U.D.C. 621.315.235: 621.315.211.2.027.6

高根第一発電所用 15 kV 主幹ケーブルの布設

Installation of 15 kV Main Cables Used for Takane First-hydraulic Power Station

堀 文 昭*	艸 田 正 義*	大 堀 利 之**				
Fumiaki Hori	Masayoshi Kusata	Toshiyuki Ôhori				
市 毛 敏 明**	岡 田 建 治**	大島和夫**				
Toshiaki Ichige	Kenji Okada	Kazuo Ōshima				

要 旨

高根第一発電所の地下発電所と地上開閉所を結ぶ,こう配 48 度の斜坑を含む約 200 メートルのブストンネル 内に,15 kV 単心,2,000 mm² アルミ導体架橋ポリエチレンケーブル 36 条(9条/台×4台)が布設され主幹 フィーダとして活躍している⁽¹⁾。

本ケーブル布設に当たっては,主幹フィーダとしてのケーブルの選定,単心大サイズケーブルの使用上の問 題,斜坑部への多条布設などの問題があった。ここではこれらを取りまとめ報告する。

1. 緒 言

最近の著しい電力需要の増加に対応して,中部電力株式会社においても,着々と電源開発が進められている。水力発電では,飛騨川 水系の一貫した開発計画があり,高根第一発電所はこのかなめとも



いえるアーチ式ダムによる340 MWの揚水式発電所である。

地下の4台の発電電動機と地上開閉所とは約200メートルのブス トンネルで連絡され,主幹フィーダとして36条の15kV,単心 2,000 mm² アルミ導体充てん剤入り架橋ポリエチレン絶縁ケーブル (日立電線商品名:ポリサーモケーブル)が採用され,布設を完了 し,営業運転にはいった。このように多条の大サイズ,アルミ導体, 架橋ポリエチレンケーブルが,発電所の主幹フィーダとして使用さ れた例はなく,世界的にも記録品である。また,斜坑に対し,ケー ブルを全ルートにわたり,金属ラダートレイ上に布設したことも特 筆すべき点である。以下に本系統完成のため検討した結果を述べ,

2. 使用条件

この系統に用いられたケーブルのおもな設計条件を以下に示す。

- (1) 負荷容量(発電電動機容量): 100 MVA×4 台
- (2) 電圧, 電流: 13,200V, 4,375A/相
- (3) 短絡容量: 1,035 MVA (電流: 109 kA) なお,3 台発電,
 1 台揚水起動時
- (4) 冷却方式:発電所排気を利用した強制風冷式 (1,800 m³/min)
- (5) 布設ルート: 図1に示すとおりである。 発電所~開閉所 の中間部に約50mの母線橋をはさみ45~48度のこう配の 斜坑をもつ,幅2.8m×高さ約4.5mの洞(どう)道約200m によって連絡されている。

3. 主幹フィーダの選定

高低差の大きい場所に適した主幹フィーダとしては城山発電所な どで実績のあるブチルゴムケーブル(BN)⁽²⁾,最近著しい進歩をみ 図1 ケーブル布設ルート図

ルに置きかえられているので今回の検討対象から除かれた。残り三 者についてみると, BN と CV は価格, 信頼度, 布設工事, 保守, 電力損失および誘導電圧などの点で IPB に比べすぐれている。一 方, IPB は条数が少なくてよく, 布設スペース, 電流不平衡, 機械 的強度および耐用年限の点で前二者に比べ有利である。これらにつ いて経済比較を示したのが表1である。

この結果から,初期建設費,25年の使用を考えた経費ともアルミ 導体2,000 mm² CV が最も小さく経済的である。この背景と20 kV 級での実績,信頼度の高いことから CV が使用された。また,大サ イズ,アルミ導体については伸び,付属品の問題が取り上げられた が,11 kV 以下では2,000 mm²の実績もあり,技術的にじゅうぶん な見通しが得られた。このような検討のもとにアルミ導体2,000

とで実績のあるフラルユムリーフル(DR), 敢近者しい進歩をみ せている架橋ポリエチレンケーブル(CV), 従来高落差部に用いら れた低ガス圧ケーブル (LPGF), および大容量主幹フィーダとして 使用ひん度の増している絶縁相分離母線 (IPB) などがあげられる。 この中で, LPGF は今や, 30 kV 級までゴム, プラスチックケーブ

* 中部電力株式会社** 日立電線株式会社日高工場

加加 2 CV が採用された。

4.1 ケ ー ブ ル
4.1.1 ケーブルの構造
ケーブルの概略構造を表2に,断面写真を図2に示す。導体は

43

924 日 立 評 論

(順 位) 布設条件 25年後まで考慮 フィーダの種類 送電損失 初期建設費 した総合経費 (条) $1 \times 2,000 \text{ mm}^2$ 24 4 2 4 Cu-BN $1 \times 1,600 \text{ mm}^2$ 36 6 6 1 Cu-BN $1 \times 2,000 \text{ mm}^2$ 36 2 3 2 Al-BN $1 \times 2,000 \text{ mm}^2$ 24 3 2 3 Cu-CV $1 \times 1,600 \text{ mm}^2$ 36 5 1 5 Cu-CV $1 \times 2,000 \text{ mm}^2$ 36 1 3 1 Al-CV $130\phi \times 12 t$ 12 7 4 7 IPB 比 較条件 銅価格 520 ¥/kg, アルミ価格 210 ¥/kg 電力料金 3 ¥/kWh, 金利負担 7%/a 25年後スクラップ回収価格 銅 360 ¥/kg, アルミ 70 ¥/kg

15 kV 主幹フィーダ経済比較 表1

表3	ケ	 ブ	N	0	雷	気	特	14
						~	- 1 · 1	

試	験 項 目	単 位	規 格 値	特性			
	静電容量	µF/km	0.7以下	0.671~0.683			
K*1	絶縁抵抗	MΩ-km	750以上	15, 500~18, 000			
5	導体抵抗(20℃)	Ω/km	0.0154 以下	0.01418~0.01430			
4	誘 電 正 接 (常 温)	%	1.0以下	9.5 kV : 0.131~0.18 19.0 kV : 0.133~0.18			
	交流耐電圧	kV/10min	32	良			
サプ	交流長時間破壊	kV/min	40/60以上	120/3~125/9			
ンル	衝擊電圧破壞	kV/回	170/3	330/3~370/3			
参*2				常温 95℃			
	交流長時間破壊	kV/min		120/10 125/23			
考	衝撃電圧破壊	kV/回		290/2 290/3			

注:*1 36 ドラムの特性を示す。

*2 先行試作品絶縁厚 7.5 mm

表 2	ケ	-	ブ	ル	の	構	造	
			_	-	-		and and the second second	

項目		目	単 位	規	格	値		
公	称	電	圧	V		15,000	1118-11-1	
線	心	心数		No.	1			
導	公 称	断 面	積	mm ²	2,000			
	形		状		5 分	割圧	縮	
体	外		径	mm	56.4			
ポ (P	リサーモ 内部半導電	絶 縁 (層 を 含	本 厚 む)	mm		7.75		
半	導電性布	テーン	プ厚	mm	0.25			
L	ゃへい軟翁	同テー	プ厚	mm		0.1		
F.	ニルシ	- X	厚	mm	4.0			
仕	上 外	径	(約)	mm	83			
概	算	重	量	kg/kW	9, 430			
許 (克	容 魚制通風時,周	電 囲温度 40	流 0℃)	A/条		1,940		

撃電圧破壊値も BIL の 2 倍以上の特性を示している。参考試験 として破壊の温度特性を測定したが、ポリサーモケーブルは高温 時、特性低下がなく、すぐれていることがわかった。

4.2 ケーブルヘッド

ケーブルヘッドにはがい子を使用し, 内部絶縁を自己融着テープ によるしゃへい形としたが、アルミ導体引出部に MIG 溶接法(4)(5)



図2 15 kV ポリサーモケーブル

外径の縮小,真円度を保つ目的で中心部に円形圧縮より線をそう 入し、その周囲に4個の特殊扇形セグメントを配した、5分割圧 縮導体とした。また、材質は軟アルミで、可とう性および製造作 業性の改良が図られている。絶縁体には充てん剤入り架橋ポリエ チレン (ポリサーモ)(3)を使用,耐熱性を向上させ風冷停止時お よび過負荷時の裕度をもたせた。 4.1.2 ケーブルの特性 ケーブルの主要電気特性は表3に示すとおりである。破壊値に ついてみると交流長時間破壊値は120~125 kV で使用電圧7.65 kV (13.2/√3)に対し、15倍以上の裕度をもっている。また、衝

44

を採用し、寸法の縮小と作業性の向上を図った。すなわち、従来, アルミ導体の接続には圧縮法、アルミろう接法などがとられてきた が、今回は発電機1台につき9条のケーブルが継ぎ込まれるため作 業性および端末部の寸法縮小が要求された。そのため、がい子内ケ ーブル長は絶縁に必要な長さのみにとどめ、がい管を短くして、導 体引出棒を有効に使い,同一部で導体接続とがい管からの引き出し を兼ねることを考えた。

当初, 圧縮法を予定し, スリーブを多角形に圧縮後, 成形された 部分を円柱状に切削し,引出部とすることを試みたが,長い時間を 要し,狭い場所での作業に不向きなことから,アルゴンガスを用い た MIG 溶接法の検討を進めた。 この方法は溶接時間も約5分程度 と短く,比較的自由な方向で作業が可能で,性能も安定している。ま た,スリーブの外面形状はそこなわれず,引き出しにも適している。 さらに, 溶接時ケーブル絶縁体への影響もなく, 接合部の顕微鏡に よる組成調査結果も良好であったためこの方法の採用をみた。図3 はケーブルヘッドの構造を示したものである。

5. 布設方式の検討

今回のような急こう配ルートでのケーブル布設法としては、棚 (たな)上布設, 立坑内布設のようにケーブルに補強層をもたせ上部 で引き止める法およびトラフ内クリート止め法などが考えられる。 本布設ルートは地下発電所の排気口を兼ねたブストンネルであ り、多条布設および風冷効果を高める点から棚上布設が選ばれた。 布設は図4に示すラダートレイ方式である。この布設法決定にあた って検討した点を以下に述べる。

5.1 風冷の効果

棚の構造決定のため風冷の効果を名古屋市内の幅 1.7 m×高さ2.2 mの洞道を使用して調べた。このルートでは図4と同様に中央に 700mm幅の通路をはさんで両側に4段および5段の棚を配してい る。通風による風速はケーブル布設部では通路および天井に比べ著 しく小さく、クリート止めをしていない個所でも通路部などの1.8 ~2.6 m/sの1/2以下であった。また、木製クリートでケーブルを 固定した場合にはケーブルの上,側面とも、クリートの前後約1m から影響を受け、200mm以内では風速は急激に低下し、ほとんど

高根第一発電所用 15 kV 主幹ケーブルの布設 925



図3 ケーブルヘッドの構造



図4 ケーブル配置およびラダートレイ組立状況

無風状態となる。また,壁面の近傍100mm以内では風速の減衰が 大きい。

これらのことを参考にケーブル棚には従来,火力発電所主幹ケー ブル用として実績の多い,金属ラダートレイ方式(6)を採用,木製ク リートにかえ,風の抵抗の小さい非磁性サドルでケーブルを固定し た。また、許す限り通路幅を小さくして棚のスペースを大きくする

単心ケーブルを金属製棚上に布設し,大電流を流した場合,ケー ブルの位置関係の不平衡によって電磁誘導を生ずる。今回もサイ ドチャンネル、クロスチャンネルおよび支持用立金物などにより、 ケーブルに平行した閉回路が形成され、電磁束によりラダーに循 環電流が流れ温度上昇する心配がある。そこで、ケーブル3条2段 布設のラダーを組み立て、1条あたり1,450Aの3相通電を行なっ た結果,サイドおよびクロスチャンネルがアルミで構成されている がみられる。 ときには、約500Aの電流が認められた。また、チャンネルによる 閉回路はいくつも形成されるにもかかわらず,温度上昇はラダー端

部のみにみられ、中間部は電流が打ち消されている(7)ためか、認め られなかった。

このことから、金属材料で構成される閉回路を無くし循環電流を 阻止するよう,部材の交さする個所は図4(b)に示すように絶縁処 理をした。

45

5.3 母線橋の温度上昇

ルートの中間に設けられる橋りょうは強制通風の目的から全面耐 とともに、 棚間隔を大きくとり風速分布の均一化を図った。 なお, 候性鋼板でおおわれる。この橋りょう内の36条もの単心ケーブル 上部ほど風速が大きいこと,および斜坑である点を考慮して,主幹 が通電された場合,鋼材の鉄損による局部加熱および磁路形成によ ケーブルの布設棚は洞道上部に設置するようにした。 る全体の加熱が問題となり、9条のケーブルと実際の1/4の模擬橋 5.2 循環電流の阻止 りょうを用い通電による温度上昇を検討した⁽⁸⁾。図5は供試ダクト を、図6は試験結果を示したものである。図6(a)は磁束の影響を みるため図5の点線部に隔壁を設け、内部通風によりケーブルの熱 しゃ断を行なったもので,温度上昇は支持鋼では若干認められるが, 橋りょう鋼板部ではほとんど認められない。(b)は風冷停止時を想 定したもので橋りょう部はケーブル群内温度に比べて低い。しかし, 支持鋼は約2℃高く、初期温度上昇の様相からわずかに鉄損の影響 さらに、多条のケーブルにより、橋りょう鋼材によって磁路が形 926 日立評論

30r

温(32℃) 岩盤温度 (9~11℃),風速,日射量などと運転および風冷 /15kV1×2,000mm²アルミ導体ポリサーモケーブル の条件より Giaro 氏の風冷計算式(9) その他を用い,熱の授受によ

る温度上昇を詳細に検討した。これによると、熱しゃへいを行なわ ず,岩盤温度25℃,ケーブルは全負荷時の最悪条件下で,地下トン ネル入口で30℃の風は上部出口では42.4℃となる。しかし、ケー ブルの導体温度は73.4℃で使用上問題がなく,周囲諸条件を考える とさらに数度低いものと推定される。

VOL. 52 NO. 10

1970

なお,母線橋に対しては安全をとり,天井,両側面をシルバーペ イント,底面を黒色塗装とした。この場合出口温度の計算値は40.9 ℃となる。

5.4 制御ケーブルの誘起電圧

電力ケーブルによる,下段部布設の制御ケーブルの誘起電圧を一 般に知られている Carson-Pollaczek の式によって計算してみた。 電力ケーブルと制御ケーブルの平行布設距離を220mとした場合 には次のようになる。

(1) 発電機4台定格運転時 18.4 V

(2) 1台のみ定格運転時1.11~8.80V

(3) 1, 2, 4 号機定格, 3 号機 9,000 A /相 30 度遅れ時 17.1 V また, Carson-Pollaczek の式による算出法をこのような坑内布 設ケーブルに用いることの可否を城山発電所の主幹ケーブルと制御 ケーブルを用いて検討した。その結果,誘起電圧の計算値と実測値 は、6.04V対1.5Vおよび4.95V対0.89Vで、実測値は計算値の 20~25%程度と小さく、この計算式による結果は安全側にあること がわかった。



温度上昇試験用模擬橋りょう 図 5



成されて, 磁束が重畳し, 橋りょうが発熱することも考えられる。 そこで、L鋼で四角形のわくを組み、中に単心ケーブルをそう入し、 単相および3相電流による磁束の相異を誘起電圧によって確認した ところ,3相は単相に比べ磁束密度が小さく,ケーブルとL鋼の間 隔を増すことにより減衰も著しく,磁路形成による温度上昇は問題 にならない。これら試験結果から、橋りょう部についてはケーブル を鉄鋼部から100mm程度離せば温度上昇の心配がないことがわか った。 一方、ケーブルは密閉された洞道中に布設され、しかも、洞道の 母線橋および上部斜坑部は直射日光にさらされる。このため橋りょ う部の断熱処理,日射しゃ断などが必要か否かを建設地に即した,気

46

実測結果からみて,今回も使用上問題ないとみられたが,安全性 の点から,制御ケーブルと平行して布設される区間の電力ケーブル を3等分し、ルート中間部で相の完全撚(ねん)架を実施し、誘起電 圧を無くすことにした。

なお, 撚架により同相内電流不平衡も軽減され, 計算値では, 撚 架を実施しない場合の7.0%から5.8%になる。

5.5 ケーブルの固定法

アルミ導体ケーブルのため,伸びの発生が大きく,この吸収法が 問題となったが,従来からラダー方式そのほかで多くの実績をもつ スネーク布設方式⁽¹⁰⁾を採用して解決した。スネークは3.0mの ピッチで撚架部を除いて全長にわたって実施することとし、中心線 からの変位は初期で約40mm,最大で100mmに押えられるように 設定した。

ケーブルは斜坑に布設されるためヒートサイクルの繰り返しによ ってすべり落ちる可能性もある。このため、スネーク布設の固定部 に配慮するとともに,斜坑上部にケーブル引き止め装置を取り付け, 安全の確保を図った。

なお、このような布設法のもとでの短絡時の挙動について、3条 3段布設のラダーを組み、三相短絡によるケーブル挙動、部材に発 生する応力を調べた。

その結果は第一波波高値110kA, 1/2 サイクル時非対称実効値 60 kA のとき、最大ひずみより求めた最大応力はサイドチャンネル (アルミ合金) で 4.6 kg/mm², 支持柱(鋼) で 5.5 kg/mm² といずれ も非常に小さく強度的に問題がない。また、ケーブルもスネーク状 態でほとんど動かず、なんら問題のないことが確認された。

6. 布 設 工 事

ケーブル棚の構築から端末継ぎ込みまでの布設工事は昭和43年 10月上旬から昭和44年8月上旬に至る約10個月間にわたって行な われた。

そのおもなものを示すと下記のとおりである。

高根第一発電所用 15 kV 主幹ケーブルの布設 927

図7 ケーブル布設状況

6.1 ラダーの構築

ラダーの組み立ては急傾斜部での構築が主体となるため,工期に 占める割合も長く,約4個月間を要した。組み立ては洞道内の側壁, 床,天井を利用した2~3m間隔の支持鋼の固定に始まり,引き続 いてサイドチャンネル,クロスチャンネルの順で取り付けられた。

7. 特殊試験

系統完成後,発電電動機のヒートランテストと合わせてケーブル 系統の確認試験を行なった。そのおもなものを示すと下記のとおり である。

7.1 ケーブルヘッドの温度上昇

アルミ溶接部,導体引出棒部に,感音ラベルを張り,温度上昇を 確認した。その結果,温度は60℃以下で温度上昇も約25℃で問題 がなかった。

7.2 洞道内風速分布

風速分布はルート全体を通して,中央通路 1.2~1.8 m/s,ケーブ ル群内で 0.7~1.0 m/s を示し,長さ方向および同一断面内分布とも 非常に均一な結果が得られた。また,風速はケーブル通電時には発 熱により若干,増大することがわかった。

7.3 ケーブルおよび洞道温度上昇

全負荷におけるケーブル表面温度上昇は約28℃で,設計値の28℃ とほぼ一致した満足した結果が得られた。また,磁束による発熱が 心配された橋りょう部材の温度上昇もケーブル群内の約6℃に対し 支持柱で約4℃と問題がない。なお,直射日光により天井板は約45 ℃にも達するが橋りょう内全体としてはほとんど影響が認められ なかった。

7.4 ケーブル撚架の効果

傾斜部では安全性,作業性を考慮した車輪付きの特殊な作業台を作 り,斜坑下側より徐々に作業台を引き上げ移動させながら棚の構築 を行なった。

また,サイドチャンネルは単長6mのものを全長にわたり,絶縁 物を介して接続したが,母線橋と上部斜坑間はサイドチャンネルを 切り離し,橋りょうの熱伸縮に備えた。

6.2 ケーブル布設

6.2.1 布 設 工 事

ケーブルの布設は制御そのほか作業性の面から,ドラムを地下 発電所ケーブル室入口に設置し,上部キュービクル地下水平洞道 部に設置した電動ウィンチによって引き上げた。布設に当たって は,ケーブル棚専用に製作したコロを2m間隔に配置するととも に,水平ならびに上下曲り部には2mRのローラ付きケーブルす べり板を使用した。

引き入れは1日1~2条の割合で進められ,1条延線するごとに クロスチャンネルに固定した。図7は斜坑部のケーブル布設状況 を示したものである。なお,引き上げ時の最大張力は1,800kgで 許容張力4,600kgに対しじゅうぶん安定であった。

6.2.2 そ の 他

ケーブル引き上げ完了後,布設時の温度に応じたスネーク布設 を行なった。また,制御ケーブルに対する誘導障害を軽減するた め,下部斜坑の上部,橋りょうでキュービクル地下ケーブル立上 り部に特殊棚を構築し,完全に相配列入替えのケーブル撚架を実 施した。

これらの作業完了後,万一の場合のすべり落ちに備えて各ケー ブルごとに,アルミ製のくさび形固定金具を各斜坑上部に取り付 けた。

仮設ケーブルを使用し、1号機のみにより誘導電圧を検討した。 ルートの関係から1号機用ケーブルには理想的な撚架はできなかっ たが、撚架の効果はきわめて顕著で、誘導電圧の約1/10に低減して いる。したがって、ほかのケーブルではさらに効果が出ているもの とみられる。

7.5 そ の 他

ヒートサイクル時の引止金具,スネークの確認を行なったが,引 止金具の移動は認められず,スネークも設計値どおりの結果が得 られた。

8. 結 言

高根第一発電所用のフィーダを検討し、ケーブル系統の完成をみ た。これらの結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 技術的, 経済的な面から 15 kV アルミ導体 2,000 mm² 架橋 ポリエチレンケーブルを実用に供した。
- (2) 大容量,多条ケーブルの斜坑布設法を検討し,全長金属ラ ダートレイ上布設を実施した。
- (3) 大電流による周囲の発熱などにつき検討を加え,離隔距離, 布設棚などに配慮を施した。

(4) 端末引出棒接続にアルミ溶接法を開発し、これを適用した。 最後に本系統完成にあたり、終始ご指導いただいた中部電力株式 会社関係各位にお礼申し上げるとともに、日立電線株式会社関係各 位のご援助に対して謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 堀, 大堀ほか: 昭44, 電学東支大 No.414
 (2) 佐伯, 橋本ほか: 電力 49, 62 (昭40-12)
 (3) 大堀, 浜田ほか: 日立評論 51, 371 (昭44-4)
- (4) 浜田, 富田ほか: 昭44, 電学東支大 No. 323

6.3 端 末 処 理	(
ケーブルヘッドは発電電動機側では水平に、キュービクル側では	(
垂直に取り付け施工した。また、アルミ引出棒には前述のアルミ溶	(
接法を採用したため、作業能率が良く、1日3端末の割合で施工す	(
ることができた。	(
なお,溶接部は全数,超音波探傷器によって異常のないことを確	
認した。	

(5) 浜田, 三宅ほか: 日立評論 52,827(昭45-9)
(6) 橋本,岡田ほか: 日立評論 47,1965(昭40-10)
(7) S.C.Killian: AIEE Transactions 69,1388 (1950)
(8) 大堀,市毛ほか: 昭43,電学四連大 No.1051
(9) J.A.Giaro: CIGRE No.213 (1960)
(10) 岡,浜田ほか: 日立評論 45,997(昭38-6)

47