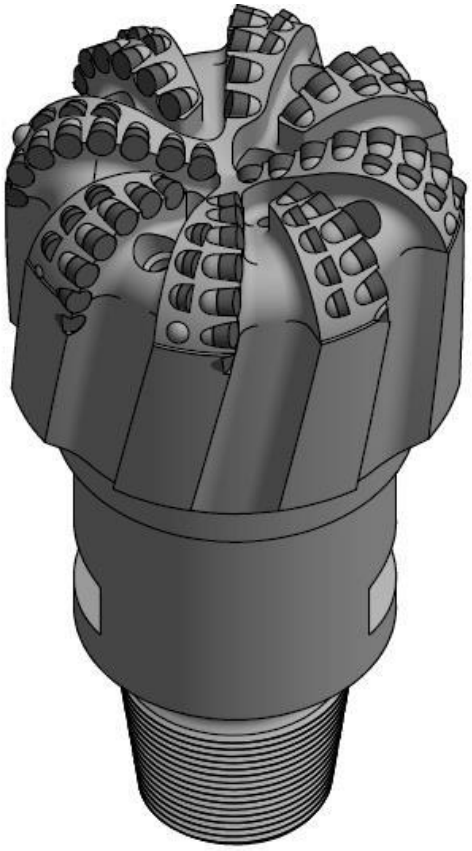
令和 2 年度 - 令和 3 年度
「地熱貯留層掘削技術（PDC ビット）
実用化のフォローアップ共同研究」

# 地熱井用 PDC ビットのガイドブック



令和4年6月

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構

株式会社クリステンセン・マイカイ

＜目次＞

＜図表目次＞

## 1.　地熱井用 PDC ビットのガイドブックについて

本ガイドブックは，平成 27 年度から平成 30 年度の 4 年間にわたり実施した「地熱貯留層掘削技術開発（地熱井用 PDC ビット（PDC：Polycrystalline Diamond Compact：多結晶ダイヤモンド焼結体））」において設定した 3 つの開発目標「掘削能率：従来技術の 2 倍向上」，「耐久性：従来技術の 5 倍増」および「ビットゲージ落ち：1/16 インチ以内」の全てを達成した地熱井用 8-1/2 in.PDC ビット（都築他，2022）ならびにそのビットをベースに令和 3 年度から令和 4 年度の 2 年間にわたり「地熱貯留層掘削技術開発（PDC ビット）実用化のフォローアップ共同研究」において製作した 2 丁の地熱井用 8-1/2 in.PDC ビットの仕様をベースとして，石油技術協会編ビットマニュアル（1995）に基づき，新たに地熱井用 PDC ビットの取り扱い内容等を取りまとめたものである。

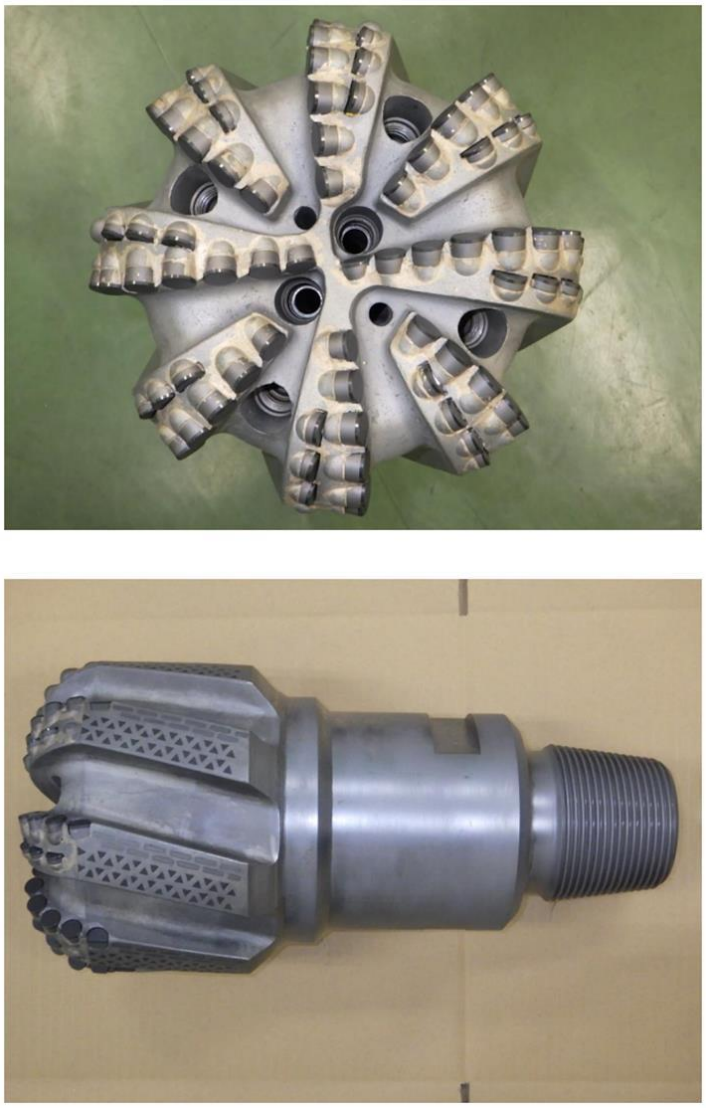


図 1　当該 8-1/2 in.PDC ビット

## 2. PDC ビットについて

### 2-1. PDC ビットの特性

多くの地熱井掘削では，断裂系の地熱貯留層を掘り抜くために傾斜井掘削が採用される。傾斜井掘削でマッドモーター（8.用語集）を使用すると，ビット回転が高速回転になるためにローラーコーンビット（8.用語集）ではベアリング部が損傷して脱落する危険性が伴う。ベアリング部のない PDC ビットはその危険性を回避できるため，マッドモーターの使用に適したビットと言える。ここで，PDC ビットで高い掘進率と長いビット寿命を得るための留意点を提示する。

### 2-2. PDC ビットの各部名称

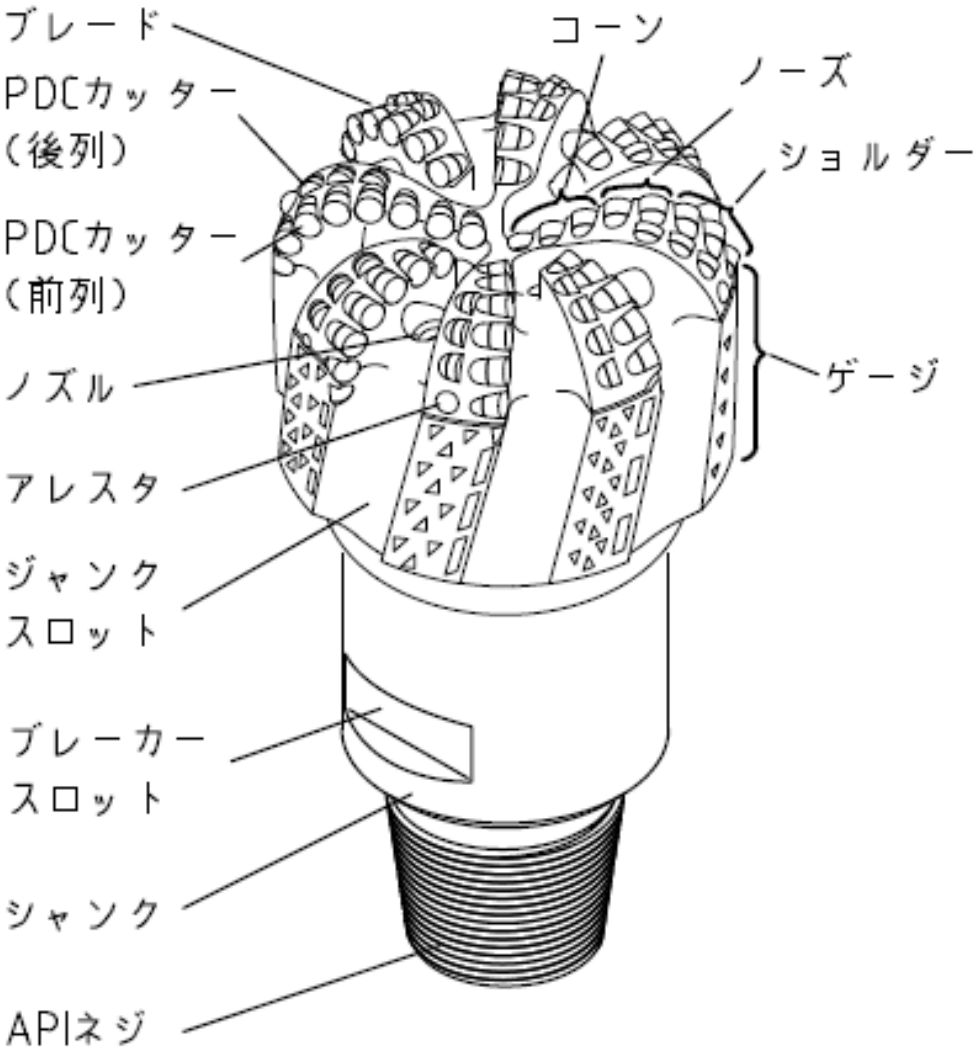



図 2　PDC ビットの各部名称

## 3. PDC カッター

技術開発した PDC ビットは，PDC カッターと PDC ビットデザインの両面から開発を実施し，9 丁の PDC ビットをその両面からアプローチして製作し，現場実証試験と室内試験を実施して，ノズル（8.用語集）数，ハイドロリクス，カッター取り付け方法，カッター取り付け角度およびカッター配置の検討等，様々な課題を解決して現状モデルに到達した。

中硬岩から硬岩での使用を想定している技術開発した PDC ビットに要求される PDC カッター（以後，カッターという）については，耐摩耗性に加え，耐衝撃性の向上が求められてきた。しかしながら，通常はカッターの組成上の特性から，耐摩耗性を上げれば耐衝撃性が下がり，耐衝撃性を上げれば耐摩耗性が下がるといった相反関係になるため，両方の性質を満足すべきカッターの改良が進められた。

技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットで新たに開発したφ13.44 mm の PDC カッターは，耐摩耗性，耐衝撃性の両方の性質を具備したカッターとして改良が実施されたものである。

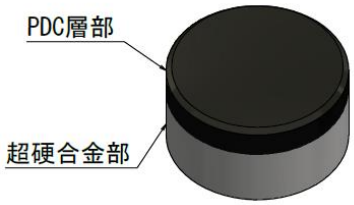



図 3　PDC カッター

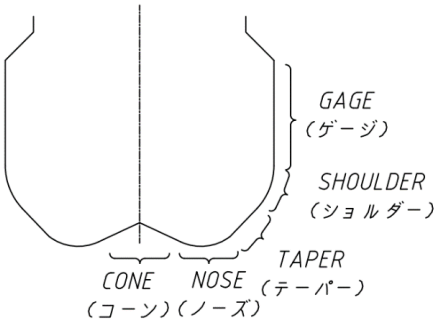
## 4. ビットデザイン

IADC（International Association of Drilling Contractors）コード（Brandon et al. 1992）による PDC ビット区分を表 1 に示す。

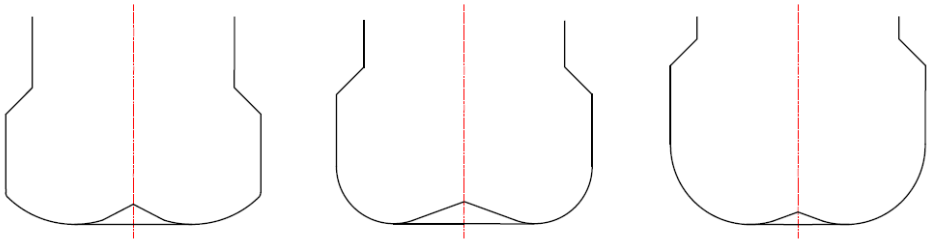
表 1　IADC コードによる PDC ビット区分

| PDC ビットの IADC 分類コード | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ビット ボディ | | フォーメーション（カッター数） | | | カッターサイズ（直径） | | ビット プロファイル | |
| M | マトリックス | 1 | Very soft | 30 個未満 | 1 | 24 mm 以上 | 1 | Fishtail |
| | | 2 | Soft | 30 個以上 40 個未満 | 2 | 14 mm 以上 24 mm 未満 | 2 | Short |
| S | スチール | 3 | Soft to medium | 40 個以上 50 個未満 | 3 | 8 mm 以上 14 mm 未満 | 3 | Medium |
| | | 4 | Medium | 50 個以上 | 4 | 8 mm 未満 | 4 | Long |

PDC ビットのビットプロファイル（8.用語集）は，ビットの中心線からゲージまでのコーン，ノーズ，テーパー，ショルダー，ゲージの最大 5 つの領域を含んだビットの概略形状を表し，ビット径に対するノーズからテーパー部を含むショルダー領域までの放物線の長さによって概ね図 4 に示す IADC コード 2，3，4 に区分される。




最大 5 つの領域から構成されるビットの概略形状



ショート：2　　ミディアム：3　　ロング：4

図 4　ビットプロファイルの IADC コード

技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットは，マトリックスボディ（8.用語集）(M)，カッター数 50 以上(4)，カッターサイズ 8 mm 以上，14 mm 未満(3)，ビットプロファイル(3)に相当するため，IADC コードは M433 に区分される。以下に，技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットのビットデザインについて示す。

4-1.　ビットボディ

ウォーターベースの掘削泥水にはマトリックスボディの PDC ビットが主流であり，スチールボディ（8.用語集）に比べてコスト増となるが耐摩耗性に優れているため，技術開発した PDC ビットではタングステンカーバイドを主成分とするマトリックスボディを採用している。

4-2.　ゲージ

技術開発した 8-1/2　in.PDC ビットは，傾斜井掘削用のマッドモーターとロータリードリリング（8.用語集）の併用による高速のビット回転使用に対して，マトリックス母材からなるスパイラル形状のゲージブレード表面の耐摩耗対策として，超硬および TSP（Thermally stable Polycrystalline：熱安定性多結晶ダイヤモンド）（8.用語集）チップを埋め込んだゲージ強化対策を施しており，ゲージ部のカッター設置角度についても耐摩耗性向上に関しての特許を取得している（特許第 6543297 号，発明の名称：PDC ビット，特許権者：独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構）。

更には，ビットマニュアルによれば，以下の使用方法ではゲージを長くする必要があるとされ，技術開発した 8-1/2　in.PDC ビットでは，このような使用方法に適合可能なゲージ長を採用し，ロータリー掘削時の直進安定性を向上させている。

・坑芯軸に対して真直ぐに掘る場合（垂直井なら垂直に，傾斜井なら沿角に掘る。）
・マッドモーターで掘削する場合（モーターのバックトルクによる Left　Hand Walk（平断面図上の坑跡が左に向こうとする動き）の影響を受けないため。）

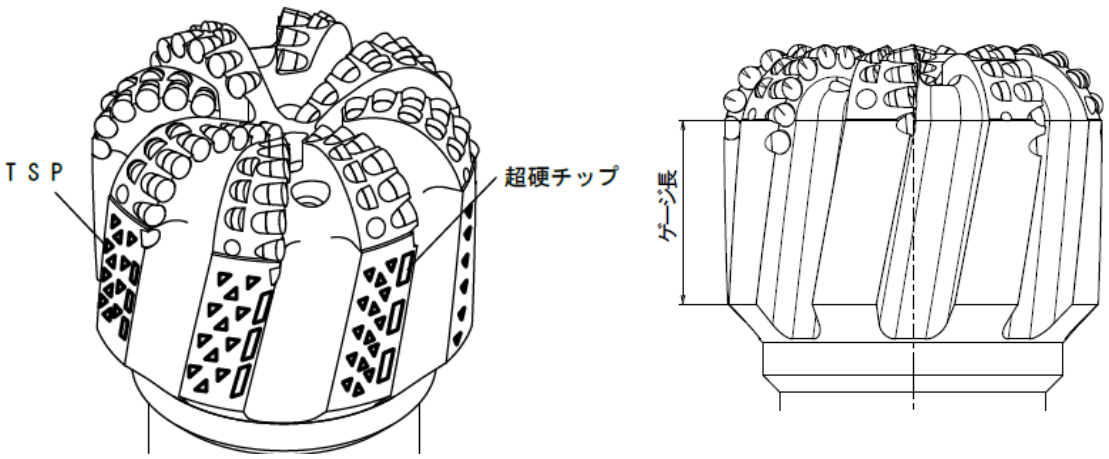



図 5　ゲージ部

4-3.　PDC カッターの配置方法

(1)　フェース用カッター（ビット刃面）

フェース用カッターには，ブレード前面に配置している 50 個の前列カッターに加えて，切削負荷が高い刃面領域には前列カッターと同一円周上に配置した後列カッターを合わせて 25 個配置している。

(2)　ゲージ用カッター

ゲージ用カッターは，ブレード毎に各 1 個ずつ計 8 個を配置している。

4-4.　PDC カッターの設置角度

PDC カッターの設置角度については，バックレーキ角（8.用語集）とサイドレーキ角（8.用語集）の 2 種類があり，地層の硬さや用途によって，その角度を適正に設定する必要がある。

ビットマニュアルによれば，図 6 のとおりバックレーキ角はカッター面とビット軸との角度，サイドレーキ角はカッター面とビット放射軸との角度を示す。通常前者はビットフェースと鈍角に開いており，後者は外側に向かって開いている。

バックレーキ角を大きくすると掘進率は低下するが，地層からの反力を正面から受けないため個々のカッターの負荷が軽減されて，硬質地層に遭遇してもカッターのエッジの摩耗を緩和し，ビット寿命を延ばす働きをするとされている。したがって均質な超軟質層ではこの角度を小さくするほうが掘進率はよいが，硬質地層の介在が予想された場合は，ビット寿命を延ばすためにはバックレーキ角を大きくする。

サイドレーキ角も同様に大きくすると掘進率は低下するが，切削された掘り屑（以下，カッティングスという。）がビットの外側に向かって押し出されるため，ハイドロリクス作用と協調してカッティングスを効率良く掘削面から排除できる。したがって掘削面のクリーニングが問題なければこの角度を小さくするほうが掘進率はよいが，クリーニングに問題がある場合には，角度を大きく取ることで改善できることもある。一方で，カッターはビットの中心側に配置されているものほど切削スピードは遅くビットの外周側は速いので，その効果に差が出ることも念頭におく必要がある。

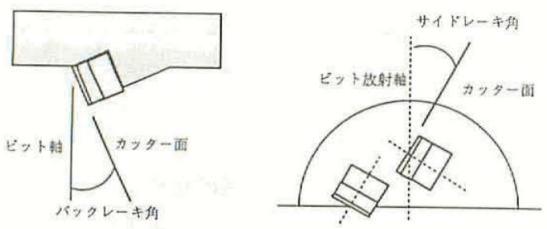



図 6　バックレーキ角とサイドレーキ角

技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットでは，後列カッターを装備した前列カッターについては，バックレーキ角を小さくした掘進率重視の設定を行い，後列カッターでは前列カッターよりもバックレーキ角を大きくして，カッターのエッジの摩耗を緩和できるように設定している。そして，最外周領域に配置される前列カッターについてはバックレーキ角を後列カッターと同じ角度に設定し，耐衝撃性と耐摩耗性の向上を図っている。

4-5.　PDC カッターのエクスポージャ

PDC カッターのエクスポージャは，図 7 のとおりカッターのエッジからビット刃面のマトリックスボディ表面までの高さである。地質と掘削条件によって，適正なエクスポージャを設定する必要がある。

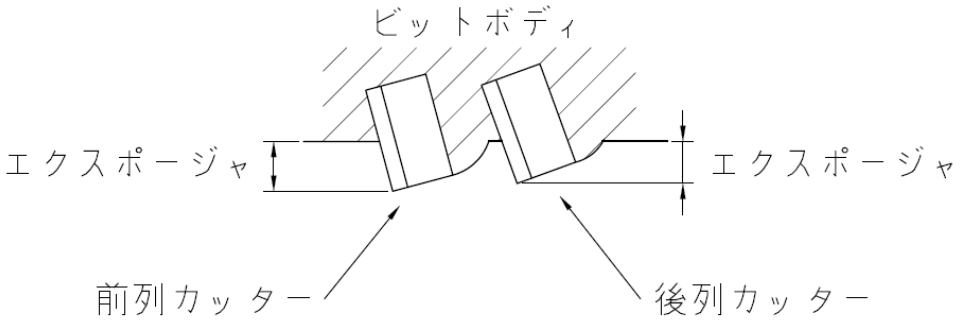



図 7　カッターのエクスポージャ

技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットでは，同一円周上に後列カッターが配置されている前列カッターのエクスポージャを 5.4 mm に設定し，それ以外の前列カッターは 4.9 mm から 5.4 mm としている。そして，後列カッターは全て前列カッターよりも 0.5 mm 低い 4.9 mm に設定しており，掘削開始時には前列カッターと同時に切削には寄与しないため，低いビット荷重（8.用語集）でも前列カッターが地質へ食い込みやすく，適度な掘進率が得られるようにしている。

4-6.　アレスタ

掘削中に最も衝撃力を受けるビット刃面の各ブレード外周部には，その前方に配置されているカッターを保護するために，ビットボディと同じマトリックス材から成形された衝撃抑制用部材（以下，アレスタという。）を，後列カッターが配置されている 1 つのブレードを除いた残りの 8 ブレード中の 7 ブレード上にそれぞれ 1 カ所設けている。アレスタのエクスポージャは，それぞれの前方に配置されているカッターのエクスポージャと同じ高さに設定している。

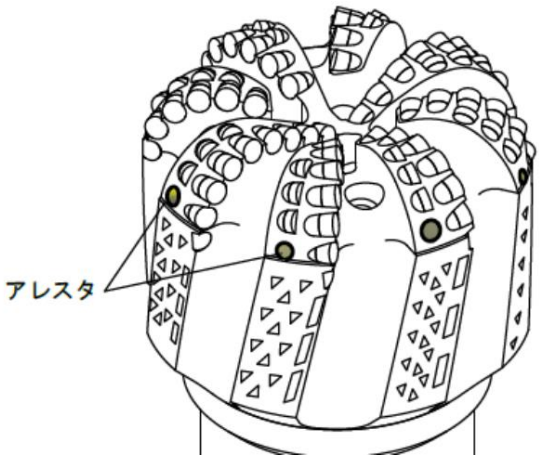



図 8　アレスタ

4-7.　ハイドロリクス

ビットマニュアルによれば，PDC ビットを用いる場合，まず，ビットハイドロリクスに関しローラーコーンビットと比べ基本的な違いは，ボトムホールクリーニングの指標としてインパクトフォース(泥水のノズルからの流れによって抗底に与えられる力)は用いず，ハイドロリックホースパワー(ビットノズルで消費される水馬力)のみを用いるとされている。またビットの張り付きと冷却がより大きな問題である。したがって泥水性質と共にハイドロリクスは大きな役割を果たす。

つぎに，PDC ビットではカッターのせん断力によって高い掘進率が得られるため，坑底において大量に発生するカッティングスを滞留することなく排除しなければならない。そのため,坑底からのカッティングスを含む掘削流体を素早く排出するためにゲージ部にはジャンクスロット（8.用語集）を設ける必要がある。

さらに，掘削流体によるカッターのクリーニングも重要であり，合わせてカッターの耐熱性の問題から冷却効果を高める必要がある。

## 5. 掘削

### 5-1. 使用前の諸準備

#### 5-1-1. ノズルの選定および装着方法

(1) ノズルの選定に伴うフローエリア（ビットの掘削流体の通過面積）の算出方法

リグの規模によって決まる掘削循環流体の環状流速，泥水循環量，ポンプ圧力には限界があり，それらの制約条件下で最大のハイドロリックエネルギーを得るために必要となるノズルの内径（面積）を選定しなければならない。この時，ビットのハイドロリックエネルギーの効果的なレベルを確認するために使われるパラメータが，ハイドロリクスホースパワー/$in^2$（以下，HSI という。）であり，以下のように求めることが出来る。

・Hydraulic Horsepower/$in^2$ （ハイドロリクスホースパワーインチ）

$$HSI = \frac{HHP}{HA} \ [HP/in^2]$$

・Hydraulic Horsepower （ハイドロリクスホースパワー）

$$HHP = \frac{\Delta PB \times Q}{1747} \ [HP]$$

・Bit Pressure Drop（Nozzle Pressure Drop） （ビット圧力損失）

$$\Delta PB = \frac{\rho \times Q^2}{10858\,(FA)^2} \ [psi]$$

・Flow Area（Bit Nozzle type） （フローエリア）

$= N \times A_n \ [in^2]$ （ノズル仕様のビット）

※ウォーターホールが配置されている場合は，当該ホールのエリアを加算する

表 2 ハイドロリックエネルギーのパラメータ

| 記号 | 単位 | 名称 | 単位換算 |
|---|---|---|---|
| HSI | [HP/$in^2$] | ハイドロリクスホースパワーインチ | － |
| HHP | [HP] | ハイドロリクスホースパワー | － |
| HA | [$in^2$] | 掘削面積 | － |
| ΔPB | [psi] | ビット圧力損失 | － |
| $\rho$ | [lb/gal] | 泥水比重 | 1[g/$cm^3$]＝8.35[lb/gal] |
| Q | [gpm] | 泥水循環量 | 1[lpm]＝0.264[gpm] |
| FA | [$in^2$] | フローエリア（面積） | － |
| N | - | ノズル数 | － |
| $A_n$ | [$in^2$] | ノズルエリア（面積） | － |

技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットのノズル装着箇所は 6 カ所であり，ビット中央領域にはφ10 mm の大きさで 2 ヵ所のウォーターホールを設けている。表 3 は，ノズルのサイズ毎のノズルエリア $A_n$ [$in^2$]の早見表であり，選定したノズル 6 個分の $A_n$ 面積にウォーターホールのフローエリア（φ10 mm×2 ヵ所）0.243 [$in^2$]を加えたものが，トータルフローエリア TFA（8.用語集）[$in^2$]として計算される。

表 3　装着ノズル　$A_n$ [$in^2$] 早見表

| ノズルサイズ | ノズル数 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 9/32 | 0.062 | 0.124 | 0.186 | 0.248 | 0.310 | 0.372 |
| 10/32 | 0.077 | 0.154 | 0.231 | 0.308 | 0.385 | 0.462 |
| 12/32 | 0.110 | 0.220 | 0.330 | 0.440 | 0.550 | 0.660 |
| 16/32 | 0.196 | 0.392 | 0.588 | 0.784 | 0.980 | 1.176 |

ビットの圧力損失は，一定の泥水循環量の下で最大の HSI を得るために要求されるもので，ビットにおける最大圧力損失を考慮する必要がある。ビットの最大圧力損失はポンプの可能最大圧力からビットを除いた地上部，管内，環状部の圧力損失を差し引いた残りの圧力である。もしビットに最適なハイドロリクスを得るための圧力が供給可能なポンプの可能最大圧力を上回った場合には，ビットの HSI の値を下げるかまたは泥水循環量を減らす，又は 両方ともに下げる方向で調整する必要がある。泥水循環量は多量のカッティングスをアニュラスに排出するために十分な量の確保が必要であるが，一方で坑壁への過剰な浸食が影響しないようにしなければならない。ビットの圧力損失は，ビットノズルの面積，泥水循環量，泥水比重によって決定し，ノズルの選択によってビットのジェット（8.用語集）作用効果が決められる。

(2)　ノズルの装着方法

技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットでは，2 カ所のノズル装着部とφ10 mm，2 カ所のウォーターホールをビット中心領域に，4 カ所のノズル装着部をビット刃面の約 2/3 半径の領域にそれぞれ設けて，ビット中心部から外側へ刃面上のカッティングスを効率的に洗浄できるように配置している。

①　ノズル装着部の掃除

ノズル装着部のネジ部および O リング溝にゴミや残留物がないか確認し，パーツクリーナー等の洗浄用スプレーを使用して，ブラシ，ウエス等できれいに拭き取る。

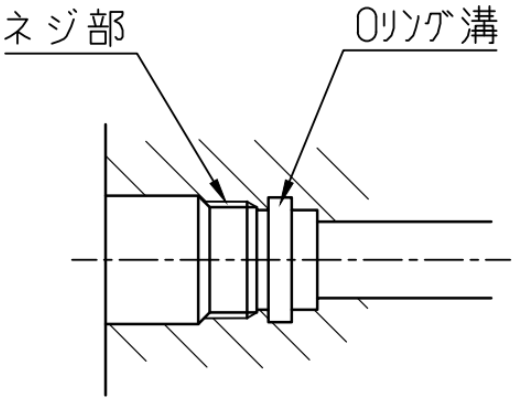



図 9　ビットのノズル装着部　断面図

②　O リングの取り付け

O リング全体にグリースを薄く塗り，O リングに傷がつかないよう指先で押し込むようにして所定の O リング溝内にはめ込む。そして，必ず O リングが溝から出っ張ってないことを目視と指先の感触で確認し，ネジ部に付着したグリースはパーツクリーナーとウエスできれいに拭き取る。

③　ノズルの取り付け準備

ノズルの締め込み中に O リングを傷つけないように，ノズルの先端部にはグリースを塗り，ネジ部には緩み止めのネジロック剤をネジの最初の 2～3 山に塗布する（ネジロック剤は，ネジの締付けに伴い残りのネジ山にも拡がっていくため）。使用するネジロック剤は嫌気性接着剤であり，所定のネジ部への塗布後に徐々に硬化が始まるが，完全硬化までには一定の時間（硬化時間は環境温度により変わる）がかかるため，ビット使用までの時間を考慮して準備をする必要がある。

図 10　グリース（左図）とネジロック剤（右図）の塗布

④　ノズルの締め込み

選定したノズルをノズル装着部に入れ込み，ノズルレンチを使用して片手でノズル先端が 0 リングに到達するまで締める。その途中で，何らかの抵抗感がある場合には，一度ノズルを取り外して，もう一度ゴミや残留物がないか，ノズルのネジ山に傷等がないかを確認し，無理やりに締めこんではいけない。ノズルの先端部が 0 リングに到達した時点で 0 リングへの締め付け抵抗が大きくなるが，更にしっかりと両手で締め付ける。

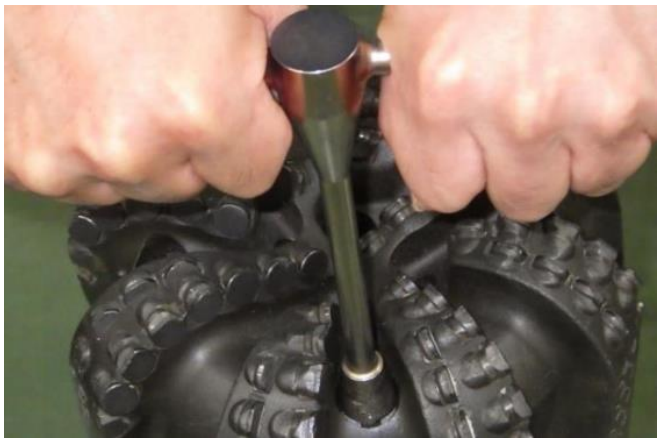


図 11　ノズルの締め込み

5-1-2.　PDC ビットの前準備

PDC ビットを使用するための準備は，現在使用中のビットがロータリーテーブルから揚管された時点から必要である。まずは，坑内に物が落下しないように早急にテーブルカバー等でロータリーテーブルを覆い，引き揚げられたビットの損傷等について確認し，ジャンク（8.用語集）が坑内に残されていた場合は，坑内から除去されるまで PDC ビットを使用してはいけない。

PDC ビットを箱から出す時や櫓下へ引き込む際には，鉄製の物にぶつけないようにし，リグフロアー上でも転がしたりしないよう PDC ビットの取り扱いは万全の注意を払う必要がある。ビット刃面上のカッターは，木材片や厚いラバー材の上に乗せるようにして置く事で，カッターの損傷を防ぐことができる。そして，ビットのシリアルナンバーを記録し，ビットの内部に何か異物などが残されていないことも必ず確認する。ビットを接続して締め付ける際には，ネジを傷めたりカッターを欠けさせたりしないよう慎重に行い，専用のビットブレーカーを使用して適正トルクで締め付けを行う。当該 8-1/2 in.PDC ビットの締め付けトルクを表 4 に示す。

ビットブレーカー本体（左図）　　テーブルへの組み込み後（右図）

図 12　ビットブレーカー

表 4　当該 8-1/2 in.PDC ビットの締め付けトルク

| ビットサイズ | ネジ仕様 | 締め付けトルク |
|---|---|---|
| 8-1/2 in. | 4-1/2 in.REG | 21,000[ft･lbs]<br>(2,900[kgf･m]) |

## 5-2. ビットの降管

ビットマニュアルによれば，ビットがロータリーテーブル，BOP，ケーシングシューおよびライナーハンガー頭部を通過する際や，予めその深度が分かっているタイトスポットやドグレグシビリティ（8.用語集）の高い所を通過する場合は，それらに引っ掛かったことによる衝撃によってカッターを欠けさせることのないようスピードを抑えて揚降管しなければならないとされている。降下の途中でタイトスポットによる浚いの必要性が生じたら，低ビット荷重（1～2 トン），高フローレート（掘進時に予定しているフローレートと同程度）で浚い，テーブル回転は，せり込みによる抑留を避けるために 80～100 rpm 程度が適当である。ただし PDC ビットによる浚いはできるだけ避けることが望ましく，必要であればワイパートリップによって坑内を良好な状態にしておくことが重要である。PDC ビット使用前のビットにゲージ摩耗が確認された場合には，PDC ビットはそのまま使用せずに，坑底まで別のビット等でリーミングによる坑径の補修を実施する必要がある。リーミング中はゲージカッター部分に圧縮および楔作用による高荷重が作用するために，実際には荷重計に表示される以上の荷重が掛かっているために，ゲージ部付近のカッターが損傷し，PDC ビットに深刻な損傷を与えてしまうことを回避するためである。

坑底まで坑径がフルゲージであっても，埋没に突っ込むことを避けるために，少なくとも最後の 1 ジョイントは循環しながら 40～50 rpm 程度でゆっくりと降下し，必要であれば浚いを行う。坑底に到着したら，クリーニングのために 15～30 cm 程ケリーを張り，2～3 分間循環する。理没があった場合は管動しながら少し長めに循環する。

## 5-3. 掘削方法

ビットマニュアルによれば，掘進を開始して 1 m 程度掘るまでは，ビット荷重は 0.5～1 トン，テーブル回転は 30 rpm（マッドモーター使用の場合は，テーブル回転数に 100-120 rpm が加算される）前後に抑えてビットのパターン（図 13 参照）を形成させることが望ましいとされている。

図 13　技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットで掘削した時のパターン例
（PDC ビット掘削後に採取されたコアより）

地質が硬い場合，最初の 30 cm 程度の掘削にも時間を要すこともあるが，PDC ビットの新たなビットパターンが坑底に成形されるまでは，全てのカッターが坑底に接触していない状態であるため，時間をかけて掘削する事が重要である。その後，ビットのパターンが確立されたら回転を 80～90 rpm 程度に上げて，適度の掘進率が得られるようにビット荷重についても 3 トンまでを目安に徐々に上げていく。

その後は徐々に荷重および回転を増加させ，掘進率の最も良い最適なパラメータを見つけて掘進する。たたしその場合もフローレートはできるだけ高く維持することが不可欠である。

近年はマッドモーターと併用されることが多く，ロータリー回転のみで最大 100 rpm，マッドモーターとの併用では 130～最大 200 rpm までが PDC ビットの回転使用域となるが，通常 100～150 rpm において最適の掘進率が得られることが多く，回転数が掘進率を改善するための最重要掘削条件の一つとなる PDC ビットにおいて，ビット荷重は極力抑えながら一定の掘進率が得られることが望ましく，岩質の変化によって一時的に掘進率が低下しても，むやみにビット荷重を増加することは避けるべきである。ビット荷重を増加することで一時的には掘進率は改善されるが，地層が硬い場合には過剰にカッターの摩耗が進みビット寿命が短くなる。また，急激なビット荷重増の場合にも，カッターの損傷が発生しビット寿命を短くしてしまう。PDC ビットのビット寿命を延ばすためには，極力ビット荷重を抑えて，適度の掘進率をいかに長く維持できるかが肝要となる。そして，掘削当初に比べて 2 倍を超えるようなビット荷重でも掘進率が徐々に低下するような状態が継続するような場合には，カッター自体の損耗が進んだ状態であり，ビット寿命に近づいていることが予想されるため，掘削

コストとの兼ね合いから次のビットとの交換時期を検討する必要がある。

上述の方法でも，最初から掘進率が上がらない場合には，地質が PDC ビットの使用には合ってないと判断するべきである。

### 5-4. ビットの洗浄

張り付きとは，ビットによって削り取られたカッティングスが坑内機器に粘着・凝集する事を言う。張り付きがビットに起これば掘削率の低下が起こる。

ウォーターベース泥水を使って，軟らかく粘性のある地質を掘削した時には，ビットがボールアップ（8.用語集）の状態になる事がある。掘削中のオンボトム（ビットが坑底に着岩）の状態でボールアップになった時には，通常，掘進率とトルクが低下し，ポンプ圧力が上昇する。この場合，坑底からビットを上げる（オフボトム）とポンプ圧力は下がる。ビットを洗浄するためには，ビットを坑底から上げて泥水循環量を最大にして，通常の回転でほぼ坑底近くまで降ろす。この位置で新たなカッティングスを発生させないでビットの表面を 10～15 分間洗浄する。このオフボトム状態で，循環を継続しながら短い時間に限定して，ビットを高速で回転させてビット表面の張り付きを振り落とす。それでも，ボールアップが解消できず，泥水循環量をそれ以上に増やせない場合には，掘進率が許容できる範囲であれば掘削を継続する。そして，ビット洗浄が何度も必要な時や掘進率が低下して掘削コストに合わないと判断された場合にはビットを交換し，より洗浄が容易なデザインのビットを選択するべきである。

ノズルが詰まった場合は，掘削中のポンプ圧力が上昇するため，その場合にも上述のビットの洗浄方法によって解消できることがある。更には,ビットを 9～12 m 程度坑底から上げてから 1.5～3 m 降ろして急停止し，ビットへ掘削循環流体の波動を発生させる方法もある。1 個のノズル詰まりであれば，この詰まりは解消されなくとも，カッティングスの排出に問題なく掘進率が許容出来る範囲にある場合には，掘削中にノズルの詰まりが取り除かれる事もあり，PDC ビットを継続して使っても問題はない。しかしながら，ノズルの詰まりにより，坑内の洗浄が出来ないほどに泥水循環量が減少したりノズルの詰まりからビットのボールアップが発生したと考えられる場合には，ビットを揚管してノズルを洗浄しなければいけない。

5-5.　ビットの揚管

最終的には掘進率の著しい低下によって，ビットの揚管を判断する。PDC ビットの正常なカッター摩耗が進行し，これ以上の掘削が不可能となった場合にはビット寿命となる。その場合，著しい掘進率およびトルクの低下が見られポンプ圧力が上昇するが，これは掘削循環流体が通過するビット刃面と地質の隙間が制限されるためである。そして，ビット揚管の判断には，もう１つ重要な方法があり，使用中のビットの掘削コストを決められた間隔で評価する事である。

使用開始からの掘進率は，ビットのカッター摩耗の進行に伴い徐々に下がってくることで，ビットの掘削コストは上昇する。その結果，掘削コストの損益分岐点を下回る状況になった場合には，ビット寿命前であっても新たなビットへ交換して，掘削コストの向上を図る必要がある。

5-6.　実掘削データの事例

実際に当該 8-1/2 in.PDC ビットを使用し，1478-1995 m 区間の 477 m を掘削した現場の掘削データについて，ビット荷重と掘進率のグラフを図 14 に示す。対象岩石は火山礫凝灰岩で，一軸圧縮強度は 138MPa～182MPa と推定された。

掘り止めまで延べ 3 回の揚管が実施されており，一回目(Run1)，2 回目(Run2)は共にボトムホールアッセンブリー(BHA) の編成替えであり，3 回目(Run3)は掘り止め(TD)によって引き揚げられた。表 5 は，全掘削期間を Run1，Run2，Run3 に 3 分割した区間毎の掘削データである。

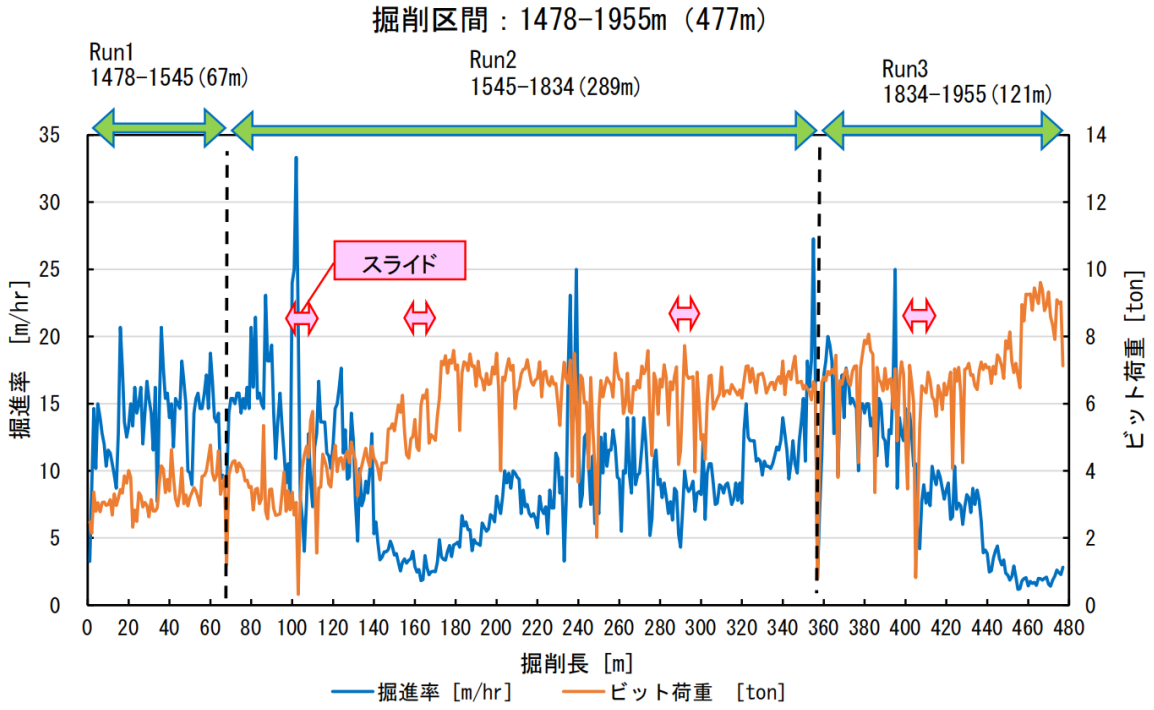



図 14　掘削中におけるビット荷重と掘進率の推移

表 5　Run1/Run2/Run3 区分の掘削データ

| 掘削長 [m] | | ビット荷重 [ton] | | | 掘進率 [m/hr] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 平均 | 最小 | 最大 | 平均 | 最小 | 最大 |
| Run1 | 67 | 3.3 | 2.1 | 4.8 | 13.7 | 3.3 | 20.7 |
| Run2 | 289 | 6.4 | 4.0 | 7.7 | 10.5 | 4.3 | 27.3 |
| Run3 | 121 | 6.9 | 0.8 | 9.6 | 8.5 | 1.2 | 25.0 |
| 累計 | 477 | 全区間平均 | 5.6 | | 全区間平均 | 10.0 | |

| 掘削長 [m] | | ビット回転数 [rpm] | | | トルク [kg-m] | | | 泥水循環量 [l/min] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 区間平均 | 最小 | 最大 | 区間平均 | 最小 | 最大 | 区間平均 | 最小 | 最大 |
| Run1 | 67 | 181 | 151 | 197 | 871 | 810 | 857 | 1913 | 1746 | 2118 |
| Run2 | 289 | 183 | 134 | 198 | 1073 | 475 | 1287 | 1988 | 1900 | 2137 |
| Run3 | 121 | 185 | 136 | 201 | 1356 | 686 | 1500 | 1953 | 1916 | 2112 |
| 累計 | 477 | 全区間平均 | 183 | | 全区間平均 | 1116 | | 全区間平均 | 1968 | |

(1)　Run1 区間

掘進開始時は，PDC ビットのビットのパターンを形成させるためにも，ビット荷重は 1 ton 程度に抑えて，ロータリー回転させながらゆっくりと降下させる必要があった。ロータリー回転に加えマッドモーターを使用しているため，ビット回転数は既に 160 rpm(40 rpm +120 rpm)以上となっていた。この掘削初期段階において掘進率が 2～3 m/hr 程度であったため，ビット荷重を 3 ton までを目安として徐々に上げていき，ビット回転数も最大 190 rpm までの範囲で調整し，掘進率は 10～20 m/hr までに増加した。67 m の掘削長となった Run1 では，表 5 に示す通り平均のビット荷重は 3.3 ton であり，平均の掘進率は 13.7 m/h であった。

使用開始時の PDC ビットのカッターは摩耗もなく鋭利な状態で切れるため，多量のカッティングスの排出量にも注意しながら，掘進率を制御する必要がある。PDC ビットの使い始めの段階で最も重要な点は，適度な掘進率が得られるように優先してビット荷重とともにビット回転数を制御することであり，岩質の変化によっては一時的に掘進率が低下しても，むやみにビット荷重を上げることはしないで，その状況を見守ることが肝要である。

(2)　Run2 区間

Run2 開始後も一定の掘進率を維持していたが，累計 120 m 掘削後には掘進率が低下してきたため，徐々にビット荷重を 4 ton まで上げていった。しかしながら，岩質が硬くなったために，累計 140 m の掘削時点では 5 m/hr を下回り，累計 160 m の時

点ではさらに 3 m/hr まで低下した。このため，ビット荷重を更に 6 ton 超まで上げてからは，掘進率は改善され 10 m/hr を超える状況で推移した。以降はビット荷重 6 ton 超を維持しながらも，一定の掘進率が得られた。この区間の掘進長は，289 m（累計 356 m）であり，その間には傾斜および方位修正のために 3 回のスライドが実施された。Run2 の平均のビット荷重は 6.4 ton であり，平均の掘進率は 10.5 m/hr であった。

掘進率の低下については，岩質が硬くなったことに加え，前列カッターの初期摩耗が進行して，後列カッターと合わせて掘削する状況となったために，掘削に寄与するカッター数が増えて，Run1 に比べて 2 倍程度のビット荷重が必要になったと考えられた。そのため，Run1 に比べて Run2 区間の平均のビット荷重は 6.4 ton に上がり，平均の掘進率は多少低下して 10.5 m/hr となったが，掘り止めまでの残りの掘削長についても十分に使用可能な状態であると判断した。

(3) Run3 区間

Run3 では，徐々に掘進率が低下する状況となったが，掘進率が 5 m/hr を下回るまでは，ビット荷重 7 ton を維持しながらその途中で 1 回のスライドを実施して掘削を継続した。そして，さらに掘進率が低下したため，ビット荷重を 9 ton 超まで上げて掘削を継続し，掘り止めの深度まで到達したが，残り 30 m の掘進率は，2～3 m/hr まで低下していた。その結果，Run3 区間の平均のビット荷重は 6.9 ton となり，平均の掘進率はさらに低下し 8.5 m/hr であった。

Run1, Run2, Run3 を通して，これまで PDC ビットには適さないとされてきた，硬質，高温および多数の亀裂を介在する不均質な断裂系地熱地層に対して，現場実証試験において十分な掘削性能を有していたことを示した。

## 6. ビットの評価

ビットの揚管後は，摩耗度評価と経済性の評価を行う。ビットの摩耗度評価については，掘削途中において何らかの理由により揚管する場合にも実施し，カッターの摩耗進行の状況を把握することで，ビットの掘削条件の見直しやビット寿命に到達するまでの使用可能な掘削深度の予測にも役立つ。

そして，ビットの摩耗状況を正しく評価することは，次に降下するビットの選定に寄与するばかりではなく，今後周辺で掘削する坑井でのビット選定にも役立つことになり非常に重要な作業である。

### 6-1. 摩耗度評価（ダルグレード評価）

ビットにおける摩耗度の評価によって得られる情報は非常に重要である。この摩耗度評価基準は，IADCによって当初に定められたローラーコーンビットを対象にしたビット摩耗度評価システムであった。その後，PDC ビットを含む全てのダイヤモンドビット（8.用語集）を対象としたフィックスドカッタービット（8.用語集）損耗評価法（Brandon et al., 1992a）に改定され，ビット摩耗度評価システム表（1995）石油技術協会にも紹介されている。表 6 は，このビット摩耗度評価システム表にある歯の摩耗度合いの表示図を PDC ビットの歯であるカッターに差し替えたものである。

## 表 6　ビット摩耗度評価システム　[石油技術協会、1995]に準拠

### ビット摩耗度評価システム表

| Cutting Structure（掘削歯の摩耗） | | | | Bearings /Seals<br>ベアリング/シール | Gage<br>ゲージ<br>摩耗 | Other Dull Char<br>他の形状変化 | Reason Pulled<br>使用停止判断 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Inner<br>（内側） | Outer<br>（外側） | Dull Char<br>（形状） | Location<br>（部位） | | | | |
| I (1) | O (2) | D (3) | L (4) | B (5) | G (6) | O (7) | R (8) |

ビット摩耗度評価システム表の記載記号と説明

(1)坑壁に接していない歯の摩耗度を 0～8 の 9 段階で評価（All Inner Rows）
(2)坑壁に接している歯の摩耗度を 0～8 の 9 段階で評価（Outer Rows ）
　○ツースビット、フィックスドカッタービット
　　0：摩耗なし（No Loss）～8：全摩耗（Total Loss）
　○インサートビット
　　0：ほとんど未使用（No Loss, No broken Inserts）～8：全損（All Inserts Lost, All Broken）


(3)摩耗の形状　※複数の場合は(7)にも記載

| | |
|---|---|
| 歯の根元からの欠損 | BT(Broken Teeth) |
| 歯の欠損 | CT(Chipped Teeth) |
| 歯の抜け落ち | LT(Lost Teeth) |
| 歯が平らに摩耗 | FC(Flat Crested Wear) |
| 歯が丸く摩耗 | WT(Worn Teeth) |
| 歯が尖って摩耗 | SS(Self Sharpening Wear) |
| 歯の接着不良 | BF(Bond Failure) |
| コーン割れ※ | BC(Broken Cone) |
| コーンにひび※ | CC(Cracked Cone) |
| コーン引きずり※ | CD(Cone Dragged) |
| コーン干渉 | CI(Cone Interference) |
| コーン脱落※ | LC(Lost Cone) |
| 張り付き | BU(Balled Up) |
| ジャンクダメージ | JD(Junk Damage) |
| ビット中心部コア状摩耗 | CR(Cored) |
| コーンシェルの摩耗 | OC(Off-Center Wear) |
| ノズル脱落 | LN(Lost Nozzle) |
| ノズル閉塞 | PN(Plugged Nozzle) |
| 穴開き | WO(Washed Out Bit) |
| 先細り | PB(Pinched Bit) |
| シャーツテール摩耗 | SD(Shirttail Damage) |
| ゲージ部丸み | RG(Rounded Gauge) |
| 泥水によるエロージョン | ER(Erosion) |
| 同列コーンシェル摩耗 | TR(Tracking) |
| 熱によるひび | HC(Heat Checking) |
| リング溝状の摩耗 | RO(Ring Out) |

※コーンナンバーを記載

(4)　主たる摩耗部位（Location）
　○ローラーコーンビットの場合
　　最内列 N（Nose Row）
　　中間列 M（Middle Row）
　　最外列 G（Gage Row）
　　全列 A（All Row）
　○フィックスドカッタービットの場合
　　コーン内側 C（Cone）
　　先端部 N（Nose）
　　テーパー部 T（Taper）
　　肩部 S（Shoulder）
　　ゲージ面 G（Gage）
　　全域 A（All Area）
特定のコーンに摩耗が発生している場合は、そのコーン番号を記号の後に付す

(5)ベアリングおよびシール摩耗度（Bearings /Seals）
　○ノンシールドベアリングの場合
　　0＝損耗なし、8＝完全に損耗
　　1～7：損耗の 8 段階評価
　○シールドベアリングの場合
　　E：シール有効（Seal Effective）
　　F：シール不良（Failed）
　　N：損傷により評価不能(Not able to grade)
注：ベアリングがない場合は×を記載（×ーFixed Cutter Bit）

(6)ゲージ摩耗（Gage）
　I：ゲージ落ちなし（In Gage）
ゲージ部の摩耗を 16 分の 1inch 単位で記載

(7)他の形状変化(Other Dull Char)
　(3)と同様

(8)使用停止の判断理由（Reason Pulled）

| | | | |
|---|---|---|---|
| 掘り止め(含む CSG 深度) | TD（Total Depth） | 坑内状況悪化 | HP（Hole Problem） |
| コア堀り深度 | CP（Core Point） | ストリングス閉塞 | DP（Drill Plug） |
| 検層深度 | LOG（Logging） | ウオッシュアウト | WO（Wash Out） |
| ドリルステムテスト深度 | DST（Drill Stem Test） | ストリングスの不具合 | DSF（Drill String Failure） |
| 掘進率低下 | PR（Penetration Rate） | 坑底ツールの不具合 | DTF（Downhole Tool Failure） |
| ビット時間 | HR（Hours on Bit） | ダウンホールモータ不具合 | DMF(Downhole Motor Failure) |
| 編成替 | BHA（Change BHA） | ツイストオフ | TW（Twist Off） |
| 調泥 | CM（Condition Mud） | 坑内遺留 | LIN（Lost in Hole） |
| トルク異常 | TQ（Torque） | リグ加修 | RIG（Rig Repair） |
| ポンプ圧力異常 | PP（Pump Pressure） | 天候悪化 | WC（Weather Conditions） |
| 地質の変化 | FM（Formation Change） | | |

ビット摩耗度評価システム表の使用方法について，平成 27 年度から平成 30 年度の 4 年間と令和 3 年度から令和 4 年度の 2 年間にわたり製作した地熱井用 8-1/2 in.PDC ビットについて,現場実証試験後に評価した具体例を交えながら以下の通り説明する。

表 7　フィックスドカッタービットの損耗評価

| IADC DULL GRADING SYSTEM CHART<br>（IADC ビット摩耗度評価システム） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cutting Structure<br>（掘削歯の摩耗） | | | | B | G | Remarks<br>（備考） | |
| Inner Rows<br>（内側） | Outer Rows<br>（外側） | Dull Charact-eristics<br>（形状変化） | Location<br>（部位） | Bearing /Seals<br>（ベアリング/シール） | Gauge<br>（ゲージ摩耗） | Other Charact-eristics<br>（他の形状変化） | Reason Pulled<br>（引き上げ理由） |
| ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ |

表 7 のフィックストカッタービット損耗評価では，以下の 8 項目が対象となる。下記に，当該 8-1/2 in.PDC ビットの損耗評価実例を用いて説明する。

① 内側カッターの摩耗度の評価
② 外側カッターの摩耗度の評価

カッター評価となる「掘削歯の摩耗」については，ビット刃面上の中心から①ビット半径内側 2/3 までの領域と②外側 1/3 の領域に分け，図 15 に示すカッターの摩耗度を 0～8 の 9 段階で評価し，それぞれの領域について平均の摩耗量を算出する。

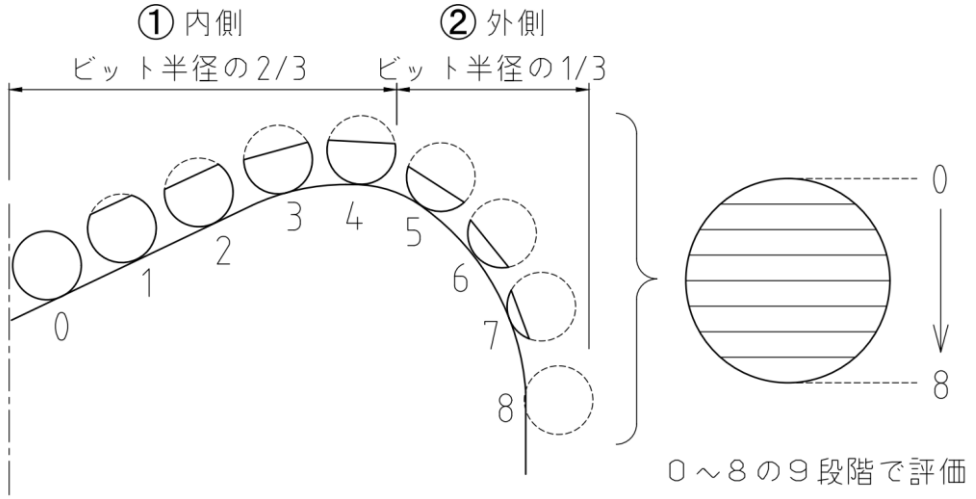



図 15　①と②カッター領域とその摩耗度区分

①，②についての算出方法を下記に示す。なお，②については，ゲージカッターは含まない。

（カッター摩耗度評価）

ビット刃面を図 16 に示す。このビットは 8 ブレード構成となっているが，その中の奇数 No ブレード（No.1,3,5,7）はプライマリーブレードと呼ばれ，ビットの中心領域でつながった形状でありブレード長が長い。一方で，残りの偶数 No ブレード（No.2,4,6,8）は，セカンダリーブレードと呼ばれ，それぞれプライマリーブレードの間にあり，ブレード長が短くなっている。そのため，カッター摩耗度評価の一例として 2 種類のブレード群からそれぞれブレード 1 とブレード 2 を選択し，それらのカッターの摩耗度を図 17 に示す。同様に他のブレードの各カッターの摩耗度を纏めた結果を表 8 に示す。

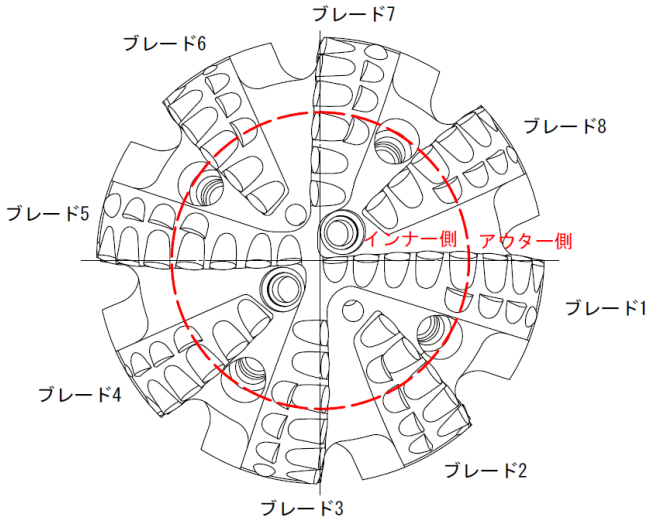



図 16　ビット刃面

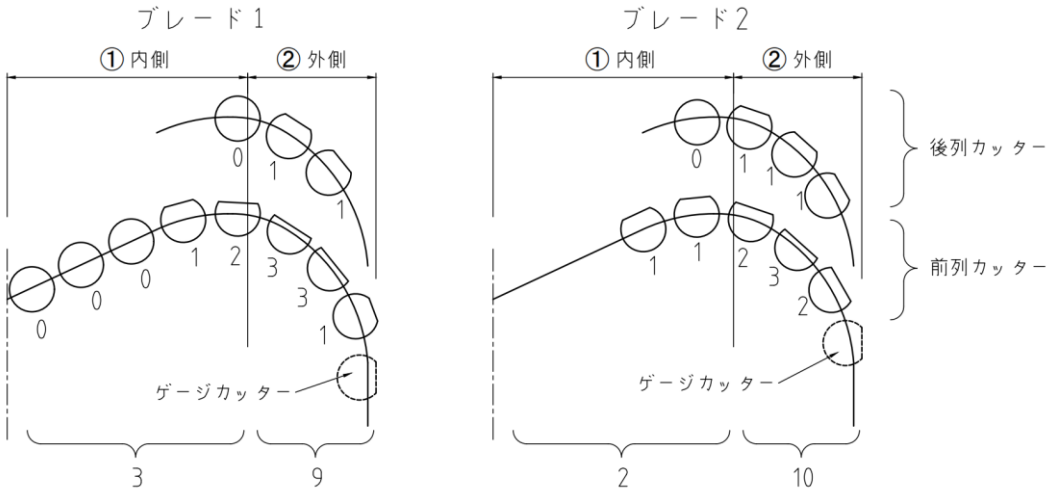



図 17　ブレード 1,2 の各カッターの摩耗度

表 8　ブレード毎の各カッターの摩耗度

| ブレードNO | ① 内側 | | | | | | | | ② 外側 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | カッター数 | 各カッター摩耗度 | | | | | | 計 | カッター数 | 各カッター摩耗度 | | | | | | 計 |
| 1 | 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 3 | 5 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | | | 9 |
| 2 | 3 | 1 | 1 | 0 | | | | 2 | 6 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | | 10 |
| 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 0 | | | 3 | 5 | 3 | 2 | 3 | 1 | 0 | | | 9 |
| 4 | 2 | 0 | 1 | | | | | 1 | 7 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 8 |
| 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | | 1 | 5 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | | | 10 |
| 6 | 2 | 0 | 1 | | | | | 1 | 7 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 0 | 10 |
| 7 | 4 | 0 | 1 | 2 | 1 | | | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | | | 10 |
| 8 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | | | 5 | 5 | 3 | 2 | 3 | 1 | 0 | | | 9 |
| 計 | 30 | | | | | | | 20 | 45 | | | | | | | | 75 |

①　内側の摩耗度の評価

$$\frac{\text{内側の摩耗度の合計}}{\text{内側のカッター数}} = \frac{20}{30} = 1 \text{（小数点以下切り上げ）}$$

②　外側の摩耗度の評価

$$\frac{\text{外側の摩耗度の合計}}{\text{外側のカッター数}} = \frac{75}{45} = 2 \text{（小数点以下切り上げ）}$$

③　カッターの形状変化

表 6 の(3)から該当する最も顕著な事例を選択する。カッター形状変化（最も摩耗度の大きいカッター）を図 18 に示す。その評価は，「WT」（カッターの摩耗）とした。

図 18　カッター形状変化において選択されたカッター

④　部位

③において選択された事例のビット刃面の領域を記載する。
カッター形状変化評価は「WT」（カッターの摩耗）であり，そのカッターの配置領域は，図 19 に示すショルダー領域であった。

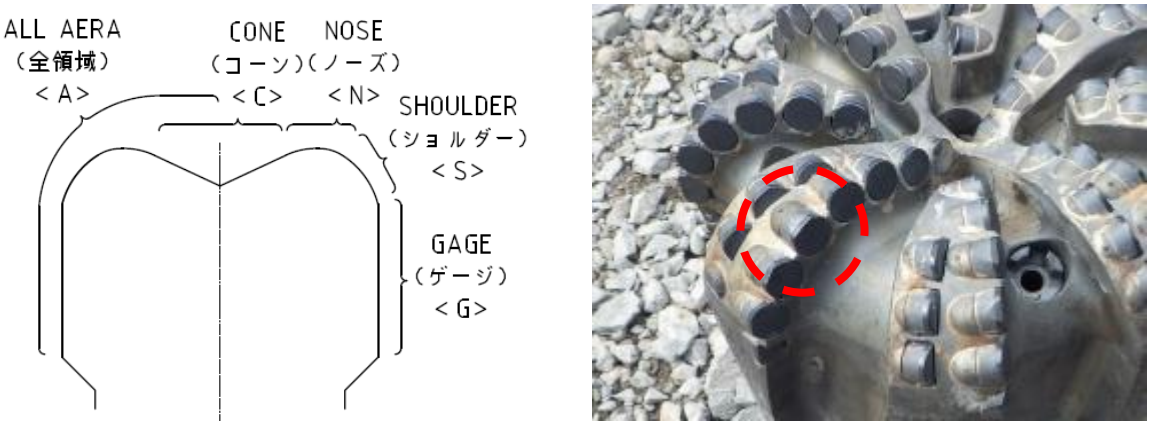



図 19　選定されたカッターのビット刃面領域

⑤　ベアリング／シール

回転機構を持たないフィックスドカッタービットには適用されないため，対象外となる「X」を記載する。

⑥　ゲージ摩耗評価

摩耗がなければゲージ落ちなしを意味する「I」コードを選択し，ゲージ落ちがある場合には，表 9 に示すゲージ摩耗評価から適合するコード(1/16 in.単位)を選んで表記する。当該ビットでは,ゲージ落ちなしの「I」評価とした。

表 9　ゲージ摩耗評価（IADC 評価より）

| コード | ゲージ摩耗数値 |
|---|---|
| I | In Gauge<br>ゲージ落ちなし |
| 1/16 | Undergauge up to 1/16 in.<br>1/16 in.(1.59 mm)以下 |
| 2/16 | Undergauge 1/16 in. to 1/8 in.<br>1/16 in.より大きく 1/8 in.(3.18 mm)以下 |
| 3/16 | Undergauge 1/8 in. to 3/16 in.<br>2/8 in.より大きく 3/16 in.(4.76 mm)以下 |
| 4/16 | Undergauge 3/16 in. to 4/16 in.<br>3/16 in.より大きく 1/4 in.(6.35 mm)以下 |
| ※ 1/4 in.より大きい場合は,<br>1/16 in.単位で表記 | |

⑦　備考（他の形状変化）

③において選択されたカッターの形状変化の事例を除き，カッターおよびその他の形状変化について，同様に最も該当する事例を表 6 から選択し記載する。カッター形状変化（最も摩耗度の大きいカッター）「WT」の形状変化としては，複数のカッターに破損が確認されたため，CT(歯の欠損)とした。

⑧　備考：引き上げ理由

表 10 から最も適合する事例を選択してその当該コードを記載する。

表 10　(8)使用停止の判断理由(Reason Pulled)
（石油技術協会 ビット摩耗度評価システム表からの抜粋）

| (8)使用停止の判断理由 (Reason Pulled) | | | |
|---|---|---|---|
| 掘り止め(含む CSG 深度) | TD (Total Depth) | 坑内状況悪化 | HP (Hole Problem) |
| コア堀り深度 | CP (Core Point) | ストリングス閉塞 | DP (Drill Plug) |
| 検層深度 | LOG (Logging) | ウオッシュアウト | WO (Wash Out) |
| ドリルステムテスト深度 | DST (Drill Stem Test) | ストリングスの不具合 | DSF (Drill String Failure) |
| 掘進率低下 | PR (Penetration Rate) | 坑底ツールの不具合 | DTF (Downhole Tool Failure) |
| ビット時間 | HR (Hours on Bit) | ダウンホールモータ不具合 | DMF(Downhole Motor Failure) |
| 編成替 | BHA (Change BHA) | ツイストオフ | TW (Twist Off) |
| 調泥 | CM (Condition Mud) | 坑内遺留 | LIN (Lost in Hole) |
| トルク異常 | TQ (Torque) | リグ加修 | RIG (Rig Repair) |
| ポンプ圧力異常 | PP (Pump Pressure) | 天候悪化 | WC (Weather Conditions) |
| 地質の変化 | FM (Formation Change) | | |

掘削終了まで延べ 3 回の揚管が実施されたそれぞれの引き上げ理由を表 8 から選択し記載した。

・1 回目：「BHA」編成替え
・2 回目：「BHA」編成替え
・3 回目：「TD」掘り止め

## 6-2. 経済性の評価

ビットマニュアルによれば,掘削コストは次式により計算される。

$$C = \frac{B + R(T + t)}{F} \quad \cdots\cdots\cdots \quad \text{式 a}$$

C ：単位掘削費(円/m)
B ：ビット費(円/丁)
R ：リグコスト(円/時)
T ：掘削時間(時)
t ：揚管時間(時)
F ：掘進長(m)

マッドモーターを使用する場合や特別な機材を使用する場合はその費用を加える。単位掘削費は,

① 異なるビット間（同一坑井の他型種や他坑井間の同型種）での経済的評価,
② 次に使用するビットの選択基準の一つである「ブレークイーブン分析」
に利用・活用することができる。

### 6-2-1. ブレークイーブン分析による評価法・活用法

ブレークイーブン分析とは，次に使用するビットを直前使用ビットと同額の単位掘削費で使用するための平均掘進率と掘削時間（ビット使用時間）を計算するものである。その相関をグラフに表したものをブレークイーブンカーブと呼ぶ。現使用ビットの掘進率と使用時間（または掘進長）の交点がブレークイーブンカーブの上方に記録されたら,その時点で現使用ビットは前使用ビットよりも経済的な効果（単位掘削費が低価になった）を得られたことになる。

またブレークイーブンカーブはビットの取り替え時の判断基準の一つとしての活用法もある。

(1)　ブレークイーブンカーブの作り方

技術開発した 8-1/2 in.PDC ビットの現場実証試験で,PDC ビットを使用する前に使用した 8-1/2 in.ローラーコーンビットと PDC ビットの実績を例にして比較する。

【例】8-1/2 in.坑でローラーコーンビット（インサート）（IADC 537） を使用し下記の実績を得た。

ビット費　　B：800,000 円/丁

リグコスト　R：165,000 円/時（トップドライブ工法（8.用語集）を採用 。）

掘削時間　　T：56 時間

揚管時間　　t：6 時間

掘進長　　F：185 m（ビット寿命のため）

ここで次使用ビットを PDC ビットに取り替えた場合についてブレークイーブンカーブを描き，経済的効果をもたらすような掘進率・掘進長を求めてみる。

式 a よりローラーコーンビットの単位掘削費は,

$$C = \frac{800{,}000 + 165{,}000(56 + 6)}{185} \fallingdotseq 59{,}620 \text{ 円/m}$$

となる。

次にブレークイーブンカーブを描くための掘進率（ROP）と掘進長 F を求める。

【PDC ビットの場合】

ビット費　B：5,500,000 円/丁

式 a より

$$F = \frac{B + R(T + t)}{C} \quad \cdots\cdots\cdots \quad \text{式 b}$$

B, R, t, C を式 b に代入すると,

$$F = \frac{5{,}500{,}000 + 165{,}000(T + 6)}{59{,}620} = 108.9 + 2.8\mathrm{T} \quad \cdots\cdots\cdots \quad \text{式 C}$$

（つまり 1 m あたり 59,620 円にする T と F を求める）

T を（例えば 10 時間から）式 c に代入 F を求め表 11 を作る。

表 11　PDC ビットのブレークイーブン表

| T（時間） | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F　（m） | 137 | 151 | 165 | 179 | 193 | 221 | 249 | 333 | 389 | 529 | 669 | 809 |
| ROP(m/hr) | 13.7 | 10.1 | 8.3 | 7.2 | 6.4 | 5.5 | 5.0 | 4.2 | 3.9 | 3.5 | 3.3 | 3.2 |

表 11 よりブレークイーブンカーブ（図 20）を描く。

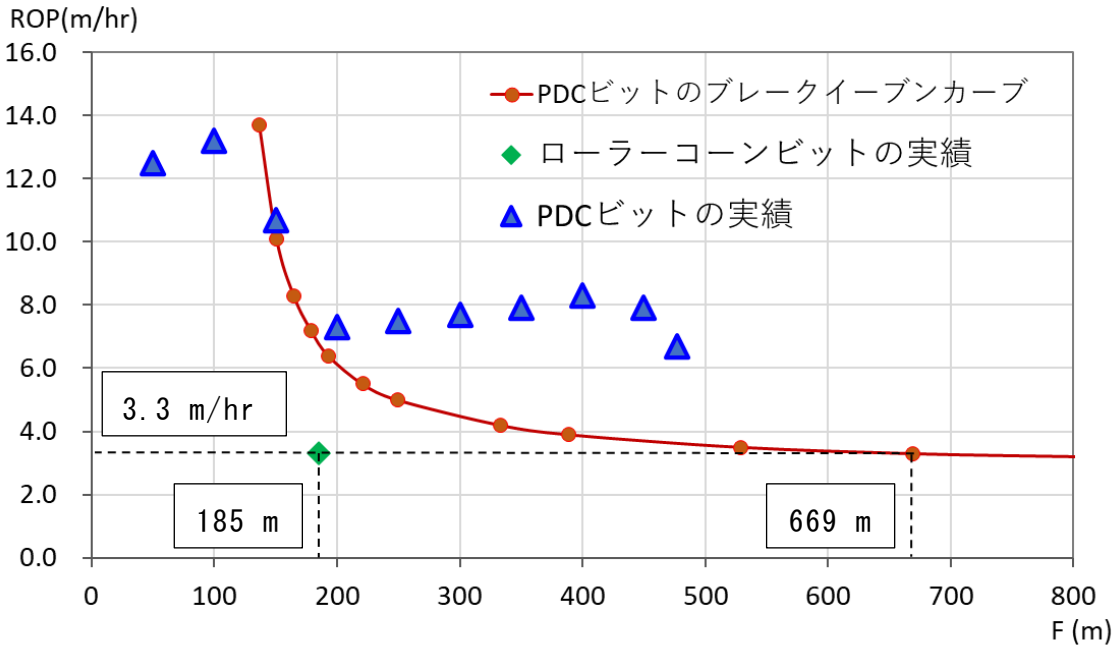



図 20　ブレークイーブンカーブ

(2)　次ビット選択としてのブレークイーブンカーブの活用法

ローラーコーンビット（IADC 537）で掘削時間 56 時間，掘進長 185 m，ROP3.3 m/hr の実績から，PDC ビットの ROP を同じ 3.3 m/hr と仮定するとおよそ掘削時間 200 時間，掘進長 669 m でイーブン（ローラーコーンビットと同じ単位掘削費）となる。

a．PDC ビットに取り替える条件

ROP がローラーコーンビットと同等と仮定した場合，

・地層が PDC ビットに適しており，かつ 669 m 以上続いていることが予想される。

・ビット寿命は 200 時間以上と期待されること。

これら a．の条件からローラーコーンビットそのままか，PDC ビットかを決める。

(3)　ビット取り替え時の判断としてのブレークイーブンカーブの活用法

前使用ビットの単位掘削費での現ビットのブレークイーブンカーブを作っておき，掘進長に対する掘進率をプロットする。使用開始時は当然カーブの下方にプロットされる。使用するにしたがってカーブに近づく傾向が認められるならばそのまま使用しプロットがカーブの上方に記録されることを期待する。またいったん近づいたが，使用するにしたがいカーブより離れていく傾向となり，再度近づく傾向にならなければ，現ビットで前ビットと同じ掘削コストを求めることは出来ないと判断してビットを取り替える。

前ビットの単位掘削費を現ビットの単位掘削費に置き換えても同様である。

実際に使用した PDC ビットの 50 m ごとの掘進長とその時点での平均 ROP をプロットした点を青△で示す。

100 m まではブレークイーブンカーブよりも下方であったが，150 m を超えるところからブレークイーブンカーブよりも上方に推移し，掘り止めとなった 477 m までの平均掘進率は 6.7 m/hr であったことから，その時点での単位掘進長当たりの費用は，

$$C = \frac{5{,}500{,}000 + 165{,}000(71.7 + 6)}{477} \fallingdotseq 38{,}400 \text{ 円/m}$$

となり，掘削費削減では，ローラーコーンビットで掘削をした場合の費用 59,620 円/m に比較して約 64%となり，36%が削減されたことになる。

時間短縮では，以下の様に試算される。

ローラーコーンビット：$\frac{56+6}{185} \times 477 = 159.9$ (hr)

PDC ビット：71.7 + 6 = 77.7 (hr)

時間短縮では，ローラーコーンビットで掘削した場合の 159.9 hr に比較して約 49%となり，51%が削減されたことになる。

## 7. おわりに

本ガイドブックは，地熱貯留層掘削技術（PDC ビット）実用化のフォローアップ共同研究の一環として，現時点の最終モデルとなる地熱井用 8-1/2 in.PDC ビット仕様をベースとし，ビットの設計製作や地熱井掘削現場での実証試験結果を通して得られた PDC ビットを使用する時に特に留意しなければならない事項について取りまとめたものである。超硬岩に対しては今後の改良が必要である一方，これまで PDC ビットには適さないとされてきた，硬質，高温および多数の亀裂を介在する不均質な断裂系地熱地層に対しても，高い掘進率と長いビット寿命に加え，外径変化においてゲージ落ちしないビットであることは，全断面ビットである PDC ビットにとって重要な事項である。

本ガイドブックは，地熱井用 PDC ビット普及のための手始めの段階であり，今後の適用事例の増加とマッドロギングデータ等で得られた結果の分析により，さらに地熱井用 PDC ビットの優れた掘削性能について検討がなされ，地熱井掘削において PDC ビットが汎用化されることを期待したい。

## 8. 用語集（ビットマニュアルからの引用）

| | | | |
|---|---|---|---|
| A | Airated Drill | エアレーテッド掘り | 泥水と空気を混合させた掘削流体を用いる掘削方法。掘削流体として空気を用いる掘削方法。条件が合えば用いることができ，掘進率を高くできる。 |
| B | Back Rake Angle | バックレーキ角 | PDC ビットのデザイン要素の一つ。PDC カッター面の垂直からの逃げ角（垂直面とカッター表面とのなす角度）。 |
| | Balled Up | ボールアップ | 掘屑がビットに粘着すること。張り付きが起こると掘進効率が 著しく悪化する。 |
| | Bit | ビット | 岩石を切削するツール。 |
| | Bit Gauge | ビットゲージ | 使用後のビットがゲージ落ちしていないか調べるための測定器具。円形のリング。（その他のものもある） |
| | Bit Profile | ビットプロファイル | ビットのクラウン形状 |
| | Bit Pressure Drop | ビットプレッシャードロップ | ビット面と地層との間に泥水が流れるときの摩擦が原因となって生じる圧力損失。リグにおいてはスタンドパイプ圧で確かめられる。まず最初に坑底から離してビットを回転させ，次に同じフローレートを維持しながら坑底にビットをつけて回転させればわかる。 |
| | Bit Record | ビットレコード | ビット使用実績（記録）。 |
| | Bit Shank | ビットシャンク | 1）ビットのドリルストリングと接続するためのネジ部。<br>2）フィックスドカッタービットのクラウンとネジ部の間の円筒部分。 |
| | Bit Weight | ビット荷重 | 岩石を切削するためにビットを岩石に押しつける力。 |
| | Breaker Slot | ブレーカースロット | フィックスドカッタービットのスリーブ部にある溝で，ドリルストリングとのネジの締め戻しの時に使う。 |
| C | Cone | コーン | 1）ローラーコーンビットのコーン。<br>2）フィックスドカッタービットのクラウン先端のくぼみ。 |
| | Core Bit | コアビット | コア採取を行うためのビットで，坑の中央部を残し，周囲のみ 切削するようにデザインされたビット。 |
| | Crown | クラウン | フィックスドカッタービットのカッターが植え込まれている部分のボディーのこと。 |
| | Cutting Edge | カッティングエッジ | ビットの実際に岩石を切削するための部分。刃先。<br>刃先の尖頭部。 |
| D | Diamond Bit | ダイヤモンドビット | カッターとしてダイヤモンドを用いるビット。 |
| | Dog Leg Severity | ドグレグシビリティ | 坑井の急激な方位傾斜の変化によって生じる極端な曲がり部（ドグレグ）の強さ。一般に掘進長 100 フィート当たりの全角度変化で表す。 |
| | Double Cone | ダブルコーン | 1）フィックスドカッタービットのクラウンプロファイルを表す用語の一つ。<br>2）タングステンインサートの形状を表す用語の一つ。 |
| | Drilling Bit | ドリリングビット | コアリング等特殊な用途のビットに対し，単に所定の径の坑を掘るためのビット。 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| F | Fixed Cutter Bit | フィックスドカッタービット | ボディーとカッター部分が一体となっており，可動部分の無いタイプのビット。 |
| | Flow Area | フローエリア | ビットを掘削流体が通るときの流路の面積，または流路の形状。 |
| G | Gauge | ゲージ | Gage とも書く。ビットの坑壁に接する部分。 |
| H | HHP | | P9 を参照 |
| | HSI | | P9 を参照 |
| I | Insert Bit | インサートビット | ローラーコーンビットのうち，刃としてタングステンカーバイド製のチップをコーンに植え込んだビット。 |
| J | Jet | ジェット | ビットノズルから噴出される泥水噴流，またはノズルそのもの。 |
| | Junk Slot | ジャンクスロット | ビットより下のジャンク(金くず等)が上方へ流れ易いようにビットボディに与えられた坑壁との間隙。 |
| M | Matrix Body | マトリックスボディ | ビットボディの材質の一つで，タングステンカーバイドを主体とした鋳造品。 |
| | Mud Motor | マッドモーター | 先端部にビットを接続して，掘削流体によってビットを回転させる装置。 |
| N | Nozzle | ノズル | ビットに装着された泥水の噴出口。流路を狭く絞ることにより高エネルギーの噴流をつくりだす。 |
| P | PDC | | Polycrystalline Diamond Compact，人造焼結ダイヤモンド。 |
| R | Radial Flow | ラディアルフロー | ビットのハイドロリクスデザインの一種で，坑底中心より半径方向に流れるフローパターン。 |
| | Rake Angle | レーキ角 | PDC ビットのカッターに与えられている角度。 バックレーキ角とサイドレーキ角がある。 |
| | Roller Cone Bit | ローラーコーンビット | 歯のついた円錐型のコーンが自由回転するようにベアリングを介してボディーに取り付けられており，岩石に押しつけてボディーを回転させることによりコーンが岩石表面を転がって歯で岩石を切削するように設計されたビット。 |
| | Rotary Drilling | ロータリードリリング | ビットを回転させることにより掘削する方法。パーカッションドリリングに対する言葉。 |
| S | Shank | シャンク | ビットのドリルストリングに接続するためのネジ部。 |
| | Side-Rake Angle | サイドレーキ角 | PDC ビットのデサイン要素の一つ。PDC カッター面の半径線からの逃げ角（カッター中央を通る半径線とカッター表面とのなす角度）。 |
| | Stabilizer | スタビライザー | ドリルストリングの坑内での位置を調整する（芯を出す）ためにボトムホールアッセンブリーに組み込むブレードのついた短管。 |
| | Steel Body | スチールボディ | ビットボディの材質の一つで，スチールからの切削品。 |
| T | TFA | | Total Flow Area. ビットのウォーターコースの総断面積。ノズルの場合全ノズルの流路面積の合計。フィックスドカッタービットでオープンスロートの場合ビットノーズ部を掘削面に接触させた場合にビットボディとの間にできる隙間の合計面積。 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Top Drive System | トップドライブシステム | ケリーやロータリーテーブルを使わずスイベル部に内蔵されたモーターで上部から直接ドリルストリングを回転することのできる装置。<br>（石油・天然ガス資源情報　用語辞典からの引用） |
| | TSP | | Thermally Stable Polycrystalline. 高温にも耐えるよう製造された人造ダイヤモンド。 |
| W | Walking | ウォーキング | 掘進するにつれ，ビットの掘進方向が坑芯よりはずれてしまうこと。 |
| | Wash Out | ウォッシュアウト | 掘削流体の流れにより，坑内ツールス等ストラクチャーが侵食されること。 |
| | Water Way | ウォーターウェイ | 掘削流体の通り道。 |

## 引用文献


・Brandon, B. D., Cerkovnik, J., Koskie, E., Bayoud, B. B., Colston, F., Clayton, R. I., Anderson, M. E., Hollister, K. T., Senger, J., and Niemi, R. (1992) Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System. Proceedings of the IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, February 18–21, SPE-23939-MS.

・都築雅年，宮本哲臣，山田直登，田中洋，矢野雅大，アフマディ　エコ，宮下庸介，宮崎晋行，大野哲二，今泉博之（2022）地熱井における新規開発 PDC ビットの掘削性能評価，日本地熱学会誌　第 44 巻　第 3 号　123 頁～135 頁.

・石油技術協会（1995）ビットマニュアル，15-17, 27, 41, 46-47, 59-61, 72-79.

・石油技術協会（1995）ビット摩耗度評価システム表.

・独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（ホームページ，https://oilgas-info.jogmec.go.jp/termsearch/index.html）石油・天然ガス資源情報　用語辞典.