大変興味深い。一方、重要課題である超電導線材の高性能化、低コスト化が実現されれば、超電導ケーブルはインフラ整備を最小限とする低コスト線路で、かつ省エネルギーかつ CO₂ 低減に貢献する次世代ケーブルとして位置付けられ、その期待は大きい。

従って、超電導ケーブルの検討、開発、実証の状況は各国が直面している状況（ニーズ）と関連することから、米国、そして韓国、日本などのアジアにおける超電導ケーブル開発の背景を整理して紹介する。

5.1 内外の超電導ケーブルプロジェクト

表 1 内外の超電導ケーブルプロジェクト実績および計画

 終了、 継続中、 新規							
地域	プロジェクト名	主な参加社	線路条件	絶縁	相構成	端末	試験期間
日本	実用性検証プロ	東京電力、住友電工	66kV、1000A、100m	低温	三心一括	固定	2001-2002
	Super-ACE	Super-GM	77kV、1000A、500m	低温	単心×1		2004-2005
	高温超電導ケーブル実証プロ	東京電力、住友電工、マエカワ	66kV、3000A、200～300m	低温	三心一括	固定	2007-2011
米国	デトロイト	Pirreli	24kV、2400A、120m	常温	単心×3		失敗
	Southwire	Southwire	12.5kV、1250A、30m	低温	単心×3		2000-
	Albany (ph1)	住電、SuperPower,BOC	34.5kV、800A、350m	低温	三心一括	固定	2006-2007
	Albany (ph2)	住電、SuperPower,BOC	34.5kV、800A、30m部分	低温	三心一括	固定	2007-
	OHIO	Ultela, ORNL	13.2kV、3000A、200m	低温	三相同軸		2006-
	LIPA (1)	AMSC, NEXANS	138kV、2400A、600m	低温	単心×3		2007-
	LIPA (2)	AMSC, NEXANS	138kV、2400A、600m	低温	単心×3		
	New Orleans	Southwire, NKT	13.8kV、2.5kA、1760m	低温	三相同軸		2009-2010
	Hydra	Southwire, AMSC	13.8kV、?A、?m	低温	三相同軸		2010-
欧州	コペンハーゲン	NKT	30kV、200A、30m	常温	単心×3		2001-2003
	Nuon	NKT, Plexair	50kV、3kA級、6000m	低温	三相同軸		2008-2011
アジア	雲南	Innopower, InnoST	35kV、2000A、33.5m	常温	単心×3		2004-
	蘭州	中国科学院	10.5kV、1500A、75m	常温	単心×3		2005-
	KEPCO	住友電工	22.8kV、1250A、100m	低温	三心一括	固定	2006-
	DAPAS	LSケーブル	22.8kV、1250A、100m	低温	三心一括		2007-

表 1 に示す通り、超電導ケーブルシステムの実用化に向けて内外で多くのプロジェクトが実

施、計画されている。電圧階級、ケーブル構造（単心、3 心一括、同軸）、プロジェクトの目的、位置付けなどから、プロジェクト毎にいろいろな顔を有している。特に、米国において複数のプロジェクトが並行して実施されていることは非常に特徴的であり、如何に超電導ケーブルの実用化が待望されているかが窺われる。

5.2 米国

米国における大都市停電のニュースがそれほど驚かなくなってきたと思うのは気のせいであろうか。北米の大停電以降、マンハッタンの夜景の消灯や冷房の停止などの報道からも米国の電力供給は非常に逼迫していることが窺え、送電網の増強、整備は米国政府の最重要課題として位置付けられている。さらに NY での老朽蒸気配管の爆発事故のように設備の老朽化が指摘されている。

従って、送電網の補強（増強）の必要性に加え、既存設備の老朽化、低電圧大容量送電ニーズ（EMI 対応）などがあり、既存ルートのリプレースや、低電圧大電流による送配電ネットワーク（電力送配電網整備）を実現する上で超電導ケーブルシステムが非常に有効であり、期待されている。また、米国では超電導がエネルギー輸送のキーテクノロジーと位置付けられており、図 1 に示すように電力送電網に超電導を適用する施策が政府レベルで検討されていることは非常に興味深い。この方針と同調して DOE（米国エネルギー省）の SPI（Superconductive Partnership Initiative）プロジェクトにおいて 3 プロジェクト（Albany、Ohio、LIPA）が進められている。表 1 に示す通り、Albany および Ohio は、それぞれ 34.5 kV、13.2 kV と送電用としては低い電圧であるのに対し、LIPA は 138 kV と電圧階級に差がある。また、電圧が高い場合は絶縁厚の関係で単心型が選択され、電圧が低い場合はケーブル本数が少なくなる 3 心一括型や同軸型の適用が可能になる。さらにケーブルルートによって、超電導ケーブル固有の冷却時の熱収縮の吸収や接続部（ジョイント）の要否などによって、適用可能で最も有効な超電導ケーブルが選定されることになる。Albany、Ohio は既に実運転評価が行われており、LIPA は現在建設中である。さらに、次プロジェクトが公表されていることから、米国において超電導ケーブルシステムの本格採用が急がれているかが分る。また、並行して超電導限流器の検討が SPI プロジェクトで進められており、限流器との組み合わせによって、超電導ケーブルシステムの有効性が向上するとともに、電力向け超電導応用機器としての市場が広がるものと期待されている。

National Energy Policy

2001年5月Cheney副大統領からBush大統領に提出
超電導をエネルギー輸送技術のキーテクノロジーと位置づけ

Office of Electric Transmission and Distribution

老化した時代遅れのグリッドインフラの問題点を扱うために2003年DOE内に設立

A National Vision for Electricity's Second 100 years

2003年4月～検討
2010: 10マイル超電導ケーブル計画
2020: 長距離超電導ケーブル運転
2030: 北米大陸に強固な超電導送電網

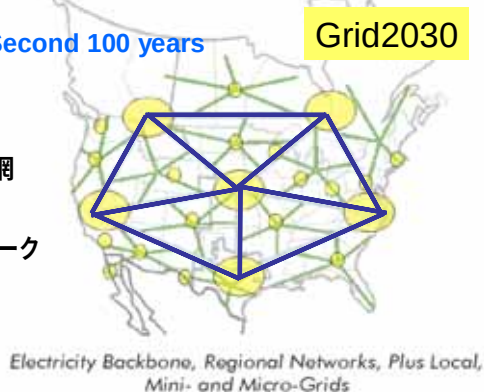
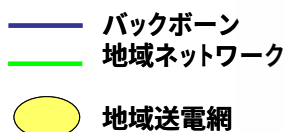


図1 米国における超電導ケーブルへの期待

5.3 日本

日本では米国に先んじて実証試験が行われており、超電導ケーブルの開発が（技術的に）先行している。また、韓国（KEPCO）への超電導ケーブルシステムの納入、米国 Albany プロジェクトでの超電導ケーブルシステムなど、日本の超電導ケーブル技術が適用されていることは特筆すべき事項である。

一方、日本の送配電系統は、設備が新しく、かつ系統運用が堅牢でもあることから非常に高い信頼度を有し、米国のように逼迫した状況には至っていない。しかしながら、従来の電力ケーブルの寿命（30 年設計）により今後電力ケーブルの更新時期が来ること、IT を中心に電力需要が増加していること、より環境面に配慮した設備化が望まれること、NY のマンハッタンのように既存インフラの更新が難しくなることなど、超電導ケーブルに期待されるところは大きく、所謂リプレイス用途を中心に適用検討が進められている。その期待に応えるためには、（超電導送電始④に記述した通り）超電導線ならびにケーブルの高性能化、低価格化の早期実現と並行して、既存電力ケーブルシステムと比して遜色のない信頼性を有することを評価する実線路評価、すなわち実系統での実証プロジェクトの成否が、超電導ケーブルを日本の電力系統で構成し得るかどうかを見極める上でも非常に重要である。

5.4 韓国、中国

韓国、中国における超電導ケーブルシステムの適用例を図 2 に示す。韓国では電力需要の増加に対応して送配電系統を再構築するに当り「変電所の省略」を可能にする超電導ケーブルシステムへの期待が高い。これは、超電導ケーブルの特長の一つである「低電圧長距離送電」（低電圧化に伴う充電電流の低減により送電距離の延伸化が図れる）に着目した広域低電圧送電系統の超電導ケーブル適用例として興味深い。また、中国では電力需要の高い東海岸への大電力供給、ならびに上海、北京地区配電用途において超電導ケーブルの有効活用が検討されている。いずれも大容量送電のニーズと設備規模縮小化の両者を満足するもので、電力設備の充実している日本に比してその重要性、期待は高く、その必要時期は早いと言えよう。

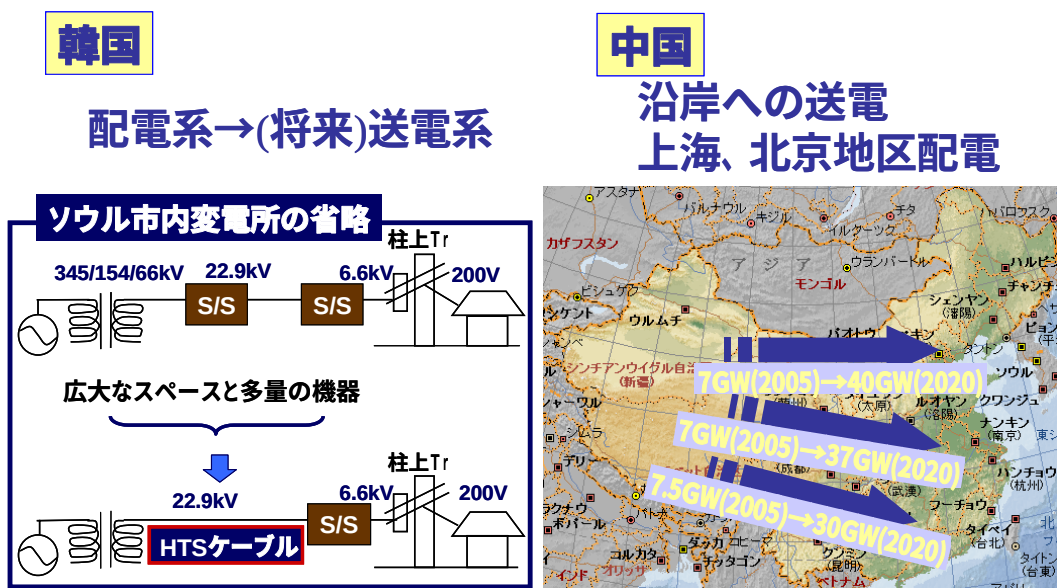


図 2 韓国、中国における超電導ケーブルのニーズ（例）

超電導ケーブルは「より大電流、より低損失」を目指して開発が進められている。この開発において、超電導線材そのものの高性能化はもちろんのこと、よりコンパクトで超電導線材の高電流密度運用に向けたケーブル構造の検討が重要となる。「大電流＝磁場大」の関係から導体サイズをコンパクト化するほど、超電導線材に流れる電流密度が大きくなるほど、交流損失が大きくなる。表現を変えれば、導体およびケーブルサイズを大きくし、定格電流に対する超電導導体の臨界電流を大きくすれば、損失面ではより低減が図れることを意味する。従って、大容量・低損失を実現する検討とコンパクトを重要視する検討とはアプローチが異なり、それぞれのニーズに対応する超電導ケーブルシステムを、経済性も含めて最適化する手法が今後必要になると考えられる。

また、超電導ケーブルの損失等を評価する場合、超電導ケーブルのサイズや超電導線の電流密度などの設計諸元を考慮することが重要であり、よりコンパクトなサイズや超電導線材の使用量を極力少なくしてコストパフォーマンスを高めたケーブルであればあるほど、低損失化が難しくチャレンジブルであることをよく認識しておくことが、超電導ケーブルシステムをよく理解する上でも重要である。それは、最もコンパクトな導体構成である 3 心一括型の技術がそのまま単心型、3 相同軸型に容易に適用し得ることでもある。

各国の送配電システムの現状ならびに将来動向をふまえた超電導ケーブルシステムの検討として、大容量・低損失効果を期待するケース、リブレース等の寸法的制約の中で大容量送電を実現するケース、環境面や立地面で超電導ケーブルによってのみ実現可能なケースなど、具体的なアプリケーションとして議論されるレベルに超電導ケーブルシステムの技術は到達してきたとも言えよう。

次回は、本項でも記載した Albany プロジェクトを中心に、実線路での超電導ケーブル評価の意義を「論より証拠」と称して紹介する。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導送電事始（その 6）

住友電気工業株式会社
超電導・エネルギー技術開発部
主幹 廣瀬正幸

6. 「論より証拠」 実証プロジェクトの意義

超電導送電事始と題しての連載は、3 心一括型超電導ケーブルが世界で初めて実系統運用を開始したことが発端となっている。この 3 心一括型超電導ケーブル技術は東京電力と住友電工が 1990 年代初より共同開発を進め、2001～2002 年に 66 kV 実用性検証試験として実施した 100 m の長期試験で確認された技術が踏襲されている。その後、超電導送電事始⑤にも述べた通り、超電導ケーブルシステムのニーズは日本よりも米国の方が高いこともあり、米国 Albany プロジェクトに日本の 3 心一括型超電導ケーブル技術が（日本に先駆けて）日本よりも電圧の低い 34.5 kV ケーブルに適用された。これは、日本の超電導ケーブル技術が世界的に先行し、かつ実用化段階に至っていることを示唆している。また、国際的なプロジェクト推進体制は、将来の超電導ケーブルによる広域送電網を構築する上で、その基盤インフラを実現する姿を示しているとも言える。超電導ケーブルシステムの本格適用に向けては、超電導線材の高性能化、低価格化やケーブルシステムとしての高信頼性を中心とした技術的展開が必要であり、これからは実績を作りながら社会基盤インフラとしての技術を確立してゆくことが重要である。

ここでは、米国 Albany プロジェクトにおいて、（既存ケーブルと同様の）ケーブル布設、接続施工や、運転状況などについて紹介する。

6.1 Albany ケーブルの概要

Albany プロジェクトは米国エネルギー省（DOE:Department of Energy）が資金提供する実系統での超電ケーブル実証試験プロジェクトの 1 つで、そのシステム構成および線路仕様を図 1、表 1 に示す。本プロジェクトは、NY 州の州都 Albany 市の National Grid（旧 Niagara Mohawk）電力会社の 2 変電所（Menands/Riverside）間約 3 km の実線路において、高速道路を横断する 350 m 区間に超電導ケーブルを適用する実証プロジェクトである。

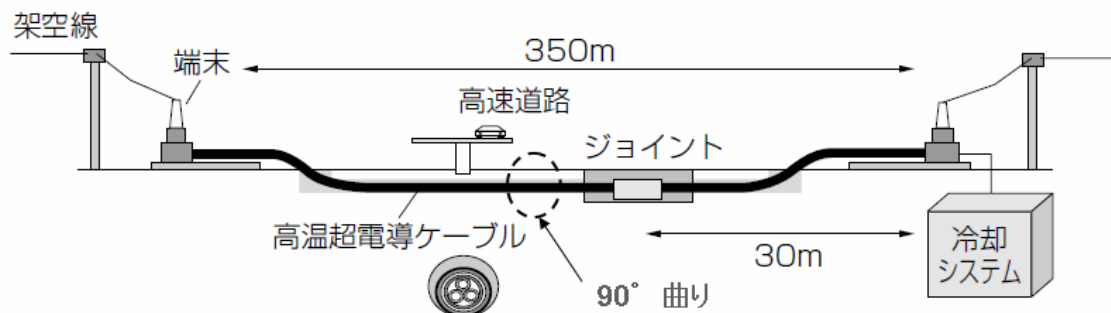


図 1 超電導ケーブルシステム構成図（米国 Albany）

表 1 超電導ケーブル線路仕様（米国 Albany）

項 目	仕 様
ケーブル構造	3 心一括型
電圧・電流	34.5kV, 800Arms
長 さ	350m (320m + 30m)
付属品	気中端末（両側） 中間接続部（マンホール内組立て） LN2 リターン管（350m）
布設条件	地中管路（管路サイズ 6inch）
短絡電流条件	23kA, 38cycles

6.2 管路布設の実証

本線路は、90°曲がりや最大約 5 m 高低差が存在する 6 インチ管路で構成され、従来ケーブルと同じ工法（ウィンチによりケーブル先端を引張り、管路内に布設する）を採用した。布設状況を図 2 に示す。布設最大張力は、管路摩擦係数 0.25 に相当する 2 ton であり、断熱管真空度等、超電導ケーブルに異常の無いことを確認している。超電導ケーブルは大容量でありながらコンパクトで管路内布設できることが長所の一つであり、それを実証した意義は大きい。



図 2 超電導ケーブル布設状況（米国 Albany）

6.3 ジョイント、端末の実証

送電線路を構成する場合、ケーブル本体に加え、端末やジョイントが必要で、その構造や技術はケーブル本体よりも複雑で難解である。また、ケーブルそのものも端末やジョイントの構造や施工方法に配慮した仕様にする必要がある。従って、新規にケーブルを実用化するにはジョイントや端末を組み入れた検証、評価が重要であり、さらにジョイントはマンホール内の限られたスペースで施工するという難しい課題が課せられる。本線路は、図 3、図 4 に示すジョイント

や末端で構成されており、ジョイントを含む線路として世界初である。さらに、コンパクト化、施工簡素化を図る必要はあるものの、ジョイントを含めた超電導ケーブル線路を実運用し、良好に異常なく運転されることを実証した意義は極めて高い。また、図 4 は運用開始セレモニー時の写真であるが、本プロジェクトが国際的な取り組みになっていることが窺える。

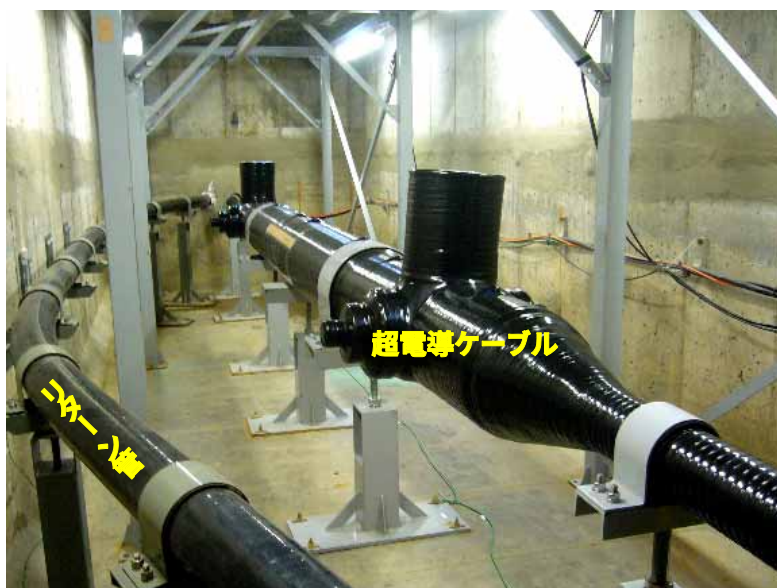


図 3 地下マンホール内のジョイント（米国 Albany）



図 4 3 心一括型端末（米国 Albany）

6.4 実系統運用

本線路は、冷却システムを含めた耐圧力試験、冷却後の臨界電流、熱損失、冷媒循環（圧力損失）、そして竣工耐電圧（DC 課電）などの各種試験に良好であった結果を受け、現地時間 2006 年 7 月 20 日 21 時に実系統実線路への接続が行われた。長尺超電導ケーブル線路として実系統送

電が開始された歴史的な瞬間である。その後、2007 年 5 月 1 日まで延べ略 7000 時間の実運用（phase 1）が行われており、この間の運転状況事例として図 5 にケーブル入口、出口の温度および送電電力を示す。ケーブルの温度に大きな変化はなく安定に運転できていることが分かる。また、図 5 中に記載している通り、短絡電流（想定内）の履歴において、正常な温度範囲内に超電導ケーブルシステムが維持できていることを確認している。さらに、本ケーブルシステムでは、現地運転状況の遠隔モニタおよび遠隔運転制御が可能になっており、無人による実系統送電が実現できたことは、超電導ケーブルシステムが高い信頼性の下に運用可能であることの実証に他ならない。

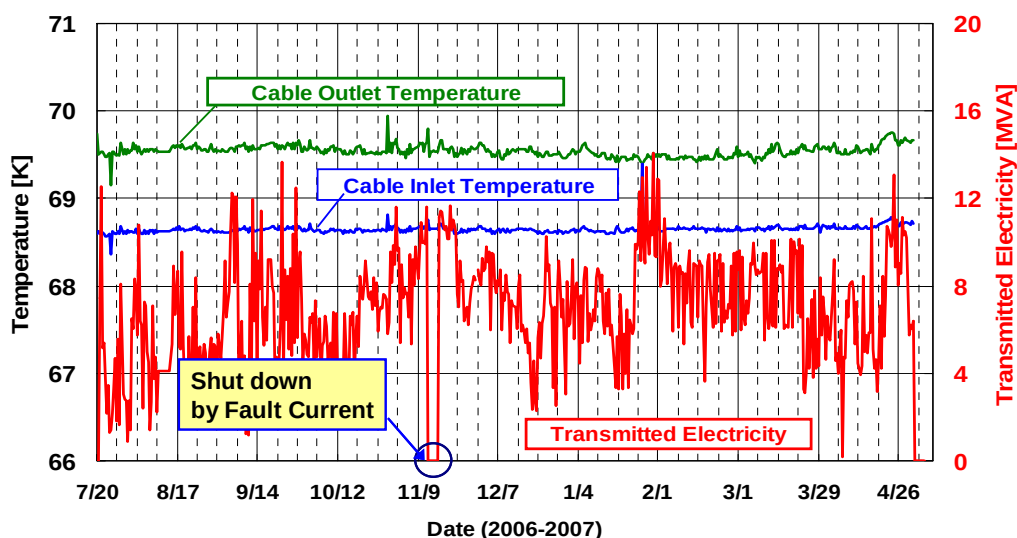


図 5 実系統運転状況（米国 Albany： phase 1）

米国 Albany プロジェクトの実系統送電は、超電導ケーブルシステムが実用化段階に入ってきたことを示す意味で、その意義は非常に大きい。ところで、電力系統は交流で構成されているため超電導ケーブルも交流ケーブルとしての開発、実証が進められているのが現状といえる。しかしながら、超電導ケーブルの利点を最も有効に引き出す用途は「直流」であり、将来は交流用途のみならず直流用途を検討する必要があると考えられる。日本においても、北海道-本州連系ならびに紀淡連系に直流海底ケーブルが適用されるなど、特に広域電力網を形成する場合に直流連系は重要な技術になると考えられる。その事例の一つとして、自然エネルギーと直流超電導ケーブルシステムとを組み合わせる GENESIS 計画 (Global Energy Network with Solar cells and International Superconductor grids) が提案されている。従って、超電導ケーブルシステムの今後の展開においては、交流用途、直流用途の両面からの検討が重要であり、かつ両用途共に発展してゆくことを期待したい。

光ファイバ（非メタル）ネットワークの発展により情報の世界が身近になったように、セラミック（非メタル）の高温超電導ケーブルで構成されるエネルギーネットワークにより、世界が結ばれるようになるのもそう遠くは無いのかも知れない。

結