

ヒートパイプ冷却を用いた超電導直流海底ケーブルの可能性

Possibility of DC Underwater Superconducting Power Cable Cooled by Long-length Heat-Pipe

石郷岡 猛*

Takeshi Ishigohka*

Abstract: With the recent progress of high T_c superconductors (HTSs), it becomes realistic to introduce them into underwater power cables. However, in an underwater cable we have to take into consideration a difference in height level and a large additional hydraulic pressure by cryogenic liquid itself. In such a case, boiling point of the coolant increases due to the increase of the pressure. So, the author propose a new cryogenic cooling system using long-length heat-pipes. A conceptual design of a DC superconducting underwater power cable was carried out. The fundamental idea and the conceptual design are presented.

KEYWORDS: superconducting power cable, underwater cable, heat-pipe cooling

(Received December 8, 2002)

1. まえがき

近年、高温超電導体を用いた液体窒素冷却の超電導ケーブルが各所で研究されている。そのような状況の中で、超電導ケーブルの海底ケーブルへの適用に関心が高まっており、そのための基礎研究を開始する必要があると思われる。このため、本論文では、著者は液体窒素を作業流体とする長尺低温ヒートパイプにより冷却される超電導直流海底ケーブルの可能性について検討した。

言うまでもなく、海底ケーブルでは中間冷却ステーションを海底部へ設置することは極めて困難である。それゆえ、超電導海底ケーブルでは冷却のための二つの選択肢のうちの一つを選ばなければならない。その一つは液体窒素の蒸発を許容しない一相流冷却であり、もう一つは液体窒素の蒸発を許容する

二相流冷却である。しかしながら、海底ケーブルの場合は1スパンが大きく、この間を冷媒(液体窒素)の顕熱のみで冷却することにはかなりの困難がある。そのため、実用的見地から、ケーブル中間部での冷媒の蒸発を許容する冷却法を採用する必要がある。

一方、海底ケーブルでは当然のことながら陸上部と海底部との高低差を考慮する必要があり、これによる大きな静水圧の影響を無視することはできない。このような場合には冷媒である液体窒素の沸点が上昇し、高温超電導体の臨界温度を超えてしまう可能性がある。する。それゆえ、この問題を解決する何らかの方法が必要になる。その解決法の一つとして長尺低温ヒートパイプによる冷却システムの導入が考えられる。

著者は液体窒素ヒートパイプ冷却、 $\pm 250\text{kV}$, 8kA , 4GW , 巨長 50km の直流超電導海底ケーブルの概念設計を行った。想定設置サイトは北海道/本州、本州/四国、および九州/韓国である。その基本的構造と概念設計について述べる。

* 電気電子工学科教授

Professor, Dept. of Electrical Eng. & Electronics

2. ヒートパイプ冷却の利点

2.1 液体窒素の静水圧による沸点の上昇

周知のように液体窒素の沸点は気/液飽和曲線に沿って上昇する。一例として、水深 100m の海底では、液体窒素の圧力は静水圧により約 10 気圧に上昇し、液体窒素の沸点は 104K に上昇する。一方、Bi-2223/Ag テープ線材の臨界温度は約 110K である。それゆえ、液体窒素の沸点と高温超電導体の臨界温度との温度マージンは極めて小さくなり、静水圧のかかった状態での液体窒素の潜熱を利用した冷却は困難である。

図 1 に窒素の状態図を示す。同図から、気/液平衡温度は圧力の増加と共に上昇することが分かる。

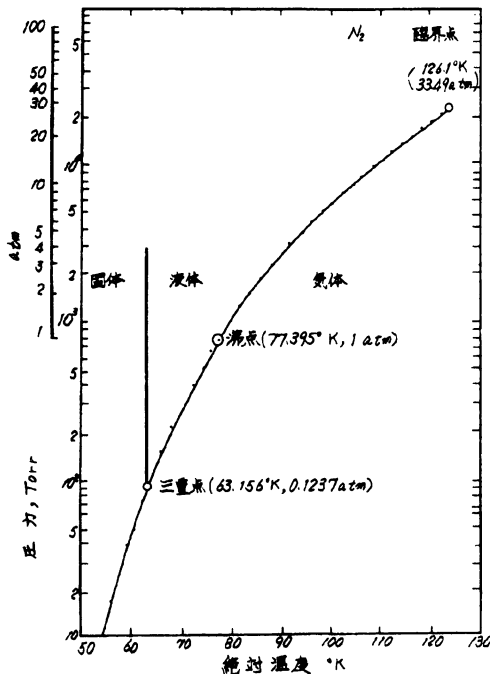


図1 N₂ の圧力-温度状態図

表 1 静水圧がかかった場合の海底最深部における液体窒素の沸点

地点	水深	LN ₂ 圧力	LN ₂ 温度
北海道・本州間	300m	25.3atm(g)	122K
紀伊水道	80m	75 atm(g)	100K
朝鮮海峡横断	200m	17.2atm(g)	112K

図 1 の状態図を基に、液体窒素の比重を 0.809 として静水圧による圧力上昇を求め、前述の北海道・本州間直流海底ケーブル、紀伊水道直流海底ケーブル、朝鮮海峡横断海底ケーブルの海底最深部における液体窒素の沸点を求めると、表 1 に示すようになる。

2.2 液体窒素の蒸発潜熱を利用する利点

前述のように、海底部分では中間冷却ステーションの設置が不可能であるため、長距離海底ケーブルを液体窒素の顕熱のみで冷却するには困難が伴う。これに対し、液体窒素の蒸発潜熱を利用すると、161 J/cm³ という大きな蒸発熱を利用でき、より長距離の冷却が容易に達成できる。従来は、気/液二相流による冷却は、熱的振動問題等の理由により避けるべきとされていたが、これを積極的に活用すれば、大きな蒸発潜熱が利用できて、冷却が容易になる可能性がある。なお、固体窒素の融解熱は 25 J/cm³ であり蒸発潜熱の 1/6 程度であり、固/液二相流を用いたスラッシュ窒素も一つの候補ではあるが、この場合は固体成分による流路の閉塞の問題に留意が必要になってくる。

2.3 ヒートパイプによる超電導ケーブル冷却の基本構成

前述のように、海底ケーブルに顕熱のみを利用する通常の液体窒素循環式の冷却方式を適用すると、過冷却窒素が必要になると共に、流体粘性抵抗損が発生する。これに対し、液体窒素の蒸発潜熱を利用することは有効であるが、通常的方式では静水圧のため気液平衡点がずれ、液体窒素の沸点が上昇してしまう。これを防止するため、静水圧がかからないような方法を適用する必要がある。これにはヒートパイプ(HP)による冷却が考えられる。図 2 にヒートパイプ冷却による海底ケーブルの敷設図の一例を示す。

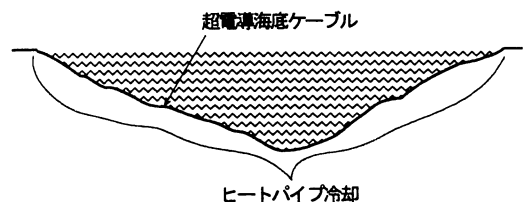


図2 ヒートパイプ冷却による超電導海底ケーブルの概念的敷設例

ヒートパイプによる冷却は、基本的に高低差がある場合に有効な動作が期待できる。ヒートパイプでは、重力により液体はパイプ内を自然に流れ下り、蒸発ガスはポンプにより減圧された地上の排気口へと上っていく。このため、本方式では液体窒素の粘性抵抗損は発生しない。基本的に高低差のある海底ケーブルの構成を積極的に利用できることが、本ヒートパイプ冷却方式の利点である。

3 直流超電導ケーブルの利点

一般に、直流超電導ケーブルの利点として、以下の項目が挙げられる。

- (1) 超電導体の交流損がない。
- (2) 素線間のインダクタンスの不均衡による電流偏流の虞がない。
- (3) 交流の場合の波高値と実効値の区別がないため、基本的に直流臨界電流近くまで定格電流を設定することができる。
- (4) フォーマ、コルゲート管、熱絶縁材等における渦電流損がない。
- (5) 電気絶縁材における誘電体損がない。
- (6) 脈動する電磁力による機械的振動がない。

以上のように、直流超電導ケーブルは、導体、構造材、絶縁材等全ての部位から発生する損失が無い。

なお、直流では波高値と実効値の区別がないので、交流の場合のように定格電流を直流の臨界電流の $1/\sqrt{2}$ に抑制する必要がない。また素線間電流偏流の虞がないため、ほぼ素線の臨界電流近くまで各素線電流の定格値を設定することができる。素線間電流偏流は、本来は抵抗が零の超電導線材を導体に用いる超電導ケーブル特有の問題であるが、この問題が直流ケーブルでは基本的に存在しないことは大きな利点である。

4 概念設計

4.1 基本仕様

現在、世界最大級の直流海底ケーブルとして紀伊水道直流海底ケーブルがあるが、これは $\pm 500\text{kV}$ 昇圧時には 2.8GW の設計である。本超電導ケーブルでは将来の需要増を見込み、送電容量を 4GW に定めた。電圧は紀伊水道直流海底ケーブル (OF ケーブル) に採用されている最高電圧値の $1/2$ の $\pm 250\text{kV}$ とし

た。なお、定常時の最大電界は 13.6kV/mm である。

冷却は、液体/気体窒素を冷媒とする低温ヒートパイプ冷却とする。通常、ヒートパイプの内壁には表面張力により冷却液 (本超電導ケーブルの場合は液体窒素) を浸潤させるため金網等のウィックを内張するが、本超電導ケーブルの場合は、超電導テープ線材を巻き付ける銅のフォーマを銅細線の成形構造として、それ自身の保液力を活用する方式を採用したものとした。

なお、ヒートパイプの熱負荷をできるだけ低減するため、熱絶縁層の厚さを 16mm とし、ケーブル 1m 当たりの侵入熱を 1W/m と想定した。

また、電気絶縁層外表面には半導電テープ巻きを施し、等電位面を形成して、内側コルゲート管内表面の凹凸による電界の集中を防止するものとする。

以上のような仮定の下に、概念設計したヒートパイプ冷却型直流 $\pm 250\text{kV}$ 、 8kA 、 4GW の海底超電導ケーブルの構造図を図 3 に示す。その特徴として、海水の圧力が外側コルゲート管にかかるので、深度 300m を想定して内外圧力差 31 気圧の圧力に耐える構造とする。このため、外側コルゲート管には肉厚 2mm (安全係数 2 を想定) のステンレス管を用いるものとする。

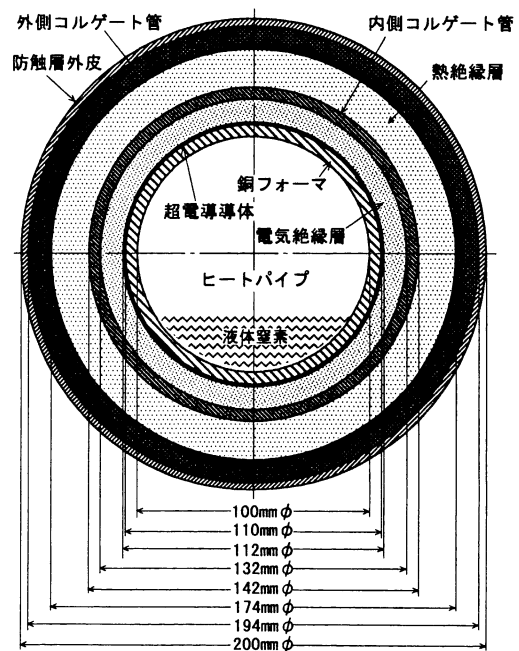


図3 ヒートパイプ冷却超電導海底ケーブルの構造

超電導体については、高温超電導テープ 1 本当たり 40A を流すものとする。導体は 110mm φ の銅フォー

マに 2 層に巻き付けるものとし、全テープ本数は 200 本である。巨長は 50km を想定し、侵入熱をケーブル 1 本 1m 当たり 1W/m とすると全侵入熱は 50kW であるが、これをケーブル両端からのヒートパイプで冷却するものとするれば、片側 25kW ずつを受け持てばよい。その場合の片側からの送液量は、液体窒素の蒸発潜熱を $161\text{J}/\text{cm}^3$ とすれば $155\text{cm}^3/\text{s}$ になる。液体窒素は地上部からヒートパイプの下部を流れ下り、海底最深部まで至ってほぼ完全に蒸発するように流量を制御するものとする。

図 3 のケーブル断面図に示すように、液体窒素は中心のヒートパイプの下部を自然に流れ下るものとしており、特別に液体窒素専用の給液管を備えてはいない。

表 2 に、概念設計したヒートパイプ冷却直流超電導ケーブルの仕様を示す。また、同ケーブルの主要寸法を表 3 に示す。

表 2 概念設計直流超電導海底ケーブルの基本仕様

容量	4GW
電圧	± 250kV
電流	8kA
巨長	50km
海底深度	300m
侵入熱	1W/m・本
使用線材	Bi-2223 銀シーステープ
テープ電流	40A
テープ総本数	200 本
絶縁	液体窒素含浸 PPLP
冷却方式	ヒートパイプ
作動冷媒	窒素気液二相流
液体窒素流量	$155 \times 4 \text{ cm}^3/\text{s}$
蒸発窒素ガス流量	$27.2 \times 4 \text{ l/s}$
蒸発窒素ガス流速	3.5 m/s
冷凍機電力	$280 \times 4 \text{ kW}$
送電効率	99.97 %

4.2 ヒートパイプ内圧力

ヒートパイプ内の圧力を制御すれば気液平衡点が移動し、温度を調節することが可能である。ヒートパイプ内を減圧して動作温度を下げれば、超電導体の臨界電流密度は上昇し、定格電流を増大できる。この現象を積極的に利用すれば、一回線故障時のような特別な重負荷時にはヒートパイプ内圧力を下げ

て運転し、復帰後には定常値に戻すような柔軟性のある運転が可能である。

表 4 に、ヒートパイプ内の圧力に対する動作温度を示す。また、同表には一例として東電/住友電工の 66kV 三相一括超電導ケーブルにおける対応する運転温度での臨界電流を参考として示す³⁾。

表 3 概念設計直流超電導海底ケーブルの主要寸法

ケーブル最外径		200mm
外側コルゲート管	外径	194mm
	肉厚	2mm
熱絶縁層	外径	174mm
	厚さ	16mm
内側コルゲート管	外径	142mm
	肉厚	0.5mm
電気絶縁層	外径	132mm
	厚さ	10mm
超電導導体層	外径	112mm
	厚さ	1mm
銅フォーマ(銅細線成型体) (ウィック兼用)	外径	110mm
	厚さ	5mm
液体/気体窒素流路	内径	100mm

表 4 ヒートパイプ内圧力と動作温度および臨界電流の関係

圧力	動作温度	東電 SC ケーブルの 臨界電流 ³⁾
1 atm	77 K	2760 A
1/2 atm	73 K	3300 A
1/4 atm	69 K	4000 A

4.3 冷却パワおよび送電効率

本超電導ケーブルでは、一本当たりの注入する液体窒素量はケーブル両端からの合計で $155 \times 2 = 310\text{cm}^3/\text{s}$ である。常温の窒素ガスから液化するものとするれば、約 560kW の冷凍機パワを必要とする(なお、蒸発した戻りガスの冷熱を有効に活用するものとするれば、必要な窒素冷凍機のパワはさらに低減できる)。これから、本直流超電導ケーブルシステムにおける冷却パワは、送電容量(4GW)の 0.03%程度に過ぎず、殆ど無視できる範囲であることが分かる。

直流超電導ケーブルにおいては、渦電流損、誘電体損、機械的振動損、等々は基本的に存在しないので、外部侵入熱を除去するための冷却パワのみが損

失として考慮されればよい。これから、本直流超電導ケーブルの効率は現用ケーブルに比べ極めて高いと言える。

5 今後検討を要する課題

5.1 海底の水深が単調増加でない場合

図4の概念図に示すように、海底の水深が単調増加でない場合は、中間の屈曲部で液体窒素がヒートパイプ内に充満して流路を閉塞し、蒸発ガスの戻り流路が確保されない可能性がある。この場合、前述のように液体流路と気体流路とを分離する方式(給液管の設置)を採用すれば解決できるものと考えられるが、今後、実験および理論による解明が不可欠である。また、海底の平坦度が低い場合も、検討を要すると考えられる。

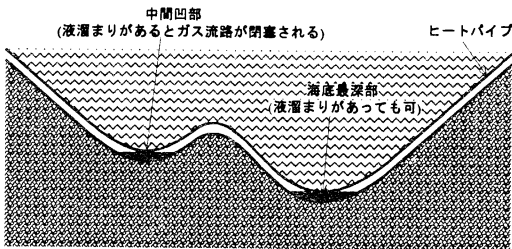


図4 海底中間凹部がある場合

具体的な海底敷設状況の例として、紀伊水道海底ケーブルおよび北本海底ケーブルの敷設状況を図5⁴⁾、6⁵⁾、7⁵⁾に示す。

図7の北本海底ケーブルの海底部敷設詳細図を見ると、埋設部からの立ち上がり部などで、局所的に中間凹部ができる可能性があり、対策が必要である。

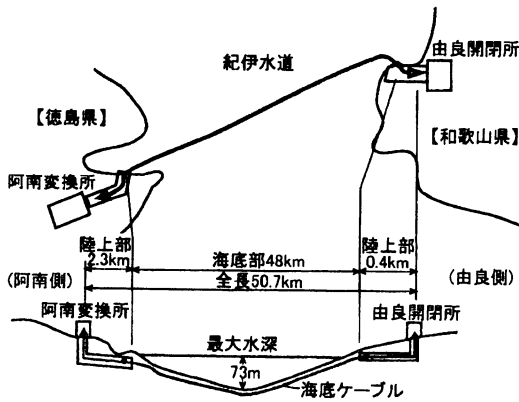


図5 紀伊水道海底ケーブル敷設図⁴⁾

5.2 熱収縮対策

熱収縮により、内側の低温部と外側の常温部の間に応力が発生する。これについては、内外コルゲート管の弾性変形でほぼ吸収できると考えられるが、端部における集中的処理が必要となると思われる。対策としては、端部付近にスネーキングを施して吸収する方法、あるいはレール上の台車に端部装置一式を載せる方法等が考えられる。

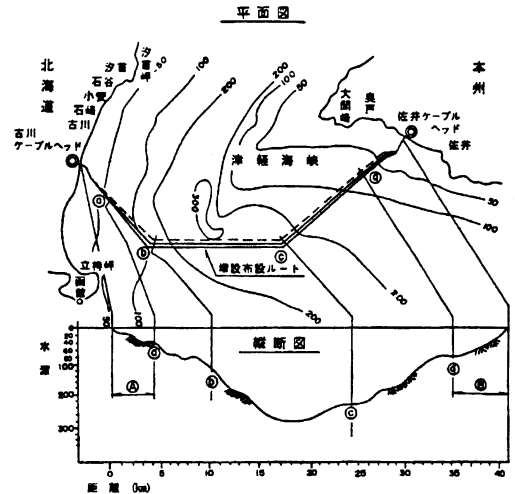


図6 北本海底ケーブル敷設ルート図⁵⁾

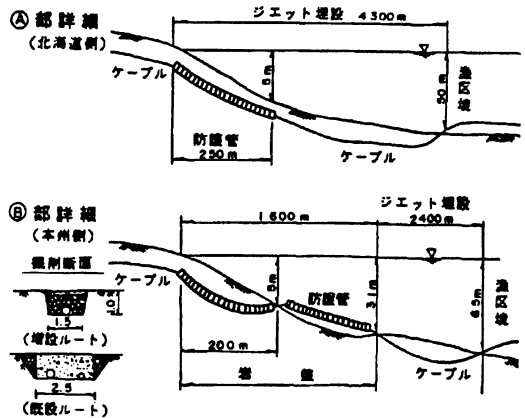


図7 北本海底ケーブル海底部敷設詳細図⁵⁾

6 むすび

一般に、数十 km 以上の長大な海底部を持つ海底ケーブルでは、中間に冷却ステーションの設置ができないため、通常の相変化を伴わない液体窒素の单相流では冷却が困難になる。本質的に高低差を伴う

海底ケーブルに超電導ケーブルを適用する場合、静水圧により液体窒素の沸点が上昇し、一般的な潜熱を利用する冷却方式では冷却が困難になってくる。このため、静水圧のかからない工夫をした潜熱の利用が必要になる。一般に海底ケーブルは直流方式になるので、超電導体の交流損、構造材や熱絶縁材の渦電流損、あるいは絶縁材の誘電体損などが無く、冷却負荷としては常温部からの侵入熱のみを冷却すればよい。このため、ケーブル 1 本当たり 1W/m 程度の侵入熱を許容しても、50km 程度の亘長の直流超電導海底ケーブルでは、両端から冷却するものとして 25kW の熱の除去ができればよいことになる。必然的に高低差がある海底ケーブルでは、積極的にその高低差を利用してヒートパイプ冷却方式を適用することが効果的であると考えられる。

作動液に液体窒素を用いたヒートパイプ冷却方式の直流超電導海底ケーブルの利点をまとめると以下の通りである。

- (1) 液体窒素の静水圧による沸点上昇の問題がない。
- (2) 液体窒素の強制循環に伴う粘性抵抗損がなく、冷却パワーが最小限にできる。

以上の事項を考慮して、±250kV、4GW、亘長 50km の直流超電導海底ケーブルの概念設計を行った結果、所用冷凍機電力は 1120kW で、送電効率 99.97% が得られることが分かった。

なお、今後の検討すべき課題として、長尺の低温ヒートパイプの動作の確認が不可欠である。特に定常特性のみならず、長尺パイプ内の気体の圧力振動などの過渡的特性の把握に努める必要がある。

また、本論文では、本来地上部から海底部まで、一様な深度の増加があるものと仮定しているが、海底の地形に大幅な凹凸があり、作動液である液体窒素がヒートパイプ内に充満して、流路を閉塞するようなケースが考えられる場合は、その対策に十分な配慮が必要である。実用的な対策としては、海底地

形図を事前に良く調査して、できるだけ大きな凹凸のないルートを選定することが必要であろう。場合によっては、海底掘削により、平坦にすることも考えられる。

なお、本論文では熱収縮対策については詳細な検討は行っていないが、今後、収缩量、収縮対策についても十分な検討が必要である。

終わりに、液体窒素の静水圧の影響について貴重なご教示をいただいた産総研の淵野修一郎主任研究員、紀伊水道直流ケーブルについて技術的資料を頂いた関西電力㈱総合技術研究所の椛橋清主席研究員、北海道・本州間海底ケーブルについて貴重な資料を頂いた電源開発㈱北本連系電力所の野阪直人課長、長尺ヒートパイプについて技術的資料を頂いた㈱フジクラの志関誠男部長および望月正孝部長に感謝申し上げる。

また、ヒートパイプの基本特性、およびコルゲート管の耐圧特性についてご教示いただいた、本学機械工学科の前沢三郎教授ならびに三角正明教授に感謝申し上げる。

文献

- 1) 淵野修一郎：private communication, 2001 年 10 月
- 2) 白石正夫、他、「超大型ヒートパイプによる地熱抽出実証試験」フジクラ技報第 89 号、pp. 36～41、1995 年 10 月
- 3) 増田孝人、他「東京電力/住友電工の超電導ケーブルの試験状況」低温工学会超電導応用研究会シンポジウム資料、2001 年 11 月
- 4) 井上利之、他「直流 500kV PPLP 絶縁 OF 海底ケーブル線路の建設」SEI テクニカルレビュー第 155 号、pp. 69～76、1999 年 9 月
- 5) 電源開発㈱、「北海道・本州間電力連系設備の概要」1994 年 2 月