

ボーリングマシンの高度化

— 再生可能エネルギー熱の普及に向けた取組み —

伊藤 春彦*

Sophistication of Drilling Machine

— Efforts Aiming toward Common Use of Renewable Energy Heat —

Haruhiko ITO*

Key Words : noise reduction, automation, remote control, renewable energy heat, underground thermal energy, sonic drill, open innovation

1. はじめに

21世紀に入っの我が国のエネルギー政策は、1997年に採択された京都議定書、2002年に公布されたエネルギー政策基本法を主軸として構築されてきた。これは需要側でのエネルギー消費量の削減と、供給側での化石燃料依存からの脱却を主体とする取組みを目指すものである。

しかし、2011年3月の東日本大震災と福島第一原発事故は、それまでのエネルギー政策の根幹を揺るがす事象となっている。この結果、2014年4月に閣議決定された第4次エネルギー基本計画¹⁾では、再生可能エネルギー、原子力、石炭、石油、LNG (Liquefied Natural Gas) 等の多層的な需給を目指し、長期的なエネルギー政策を2018~2020年を目途に再構築することを決定している。

再生可能エネルギーとしては、太陽光、風力、地熱、水力、バイオマス等が挙げられる。さらに地中熱や下水・工場排水の熱源等を利用した再生可能エネルギー熱を含め、温室効果ガスを排出しない純国産のグリーンエネルギーへの期待が高まっている。グリーンエネルギーは環境保全に寄与し、経済の活性化を担う鍵であると同時に、低コストでのエネルギー供給を図り、継続的な経済成長を実現することを前提に普及が行われるべきで

ある。したがって、グリーンエネルギーの普及拡大には、導入コストや運用コスト低減のための研究開発が急務といえる。

地中熱の利用においても、地中熱ヒートポンプシステム導入時でのコスト高が課題となっている。掘削孔を用いた地中熱利用(ボアホール方式)²⁾では、熱交換井設置工、ヒートポンプ設置工、室内空調施設設置工により導入コストが決定される。熱交換井設置工に着目すれば、ボーリングマシンを用いた掘削作業に最も費用を要するため、日施工量の向上、労務人員の削減が有効なコスト低減策となる。

本報では、NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)が2014年度から2018年度で実施する「再生可能エネルギー熱利用技術開発」プロジェクトの概要を紹介すると共に、導入コスト低減を目的に業務委託された「高性能ボーリングマシンの低騒音化・自動化に向けた研究開発」での取組み状況を解説する。

2. 進化するボーリングマシン

日本でのボーリング技術の始まりは、江戸時代で人力にて鉄棒を使い、突き崩しながら掘る「大阪掘り」といわれている。明治時代に入ると、やぐらを組み、鉄棒を持ち上げ、地面に叩き付けて掘る「上総掘り」が普及し、多くの灌漑用水の汲

(株)東亜利根ボーリング(〒106-0032 東京都港区六本木7丁目3-7)
TOA-TONE BORING CO., LTD (3-7, Roppongi 7-chome, Minato-ku, Tokyo 106-0032)

* Corresponding author : E-mail: h_itou@tone-boring.co.jp

み上げ井戸が構築されている。大正時代には初の国産ボーリングマシンが誕生するが、国内でのボーリングマシンへの本格的な要求は、戦後の炭鉱調査と水井戸構築が始まりである。

現在のボーリングマシンは、対象物を破砕・切削するために、“叩く”、“押し込む”、“回す”、“振動する”等の様々な外力を適用でき、掘削方向も単一方向（鉛直、水平等）に限らず、指向性掘削をも可能とするなど大きく進化している。

したがって、ボーリングマシンと一概に言っても、適用分野により掘削可能な形状・寸法・深さは異なり、機械本体の構造・大きさも多種多様となっている。

2.1 適用分野

ボーリングマシンの主な適用分野を図1に示す。以下では、幾つかの適用分野の概要を紹介する。

2.1.1 地下水開発 地下水は飲料水・灌漑水を安定した水質で供給できる大切な資源となる。国内では災害時での飲料水として注目されており、開発途上地域では衛生環境の改善で活用されている。

2.1.2 温泉開発 日本は火山大国であることから、温泉井の深さは1000m未満と比較的浅



図2 地下水開発（海外）



図3 温泉開発

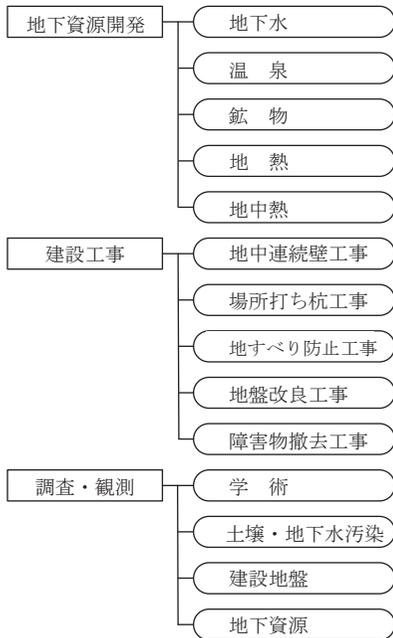


図1 適用分野

い場合が多い。しかし、地熱開発（調査井、生産井）に次ぐ掘削深さとなることから、掘削に伴うツールズ類（ボーリングロッド、ケーシングパイプ等）の昇降作業時間を短縮するため、“鋼製やぐら”が設置される。最近では観光施設だけでなく、福祉、農業、医療、スポーツ施設でも温泉が活用されている。

2.1.3 地中連続壁工事 地中連続壁工事では、回転水平多軸式連壁機を用いて矩形断面となる掘削を行い、地中にRC（鉄筋コンクリート）連続壁を形成し、土留め壁または基礎本体を構築する。

国内では鉄道・高速道路の地下化、シールド工法の立坑、共同溝等で適用されることが多く、リニア中央新幹線建設でも活躍が期待されている。

2.1.4 地すべり防止工事 地すべりを抑止するため、すべり面より深い地盤まで杭を打ち込む「杭工」、地すべりを抑制するため、水平方向にボーリングを行うことで地下水を抜く「水平



図4 地中連続壁工事



図5 地すべり防止工事

ボーリング工」や「集水井工」でボーリングマシンが使用されている。

2.1.5 宅盤改良工事 宅盤改良（宅地地盤改良）工事では、住宅を支える地盤または地盤の一部が軟弱であったことが原因で、建設した住宅が不同・不当沈下を起こさないように地盤支持力を強化する。2011年に発生した「東日本大震災」による戸建住宅での液状化被害が大きく取り上げ



図6 宅盤改良工事



図7 土壌汚染調査

られたことにより、住宅建設での宅盤改良の重要性が一段と高まっている。

2.2 潤滑油

調査ボーリングでは試料採取が不可欠であり、調査目的として「土質試験」、「汚染土壌の分析」、「地層の構成厚さ」、「地層を構成する砂・粘土・礫等の分布状況」等が挙げられる。

したがって、調査ボーリングでは以下の条件で作業可能なボーリングマシンが求められる。

- ① 試料を乱さない
- ② 汚染物質が拡散しない
- ③ 無水での作業
- ④ 潤滑油の漏出防止

一般的なボーリングマシンでは、高級耐摩耗性作動油を使用しているのに対し、調査用ボーリングマシンでは合成エステルを用いた生分解性潤滑油を活用している。

3. 再生可能エネルギー熱利用技術開発

NEDOが実施するプロジェクト概要を以下に示す。

3.1 目的

再生可能エネルギー熱利用の技術開発でコストダウンを促し、熱利用の普及拡大に貢献する。

3.2 目標

地中熱利用については、システムトータルで、導入コスト20%低減、および運用コスト20%低減を目指す。その他の再生可能エネルギー熱（太陽熱、雪氷熱、その他熱等）利用システムでは導入コスト10%低減を目指す。

3.3 研究開発内容

目標を達成するための研究開発内容は以下の5項目となる。

- ① コストダウンを目的とした地中熱利用技術の開発
- ② 地中熱利用トータルシステムの高効率化技術開発および規格化
- ③ 再生可能エネルギー熱利用のポテンシャル評価技術の開発
- ④ その他再生可能エネルギー熱利用トータルシステムの高効率化・規格化
- ⑤ 上記以外での再生可能エネルギー熱利用システム導入拡大に資する革新的技術開発

3.4 委託・共同研究事業数

研究開発内容5項目に対して採択された事業数を表1に示す。

3.5 期間

2014年度から2018年度までの5年以内とする。原則として3年以内の契約とし、年度ごとに進捗の確認を行う。

4. コストダウンを目的とした地中熱利用技術の開発

ロータリーバイブレーションタイプのボーリングマシン「ソニックドリル」は、高い掘削能力と優れた垂直性により、数多くの熱交換井設置工事で使用されている。特に、掘削長を100m程度とする熱交換井設置工事では、従来活躍していた「ロータリードリル」、「パーカッションドリル」に代わり、主力機械となっている。地中熱利用は、東京オリンピック開催決定やリニア中央新幹線整備計画等を背景に、数多くの都市再生事業での適用が見込まれるなど、国内での普及が急激に拡大

表1 プロジェクト数

研究開発内容	委託・共同研究事業数
①	3
②	7
③	1
④	2
⑤	1
計	14



図8 東京スカイツリー地区 熱供給事業でのソニックドリルでの採熱孔掘削 [写真提供：株式会社東武エネルギーマネジメント]

している。一方、都市部で地中熱利用を普及させていく上で、生活環境の保全に配慮したソニックドリルの低騒音化、さらに、掘削技術者の確保が大きな課題である。これらは、ソニックドリル本来の性能を最大限に発揮できないことによる「日施工量の低下」、技術者の高齢化による「労務費(特殊運転手)の高騰」など、掘削コスト低減に関する課題に直結する。

本事業では、ソニックドリルの低騒音化、省力化・省人化に寄与する自動制御に関する研究開発を実施し、従来工法である「ロータリードリルトリコンビット」、「パーカッションドリル二重管」と比較して30%の掘削コスト削減を図る。この結果、導入コスト(熱交換井設置工、ヒートポンプ設置工、室内空調施設設置工)の20%削減を目標とする。

4.1 事業概要

2014～2016年度での事業概要を以下に示す。

(1) 2014年度

① 低騒音化

「機械内構造の効率化」および「遮音・吸音強化対策」に関する設計

② 自動化

「制御システム構成の明確化」と「掘削制御」に関する設計

(2) 2015年度

① 低騒音化

「遮音・吸音強化対策」および「消音装置」に

関する設計

② 自動化

「走行・姿勢・表示」等に関する制御設計

(3) 2016年度

新型機の製造と性能照査、性能照査結果に基づいた改良

4.2 社会的意義

本技術開発が果たす社会的意義を以下に示す。

- 若手技術者による掘削作業を容易とし、高齢化による熟練技術者不足を解消
- 機械の回送・現場内移動を遠隔操作するなど、掘削作業の安全・安心を確保
- 都市部での生活環境の保全に寄与
- 土木分野への技術導入による市場拡大
- 新技術開発による既存市場（鉱山機械）の活性化
- 新技術導入により付加価値を高め、海外競争力を強化

5. 高性能ボーリングマシンの低騒音化・自動化に向けた研究開発

5.1 低騒音化技術開発

低騒音化技術開発では、既存機種と比べ音圧レベルで1/2（人の感度として2/3）に相当する「6 dB」を騒音低減目標とする。

5.1.1 従来機種での発生騒音の解明

従来機種での騒音レベル（A特性補正音圧レベル）を把握し、騒音の主たる発生部位を特定することは、効率的に技術開発を行う上で重要である。従来機種の騒音測定概要を表2に、機械の設定条件を表3に示す。なお、表中での「静的」はエンジンのみを稼働させた状態、「動的」は掘削作業を行っている状態での騒音測定をいう。

騒音・振動測定結果より得られた知見を以下に

表2 騒音・振動測定概要

測定方法	測定区分	解析手法
音響パワーレベル測定	静的・動的	1/3 オクターブ分析
指向性測定	静的・動的	1/3 オクターブ分析
機械側（部位）測定	静的・動的	FFT（高速フーリエ変換）による狭帯域分析
	動的	振動加速度
音響カメラ測定	静的・動的	ビームフォーミング解析

表3 従来機種の設定値

設定項目	静的	動的	備考
エンジン回転数, rpm	2 200	2 200	最大値
バイブレーション起振力, kN	—	—	最大値
作動油流量, L/min	—	230	最大値
オイルモータファン回転数, rpm	1 100	1 100	最大値



図9 主要な騒音発生源

示す。

- 静的条件では250 Hz付近、動的条件では315～630 Hz付近で最も大きい音圧レベル（A特性補正）となる。したがって、これらの周波数領域での効果的な低騒音化対策を検討する。
- 動的条件では地盤の固さにより変動するが、静的条件より最大で10 dB程度高くなる。したがって、静的条件での低騒音化に加え、動的条件での低騒音化も実施する。
- 静的条件では30～150°（角度は機械正面より時計回り）、動的条件では330～60°で騒音放射が大きい。したがって、静的条件ではエンジン部、動的条件ではヘッド部が主たる発生部位となり、これらに焦点をあてた低騒音化対策を実施する。（図9参照）
- ヘッド部では振動発生機構が集中する上部での振動加速度が大きく、防振・制振対策を検討する。

表 4 低騒音化技術の適用例

低騒音化技術	適用箇所	
吸音対策	エンジン部	ヘッド部
遮音対策		ヘッド部
防振対策		ヘッド部
制振対策	エンジン部	ヘッド部
消音対策	エンジン部	
構造対策 A	エンジン部	
構造対策 B	エンジン部	
構造対策 C	エンジン部	

5.1.2 低騒音化技術の概要 従来機種との騒音・振動測定結果を考慮し、適用検討を行っている低騒音化技術を表 4 に示す。なお、表中の消音対策は、エンジンの排気騒音のように低い周波数領域で高いピークを示す騒音に対して、反対位相（逆波形）の音波を放射して打ち消す技術³⁾である。

5.1.3 騒音シミュレーション 吸音・遮音・制振対策では、使用材料を「性能指標値（吸音率、音響透過損失、損失係数）」、「耐熱温度」、「経済性」により数種類に選定する。騒音シミュレーション（ISO 9613-2 に準拠）により、騒音低減効果が最も高い選定材料を採用する。

なお、騒音シミュレーションは既存機種での機械側（部位）測定データを基本に構築され、各材料を単独または複合して予測を行う。騒音レベル計算点は音響パワーレベル測定と指向性測定で用いた 18 点（図 10 参照）とし、OA 値（オーバーオール値）で比較検討する。

騒音シミュレーションの妥当性を検証するため、実測値と比較した騒音レベルを図 11 に示す。両

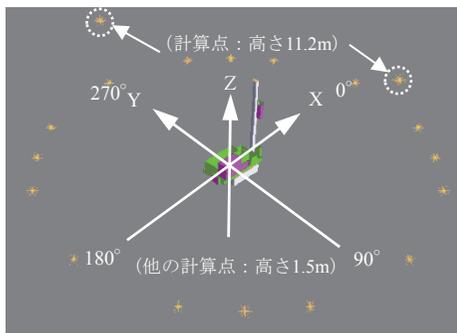


図 10 騒音シミュレーション (Sound Plan)

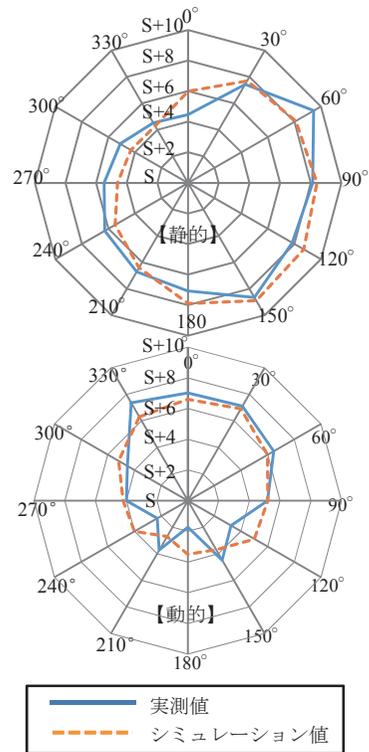


図 11 騒音レベル (dB) の比較

者の騒音レベルは類似しており、OA 値でも静的条件で誤差平均値 0.7 dB、動的条件で誤差平均値 0.8 dB と、1.0 dB 未満に収まっている。したがって、本シミュレーションは有効と判断できる。

5.1.4 性能照査結果 現時点（2015 年 7 月 31 日）では、低騒音化技術に対する性能照査は静的条件でのみ行っている状況にある。また、性能照査は既存機種の騒音測定結果との比較となるため、測定箇所は一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所テストフィールド内での同一位置としている。

静的条件での既存機種との騒音レベル比較例を図 12 に、性能照査結果を表 5 に示す。

これらの結果より、静的条件では全方向において騒音レベルは大幅に減少しており、OA 値も既存機種と比較して 12 dB 低減を達成している。また、消音装置については、エンジンの排気騒音に含まれる低周波卓越成分を 10 dB 程度低減させることを確認している。静的条件での低騒音化技術の適用は、「消音装置」と「制振対策」を残すのみ

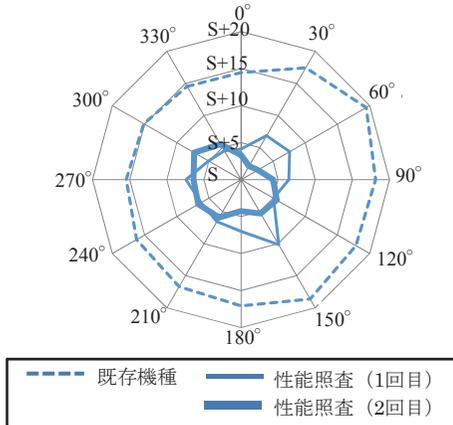


図12 騒音レベル (dB) の比較例

表5 低騒音化技術の適用例 (静的条件)

性能照査	性能照査		工場内測定
	1回目	2回目	
低騒音化技術	2015年 4/27	2015年 7/25	
吸音対策	○	○	
制振対策			
消音対策			○
構造対策 A	○	○	
構造対策 B	○	○	
構造対策 C		○	
騒音低減値, dB	8	12	—

となるが、現段階で“低騒音型建設機械”⁴⁾を満足し、さらに“超低騒音型建設機械”への対応が見込める。

6. 自動制御技術開発

自動制御技術開発では、熱交換井設置工での編成人数を現状の4～5人体制から2～4人体制へ削減すると共に、若手技術者での掘削作業を可能とすることを目標とする。

6.1 掘削に対する制御

熱交換井設置工での施工手順、掘削に対する主な自動制御項目を図13に示す。なお、掘削ではビットを冷却し、スライム (切り屑) を地上に運び上げるため、清水または泥水の循環が必要となる。掘削時での流体循環を行う施設がプラント (循環水ポンプ、マッドスクリーン、水槽、ゼネレータ等で構成) と呼ばれる。

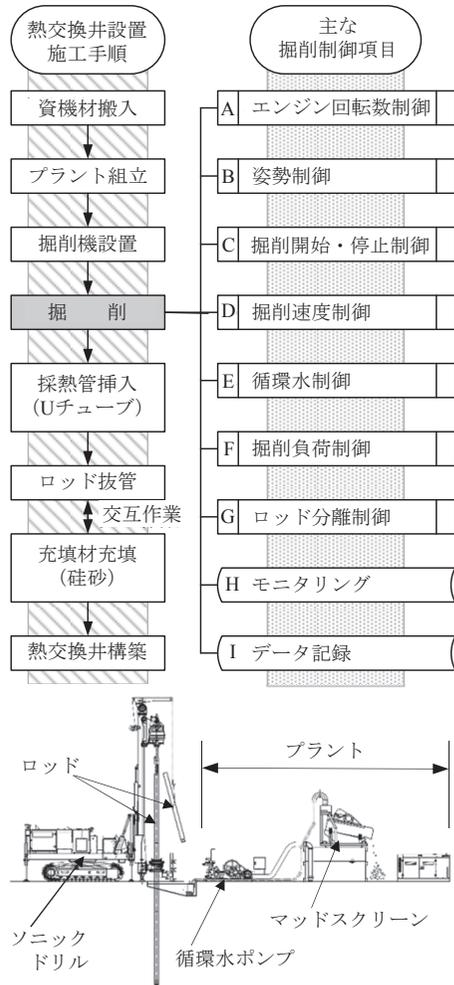


図13 掘削作業での制御

6.2 制御アプリケーション

自動制御システムでは、コントローラとして耐環境性能に優れた ECU (Electronic Control Unit) を使用している。また、アプリケーション開発では、国際標準規格 (IEC61131-3) に準拠したソフトウェアである CoDeSys (Code Development System) を用い、ストラクチャード・テキスト (ST 言語) によりプログラムを作成する。

主要な制御順序を図14に、タッチパネル画面イメージ例を図15に示す。なお、各地層での掘削データが蓄積された後は、図中の「初期設定」と「条件設定」は省略可能となるため、隠しコマンドとなる。

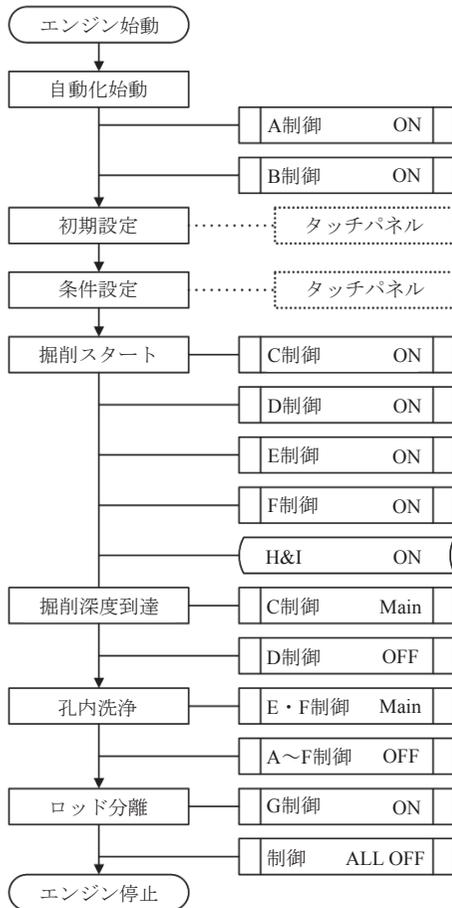


図 14 掘削作業での制御順序



図 15 タッチパネル画面イメージ例

6.3 アプリケーションの動作確認

アプリケーションは、一部機能（ロッド分離制御での抜管等）を除き、2015年10月末に完成させる予定となっている。また、2016年度では、新

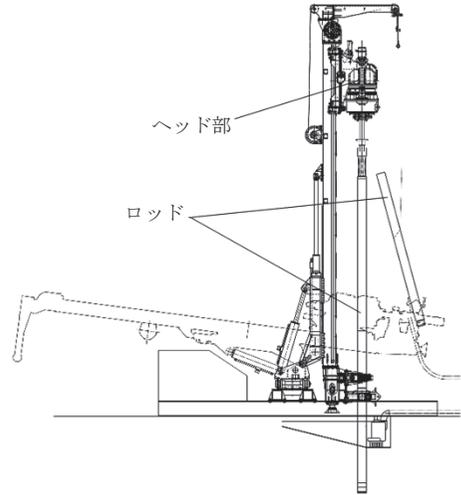


図 16 新型機フロント部の作製

型機に対する「低騒音技術」および「自動制御技術」の照査・改良が繰り返し実施される。

2016年度での作業計画を円滑に遂行するために、アプリケーションによる基本動作確認を2015年11月以降に実施する。このため、新型機のフロント部を前倒しで仮作製（図16参照）し対応する。

7. 技術開発へのアンケート調査

本研究開発後での迅速な普及促進を図るため、ソニックドリルの技術開発に対するアンケート調査を実施している。豪州と日本での調査概要を表6に、技術開発への要望順位を表7に示す。なお、表中の網掛け部分は要望項目の1～3位を示す。

豪州と日本でのアンケート調査結果より得られた知見を以下に示す。

- 日本では「低騒音」に対する要望が最も高い。掘削作業において“周辺環境の保全（騒音）”が強く求められていることがわかる。
- 日本では豪州と比較して「ロッドチェンジャ」への要望が低い。日本では狭隘地での作業が多く、従来機構でのロッドチェンジャに対する要求が少ない。
- 豪州では「自動化」に対する要望が高い。熟練技術者に依存する日本と異なり、作業の効率化への関心の高さが伺われる。
- 豪州・日本とも「掘削能力の向上」と「機械の

コンパクト化」が上位3位以内に入っており、共通の要望となる。

表6 調査概要

	豪州 ①	日本 ②	日本 ③
展示会名	DRILL2014	ENEX2015	NEW 環境展
開催場所	ゴールドコースト	ビックサイト	ビックサイト
開催期間	2014年 8/19~8/22	2015年 1/28~1/30	2015年 5/26~5/29
回答者数	28	33	57

表7 技術開発の要望順位

調査会場	豪州 ①	日本 ②	日本 ③
要望項目			
低騒音化	6位	1位	1位
機械のコンパクト化	2位	3位	2位
掘削能力の向上	1位	2位	3位
掘削の垂直性	9位	4位	7位
ロッドチェンジャ開発	1位	9位	10位
自動化	全ての作業	2位	9位
	掘削作業	9位	5位
	ロッド交換	2位	6位
遠隔操作	全ての作業	6位	6位
	掘削作業	9位	6位
	回送・移動	8位	11位

8. おわりに

社会経済情勢が大きく変化していく中で、現状を打破し、持続的な成長を成し遂げていくことは企業経営の源泉である。企業戦略が経営ビジョンを達成する手段と考えるなら、市場の創生・再構築を実現する技術革新は最も優先される戦略事項といえる。技術開発の目標は、開発を成し遂げる

ことではなく普及させることにあり、普及成功の秘訣はスピードとタイミングである。技術開発には豊富な経営資源（人、物、金、情報）が必要であり、企業単独で時間軸を短縮することは容易ではない。したがって、従来の“クローズドイノベーション”より、必要に応じて“オープンイノベーション”への円滑な移行が図られるべきである。これはグローバル市場での「稼ぐ力」強化にも直結するものとなる。

「再生可能エネルギー熱利用技術開発」プロジェクトは産官学での“オープンイノベーション”を基本とした国家戦略の位置付けとなる。本事業では産官学での連携がとれず、企業単独での業務委託となっているが、業務を遂行する上で積極的に他事業との連携を図っていきたい。

文 献

- 1) 経済産業省：エネルギー白書（2014）（http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/）。
- 2) 北海道大学 地中熱利用システム工学講座：地中熱ヒートポンプシステム，オーム社（2007）32-33。
- 3) 内野・宮崎・井上・石橋・吉岡：重機等の排気低周波音低減用アクティブ消音器の開発，公益社団法人日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集（2014）133-136。
- 4) 騒音振動対策ハンドブック改定委員会：建設工事に伴う騒音振動対策ハンドブック（第3版），日本建設機械化協会（2001）（http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000008.html）。

■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■ 著者プロフィール ■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■

伊藤 春彦 1957年生まれ。広島大学工学部構造工学課卒業。広島大学にて修士（工学）取得。現在、株式会社東亜利根ボーリング代表取締役。

