



高温超電導の実製品化検討

廣瀬正幸・山田雄一・増田孝人
佐藤謙一・畑良輔

Studies on Commercialization of HTS Wire — by Masayuki Hirose, Yuichi Yamada, Takato Masuda, Ken-ichi Sato and Ryosuke Hata — By using the Controlled Over Pressure (CT-OP™) process, Sumitomo Electric Industries, Ltd. (SEI) has developed a world's-longest, commercial-level $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$ (BSCCO) high-temperature superconducting (HTS) wire and named it “Drastically Innovative BSCCO (DI-BSCCO®)”. Because the DI-BSCCO® wire has the high critical current, high strength, high production yield and anti-ballooning properties and it is far superior to conventional BSCCO wires, SEI is pursuing the use of the DI-BSCCO® wire for HTS applications. This paper summarizes the result of the study on HTS cable system. The authors studied the reliability from the perspectives of lifespan and failure, economic efficiency from transmission loss reduction and energy saving performance, and environmental performance from EMI and LCA evaluation, and concluded that HTS cables have reached the stage of actual utilization. It is expected that after HTS cables are evaluated on actual grids in the near future, practical utilization will be accelerated. SEI is aimed to penetrate the global HTS market with its DI-BSCCO® wire by further improving the performances and promoting the practical application of the wire.

1. 緒言

高温超電導が発見されてはや20年になろうとしている。当社では、高温超電導発見当初より材料研究から応用製品開発に至るまで、その研究開発を進めてきた。最近では、第1世代高温超電導線とも呼ばれるビスマス系 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) 超電導線の性能を当社が独自に開発した加圧焼成技術と設備により、大幅に向上させ、世界最長レベルの高性能高温超電導線を商用ベースで供給できる段階になってきた⁽¹⁾。加圧焼成法により製作されたビスマス系超電導線は、高臨界電流、高強度、高歩留り、アンチバルーニング特性など、これまでのビスマス系超電導線のほぼ全ての特性を凌駕し、第1世代 BSCCO 線材の常識を改める革新的な超電導線である。当社は、この革新的ビスマス系超電導線を DI-BSCCO® (Drastically-Innovative BSCCO) と称し、その実用製品の開発を展開している。本論文では、その取り組み、検討すべき課題等について、超電導ケーブルシステムの事例を中心にとりまとめて紹介するものである。

2. 超電導線材の展開

2-1 超電導線材の低価格化 超電導とは、いわゆる「抵抗がゼロ」で通電可能な状態のことを言う。ロス無しで低電圧大電流送電が可能となり、コンパクトな導体を実現することができるため、低損失の送配電ケーブルや、強い電磁石への適用が期待される。ただし、高温超電導は

液体窒素温度 (約-200℃) で運用されるので、冷却効率 (コスト) も含めた経済性評価や、超電導線材自身の高性能化、低価格化を進めることが重要な課題となっている。図1にDI-BSCCO®のロードマップの一部を示す⁽²⁾。現状 \$100/kAm@77K (臨界電流 $I_c = 200\text{A}$ で線材価格約2,000円/m) が視野に入っており、将来的には、約 \$20/kAm@77K まで高性能化、低価格化が進むものと考えられる。\$20/kAm の価格が銅線とほぼ同等であることから、DI-BSCCO®の超電導機器への応用の期待が高いことが分かる。

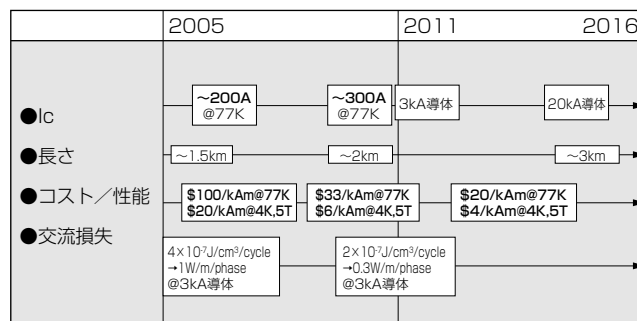


図1 革新的ビスマス系超電導線(DI-BSCCO®)のロードマップ

2-2 超電導線の高性能化、信頼性向上 当社では約20年前からビスマス系超電導線の開発を行っており、そ

れらは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。当社の線材使用実績について、これらの劣化要因より整理した結果を表1に示す。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。また、表1の機器に使用された超電導線材は加圧焼成法を適用する前の線材であり、現在のDI-BSCCO®は機械強度がはるかに向上しているので、コンパクト化、信頼性向上面では有利である。また、設計に使用する歪特性の例を図2に示す。高強度仕様の場合、0.3%程度の歪まで臨界電流の低下は無いことが分かる。加圧焼成法によるDI-BSCCO®は、超電導部分の密度が100%となるため、高強度化を実現するとともに、超電導部に液体窒素が浸透することも無く、急昇温時のパルニング現象が生じないという特徴も有している。品質保証面では、DI-BSCCO®の出荷検査では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わたって保証している。

合、0.3%程度の歪まで臨界電流の低下は無いことが分かる。加圧焼成法によるDI-BSCCO®は、超電導部分の密度が100%となるため、高強度化を実現するとともに、超電導部に液体窒素が浸透することも無く、急昇温時のパルニング現象が生じないという特徴も有している。品質保証面では、DI-BSCCO®の出荷検査では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わたって保証している。

3. 超電導ケーブルの特徴と適用用途

超電導ケーブルの特徴と適用用途との関係を整理して図3に示す。超電導ケーブルシステムでは、その信頼性評価と経済性評価が非常に重要である。経済性が課題となる場合、超電導ケーブル自身が現用ケーブルよりも経済的であるケースと、総合的にケーブルシステムとして経済的であるケースとに2分される。前者については、超電導ケーブルの目標性能、目標コストを考慮して検討する必要があり、後者については、現状のインフラ設備の簡素化による比較評価が主となる。一方、CO₂削減、EMIフリー等の環境面では、超電導ケーブルが必須となるので、必然的に超電導ケーブルが適用されることになる。

表1 ビスマス系超電導線の長期間使用実績

製品種類	冷却or振動サイクル	励磁 or 通電確認	結果
電流リード	200サイクル以上 @RT~4.2K	冷却サイクルの 数倍以上	劣化の兆候無し
	・直線タイプ：100 μ の歪みで4×10 ⁶ サイクル@77K	・液体窒素中で 1,000A (Ic=750A) まで通電	ビスマス系線材 の機械的振動に 対する十分な耐 久性を確認
	・アークタイプ： 実際のマグネット に装着して加速 度試験@12~38K	・過負荷も含め、 加速度試験後、 1,000Aまで通電	
マグネット (1998.10- 2000.12)	5サイクル@RT ~20K	1~2回/週、 合計で100回程 度×数度の励消 磁(磁場の上下)	劣化の兆候無し (7Tまで5分 で励消磁)
モータ用 コイル	50サイクル@RT ~77K	10回のヒートサイ クル毎に励消磁	劣化の兆候無し
ケーブル (2001.06- 2002.06)	4サイクル@RT ~77K	合計：2,400時間 @1,000~1,500A	線材Ic、交流ロス、 変化無し

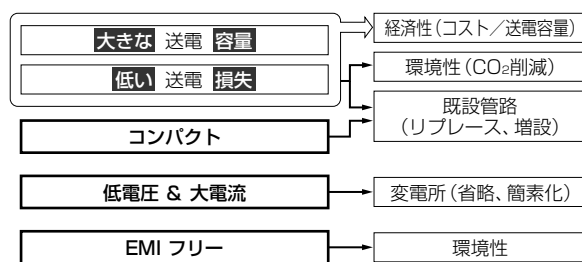
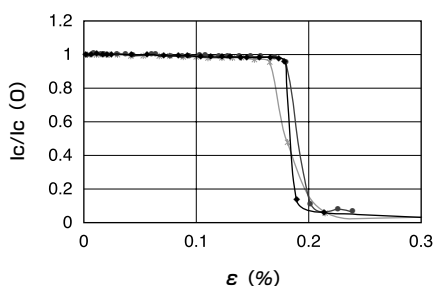
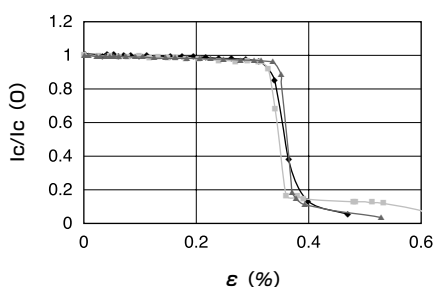


図3 超電導ケーブルの特徴と適用用途



(a) 高臨界電流仕様



(b) 高強度仕様

図2 超電導線材(加圧焼成法)の臨界電流-引張歪特性(京都大学・長村)

4. 超電導ケーブルの信頼性評価

4-1 実用性検証試験の評価 当社の3心一括型超電導ケーブルの基本構造を図4に、その実用性検証試験の試験状況、試験概要、試験結果を、写真1、表2、表3にそれぞれ示す。

3心一括型超電導ケーブルは、銅撚線フォーマ上にビスマス系超電導線をスパイラル状に巻回し、PPLP® (Polypropylene Laminated Paper) 絶縁を施した外側にビスマス系超電導線の帰路回路を形成し、その外側に保護層を設けてコアを形成している。このコアを3本撚り合わせた後、波形(コルゲート)ステンレス管(2重断熱管)が構成され、この2重管内が真空引きされてクライオスタットを形成する。

3心一括型超電導ケーブルは、当社と東京電力(株)の共同研究の下に2001年~2002年に長期実証試験に供試され、超電導ケーブルシステムが実用可能な技術レベルにあることを実証した⁽³⁾。

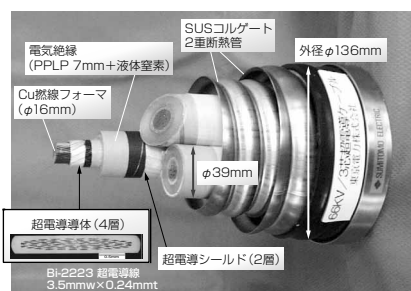


図4 超電導ケーブルの基本構造



写真1 実用性検証試験

表2 実用性検証試験概要

定格電圧	66kVrms	
定格電流	1kArms	
定格容量	114MVA	
超電導ケーブル	型	3心一括型
	長さ	100m
	絶縁	PPLP® (Poly-Propylene Laminated Paper) 液体窒素含浸
	3相分岐部	2
	端末	6(気中端末)
布設	地上布設(一部、150mm管路に布設)	
冷却システム	過冷却液体窒素循環	

表3 実用性検証試験結果

項目	結果、測定	備考	
電気的特性	電圧	AC 130kV (3時間) 良好 インパルス-385kV × 3回 良好	66kV OFケーブル規格 (5m サンプル) 350kV (66kV BIL) × 1.1
	静電容量、tanδ	0.24μF/km、0.08% AT 77K	
	V-t 特性	n-value > 20 (部分放電発生レベル)	PPLP® シート試験
	臨界電流	Ic > 2700A (DC)	for 100m cable
	機械的特性	曲げ試験	直径1.9m 曲げで劣化なし
熱的特性	ACロス(3相)	2.0W/m at 1kA	for 100m cable
	熱侵入	2.5W/m	for 100m cable
	長期特性	2400時間以上課通電 6500時間以上冷却	for 100m cable
システムパフォーマンス	負荷変動	1000A 16時間 + 200A 8時間 (1ヵ月)	for 100m cable
	過電流	AC 1500A	公称電流の1.5倍
	冷却サイクル	4回(四季)のサイクルで劣化なし	for 100m cable

超電導機器の場合、常温から液体窒素温度(77K)に冷却する際の約220度の温度変化による熱収縮(0.3%歪)が生じる。当社の3心一括型超電導ケーブルは、この熱収縮を吸収する「3心コア弛み構造」を採用し、冷却時のコア収縮をこの弛み構造で吸収している。この長期試験期間中に、冷却～昇温のサイクルを4回繰り返し、電氣的に、機械的に安定して良好な特性を有していることが確認されている。さらに、図2に示すとおり、高強度仕様の超電導線材は0.3%の歪に耐えること、DI-BSCCO®は機械特性が非加圧焼成法より大きく改善されているので、さらに信頼性の高い超電導ケーブルの製造が可能になっている。

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は、通電による発熱と、昼夜の温度変化によるケーブル自体の繰り返し伸縮である。超電導ケーブルは保守などに伴う昇温がなければ、断熱管の中はほぼ一定の温度に保持されているので、熱機械的な経年変化の要素はないと言える。

超電導ケーブル自身の性能検証については、初期試験と、長期試験によって行う。しかしながら、超電導ケーブルシステムはケーブル以外に、ポンプ、冷凍機からなる冷却システムが必要となり、これらの機器のメンテナンス技術を確認する必要がある。

①絶縁性能長期寿命特性

超電導ケーブルは運用温度が約-200℃と非常に低く、いわゆる絶縁材料の加熱劣化は生じないが、現状の超高圧ケーブルと同様の課電長期特性、すなわちV-t特性の評価を行う必要がある。超電導ケーブルはOF (Oil Filled) ケーブルファミリーの一員であり、「絶縁テープ+液体含浸絶縁」の複合構造をとる。液体窒素はOFケーブルの合成油と電気強度が類似しており、超電導ケーブルはOFケーブルと同様の絶縁特性を示すものと考えられる。AC絶縁破壊、Imp絶縁破壊等の電気試験結果については多く報告されている⁽⁴⁾。加速課電条件下での部分放電発生ストレスによるV-t試験結果を図5に示す⁽⁵⁾。7000時間課電後でも絶縁破壊には至っていないが、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、PPLP®-OFケーブルのV-t特性と同等であった。

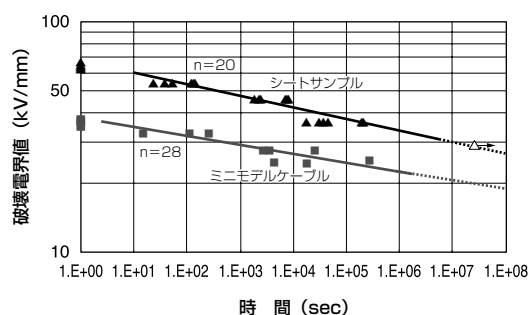


図5 液体窒素含浸PPLP®のV-t特性

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℃への冷却、またはその逆の昇温時の熱機械履歴が劣化要因となる可能性がある。各部材の歪履歴は、その緩和対策を講じないとした場合に約0.3%となる。図2に示す高強度仕様のDI-BSCCO®は0.3%歪に対して劣化を生じない。また、ケーブルそのものに熱収縮吸収機能を持たせて設計するので、熱伸縮による機械的劣化は生じない。一方、断熱管はSUS管で構成されるが、0.3%歪で破断を示す繰り返し曲げ回数は、図6のSUS管のS-n特性⁽⁵⁾より約10⁵回となり、ケーブルの使用条件から見て全く問題の無いことが分る。

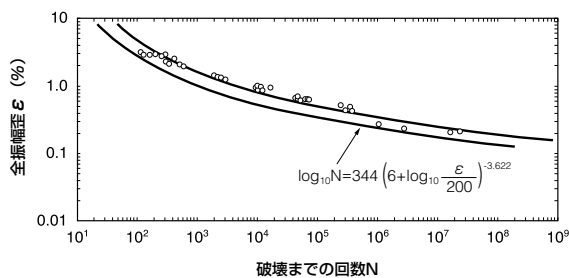


図6 ステンレスシースのS-N曲線と回帰曲線(常温)

4-3 事故電流設計(短絡電流対応)

交流電力系統では、事故時に短時間ではあるが大電流が流れるので、交流用電力機器はこの短時間大電流を許容する必要がある。この大電流を超電導線材のみに流す場合、使用する超電導線材量が事故時のためだけに膨大となるため非経済的である。従って、絶縁破壊に留意するとともに、超電導線材の若干の温度上昇は許容するが損傷を与えることのない設計を行う必要がある。

この方策として、導体の短時間大電流に対しては超電導導体の芯となるフォーマに銅撚線を適用し、シールドの短時間大電流に対しては超電導シールド層の外側に銅シールド層を追加適用することによって、瞬間的な電流を超電導線から銅線に分流させるとともに、短時間温度上昇を抑制するための昇温材料の熱容量を大きくしている。この方策を採用した事例として、2006年竣工予定の米国ALBANYプロジェクト向けHTSケーブルの構造を表4に、短絡試験における各部の温度上昇を図7に示す⁽⁶⁾。

ALBANYプロジェクトでは、最大短絡電流は23kAで、第1段階目保護システムで8cycle遮断を、バックアップとしての第2段階目保護システムで38cycle遮断が可能になっている。これらの条件で短絡電流がケーブルへ侵入した場合を想定して、短絡時間をパラメータとして23kAの短絡試験を実施し、ケーブル導体、シールドの温度上昇を測定した。

38cycle遮断時の最大温度上昇は導体で20K、シールドで50Kであり、遮断される38cycle時点での過渡温度上昇は

表4 Albany向け超電導ケーブルの構造

項目	諸元
フォーマ	銅撚り線
超電導導体	2層、Bi-2223 tape
電気絶縁	PPLP® 厚み4.5mm
超電導シールド	1層、Bi-2223 tape
シールド保護層	銅テープ
三芯より	弛ませた三心撚り
熱絶縁層	2重ステンレスコルゲート管 (2重管の間は真空状態)
保護層	PE + SUS テンションメンバー

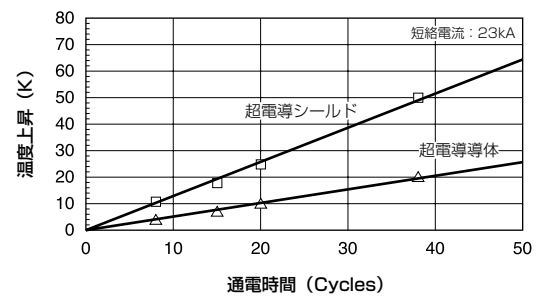


図7 短絡時のケーブル温度上昇

導体14K、シールド24Kであった。解体調査後の外観検査、および臨界温度の測定結果から、この温度上昇による超電導特性への影響がないことが確認され、ケーブル性能を劣化させることは無かった。このようにフォーマや銅シールドのサイズ(仕様)は、短絡電流の条件にあわせて設計される。

4-4 冷却システムの信頼性

(1) 冷却システムの基本構成

超電導ケーブル用冷却システムの基本構成は図8に示す通り、循環冷却用冷凍機と循環ポンプおよびリザーバタンクとが組み合わせられて構成される。リザーバタンクの容量は、超電導ケーブル運用時に想定される温度変化、冷却設備停止時の冷却維持時間等により決定される。

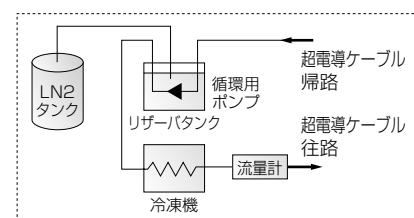


図8 超電導ケーブル用冷却システムの構成

(2) 冷却設備の寿命(メンテの考え方)

超電導ケーブルの冷却システムで、メンテナンスの必要な機器は、回転機であるポンプと冷凍機である。これらの

設備については、定期点検と消耗部品交換が必要となるが、これらの点検および交換インターバルについては頻度の少ない方がよい。未だ長時間連続運転の事例は少ないが、延べ数千時間を越えて問題を生じていない運転実績があり、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。

尚、冷却システムの信頼性をより確実にするには、予め予備装置を導入しておき、常時切替運転を行っておくシステムが好ましい。また、超電導ケーブルシステムの規模が大きくなる場合、必要な冷却システム容量も大きくなるので、大型冷凍機の低コスト化、高効率化、高信頼性の向上等の検討、あるいは小型装置のシリーズ・パラレル運転方式の検討が必要になることは言うまでもない。

4-5 冷却システム停止時の送電継続維持 冷却システムを緊急停止する必要性が生じた場合、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事項である。すなわち、予備冷却システムへの立上げ、あるいは送配電ルートの切替までの間、超電導ケーブルシステムを運転し続けることができればその信頼性を高めることができる。

冷却システム停止の状態としては、①冷凍機が停止し循環ポンプが稼働している場合、②両装置ともに停止した場合、が想定される。これらを模擬した試験を4-1項に示す実証試験線路で実施した⁽⁷⁾。この結果は表5、図9（温度上昇測定結果例）に示す通りであり、いずれも5時間程度の送電が維持可能である。この緊急時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異なってくるので、個別の対応が必要である。中でも、特に温度上昇の要因である「超電導ケーブルのACロス」を低減することが冷却設備停止時の許容送電継続時間を延伸する上で最も重要となる。この面からは、AC送電ロスに相当する送電ロスがまったく無い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5 冷却システム故障模擬試験結果

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。

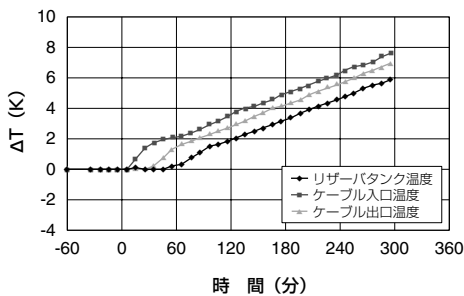


図9 冷却システム故障模擬試験結果(冷凍機故障、ポンプ運転のケース)

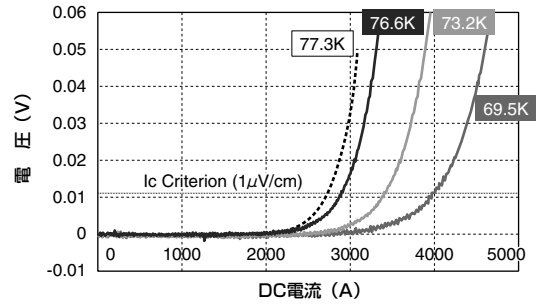


図10 温度変化による臨界電流特性の変化

4-6 超電導ケーブルシステムの信頼性向上検討 超電導線材は、温度によって臨界電流が変化する。図10に4-1項の実用性検証試験に供試した超電導ケーブルの臨界電流温度特性を示す⁽⁸⁾。

例えば、77.3Kにおける臨界電流が2,700Aであるのに対し、69.5Kまで冷却すると臨界電流は約1.5倍の4,000Aにまで増加する。従って、この特性を用いると、冷却能力を向上させることによって、超電導ケーブルの送電容量を増加させることができる。ケーブルの最低運用温度を65Kとした場合、冷却温度としては、理論上77-65=12(K)の冷却温度幅を活用することができる。

この超電導線材固有の特性を応用した超電導ケーブルシステムの過負荷運用例を図11に示す⁽⁹⁾。日本の場合、在来ケーブルを用いた電力系統運用では、事故に備えて1回線の裕度を有する運用を行っている。すなわち、定格送電には2回線で十分なところに3回線用意し、1回線停止しても残りの2回線を100%運転することで定格容量送電を継続するシステムとなっている。一方、超電導ケーブルシステムの場合、定格容量を満たす2回線、もしくは3回線で線路を構成しておく。1回線停止した場合、停止回線の冷却システムを他回線に振り向け、健全回線の冷却能力を向上させ、冷却温度を下げて超電導線材の臨界電流(Ic)を増加させることによって1回線当りの通電容量を向上させ、残りの健全回線のみで定格電流を継続通電させることが可能である。このように超電導ケーブルを用いれば、従来

	従来型電力ケーブル (OF/CV)	超電導ケーブル		
	"3の2"	"2の2"	"3の3"	
1ルート当りの回線配線システム	○ ○ ○	○ ○ ○ 冷却ステーション① 冷却ステーション②	○ ○ ○ 冷却ステーション① 冷却ステーション②	○ ○ ○ 冷却ステーション① 冷却ステーション② 冷却ステーション③
定格(正常)状態	3回線「Not」フル負荷 (67%/回線×3=200%)	2回フル線負荷 (100%/回線×2=200%) 〈送電容量/ルート:1〉	3回線フル負荷 (100%/回線×3=300%) 〈送電容量/ルート:1.5〉	
事故時対応	✗ ○ ○	✗ ○ ○ 2回線でフル負荷 (100%/回線×2=200%)	○ ○ 1回線で過負荷 (200%/回線×1=200%)	○ ○ ○ 2回線で過負荷 (150%/回線×2=300%)

図11 超電導ケーブルを用いた場合の事故・過負荷対応システム

ケーブルシステムに比較して冗長度を小さくして経済性を向上させながら、同時に信頼性の高い送電システムを実現することが可能となる。従って、在来ケーブルと超電導ケーブルの経済比較には冗長度を加味したトータルシステムとしての比較が肝要である。

5. 超電導ケーブルシステムの経済性

5-1 ケーブルルートの簡素化 超電導ケーブルの最も期待される適用対象は大容量送電用途であり、現用ケーブルでは管路布設すると土壤熱抵抗によって送電容量が大きく制限されるために、洞道布設されるケースが多い。洞道の建設コストはケーブル価格に対して非常に高価であるため、洞道を避けて管路布設を可能にする意義は大きい。前述の通り、超電導ケーブルでは、管路による熱的制約無しに既設管路を活用したり、また管路の新設、増設による増容量が可能になる。表6に1,500MVA送電をモデルとし

表6 超電導ケーブルの有効性(ケーブルルートの簡素化)

【検討モデル】 送電容量：1,500MVA	AC		DC
	従来ケーブル (275kV 単心CV)	超電導ケーブル (66kV 3心一括)	超電導ケーブル (130kV 3心一括)
布設形態			
建設コスト (億円/km)	100	20	10

た都心における現用ケーブル(洞道布設)と超電導ケーブル(管路布設)との比較を示す。表6より、ケーブルルートの建設を洞道から管路に簡素化することによる経済的効果が非常に大きいことが分かる⁽¹⁰⁾。

また、超電導ケーブルは、低電圧・大電流使用が可能であるが、この場合、従来の超高圧電力ケーブルと比較して送電電圧に比例する充電電流の制約が無く、この観点から長距離送配電が可能となり、送電電圧を下げるための都市近郊の中間変電所を省略したり、開閉所に簡素化できる応用例が示されている⁽¹²⁾。この場合の経済的効果はさらに大きいものとなる。

5-2 超電導ケーブルの経済性評価 1,500MVA送電ルートを対象に、ロス評価、省エネ評価、経済性等について、従来ACケーブル、超電導ACケーブル、超電導DCケーブルを対象に比較評価した事例を表7に示す。尚、本検討における線材は、Ic(臨界電流@77K)：200A、線材価格：\$20/mとした。

①冷却効率を考慮したロス評価においては、超電導ACケーブルは在来常温ケーブルの約1/4、超電導DCケーブルは同1/40に低減できる。尚、超電導ACケーブルのACロスは「今後の目標値」を想定して算出しているのに対し、超電導DCケーブルではそのような課題は無く、即実現可能な値となっている。

②超電導ケーブルの省エネ効果は大きく、この効果を、金利5%、運用期間30年でディスカウント現在価値(DPV)に換算した場合、および排出権取引(炭素排出権取引価格：2010年頃想定5千円/t-C、ならびに将来考えられる取引価格上昇額の10千円/t-Cとする)を評価した場合、

表7 超電導ケーブルの有効性(超電導ケーブルの経済性評価)

ケーブルシステム	AC		DC
	従来ケーブル	超電導ケーブル	超電導ケーブル
送電容量	1,500MVA (500MVA × 3回線)	同左 (375MVA × 2回線 × 2ルート)	同左 (1,500MVA × 1条)
常规電圧	275kVrms	66kVrms	130kV
常规電流	1kArms/phase	3.3kA/phase	12kA/phase
ケーブル種	単心 CV ケーブル	3心 超電導ケーブル	3心 超電導ケーブル
ケーブル外径	約140mm	約135mm	約135mm
ケーブル条数	9	4	1
送電損失	740kW/km	200kW/km	20kW/km
CO ₂ 排出 (CO ₂ 削減)	778ton-C/km/year (-)	210ton-C/km/year (568ton-C/km/year)	21ton-C/km/year (757ton-C/km/year)
送電損失費用	64.8百万円/km/year (-)	17.5百万円/km/year (▲47.3百万円/km/year)	1.8百万円/km/year (▲63百万円/km/year)
送電損失低減を初期投資に換算 (30年運用、金利5%)	(-)	+728百万円/km (47.3 × 15.4)	+970百万円/km (63 × 15.4)
30年間の 排出権取引	¥5,000/t-C	+85.2百万円/km (5,000 × 568 × 30)	+113.6百万円/km (5,000 × 757 × 30)
	¥10,000/t-C	+170百万円/km (10,000 × 568 × 30)	+227百万円/km (10,000 × 757 × 30)

C換算：0.12kg-C/kWh 発電コスト：¥10/kWh

いずれの場合にも超電導ケーブルの経済的メリットの大きいことが分る。尚、超電導ACケーブルにおいては、ACロス低減効果を加味することによって経済性が現われるのに対して、ロスが侵入熱のみとなる超電導DCケーブルの場合では、現状でもケーブル単独で経済的メリットが顕著に現れることが分る。

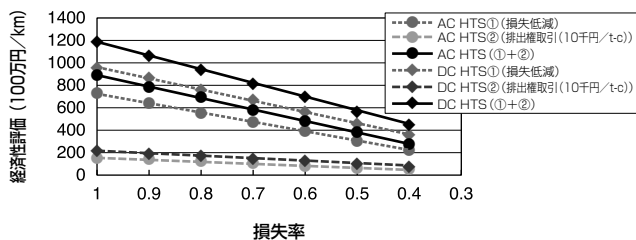


図12 従来ACケーブルに対するHTSケーブルの経済性評価

さらに、負荷率 (Load factor) および損失率 (Loss factor) を考慮した場合の経済効果を整理した結果を図12に示す。負荷率は「ある期間における平均の最大電力に対する比率」であり、損失率は「負荷率1.0での損失に対する実際の損失の比率」である。一般に、負荷率から損失率を求める場合は、

$$\text{損失率} = 0.3 \times (\text{負荷率}) + 0.7 \times (\text{負荷率})^2$$

の式が用いられ、日本電線工業会規格「電力ケーブルの許容電流 (JCS 第168号)」で一般に採用される損失率は、一般送配電線で0.6~0.8、特殊送電線 (火力からの引出し線等) で1.0である。

ここでの検討モデルでは、損失率0.6で経済性評価は約2/3に、損失率0.4で約半分に低減するものの、それでも超電導ケーブル適用による効果は顕著である。尚、実際には個別に経済性評価を行う必要があることは言うまでもない。

6. 超電導ケーブルシステムの環境性

6-1 漏洩磁場なし (EMIフリー) 超電導ケーブルは、図4に示す通り、導体およびシールドに超電導線を適用している。超電導ケーブルの場合、シールドに超電導線を適用することで、誘導により導体電流とほぼ同じ電流を導体と逆位相でシールドに流すことができ、ケーブルとして完全な磁気シールドが形成できる。これにより、渦電流損失や導体交流損失の大幅な低減が可能である。また、ケーブルの外側に電磁波を漏洩さない、EMI (Electro-Magnetic Interference) フリーなケーブルである。図13に、4-1項に示す実用性検証試験で得られた超電導導体およびシールドに流れる電流波形を示す。導体電流とシールド電流の位相が正反対であり、電流値もほぼ等しいことを確認した。また、実際の磁場測定によりケーブル周辺への漏洩磁場の無いことを確認している⁽⁹⁾。

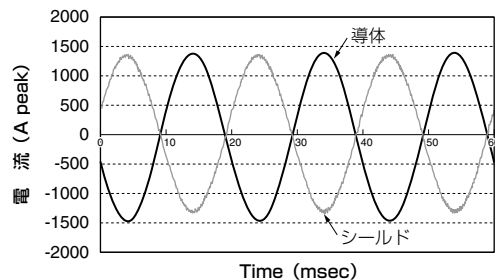


図13 超電導ケーブルの導体およびシールドの電流

また、超電導ケーブルは、従来のOFケーブルの絶縁に採用されているPPLP®とOFケーブルの合成絶縁油に替えて液体窒素の複合絶縁構造である。従って、超電導ケーブルは油を使用しない非可燃・非爆ケーブルであり、万が一液体窒素がリークしても全く無害であるとともに廃棄面での心配もない。従って、超電導ケーブルは「クリーン」で「グリーン」なケーブルであると言える。

6-2 超電導ケーブルのLCA (Life Cycle Assessment) 地球における資源の有効活用、環境に及ぼす影響 (負荷) の評価方法としてLCAが広く用いられている。すなわち、製品それぞれについて、その原材料取得から生産、流通、使用、廃却に至る全過程を「製品の一生」とし、その間に発生する二酸化炭素排出量を評価の対象とする場合が多い。超電導機器についても、その機器の適用目的が省エネルギー・省資源、ならびに環境面での優位性にあるので、LCAの面から評価しても有効である必要がある。そこで、高温超電導ケーブルについてもLCA的評価を試みたので、その概略を示す。

(1) 検討モデル

- ・AC66kV・3kA (350MVA) の超電導ケーブルを対象とし、その比較対象とする既存ケーブルを同容量の275kV 1×1000mm²OFケーブル3条 (管路布設) とした。
- ・超電導ケーブルは、これまでに開発、実証されてきたACケーブル構造を対象とした。ここで使用する超電導線材の臨界電流 (Ic) は、100A, 150A, 200Aとする。また、交流ケーブルよりもさらに低損失効果が期待される超電導直流ケーブルについても評価する。
- ・超電導ケーブルの侵入熱は1.5W/m、ACロスは4, 3, 2W/m (@3kA) の3ケースとし、冷却効率はCOP=0.1とする。
- ・運用は負荷率=1.0の下に寿命を30年とした。

(2) 製造・布設までのLCA評価

従来のOFケーブルと超電導ケーブルの製造および運用時のCO₂排出量を概算した結果を表8に示す。超電導ケーブルの基本構造はOFケーブルの構造と類似しており、その共通部分については大きな差異は無いと考えられる。一方、超電導ケーブルの製造時に発生するCO₂は従来OFケーブルに比して非常に大きい。これは、唯一OFケーブルとは異なる超電導ケーブル固有の事項、すなわち超電導

表8 LCA概算評価(CO₂排出量換算)

	OFケーブル (275kV 1×1000mm ²) 3条/km	3心一括型超電導ケーブル (AC66kV・3kA) 1条/km	単心一括型超電導ケーブル (DC100kV・3.5kA) 単極・1条/km
製造	32t	Ic=100A 約600t	Ic=100A 約170t
		Ic=150A 約410t	Ic=150A 約120t
		Ic=200A 約310t	Ic=200A 約100t
運用 (30年)	9100t	ACロス=4W/m 7100t	1900t
		ACロス=3W/m 5800t	
		ACロス=2W/m 4500t	
合計	9132t	4810~7700t ▲4322~▲1432t	2000~2070t ▲7132~▲7062t

線材の製造に関係するCO₂発生量が大きいことによると考えられる。従って、使用する超電導線材を少なくする、すなわち超電導線材の高Ic化がLCAの観点からも重要であることが分かる。

一方、製造時のCO₂排出量に比して両ケーブルともに運用時のCO₂排出量が非常に大きい。従って、超電導ケーブルの適用による送電損失の低減は、LCA評価においても非常に有効である。AC送電では、より低損失のAC超電導ケーブルの実現により、LCA評価における超電導ケーブルの有効性が顕著になることから、ACロスの低減が今後重要になると考えられる。

DC超電導ケーブルについては、AC超電導ケーブルに比して使用する超電導線材が少なく、かつACロスに相当する送電損失が無く、侵入熱による熱ロスのみとなる。従って、LCA評価において大きなCO₂削減効果が得られることが分かる。

ただし、超電導線材に使用する材料には特殊な材料が多いので、今後、さらに正確なLCA評価を行うために、データの整備、種々の用途における定量的評価等を行う必要がある。

7. 今後の課題

超電導ケーブルの信頼性、経済性について整理した。今後、実線路に適用するためには、個別線路毎に本稿に記した各項につき改めて評価を行うことが必要である。また、超電導線材の高性能化、低価格化をさらに進めるとともに、実績を積み重ねることで、信頼性、経済性を向上させてゆく必要がある。

現在、当社では米国エネルギー省、ニューヨーク州の資金を得て米国ニューヨーク州、オルバニー市において、米国SuperPower社、BOC社、National Grid(旧Niagara Mohawk)電力会社と共同で、実系統での世界初の接続部を含む350m検証プロジェクトを実施している。このプロジェクトが世界初の実線路による長期試験ケーブルである。これらの経験、実績が、超電導ケーブルの実製品化に大きく寄与するものと考えられる。また、本稿では、超電導

ケーブルシステムについてとりまとめたが、その他の超電導機器(コイル他)についても同様の評価を行い、超電導応用機器の早期実用化を図ってゆきたい。

8. 結 言

1911年に超電導現象が発見されてから、まもなく100年になろうとしている。今日ニオブチタンやニオブズズといった金属系超電導線が実用化されているが、まだまだその活躍の場は小さい。高温超電導材料による超電導機器が実用化することによって、超電導の商用化は飛躍的に増大するものと考えられる。当社のビスマス系超電導線(DI-BSCCO[®])は、超電導の広範な商用化にとってトリガとなる可能性を有している点で、革新的(Drastically Innovative)である。当社では、21世紀が超電導技術の世紀になることを確信して、DI-BSCCO[®]の改善とその応用開発、検証を進め、世界の超電導市場を先導してゆく所存である。

参 考 文 献

- (1) 山崎等、「ビスマス系超電導線材の開発」、SEIテクニカルレビュー、第164号(2004年3月)
- (2) <http://www.sei.co.jp/super/hts/road.html>
- (3) 増田等、「三心一括型超電導ケーブルの実用性検証試験結果(1)(2)」、2003年電気学会全国大会、7-094、7-095
- (4) 露木等、「超電導直流ケーブルの電気絶縁に関する研究」、低温工学、Vol.35、No.7(2000)
- (5) 増田等、「液体窒素含浸[®]絶縁のV-t特性」、平成15年電気学会全国大会
- (6) 「CVケーブル線路における工事技術の現状と今後の展望」、電気協同研究、第61巻第1号(平成17年9月)
- (7) T Masuda et. Al., "Design and Experimental Results for Albany HTS Cable", submitted to Applied Superconductivity Conference(2004)
- (8) 増田等、「66kV級3心一括型超電導ケーブル実用性検証試験後の調査結果」、2003年電気学会電力エネルギー部門大会、B08-286
- (9) S Honjo et. Al., "Electric Properties of a 66 kV 3-core Superconducting Power Cable System", submitted to Applied Superconductivity Conference(2002)
- (10) R Hata, "Revolutionary Step toward 21st Century's Electric Transmission Network", submitted to International DAPAS Workshop(2004)
- (11) 廣瀬等、「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)
Jae-young Yoon et. Al., "The Future of cable in Korea", Transmission & Distribution World, July 2005

執 筆 者

廣瀬 正幸：電力・エネルギー研究所 超電導開発室 主幹
 山田 雄一：電力・エネルギー研究所 超電導開発室 主席
 増田 孝人：電力・エネルギー研究所 超電導開発室 プロジェクトリーダー
 佐藤 謙一：電力・エネルギー研究所 所長
 畑 良輔：常務執行役員 研究開発本部 副本部長