

岩盤対応型大口径シールドマシンによる 海底トンネルの施工

— 志賀原子力発電所 2号機放水路工事 —

西田 勝幸・永田 健二・坂東 栄吾

北陸電力株式会社志賀原子力発電所の取放水設備は、海底地形の保護や温排水拡散範囲の抑制などの環境保全に配慮し、海底トンネル形式を採用している。

志賀原子力発電所2号機の建設では、機械化施工の急速な発展及び経済性の追求を背景にシールド工法の採用を検討した結果、岩盤対応型泥水加圧式シールド工法で放水路トンネルを施工した。以下に放水路トンネルの工事概要、シールド掘進機的设计及び施工実績について報告する。

キーワード：海底トンネル、シールド、ディスクカッタ、岩盤、高水圧

1. はじめに

北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機の運転に必要とする $93 \text{ m}^3/\text{s}$ の冷却水には海水を使用し、その取放水路は、海岸などの自然環境の保護、温排水拡散範囲の抑制などに配慮し1号機と同様の海底トンネル形式としている。

今回、取放水路トンネルのうち延長の長い放水路トンネルの施工にあたっては、機械化施工の急速な発展と経済性の追求を背景に止水注入を必要としないシールド工法を採用した。放水路トンネ

ルの位置を図-1に示す。

2. 施工条件及び掘削工法の選定

(1) 地形、地質

海底は不陸の激しい岩礁地形で、約 1/30 の勾配で沖合いに向かって傾斜している。

経過地の地質は、安山岩及び凝灰角礫岩から成り、凝灰角礫岩は節理が少ないが、安山岩の一部で節理が多く認められる部分を含んでいる。また、岩石試験により得られた一軸圧縮強度は、 $15 \text{ N}/\text{mm}^2$ の中硬岩から $150 \text{ N}/\text{mm}^2$ の硬岩まで広範囲

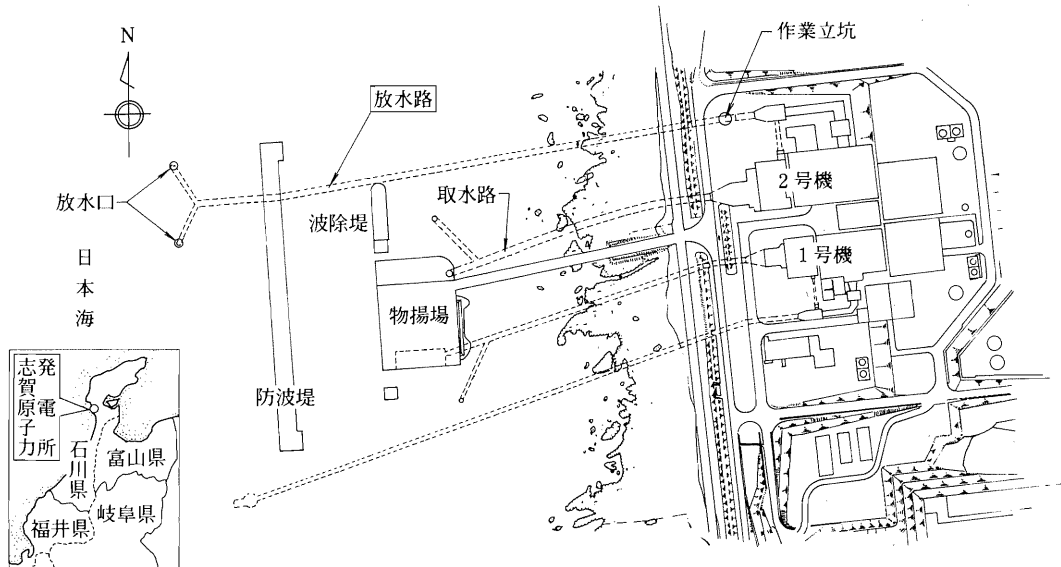


図-1 放水路位置図

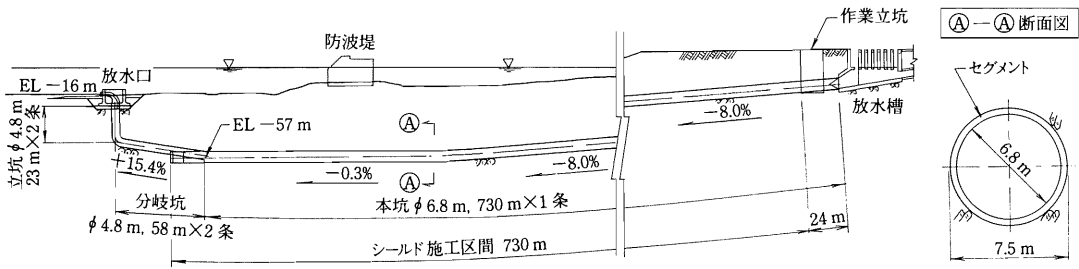


図-2 放水路縦断面図

にわたり、透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s のオーダーである。

(2) 掘削工法の選定

放水路トンネル縦断形状は図-2 に示すとおりであり、本坑は、

- ① 掘削径が約 7.8 m の大口径トンネルである。
- ② 岩盤の一軸圧縮強度は $15 \sim 150$ N/mm² の広範囲にわたる。
- ③ 海面下約 60 m のため、約 0.6 MPa の高水圧が作用する。

との施工条件の下で機械化施工の技術的検討を行い、さらに、経済性について、1号機で施工実績のある止水注入を補助工法とする NATM と比較検討し、岩盤対応型泥水加圧式シールド工法を採用した。

放水路トンネル（シールド施工区間）の諸元は以下のとおりである。

- ・施工延長：約 730 m
- ・仕上り内径：6.8 m（掘削径 約 7.8 m）

- ・セグメント：幅 1.2 m，厚さ 35 cm
- ・曲線半径：300 m（縦横断 1 箇所ずつ）
- ・最急勾配：-8%
- ・土 被 り：最大約 36 m

3. シールド掘進機的设计

シールド掘進機の仕様設定にあたっての主な留意点を以下に述べる。また、シールド掘進機の写

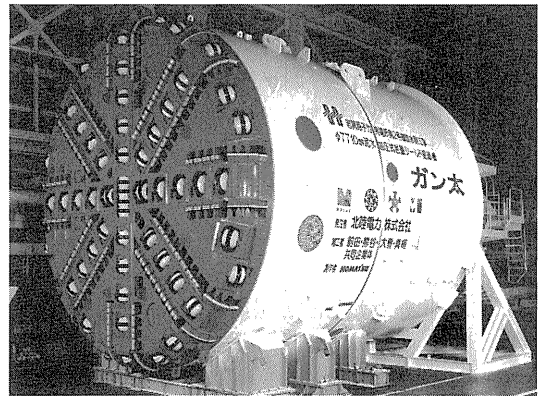


写真-1 シールド掘進機

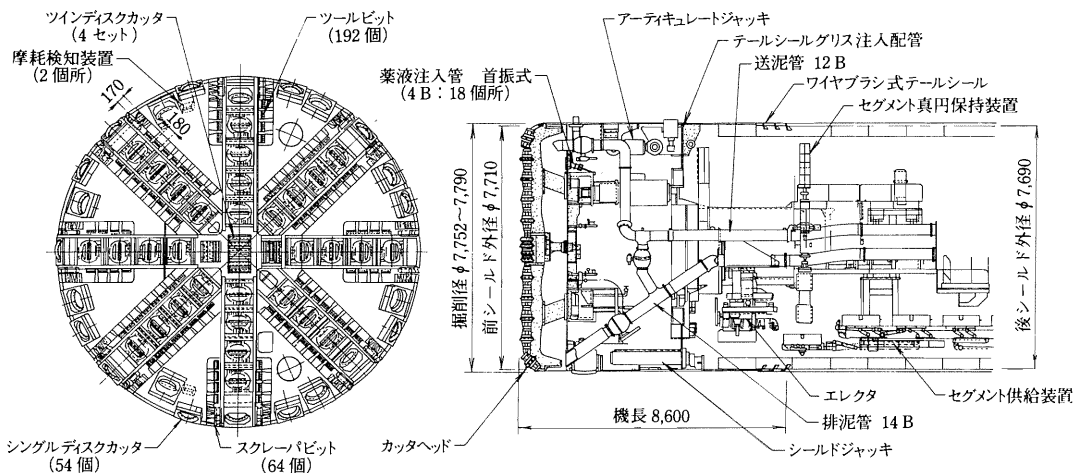


図-3 シールド掘進機詳細図

表一 シールド掘進機の仕様

		シールド仕様
外 径		前胴 $\phi 7,710$ mm 後胴 $\phi 7,690$ mm
機 長		8,600 mm
伸 張 速 度		0~5.8 cm/min (無負荷作動時)
総 推 力		最大 64,680 kN (6,600 tf)
最大中折れ角度		左右 1.0°, 上下 1.0°
テールシール		ワイヤブラシ式 3 段
シールドジャッキ		2,940 kN (300 tf) × 22 本
アーティキュレートジャッキ		3,430 kN (350 tf) × 16 本
フロントサポートジャッキ		980 kN (100 tf) × 4 本
リヤグリッパジャッキ		980 kN (100 tf) × 6 本
余量調査ジャッキ		17 kN (1.7 tf) × 3 本
カッター摩耗検知ジャッキ		17 kN (1.7 tf) × 2 本
		カッターヘッド
形 式		ドームヘッド型 中間ビーム支持方式
回 転 数		最大 3.00 rpm (40.0 Hz)
4 段 階 変 速		1.5 rpm (20.0 Hz) 2.5 rpm (33.3 Hz) 3.0 rpm (40.0 Hz) 4.0 rpm (53.3 Hz)
回 転 ト ル ク		常用 486 tfm (40.0 Hz) 常用 4,766 kNm ($\alpha=1.07$) 最大 583 tfm (33.3 Hz) 最大 5,717 kNm ($\alpha=1.29$)
開 口 率		12%
		エレクト
旋 回 角 度		左右各 200°
旋 回 速 度		0~1.5 rpm
昇 降 範 囲		0~950 mm
摺 動 範 囲		0~1,400 mm
押 込 み 力		314 kN (32.0 tf)
吊 上 げ 力		222 kN (22.6 tf)
操 作 方 法		部分自動式
		真円保持装置
押 付 け 力		294 kN (30 tf) × 2
ス ラ イ ド 量		1,450 st

真, 詳細図及び仕様を, 写真一, 図一3 及び表一 1 に示す。

(1) 岩盤条件等に対する配慮

(a) 硬岩掘削時の対策

① ビット

ビットは岩盤破碎用のディスクカッターをメインカッター (62 個) とし, 破碎され下に滞留する掘削ずりをすくい上げるスクレーパビット (64 個), チャンバ内に掘削ずりを取込むツールビット (192 個) で構成した。

ディスクカッターの配置は, 標準部は 80 mm ピッチとし, 外周部は負荷を軽減するよう 80~5 mm と密に配置した。カッターヘッド形状は岩盤掘削に適したドームヘッド型とした。

また, ディスクカッターは国内初となる 19 インチカッターを採用した。これは従来用いられてきた 17 インチカッターに比べ, カッター切込み深さや耐荷重を大きくできるため, 高強度岩盤においても十分な切込みと信頼性を確保することが可能である。

② カッターヘッド回転速度

カッターヘッド駆動には 150 kW 電動機を 10 台装備し, インバータによる可変速制御 (1.5~4 rpm, 4 段切替え式) にて高速回転を可能とした。また, 高強度岩盤においても毎分 2.5~3 cm 程度の速度で連続掘削が可能となるようカッタートルクは最大 5,717 kNm を装備した。

(b) 切羽不安定時の対策

① 排泥管の閉塞防止

切羽の崩落や坑壁の肌落ちなどによる大きな岩塊の流入防止, 土砂状となった掘削ずりの過剰流入防止のため流入制限バーを設け, 個々の開口の大きさを 170 mm × 180 mm に制限した。これによりカッターヘッド開口率は 12% となった。

また, シールド掘進機後方のクラッシュまでの排泥管径を最大径で 14 インチとし, クラッシュ以降の排泥管 (10 インチ管) より太くすることで排出できる掘削ずりを極力大きくした。さらに, 排泥管の流入付近の閉塞に備え予備排泥管 (14 インチ管) を装備した。

② シールド掘進機の形状

シールド掘進機外径は前胴 7,710 mm, 後胴を 7,690 mm で片側 10 mm の段差を設け, 後胴を小さくすることにより岩塊による機体拘束防止を図った。

シールド掘進機スキンプレート厚さは, 水圧, 緩み土圧等を作用させた FEM 解析により板厚 32~60 mm とし, 必要強度を確保した。

③ ジャッキ推力

ジャッキ推力は機体拘束状態でも容易に脱出できるよう安全率 1.2 を見込み, 64,680 kN とした。

④ カッターヘッド回転速度

カッターヘッド駆動は, 前述の通り可変速可能と

し、低速でカッターヘッドの回転を行うことにより、切羽をできるだけ乱さないような対応も可能とした。

(2) 長距離掘削に対する配慮

(a) ディスクカッターの交換

摩耗、破損によりディスクカッターの交換が必要となった場合、海底下では岩盤からの湧水を止めるための止水注入などの補助工法が必要となり、工程やコストに大きな影響をもたらすことになる。そこで、ディスクカッターの長寿命化を図るため前述の19インチカッターを採用した。また、カッターリング材質も従来材質であるニッケルクロム系特殊鋼よりも耐摩耗性に優れる冷間ダイス鋼に変更し、一層の耐摩耗性の向上を図った。

今回の19インチカッターは、従来使用されてきた17インチカッターに比べ、耐摩耗性がサイズ効果で約1.2倍、材質効果で約1.5倍の性能を有し、両効果により従来比1.8倍の耐摩耗性能を確保した。

なお、カッター交換が必要となった場合に備え、機内には薬液注入装置を設け、これにより岩盤の止水を行い、中折れ装置とリヤグリッパを用いてカッターヘッドを後退させ交換スペースを確保できる構造とした。

(b) 摩耗量の計測

摩耗条件の厳しいカッターヘッド外周部にディスクカッター摩耗検知装置を2箇所設け、ディスクカッター摩耗量の進行状況を計測できるようにした。摩耗限界20mmを超えると判断された場合には交換を行うこととした。

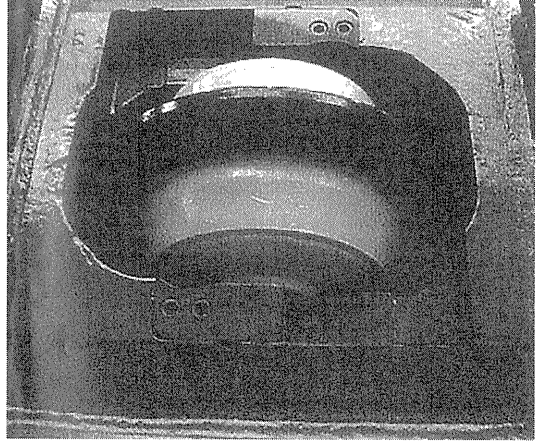
(3) 高水圧に対する配慮

(a) ディスクカッター軸受け部シール

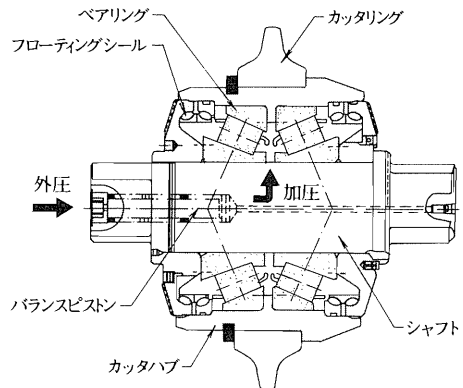
掘進機は泥水式のため、高水圧の泥水でチャンバ内が満たされており、ディスクカッターの軸受け部にも高い外水圧が作用する。通常、ディスクカッターの軸受け部はベアリングで支持されシールにより潤滑油が封入されているが、高強度岩盤の掘削振動や高い外水圧が作用し、シールが不良となった場合ディスクカッター軸受けが破損することも予測された。このため軸受け部に外水圧に反応するピストンを設け、外水圧と内部の潤滑油封入圧がバ

ランスをする特殊構造とし、シールの負荷を軽減することにより19インチディスクカッターの耐圧性、耐久性の向上を図った。

19インチディスクカッター取付け状況を写真—2に、シール構造を図—4に示す。



写真—2 19インチディスクカッター取付け状況



図—4 ディスクカッター軸受部シール

(b) カッターヘッド駆動部シール

カッターヘッド駆動部シールは高水圧に加え、大口径高速回転により発熱劣化の危険があるため、「多段シール+グリース連続給脂+潤滑油循環放熱」などの対策により信頼性向上を図り、耐水圧を1.5 MPaまで向上させた。

(c) テールシール

テールシールは高水圧対応型ワイヤブラシテールシール3段とし、耐水圧を1 MPaとした。スキンプレートに内蔵された注入管からテールシール間にグリースを間欠給脂することにより、止水性の向上を図った。

(4) 線形に対する配慮

岩盤掘削においては、掘進機の姿勢や方向が急激に変化することが予測される。また、縦断・横断各1箇所の曲線施工にも確実に対応する必要がある。そこで、掘削径をシールド外径より片側40mmオーバーカットすると同時に、上下左右各1°の機体屈曲が可能な中折れ装置を装備することで、機体の拘束防止と方向制御の容易化を図った。

4. 二次覆工の省略

シールド工法においては、そのほとんどがセグメントの内側に二次覆工を施しており、その役割は、

- ① 設計上の構造部材
- ② 施工上の蛇行、不陸に対する仕上り断面積の確保
- ③ 粗度係数の確保
- ④ セグメント継手金物の腐食防止

である。

今回採用したコッタ・クイックジョイントセグメントは断面欠損が小さく、かつ、継手金物の露出も小さいという特徴を有しており、さらに継手金物にダクロタイズド防食処理を施すことにより耐久性の向上を図っている。また、設計荷重に対してもセグメントのみで耐え得る構造とし、二次覆工を省略することとした。

さらに、二次覆工の省略により要求されるセグメント組立て精度の向上や大口径セグメント組立ての効率化に対しては、エレクタシステムの自動化と高精度化を図る必要がある。そこで、エレクタにはコッタ・クイックジョイントセグメントに対応できる部分自動システムを採用した。

本システムはセグメントの供給から把持、粗位置決めまでを自動化するとともに、ジョイントの精位置合わせにおいては倣い制御機構で作業者が簡単な目視確認とスイッチ操作のみで精度良く迅速に合わせができる。また、エレクタにはコッタ打込み装置も搭載されており、作業者のスイッチ操作のみで簡単に打込みができる構造とした。

これらにより、大口径のセグメントを作業員1~2名で高精度かつ効率良く組立てできるようにした。エレクタを写真-3に、セグメント組立



写真-3 エレクタ

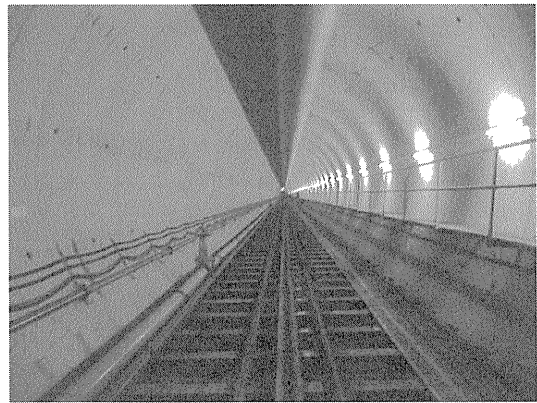


写真-4 セグメント組立て状況

て状況を写真-4に示す。

5. 施工実績

(1) 掘進工程

平成12年3月よりシールド掘進機の現地組立てを開始し、6月に掘進開始、すべての後続台車をトンネル内に投入するまでの初期掘進(約120m)、それに引続いて実施した本掘進を経て、平成13年1月末に掘削を完了した。進捗実績は以下のとおりである。

・平均日掘進量(昼夜):

初期掘進 4.8m (4R)/日

本掘進 8.4m (7R)/日

・最大日掘進量(昼夜):

9.6m (8R)/日

・最大月掘進量:

190.8m (159R)/月

(2) 掘進管理

(a) ジャッキ推力

ジャッキ推力の推移を図-5に示す。最大で45,000 kNであり、装備推力の7割程度の推力で掘進することができた。縦断勾配を有する550 mまでの推力は、切羽水圧の上昇に伴い増加しているが、550 m以降の推力の増加は、曲線施工による偏荷重、ディスクカッタの摩耗増加等が要因と考えられる。なお、切羽水圧は静水圧とほぼ等しい増加傾向を示している。

(b) カッタトルク

カッタトルクの推移を図-5に示す。最大で4,000 kNmであり、装備トルクの7割程度のトルクで掘進することができた。

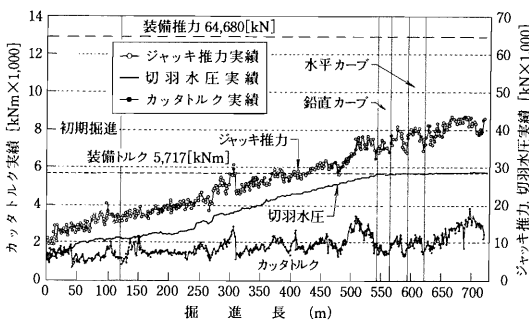


図-5 ジャッキ推力とカッタトルク

全長にわたり緩い増加傾向にあるが、これはディスクカッタの摩耗の増加等が要因と考えられる。ただし、曲線部では掘進速度を遅くしてトルクの増加を抑制した。

(c) セグメント蛇行量

蛇行量は管理値 150 mm に対して、上下方向 60 mm、左右方向 78 mm であり、精度よく掘進しセグメントを組立てることができた。蛇行修正用テーパセグメントの使用率は約 2% (11R) で、一般的な使用率 3~5% に比べて少なかったことから組立て精度が高いと言える。

(d) ディスクカッタ摩耗量

摩耗量は最大で 15 mm 程度であり、許容摩耗量 20 mm の 7 割に収まり、カッタ交換を行うことなく掘進を完了することができた。しかし、667 m 掘進時にクラッシャの内部よりカッタリングの小片 1 個が発見されており、また、到達後、偏摩耗の傾向とヘアクラックのあるカッタリングが 1 個確認された。これは、切羽面に一軸圧縮強度が 150 N/mm² である安山岩 (均質) が部分的に現れ、互層地層となり一部のディスクカッタに

大きな偏荷重が作用したために発生したと考えられる。

今回はディスクカッタの配置を通常より密にしたこと、強化型ツールビットを用いたことにより掘削には支障は出なかったが、今後は、不均質岩盤での切込み深さの調整などの検討が必要と思われる。

6. おわりに

海底トンネルである放水路の施工は、一軸圧縮強度が 15 N/mm² の中硬岩から 150 N/mm² の硬岩まで広範囲にわたる岩盤への対応が重要なポイントであった。

ディスクカッタ等に技術的改良を施したシールド掘進機を採用したことにより、経済性、工期短縮及び安全かつ確実な施工を実現した。

今後は、放水立坑の工事が主体となるが、さらなる合理化に向けての技術的課題を解決しながら品質、安全、コスト、工期、環境保全の点で水準の高い工事を実現したいと考えている。

最後に、設計、施工を進めるにあたり、多大なご指導を賜っている海岸施設技術委員会、海底トンネル部会の委員の方々に深く感謝の意を表します。

J C M A

[筆者紹介]

西田 勝幸 (にしだ かつゆき)
北陸電力株式会社
志賀原子力発電所建設所
土木第二課



永田 健二 (ながた けんじ)
前田・熊谷・大豊・真柄 JV
志賀原子力作業所
土木主任



坂東 栄吾 (ばんどう えいご)
株式会社小松製作所
建機マーケティング本部
地下建機事業室

