

マレーシア ルムト火力発電所建設工事における取放水管の設計と施工

The Design and Construction of CW Pipeline for Lumut Thermal Power Station Project

井之上賢一* 井崎秀男** 池上政司*** 武富幸郎****

Kenichi Inoue, Hideo Izaki, Masashi Ikegami, Yukio Taketomi

Abstract

As for the construction of circulating water pipeline for Lumut thermal power station in Malaysia, the works was executed under the design / construction lump contract. Therefore, the hydraulic model test was carried out for the intake structure to confirm the hydraulic characteristics to satisfy requirements from the client. And rapid construction was necessary for circulating water pipeline due to its long extension and short construction period. In this paper, we report the result of hydraulic model test for the intake structure and an outline of construction method.

Keywords: circulating water pipeline, intake structure, hydraulic model test

1. はじめに

マレーシアのルムト火力発電所の取放水管建設工事は、設計・施工一括方式の契約であった。取水口の構造は、施主から要求された水理特性を満足することを確認するために、水理模型実験を行って決定するように契約の中に定められていた。取水口の形式は鉛直取水管式取水口であったが、施主からの要求事項として、その構造については、損失水頭・流速・気泡の混入等の水理特性が仕様の条件を満たしていること、管内面への生物の付着を防止するために注入する次亜塩素を管内で充分に拡散させる薬液注入ノズルの配置を決定することなどが上げられた。そのため、施主からの要求を満足する取水口の構造および薬液注入ノズルの配置を決定するために、水理模型実験を行った。

また、当発電所は遠浅の海岸に位置しているため、取水口の位置は海岸線から1km以上沖合にあった。取水管は1,070m×4条、放水管は270m×4条で、定められた工期が厳しく急速施工が必要であったため、管材質や管径の選定からその製作・運搬および沈設方法については、現地の状況に合った設計・施工方法の検討を行い決定した。

本稿では、取水口の構造と薬液注入ノズルの配置に関する模型実験結果および取放水管の施工方法の概要について報告する。

2. 取放水管の設計

取放水管の設計の範囲は、管路の材質選定および水理・安定・構造設計、取水口の安定・構造設計および水理模型実験であった。ここでは、水理模型実験の実験装置および実験結果について述べる。

2.1 取水口形状の模型実験

取水口の構造については、基本設計形状および修正形状について染料を使用した流れの追跡、損失水頭の計算、管内流速の測定等を行った。基本設計の取水口形状の実験結果では、要求された水理特性の条件をほぼ満足していた。しかし、さらに優れた取水口の形状を知るために7タイプの形状を提案し、各々の提案形状について水理特性を明らかにした。

取水口の模型実験の目的は、① 最適な水理特性の取水口形状を試験する。② 取水口の水理特性の改善のために必要な修正形状を試験する。③ 取水工内での損失水頭の測定、である。また、施主からの要求事項は、模型実験によって確立される水理特性として、① 取水工内での圧力低下を最小にすること。② 憩流状態においても気泡が混入した渦が無いこと。③ 取水工のどの部分においても砂、シルトの堆積を最小にすることであった。

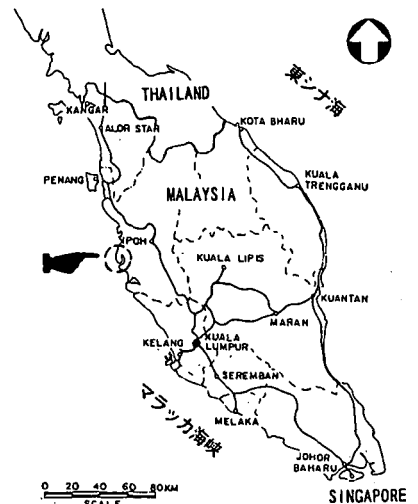


図 1-1 位置図

* 正会員 三井建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒261-0023 千葉県美浜区中瀬1-9-1)

** 三井建設株式会社 東京土木支店

*** 三井建設株式会社 国際事業部土木部

**** 三井建設株式会社 土木本部土木設計部

ケース 1：冷却水の流量；フェーズ 1・2、潮位；平均潮位(MSL)、潮流；最大上げ潮、下げ潮
ケース 2：冷却水の流量；フェーズ 1・2、潮位；低極潮位(ELW)、潮流；憩流

また、潮位については、HAT= 1.96 m (LSD)、MSL = 0.26 m (LSD)、ELW = LAT = -1.44 m (LSD)である。ここで、HATは、Highest Astronomical Tide(最高天文潮位)、LATは、Lowest Astronomical Tide(最低天文潮位)、LSDは、Land Survey Datum(陸地測量基準面)を示す。

表 2-1 模型実験条件

ケース	原型条件			模型条件	
	潮位	冷却水流量 Q _{cw} (m³/sec.)	潮流 V _p (m/sec.)	流入量 Q _f (L/sec.)	潮流 V _m (m/sec.)
1-1(A)	MSL	4.25	0.6	206.8	0.168
1-2(A)	MSL	8.5	0.6	206.8	0.168
1-1(B)	MSL	4.25	0.4	137.8	0.112
1-2(B)	MSL	8.5	0.4	137.8	0.112
2-1	LAT	4.25	静止	7.26	静止
2-2	LAT	8.5	静止	14.5	静止

実験条件は表 2-1 に示すとおりである。損失水頭は、図 2-2 に示された圧力タッピングに接続された流体圧力計（マノメーター）の読みから計算した。流れを視覚化するために染料を注入し、さらに、流れの視覚化を助けるために羊毛をバースクリーンと湾曲部の内側に取付けた。

基本設計形状を図 2-3 に示す。実験の結果から、①全ての憩流状態で、バースクリーンを通した水平な放射状の流入である、② LAT の憩流状態で、空気を巻き込んだ渦は見られない、という結果が得られ、これらの試験結果は施主の仕様を満足していた。

しかし、図 2-4 に示すケース 1-1(A)の結果では流れの一部が取水口上部を通過しており、このことは薬液注入システムの性能を発揮させるためには望ましくないと判断した。また、取水管の湾曲部で乱流と損失水頭に関して好ましくない流れの分離が見られた。

以上の結果から、取水口の一般的な水理特性に関して仕様書の要求はほぼ満たしていたが、以下の2項目に関して改良することが望ましいと考えた。

①高い潮位の状態で、取水口頭部を通過する流れを可能な限り少なくする。②鉛直管内の上部での流れの分離を最少化する。そのために引き続き修正形状の実験を行った。

修正形状の模型実験の目的は上記のとおりで、最終的に図 2-5 に示す 7 つの修正形状について試験を行った。

- ① 1組のクロスベーン（十字羽根）を取水口頂版の下に取り付ける。
- ② コーン（円錐）を取水口頂版の下に取り付ける。
- ③ 放射状の8枚のフローベーン（整流羽根）を中心にあるマンホールまで延長する。
- ④ 8枚の鉛直フローベーンを鉛直管内部の上部に放射状に取り付ける。
- ⑤ マンホールを延長した形の円筒を取り付ける。
- ⑥ 取水口頭部と鉛直管の間にベルマウスを挿入する。
- ⑦ ベルマウスの高さ分の鉛直管を切断した最終形状。

ケース 1-2 (A)の実験結果では、図 2-6 に示すように下流側の両側の区画で乱流が発生し染料が流出した。ケー

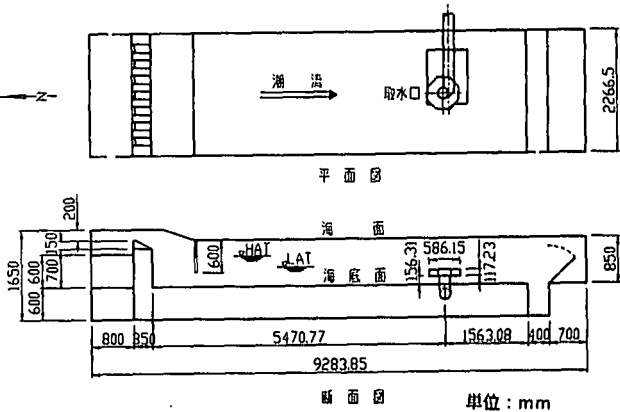


図 2-1 実験水槽

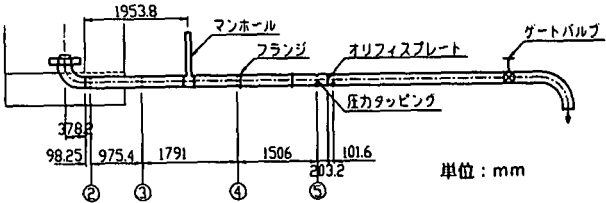


图 2-2 取付管断面图

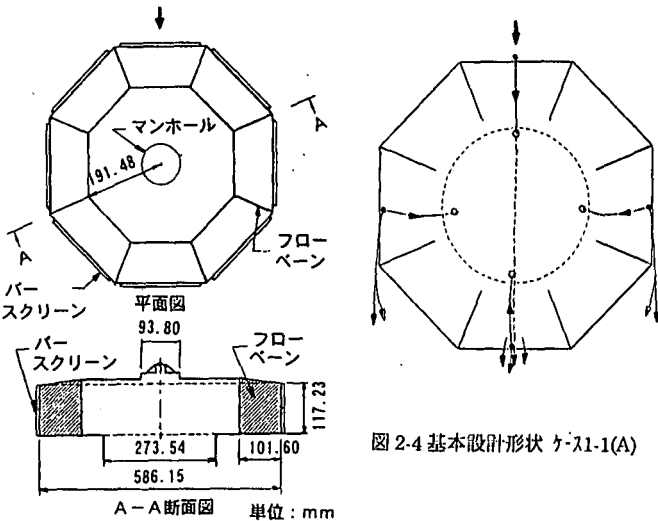
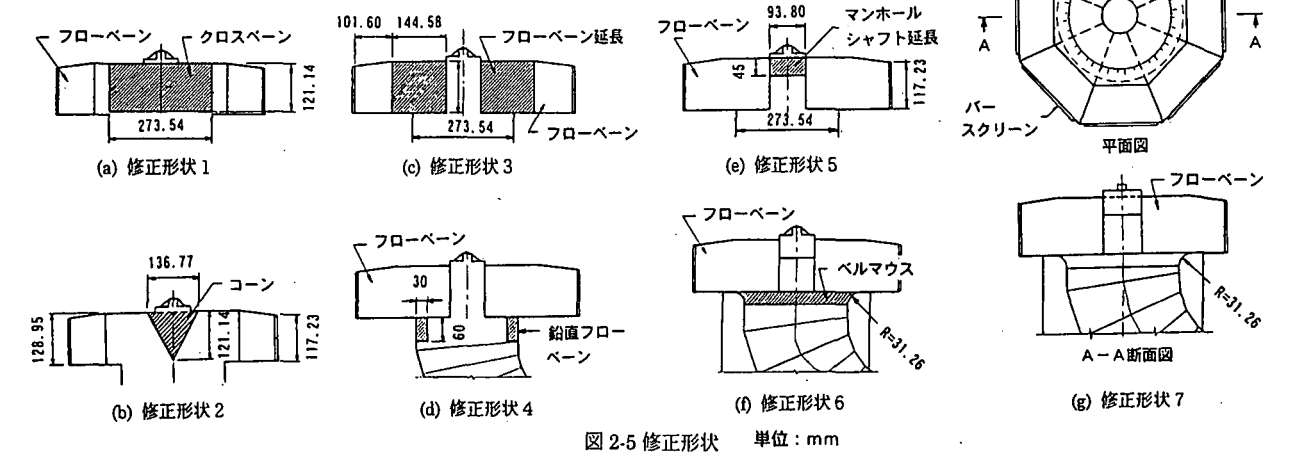


图 2-4 基本設計形状 ケ-λ1-1(A)

图 2-3 基本设计形状

ス 1-1 (A)では、フローベーンとクロスベーンに沿った通過流が生じた。この現象は頭部からの注入薬液の流出につながり、条件を満たしていなかった。また、取水管の湾曲部で流れの分離が見られた。



(2)修正形状 2：円錐（コーン）

近接した連続的な流れを造る事によって、流れの分離を減らす目的でコーンを取り付けた。しかし、流れの分離の範囲は修正形状 1 よりも広がり、コーンの水理特性はクロスベーンより劣っていることがわかったためこの案は採用しなかった。

(3) 修正形状 3：フローベーンの延長

修正形状 3 の目的は、流れを取水口の中央に導き開口を絞ることによって取水口での通過流を防止することであった。図 2-7 に示すように、ケース 1-1(A)では上流側の 4 つの区画からの流入が潮流によって下流側の区画に押し込まれていた。また、下流側の区画から注入された染料は、下流側に流出した。ケース 1-2(A)では、両側の区画からの流入が下流側の区画に流出した。ケース 2-2 では、フローベーンの延長は基本設計形状に比較して取水口での流れをまっすぐにする効果があることがわかった。フローベーンの延長は、水理特性の改善に効果があることが確認されたので最終形状に取り入れた。

(4) 修正形状 4：鉛直フローベーン

取水管の湾曲部での流れの分離と乱流を減らすために、鉛直フローベーンを鉛直管内部の上部に放射状に取り付けた。この修正形状は特にケース 2-2 において、取水口の中への流れの矯正に効果があった。

(5) 修正形状 5：マンホールシャフト

取水口を通過する流れを除去する目的で、円筒をマンホールの下に取り付けた。図 2-7 の(b)ケース 1-2(A)と図 2-8 の(b)ケース 1-2(A)に示す取水口頂部の流れの比較から、修正形状 3 において前面から背面に流出していた流れが減少していることがわかる。また、前面区画から流入して背面区画側に流れ込んでいた流れが減少した。この修正は水理特性の改善に効果があったため、最終形状に組み込まれた。

乱れの範囲と強さの表示および部分的な高流速エリアを確認するために、ケース 1-2(B)で流速の測定を行った。

流速の測定は図 2-9 に示す 8 つの区画において、A から F の高さまで壁から 30mm ～ 35mm の位置で行った。激しい乱流の範囲は、広い流速分布を示した区画 6 と 7 で見られ、区画 3 と 4 で最も早い流速が測定された。早い流速と乱流は、ペイントの侵食と管内面の腐食に関して望ましくないことがわかっているため改善が必要であった。

(6) 修正形状 6：ベルマウスの挿入

シャフトの入口にベルマウスを挿入する狙いは、修正形状 5 で実施された流速測定によって確認された取水管内での流れの分離範囲の広がり、大きなスケールの乱流を減少させることであった。修正形状 6 は、既設シャフトの上部にベルマウスを挿入したために取水口の模型全体の位置が高くなった仮の模型である。ベルマウスの挿入によって、鉛直方向の流れの分離範囲が原型で 600mm 減少した。区画 3 と 4 において最大流速は低下し、区画 6 と 7 の激しい乱流の範囲もまた狭くなった。ベルマウスによって流れの分離と乱流の範囲が減少し、優れた水理特性を示したためこの修正形状も最終形状に組み込まれた。

(7) 修正形状 7：ベルマウスを持つ最終形状

シャフトを切断して、取水口の設置レベルを基本設計と同じにしたモデルである。図 2-10 に示すように、ケース 1-1 (A) と 1-2 (A) において、いくつかの区画で渦が残っているが、ベルマウスは基本設計の鋭角な縁を持った流入口よりも、取水管に流下する水理特性は改善された。ケース 2-1 と 2-2 において、取水口周囲の時計回りの渦が、先の修正形状よりも幾分強いように観察された。しかし、どの試験条件においてもバースクリーンを通る放射状の流入は連続し、気泡の混入は見られなかった。

ケース 2-1 と 2-2 において、水面を 1mm ～ 2mm 引き下げる小さな弱い渦が観察され、ケース 2-2 においてその芯がバースクリーンの最上部に達する最も強い渦が観察されたが、どのケースにおいても気泡が混入した渦は観察されなかった。

流体圧力計の読みから計算した損失水頭を表 2-2 に示す。ここで注目すべき改善は、基本設計形状および修正形状 1 ～ 5 との比較において損失水頭が減少したこと、流れの分離と乱流の範囲が減少したこと、そして、取水口の水理特性が改善されたことである。

先のケースと同様に流速測定は、ケース 1-2(B) において、-2.4mLSD で行った。測定位置を図 2-9 に示す。区画 3、4 で測定されたピークの流速は、0.43m/sec. (原型では 1.52m/sec.) で、修正形状 6 よりもわずかに速いが、その値はベルマウスを組み込む前の形状に比べると非常に遅い。また、区画 6、7 で記録された広い乱流の範囲の流速レンジは、修正形状 6 に比べて減少した。

2.1.3 結論

修正形状の狙いは、取水管の湾曲部での流れの分離と乱流を減らすこと、取水口での潮流による水圧変化と通過流による注入薬液の損失のためにポテンシャルを最小にすることであった。効果があつた修正形状は、最終の形状に組み込まれたが、その形状は、①フローベーンの延長 ② 取水口頂版下の円筒マンホールシャフト ③ 取水管入口へのベルマウスの挿入である。

最終形状は、以下の条件に関して最適な水理特性を得られた。

- ① いかなる憩流の条件においても気泡が混入した渦が生じない。
- ② 取水口のどの位置においても砂あるいはシルトの堆積が最少になる。
- ③ 流れの分離と乱流が最少になる。
- ④ 取水口における圧力低下が最小になる。
- ⑤ 速い潮流条件において注入薬液の損失に関するポテンシャルが最小になる。

全ての試験条件 (取水口形状、潮位、潮流、流量) において、いくつかの流れの分離が観察された。修正形状 7 において、流れの分離の範囲は、湾曲部の上から 1.5 区画まで広がったが、この位置は、取水管の鉛直部に近く、砂あるいはシルトの沈澱に関しては問題が無いと考えた。

以上の試験結果から、最終形状は修正形状 7 とすることを施主に提案し、施主との合意を得た。

2.2 薬液注入ノズル配置の模型実験

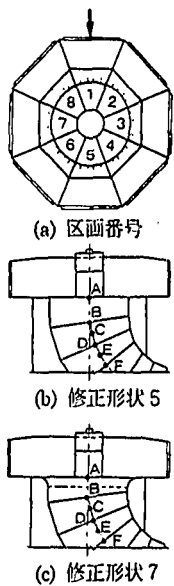


図 2-9 流速測定位置

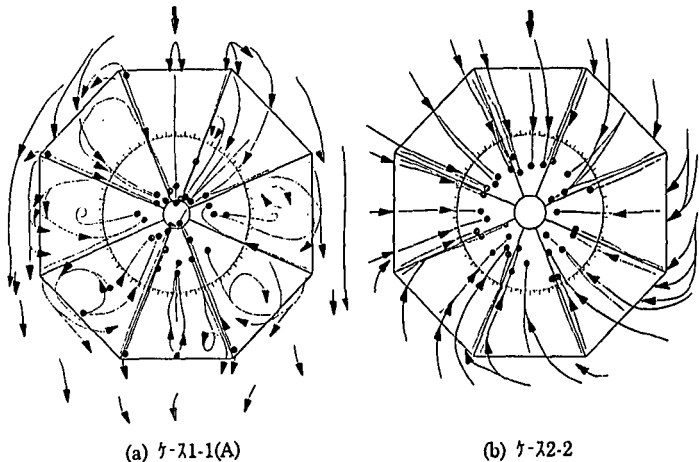


図 2-10 修正形状 7 (最終形状)

表 2-2 損失水頭の計算結果

ケース	1-1(A) (mm)	1-2(A) (mm)	2-1 (mm)	2-2 (mm)
修正形状 1	48.6	-	-	51.2
修正形状 2	-	-	-	-
修正形状 3	48.6	-	-	48.6
修正形状 4	55.0	-	-	48.6
修正形状 5	61.4	-	-	48.6
修正形状 6	42.4	-	-	29.4
修正形状 7	18.4	35.8	5.63	29.4

この実験の目的は、取水口において可能な限り上流で添加薬品が分散する注入ノズルの最適位置を求めることである。使用される薬液添加比率は、海洋性成長物を考慮した以下の2種類あった。

- ① 通常添加率は、 $40\text{m}^3/\text{hr}$ （ノズルの管内流速は $1.25\text{m}/\text{sec.}$ ）で、1日あたり23時間45分添加される。
- ② 衝撃添加率は、 $160\text{m}^3/\text{hr}$ （ノズルの管内流速は $5.00\text{m}/\text{sec.}$ ）で、1日あたり15分添加される。

薬液注入ノズルの配置に関して、ノズルからの注入方向・ノズルの数および設置位置について水理模型実験を行った。薬液の分散は1本のノズルによってシミュレートできることから、最初は単純化された注入システムで実験を開始した。モデルは長さに対して $1:12.795$ の縮尺で、流速はフルードの相似則から求めた。

薬液注入ノズルの配置について、基本設計では2つの案が出されていた。第1案：鉛直管内の上部に6つの注入ノズルを配置する。第2案：取水口の内部に6つの注入ノズルを配置する。第2案が優れていると考えられたが、両方について試験を行った。試験の最初のシリーズは、上記の第1、2案を基にしたフェーズ1 A、1 Bおよび2で実施した。その後の試験は、染料の混合と分散の最適化のために注入ノズルの配置範囲のシミュレーションを行った。

(1) フェーズ1 A試験

取水管の湾曲部は潮流に対して対称ではないために、取水口ヘッドの各区画からの流入時の水理特性は異なっている。取水口形状の試験結果（図2-10）より、区画1、2、8からの染料の損失はなかった。従って、区画3、4、5、7にノズルを配置して試験を行った。ノズルの配置は図2-11(a)に示すように、バースクリーンから110mm突出し取付けレベルは頂部、中間部、底部とした。フェーズ1 A試験は衝撃添加率をシミュレートした。

試験結果を表2-3に示す。ここで、1は最もよく混合する、3は最も少なく混ざる状態を表現している。この試験結果では最適なノズル位置は取水口の頂部で、最初のフランジと2番目のフランジの間まで完全な薬液分散が生じなかった。

(2) フェーズ1 B試験

フェーズ1 B試験ではフェーズ1 A試験と同様に3種類のノズル位置で通常添加率に対して行った。試験結果から、最適なノズル位置はフェーズ1 A（衝撃添加率）と同様に取水口の最上部であることがわかった。また、完全な薬液分散は最初のフランジと2番目のフランジの間まで生じなかった。

(3) フェーズ2試験

この試験では、ノズルを取水管の方に延長した。そして、添加率は通常添加率と衝撃添加率に対して行った。通常添加率と衝撃添加率の両方に対して、2番目のフランジの下流まで完全な薬液分散が生じなかった。

(4) フェーズ3試験

このシリーズの目的は、薬液添加システムの分散性能を改善することである。薬液の分散は、注入された薬液の流れと水の流れの境界面が乱されることによって改善されると考え、ノズルの注入方向を放射状に外向きに変えた。ノズルの高さは、頂部、中間部、底部と変え、染料は衝撃添加率で注入した。ノズルの位置は、図2-11(c)に示す3種類とした。試験結果は表2-4に示すとおりで、最適位置は取水口ヘッドの底部であることがわかった。

取水口ヘッドの8つの区画（図2-9(a)区画番号による）からの注入による薬液の分散を評価するために、ノズルを区画1、3、7に配置して試験を行った。その結果、取水管内において薬液が十分に分散することが確認された。

最後の試験は、全ての区画に注入ノズルを配置して行った。そして、この配置において完全な染料の分散が始まる位置は原型で、通常添加率では湾曲部の下流7m~10m、衝撃添加率では湾曲部の下流7mの位置であると判断した。

また、ケース1-1(A)、1-2(A)、1-1(B)において、区画4と6からいくらかの薬品の損失があった。添加薬液の損失率は、表2-5に要約するように損失率は小さく、発電所のフェーズ1操業時の速い潮流条件のみで生じ、この損失は以下の理由により容認された。

- ① ケース1-1(A)の流れ状態は、非常に大きな上げ潮のピーク付近の短期間だけに生じる。
- ② ケース1-1(A)の流れ状態と衝撃添加率の組合せは、発電所の運転上の調整で容易に避けることができる。

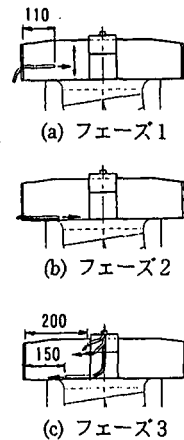


図2-11 薬液注入ノズル配置

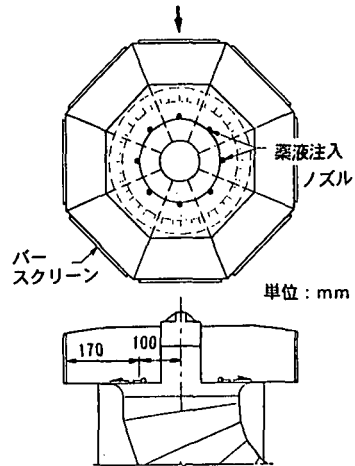


図2-12 薬液注入ノズル最終配置

表2-3 分散評価

注入区画	ノズル高さ		
	頂部	中間	底部
3	2	3	1
4	1	1	2
5	2	3	1
7	1	2	3

表2-4 分散評価（区画1）

注入率	ノズル高さ		
	頂部	中間	底部
通常添加率	2	2	1
衝撃添加率	2	3	1

表2-5 添加薬液の損失率

ケース	添加率	損失率(%)
1-1(A)	通常	3% - 6%
	衝撃	6% - 10%
1-1(B)	通常	0
	衝撃	1.5% - 5%
1-2(A)	通常	0
	衝撃	0

以上のことから、薬液注入ノズルは「取水口ヘッド底部の中心から 100mm（原型では 1290mm）の位置に 8 個所配置し、注入方向を放射状に外向きにすることが最適である」ことを施主に提案し承認された。

3. 取放水管の施工

取放水管は、内径 2,600mm の鋼管で、その延長は取水管が約 1,070m×4 条、放水管が 270m×4 条で合計が約 5,300m と非常に長かった。しかし、取放水管工事の全体工期は、18 ヶ月という非常に短期間の設定であったため、全体の約 9 割を 6 ヶ月で沈設する必要があるがあった。そのため、長さ 48m の長管を毎週 4 本沈設するというサイクルの沈設計画を立て、短管の製作・運搬から長管の製作・運搬・沈設までをシステム化し、施工を開始した。長管の製作から進水までの主要陸上設備は、①工場製作された 12m の短管を溶接して 48m の長管にする長管製作台、②製作された長管を仮置台・艀装台に移動する長管移動台車、③長管を仮置きする長管仮置台、④曳航用吊点・沈設および進水用吊点等を艀装する長管艀装台、⑤艀装を終えた長管の仮置台、⑥艀装された長管を曳航するために進水させる長管進水ヤードから構成されている。また、進水から沈設までの主要設備は、①艀装長管 2 本を同時に運搬できる曳航台船、②艀装長管を台船から取り込んで移動することなしに 4 条を順次沈設できる沈設架台、③クレーン船・ガット船等の作業船から構成された。工事に当ってはこれらの設備が効率よく機能し、計画どおりに 6 ヶ月で約

4,700m の据え付けを完了することができた。さらに、取放水口の建設からポンプピットへの接続までを工期内に終了することができ、施主から高い評価を得た。本工事のために新たに設計・製作した主要設備を表 3-1 に、長管の曳航から沈設までの施工フローを図 3-1 に示す。

表 3-1 主要設備一覧表

設 備	基数	備 考
長管製作台	1 組	パワーローラー
長管移動台車	1 組	
長管仮置台	15 基	
長管艀装台	2 基	
艀装長管仮置台	4 基	
長管進水ヤード	1 式	門型クレーン
曳航台船	1 隻	
沈設架台	5 基	

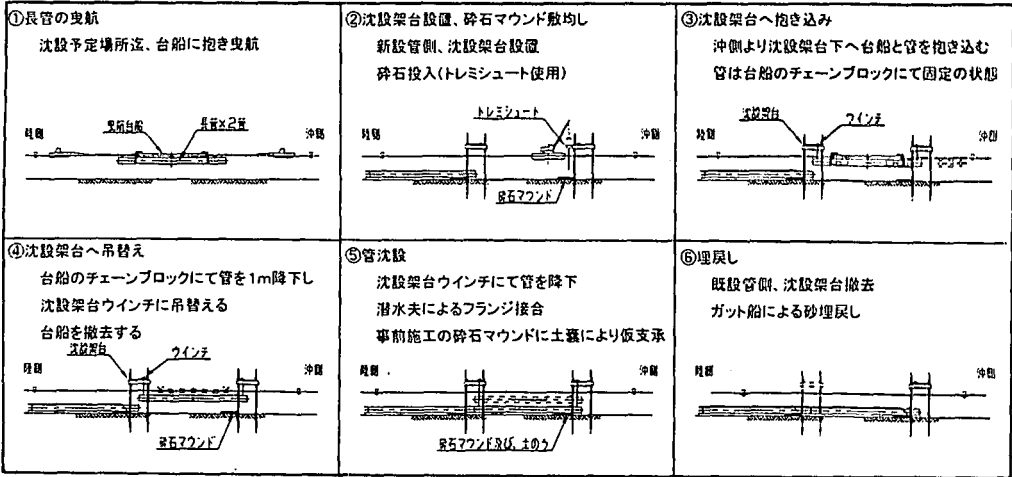


図 3-1 施工フロー

4. おわりに

取水口の構造は基本設計の外形寸法を変更することなしに、フローベーンの延長、取水口頂版下のマンホールシャフトの取り付け、ベルマウスの挿入等の部分的な形状変更により、要求された水理特性を十分に満足する形状が得られた。薬液注入ノズルの配置については、発電所のフェーズ 1 操業時（約 1 年間）における、上げ潮時の速い潮流条件という限られた条件で、添加薬液のわずかな損失が生じるが、発電所の運転上の調整で避けることができたため、要求された水理特性を満足する配置が得られたと考えている。

施工に関しては、鋼管の製作から曳航・沈設までをシステム化した施工方法を採用したことにより、18 ヶ月という限られた工期の中で、総延長 5,300m 余りの取放水管の沈設、取放水口の建設およびポンプピットへの接続までを、無事に終えることができた。

今後は、取水口の水理特性のさらなる改善を進め、取放水管の大口径化・長大化に対応できる設計・施工システムの研究開発に努めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 火力・原子力発電所土木構造物の設計 社団法人 電力土木技術協会編
- 2) 火力・原子力発電所土木構造物の設計(増補改訂版) 社団法人 電力土木技術協会編
- 3) ABB (1994) "Lumut Power Station, Cooling Water System - Offshore Civil Works, Volume 2, incorporating Addendum 1" Specification, ABB Power Generation, South East Asia, May 1994.
- 4) HYDEC (1994) "Combined Cycle Power Plant Project at Lumut, Perak Darul Ridzwan, Marine Study, Data Collection and Hydrographic Survey" Submitted by MRCB Engineering - Lankhorst JV, Hydec Engineering Sdn Bhd in association with Dr Nik & Associates.