

地熱井掘削 PDC ビット用 PDC カッターの開発

矢野 雅大 アフマディ エコ 宮下 庸介

Development of PDC Cutters for Geothermal Well Drilling

Masahiro YANO Akhmadi EKO Yosuke MIYASHITA

Abstract

Polycrystalline diamond compact (PDC) cutters are widely used as oil, gas and geothermal well drilling tools, since they have excellent wear resistance and thermal stability. However, the stratum in geothermal developing sites tends in general to be not only hard abrasive rocks such as granites but also heterogeneous with geological fractures as compared with that in oil and gas developing sites. The vibrations and impact shocks worked on the bit due to the geological conditions greatly affect the damage and wear of the PDC cutters. In order to develop PDC bits for geothermal well drilling, we have carried out a research and development project on the PDC bit sponsored by JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) during 2015–2018. In the project, we have successfully developed the four types of PDC cutters having high wear resistance and high impact toughness by using the fine and coarse diamond grains as starting materials.

キーワード：PDC cutter, polycrystalline diamond compact, geothermal well, drilling

1. はじめに

多結晶ダイヤモンド焼結体[†] (Polycrystalline diamond compact, 以下 PDC) は、優れた耐摩耗性や熱的安定性を有することから工具や摩耗部品などに広く用いられている¹⁾。特にその高い耐摩耗特性より、地中深くを掘り進み、交換作業が困難な石油井掘削において早くから適用が進み、超硬合金製に比べて高い掘削効率と耐久性を特徴とする PDC ビットとして利用されている。この PDC ビットとは、掘削進行方向に対する面に PDC と超硬合金が一体となった円筒形状の PDC カッターを刃先として配置した岩盤掘削用の工具である。掘削機構としては、ビット全体を回転させることにより刃先で掘削面を削り取る作用を主とし、近年では石油井以外の資源掘削にも応用が試されている²⁾。ここで、石油井において PDC ビットの利用が進んだ理由の一つとして、石油井では泥岩や頁岩など比較的均質な硬度の低い地層が対象となることが多く、刃先として機能する PDC カッターの高い耐摩耗性が優位に働くことが挙げられる。一方、石油井以外の資源掘削の 1 つである地熱井においては花崗岩のような研磨性の高い岩質を含み、不均質で硬度の高い地層が対象になることが多く、掘削中のビットには石油井に比べて大きな負荷や振動が加わりやすい。このような負荷や振動は刃先の欠損や摩耗に対して大きく影響する³⁻⁵⁾ ため、PDC カッターにはより高い強度や耐摩耗性が求め

られるが、地熱井向けの PDC 素材開発に関する研究⁶⁾ は多くはない。そのため、地熱井掘削へ PDC ビットを応用していくためには、地熱井掘削に適した高性能な PDC カッターの開発が必要である。

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層掘削技術」により、地熱井掘削用 PDC ビットの研究開発が行われた。本研究開発は、PDC ビットの製造・開発技術は(株)クリステンセン・マイカイ、岩石に対する PDC カッターおよび PDC ビットの室内試験による性能評価は(国研)産業技術総合研究所、そして PDC カッターの素材開発と試作は三菱マテリアル(株)にて、各々の専門領域を担当し共同で進めた。本稿では、その研究成果⁷⁻¹⁶⁾ 中から、当社が担当した内容を中心に纏め報告する。

[†]多結晶ダイヤモンド焼結体：サブミクロンから数十ミクロンのダイヤモンド粒子を原料粉末とし、一定以上の圧力・温度 (5 GPa, 1400℃ 以上) をかけることによって得られる高硬度の焼結体のことを指す。一般的な製造方法として、高压高温下でのダイヤモンドの溶解・再析出反応を利用し、ダイヤモンド粉末と焼結助剤となる触媒 (Co や Ni など) で焼結される。Polycrystalline Diamond Compact の略称として PDC あるいは PCD と呼ばれ、主に非鉄金属の切削用や石油・ガス田の掘削用の工具材料として広く使用されている。

2. 地熱井用 PDC カッター素材開発

2.1 実験方法

PDC カッター素材は超高压発生装置を用いて高压高温下にて焼結を行った¹⁰⁾。PDC カッター素材は、予め用意した円筒型の超硬合金製の台金の上に PDC 原料を充填した後、ダイヤモンドの安定領域下にて焼結することにより作製した。焼結後の素材を加工した PDC カッターの外観を図 1 に示す。焼結時に超硬合金と PDC 部が一体となった構造となり、上部の黒い部分が PDC、灰色の部分が超硬合金である。開発した PDC の組成はダイヤモンドと Co からなる一般的な組成^{17,18)}であり、粒径が約 2~30 μm のダイヤモンド原料粉を各々用いることによって PDC 中のダイヤモンド粒の平均粒径が異なる 4 種類の PDC カッター素材を開発した。図 2 に各 PDC 部の組織断面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を示す。黒い部分がダイヤモンド粒であり灰色の部分がコバルトである。焼結後の



図 1 PDC カッターの外観写真
Polycrystalline Diamond Compact (PDC) cutter.

ダイヤモンド粒径は、開発品 C で最も小さく、開発品 A、開発品 B、開発品 D の順で大きくなり、ダイヤモンド粒の含有量はいずれも 90 vol% 以上とした。PDC カッター素材の評価として、岩石を用いた外周切削試験による耐摩耗性評価と落錘式衝撃試験機を用いた耐衝撃性評価を行った (図 3)。耐摩耗性評価に関しては、PDC カッター素材の特性を把握することを目的としてチャンファ加工を施していない。ここで、チャンファとは PDC カッター素材の PDC 部外縁の面取りのことである。摩耗形態の例を図 3 に示す。工具顕微鏡を用いて摩耗試験後の摩耗幅を測定した。摩耗幅を測定するにあたり、初期状態の PDC 部上面位置から摩耗最下部までの長さを摩耗幅と定義した。耐衝撃性評価に関しては、PDC ビットへの PDC カッター搭載を模擬して配置した。PDC 部へ加える衝突エネルギーは、錘の質量と衝突させる PDC 部位を基準点とした錘の高さを基に算出できる位置エネルギーとした。なお、PDC カッターは直径 Φ 13.44 mm $\times$ 高さ 8 mm とし、掘削時を想定して PDC 部にチャンファ加工を施した。錘が衝突する PDC の部位を中心にして弧を描くような亀裂を伴う破壊形態が観察された時点破壊とみなし、破壊に至るまでに与えた衝撃エネルギーを指標として PDC カッターの耐衝撃性を評価した。

2.2 開発 PDC カッター素材の耐摩耗性と耐衝撃性評価

図 4 に岩石を用いた外周切削試験による耐摩耗性評価結果を示す。開発品 A を基準として開発品 B、開発品 C の PDC 部の摩耗量を示しており、値が小さいほど耐摩耗性に優れることを示す。開発品 A に対して焼結体中のダイヤモンド粒の平均粒径の大きい開発品 B は摩耗量が

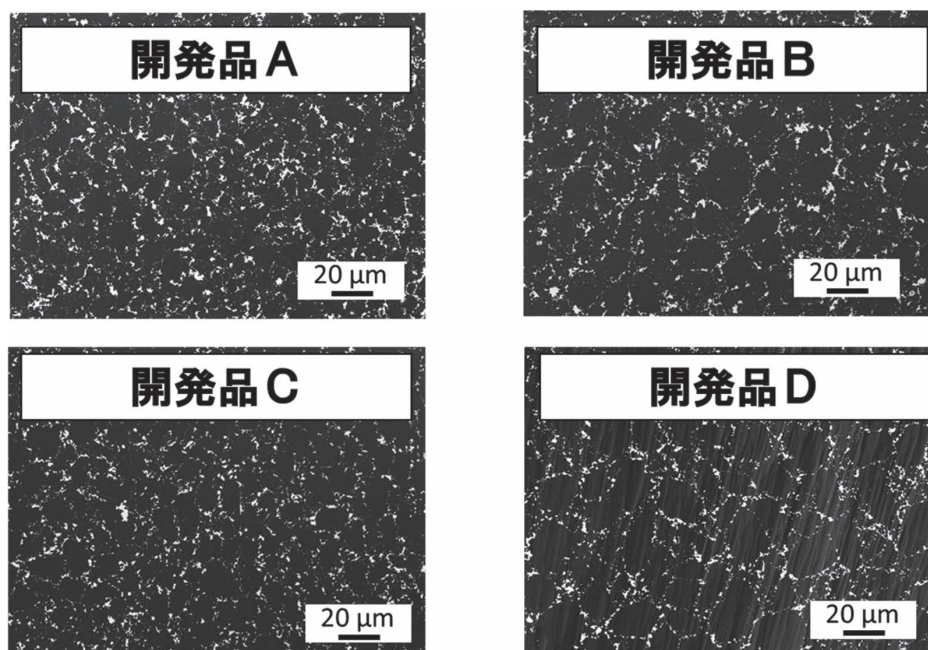


図 2 開発した PDC カッター素材 4 種の組織断面 SEM 像
SEM images of four types of PDC cutters.

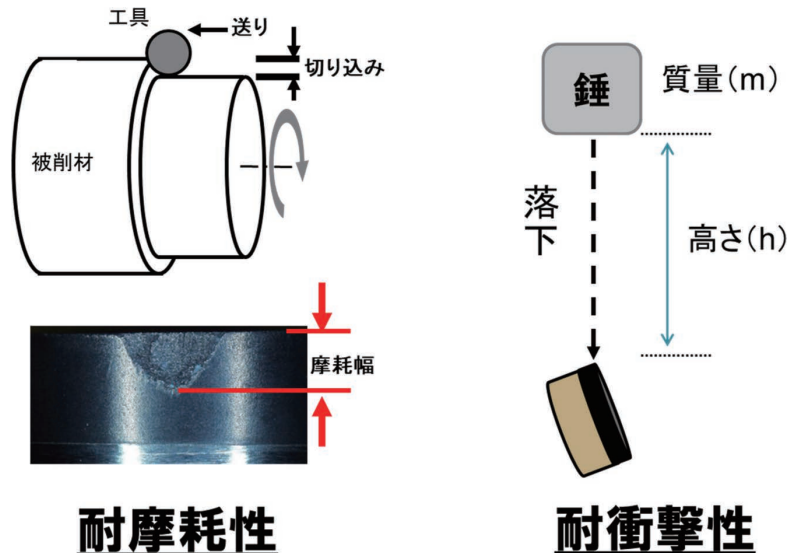


図3 PDC カッター素材の評価方法模式図

Schematic diagram of the wear resistance and the impact toughness tests of the PDC cutters.

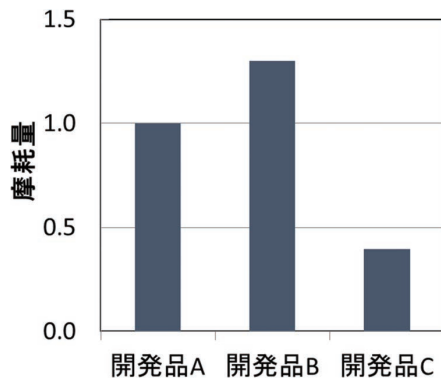


図4 岩石を用いた外周切削試験による耐摩耗性評価結果 (開発品 A を基準)

The result of the wear resistance of three types of PDC cutters.

きく耐摩耗性が劣るのに対して、ダイヤモンド粒の平均粒径が小さい開発品 C は摩耗量が小さく約 2 倍の耐摩耗性を示した。このことから、焼結体中のダイヤモンド粒の平均粒径が小さいほど、岩石に対する耐摩耗性は高い傾向となることが分かった。

図5に落錘衝撃試験機を用いた耐衝撃性評価結果を示す。耐摩耗性評価結果と同様に、開発品 A を基準として示しており、こちらは値が大きいほど耐衝撃性が優れることを示す。開発品 A に対して焼結体中のダイヤモンド粒の平均粒径の大きい開発品 B の耐衝撃性は開発品 A の 1.5 倍以上であったのに対してダイヤモンド粒の平均粒径が小さい開発品 C は開発品 A の半分以下の耐衝撃性を示した。このことから焼結体中のダイヤモンド粒の平均粒径が大きいほど耐衝撃性は高い傾向となり、岩石に対する耐摩耗性とは逆の傾向を示すことが分かった。

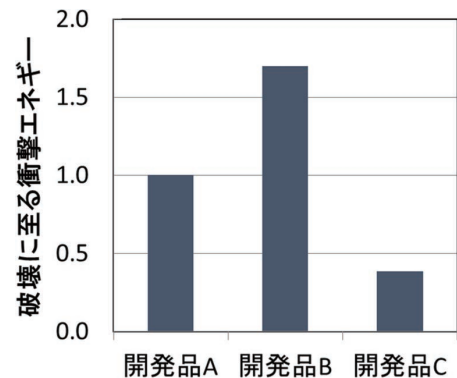


図5 落錘型衝撃試験を用いた耐衝撃性評価結果 (開発品 A を基準)

The result of the impact toughness of three types of PDC cutters.

2.3 地熱井掘削における開発 PDC カッターの性能評価

2.2 節において評価を行った開発品 A、開発品 B、開発品 C の PDC カッター素材を用いて作製した直径Φ 13.44 mm×高さ 8.0 mm の PDC カッターを搭載した PDC ビットを作製し、地熱井における現場掘削試験において開発 PDC カッターの使用可否を評価した。PDC ビットは地熱井掘削現場に適用可能な 8-1/2" PDC ビットを作製した。図6に作製した PDC ビットを示す。開発品 A と開発品 B を搭載した PDC ビット 1 は一軸圧縮強度が約 120 MPa の地層において、開発品 C を搭載した PDC ビット 2 は一軸圧縮強度が 150 MPa 以上と推定される地層において掘削試験を行った¹⁰⁾。結果、PDC ビット 1 は深度 1756-1917 m の区間の計 161 m を、PDC ビット 2 は深度 1210-1249 m と深度 1414-1484 m の 2 区間での計 109 m を掘削できた。いずれのビットにおいても PDC カッターが脱落することはなく、主に摩耗の進行状態で掘削を終えたこ



図 6 8-1/2" PDCビットのPDCビット1 (左) とPDCビット2 (右) の外観写真

Photographs of 8-1/2" PDC bit-1 (left) and PDC bit-2 (right).

とを確認した。IADC[†] (International Association of Drilling Contractors) による刃先摩耗状態の区分から PDC ビット 1 は IN/OUT 共にグレード 3, PDC ビット 2 は IN/OUT で摩耗の進行程度が異なり, グレード 1 とグレード 3 の判定結果となった。なお IN/OUT は PDC ビットの直径の中心から 3 分の 2 の領域内を IN, それより外の領域を OUT と区分し, グレードは 8 段階に分けられ数字が大きいほど摩耗の進行が大きいことを示しており, 例えば, グレード 2 では PDC カッターの約 25%, グレード 4 では約 50% の摩耗進行状態を示す。図 7 に掘削後の PDC カッター損耗具合の代表例を示す。PDC ビット 1 に関してはいずれのカッターも摩耗が進行した損耗状態であったのに対し, PDC ビット 2 に関しては IN 領域では摩耗進行の損耗状態であったのに対して, OUT 領域において PDC 部の剥離箇所が確認された。耐摩耗性の観点より, 各 PDC ビットの IN 領域を比較すると, より硬い地層で使用した PDC ビット 2 は PDC ビット 1 に比べて摩耗進行が遅いことから, 2.2 節における耐摩耗性の優劣に順ずるように開発品 C > 開発品 A > 開発品 B の順に地熱井掘削に適していると考えられる。また耐衝撃性の観点より,

IN 領域においてはいずれのカッターも欠損は確認されなかったことから, 開発品は地熱井用として有効な耐衝撃性を有していると考えられる。ここで, PDC ビット 1 の OUT 領域では損傷は確認されなかったのに対し PDC ビット 2 においては観察されたことに関し, PDC ビット 2 の掘削対象となった地層は PDC ビット 1 に対して硬いこと, OUT 領域はビットの中でも周速が速く衝撃要素が高い位置であること, そして 2.2 節における耐衝撃性の優劣より PDC ビット 2 に搭載した開発品 C は開発品の中で最も耐衝撃性が低い素材であったことから, 硬質な地層における使用に対しては開発品 C よりも高い耐衝撃性が必要であることが分かった。

[†]IADC: International Association of Drilling Contractors の略称。米国において設立された掘削請負業者の業界団体であり, ビットの仕様や損耗の判断基準などの統一的な分類に関して本団体が定めたシステムが広く用いられている。

2.4 開発 PDC カッターの性能改良

2.3 節における地熱井掘削試験結果を受け, 開発品 C に対して耐摩耗性は同等以上であり耐衝撃性の高い素材を目標として開発を行った。図 2 に開発した開発品 D の組織断面 SEM 像を示す。また, 開発品 D に対しても 2.2 節における同様な手法を用いて耐摩耗性と耐衝撃性の評価を行った。図 8 に横軸を耐衝撃性, 縦軸を耐摩耗性にて示した性能マップを示す。開発品 A を基準とした。耐衝撃性と耐摩耗性は二律背反の関係を有することから, 開発品 A や耐衝撃性を重視した開発品 B, そして耐摩耗性を重視した開発品 C は負の相関の関係を有するのに対し, 開発品 C を基に改良した開発品 D は, この負の相関関係を外れ, 開発品 C に比べて耐衝撃性は約 1.9 倍, 耐摩耗性は約 1.4 倍といずれも強化された PDC カッター素材であることが分かった。



図 7 掘削後の PDC カッター損耗具合の代表写真 (左: PDC ビット 1, 右: PDC ビット 2)

Photographs of PDC cutters in gage portion of PDC bit after the field experiment: PDC bit-1 (left) and PDC bit-2 (right).

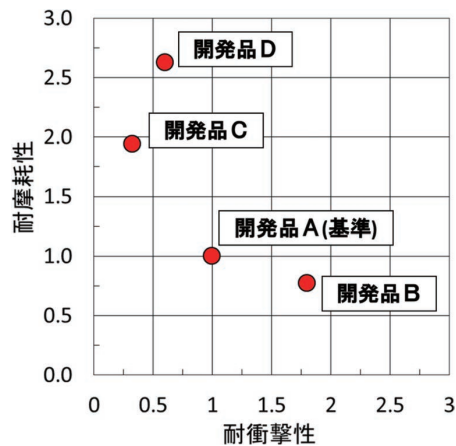


図 8 耐衝撃性に対する岩石への耐摩耗性にて示した PDC カッター素材性能マップ

Characteristics of four types of PDC cutters.

2.5 地熱井掘削における開発品 D の性能評価

開発品 D を PDC カッター素材に用いて 2.3 節と同様な PDC ビット 3 を作製し、地熱井における現場掘削試験において使用可否を評価した。図 9 に作製した PDC ビット 3 を示す。試験対象の地層の一軸圧縮強度は約 138–182 MPa と推定された。結果、PDC ビット 3 は深度 1478–1955 m の区間の計 477 m を掘削した。図 10 に掘削後の



図 9 8-1/2" PDC ビットの PDC ビット 3 の外観写真
Photograph of 8-1/2" PDC bit-3.



図 10 掘削後の PDC ビット 3 の刃面部外観写真
Photograph of PDC bit-3 after the field experiment.

PDC ビットの写真を示す。掘削後の PDC カッターにおいて計 6 カ所に剥離を確認したが、カッターの摩耗状況は PDC ビット 2 と同等であった。本結果より、PDC ビット 2 に比べて同程度の強度を有する地層に対して、掘削長は約 4.4 倍と高い耐久性を示し、開発品 C に対して耐衝撃性と耐摩耗性を強化した開発品 D を用いた効果が寄与したと考えられ、開発品 D は地熱井掘削用として有効な素材であることが分かった。なお、本 PDC ビット 3 における掘削結果により、JOGMEC からの地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層掘削技術」の目標として掲げた通常のローラーコーンビットに対して掘進率 2 倍、掘削寿命 5 倍の目標を達成した。

3. おわりに

本稿では、地熱井掘削用の PDC カッター開発を目的として PDC カッター素材の開発を行い、焼結体中のダイヤモンド粒の平均粒径により PDC カッター素材の耐摩耗性や耐衝撃性を制御できることが分かり、4 種類の PDC カッター素材を開発すると共に、その耐摩耗性と耐衝撃性は負の相関関係を持つことを明らかにした。また、開発した PDC カッターを搭載した PDC ビットを用いて地熱井における現場実証試験を行い、PDC ビットは高い掘削性能を有することが実証され、開発した PDC カッター素材はいずれも地熱井掘削において利用可能であることを確認した。今回開発した高性能な PDC ビットが世界第 3 位の地熱資源を有する我が国だけに留まらず、世界各国の地熱エネルギー開発に利用されることを期待したい。

謝 辞

当該研究は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層掘削技術」によって実施した。また、当委託研究を共同で進めた(株)クリステンセン・マイカイおよび(国研)産業技術総合研究所においては、地熱井掘削現場における実証試験を実施するにあたり多大な協力をいただくと共に、各々の専門領域の観点から PDC カッターに関する助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) M. W. Cook and P. K. Bossom, *Intl. J. Ref. Metals Hard Mater.*, **18**, 147–152 (2000).
- 2) 岡田浩明, 東 修平, 刈城佐登志, “武佐岳地域の地熱井における新しい掘削技術の適用結果について (その 1 PDC ビット)”, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 平成 25 年度地熱部事業成果報告会, (2014), <https://geothermal.jogmec.go.jp/initiatives/achievement/file/10.pdf>
- 3) W. Agawani, et al., *Application Focused Drill Bit Engineering Delivers Consistent Improvement in Efficient*

- Drilling Performance, (2016) IADC/SPE-180673-MS.
- 4) J. Schilling, et al., Innovative Conical Diamond Element Bit Significantly Reduces Drilling Cost of Laterals, (2016) IADC/SPE-180499-MS.
- 5) V. Radhakrishnan, et al., Conical Diamond Element Technology Delivers Step Change in Directional Drilling Performance, (2016) IADC/SPE-180515-MS.
- 6) 三澤茂夫, 唐澤廣和, 石油技術協会誌, **56**(6), 492-500 (1991).
- 7) 都築ほか, 地熱井でも使用可能な PDC ビットの研究開発, 日本地熱学会平成 28 年郡山大会, 2016 年 10 月.
- 8) 都築ほか, 地熱井でも使用可能な PDC ビットの開発研究, 地熱技術, **41**, 51-60 (2016).
- 9) 今泉ほか, 地熱井掘削のための PDC ビットの開発, 地熱学会誌, **39**, 217-227 (2017).
- 10) H. Imaizumi, T. Ohno, H. Karasawa, K. Miyazaki, E. Akhmedi, M. Yano, Y. Miyashita, N. Yamada, T. Miyamoto, M. Tsuzuki, S. Kubo and Y. Hishi, "Field experiments of drilling geothermal wells using pdc bits in japan, proceedings", The 6th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE), 1-9 (2018).
- 11) H. Imaizumi, T. Ohno, H. Karasawa, K. Miyazaki, E. Akhmedi, M. Yano, Y. Miyashita, N. Yamada, T. Miyamoto, M. Tsuzuki, S. Kubo and Y. Hishi, "Drilling Performance of PDC bits for Geothermal Well Development in Field Experiments", Proceedings, 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 1203-1217 (2019).
- 12) 宮下庸介, "【技術開発】地熱井掘削用 PDC ビットの開発", 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 平成 27 年度地熱部事業成果報告会, (2016), https://geothermal.jogmec.go.jp/initiatives/achievement/file/session_160603_05.pdf
- 13) 宮下庸介, "【技術開発】地熱井掘削用 PDC ビットの開発", 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 平成 28 年度地熱部事業成果報告会, (2017), https://geothermal.jogmec.go.jp/initiatives/achievement/file/session_170608_07_miyashita.pdf
- 14) 宮下庸介, "【技術開発】地熱井掘削用 PDC ビットの開発", 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 平成 29 年度地熱部事業成果報告会, (2018), https://geothermal.jogmec.go.jp/initiatives/achievement/file/session_180618_06.pdf
- 15) 都築雅年, "【技術開発】地熱貯留層掘削技術開発の成果", 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 平成 30 年度地熱部事業成果報告会, (2019), https://geothermal.jogmec.go.jp/initiatives/achievement/file/session_190620_04_tuduki.pdf
- 16) 宮下庸介, "【技術開発】地熱井掘削用 PDC ビットの開発", 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 平成 30 年度地熱部事業成果報告会, (2019), https://geothermal.jogmec.go.jp/initiatives/achievement/file/session_190620_05_miyashita.pdf
- 17) D. Miess and G. Rai, "Fracture toughness and resistance of polycrystalline diamond compacts", *Mater. Sci. Eng.*, **A209**, 270-276 (1996).
- 18) J. W. Paggett, et al., "Residual stress and stress gradients in polycrystalline diamond compacts", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, **20**, 187-194 (2002).



矢野 雅大 Masahiro YANO
中央研究所 主任研究員



アフマディ エコ Akhmedi EKO
OTEC (THAILAND) CO., LTD
工学博士



宮下 庸介 Yosuke MIYASHITA
三菱総合材料管理(上海)有限公司