

# 関西電力株式会社喜撰山発電所納 相 分 離 形 密 閉 母 線

Isolated-phase Bus for Kisenyama Pumping Power Station,  
Kansai Electric Power Co.

藤 崎 芳 男\*  
Yoshio Fujisaki

白 浜 正 忠\*  
Masatada Shirahama

鈴 置 昭\*\*  
Akira Suzuki

## 要 旨

関西電力株式会社喜撰山発電所に納入された相分離母線は、定格電流 9,500 A で専用立坑 265 m に設置された、世界でも例をみない大規模のものである。したがって母線の温度上昇、立坑内の温度、相分離母線周辺の鉄構の誘導加熱など、計画にあたって種々問題になった。

今回これらを検討し、モデル実験などで確認して、この結果をもとに製作、昭和 45 年 6 月据付完了、同年 7 月営業運転にはいった。

### 1. 結 言

従来から水力発電所などにおいて、母線専用トンネル内に発電機主回路用として相分離母線を設置する例は数多くあったが、水平または、緩こう配をもったものが多く、そのこう配はたかだか 25 度程度のものであり、電流も 4,000~5,000 A 程度であった。

今回、据付けられた関西電力株式会社喜撰山発電所の主回路用相分離母線は、垂直 265 m、直径 7 m の専用立坑に 2 機分設置されるという、この種発電機主回路用としては記録的な大容量、大規模のもので、国内ではもち論、世界でも初めてのものである。したがって、この計画に際しては下記の点について事前に、じゅうぶんな検討が加えられた。

- (1) 立坑内の発熱量
- (2) 立坑内の空気温度（立坑内の通気）
- (3) 相分離母線の温度
- (4) 立坑内の鉄構部分の誘導加熱
- (5) エレベータワイヤへの電磁誘導

この中、特に母線の温度に関しては

- (1) 垂直配置のため上方にいくほど温度が高くなるであろうし、その程度はどれほどか。
- (2) それを改善すべき手段はどんな方法か。

上記の 2 点は特に前例もないため、非常に懸念された。そのため昭和 42 年 12 月から試作試験を行なって検討を加えてきたが、その結果、

- (1) 母線自体の温度上昇は垂直方向にこう配はなく、立坑内の空気の温度こう配だけを考慮すればよい。
- (2) 母線の垂直方向の温度こう配の改善策として、中間仕切りも考えてみたが、これらはまったく不要である。

の結論を得たのでこれを盛り込んで製作、昭和 45 年 6 月据付を完了し、同年 7 月営業運転にはいった。以下、製品化までのいきさつ、検討事項などについて述べる。

### 2. 立坑設置相分離母線の仕様と構造

表 1 が相分離母線の仕様で、その構造は図 1 に示すとおりである。図 2、3 は現地概略配置と立坑部に据付けられた状態の写真である。

### 3. 立坑内相分離母線の発熱および伝熱

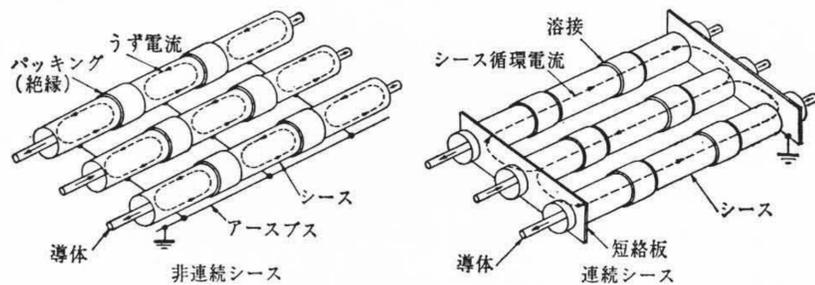
立坑内での発熱量は立坑内に設置された母線の導体およびシース

\* 日立製作所国分工場  
\*\* 日立製作所日立研究所

表 1 相分離母線の仕様

定 格 電 圧 (kV)	24
定 格 電 流 (A)	9,500
周 波 数 (Hz)	60
衝 撃 波 耐 電 圧 (kV)	125
商 用 周 波 耐 電 圧 (kV) (乾燥 1 分間)	50
短 時 間 電 流 (kA)	71
導 体 温 度 上 昇 限 度 (deg)	65
方 式	連続シース式 (注1)

(注 1)



非連続シースと連続シースの比較説明図

連続シースアイソブスとは、シース各相ユニットを電氣的に接続し、両端部は三相間を短絡して、シースに積極的に循環電流を流そうとするもので、その電流の大きさは導体電流の 95% 程度であり、その効果とするところは外部磁界の軽減にあり、導体電流が大きいほど効果が発揮される。

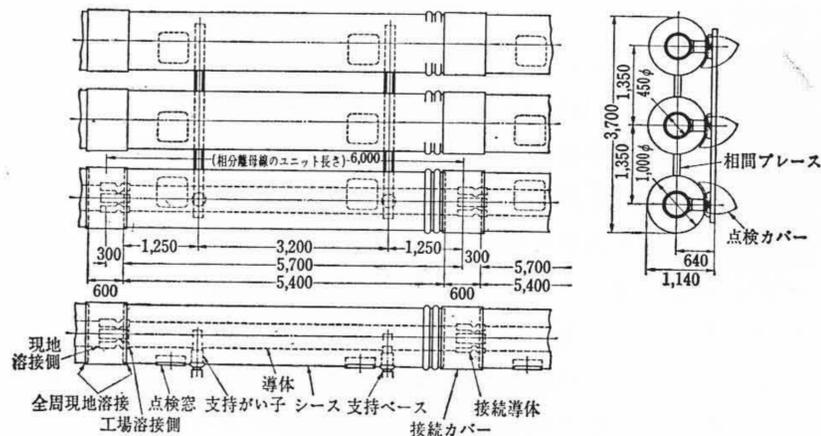


図 1 相分離母線の構造

のジュール熱であり、単位長あたりの発熱量は下記で求められる。

#### 3.1 導体の発熱量

$$Q_1 = 0.860 k I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $Q_1$ : 導体の発熱量 (kcal/mh)

$k$ : 表皮係数

$I_1$ : 導体電流 (A)

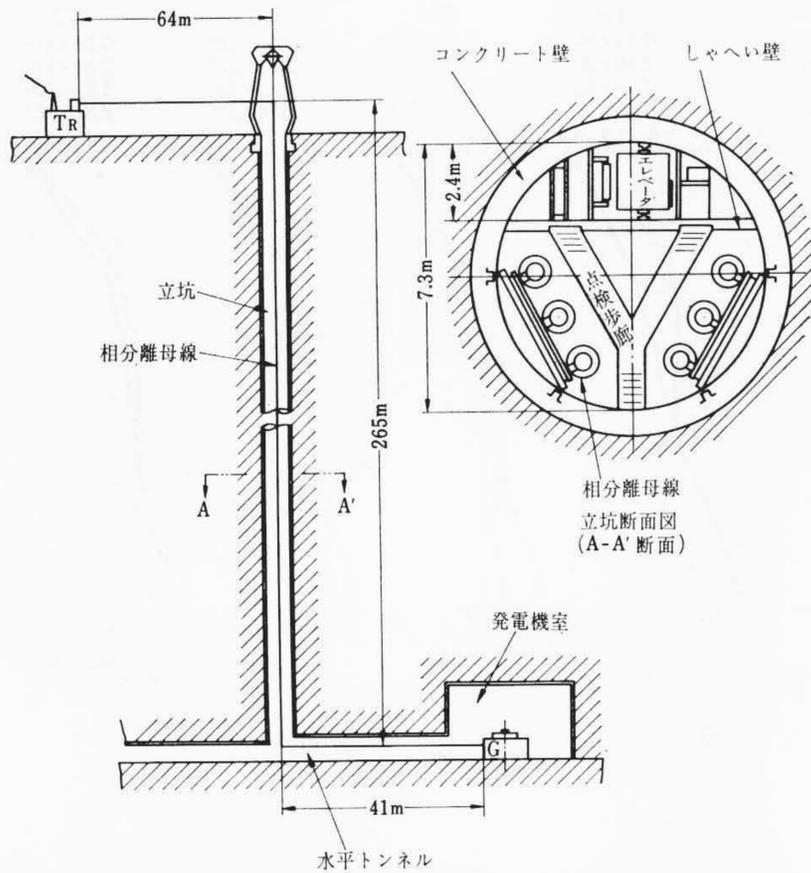


図2 相分離母線現地概略配置図

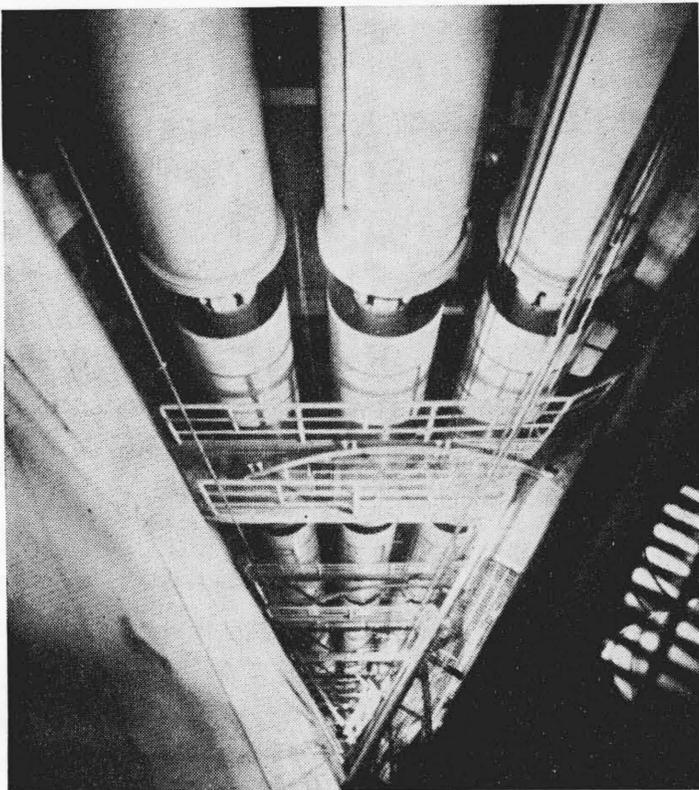


図3 立坑部に設置された相分離母線

$R_1$ : 導体の直流抵抗 ( $\Omega/m$ )

3.2 シースの発熱量

$$Q_3 = 0.860 I_3^2 R_3 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $Q_3$ : シースの発生熱 (kcal/mh)

$I_3$ : シース電流 (A)

$R_3$ : シースの直流抵抗 ( $\Omega/m$ )

一方、立坑内の伝熱については、図4のプロセスによると考えられる。

すなわち、導体に発生したジュール熱は、ふく射および対流によってシースに伝達され、シース自身で発生したジュール熱と加わってふく射により立坑壁に、対流により立坑内空気へ伝達される。立坑壁に伝達された熱量は、さらに立坑内空気へ対流伝達され、また、一部伝導により地中へ伝達される。立坑単位長あたりの各伝熱量を数式で取り扱おうと次記となる。

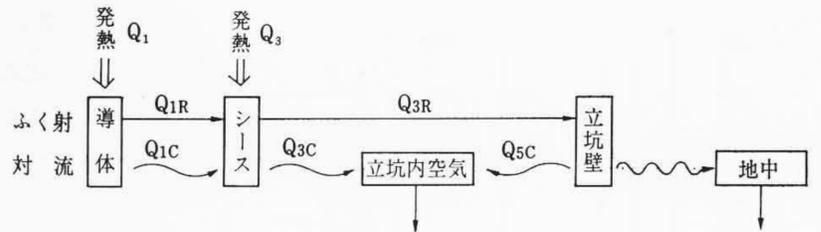


図4 立坑内の伝熱プロセス

3.3 導体とシース間のふく射伝熱

$$Q_{1R} = A_1 \sigma (T_1^4 - T_3^4) \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_3} \left( \frac{1}{\epsilon_3} - 1 \right)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $Q_{1R}$ : 導体とシース間のふく射伝熱量 (kcal/mh)

$A_1, A_3$ : 導体およびシースの表面積 ( $m^2/m$ )

$\sigma$ : ステファンボルツマン定数  
 $= 4.88 \times 10^{-8}$  (kcal/ $m^2 h^\circ K^4$ )

$T_1, T_3$ : 導体およびシースの絶対温度 ( $^\circ K$ )

$\epsilon_1, \epsilon_3$ : 導体およびシースの表面ふく射率

3.4 シースと立坑壁間のふく射伝熱

$$Q_{3R} = \epsilon_3 A_3 F_{3-5} \sigma (T_3^4 - T_5^4) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $Q_{3R}$ : シースと立坑壁間のふく射伝熱量 (kcal/mh)

$F_{3-5}$ : 2機分のシースの立坑壁に対する形状係数

$T_5$ : 立坑壁絶対温度

3.5 導体とシース間の自然対流伝熱

$$Q_{1C} = \frac{2\pi k_c}{\ln D_3/D_1} (t_1 - t_3) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $Q_{1C}$ : 導体とシース間の対流伝熱量 (kcal/mh)

$k_c$ : 等価熱伝導度 (kcal/mh $^\circ C$ )

$D_1, D_3$ : 導体およびシースの直径 (m)

$t_1, t_3$ : 導体およびシースの温度 ( $^\circ C$ )

3.6 シースと立坑内空気の対流伝熱

3.7 立坑壁と立坑内空気の対流伝熱

$$Q_{3C} = \alpha_3 6 A_3 (t_3 - t_4) \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_{5C} = \alpha_5 A_5 (t_5 - t_4) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$Q_{3C}, Q_{5C}$ : シースおよび立坑壁と立坑内空気層対流伝熱量 (kcal/mh)

$\alpha_3, \alpha_5$ : シースおよび立坑壁の熱伝達率 (kcal/ $m^2 h^\circ C$ )

$A_5$ : 立坑壁面積 ( $m^2/m$ )

$t_4, t_5$ : 立坑内空気および立坑壁の温度 ( $^\circ C$ )

3.8 地中への伝熱

立坑壁より地中への熱放散は、場合によってはダム水位との関係で大きく影響することも考えられるが、経年的にその熱吸収は飽和すると考え、設計においては、地中への熱放散は無視したものとした。

3.9 立坑内空気温度

立坑内の空気は母線から伝えられる熱により暖められて上昇流を起し、垂直方向に温度こう配を生ずる。地中への伝熱の項で述べたように、地中への熱放散を無視すると、この温度こう配は次式で与えられる。

$$\frac{dt_4}{dx} = \frac{Q}{USC_p \gamma 3,600} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $x$ : 立坑底部よりの距離

$Q$ : 立坑内相分離母線の発熱量  
 $= 6(Q_1 + Q_3)$  (kcal/mh)

$U$ : 流速 (m/s)

$S$ : 流路断面積 ( $m^2$ )

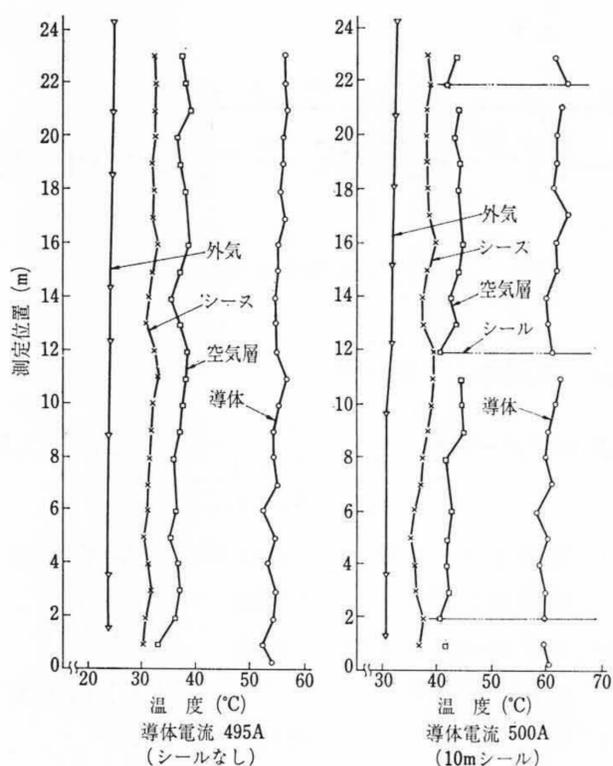


図5 仕切板による温度分布の変化

$C_p$ : 定圧比熱 (kcal/kg°C)  
 $\gamma$ : 比重 (kg/m<sup>3</sup>)

立坑内に生ずる空気の流速は自然対流によるもので、坑内空気の温度上昇により生ずる浮力と坑内の流動抵抗のバランスにより決まることはいままでのない。

3.10 ヒートバランス

以上の諸式の関係は、前記伝熱プロセスで示されるとおりで下記となり、各部の温度がこの関係式より求められる。

$$Q_1 = Q_{1R} + Q_{1C}$$

$$6(Q_1 + Q_3) = Q_{3R} + Q_{3C}$$

$$Q_{3R} = Q_{5C}$$

4. 伝熱の問題

上記伝熱において、ふく射伝熱については母線の長さ方向に熱量の累積作用がなく、高さによる影響はまったく考えなくてよい。すなわち形状、表面状態および温度が定まれば伝熱量は一義的に規定され、その算出も容易である。

対流伝熱についてはシースおよび立坑壁より、立坑内空気への強制対流(もともと立坑に生ずる流れは自然対流によるものであるが、局所的な伝熱は強制対流的と考えられる)は流速が決まれば、幾何学的形状、配置により一義的に求められる。一方、導体とシース間の対流伝熱については、垂直密閉流体層の自然対流伝熱の問題として、現在、多くの研究者の研究対象になっているが、自然対流の流動様式すら明確にされていないため、熱伝達を正確に予測することはできない段階であり、特に今回の場合のように垂直長さが非常に長い場合には、実験結果すら皆無である。

従来の、高さ/空気層厚(H/L)が5~100の実験結果および実験式によると、垂直密閉流体層の熱伝達にはH/Lが関係し、H/Lが大きいほど熱伝達が悪くなることがいわれている。

今回の喜撰山発電所の場合は、H/L=1,000にもなるため、従来の実験結果および実験式をそのまま外そうして使うことはできず、したがって今回の場合は、特にこの点について焦点が絞られ、種々実験を重ねてその解決にあたった。

4.1 縮小モデルによる検討

200φのアルミシース24mに31.8φの銅パイプを導体としてそう入し、378~900Aの各種電流を通電、H/L=62.5~1,000のおのおの

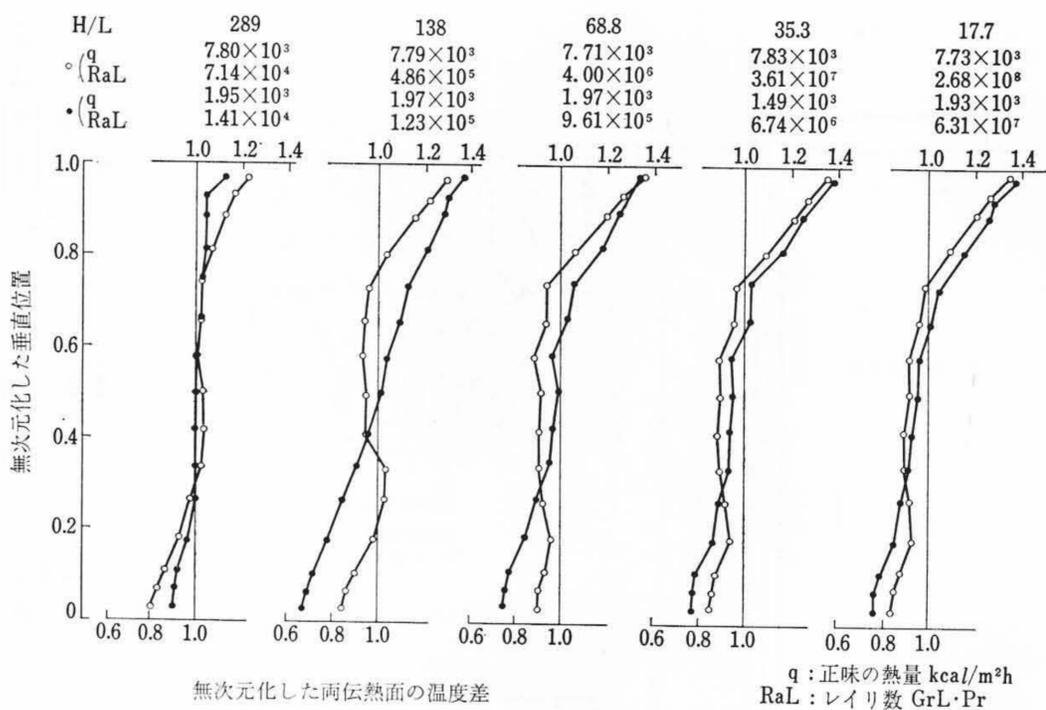


図6 両伝熱面の局所温度差の分布

について実験した。また、垂直方向の温度改善策として、密閉流体層を縦方向に仕切ることが有効ではないかの見地から、仕切板を中間に置いて温度を測定し、図5に示す結果を得た。

一点鎖線で示した仕切板の効果により、導体の温度分布に変化がみられるが、熱伝達を改善する目的や、導体上端部の高温部の温度を低下させる目的のためには、仕切板の効果は少ない。仕切板を入れたため、その下側で温度上昇が見られたり、仕切りにより立坑内全長の最大温度差が上昇したりする場合があるので注意しなければならない。

さらに母線上端部に生ずる最高温度を評価するためには、仕切板上下の局所伝熱の解析が必要である。そこで水を用いて対流熱伝達のみをシミュレートする基礎実験を行ない、加熱面と冷却面の平均温度差に対する両伝熱面の局所温度差の比を求めた。図6はその結果である。

この図から自然対流のみが存在する密閉流体層の加熱面の温度上昇は平均の温度上昇に対して、最高40%の過上昇になることがわかる。しかしながら一般の相分離母線では対流伝熱と同時にふく射伝熱も共存し、しかもふく射伝熱の占める割合が大きい(ふく射70%, 対流30%程度)相分離母線においては、上端付近の局所的な温度の過上昇は対流熱伝達の場合に比べ非常に小さく、今回の喜撰山発電所の場合で3°C程度と推定された。

以上の結果から導体とシース間の対流熱伝達についてはH/Lが大きく、さらに導体とシース間の空気層の厚さが大きいいため、自然対流は乱流と考えられ、熱伝達率は上、下端のごく近傍を除いてほぼ一定の値となる。したがってシールブッシングを用いて相分離母線内を高さ方向に仕切っても熱伝達の上では効果はない。

4.2 実物大三相24mによる確認

縮小モデルによる結果を確認するため、実物大三相24mを垂直に配置し定格電流を通電して各部の温度を測定、熱伝達率の確認を行なうとともに実機265m用の製作の基礎固めを行なった。図7はその試験状況を示し、図8はその測定結果であり、それは図5と同様であり縮小モデル実験の成果が確認された。

5. 現地試験

図9は現地据付後の温度上昇試験結果である。その結果よりわかるように温度の測定値は、工場試験の結果とほとんど差異は認められない。

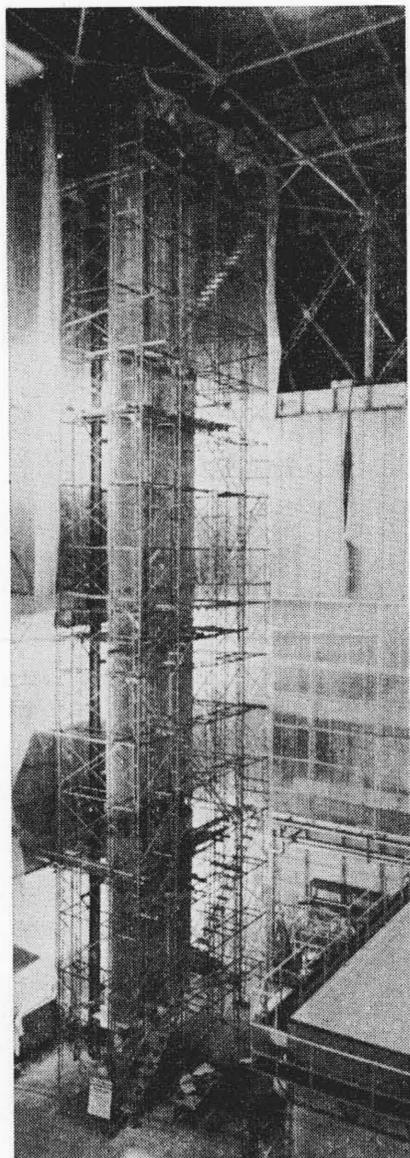


図7 実機 24m の工場試験セット

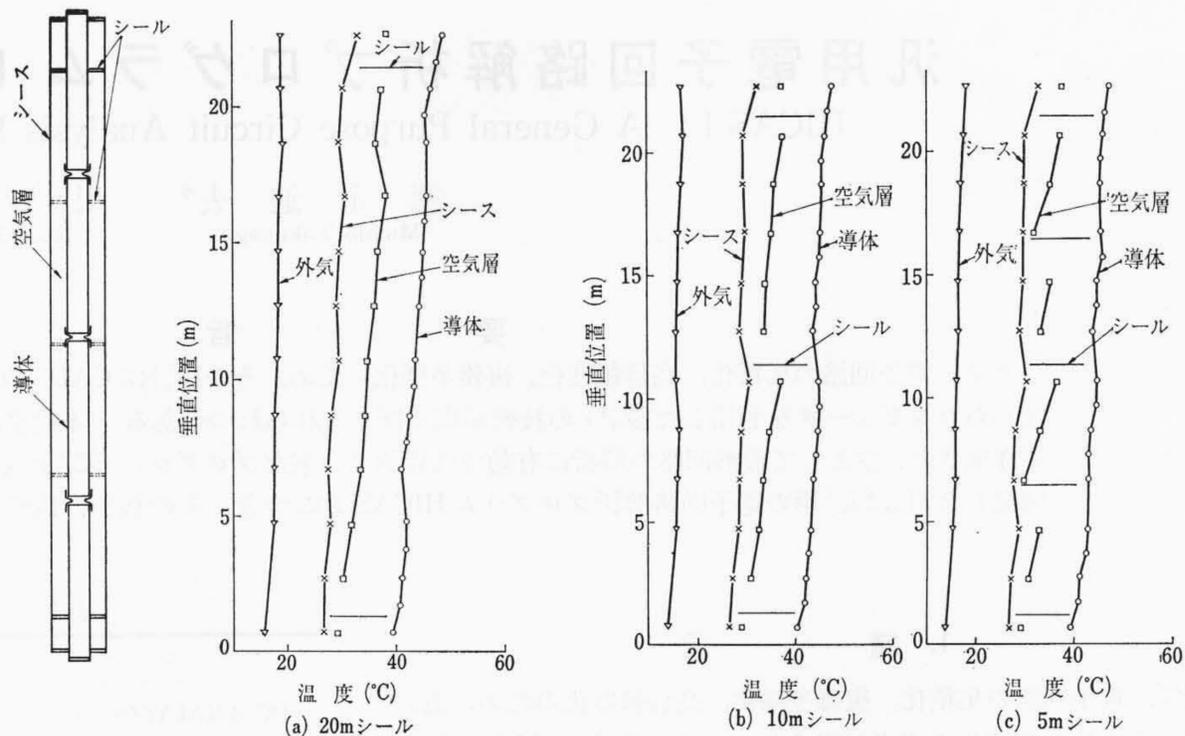


図8 温度分布 (導体電流 9,500 A)

6. そのほかの検討事項

そのほかの検討事項として、立坑内鉄構部分の誘導加熱，エレベータワイヤへの電磁誘導が当初検討項目として掲げられたが，喜撰山発電所用の相分離母線は，従来の非連続シース方式(注1)を改め，連続シース方式(注1)を採用したため，外部磁界の軽減が著しく，従来方式の約 1/10 にも減じた。そのため上記誘導加熱，電磁誘導体は全然問題にならなくなった。これらも工場試験時検討されたが本稿では省略する。

7. 結 言

以上，喜撰山発電所向けの相分離母線として，世界でも例のない記録品の据付完了までの検討結果のうち，特に温度について述べたが，これからますます増大する大容量発電所の計画に際し，今回のこの経験が寄与するところ大であり，貴重な経験とみずかずのデータを得ることができたことに感謝する次第である。

特に 42 年末計画以来 2 年有余，終始ご指導いただくとともに，据

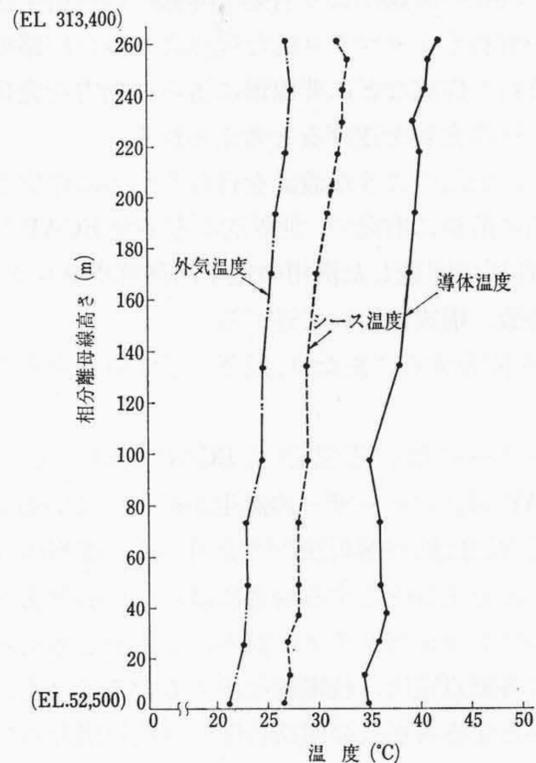


図9 立坑内温度分布曲線 (現地測定結果)

付後の各種試験にご協力いただいた関西電力株式会社関係各位に，また密閉流体層の自然対流熱伝達の検討にご指導いただいた九州大学西川教授，日立製作所日立研究所石橋主任研究員に深く御礼申し上げる次第である。