西日本技術開発株式会社

九電グループ
ずっと先まで、明るくしたい。

令和6年度　地熱井掘削監督者養成講座

地熱井における空気混合泥水掘削について

西日本技術開発株式会社
地熱業務本部　地熱部

目次

Ⅰ　空気混合泥水掘削とは

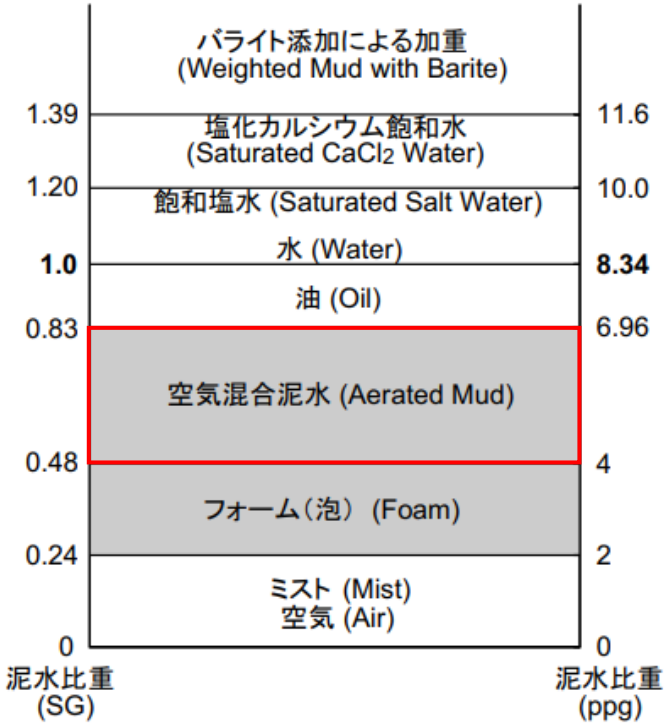
- はじめに
- 概要
- 原理
- 長所
- 短所
- 必要な機器・設備

はじめに

坑井掘削において、空気を循環流体として利用することを一般的に「エアードリリング」や「エア掘削」と称し、坑内状況あるいは汽液混合物の種類によって以下に大類される。

a. 空気混合泥水（Aerated Mud）
b. フォーム(泡)（Form）
c. ミスト（Mist）
d. 空気（Air）

本研修では、空気混合泥水掘削について説明する。



泥水の種類と泥水比重の関係

出典：「最新の坑井掘削技術（その３）」

空気混合泥水掘削の概要

【工法】

掘削泥水に圧縮空気を混入させることにより、アニュラス部の泥水の見掛け比重を下げ、坑内泥水柱圧力を低減させるもの

これにより、逸泥状態であっても泥水循環を確立することが可能な掘削工法

【適用されるケース】

逸泥状態において、逸泥層の閉塞/逸泥掘削が困難な場合

既存貯留層や周辺坑井への泥水等による影響を低減したい場合

掘進率向上及び掘削用水が少ない場合 etc.

【主な使用機材】

高圧・大容量コンプレッサーシステム、坑口装置及び気泡生成用の資機材 etc.

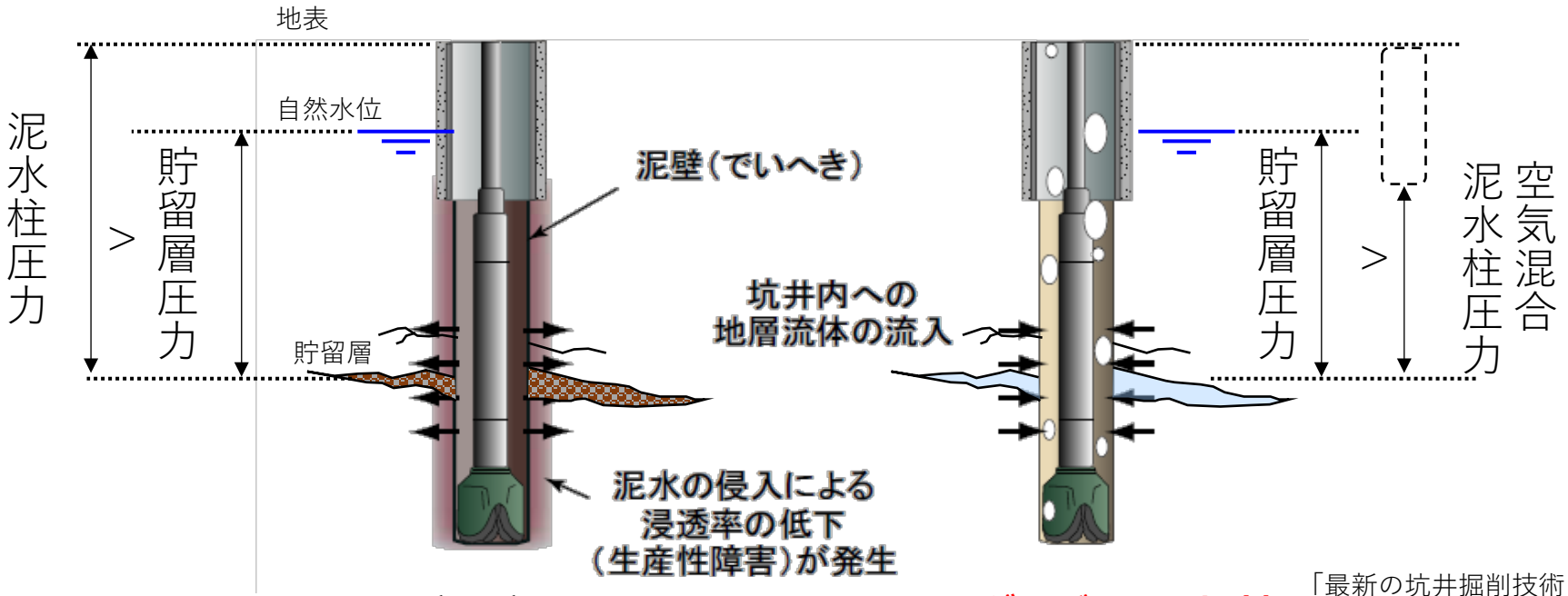
原理

①バランス掘削：逸泥が無い状態での循環掘削

②オーバーバランス掘削：泥水柱圧力が貯留層圧力より高い状態。地層流体の坑内流入を抑えながら掘削（いわゆる逸泥掘削）　泥水柱圧力＞貯留層圧力

③アンダーバランス掘削：泥水柱圧力が貯留層圧力より低い状態。地層流体の坑内流入させながら掘削

掘削泥水に圧縮空気を混合することでアニュラス部泥水の見掛け比重を下げ、坑井内圧力を小さくする　　泥水柱圧力＜貯留層圧力



②オーバーバランス掘削　　③アンダーバランス掘削

「最新の坑井掘削技術（その３）」に加筆

長所・短所

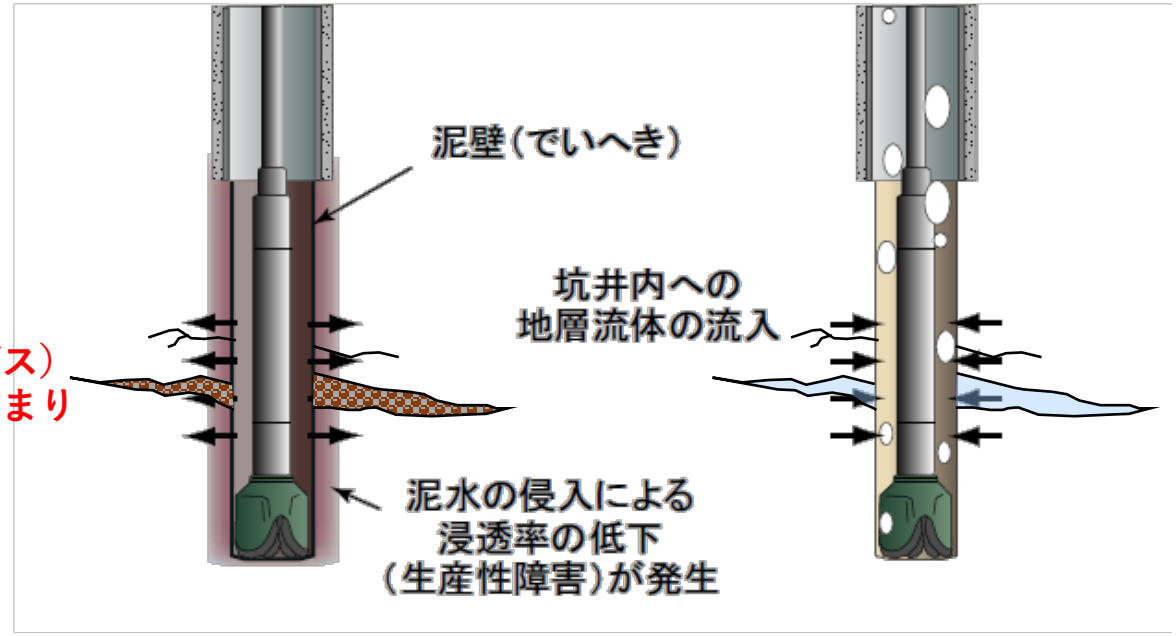
長所	短所
透水性低下（ﾌｫｰﾒｰｼｮﾝﾀﾞ ﾒｰｼﾞ）の低減 ⇒坑井の仕上げ後の生産量/還元量の増大が期待	**専用の資機材，特殊エンジニアが必要** ⇒特殊な大型コンプレッサーやエアーエンジニア等を所有する業者が限定的、且つ、掘削コスト増
カッティングス（地下情報）の回収 ⇒地質情報の取得により地熱系概念モデル更新等に寄与	**坑径拡大・崩壊のリスク増大** ⇒アニュラーベロシティが高くなり、軟弱岩相等では通常の泥水掘削より坑径拡大・地層崩壊のリスク大 ⇒掘削工期の遅延、掘削コスト増
掘削工期の短縮が期待 ⇒掘削コストの低減 ⇒運用井（生産/還元）としての早期利用開始	**坑内フラッシュの可能性上昇** ⇒掘削工期の遅延、掘削コスト増

透水性低下リスクの低減

- 逸泥掘削では、掘屑（カッティングス）による逸泥層の目詰まり、いわゆるフォーメーションダメージを受けやすい。ダメージが大きいと坑井の仕上げに時間とコストが掛り、また、仕上げ後の生産量または還元量の低下が危惧される。
- 空気混合泥水掘削の場合、

✓ 生産井の噴出に当たっては、透水性低下リスクが低減されることで噴出の確度並びに生産量の増大が期待される。

✓ 還元井の掘削及び坑内スケールのビット浚渫において、逸泥掘削/浚渫と比較して空気混合泥水・清水を使用した方が還元量が増大したケースがある。



「最新の坑井掘削技術（その３）」に加筆

透水性低下リスクの低減（実績）

還元井改修工事における透水性低下（ﾌｫｰﾒｰｼｮﾝﾀﾞﾒｰｼﾞ）の低減実績

【還元井サイドトラック掘削】

- 同一地区における還元井のサイドトラック掘削に関し、空気混合泥水を使用した場合と使用しなかった場合の最大還元量を比較（サンプル各9坑井）

⇒空気混合泥水使用時の方が約1.2倍の最大還元量

【還元井スケール浚渫】

- 工事前の自然流下量と工事後の最大還元量の差分を工事効果と定義し、空気混合清水を使用した場合と使用しなかった場合の工事効果を比較（サンプル、未使用3坑井、使用9坑井）

⇒空気混合清水使用時の方が約2倍の工事効果

※サンプル数、数値結果に多少のバラつきはあるものの、空気混合泥水/清水使用時の方が高い効果が得られており、掘削ザク/スケールザクを効果的に坑外へ排出できたことで、透水性が回復したと解釈

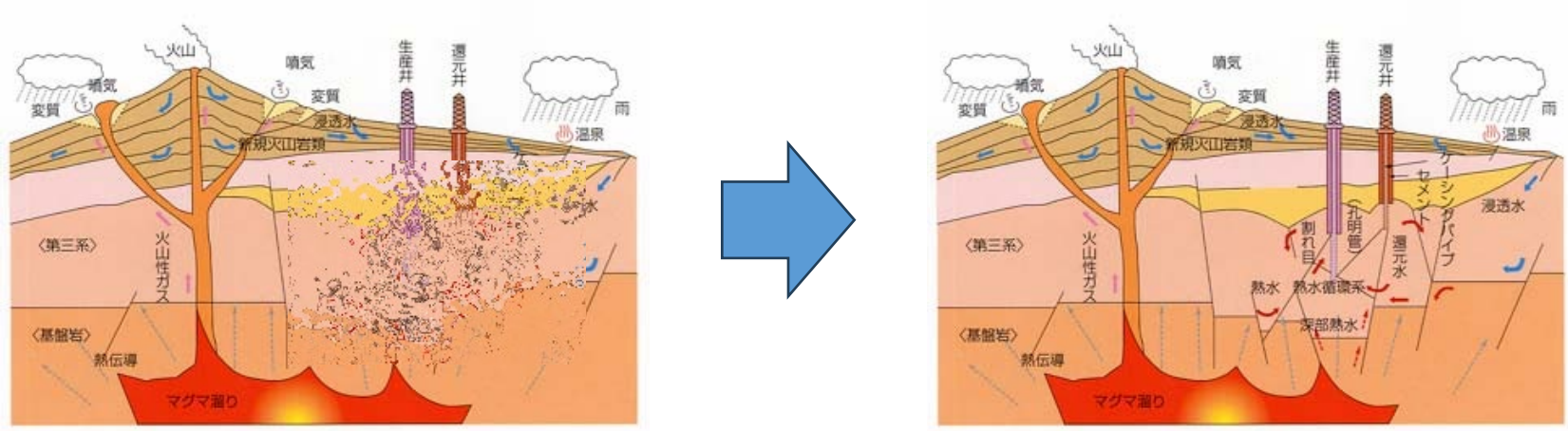
カッティングスの回収

逸泥状況下においてカッティングスを地上回収

逸泥状態でも泥水循環が確立でき、カッティングスを地上回収することができます。

カッティングスから得られる地質等の地下情報は地熱系概念モデル（地質モデル）の精緻化に寄与することになり、特に、オフセットウェルが少ない地域の調査井の掘削では大変有効であると考える。

例：地下情報の収集による地熱系概念モデルの精緻化

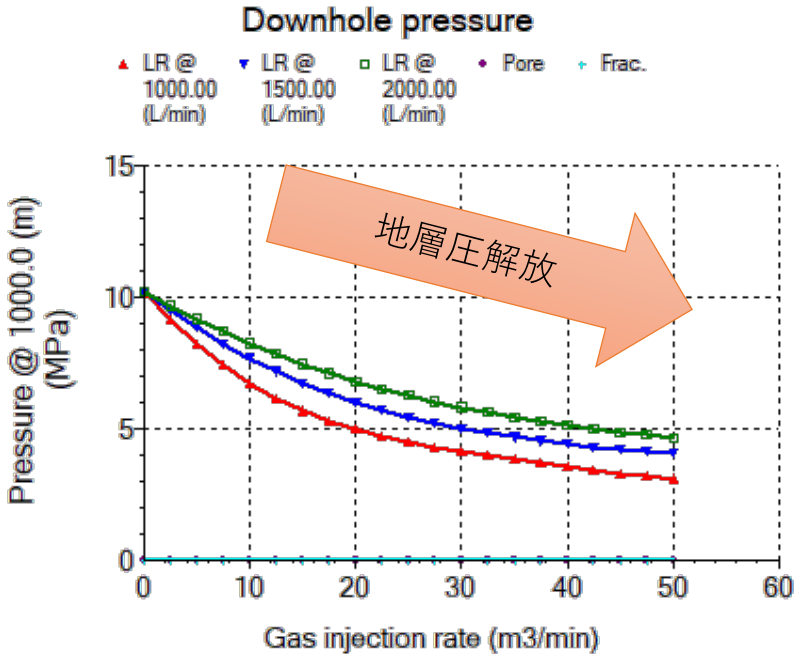


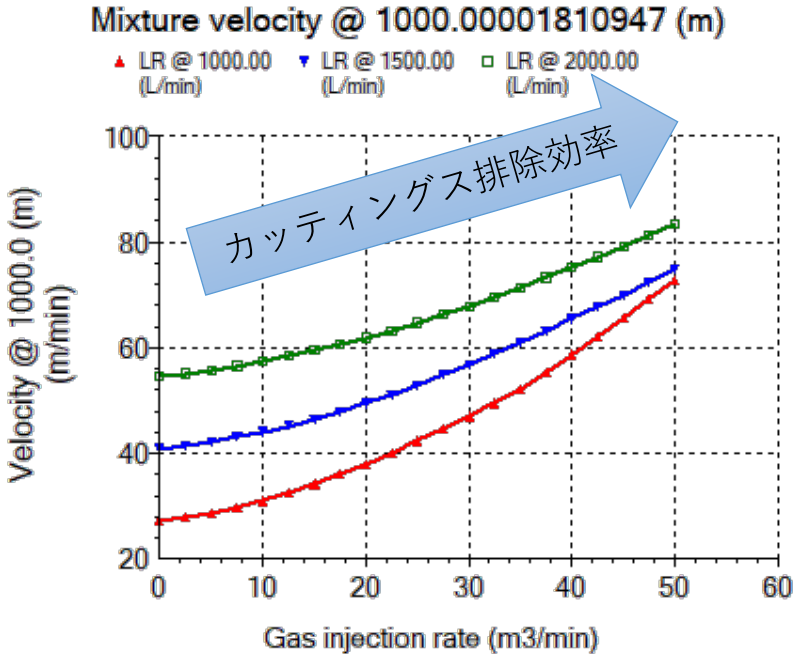
(JOGMEC HPより引用、加工)

掘削工期の短縮化

掘削工期の短縮化

- 掘進率の向上に寄与（泥水柱圧力減による地層圧の解放、アニュラス速度増でカッティングス排除効率化）
- ダウンタイムの低減（逸泥対策、貯水待機）
- 抑留リスクの低減（差圧抑留リスク、Pack-offリスク）





送泥レート1000,1500,2000L/min、送気レート0~50m³/minで変化させたときの解析例

短所

専用の資機材，特殊エンジニア等が必要

- 通常の泥水掘削に加えてコンプレッサー、ローテティングヘッド等の坑口装置並びにエア／マッドセパレーター等の専用資機材を準備する必要がある。
- 送泥量・エア送気量の調整等を行う特殊エンジニアの招聘、腐食ダメージ発生抑制のためインヒビター（腐食防止剤、酸素除去剤、スケール防止剤）の使用、フォーマー・デフォーマーの準備等、通常と異なる泥水管理も必要となる。
- 大容量の高圧コンプレッサーは一部リース会社も保有している一方、ブースターコンプレッサーを国内で運用する企業は限定的のため、余裕をもって資機材を手配する。

坑径拡大・崩壊等による坑内トラブル発生リスク増

- 掘削区間の地層状況から軟弱な岩相が想定される場合、本工法の導入には入念な検討が必要。

坑内フラッシュ・噴出による怪我のリスク増

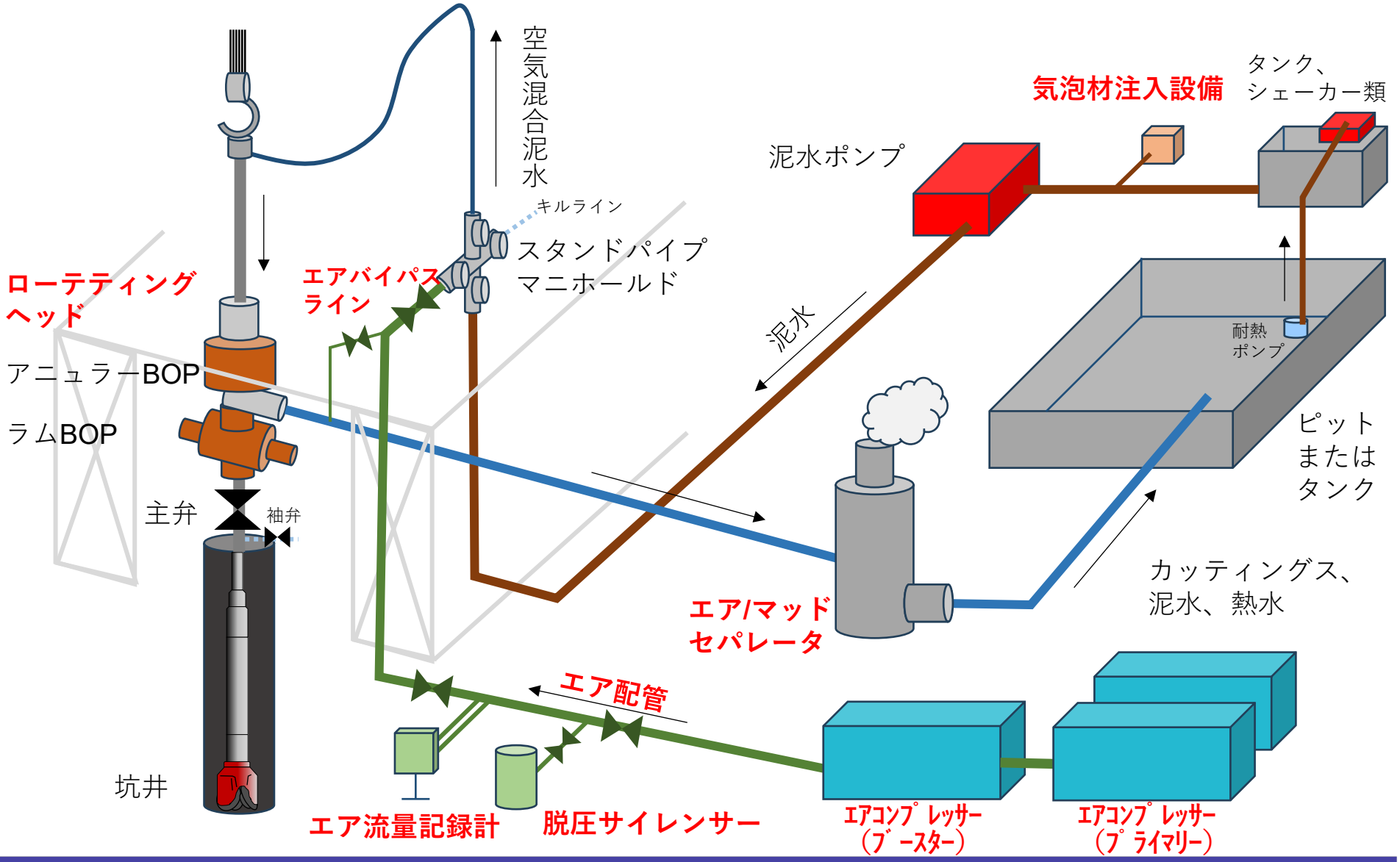
- リアルタイムモニタリングによる坑内状況の把握と適切な流量調整、注水鎮圧系統、暴噴防止装置の日常的な点検や使用訓練の励行。

※複数の逸泥層に遭遇し、且つ、坑内流動（ダウンフロー／アップフロー）がある場合、掘削中の坑内圧力バランスが複雑となることから泥水回帰を得られないケースが多い

必要な機器・設備

- コンプレッサー類
- エアマッドセパレータ
- ローテティングヘッド、ストリッパーラバー
- サブ類（逆止弁）
- パイプマニホールド（コンプレッサ出口、スタンドパイプ入口）
- 計器類
- エア配管
- 流量調整弁、脱圧サイレンサー

配置系統概念図


空気混合泥水
キルライン
スタンドパイプ
マニホールド
ローテティング
ヘッド
エアバイパス
ライン
アニュラーBOP
ラムBOP
主弁
袖弁
坑井
泥水
泥水ポンプ
気泡材注入設備
タンク、
シェーカー類
耐熱
ポンプ
ピット
または
タンク
カッティングス、
泥水、熱水
エア/マッド
セパレータ
エア配管
エア流量記録計
脱圧サイレンサー
ｴｱｺﾝﾌﾟﾚｯｻｰ
（ﾌﾞｰｽﾀｰ）
ｴｱｺﾝﾌﾟﾚｯｻｰ
（ﾌﾟﾗｲﾏﾘｰ）

プライマリーコンプレッサー

役割：大容量圧縮空気の生成（プライマリーコンプレッサー）

機材例：北越工業製　PDSK900S（スクリュ回転型2 段圧縮油冷式）

- 吐出量　25.5 m3/min、吐出圧力　2.41 MPa
- 寸法　長さ 4,670 mm × 幅 2,100 mm × 高さ 2,315 mm
- 重量　7,300 kg
- ディーゼルエンジン
  燃費（70%負荷）：53 L/hr
- 運搬重機　10ton トラック

ブースターコンプレサー

役割：大容量圧縮空気の圧入（ブースターコンプレッサー）

機材例：Ariel製　JGQ-2

- 吐出量　56.6 m3/min、吐出圧力　7.73 MPa
- 寸法　長さ 4,830 mm × 幅 2,270 mm × 高さ 2,410 mm
- 重量　7,700 kg
- ディーゼルエンジン
  燃費（参考）：30 L/hr
- 運搬重機　10ton トラック

エア／マッドセパレーター

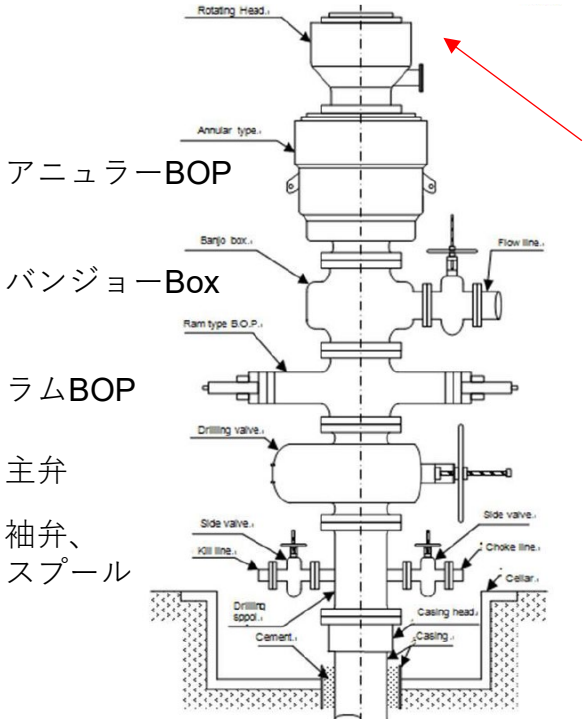
役割：回帰した坑内流体を気体と液体に分離

- 寸法　胴径 1,920 mm φ × 高さ 3,900 mm
- 出口径　8″
- 処理能力　蒸気 30 t/h、熱水 250 t/h

ローテティングヘッド、ストリッパーラバー

役割：掘削中に回帰する坑内流体の作業フロアへの噴出防止

- 寸法　長さ 686 mm × 幅 686mm × 高さ 860mm
- ストリッパーラバー径はドリルパイプ径に適合させ、必ず予備を準備
- 回帰が激しい場合、ラバーとストリングス間からフロア上にリークするケースもあるため、保護具等を必ず着使用



アニュラーBOP

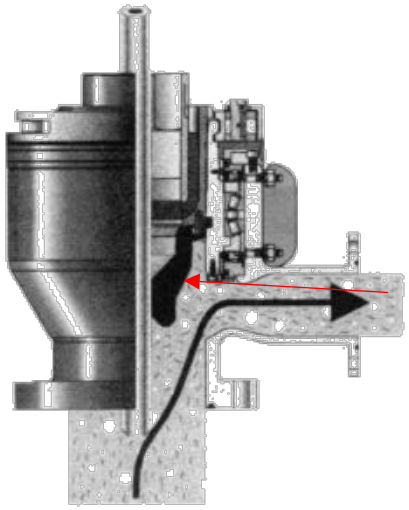
バンジョーBox

ラムBOP

主弁

袖弁、
スプール

ローテティングヘッド



ストリッパーラバー

サブ類

フロートサブ及びフロートバルブ

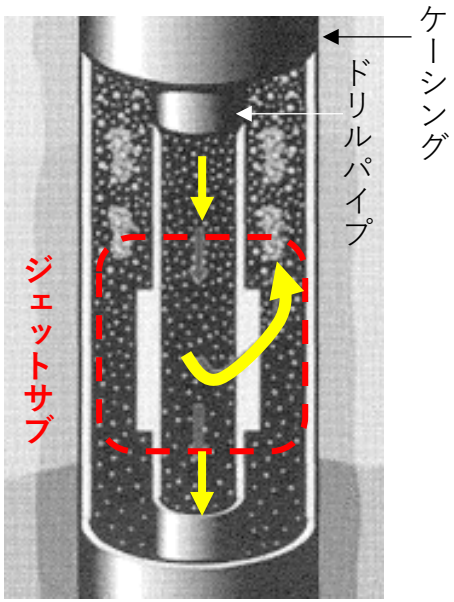
フロートバルブをサブに内挿し、ドリルストリングス内からのエアの逆流を防止

- 編成上部とビット直上に取り付ける
- フラッパータイプは、抑留回復作業や方位傾斜測定等でDP内へのツールの降下を想定して、ストリングス上部にセットする

ジェットサブ

ストリングス途中に組み込まれ、サブ側面のノズルから空気混合泥水を噴出し、アニュラス流体の上昇を補助する

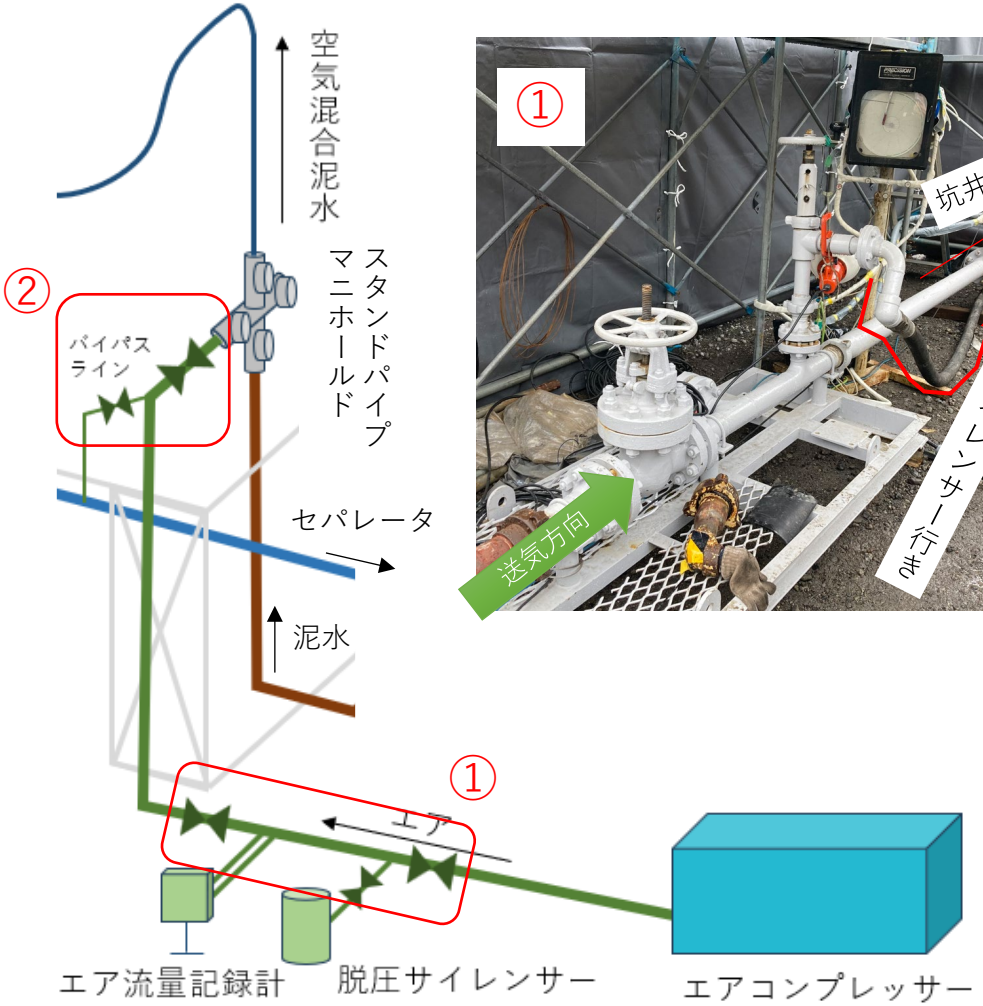
仕様例：ノズル径　10/32” (約8mm)

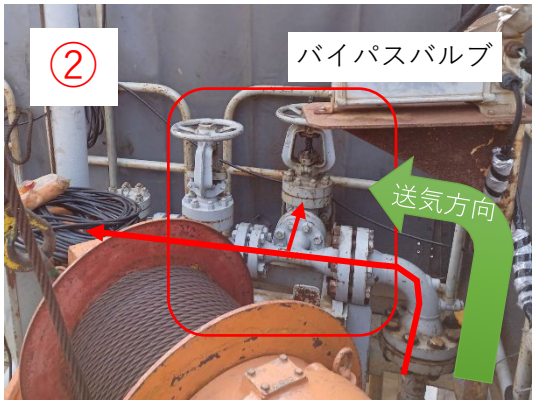


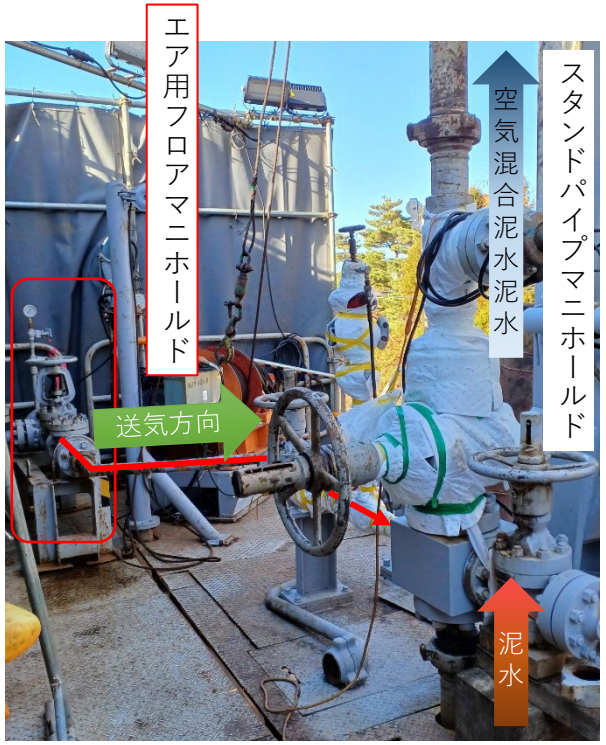
バルブマニホールド

①エア送気量調節（コンプレッサシステム出口）

②エア供給系統の切替（スタンドパイプ入口）







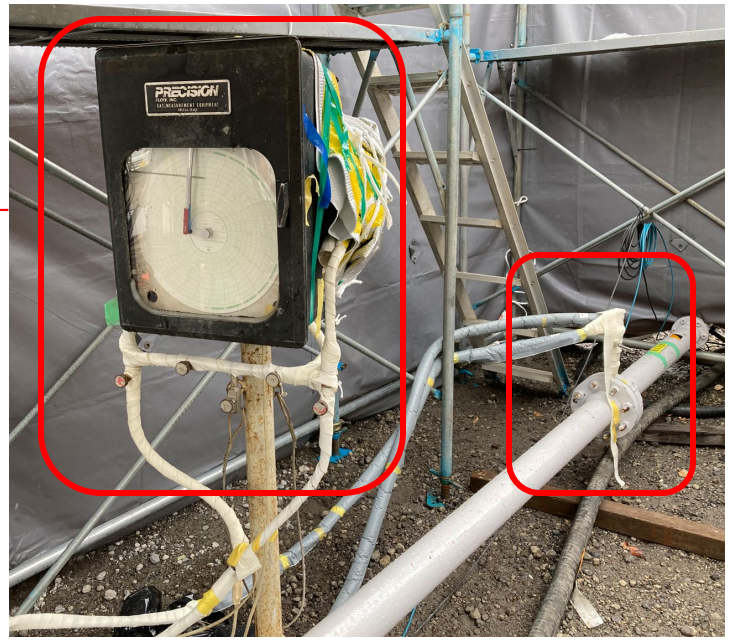
計器類

役割：エア送気量の確認・記録

機器例

- オリフィス付き差圧流量計　OD 4"、オリフィス ID 1.75"
- Barton社製 差圧記録計
- 無線式監視カメラ（回帰状況確認用）

差圧記録計



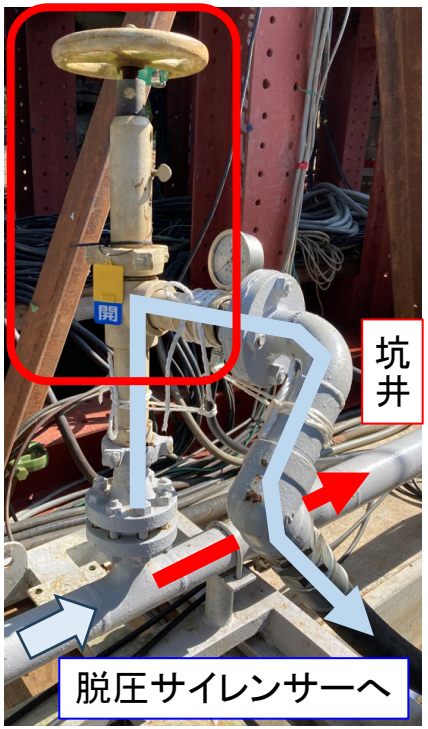
オリフィスフランジ

流量調整弁、脱圧サイレンサー

役割：坑内圧入量の調整

仕様例

- ニードルバルブ
- 基本は全開にし脱圧サイレンサー側へ送気
- 少しずつ開度を絞り坑井側へ送気（全閉ですべて坑井へ送気となる）



エア配管

役割：圧縮空気の輸送

仕様例

- 径　2～3”
- 材質　STPG SCH80
- 耐圧　FIG 206, 2,000 psi（使用圧力の２倍以上の耐圧）
- 設置時は振動防止処置を施す

Ⅱ　空気混合泥水掘削の実務

- 計画
- 組立・解体作業
- 関係法令
- 坑内作業
- 掘削中評価

計画

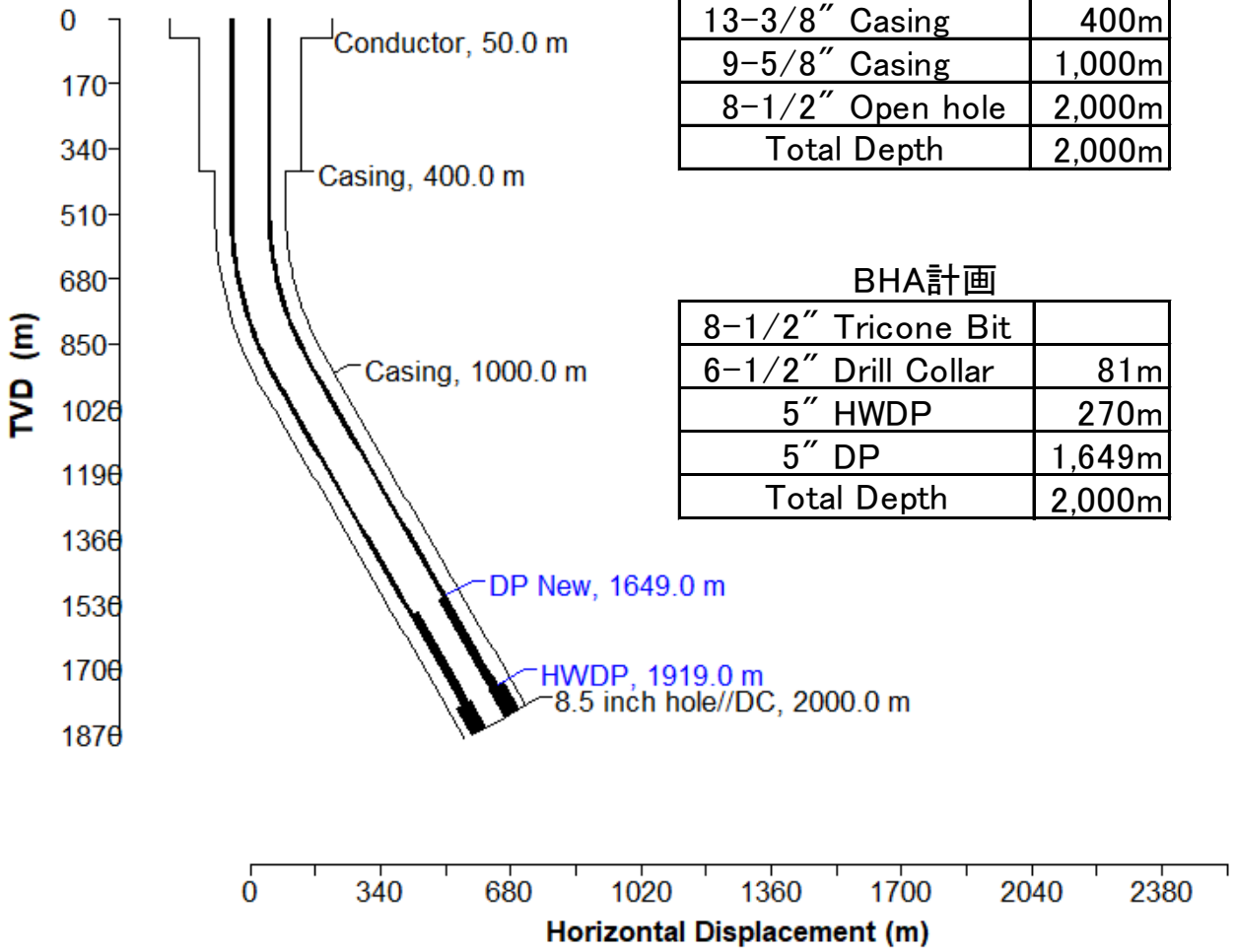
1. 空気混合泥水掘削を計画するにあたり、近傍坑井情報をレビュー
   - ケーシングプログラム、傾斜掘削実績
   - 送泥量、ポンプ圧、ROP、WOB、BHAなどの各種掘削パラメータ
   - 泥水性状、逸泥状況、エア送気量等の空気混合泥水掘削実績
   - 検層で得られた坑井情報（温度、逸泥深度、坑内流動の有無等）

2. レビュー結果および掘削工事計画を踏まえて、推定されるリスクと低減策を取りまとめ、計画立案
   - シミュレーションを実施し、必要となる機材、スペック等を検討

シミュレーション例　入力データの一例

空気混合泥水掘削シミュレーション例

【入力】



Casing Program

20″ Casing	50m
13-3/8″ Casing	400m
9-5/8″ Casing	1,000m
8-1/2″ Open hole	2,000m
Total Depth	2,000m

傾斜掘削計画

KOP	500m
増角率	2° /30m
最大傾斜	30°
掘削方位	150°

BHA計画

8-1/2″ Tricone Bit	
6-1/2″ Drill Collar	81m
5″ HWDP	270m
5″ DP	1,649m
Total Depth	2,000m

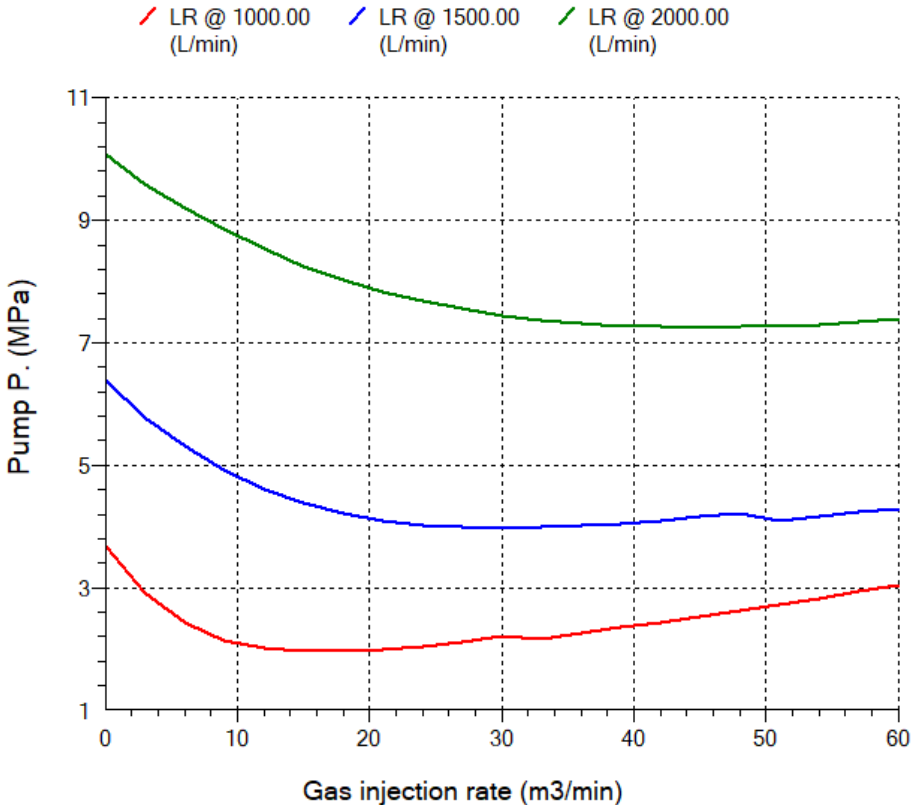
その他

Bit 流路面積	1.1in^2
泥水比重	SG 1.05
PV/YP	15/10

出力データの一例（ポンプ圧力、泥水循環時間）

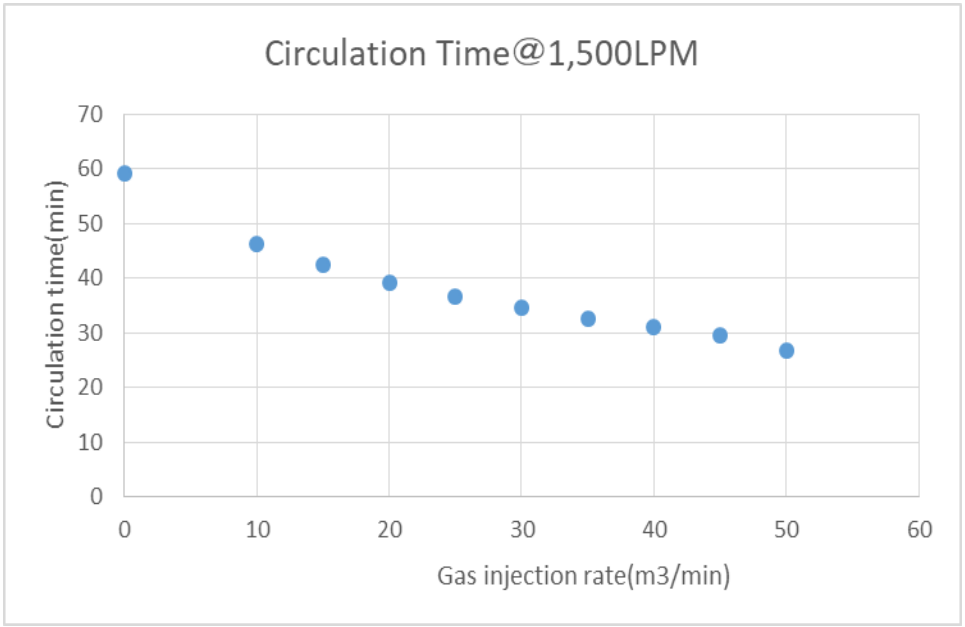
空気混合泥水掘削シミュレーション例

【出力】



ポンプ圧力比較

送気レートが上がるとポンプ圧力も上がる傾向



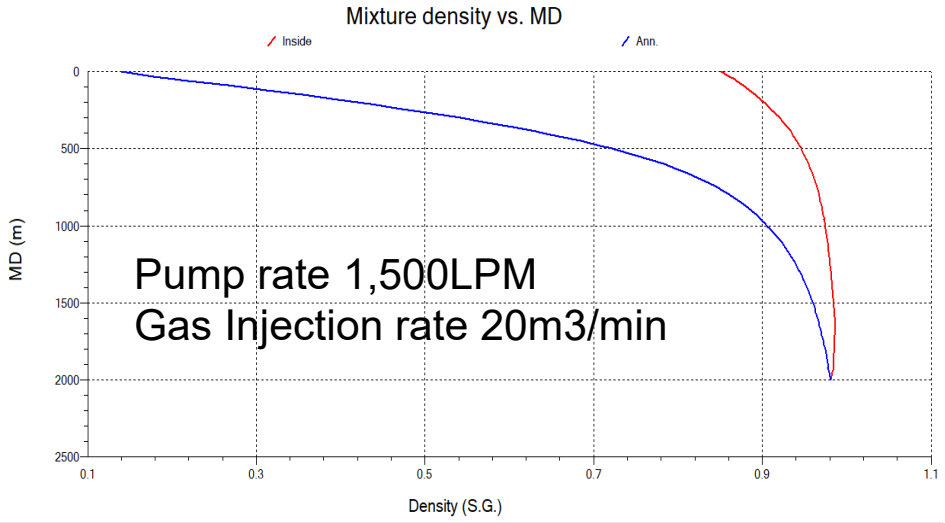
循環時間比較

ビット先端から放出される圧縮空気は浅部に上がるほど膨張するのでアニュラーベロシティが速くなり、循環時間が短くなる

出力データの一例（坑内の泥水見掛け比重）

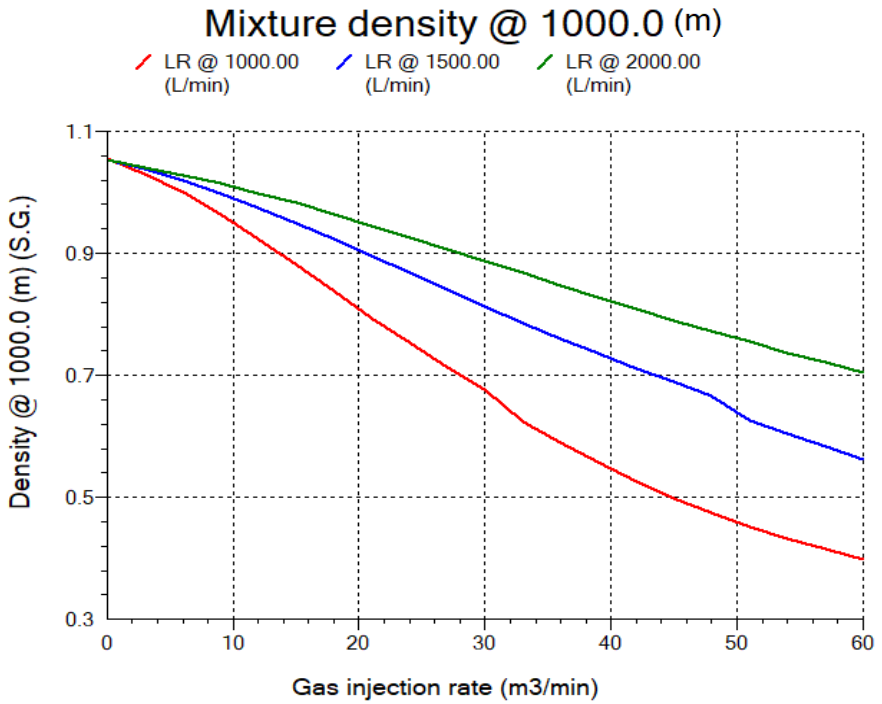
空気混合泥水掘削シミュレーション例

【出力】



循環空気混合泥水の見掛け比重分布

ビット先端から放出される圧縮空気は浅部に上がるほど膨張してアニュラス部の泥水見掛比重は低くなる



エア/Mud比ごとの見掛け比重
（深度1,000m）

1,000mMDのアニュラス部泥水見掛比重
送気レートを比重は反比例

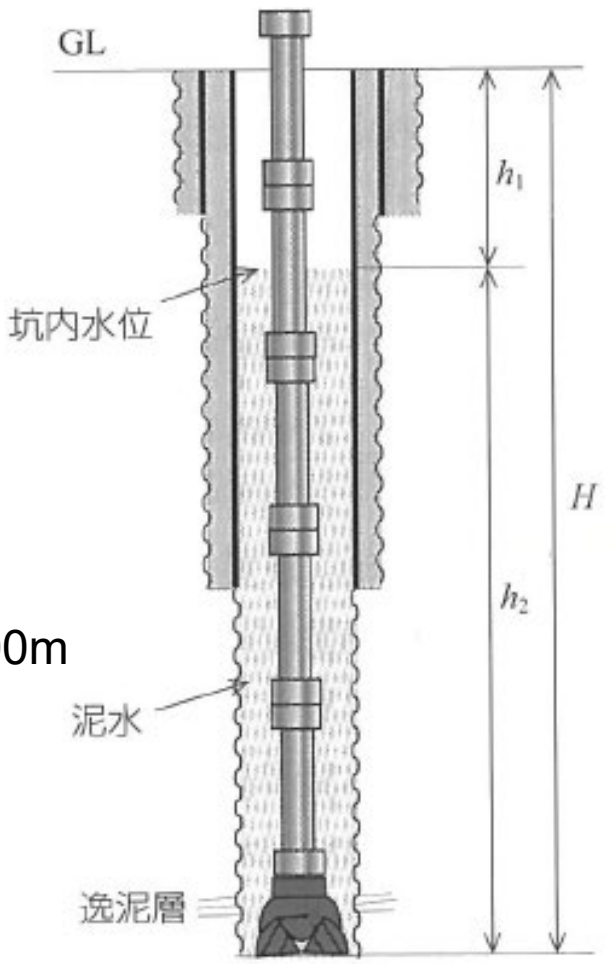
エア比の計算式

エア比とはエア送気レートと泥水送泥レートの比率

貯留層圧力 ≒ 泥水柱圧力となるエア比は次の計算式で算出（エア比（Q_A/Q_M）の計算式（阿部,1986））

$$\frac{Q_A}{Q_M}=\frac{\rho \cdot h_1}{5.166\times\log_e\left\{1+\frac{\rho(H-h_1)}{10.332}\right\}}$$

Q_A：送気レート（m^3/min）
Q_M：送泥レート（m^3/min）
h_1：坑内水位（m）
H：垂直深度（m）
ρ：泥水比重（S.G.）



計算例：

H=2,000m、h_1=400m、泥水比重1.05、逸泥層深度約2,000m

⇒ Q_A／Q_M ≒ 16、 送気レート：送泥レート ≒ 16:1

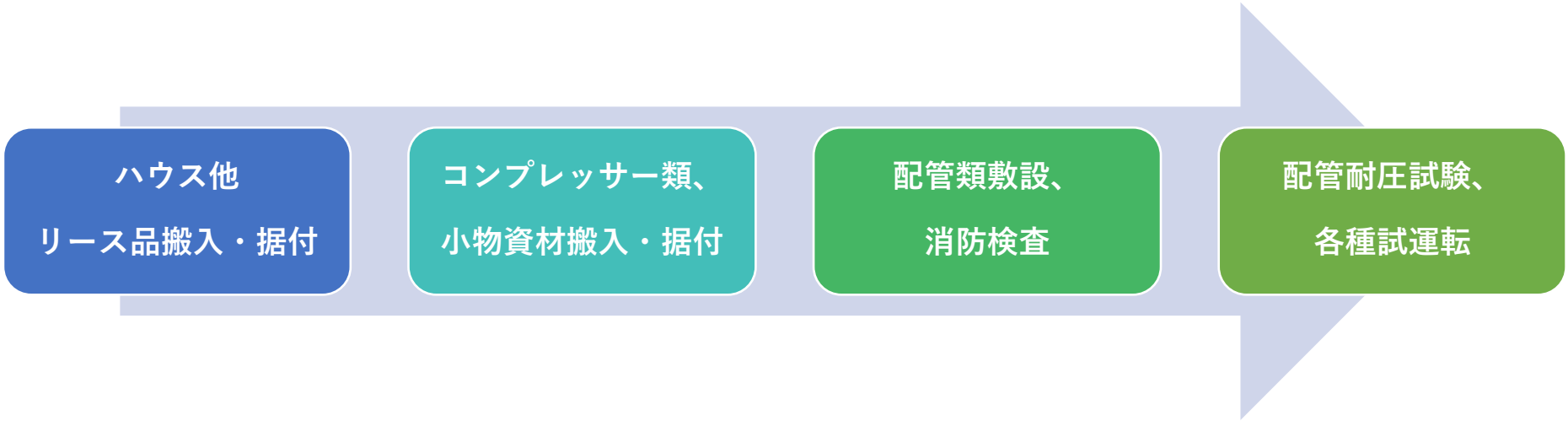
⇒送泥レート1,500L（1.5m^3）/minの場合、送気レートは24m^3/minが必要となる

「掘削技術の知識と実務 ロータリー式掘削編」より

組立・解体作業

現地における組立の標準工程は4日程度、解体の標準工程は3日程度
（プライマリーコンプレッサー2台、ブースターコンプレッサー1台）

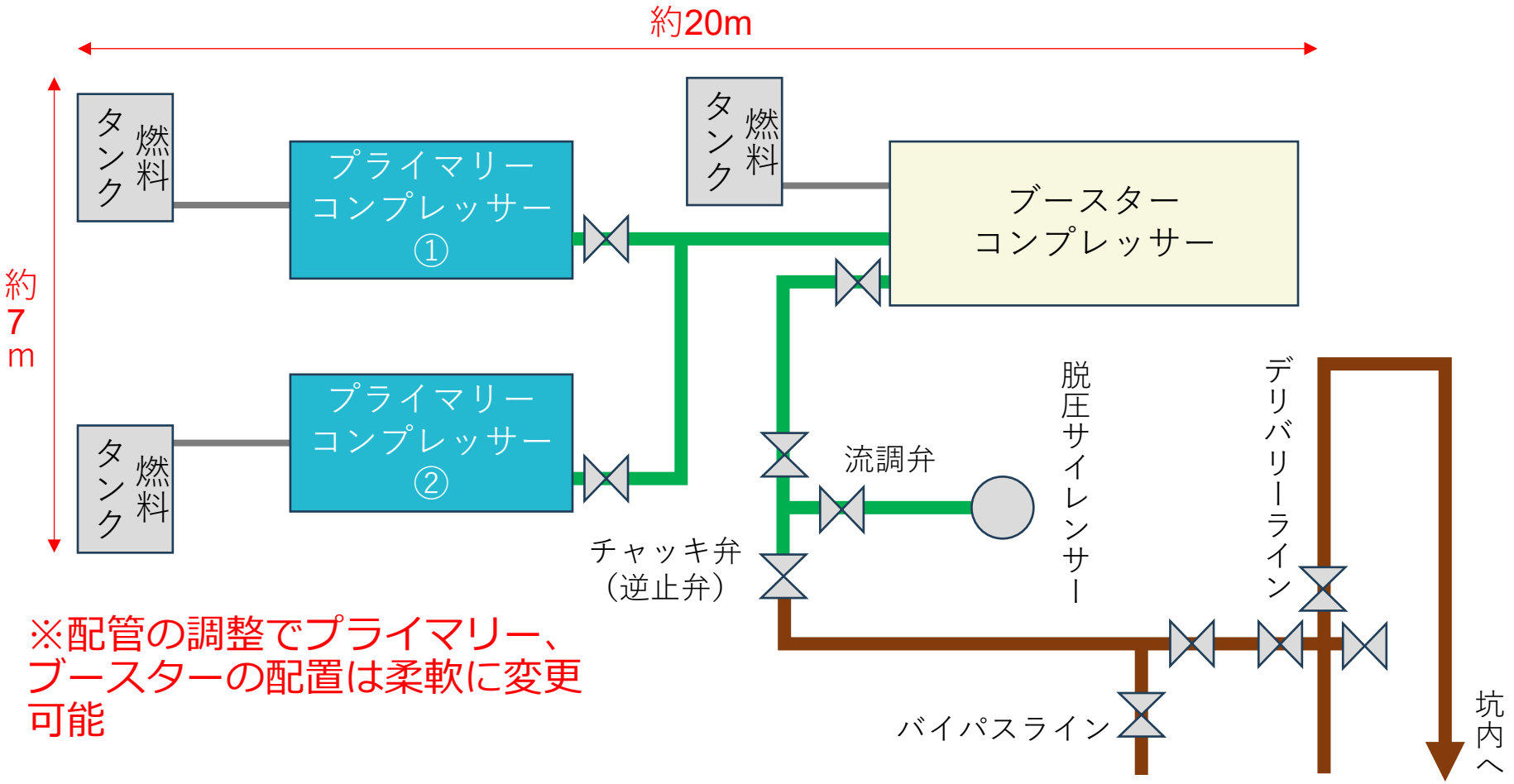
※エア配管敷設、エアマッドセパレータ―他設置は含まず



- 事前に現地視察を行い、敷地や搬入路条件から詳細工程を検討
- 運搬重機（フェリー含む）の手配、運搬にかかる日数等の観点から、半月～１か月程度の余裕をもって動員手配（現場ごとで協議）

設備配置例

- 設備配置例（プライマリー2台 + ブースター1台）
  エア供給量 最大 約50 m^3/min、
  吐出圧 最高 約7MPa(高圧ガス保安法適用除外とする場合は5MPaが最高)



関係法令

【高圧ガス保安法】

圧縮空気の製造

【消防法】

少量危険物の貯蔵もしくは危険物貯蔵所（取扱所）の設置

【道路交通法】

輸送に使用するトレーラーおよびクレーンの通行

高圧ガス保安法

法令	適用を受ける事項	申請先
高圧ガス保安法	圧縮空気の製造 製造使用する圧縮空気が装置の出口で35℃の圧力に換算し、5MPa以上で生産量300m^3/日以上は第一種高圧ガスとなり許可申請が必要 ※第一種高圧ガス：希ガス、窒素、二酸化炭素、フルオロカーボンまたは**空気** ⇒5MPa未満であれば適用除外	各都道府県

※ ブースターコンプレッサー出口の圧縮空気圧力が5.0MPa未満で運用（空気混合泥水掘削）することで高圧ガス保安法に関する許認可申請は行わない

消防法

法令	適用を受ける事項	申請先
消防法 もしくは火災予防条例	少量危険物の貯蔵もしくは危険物貯蔵所（取扱所）の設置 ※種々の条件（使用予定機材、工事予定地の燃料手配タイミング、指定数量等）から検討	設置する場所の所轄消防署

【九州での実績】

コンプレッサー類運転に際しては、各コンプレッサーの消費量は約1,000リットル/日のため、990リットルの軽油燃料タンクを3基設置し毎日給油

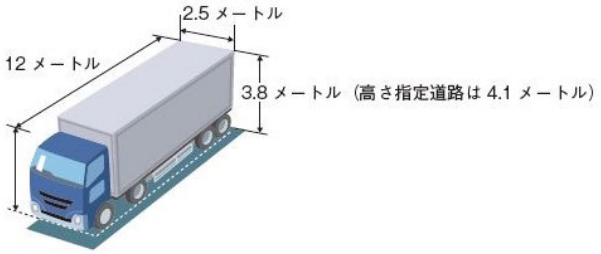
消防法第９条の４に規定する指定数量（経済産業省 関東経済産業局 HPより引用）

原油	危険物第４類第一石油類	200リットル
揮発油	危険物第４類第一石油類	200リットル
灯油（ジェット燃料油を含む）	危険物第４類第二石油類	1,000リットル
軽油	危険物第４類第二石油類	1,000リットル
重油	危険物第４類第三石油類	2,000リットル
石油ガス		5,000キログラム

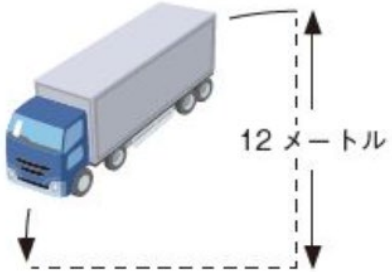
道路交通法

法令	適用を受ける事項	申請先
道路交通法	輸送に使用するトレーラーおよびクレーンの通行（下記制限を超える車両） ただしトラックで輸送可能であればクレーンの通行のみが対象 ※ブースターコンプレッサーは機種によってトレーラーでの輸送となることもある	国土交通省 ※通行許可はオンライン申請にて許可取得可能 （http://www.tokusya.ktr.mlit.go.jp/PR/index.html）

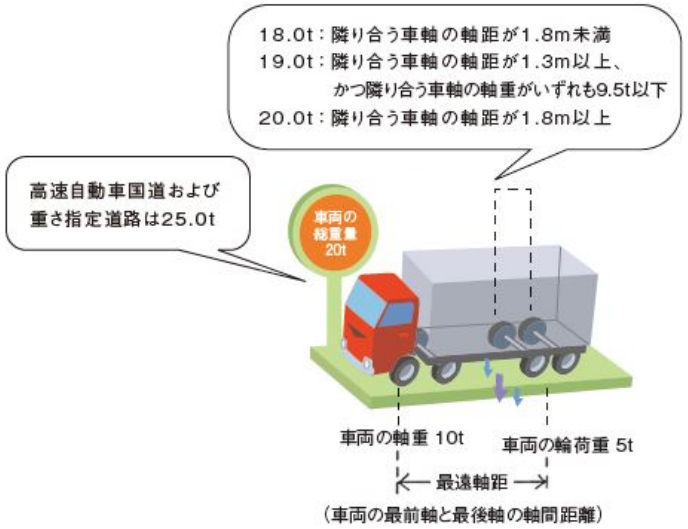
車両の幅、長さ、高さ



車両の最小回転半径



車両の総重量、軸重、隣接軸重および輪荷重

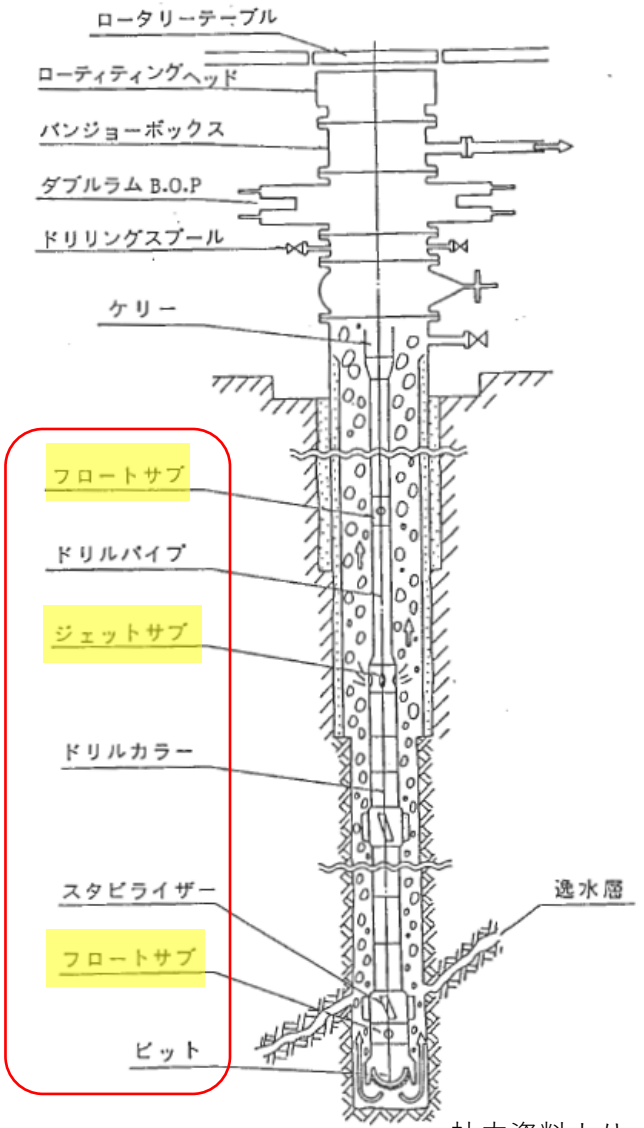


（イラスト出典：特殊車両通行ハンドブック2019）

坑内作業（掘削編成等）

- スタビライザー編成
  - ビット + フロートサブ + スタビ + DC + HWDP + DP + … + ジェットサブ + DP + フロートサブ + DP + …

- DHMや、PDCビット使用時の留意点
  1. ポンプレート毎の圧力を確認し送気可否を判断
     （最大使用可能圧力 5 MPa を超えないか）
  2. 低ポンプレートでも上限を超えていた場合は掘削工事会社と協議し、オープンノズルにする or マッドモーター等を外す等を実施



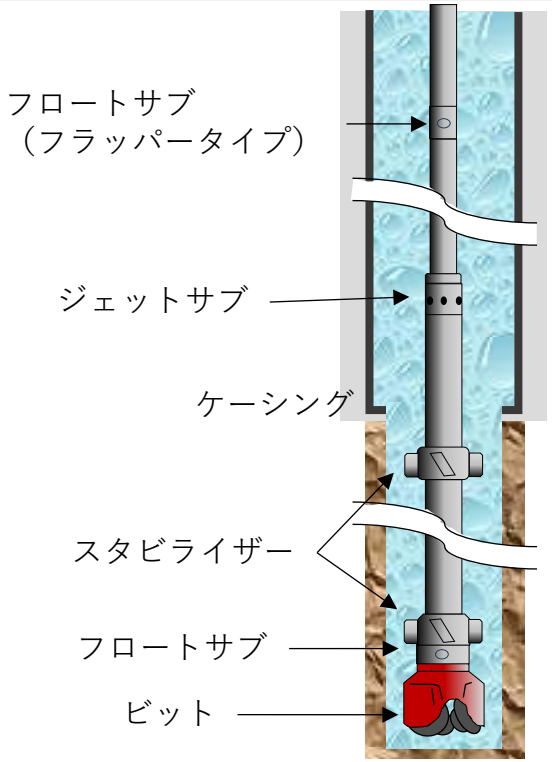
社内資料より

坑内作業（掘削編成　降管）

- 降管

1. ビットを取り付け、降管開始
2. フロートサブをビット直上に取付
3. STB、DC、HWDP、取り付け、DPスタンド内に（ジェットサブおよび）フロートサブ（フラッパータイプ）を取付
4. ビットが裸坑に入る1～2ジョイント上でストリッパーラバー取付

   ※ケリー掘りの場合、ラバー内側の摩耗軽減のためケリーにドライブブッシングを取付
5. ドリルパイプ内外に腐食防止剤（コロージョンインヒビター）を塗布 or 泥水添加しながら降管継続




ドライブブッシング

坑内作業（泥水循環）

- 循環

1. 坑底確認後に送泥のみを行い、ノズル詰まりが無いかを確認、スタンドパイプへエア送気開始
   - ➢ 最初のエア量は水位や逸泥量を考慮し決定
   - ➢ エアは徐々にを上げてフラッシング、キックしないように注意
2. 圧力変動、回帰状況をモニタリングしながらエア送気量、送泥量を調整。回帰が少なければ徐々にエア量を上げる、またはポンプ量を下げ、エア比を上げる
3. 循環が確立したら掘削を開始
   - ➢ 回帰温度が急上昇した場合、まずはポンプ量を上げ（エア比を下げ）冷却効果を高める、またはエア量を下げる

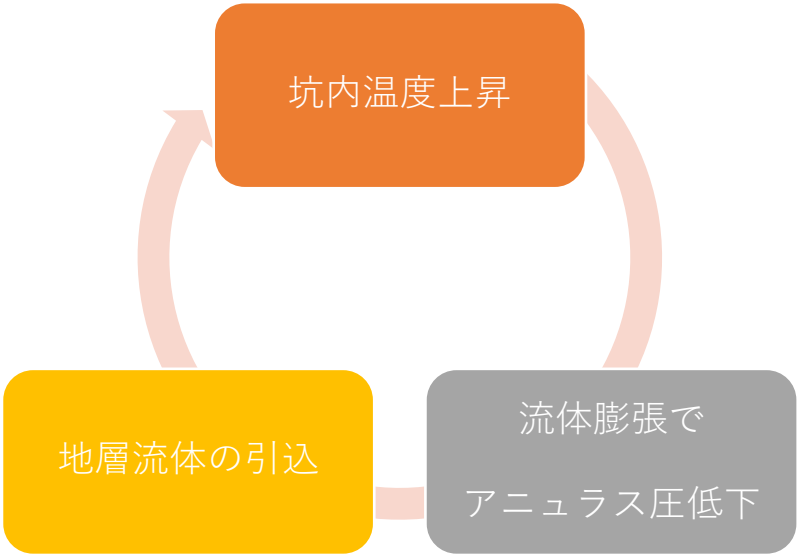
坑内作業（泥水循環）

・理想的な泥水循環は、若干のオーバーバランス（100L/min程度の逸泥）

➢ 完全なアンダーバランス（回帰量＞送泥量）の場合、
回帰泥水が貯泥設備容量をオーバーして環境事故となるリスク
坑内温度が上昇しフラッシングやツールスを破損するリスク
⇒　泥水が回帰するピット・タンクの水位レベルと泥水温度は常時監視する

※無線通信機器や遠隔カメラ等を活用し、掘削クルーと連携しオペレーションを管理！


回帰状況、ピットレベルをしっかり管理！



坑内作業（追坑、揚管）

- 追坑
  坑内の圧力バランスをできるだけ崩さないように素早く追坑
  1. 掘削後、マニホールドのバイパスバルブを開け、エアをバイパス
  2. 送泥のみでビット直上のフロートバルブより上部のDP内部のエアを泥水に置換
  3. ストリングス内からの逆流に注意しながらパイプを継ぎ足し

TDS掘削は、スタンド（3ジョイント分）での追坑が可能で、1ジョイントでの追坑となるケリー掘削よりも追坑及び循環中断の頻度が抑えられ、坑内圧力バランスが崩れにくく有利である

- 揚管
  1. 掘削完了後、空気混合泥水でザク上げ、埋没除去
  2. エアをバイパスし、坑内容量分程度の送泥により坑内に残ったエアを排出
  3. コロージョンインヒビターを塗布しながら編成を揚管

坑内作業（掘削泥水の調泥）

- 循環泥水内に緻密で丈夫な泡の形成

  掘削流体にフォーマーを添加すると圧縮空気が均質に混合され易い

  空気混合清水の場合、圧縮空気が不均質となりエアコラムが形成される傾向あり

  ✓サクションタンクにフォーマーを添加

  ✓マッドポンプのエア噛み防止のため回帰泥水にデフォーマーを使用

- ファンネル粘性の保持

  地層流体を引き込みと泥水のファンネル粘性が低下する

  ✓例）8-1/2”坑掘削場合、ファンネル粘性 40秒以上となるよう適宜調泥

- ドリスストリングス等の腐食対策

  空気混合泥水掘削中は泥水掘削時と比べてドリルストリングス等が空気や火山性ガスと接触しやすく、腐食の進行が速い

  ✓pHは10~12に維持

  ✓ガス腐食対策として各種除去剤を混入

  ✓腐食防止剤（コロージョンインヒビター）、酸素除去剤、スケールインヒビター

掘削中評価（掘削データ他監視記録）

- 掘削データ他監視記録

  静圧、差圧、ポンプ圧、送泥量、回帰状況をモニターし、状況に応じてエア送気量及び送泥量を調節

  定期的に数値を記録

  ※　協力会社ではマッドロギングのような連続記録システム（デジタル）を開発中

場 所 ：　　No.：　1

No:

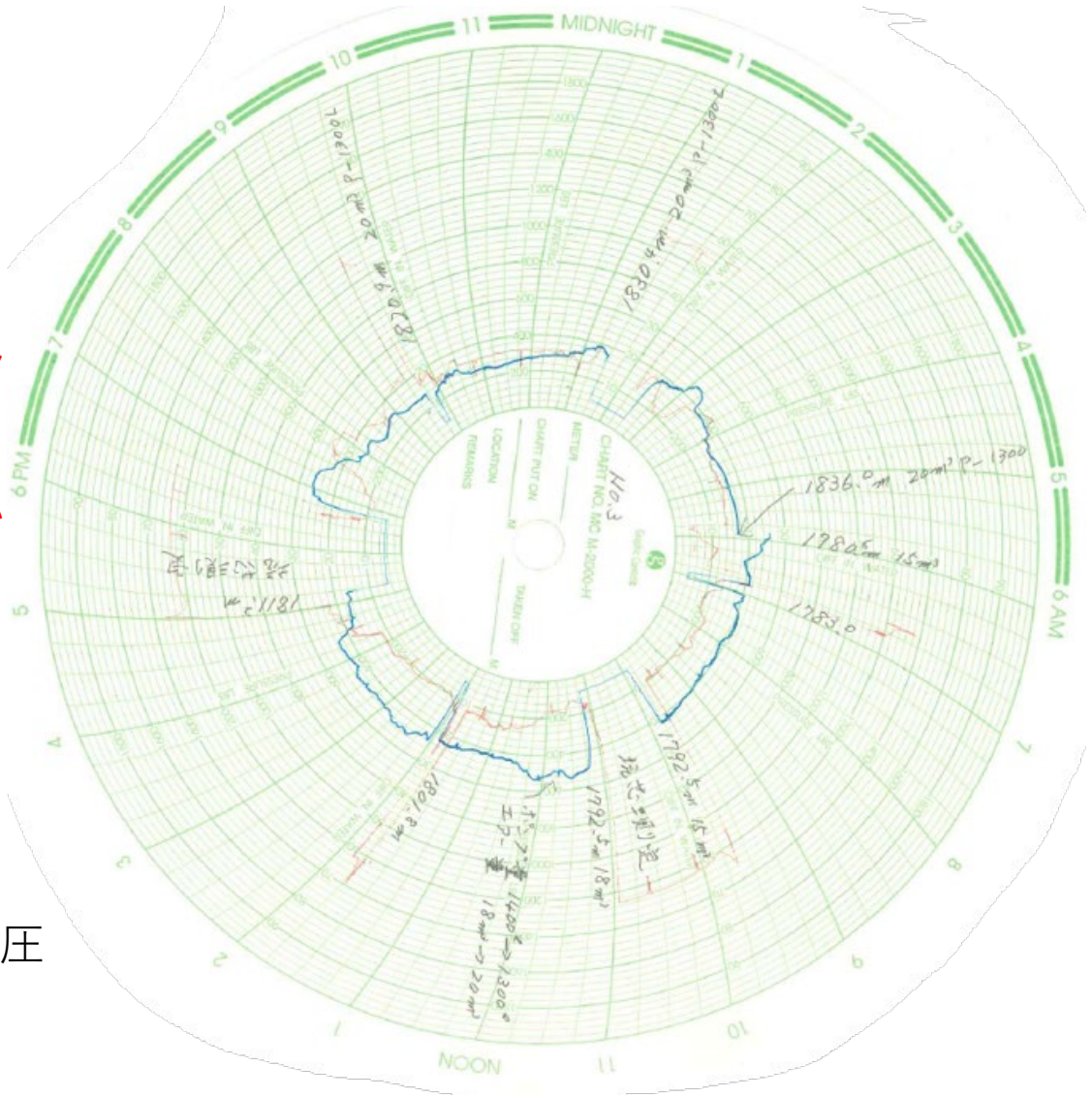
日 時 ：　月　日(　)　　6:00～6:00　　天気：　（ 晴 ）　　記録

時刻		No.1 Comp (PDSJ1100DP)			No.2 Comp (PDSJ1100DP)			Booster Comp (JGQ-2 2号機)					Mud-Air					備　考
	深度	Rotation	Pressure	Temp	Rotation	Pressure	Temp	1st Suction	1st Discharge	Rotation	No.1 Out	No.2 Out	Pump	Pres	差圧 (H_2O)	エアー流量 (差圧換算)	Air/Mud Ratio	
	m	rpm	MPa	℃	rpm	MPa	℃	MPa	MPa	rpm	° F	° F	l/min	PSI	in	m³/min	XX : 1	
7:00																0	.0:1	
8:00																0	.0:1	
9:00																0	.0:1	:40コンプレッサー始動、ブースター始動
10:00																0	.0:1	
11:00	457.7															0	.0:1	:03送気:10回帰
12:00	463.3	2150	1.2	113				1	2		105	95	1000	270	6	11.5	11.5:1	:22バイパス
13:00	463.3	2150	1.2	113				0.6	0.5		80	80				0	.0:1	:13送気:17回帰
14:00	470.0	2150	1.24	113				1	2		105	95	1000	270	6	11.5	11.5:1	:50バイパス
15:00	473.8	2150	1.2	113				0.6	0.5		80	80				0	.0:1	:55送気:58回帰
16:00	475.0	2150	1.25	113				1.05	2.4		105	90	1000	340	5	11.7	11.7:1	:35バイパス

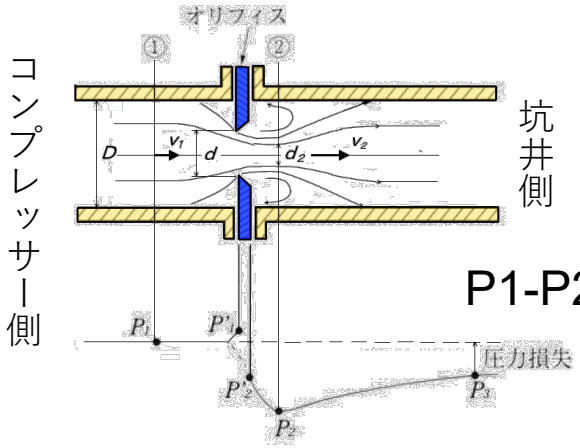
社内資料より

掘削中評価（エアチャート）

- エアチャート
  - オリフィス前圧（青線）
  - 差圧（赤線）
  - 一周で24時間分を記録



- オリフィス前圧と差圧からエア送気量を算出
- 前圧、差圧の変化（変曲点）からドリリングブレイクを推定



P1-P2が差圧