

トンネル 特集

圧気併用シールド工法による海底取水トンネルの施工

— 中部電力浜岡原子力発電所5号機取水塔・取水トンネル工事 —

清水 昇・石切山 勝好・川 森 崇 史

中部電力株式会社浜岡原子力発電所の冷却水の取水は、浜岡沖合約 600 m の地点に取水塔を設置し、海底岩盤内に取水トンネルを構築し、陸上の取水槽まで海水を取水 (95 m³/sec) する方式としている。これは、既設号機 (1~4号) 及び、今回の5号機とも同じ方式である。

取水トンネルの大部分が海底下であることから、補助工法として圧気工法を採用してきた。以下に5号機海底取水トンネルの工事概要、シールド掘進機、なぜ圧気が必要であるのかという問題とその設備について報告する。

キーワード：トンネル、海底取水トンネル、シールドトンネル、圧気工法

1. 概 要

当工事では、浜岡沖合の遠州灘に取水塔を設置し (ニューマチックケーソン工法)、陸上に構築した作業立坑より取水トンネルを掘削する。この内、延長 689 m の海底部は、掘削外径 8.06 m の開放型機械式シールド (半密閉式機械式シールド^{a)}) 工法を、延長 34 m の陸上部は山岳トンネル工法にて施工した。

補助工法となる圧気工法は、海底部の内、汀線^{b)}部より先にて併用した (圧気施工延長 590 m)。

図-1 に浜岡原子力位置図を、図-2 に取水トンネルの位置図を、図-3 に概略縦断図を示す。

2. 海底取水トンネル掘削の施工条件

(1) 自然条件

まず海底取水トンネル掘削施工の自然条件を以下に列挙する。

- ① 海底下である (理論水圧 0.29 MPa)
 - ：取水塔部海深 10 m
 - ：土被り 18 m
- ② 弱層部がある (約 50 m~80 m 間隔)
- ③ 海底地盤は、新第三紀中新世後期から鮮新世前期の相良層で泥岩優勢な、泥岩と砂岩の互層である。
- ④ 一軸圧縮強度は、砂岩 3 N/mm²、泥岩 10 N/mm²

a) 当現場で採用したシールド名称：密閉式と開放型との中間。

b) 汀線 (ていせん、みぎわせん) 陸と海との境界を連ねた線。海岸線。

mm² 程度である。

(2) トンネル湧水

既設号機の施工実績より、トンネル湧水はトンネル

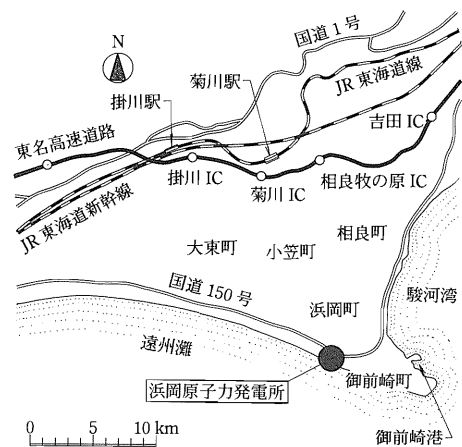


図-1 広域位置図

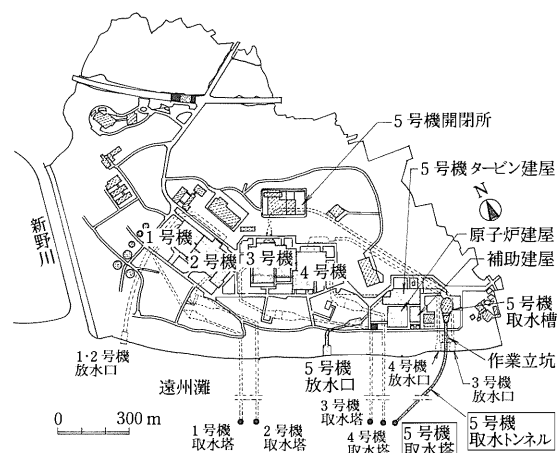


図-2 5号機取水トンネル位置図

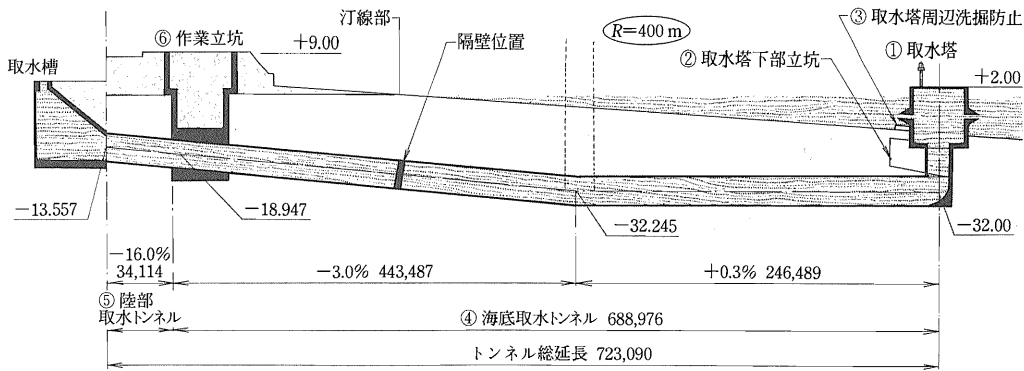


図-3 縦断面

全体で 50~80 L/min である。

3. 圧気併用施工に至る経緯

昭和 46 年からの浜岡原子力発電所 1 号機建設当時は、外洋からの取水方式は前例が全く無く、海底トンネルをいかに安全に掘削するか検討に苦慮した。

地質条件で前記したように、トンネル全体は安定した岩盤である事は確認されていた。しかし、当時最も心配とされていたのが、

- ① 海底トンネルである ……………水深 max 10 m
- ② 海底部の地質状態が不確定である
……………海底での弱層部の状態が不明
- ③ 地山の性質、特に湧水との関係が不確定である
と言う事であって、不測事態における対応策が必要であった。

掘削は安全性を重要視した結果、海底トンネルはシールド工法を採用したわけであるが、1号機当初ではシールドのオーバカットに対する危険性さえ議論されていた。また、カット部は地山の必要に応じて脱着可能な、面板を装備した。さらに、工事の遅れによる影響は取水トンネルだけにおさまらず、発電所の建設全体にも及ぼすことも考慮しなければならなかった。海底取水トンネル工事においてシールド工法と圧気工法との併用方式を採用した理由は下記に述べるとおりである。

- ① 海底トンネルの土破りが少ない (18 m) 事による安全性の確保
- ② 異常出水からの作業員の救出
- ③ 異常出水によるトンネルの早急な復旧を可能にする
- ④ 既施工の海上ボーリング孔からの出水の可能性
対応 (モルタル填充不足による出水)

以上が主な理由であるが、5号機においては、

- ① 先進ボーリング省略におけるリスクアップ
- ② 原子力発電所に対する信頼性向上の必至等、社

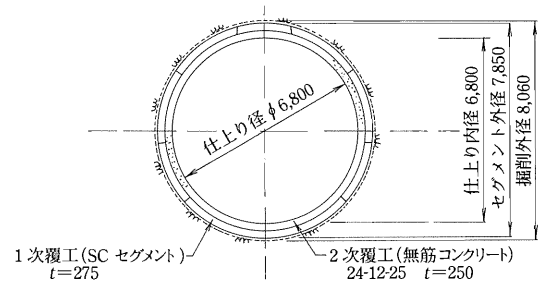


図-4 トンネル標準断面図

会的注目度アップ

- ③ 圧気設備省略によって生じるリスクの増大とトンネル水没が生じた場合の発電所工事全体への影響と被害額に対する比較検討による判定等をも配慮した。

以下、5号機建設（実施工）における圧気設備について説明する。

4. 圧気のお考え方

(1) 圧気の効果

圧気工法の排水、山留め、地山改良の一般的効果は以下のとおりである。

- ① 排水効果
圧気圧により切羽からの湧水を阻止し、切羽の崩壊を防止する効果。
- ② 山留め効果
圧気圧自体が山留め作用になり、切羽を安定させる効果。
- ③ 地山改良効果
圧気で地山を脱水することにより、土固有の強度を発揮させ、切羽の安定を向上させる効果。

(2) 今回工事で圧気に期待する効果

- ① 探りボーリング^①で異常湧水あるいは地山不良

① 切羽前面の地質及び湧水状況を調査するために行うボーリング調査。トンネル進行 30 m 毎に行い、穿孔回転数、トルク等を測定し、その変化より地質の変状を把握する。また、湧水の有無も確認する。

箇所が確認された場合、事前に坑内気圧を高めて、その後切羽の安定を保ちながら掘削できる。

- ② 通常掘削時、圧気圧 0.05~0.06 MPa で運用することで（アイドリング効果^{d)}）異常出水時の対応を即座に行うことが出来る（理論圧気をかけないのは工程上作業効率を下げない事を考慮したからである）。

(3) 圧気の方式

隔壁を設置しトンネル全体圧気方式を採用した最も一般的な圧気方法である。これは、トンネル内に隔壁を設置して圧気側と大気側を仕切り、切羽側のトンネル全体に圧気をかける方式である。隔壁は、汀線部に設置した。

ロックについては、掘削断面が大きいので人間出入り用のマンロックと、材料搬入・ずり出し用にマテリアルロックを設けた。ロックが分かれていることから作業性も安全性も向上する。

トンネル全体圧気方式には、トンネル周囲の地山に常時圧気圧を作用させているため湧水防止、坑内排水、地盤安定、裏込め注入効果が良くなるというメリットがある。しかし、圧気容積が大きくなり送気設備が大型化すること、作業環境も気圧下となるため作業員の作業性が悪い、圧気によって酸素密度が増加しており、火災の危険性が高くなるというデメリットもある。

5. シールド機

トンネル全体圧気方式を採用したことと、経験により切羽の安定度が高い。さらに、岩砕の取込み効率等考慮し、面板はスポーク形式で、開口率を 57% とした。

表一 シールド機仕様

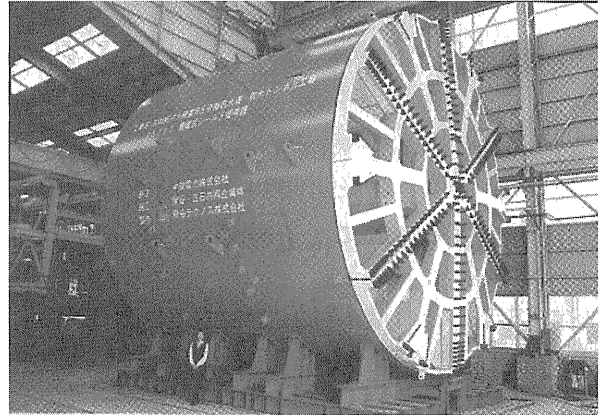
| | |
|-----------|---------------------------------------|
| 外径 | 8,030 mm |
| 内径 | 7,910 mm |
| 機長 | デッキ含まず 7,900 mm |
| スキムプレート厚 | 60 mm |
| テールクリアランス | 30 mm |
| 総推力 | 39,000 kN (770 kN/m ²) |
| シールドジャッキ | 1,500 kN×1,400 st ×at 35 MPa 26 本 |
| ジャッキ速度 | 3.5 cm/min (全数稼働時) |
| ポンプユニット | 45 L/min at 35 MPa |
| | 30 kW×4 P×440 V |

d) 常時設備を稼働させる事により対応を早くする。

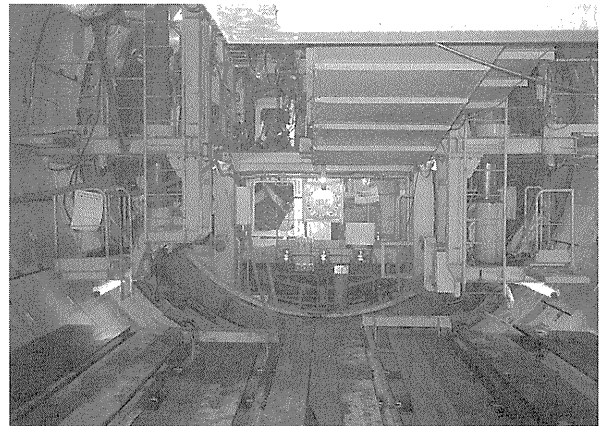
シールド機の仕様（表一）、外観と詳細図を写真一1、写真二と図一5に示す。

6. 地上に設ける圧気設備

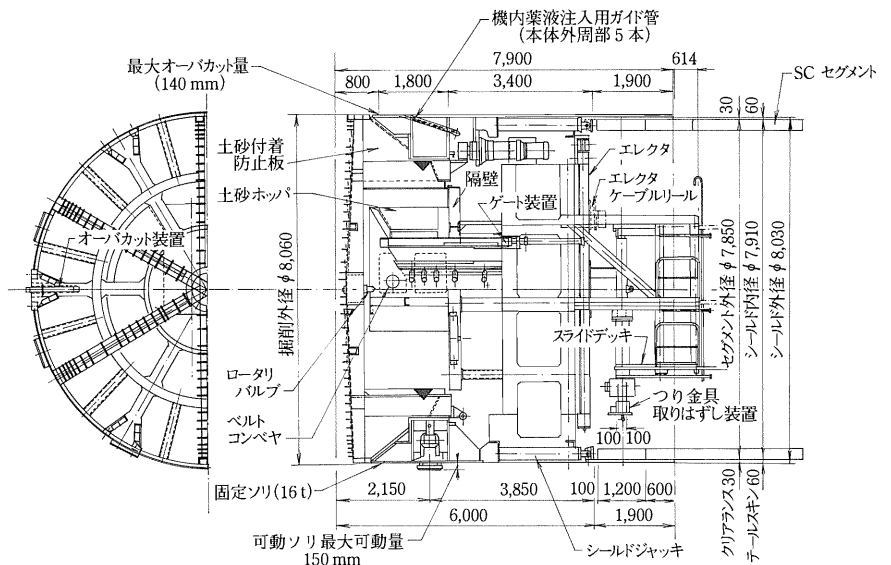
後続設備を含めたシールド機が、汀線部を超えたところで、圧気の設定に入った（図一6）。



写真一 シールド機



写真二 掘削状況



図一5 シールド機

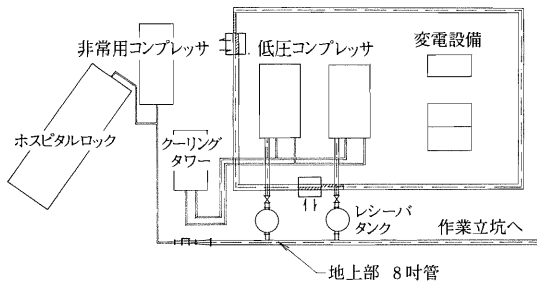


図-6 地上圧気設備配置

(1) 空気圧縮設備 (低圧コンプレッサ; 写真-3)

計画された空気圧, 送気容量を送ると共に, 清浄で適温, 適湿の空気を供給する。

圧縮空気に油分を含まないオイルフリー圧縮機を採用した。また, 吐出される圧縮空気を冷却するアフタークーラ機能と異常温度警報装置 (「高圧作業安全衛生規則」に準ずる) を内蔵している型式とした。

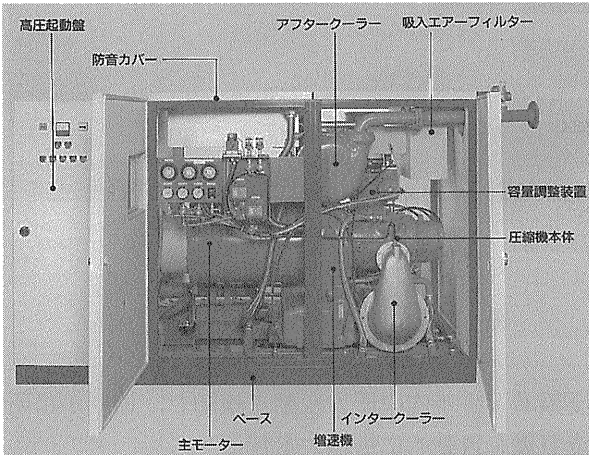


写真-3 低圧コンプレッサ

(2) 空気槽 (レシーバタンク) (容量: 1.8 m³; 写真-4)

空気槽は, 圧縮空気を蓄えておく槽である。空気槽



写真-4 レシーバタンク

は, 「ボイラー及び圧力容器安全規則」における第二種圧力容器の適用を受ける。

(3) 冷却用給水設備 (クーリングタワー; 写真-5)

コンプレッサの冷却水給水方法として, 貯留水をクーリングタワーで冷却しながらポンプで強制循環させる方法にした。



写真-5 非常用コンプレッサ (左), クーリングタワー (右)

(4) 再圧室 (ホスピタルロック; 写真-6)

高圧則に従い坑内気圧を最大 0.3 MPa としているので, 再圧室を設けた。第二種圧力容器の個別検定に合格したものを設置した。



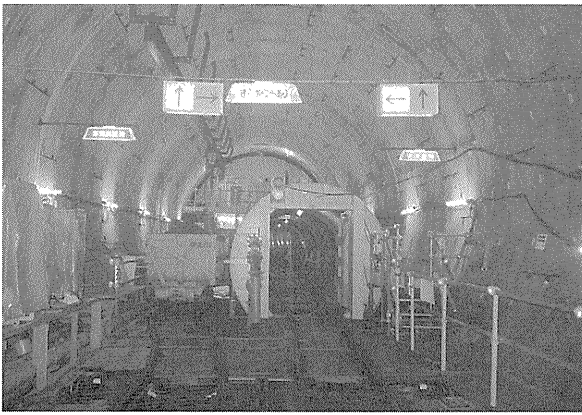
写真-6 ホスピタルロック (1人用)

(5) 非常用設備 (能力: 220 ps)

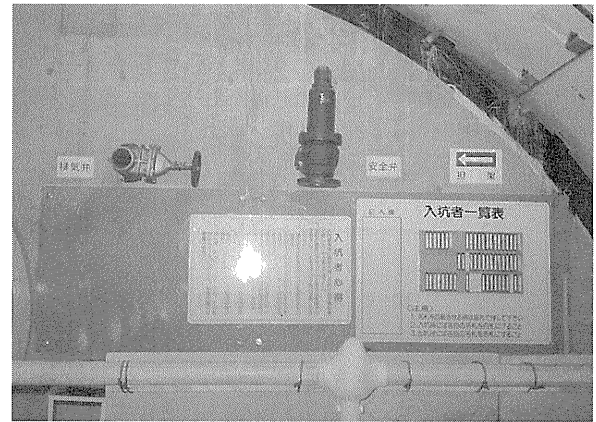
通常は, 施主の中部電力より工事用電力の供給を受けて作業を行うが, 万が一その供給が止まった時のために, ディーゼルコンプレッサを設けた。能力は電動コンプレッサ 1 台分で, 作業員全員退避するための設備とした。

(6) 上 屋

電気受電設備併設のため, 上屋を設けた。コンプレッサより発せられる熱除去のため換気設備 (換気扉) を多く取付け冷却に配慮した。



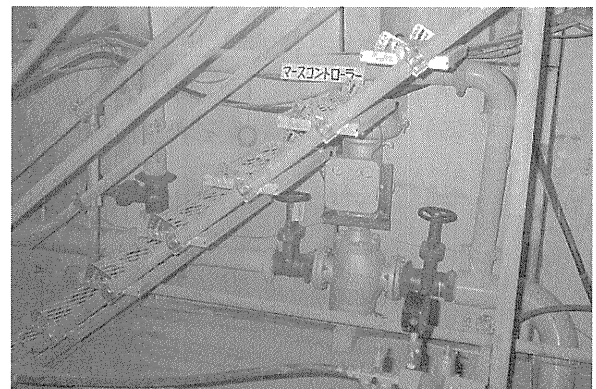
写真一7 坑内写真



写真一9 隔壁安全設備



写真一8 坑内写真



写真一10 マースコントローラ

7. 坑内の圧気用設備 (写真一7, 写真一8)

(1) ロック設備

マンロック, マテリアルロック共, 第二種圧力容器の適用を受ける。

① マンロック

$\phi 1,800 \times L 3,600$

定員 10 名, 床面積 3.3 m^2 , 気積 8.7 m^3

② マテリアルロック

$\phi 2,800$ (両端は $\phi 3,150$) $\times L = 22,740$

出入口には坑内車両用のレール転倒装置を併設, 扉の開閉は油圧式 (バッテリー+ずりトロッコ 3 台分の長さのスペース長とした)。

(2) 隔壁 (写真一9)

RC 構造と鋼製構造とを比較した結果, 大断面であるということからコスト的な面で RC 構造を採用した。送・排水管, 送気管, 動力電線, 通信電線, 安全弁などを設けた。

(3) 自動圧力調整装置 (マースコントローラ; 写

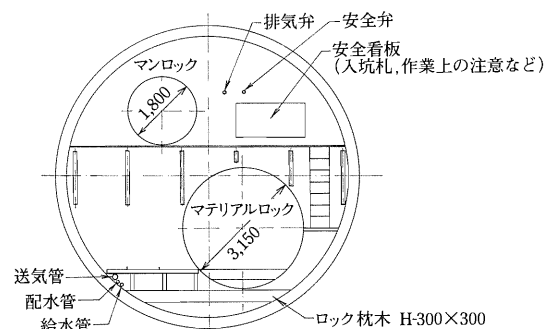
真一10)

[メーカー: フシマン]

圧気トンネル内の圧力変動を検知し, 速やかに所定の空気量を自動的に供給する装置

(4) 配管他

陸上より坑口までを, 8 インチつる巻鋼管, 坑内を 6 インチつる巻鋼管にて配管した。先端にはフラップバルブ (逆止弁) を取付け (図一7, 図一8), 漏気防止とした。



図一7 圧気設備配管図

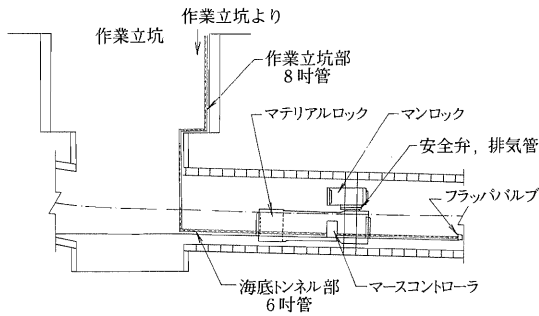


図-8 坑内断面図

8. 圧気工法における安全対策

予想される災害とその対策を表-2, 表-3, 表-4に示す。

表-2 関係法規

- ① 労働安全衛生法
- ② 労働安全衛生規則
- ③ 高気圧作業安全衛生規則
- ④ ボイラ及び圧力容器安全規則
- ⑤ 圧力容器構造規則

表-3 必要な免許・資格

| 作業内容 | 資格名称 | 免許 | 技能講習 | 特別教育 | 関係法令 |
|------|-----------|----|------|------|--------|
| 圧気工法 | 高圧室内作業主任者 | ○ | | | 高圧則 10 |
| | 高圧室内作業員 | | | ○ | 高圧則 11 |
| | 送気調節係員 | | | ○ | 高圧則 11 |
| | 空気圧縮機運転者 | | | ○ | 高圧則 11 |
| | 加減圧調節係員 | | | ○ | 高圧則 11 |
| | 再圧室係員 | | | ○ | 高圧則 11 |

表-4 災害防止対策

| 種別 | 作業重点安全管理目標 | |
|-----------------------------|--|---|
| | 予想される災害 | 災害防止対策 |
| ① 職業性疾病の防止 ・高圧室内における健康障害 | <ul style="list-style-type: none"> ・ロック室で気圧操作中、気分が悪くなる ・圧気側と大気側を何度も行き来すると、気分が悪くなる | <ul style="list-style-type: none"> ・気圧操作を行うものは、全員の体調を確認しながら行う ・体調の悪いものは、圧気内に入らないとともに、朝のKYC時職長に申し出て、配置替えを行う ・作業開始前に、該当作業員に対し、“高圧室内作業に関する特別教育”を実施する ・マンロック内に非常ベルを設け、外部へ連絡できるようにする ・圧気内で作業する人員を固定する。動力車の運転手は、圧気側と大気側で交替する |
| ② 坑内災害の防止 ・火災の発生 | <ul style="list-style-type: none"> ・溶断、溶接作業時、火災が起きる ・漏電により、火災が起きる ・煙草により、火災が起きる | <ul style="list-style-type: none"> ・作業箇所付近には、ウェス等、引火性のものを置かない ・消火器を備える ・圧気室内で作業を行う時は、事前に火元責任者（JV職員）に連絡する ・グリス等の油脂類は、安全な場所に保管すると共に少量保管とする ・漏電遮断機の点検を、毎日行う ・圧気室内は、禁煙とする。隔壁（立坑側）に喫煙所を設置する |

(1) ロック付近の安全対策

トンネル全体としては、複線であるがロック付近は単線となる。マテリアルロックの両端に手動の信号を設け入室する時、反対側を赤にする。その操作は、坑口側はロック担当者。坑内側は、坑内車両運転手が行う。

(2) 異常時の対応

火災の発生や異常出水時など、即座の退避が必要になることを考慮し、マンロック内は常に圧気側気圧とした（注：出坑時、外のバルブ操作にて送気し、作業室内気圧とするようにした）。

9. 終わりに

現在、シールド工法は密閉型シールドが主流であり、今回工事のような開放型シールドにおける圧気併用シールド工法の採用は少なくなってきている。しかし、圧気工法は切羽前面の障害物の撤去やカッタビットの交換など切羽開放の必要な場合には、有効な手段であることも確かである。又、今後予定される大深度トンネル掘削に必要とされる。従って、その適用には十分な検討が必要であるが、是非その利点を活用して頂きたいところである。

最後に、工事計画、施工を進めるに当たり、多大なご指導を賜った施主である中部電力株式会社浜岡原子力建設所の方々に深く感謝の意を表します。 **JICMA**

【筆者紹介】



清水 昇(しみず のぼる)
株式会社熊谷組
熊谷・白石JV
浜岡原子力作業所
作業所長



石切山 勝好(いしきりやま かつよし)
株式会社熊谷組
熊谷・白石JV
浜岡原子力作業所
工事課長



川森 崇史(かわもり たかし)
株式会社熊谷組
熊谷・白石JV
浜岡原子力作業所