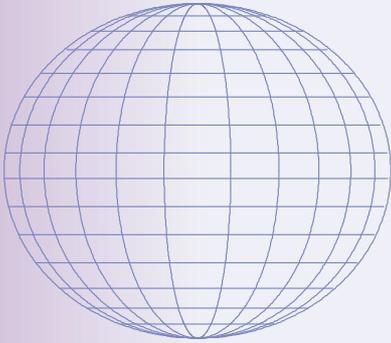


台湾龍門(核四)原子力発電所放水口立坑の設計施工

世界初の水中施工による海底鋼管矢板井筒立坑



新原雄二

NIIHARA Yuji

正会員 鹿島建設(株) 台湾龍門出張所 設計課長代理

相河清実

AIKAWA Kiyomi

正会員 鹿島建設(株) 土木設計本部 担当部長



図-1 龍門(核四)原子力発電所位置図

日本に最も近い台湾本島の最東端にて

台北から東へ 30 km、台湾本島の最東端に三貂角 (San Diao Jiao) という岬がある。ここはかつて 17 世紀前半に台湾北部を占領したスペイン人が最初に上陸したところであり、その景色の美しさからキリスト教の聖地の名をとってサンティアゴと名づけた場所である。この三貂角の北側には、白い砂浜が約 3 km にわたって続く鹽寮 (Yen Liao) 海岸がある。夏になると、台北方面からの観光客で海岸沿いの国道は大渋滞となる場所でもある (図-1)。

この鹽寮海岸、日本との関わりも深い。1894 年、日清戦争に勝利した日本は、下関講和条約により台湾を清国より割譲させた。台湾制圧の命を受けた近衛師団が、清国の残党の抵抗が予想される基隆や淡水を避け、最初の上陸地点に選んだのがこの鹽寮海岸であった。1895 年 5 月 31 日のことである。この日から、約 50 年に及ぶ日本の台湾植民地支配が始まった。戦前、この海岸には上陸を記念した「北白川宮御上陸記念碑」が建てられた。

今、この鹽寮海岸において進められているのが、台湾におけるビッグプロジェクトの一つ、龍門(核四)原子力発電所建設工事である。

龍門(核四)原発プロジェクトの経緯

龍門(核四)原子力発電所建設は、台湾の将来の電力不足に対応するため、台湾電力会社が台湾東部の台北縣貢

寮郷 (Gong Liao Xiang) に、出力 135 万 kW の改良型沸騰水型原子炉 (ABWR) 2 基を建設するものである。

龍門原発の名称には、(核四)という言葉が入る。これは、台湾で 4 番目の原子力発電所という意味である。過去 3 か所の原子力発電所はいずれも戒嚴令下で建設されたものであり、建設に際しての住民の反発も少なかった。しかし、この核四は民主化後の台湾における最初の原子力発電所建設であり、そのために核四に対する一般市民の関心は高く、着工に至るまでにはさまざまな紆余曲折があった。

台湾電力会社は 1996 年 5 月に、米国 GE 社と龍門原発建設の主契約を締結、1999 年 3 月に台湾原子能委員会が同建設計画を承認、2004 年 1 号機、2005 年 2 号機の運転開始を目指して着工された。しかし、反原発を公約に掲げる民進党の陳水扁氏が 2000 年 3 月の總統選挙に勝利すると、建設計画の見直しに着手、同年 10 月に行政院が建設中止を発表した。このことは、「脱原発」という世界的な流れに沿うもので諸外国の関心を集める一方、台湾国内では当時すでに 30% も進捗していた建設費の問題、陳水扁總統就任後の台湾株式市場の暴落、立法院で多数を占める原発推進派の国民党の猛反発など、政局は混迷をきわめ、陳水扁總統の罷免運動にまで発展した。かくして、行政院は将来の脱原発を条件に、2001 年 2 月、龍門原発の建設再開を決定した。



図-2 龍門（核四）原子力発電所平面図

表-1 工事概要

| | | |
|---------|---------------------------|--------------------------|
| 工事名 | 龍門（核四）計畫循環冷却水出水道工程 | |
| 発注者 | 台湾電力公司 | |
| コンサルタント | 中興工程顧問股份有限公司 | |
| 施工者 | 榮民工程，鹿島，大豊聯合承攬 | |
| 工事場所 | 中華民國台湾省台北縣貢寮鄉仁里村研梅街 | |
| 工期 | 2001（平成13）.4～2005（平成17）.1 | |
| 工事内容 | 陸上出発立坑 | 20 m×H 53 m@2 基 |
| | 陸上連接暗渠 | - 4.25 m×4.2 m×90 m |
| | 放水路トンネル | 8.3 m×L 1 333.3 m |
| | | 8.3 m×L 1 336.7 m |
| | | （掘削外径 8.3 m，仕上り内径 6.7 m） |
| | 海上到達立坑 | 20 m×H 26.3 m@2 基 |
| | マルチノズル放水口 | 460 t@2 基 |
| | 保護ブロック | 30 t@1 500 個 |

海上放水口工事の入札と設計変更

工事概要と海上立坑の原設計案

龍門原発プロジェクトのうち、われわれが施工したのは原子炉からの温排水を海岸線から約 700 m 沖合いの海中に放流する放水路および放水口を 2 系統建設する工事であり、陸上部のシールド機発進立坑、シールド工法による放水路およびシールド機の到達立坑を兼ねる海上放水口の三つの構造物から構成される（図-2，表-1）。

設置海域は外洋に面し水深 11 m，設計波高 10.5 m，波周期 16 秒の碎波帯で，施工可能期間は 4～9 月の 6 か月，連続静穏期間は 4～6 月の 3 か月である。海中に建設される放水口立坑は，ニューマチックケーソン工法により計画され，海面下 48 m までケーソンを沈設した後，井筒内に S 字型放水管を設置，杭基礎で支持された長さ約 55 m の直管型放水管 2 本を海底部に設置する計画である（図-3）。

放水路工事の入札

本プロジェクトは国際競争入札であり，技術力と価格の両面から施工者が評価決定される。応札企業は実績のある企業ばかりであるため，入札価格が成否を決定するといっても過言ではない。厳しい価格競争を勝ち抜くため詳細な施工

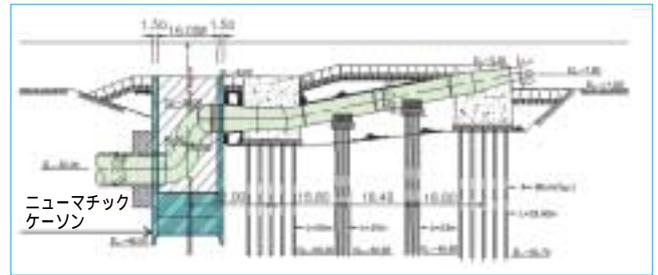


図-3 ニューマチックケーソン工法による海上立坑原案

検討を実施した。検討の結果，外海に面し，台風や季節風の直撃を受ける碎波帯海域にニューマチックケーソンを沈設して立坑を造ることはきわめて困難であり，厳しい施工工程を考慮した場合，実質的には不可能であると結論づけた。しかし，入札時の代案提案は認められていなかったため，次善の策として急速施工の可能な鋼製作業台をケーソンの外周に施工し，台風や季節風による荒天時のケーソンの安定性を確保する施工方案を考案し入札した。2001 年 4 月の入札の結果，台湾の榮民工程，日本の鹿島，大豊建設の 3 社 JV が落札した。

海底鋼管矢板井筒立坑の検討

入札に先立ち，施工可能な代案検討は入札条件である原設計の施工検討と並行して実施した。工事入手後の大規模な設計変更が認められた事例のない台湾において，代案が採用される可能性は不透明なものであった。しかし，立坑施工海域は連続静穏期間が 4～6 月の 3 か月間に限定されるため，現場での工事が主体となる原案（ニューマチックケーソン案）での施工の困難さがはっきりする中で，施工可能な代案検討の成否が本プロジェクトの入札に踏み切るか否かを決定する最大のポイントと位置づけ，以下の ～ を基本方針として海底鋼管矢板井筒立坑の代案コンセプトを取りまとめた（図-4）。

台風，季節風による巨大な波力をまともに受けないように，施工海域での施工に水中施工を取り入れる。

海底面下 26 m の掘削のため，円形に鋼管矢板を打設し土留めとする。土留め支保工は陸上製作した円形支保工とし，後工程の施工性を確保する。

現場海域での施工を最小限とするため，立坑構造は水中鉄骨コンクリート構造とする。鉄骨と J 字型放水管は工場にて一体モジュール化し（以下，J 管モジュール），現場海域に海上運搬し，一括据え付ける。

水中コンクリートは品質と海域環境に配慮し，水中不分離性コンクリートを連続打設する。

この代案は，工事を実施する施工業者ばかりでなく，工事を発注する台湾電力，工事を管理するコンサルタントにとってもプラス面が多く，入札時の前提条件以外には代案承

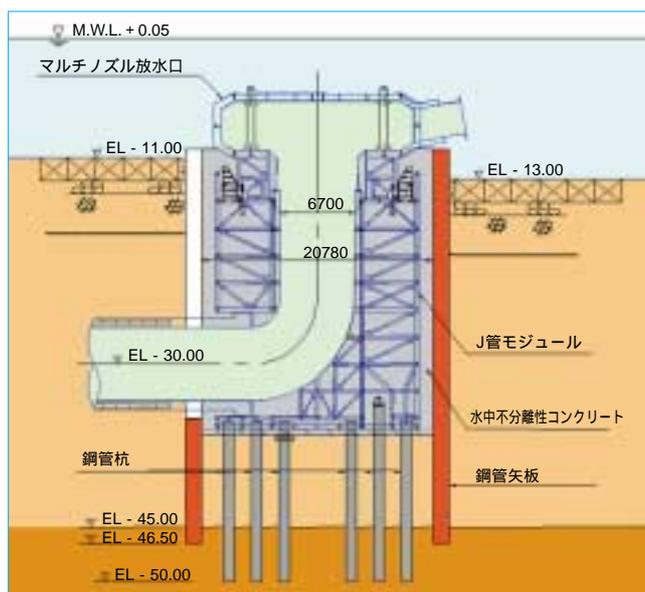


図-4 海底鋼管矢板井筒立坑

認の障害となるものはないと判断し入札に踏み切った。

代案の提案と承認

本工事の契約では、原設計よりもコストが上回らない条件で設計変更（FCR：Field Change Request）が認められている。しかし、FCRとして取り扱われる設計変更は、大がかりな変更を想定した仕組みではなく、代案承認の見込みは不透明な状況であった。原案の設計者であるコンサルタントからは原設計の施工の困難さは認めていただいたものの、原案であるニューマチックケーソン案と同等以上の構造強度、安定性、長期耐久性等の明示を求められた。JVはこれらの指摘に誠実に追加検討を実施し、原案のリスクと代案のメリットを明確に示すことによりコンサルタントの理解を得ることができたが、引き続き台湾電力の承認を得る必要があった。これには、台湾電力が抱えるPA（Public Acceptance：住民の同意）と建設費縮減への取組みが代案承認の追い風となった。放水口の原案は、温排水を放流する水理的な観点からは優れた設計であったが、施工中の海域環境への負荷が大きく、台湾電力は現場海域での施工を必要最小限とすることを求められていた。このことが、台湾電力が検討中の放水口形状の見直しと同時に、立坑構造の代案提案をFCRとして取り扱うことを認める動機となったと思われる。

このようにして、これまでに例のない『海底鋼管矢板井筒立坑』が承認された。

海底鋼管矢板井筒立坑の構造

『海底鋼管矢板井筒立坑』は、水深11mの海底に鋼管矢板（1500）を円形に打設し、内部を水深37mまで掘削し、掘削底面に支持杭を打設した後、J管モジュールを大型起重機船で設置し、井筒内部に水中不分離性コンクリートを打設して海上立坑を構築する。その後、J管上にマルチノ

ズル放水口を設置して根固めコンクリート（水中不分離性コンクリート）を打設し、シールド機到達部分の鋼管矢板を引抜き撤去する。最後に、立坑周囲に洗掘防止用保護ブロックを敷き並べる。

この工法は、大規模な仮設構造物が海上に突出しないため、台風や季節風の大波浪による倒壊の危険性がなく、環境への影響が少ない反面、作業船のみによる施工となるため、外洋に面した当海域での作業は、厳しい海象条件との戦いとなった。

水中施工による海底鋼管矢板井筒立坑の施工

鋼管矢板の海底打設

2002年4月より海上立坑工事の第一弾として、鋼管矢板打設工事に着手した。導材をSEP（自己昇降式作業台船）舷側に設置し、油圧パイプロハンマーと油圧打撃ハンマーにて鋼管矢板を打設した。鋼管矢板の打設精度確保のためには、SEPおよび導材の据付精度の管理が重要であったが、問題なく鋼管矢板井筒の閉合を達成できた（写真-1）。

鋼管矢板井筒内の掘削

打設した鋼管矢板井筒の頂部に円型支保工を設置した後、水深37mまで井筒内掘削を行った。周辺海域を汚濁しないように、グラブ枠形式の汚濁防止膜を使用した。

長尺ヤットコを用いた支持杭打設

水深37mの井筒内掘削底面に、鋼管支持杭（1000）を30本打設した。大深度海底への打設であるため、43mの長尺ヤットコ（水中杭打ち補助鋼管）を使用し、SEP舷側に設置した導材をガイドにしてフライング打設を行った。打設に先立ち、試験杭によるPDA（動的支持力）試験を実施し、支持力の確認を行った。長尺ヤットコを使用した難しい工種であったが、十分な打設精度を確保できた。

J管モジュールの海中設置

J管モジュールはJ字型放水管とそれを保持する鉄骨構造からなる鋼重534t/基の大型鉄骨モジュールである。J管モ



写真-1 パイプロハンマーによる鋼管矢板打設状況



写真-2 1 600 t吊起重機船によるJ管据付け作業



写真-3 現在の鹽寮海岸¹⁾
(左が抗日紀念碑、海上に見えるのが作業船団)

ジュールは、1 600 t吊起重機船で製作地の港から現場まで海上運搬した。台湾の国内輸送であったが、使用した起重機船が日本船籍であったため、行政院交通部の航行許可の取得に手間どったが、2003年5月に海上運搬し、立坑内に据え付けた(写真-2)。

水中不分離性コンクリートの打設

台湾では水中不分離性コンクリートの使用実績がなかったため、現場において海中打設試験を行い、十分な品質が得られることを示したうえで、使用の承認を得た。打設は、陸上のプラントで練ったハイドロクリートを、生コン車ごと台船輸送する方法を採用した。打設数量は立坑2基で約14 000 m³であったが、1 000 m³/日の打設量を実現でき、約2週間で打設作業を完了した。

マルチノズル放水口の設置

マルチノズル放水口は、直径17.3 mの鋼製円筒構造に3.0 mの出水口4基を備えたもので、鋼重約460 t/基、マルチノズル形式の放水口としては世界でも最大規模のものである。2003年6月に起重機船で海上運搬し立坑内に据え付けた。据付け後、排水頭下部まで根固めコンクリートを打設した。

こうして、2002年4月に着工した海底鋼管矢板井筒立坑工事は、2003年7月に完了した。現在、この到達立坑を目指して放水路シールド工事を進めているところである。

現場事情

審査・承認対応

外洋に面した海工事ゆえ、いろいろな苦勞があったが、工事以外の面でも、特に発注者側のオーナーズコンサルタントの審査・承認対応には時間と労力を費やした。各工程ごとの詳細施工計画書や、施工後の検査書類の審査、承認作業は煩雑で、多くのサインが必要なために時間がかかり、現場が止まることもしばしばあった。

新型肺炎(SARS)の影響

2003年の初め頃から香港や中国広東省で広がり始めた新型肺炎(SARS)は、4月頃から台湾、特に台北や高雄といった大都市で急激に拡大した。当現場は、台北から離れているためSARSの発生はなく、直接の影響はなかったが、台北方面への外出を自粛し、事務所内あるいは外出時にはマスクをするなどして予防に努めた。しかし、WHOが台湾を渡航勧告地域に指定したのを受け、日本からの協力業者の中には渡台を中止する業者も現われた。

おわりに

かつて、鹽寮海岸に建てられていた「北白川宮御上陸記念碑」は戦後取り壊され、今は同じ場所に『鹽寮抗日紀念碑』が建てられている(写真-3)。

現在、龍門原発プロジェクトは途中中断の影響等で、当初計画よりも大幅に運転開始が遅れる見込みである。また、龍門原発そのものの是非を問う国民投票の話もあり、先行きは今なお流動的である。このプロジェクトには、われわれだけでなく、原子炉、タービンといった発電所本体工事に日本の大手メーカーも参加している。そのため、日本からの『原発輸出』と批判されることもあるが、多くの日本人が関わっている龍門原発プロジェクトが、日台関係のさらなる発展に寄与することを願わずにはいられない。

参考文献

1 - 日本風俗地理体系第十五巻臺灣篇, 新光社, 1931

