

# 情報化施工技術を用いた異型ケーソンの据付とその応用について

## CAISSON INSTALLATION WORK WITH INFORMATION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION

大熊義夫<sup>1</sup>・古川園健朗<sup>2</sup>・中山晋一<sup>3</sup>・真鍋匠<sup>4</sup>  
Yoshio OKUMA, Kenro FURUKAWAZONO, Shinichi NAKAYAMA,  
and Takumi MANABE

<sup>1</sup>東京電力株式会社 東通原子力建設準備事務所 (〒039-4223 青森県東通村小田野沢2-303)

<sup>2</sup>正会員 工修 東京電力株式会社 東通原子力建設準備事務所 (同上)

<sup>3</sup>正会員 工修 五洋建設株式会社 東通原子力工事事務所 (〒039-4223 青森県東通村小田野沢55-2)

<sup>4</sup>五洋建設株式会社 土木本部機械部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

For the construction of the nuclear power plant of Tokyo Electric Power Co., Ltd. at Higashidori, Aomori Prefecture, the installation of totaling seven (7) numbers of caissons for the revetment of its water outfall needed to be executed during the winter season from January 2008 to March 2008.

Such installation work was faced with the following two main difficulties. One of them was towing the caissons for a distance of 36 km from a temporary yard to the construction site over ten (10) hours in the rough sea due to strong seasonal wind. The other was a risk of the caisson's being swamped by seawater coming through the culvert specifically provided on the caissons for discharging water. In order to overcome these difficulties, UCIS was employed to achieve remote control of the towing operation in a way that stability monitoring of towed caissons and draining seawater from caissons in case of flood can be handled from an accompanying workboat. With UCIS, the safety during the towing operation was secured without any watch man on board the caissons. In addition, UCIS was applied to the caisson installation succeeding to the towing operation and sufficient improvement of efficiency was achieved in positioning the caissons and filling sand into them.

**Key Words :** Caisson installation work, Information technology

### 1. はじめに

東京電力(株)は、青森県下北郡東通村に原子力発電所(1号機出力:138.5万kW ABWR, 敷地面積:約450万m<sup>2</sup>)を新設することを計画しており、平成18年12月よりその準備工事に着手し、平成19年3月より、工期約6年の計画で港湾工事を開始した。(図-1参照)

本稿で述べる放水口ケーソン工事は、この準備工事の一環として実施される港湾工事のうち、外郭防波堤の一部となる放水口護岸を構築するためのものであり、発電所運転開始後の温排水(冷却水量92m<sup>3</sup>/s/基)の放水口として供用される有孔ケーソン4函を含む全7函のケーソンを据え付けるものである。(図-2参照)

本工事では、施工対象となるケーソンが、建設コスト削減のため採用された異形の堤体(半没水型上部斜面堤)であり、加えて、放水口となる通水路(曳航時は仮設止水蓋にて閉塞)が存在する構造

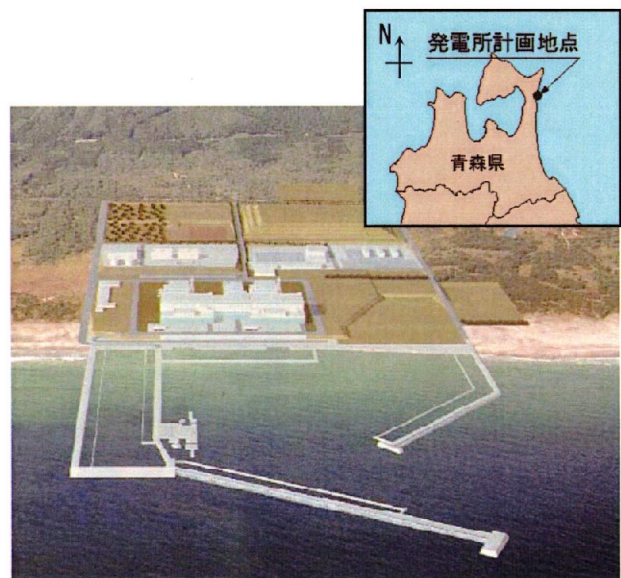


図-1 東京電力東通原子力発電所完成予想図

的な特徴があること。また、36km 離れたむつ小川原港から、風速 10m/s 程度の風浪環境下に約 10 時間をかけてケーソンを曳航する必要があるなどの施工条件により、通水路部ならびに隔室内部への曳航中の浸水リスクが予想された。さらに、ケーソン据付においては、周辺環境が良好な水産資源を有する環境下であることから、通常のケーソン据付よりも環境に配慮した施工品質を確保することが求められた。そこでケーソンの曳航・据付・中詰投入までの一連の工事に際して、以下に述べる情報化施工技術を適用し、安全・環境・品質面での向上を図った。

## 2. 工事概要

### (1) 港湾工事概要

東京電力東通原子力発電所専用港湾は、沿岸方向 700m、岸沖方向 700m の規模で新たに建設するものである。外郭防波堤は、総延長約 1,600m で、消波ブロック被覆捨石式傾斜堤を基本構造とした。また、放水口護岸は、南防波堤の沖合、水深－9.0m に位置しており、全 7 函のケーソン（約 150m）で構築した。また、港内に物揚場施設（総延長：約 650m）、敷地護岸（総延長：約 400m）を建設する計画である。

図-2 に港湾施設平面位置図を示す。

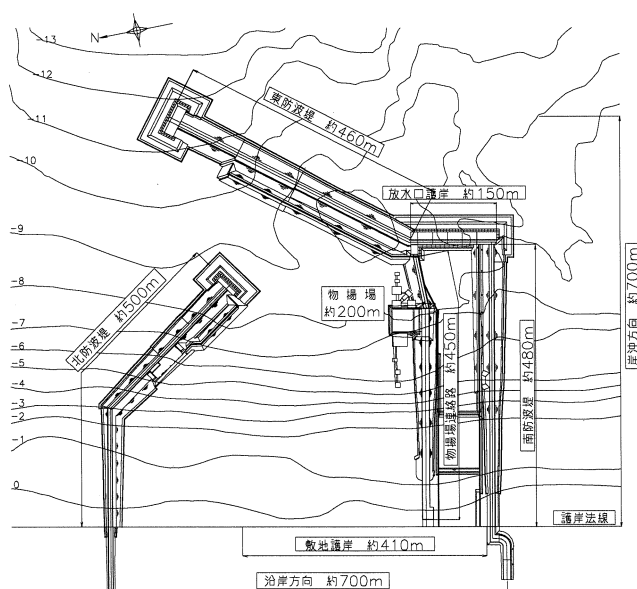


図-2 港湾施設平面位置図

### (2) 放水口護岸の構造

東京電力東通原子力発電所専用港湾の放水口護岸の断面構造には、建設コスト削減を図るための新形式防波堤（半没水型上部斜面堤）を採用した。本構造は、堤外側の堤体面上部を斜面にすることで作用波力のエネルギーを逸散させて波力を低減できること、また、水平波力作用時に鉛直下向きの力を得ることができるため、ケーソン断面の縮小による建設

コスト削減が可能となる。

なお、温排水通水路は、放水される温排水が周辺海水との連行冷却効果が高まるよう、水深－4.5m で流速 4.0m/s を確保するものとし、ケーソン底版厚を変化させ、漸縮する断面構造を採用した。

図-3 に放水口護岸の断面図を示す。

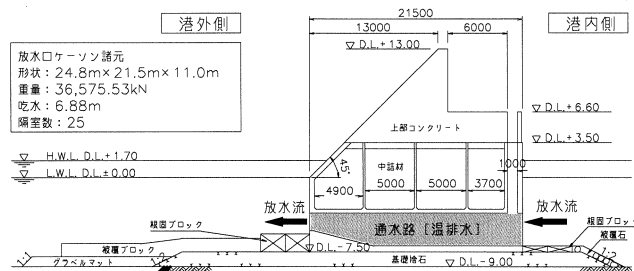


図-3 放水口護岸断面図

### (3) 放水口護岸の施工条件とリスク

本工事海域は、港湾供用係数「8」に相当する国内有数の高波浪海域であり、通常施工の場合でも、施工安全リスクに配慮が必要である。特に、有孔ケーソンの場合は、浮上時の安定性と据付に必要な吃水を確保するため、ケーソン進水、仮置、再浮上等の一連の工程において注排水を繰り返す必要があり、“仮設止水蓋の締付けボルトの緩み”や“止水パッキンの損傷”等による止水機能の低下から曳航時の被災リスクが予想された。

一方、周辺海域は磯漁やヒラメ、サケ漁などの良好な漁場であり、水産資源保全の面でも配慮が必要な海域でもあることから、ケーソン据付時の中詰材投入に伴う余剰水の排水による海域汚濁リスクも想定された。

このため、放水口護岸の施工に際しては、通常のケーソン据付よりも高度な技術と安全および環境対策が必要と判断し、UCIS（ケーソン無人化据付システム）<sup>1)</sup>を用いた情報化施工工法を活用することを計画した。

UCIS は、高波浪地域におけるケーソン据付作業の効率化ならびに作業安全性の向上を目的として開発され、宮崎県細島港沖防波堤（2005 年）など外洋に面した波浪条件の厳しい海域における施工実績を有する。また、同技術は 2006 年に沿岸技術研究センターより港湾関連民間技術の確認審査・評価事業にて評価証を受け、2007 年 7 月には国土技術開発賞を受賞した工法である。

## 3. UCIS を用いたケーソンの曳航管理

### (1) ケーソン曳航時のリスク評価

ケーソン曳航時の被災モードは、止水蓋の機能低下による通水路への浸水の発生、その後、ケーソン吃水の増加、さらにはケーソンの傾斜に伴う乾舷の

減少によるケーソン天端までの波浪遡上という一連の現象が予想された。ケーソン天端には鋼製の曳航蓋が設置されているものの、構造的には水密構造でなく、仮に遡上した水塊が隔室内に浸入すると、ケーソンが曳航不能状態に陥るとともに最悪の場合には、沈没するリスクも想定された。

具体的なリスクとしては、以下に示すケーソンの浮体安定性を評価した。

#### a) 浮体としての安定性

ケーソン浮遊時の安定性は(1)式により判定する。

$$I/V - CG = GM \geq 0.05 D_f \quad (1)$$

ここに、

$V$ ；排水容積 (m<sup>3</sup>)

$I$ ；吃水面の長軸に対する断面 2 次モーメント (m<sup>4</sup>)

$CG$ ；浮心  $C$  と重心  $G$  間の距離 (m)

$GM$ ；傾心  $M$  と重心  $G$  間の距離 (m)

$D_f$ ；ケーソン喫水 (m)

#### b) ケーソン天端への波の遡上の有無

曳航中のケーソンに対して来襲する波浪は、ケーソン壁にぶつかり壁面を遡上する。当該ケーソンは前壁上部が斜面形状になっていることから、波浪の遡上高は(2)式<sup>2)</sup>により算定する。図-4 に遡上高の概念図を示す。

$$R = 2.0 \times H \quad (2)$$

ここに、

$R$ ：斜面壁を考慮した波浪の遡上高 (m)

$H$ ：来襲波浪の有義波高 (m)

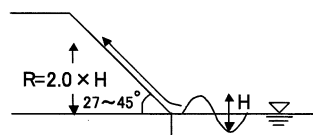


図-4 波浪遡上高の概念

図-5 に浸水によりケーソンが傾き曳航不能となる場合の概念を示す。また、表-1 に浸水状態ごとのケーソン浮体安定計算結果を示す。

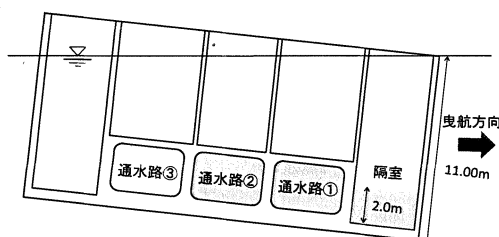


図-5 浸水により曳航不能となった場合のケーソン  
表-1 に示すように、通水路①および②に浸水し

た状態においてケーソンの吃水高は 9.47m となる。今回の曳航時においては、ケーソンの浮心を支点に曳航するため、曳航時の函体潜行量は吃水高と同一量程度と判断され、ケーソンの函体乾舷量は 1.53m (=11.0m-9.47m) と評価された。

一方、曳航中の来襲波浪別のケーソンに対する波浪の遡上高  $R$  は、表-2 に示す結果となる。施工計画では曳船の能力を勘案し、曳航時限界波高を  $H=0.8m$  として設定しているが、曳航時の波高が  $H=0.7m$  以上においては、ケーソン天端まで波が遡上する可能性が高くなり、函体乾舷量を越えることで、曳航蓋周辺からもケーソン隔室内に浸水するリスクが高まるものと評価された。

さらにケーソン隔室内が浸水し、底板天端から水位  $h=2.0m$  (水量 129m<sup>3</sup>) となった場合 (図-5 に示す状態) には、吃水がケーソン天端まで達し、この段階で浮遊時の安定性が保てず、ケーソンの曳航不能・水没状態に至ると予想された。

表-1 浸水状態ごとのケーソン浮体安定

| 項目        | 記号                        | 通常状態               | 通水路①②浸水  | 通水路①②および隔室内 2m 浸水 |
|-----------|---------------------------|--------------------|----------|-------------------|
| ケーソン形状    | $L \times B \times H$ (m) | 24.8 × 21.5 × 11.0 |          |                   |
| ケーソン重量    | $W_c$ (kN)                | 37057              |          |                   |
| ケーソン内水重量  | $W_w$ (kN)                | 0                  | 5818     | 7121              |
| 重心        | $G$ (m)                   | 4.06               | 4.54     | 4.45              |
| 吃水        | $D_f$ (m)                 | 6.88               | (*) 9.47 | 11.00             |
| 浮心        | $C$ (m)                   | 3.44               | 3.98     | 4.10              |
| 排水量       | $V$ (m <sup>3</sup> )     | 3669               | 4245     | 4374              |
| 断面2次モーメント | $I$ (m <sup>4</sup> )     | 20539              | 19246    | 一部没水              |
| 傾心        | $L/V$ (m)                 | 5.60               | 4.53     | 一部没水              |
| 傾心高       | $GM=L/V-CG$               | OK                 | OK       | NG                |

表-2 来襲波浪別ケーソン浸水リスク評価

| 通水路①②浸水の場合 [R=2.0×H] |        |                            |          |
|----------------------|--------|----------------------------|----------|
| H                    | R(遡上高) | ケーソン乾舷量                    | 浸水リスク(*) |
| 0.5m                 | 1.00m  | 1.53m<br>(*) (=11.00-9.47) | 小        |
| 0.6m                 | 1.20m  |                            | 中        |
| 0.7m                 | 1.40m  |                            | 高        |
| 0.8m                 | 1.60m  |                            | 高        |

(※) 来襲波浪がケーソン天端まで遡上するリスク [遡上高 > 乾舷量: リスク高]

#### (2) UCIS を用いたケーソン曳航管理

本工事では、UCIS の持つ隔室内水位の遠隔監視ならびに自動注排水ポンプ機能を適用し、上述のケーソン曳航時のリスクを低減することを試みた。(関連内容にて特許出願中<sup>3)</sup>)

図-6 にシステムの構成図を示す。システムは、水位センサー、データロガー、無線LANからなる計測部と発電機を始動し排水ポンプを作動させる PLC、リレーおよび無線LAN等からなる無線制御部を組み合わせたケーソン上の設備ならびにケーソンに伴走する作業船上に設置された遠隔監視操作室により構成される。その主な機能について以下に示す。

### a) 浸水監視

曳航中のケーソン隔室内の浸水を監視するための水位センサー（17本）をケーソン隔室内（25室）に設置する。計測したデータをデータロガーでキャニングして、無線により伴走する作業船上操作室に伝送し、パソコン画面に表示する。

### b) 遠隔操作による排水

漏水による貯水量が予め設定した量以上溜まった場合、遠隔監視操作室内のパソコンがアラーム音を発し、監視員に知らせる。さらに、アラーム音が会話用無線機で送信され、無線制御盤内の音感センサーが反応して発電機が始動し、浸水箇所に該当する排水ポンプ（8吋：計6台）が作動する。また、排水が終了すると水位センサーの計測値がゼロとなり、PLCからの指令により排水ポンプが停止する。

図-7に遠隔監視ならびに自動注排水機能のフローを、また、図-8にシステム関連機器の配置図を示す。本システムの適用により、ケーソンの曳航が長時間に及ぶ場合や夜間の場合、さらには、風浪の影響によりケーソンの動揺が大きい場合にも、ケーソン上に人間が搭乗する必要がなくなることから、安全に浸水監視および排水し、曳航時のリスク回避を図ることが可能となった。また、表-3にケーソン曳航時の気象海象状況ならびに曳航時間等を示す。実際の曳航に関しては、浸水することも無く、無事に完了することができた。

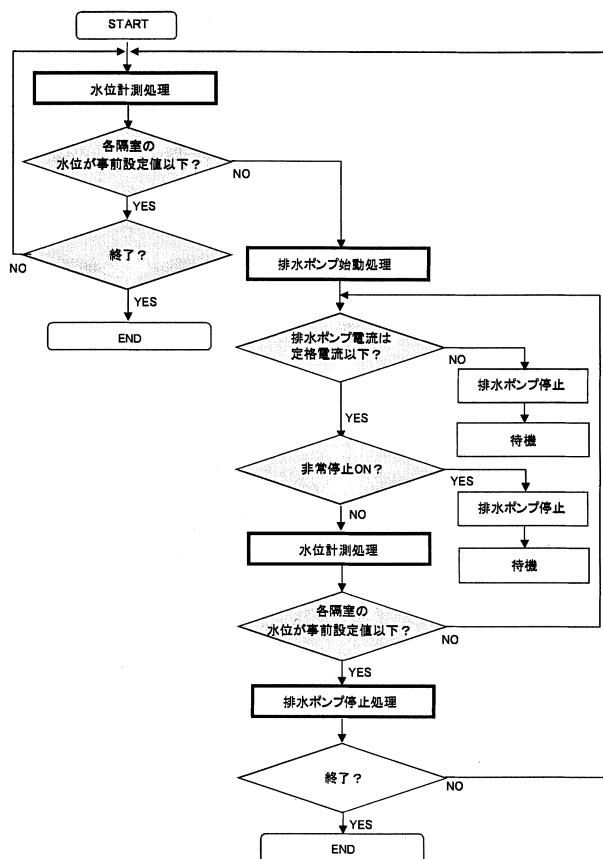


図-7 システムの処理フロー図

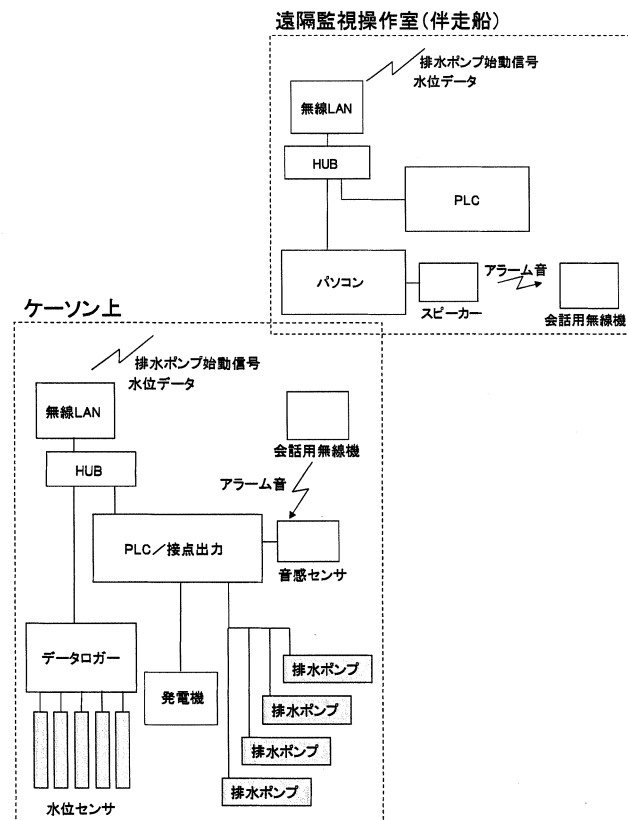


図-6 システムの構成図

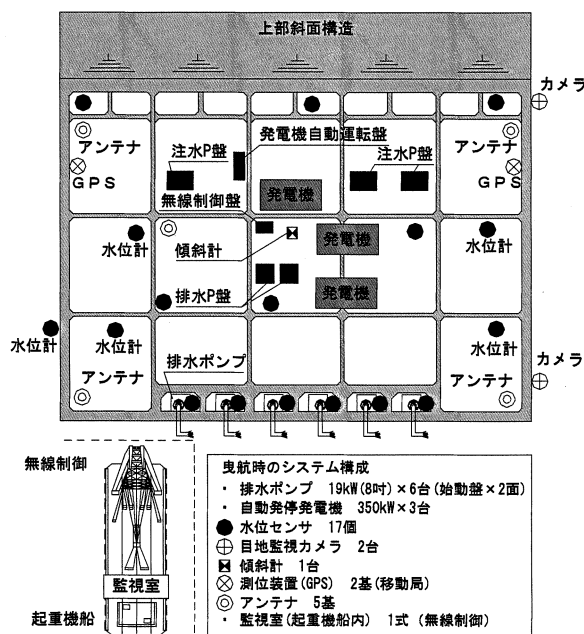


図-8 システム関連機器配置図

表-3 ケーソンの曳航時間との気象海象条件

| 名称   | 曳航日     | 曳航時間  | 天候 | 風速   | 風向  | 波高    | 周期    | 浸水 |
|------|---------|-------|----|------|-----|-------|-------|----|
| 有孔図① | 08/1/28 | 10.0h | 曇り | 3m/s | WSW | 0.38m | 9.8s  | 無  |
| 有孔図② | 08/2/15 | 10.5h | 晴れ | 3m/s | W   | 0.41m | 4.7s  | 無  |
| 有孔図③ | 08/2/20 | 14.5h | 晴れ | 3m/s | W   | 0.78m | 10.6s | 無  |
| 有孔図④ | 08/2/29 | 10.0h | 晴れ | 5m/s | SW  | 0.42m | 6.6s  | 無  |

#### 4. UCIS を用いたケーソン据付管理

本工事では、有孔ケーソンの曳航後に行われた据付作業においても、引き続き UCIS を適用した施工を実施した。本来、UCIS はケーソン据付の支援を目的として開発されたものであり、注排水ポンプだけでなく据付ウインチの遠隔操作を含む完全無人化に対応することが可能である。ただし、本工事では、現地での施工条件を勘案し、GPS3 基、目地監視カメラ 2 台に、曳航時の水位センサー、注排水ポンプの遠隔操作機能のみを用いることとした。

図-9 に据付作業に適用したシステムの基幹技術の詳細、また、図-10 にシステムのモデル図を示す。

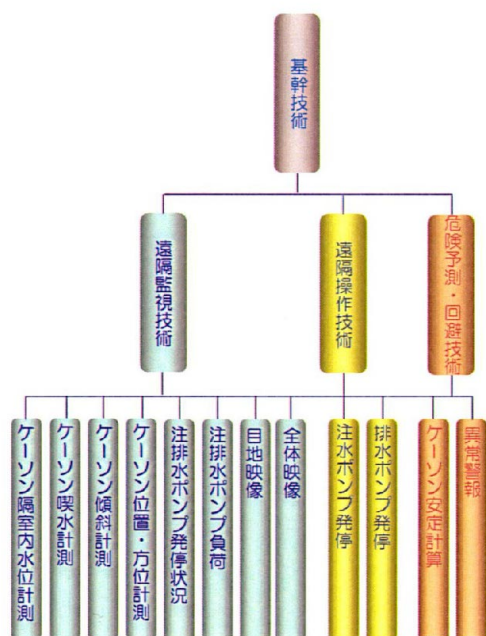


図-9 本工事に適用した UCIS の基幹技術

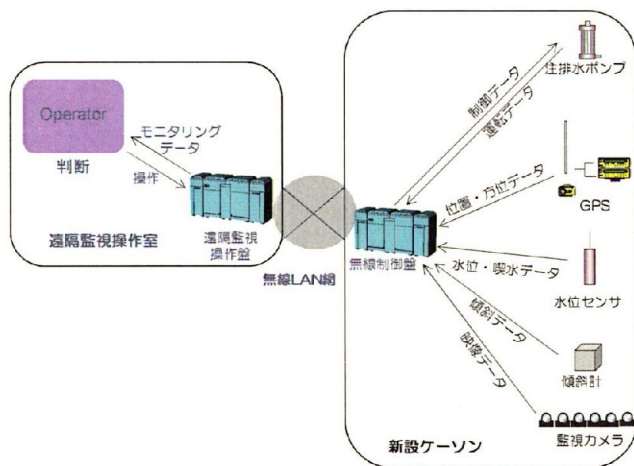


図-10 システムのモデル図

据付作業に際して、すべての作業を人力により実施した場合、注排水ポンプ操作等を含めケーソン

上の作業員は約 15 名必要と考えられた。しかし、UCIS の持つ遠隔監視機能を用いることで据付作業に必要な情報がリアルタイムに確認可能となり、作業合図や目地緩衝材設置のための必要最低限人数である 5 名に削減できた。さらに、一連の据付作業の判断が正確かつ一元的に実施でき、作業の効率化が達成された。この結果、高い据付精度（法線出入り：管理値 $\pm 300$  に対し実測値 $-25\text{mm}\sim+105\text{mm}$ ）も確保され、改めて UCIS の適用性の高さを確認した。

図-11.1.2 にケーソン据付時の状況を示す。



図-11.1 ケーソン据付状況（監視室での誘導状況）



図-11.2 ケーソン据付状況（着底完了）

## 5. UCIS を用いたケーソン中詰排水管理

東通原子力発電所港湾工事においては、サイト近傍海域が良好な漁場であることから、環境への影響を低減することが不可欠となっている。特に、ケーソンの据付作業においては中詰材投入時の余剰水による濁りが発生することが多く、本工事においてもこれらを低減するための施工的な工夫が必要となった。このため、前工程と同様に UCIS を利用し、中詰材投入時に隔室内水位ならびに濁度をリアルタイムに計測することで、排水量および周辺海域への濁度拡散を防止した。

図-12 に中詰・排水管理方法を示す。具体的には、  
STEP①：ケーソン着底時に必要最低限の注水をする。  
STEP②：ケーソン隔壁間の通水孔を特殊治具にて閉塞し、各隔壁部を独立した構造にする。また、水位

調整用隔室部となる『A』を確保した上で、その他の隔室から『濁りのない余剰水』を1次排水する。STEP③：排水を実施した隔室に中詰材を1次投入し、ケーソン中詰材の締固めにおいて最低限必要な水位を維持し、その上で『A』から隔壁によって隔離された濁りのない余剰水を2次排水する。STEP④：全隔室内に中詰材の2次投入を行い、中詰投入を完了する。この際、排水の必要はなく濁りは発生しない。

今回の中詰排水管理は、隔壁に作用する水圧が設計条件を超えない範囲内で、かつ函体の着底に必要な最小重量を維持しつつ、濁りのない水を排水していくため、隔室間の水位差を正確かつ迅速に管理する必要があったが、UCIS の持つ隔室内水位の遠隔監視ならびに自動排水ポンプ機能を有効活用することで、安全かつ円滑に施工することができた。

図-13 の濁度監視状況を示す。実際の余剰水排水に関しては、汚濁防止膜内外で濁度監視および測定を実施し、周辺環境の透明度と同程度の透明度であることを確認し、余剰水による濁度拡散を確実に防止できた。

## 6. おわりに

ケーソンの曳航・据付・中詰排水管理の一連の作業において、UCIS を用いた情報化施工を実施し、各施工段階で以下に示す主な成果を得た。

### a) ケーソン曳航管理について

通水路部からの浸水リスクが想定されたが、遠隔操作・監視機能を適用し、曳航時のリスク評価を踏まえた安全かつ確実な施工が実施できた。

### b) ケーソン据付管理について

注排水ポンプの自動発停止等の遠隔操作を有効に活用し、安全かつ高い据付精度を確保した施工が実施できた。

### c) ケーソン中詰排水管理について

排水ポンプの遠隔操作機能を適用することで、隔室内水位をリアルタイムに観測し、排水量を管理した。その結果、中詰材投入時に発生する余剰水の濁度を全く発生させず、周辺漁協関係者を含め高い評価を得た。

謝辞：最後に本工法の適用にあたり、施工を実施した東通原子力発電所1号機新設工事港湾第1工区共同企業体の関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 真鍋匠：Development of Unmanned Caisson Installation System(UCIS) ISARC (国際建設ロボットシンポジウム) 2006 発表論文集, pp62～65.
- 2) 実際に役立つ港湾の計算例、山海堂(土木施工設計計算例委員会編) 1975 年, pp89～98.
- 3) 特願 2008-157764, 開口付き中空コンクリートケーソンの曳航時安全制御装置(出願中)

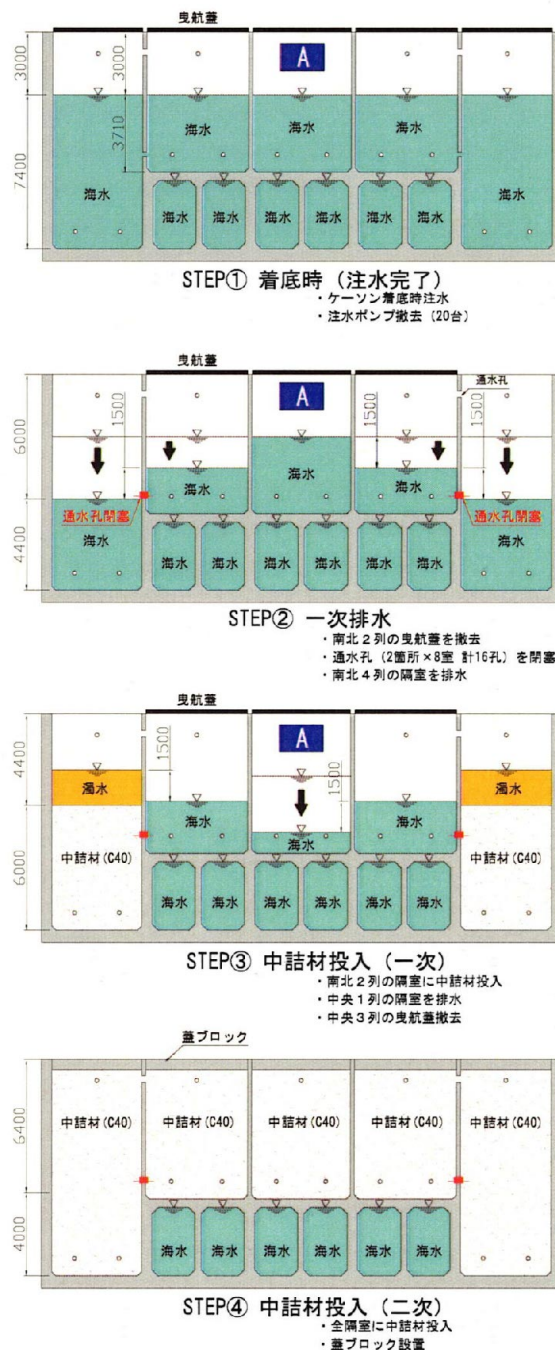


図-12 中詰・排水管理方法



図-13 濁度監視状況