火力発電所における海水ポンプピットの 水理設計および現地計測

片岡秀樹1·森本俊輔1·森田知志2·山口高弘3·古川敦4

¹工修 (株)神戸製鋼所 鉄鋼部門 IPP本部(〒657-0863 兵庫県神戸市灘区灘浜東町2)
²正会員 工博 (株)熊谷組 土木本部 土木技術部(〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)
³正会員 工修 (株)熊谷組 土木本部 土木技術部(〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)
⁴(株)熊谷組 土木本部 土木技術部(〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

大容量の循環水ポンプを備える発電所取水ポンプピットの計画では、ポンプ運転に支障となる大規模渦 が発生しないように、ピット構造の水理特性に着目した検討が不可欠である.既に1号機が営業運転を開 始している神鋼神戸発電所の取水ポンプピットの計画においても、躯体の形状や効果的な整流工の配置に 関して数値シミュレーションや水理模型実験による検討がなされ、構造設計に反映された.また躯体完成 後の試運転時には流速分布を測定し、水理性能の検証を行った.本稿では同施設の水理設計および現地計 測について報告する.

キーワード:発電所,取水ポンプピット,整流工,現場計測,数値流体解析,水理模型実験

1. はじめに

(株)神戸製鋼所 神鋼神戸発電所(石炭火力発電所: 出力140万kW)の新設工事においては,冷却水取水 用海水ポンプピット施設の施工が2001年3月に完了 し,その後通水試運転を経て2002年4月より1号機 (出力70万kW)の営業運転が開始された.

同施設の計画にあたっては、送水能力16,000m³/h および57,700m³/hの大容量の循環水ポンプがそれぞ れ4基ずつ、合計8基が設置され、各ポンプの多様 な運転条件によってフローパターンが複雑に変化す ること、敷地の制約により躯体の構造・規模に従前 の設計例が適用しにくいことなどの課題があった. ポンプピット内水路の水理設計が不適切であるとポ ンプ吸込口直前で流れの分布に極端な偏りが生じて、 大規模な空気吸込渦や水中渦の発生を招くことがあ る.これらの渦の発生は騒音や振動の原因となり、 さらに悪化するとポンプの性能低下や破損を招くこ ともあり得るため、ポンプピット躯体各部の形状は 水理的な側面からも充分検討する必要がある.

本稿では、神鋼神戸発電所海水ポンプピットの、 躯体完成後の通水試運転時に実施したポンプピット 内流速分布の現場計測結果を中心に報告する.この 際、設計段階において実施した模型実験による水理 検討について概要を示すと共に現場計測条件に対応 づけて行った数値シミュレーション結果についても 併せて示し、計画時に目標とされた水理性能が実機 において実現していることを検証するものである.

2. ポンプピットの概要

神鋼神戸発電所 海水ポンプピットの外観を写真-1 に、概略構造を図-1に示す.外海からの海水は2本 の取水管(φ4.5m)によりポンプピット内に導かれ、 取水庭部に設置された導流壁方式の整流工により分 散・整流された後、隔壁で仕切られた6つの水路に 供給される.各水路の中間部には異物除去のための スクリーン装置が備えられ、最奥部には循環水ポン プが設置されている.現場計測を実施した時点にお いては、P1~P8の計8基のポンプのうち新設2号機 用のP7,P8のポンプは設置されておらず、したがっ



写真-1 ポンプピットの外観



図-1 ポンプピットの躯体形状

て現地計測ではP1~P4および新設1号機用のP5,P6 に対応した4つの水路を対象として,各水路の角落 し設置位置での流速分布の計測を行った.なお,P1 ~P4のポンプは発電所に隣接する製鉄所に附属する 既設発電所用の設備である.各ポンプの定格流量は 図-1中に示したとおりであるが,実際の運転流量に ついては発電所の稼働状況や保守作業などに応じて 個別に制御される.また,取水管についても保守作 業等を考慮して片側のみの使用ケースも想定されている.

ポンプピットの計画段階においては、ベルマウス から空洞を伴った渦を吸い込むことによって生じる ポンプの振動・破損が懸念され、防止策としてポン プ吸込口直前の水路内の横断方向への流速分布がで きるだけ均一であることが望まれる¹⁾. 流速分布の 均一性に関する評価基準としては、各水路内のポン プ吸込口直前での水路断面内において、水路センタ ーラインを挟んで左右の断面内での平均流速の比率

(偏心率)が大きくかけ離れていないこととし,具体的にはこの比率が40%~60%の範囲以内であることが水理検討の目安とされた.図-1中に示す取水庭部の導流壁や水路前面のカーテン壁は,上記の評価基準を満足するように水理模型実験^{2),3)}による検討結果に従って導入されたもので,本ポンプピットに特徴的な設備である.

表-1 流速計の仕様

表示器		センサー	
測定流速	$0\sim\pm 2m/s$	電極部	φ24mm 球形
測定方位	360度	本体構造	ステンレス製
電源	内蔵電池	耐圧水深	最大 50m
寸法	215*100*72mm	ケーブル長	標準 20m
質量	1.3kg	質量	2.0kg



写真-2 流速計センサー

3. 現場計測の方法

(1) 計測装置

流速の測定には、磁気コンパス内蔵の可搬型電磁 流速計を用いた.センサーをケーブルで水中に吊り 降ろして計測するタイプのもので、水平直交2軸方 向(X,Y方向)の流速値(Vx,Vy)と計測軸の方位角度 θ が計測できる.流速計の仕様を表-1に、センサーの 外観を写真-2に示す.

(2) 計測方法

a)計測位置およびポンプの運転条件

既設発電所用ポンプ(P1~P4)および新設1号機 用ポンプ(P5, P6)に対応した4水路での計測を行 った.計測する水路断面の位置は,安全性と流速計 のハンドリングを考慮して,図-2に示すように各水 路のスクリーンの上流側にある角落し設置位置とし た.各水路断面内の計測ポイントを図-3に示す.計 測ポイントは水路断面内に1.5m間隔で設定した正方 格子点とし,ポイント数は(P1+P2)および(P3+P4)水 路で各20ポイント,P5およびP6水路で各30ポイント とした.

計測時におけるポンプ運転流量の概数値および水面レベルの変動幅を図-2中に併せて示す.水面レベルには外海での潮位の影響により両振幅0.5m程度の半日周期変動が観測された.

b)計測手順

流速計には磁気コンパスが内蔵されており,流速 値とともに方位角度も計測できる仕様であるが,ポ ンプ駆動用の大型電動機などの影響でうまく計測で きない可能性があった.このため,今回の計測では 方位角度データに頼らない方法として,図-4に示す ように,ガイドロープによって流速計のX軸を水路 主軸方向に固定する方法を採用した.

流速計の据え付けと計測は以下の手順で行った.

- ①まずガイドロープを結びつけたシンカーを計測ポイント直下の水底に吊り降ろす。
- ②2本のガイドロープを操作してシンカーの角度や 位置を調整した後、ガイドロープがたるまないように防護柵に固縛する.
- ③流速計センサーのガイドアームをロープに取り付け、ケーブルを繰り出して所定の位置まで沈降させる.
- ④データの収録を開始する.

この方法によって,流速計はX軸が常に水路主軸 方向に一致した姿勢となり,流速データの方向角を 明確にすることができた.また,かなり乱れた水流 中にあっても流速計センサーの位置を安定した状態 に保つことができた.

データの収録時間は1ポイントあたり400秒(6.7 分)とし,0.8秒間隔で連続測定した500個の時系列 データをパソコンに収録した.また,データ収録中 の水位レベルは,取水庭に常設してある超音波式水 位計の表示値を読みとって記録した.

c) データ整理の方法

各々の計測ポイントで収録した時系列データから 時間平均流速値を算定した.この際には、潮位レベ ルによって変動する水深条件を補正するために、解 析上での平均水位レベル(W.L.)をK.P.+0.6mに設 定し、流速計測中に記録した実測水位との差を考慮 して、流速値の換算をおこなった.一方、ポンプ運 転流量に関しては、時間による変動幅は小さいもの として、特別な補正はおこなっていない.

4. 水理模型実験の概要^{2),3)}

ポンプピットの模型はフルードの相似則に基づく 寸法縮尺をS=1/21.5とし,耐水合板とアクリル材で 製作した.図-5に実験装置の状況を示す.水位一定 の外海の状況を再現するために鋼製水槽を配して, 槽内の水を2本の取水管により実験模型に流入させ る構造であり,循環水ポンプの模型として電動ポン プを接続した8本のサイフォン管を配置した.

流速の計測は、図-6に示すように、ポンプ吸込口 の直前に各々計8点の計測ポイントを設けて行い、 水路断面内の流速分布として整理した.



図-2 現場計測における流速分布の計測断面







図-4 ガイドロープを併用した流速計の吊り降ろし方法



図-5 実験模型とポンプ配管系の配置状況



(2) P5 水路, P6 水路の場合

図-6 模型実験における流速の測定位置



図-7 模型実験におけるポンプの流量条件

実験はポンプの運転パターン等を変化させた数多 くの条件で実施しているが、ここでは、導流壁やカ ーテン壁の設置を含め今回の計測条件に類似したケ ースの実験結果のみについて示す.実験条件を図-7 に示す.

なお,実験方法や一連の実験結果の詳細について は,文献2),3)を参照いただきたい.

5. 数値シミュレーションの概要と流況の算定 結果

(1) 数値シミュレーションの概要

ポンプピット全域での流況把握を目的として、躯体の形状を数値的にモデル化した3次元流体解析プログラムによる流速分布の計算を行った.なお使用した計算プログラムの制約により水面の変動状況については評価することができないため、計算では静水面下の流れの状況のみに着目した.数値モデルの概要を表-2に、躯体の基本形状を数値的にモデル化した例を図-8に示す.

ポンプの運転流量および水位レベルは,現場計測 の条件(図-2 参照)を勘案して,図-9のように設定 した.

計算結果は、次のように図化処理した.

①角落し部(現場計測位置)およびポンプ直近部(実験 での計測位置)における各水路断面内の流速分布図

表−2		
解析手法	有限体積法	
モデル	3次元直交格子	
	要素数 : 約 177 万 (格子間隔:0.25m)	
壁面応力条件	水面:フリースリップ	
	壁面:対数則	
乱流モデル	k — ε 方程式モデル	
その他	スクリーン位置の前面・背面の2面に開口率	
	0.8相当の圧力損失を設定	

図-8 ポンプピット躯体の数値モデル

-228-



図-9 数値シミュレーションにおけるポンプの流量条件

②KP+0.5m,KP-3.6m,KP-6.3mおよびKP-8.8mレベル における流れのベクトル図

(2) ポンプピット全域にわたる流況の算定結果

取水庭部を含む海水ポンプピット全域での流況特 性に関する数値シミュレーション結果を図-10と図-11に示す.これらの図は水平面内での流速ベクトル の分布を示すもので、図-10はK.P.+0.5m、図-11は K.P.-3.6mでの状況を表している.特徴は以下のよう に記述できる.

- 水表面近傍での状況を示す図-10においては、取水管からの噴流の直接的な影響が少ないことや、水路入り口に設けられたカーテン壁の影響により、大規模な循環流や逆流の発生がみられ、比較的乱れた流況が現れている。
- ・図-11では、2本の取水管からの噴流がはっきり と表れるようになり、激しい水流が取水庭内の導 流壁によって良好に分散されている状況がよくわ かる。
- ・数値シミュレーションでは、スクリーン装置による流体抵抗も試行的に考慮されており、この影響によってスクリーン下流での流速分布がかなり整流されているのがわかる。またスクリーン上流においては、カーテン壁の影響もあって、分布の激しい流況が現れている。

実際の流れの状況は、時間的な変動成分がかなり 大きいのに対して、ここに示した数値シミュレーシ ョン結果は、時間的に平均された大まかな状況を示 すものである.しかしながらこれらの図には導流壁 による水流の分散効果やスクリーンの整流効果など がよく表れており、海水ポンプピット全域の流況は 概ね把握できるものと思われる.



図-10 ポンプピット全域での流速ベクトルの分布 (K. P. +0. 5m: 水表面近傍レベル)



図-11 ポンプピット全域での流速ベクトルの分布 (K. P. -3. 6m:取水管中心レベル)

6. 各水路における流速分布の計測結果

各々の水路における角落し部およびポンプ吸込口 直前での水平方向への流速分布を図-12にまとめて 示す.図中には、今回の現場計測、数値シミュレー ションおよび模型実験結果が併せて表示してある. 各々の結果は、図-2、図-7および図-9に示したよう に、計測位置、ポンプ流量およびスクリーンの存在 といった前提条件が異なっている.こうした相違点 を考慮しながら比較することによって、以下の傾向 を読みとることができる.

・角落し設置位置での現場計測結果と数値シミュレ ーションによる計算結果は,(P1+P2)水路を除くと, よく一致しており,共に良好な流速分布特性を示 している.(P1+P2)水路においては,ポンプの運転 条件がP2を停止させた小流量での片肺状態である 上に,水路の形状が比較的複雑であることから,



図-12 現場計測、数値シミュレーションおよび実験結果の比較

計算での算定誤差が顕在化したものと考えられる. 7

・ポンプ吸込口直前においては、数値シミュレーションと模型実験のポンプ流量条件などが異なるため単純な比較はできないものの、(P1+P2)水路を含めていずれの水路においても良好な流速分布特性を示しているものといえる.特に、スクリーンの流体抵抗を考慮した数値シミュレーションの結果の方が、スクリーンを無視した実験結果よりもより均一な流速分布となっており、スクリーンによる整流効果が大きく現れた結果となっている.なお、今回の数値シミュレーションではスクリーンの流体係数は試行的に取り入れたものであり、実際の特性に必ずしも合致したものではないことを付記しておく.

今回の現場計測においては安全上の制約により角 落し設置部での測定を行ったが、上述した状況を勘 案すると、ポンプ吸込口直前での流速分布は、現実 的にも少なからず期待できるスクリーンの整流効果 によって、測定位置よりも良好な分布特性を示して いるものと推測され、吸込口直前での流速分布に関 しても当初設定した判定基準を十分満足しているも のと判断される.

7.まとめ

海水ポンプピットの現場流速測定を実施し,数値 シミュレーション結果や施設の設計段階に行った水 理実験結果との対応を含めて,ピット内の流速分布 特性について整理・検討を行った.各水路内の流速 分布についてはスクリーンの整流効果を考慮すると、 ばらつきの少ない良好な分布特性が得られているも のと推測され,本海水ポンプピットは水理的にみて も当初計画どおりの満足できる特性を備えているも のと結論づけられる.

神鋼神戸発電所では1号機につづき,2号機の営 業運転が2004年4月に開始される計画である。その 試運転時には今回と同様の現場計測を,今度はポン プピットの全開運転下で実施することにしている. 良好な結果を期待したい.

参考文献

- (社)日本機械学会,日本機械学会基準 ポンプの吸込水 槽の模型試験法,pp.1~35,1986.
- 片岡秀樹,森本俊輔,古川 敦,飯田正克:火力発電 所取水ポンプピット内での整流構造に関する模型実験, 電力土木,(社)電力土木技術協会,No.285, pp.95~99, 2000.
- 3)飯田正克,八朝秀晃,森田知志,古川 敦:火力発電 所取水ポンプピット内での整流構造に関する模型実験, 熊谷組技術研究報告,第60号, pp.91~100, 2001.