

ボリビア国

ボリビア電力公社

**ラグナ・コロラダ地熱発電所
建設事業(第一段階第一期)
に係る案件実施支援調査(SAPI)**

ファイナルレポート

平成 27 年 8 月
(2015 年)

独立行政法人 国際協力機構(JICA)

日本工営株式会社
住鉱資源開発株式会社
地熱エンジニアリング株式会社

中南
JR
15-019

ボリビア国

ボリビア電力公社

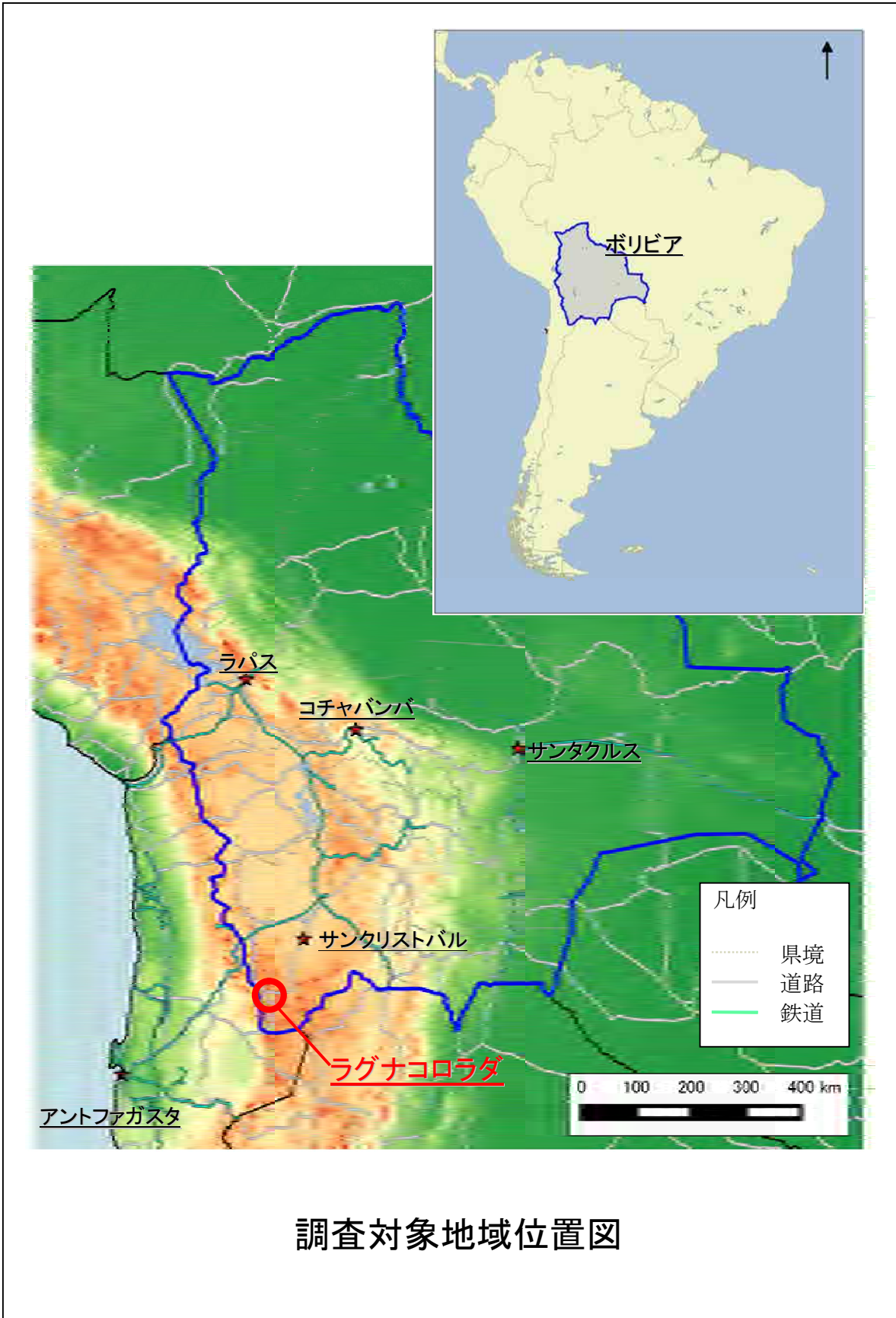
**ラグナ・コロラダ地熱発電所
建設事業(第一段階第一期)
に係る案件実施支援調査(SAPI)**

ファイナルレポート

平成 27 年 8 月
(2015 年)

独立行政法人 国際協力機構(JICA)

日本工営株式会社
住鉱資源開発株式会社
地熱エンジニアリング株式会社



略語表

BOQ	Bill of Quantity/数量明細書
ENAA	Engineering Advancement Association of Japan/エンジニアリング協会
ENDE	Empresa Nacional de Electricidad/ボリビア電力公社
ENEL	Ente Nazionale per l'energia Elettrica/イタリア電力公社
FIDIC	Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils/国際コンサルティング・エンジニア連盟
IADC	International Association of Drilling Contractors/国際掘削者協会
ICB	International Competitive Bidding/国際競争入札
IDB	Intern-American Development Bank/米州開発銀行
JETRO	Japan External Trade Organization/日本貿易振興機構
JICA	Japan International Cooperation Agency/国際協力機構
KOP	Kick Off Point/キック・オフ・ポイント
LCB	Local Competitive Bidding/現地競争入札
MDB	Multilateral Development Bank/国際開発金融機関
MT	Magnetotelluric/電磁
PTS	Pressure Temperature and Spinner/圧力・温度・スピナー（検層）
SAPI	Special Assistance for Project Implementation/案件実施支援調査
UTM	Universal Transverse Mercator/ユニバーサル横メルカトル
YPFB	Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos/ボリビア国営石油公社

ラグナ・コロラダ地熱発電所建設事業（第一段階第一期）に係る案件実施支援調査(SAPI)

ファイナルレポート

要 旨

1. 業務概要

1.1 業務の背景

「ラグナ・コロラダ地熱発電所建設事業」（本事業）については、2014年に本事業の第一段階第一期を対象とした円借款貸付契約が結ばれ、50MWの発電のため、生産井4本、還元井3本の坑井掘削が計画されている。

しかしながら、本事業はボリビア初の地熱発電建設計画であることに加え、本事業の坑井掘削は、地熱掘削が可能な石油や天然ガスの掘削業者を含めた民間の掘削業者の中から調達されると考えられる。

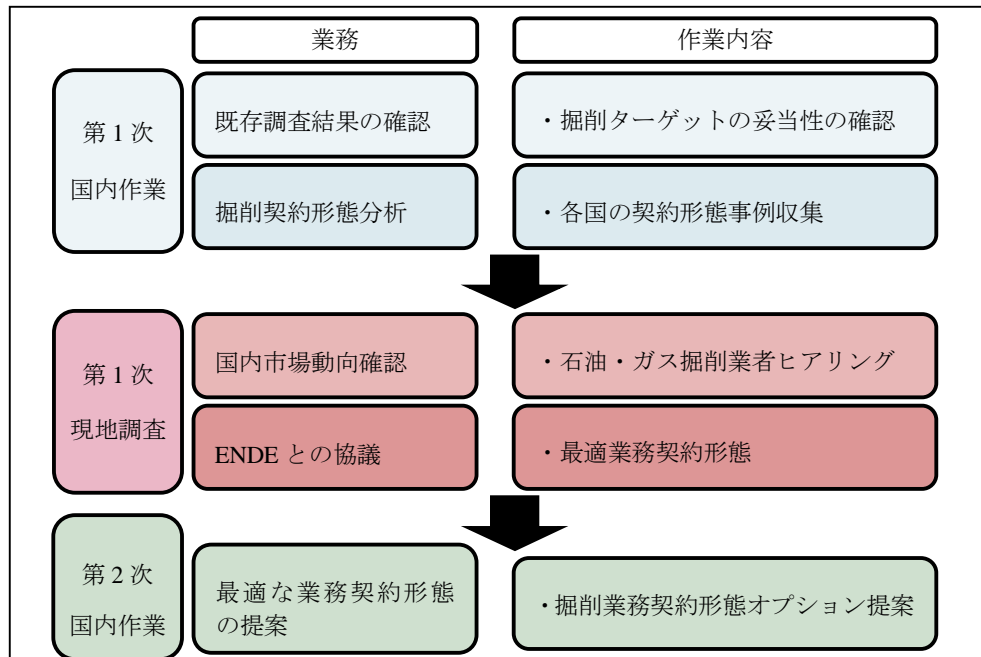
従って、円滑な事業実施には、ENDEの掘削技術に関する知識や地熱掘削の調達プロセス等の能力向上が必要となったことから、円借款事業の本体コンサルタント契約に先だち、本業務が実施されることとなった。

1.2 業務の目的

本業務は、実施機関による円借款事業の本体コンサルタント契約に先だち、速やかに掘削業務にかかる技術仕様の決定に必要な情報を整理し、同掘削業務の調達プロセスを促進するとともに、地熱掘削業務契約を適切に調達・監理するために必要な能力強化を通じ、本事業を促進することを目的とする。

2. 業務の実施方法

本業務は、2015年1月下旬～2015年7月下旬の約7ヶ月の工程で実施した。本業務は以下の項目を2回の国内作業および1回の現地調査の中で実施した。国内作業・現地調査の作業内容を次図に示す。



出典：調査団作成

図1 国内作業と現地調査における作業内容

3. 既存調査のレビュー結果

3.1 既存調査のレビュー

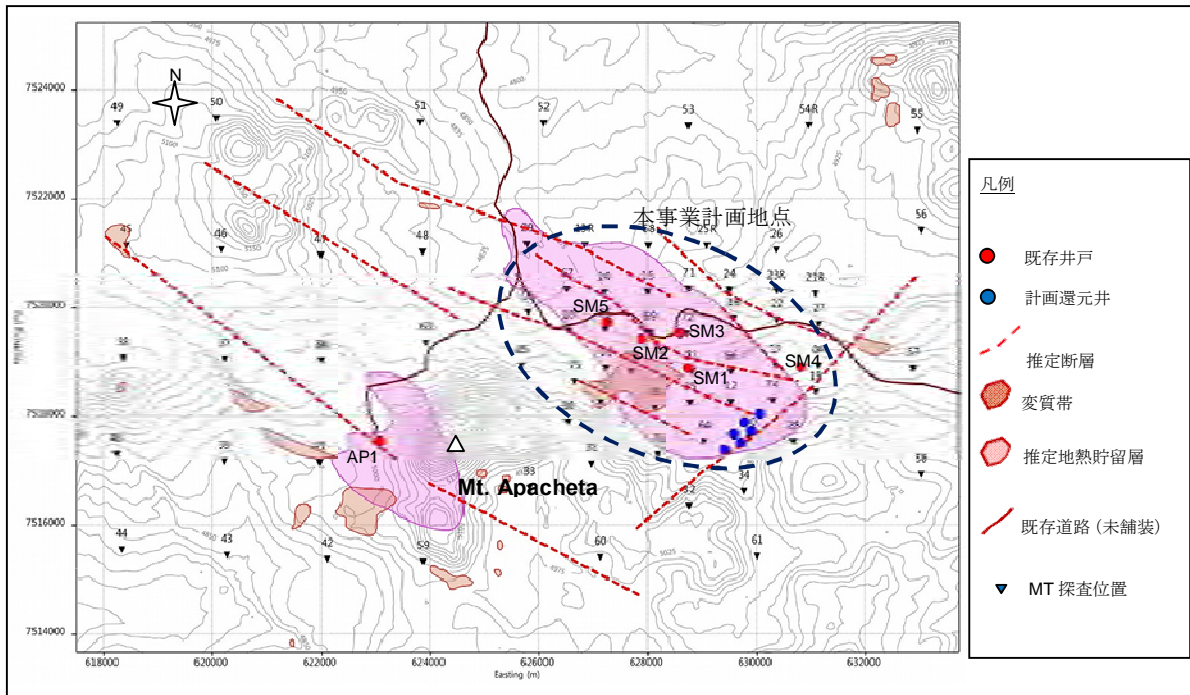
3.1.1 地質・地化学調査

プロジェクト地域はソル・デ・マニャーナ地熱地域に位置し、図2および表1に示すようにこれまでに5本(SM-1~SM-5)の地熱調査井が掘削されている。また、プロジェクト地域の約5km西方のアパचेタ山の西側山麓では1本(AP-1)の地熱調査井が掘削されている。調査井の位置および数量を表1にまとめる。

本地域の地質は中新世以降の火山砕屑岩類から構成され4層に分類される。下位から、下部イグニブライト層、安山岩層、上部イグニブライト層、セロアパचेタ層が分布している。こうした火山砕屑岩類の基盤として、白亜紀以前の堆積岩類の分布が想定されている。WNW-ESE系及びNE-SW系の断裂構造が推定されており、これらの構造がプロジェクト地域の地熱系を規制していると想定される。特にWNW-ESE系の構造が卓越しており、地形上の隆起・陥没等の特徴づけている。

地化学的検討の結果から、プロジェクト地域の地熱流体の特徴は、以下のように考えられる。

- 主な起源は天水で、深部高温流体の流入や伝導熱により270℃またはそれ以上に加熱されている。
- 熱源は堆積岩類の存在が想定される1700m以深にある可能性が高い。
- 高温流体は、深部から上昇し、主に熱水卓越型の地熱貯留層を形成している。
- SM-4では温度が低いことから、地熱貯留層の東方への広がりには限定されると想定される。



出典：調査団作成。JICA(2010)から変質帯、地熱貯留層を記載。CGG(2013) MT 法 3 次元インバージョン解析結果を基に断層を推定、加筆

図 2 調査井および MT 法測点配置図

表 1 既存調査一覧

調査	番号	位置		調査数量			実施
		X	Y	標高 (m)	掘進長 (m)	実施年	
調査井	SM-1	628743.58,	7518885.60	4858.8	1178.5	1988	未確認
	SM-2	627892.12,	7519428.50	4905.6	1486.5	1988-1989	
	SM-3	628596.10	7519536.07	4884.8	1406.0	1989	
	SM-4	630813.80	7518915.58	4840.5	1726.2	1989, 1991	
	SM-5	627246.80	7519738.6	4903.5	1705.0	1992	
	AP-1	****	****	****	1602.0	1987-1988	
物理探査	電気探査					1986	ENDE
	重力探査 (260 points)					1986	ENDE
	MT 探査 (69 points) and 3D inversion 解析					2013	ENDE
噴気試験	SM-1, SM-2, SM-3, SM-4, AP-1					1987-1990	UNDTCD
	SM-2, SM-5					1997	CFE
	SM-1, SM-3, SM-2					2012-2013	JICA

出典：調査団作成

注：座標系は UTMZ19 WGS84、AP-1 の正確な位置座標は不明である。また、既存のレポートはローカル座標を用いているため、本報告書では WGS84 座標に統一している。

3.1.2 物理探査

1986 年に実施した重力探査および 2013 年に実施した MT 探査結果のレビューを実施した。

MT 法の海拔 2,000m および 2,900m 解析比抵抗平面図における高比抵抗帯の分布は、重力（ブーゲー異常）の分布と大局的に一致している。この高比抵抗帯は高比抵抗基盤の起伏を表しており、高比抵抗基盤は重力（密度）基盤に対比させることができると考えられる。

地熱貯留層は高重力帯の中にあり、鉛直一次微分図で捉えられている断層等による裂罅帯が地熱流体の地熱貯留層になっていると考えられる。既存調査井周辺には重力探査結果の鉛直一次微分図から示唆されるリニアメントがいくつも認められる。

本地域の調査井 SM-1、2、3、5 周辺の比抵抗構造は、低比抵抗層がドーム状を形成し、下位にある高比抵抗層が急に盛り上がっている。地表付近の低比抵抗の分布は地表で認められる熱水変質帯の分布と対比できることから、調査井周辺の低比抵抗は熱水変質したキャップロック層として機能をもち、その下部にある高比抵抗基盤中の裂罅帯が地熱貯留層となると考えられる。調査井 SM-4 付近も高重力帯の中にあり、低比抵抗層の下で高比抵抗基盤が盛り上がっており、地熱貯留層となる可能性がある。

坑井掘削計画位置はいずれもこれらのリニアメント¹の近傍にあり、リニアメントを裂罅帯を伴う断層と想定してターゲットとしたものと考えられる。これらのリニアメントは重力分布や MT 法による比抵抗分布から推定される地質構造とも整合性があり、地熱貯留層としてのポテンシャルはあるものと考えられる。以上の検討から、現段階においては、物理探査資料からは計画された坑井掘削位置は適当と判断され、大幅な変更は必要ないとする。

3.1.3 調査井掘削報告書のデータ分析結果

プロジェクト地域には既に 5 本の調査井が掘削されている。本項目では、既存調査井掘削当時の掘削報告書及び現地調査での聞き取り調査等で収集したデータのとりまとめ、分析を実施し、掘削計画の検討を行った。

(1) SM-1

プロジェクト地域の 5 本の調査井の内、一番深度が浅い割に日数を要している。第一段（246坑）掘削後のケーシング挿入作業にて 3 回ケーシングの抜管及び挿入を繰り返している。このため、浅部での崩壊層に苦労したと推定される。

(2) SM-2

SM-1 井に比べ工期が短縮されており、第 1 段のパイロット坑掘削に 12-1/4坑ビットを使用し、その後 246ホールオープナーを用いて拡張掘を実施した。掘削用水が足りないために、貯水待機をしていることから、水の確保が追いつかなかった様子が見て取れた。

(3) SM-3

SM-2 同様第 1 段掘削にてパイロット坑掘削を実施しその後 246坑に拡張掘を実施した。第 2 段掘削と第 3 段掘削の間で 95 日間の休工期間があった。冬期間であったことから気温が低下し作業継続が困難な状況であったと考えられる。本文中の記述には気温低下（-20℃以下）によるマシントラブル等の記述もあった。

(4) SM-4

第 1 段掘削でパイロット坑掘削の後 246に拡張掘を実施。深度 1474.0m まで掘削後、工事を一旦終了したが再度 1726.2m まで増掘しており、76ケーシング（一部スリット管）仕上げとなっている。掘削レポートに増掘前の第 4 段掘削中にフィッシング作業の記述がある。

(5) SM-5

¹ リニアメント：地形上の線状構造、断層等の地質構造を表していると考えられる。

掘削レポートを入手することができなかった為、データの抽出量が他の調査井に比べ少なかった。現地調査においても掘削レポートを入手することができなかった。ドリリングチャート図は入手することができたため、大まかな坑井データは読み取ることができた。第4段掘削中に131日間の冬期休工期間があった。

3.1.4 噴気試験結果

プロジェクト地域では過去3回、①1987-1990年、②1997年5-8月、③2012年12月-2013年4月の噴気試験が実施されている。各噴気試験の詳細および結果を以下にまとめる。

(1) SM-1

- 最新の噴気試験（2012年12月-2013年1月）の結果、総生産流量および蒸気流量の最大値はそれぞれ約285 t/h、約50 t/hであった。また、噴気流体の比エンタルピの最大値は約1,150 kJ/kgであった。この結果は、SM-1で前回（約25年前）実施した噴気試験の結果と整合的であった。
- このことから、SM-1坑内では埋没等の問題は発生しておらず、生産能力は高い状態を維持できていると考える。
- 同試験結果を解析したところ、SM-1周辺の浸透率・層厚積(kh)は100 darcy-mと非常に高い値が求められた。
- 最新の検層（2012年12月）の結果、SM-1周辺の岩体温度の最大値は242°Cを観測した。この値は、約25年前の観測値（250°C）と同程度であった。

(2) SM-2

- 最新の噴気試験（2013年4月）の結果、総生産流量および蒸気流量の最大値はそれぞれ約280 t/h、約54 t/hを示した。また、噴気流体の比エンタルピの最大値は約1,150 kJ/kgであった。この結果は、SM-2で前回（約15年前）実施した噴気試験の結果と整合的であった。
- 同試験結果を解析したところ、SM-2周辺のkhは100 darcy-mと非常に高い値が求められた。この値は、1997年の噴気試験等の結果から求めたkhと同じ値である。
- 以上のことから、SM-2坑内では埋没等の問題は発生しておらず、生産能力は高い状態を維持できていると考える。
- 最新の検層（2013年3月）の結果、SM-2周辺の岩体温度の最大値は236°Cを観測した。ただし、この値は注水停止後の観測値であるため実際はこれより高いと考える。これを考慮すると、SM-2周辺の岩体温度は約15年前（243°C）と同程度であると考えられる。

(3) SM-3

- 最新の噴気試験（2013年1-2月）の結果、総生産流量および蒸気流量の最大値はそれぞれ約258 t/h、約43 t/hを示した。また、噴気流体の比エンタルピの最大値は約1,150 kJ/kgであった。
- このことから、SM-3坑内では埋没等の問題は発生しておらず、生産能力は高い状態を維持できていると考える。
- 同試験結果を解析したところ、SM-3周辺のkhは50 darcy-mと非常に高い値が求められた。
- 最新の検層（2012年12月）の結果、SM-3周辺の岩体温度の最大値は247°Cを観測した。この値は、約15年前の観測値（245°C）と同程度であった。

(4) SM-4

- 最新の検層（2012年12月）の結果、SM-4周辺の岩体温度の最大値は224°Cを観測した。この値は、SM-4以外の坑井周辺の岩体温度240～250°C程度と比べて低い。また、この値は約15年前の観測値（220°C）と同程度であった。
- SM-4周辺の温度だけ他坑井周辺と比べて低いことから、SM-4と他坑井とは水理的なつながりが非常に小さい可能性がある。
- 最新の注水中検層（2013年1-2月）の結果、注水流量と坑井内圧力の関係から、SM-4は大気圧で600 m³/h程度以上還元できると予想する。

(5) SM-5

- 1997年5-8月の噴気試験の結果、総生産流量および蒸気流量の最大値はそれぞれ約220 t/h、約35 t/hを示した。また、噴気流体の比エンタルピの最大値は約1,050 kJ/kgであった。
- ビルドアップ試験の結果、SM-5周辺のkhは130 darcy-mと非常に高い値が求められた。また、噴気試験等の結果からkhを求めた結果、20 darcy-mと高い値が求められた。
- 1997年5月の検層の結果、SM-5周辺の岩体温度の最大値は248°Cを観測した。

(6) AP-1

- 1987-1990年の噴気試験の結果、噴気流体の比エンタルピの最大値は、約1,400 kJ/kgであった。ただし、総生産流量の最大値は約30 t/hしかなかった。
- したがって、AP-1周辺の温度は高いものの、AP-1自身の生産能力は低い。
- 1997年5月の検層の結果、AP-1周辺の岩体温度の最大値は245°Cを観測した。

(7) 各坑井間の干渉

- JICA(2013)では噴気試験中に実施した圧力測定の結果から、SM-1、SM-2、SM-3各坑井間の干渉は小さいと判断している。
- SM-2噴気試験開始に伴い、SM-1の坑井内圧力に低下傾向が見える。このことから、SM-1とSM-2は干渉していることが懸念される。

3.2 掘削ターゲットの妥当性

3.2.1 地熱概念モデルの検証

掘削ターゲットの妥当性を評価するにあたり、ターゲット選定の前提となる地熱系概念モデルの検証を行った。

(1) 地熱貯留層構造

- ソル・デ・マニャーナ地域とアパチェタ山西麓地域それぞれにおいて、WNW-ESE系の断層が地熱流体の流動・分布を規制している。
- 坑井SM-1とSM-4の間にNW-SE系断層による水理的な遮へい構造が存在する。
- 深度800 m付近までは透水性が低く、キャップロックと見なすことができる。深度900 mから1000 mより深部では透水性が高い地熱貯留層といえる。
- 坑井内温度検層による実測値から、SM-4を除いて、坑井周辺の岩体温度は240°Cから

250℃と考えられる。SM-4 周辺の岩体温度は約 220℃と相対的に低い。

- ソル・デ・マニャーナ地域には WNW－ESE 系の断層が密に三条分布することから、地下に高透水性の断裂分布が期待できる。
- WNW－ESE 系断層は西傾斜の正断層であることから、現計画での坑口位置からでは、坑井は断層面を追うように掘削することになり、断層面に遭遇できない可能性がある。このため、断層に遭遇するためには、断層の傾斜角を考慮して十分な偏距を設定する必要がある。モデル図では垂直に近い傾斜が示されるが、この根拠は不明なため、計画坑跡に不確実性が残る。
- 坑井地質情報を見ると逸水掘進の区間が長い可能性があり、このため蒸気を生産する断裂の分布深度の推定精度が低い可能性がある。この精査には、既存調査井の掘削時の逸泥等の記録が ENDE に保存されていれば、参考には可能である。また、既存調査井の PTS 検層のデジタルデータがあれば、これを用いた解析が可能と思われる。
- 既存坑井は WNW－ESE 系の断層に沿って掘削されており、この断層から東西に離れた地点の地下温度は不明である。また、ソル・デ・マニャーナ地域とアパचेタ山西麓地域の地熱貯留層が連続していないこと、両地域間に地熱徴候が分布しないことから、断層から離れるにつれ、地下温度が急激に低下することが想定可能である。リスクを回避するには断層に近い範囲でターゲットを設定することになるが、このとき坑井間距離が短くなることで、生産干渉の発生が懸念される。
- 地熱貯留層構造の推定根拠の一つは電気探査（シュランベルジャー法）による比抵抗構造である。この探査での測線長は 1000 m と読み取れることから、可探深度は比較的浅く、地熱貯留層深度の推定精度はそれほど高くはないと考えられる。

(2) 熱源

- 熱源の分布は第四紀火山活動の特徴をまとめることにより妥当な推定がなされている。すなわち、当地域内の最も若い火山岩としてセロアパचेタ丘の安山岩（35 万年～50 万年前）が分布し、本地域周辺にはセロデスリンデ、セロボルカン、セロスデルタチオ、ボルカントチオといった活発なアンデス西側山脈が分布する。これらの火山活動を支えるマグマ溜まりからの広域な熱供給が想定できる。

(3) 地熱流体

- 地熱流体の主な上昇域はソル・デ・マニャーナ地域の SM-1 周辺とアパचेタ山西麓地域の AP-1 周辺に想定できる。
- 地熱流体は WNW－ESE 断層に沿って北西方および南東方に流動・分布する。このうち、北西方への流れがより高温を保っており、生産井のターゲットとして有効と考えられる。
- SM-1 から SM-4 の間には地熱流体の流動を妨げるバリア（NW 系断層）が分布する。

3.2.2 既存調査のレビュー結果の統合解釈

既存調査結果のレビュー内容を統合し、地熱系概念モデルの再検討を行った。地形判読、調査井結果、重力探査結果（ENDE,1986）及び MT 探査結果（CGG,2013）から断層位置を推定した。図 3 では、推定された断層分布を MT 法三次元比抵抗解析平面図（海拔 4700 m）に重ねて示している。図 4 には地熱系概念モデルの断面図を示す。なお、断面図の位置は図 3 平面図に表示している。

本調査では、CGG（2013）による MT 法 3 次元比抵抗構造の解析を行うことにより、より深部までの地熱貯留層の詳細な推定が可能となった。主な解析の成果として、地熱貯留層を規制する断層やキャップロックの分布をより明確に推定することができた。

これら解釈結果と JETRO（2008）にて提唱された地熱系概念モデルとの間には大きな乖離は見られない。従って、現在の新規坑井掘削の方針（掘削ターゲットの範囲）は概ね妥当と判断できる。既存のデータおよび MT 法 3 次元データ比抵抗構造を統合して得られた解析結果の詳細を以下にまとめる。

(1) 地熱貯留層構造

(a) 断層系

- プロジェクト地域全域において、WNW-ESE 系の断層が卓越しており、また、これを切るように NE-SW 系の断層が発達している。これらの断層系が地熱貯留層を規制していると想定される。
- 地表に現れた段差、MT 法 3 次元探査結果、既存調査井の地質から推定される落差から、WNW-ESE 系の断層の多くは正断層と推定され、掘削ターゲットとなる断層は SW 側に傾斜すると予想される。
- プロジェクト地域に発達する断層系は急傾斜と推定されているが、露頭や既存調査井で確認できていないため、断層の性状や傾斜角は不明である。
- 坑井内温度検層による実測値から、SM-4 を除いて、坑井周辺の岩体温度は 240℃から 250℃と考えられる。SM-4 周辺の岩体温度は約 220℃と相対的に低い。このことから、SM-1 と SM-4 の間に存在する WNW-ESE 系断層が、地熱貯留層の東方への広がり規制していると推定される。

(b) キャップロック

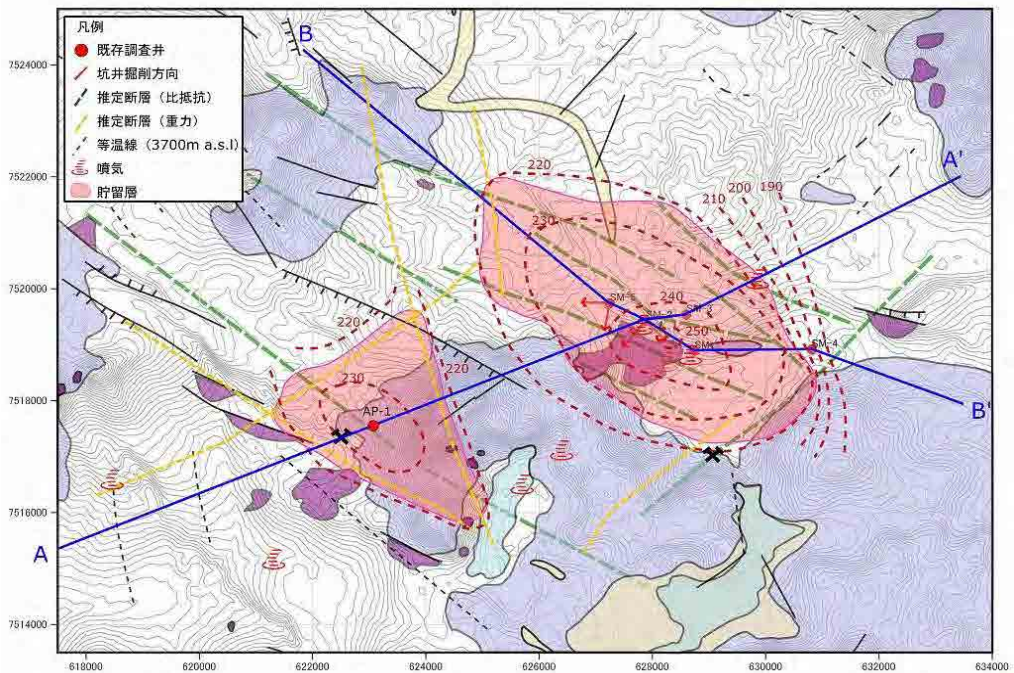
- 調査井で確認された粘土化帯～一部珪化帯は、既存の調査井で透水性が低く、キャップロックを形成すると想定される。このキャップロックの分布は、MT 法 3 次元解析結果における約 10 Ω m 以下の低比抵抗帯に相当する。
- 低比抵抗帯および調査結果から、深度 800 m 付近までは透水性が低く、キャップロックと見なすことができる。深度 900m から 1000m より深部では透水性が高い地熱貯留層といえる。

(2) 熱源

- 既存レポートの地質情報から、当地域内の最も若い火山岩としてセロアパチェタ丘の安山岩(35 万年～50 万年前)が分布し、本地域周辺にはセロデスリンデ、セロボルカン、セロスデルタチオ、ボルカントチオといった活発なアンデス西側山脈が分布する。これらの火山活動を支えるマグマ溜まりからの広域な熱供給が想定される。

(3) 地熱流体

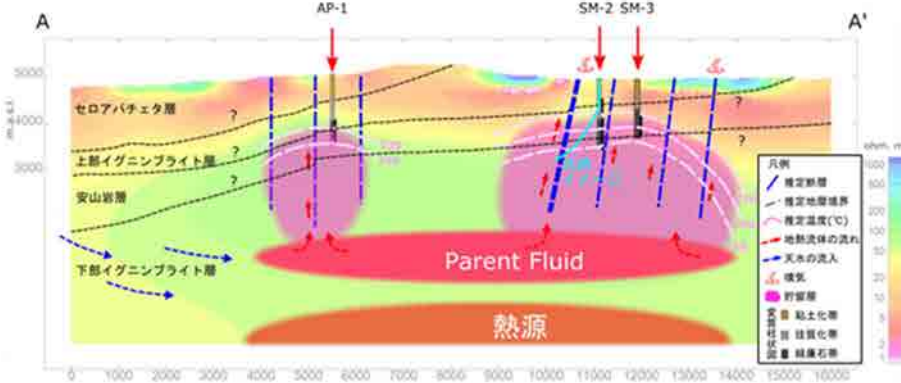
- 熱水の既存の地化学分析結果から、地熱流体の起源は主として天水であり、堆積岩類の存在が想定される 1700m 以深まで浸透・循環し、地熱流体の主な上昇域はソル・デ・マニャーナ地域の SM-1 周辺とアパチェタ山西麓地域の AP-1 周辺で、断層に沿って上昇していると想定できる。



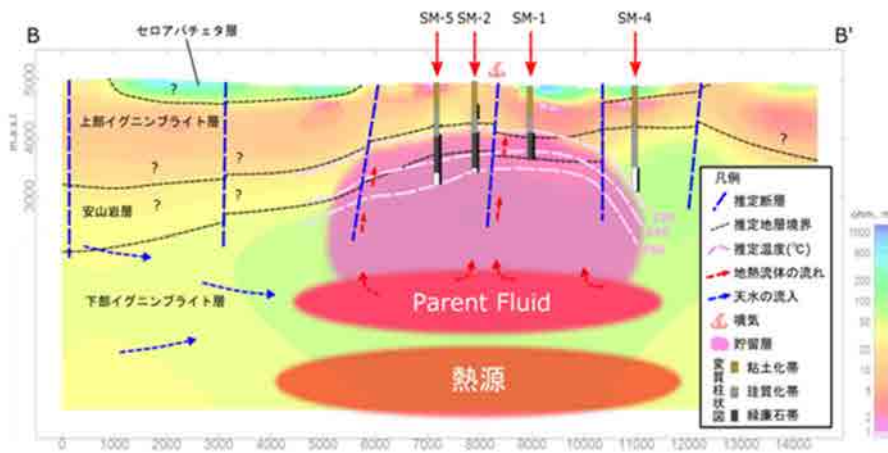
CGG (2013)に調査団加筆

図 3 レビュー結果から推定された断層分布 (平面図)

1) A - A' 断面



2) B - B' 断面



CGG (2013)をもとに調査団作成

図 4 レビュー結果を統合した地熱系概念モデル (断面図)

3.2.3 掘削仕様に係る情報整理

(1) 掘削リグ等機材

プロジェクト地域は 4000m 以上の高標高に位置し、低温で過酷な条件で傾斜掘削を実施する必要があることから、機械効率の低下(30%-40%)を考慮し、1500HP 以上（4000m 級）のリグを選定することを推奨する。また、6 月～10 月の冬季には、相当な気温の低下が予想される。このため、本プロジェクト地域で使用する機材は、寒冷地仕様の機材が好ましい。更に、ポンプや配管関係等流体を扱う機材には、水抜き機能が必要不可欠である。

(2) 掘削時のサイトの人員体制

本プロジェクト地域は、標高が高く、冬期間は気温が氷点下 20℃程度まで冷え込こともあり、掘削工事を実施する上で非常に過酷な環境であるといえる。このため、掘削クルーの人員体制、体調管理には十分な配慮をする必要がある。調査井掘削時には、発注者側は、3-4 人の監督員が 1 班として、3 班を 10 日シフトの 3 交代制、コントラクター側は管理をする数名の（Administrator/Coordinator）の下、11 名程度で 15 日シフトの 3 交代制を採用していた。

(3) 計画工程（案）の検討

調査井の掘削レポートよりデータを抽出し、各坑井、各段の掘進率から 1m 掘削するのに要した日数を算出し、これらの数値の各段の平均値を算出した。この結果、生産井の掘削が 92 日程度、還元井の掘削が 71 日程度となった。

計画工程との比較を行うにあたり、掘削レポートの分析結果より、調査井掘削当時は冬期間の 6 月～10 月は休工となっていた。これは、気温の低下によるマシントラブルや掘削用水の凍結等により、掘削が困難であったためと考えられる。このため、もっとも気温の低い 7 月～8 月に 2 ヶ月間の休工期間を設けた。更に、各坑井の掘削毎に掘削機械の移設作業が発生することも考慮し、掘削機械の移設期間を 20 日間程度と設定した。以上を加味した上で、掘削予想日数（生産井 92 日程度、還元井 71 日程度）して、計画工程の検討を行った。この結果、現在の計画工程では 24 ヶ月での掘削終了を予定しているが、今回算出した工程では 30 ヶ月を要する結果となった。

現在の掘削技術や、より高いスペックの掘削リグを使用した場合はより少ない工期で工事を完遂できる可能性は十分にあると思われる。より精度の高い計画工程を作成する為には、掘削ターゲット選定を行った上で、詳細な坑井仕様を決定し、再度計画工程の検証を行う必要がある。

(4) 既存水井戸の補修・追加掘削の必要性検討

現在の水の供給量(7L/sec)では、新規坑井掘削を実施にするにあたり、貯水待機等による掘削工程の遅延が懸念される。また、掘削中に大容量の逸泥が発生した場合に、掘削困難に陥るだけでなく、最悪の場合掘削編成がスタックされる危険がある。このため、本プロジェクトにおける水井戸の補修及び追加掘削は必要であると判断する。なお、貯水待機無しで掘削工事を進める為には、1 本ずつ掘削を進める場合、40L/sec の水の供給量が必要であると考え。仮に掘削工期短縮の為に 2 本同時掘削を実施する場合は、2 倍の 80L/sec の水の供給が必要となる。

4. 掘削業務形態の検討

4.1 支払形態

4.1.1 工事数量精算方式とランプサム方式の特徴

工事契約における支払方式は、一般的に、(1)工事数量精算方式（再計測方式）、(2)ランプサム方式、(3)コストプラスフィー方式（実費払い方式）に分類される。「コストプラスフィー方式」は開発援助案件では採用されていないことから、本調査においては、対象外とする。

掘削工事における工事数量精算方式は、「掘削時間に基づく精算（daily/hourly）」と「掘削延長に基づく精算（footage）」に分類することができる。ランプサム方式では、予見不可能事象の発生に伴う工事費用の上昇を入札者は入札金額に含めるため、入札金額は工事数量精算の場合に比べ高く提案される。

4.1.2 IADC（国際掘削業者協会）標準契約書における支払形態

International Association of Drilling Contractors（IADC：国際掘削業者協会）発行の標準工事契約条件書においても、「掘削時間精算方式」、「掘削長精算方式」ならびに「ターンキー（ランプサム）方式」が用意されており、数多くの地熱井掘削事業で利用されている。

作業時間精算において支払のベースとなる料率は、実際の掘削時間に適用される **Operating Rate**、待機時間に適用される **Standby Rate**、修理時間に適用される **Rate during Repair** の3種類があり、稼働状況の違いにより異なる料率が適用される。

さらに、IADC 標準工事条件書では、掘削長精算やランプサム精算においても、部分的に作業時間精算を組み合わせて用いること（**Operating Rate** による精算）を可能としている。

4.1.3 海外の地熱掘削事業事例における支払形態

近年地熱開発の実績のある国における事例より支払形態を確認した。7件の事例から、支払方式として作業時間精算の採用が6件あることが確認された。アイスランド国においては、掘削長精算が主流であることがヒアリングにより明らかになった。なお、ランプサム支払を採用している事例は確認されなかった。

4.1.4 本邦国内の地熱掘削事業事例における支払形態

既存の国内地熱井掘削事業では、基本的にはランプサム支払を採用しているが、別途設定された単価による実費精算を可能としており、作業時間精算が実質的に採用されていると見なすことができる。なお、契約条件書に詳細な取り扱いの記載のない事項については、個別に協議することとなっている。

4.1.5 井戸掘削業者とのヒアリング結果

サンタクルスにおいて実施した市場調査の結果、12社全てが本事業への参画の意思を示しているが、支払条件についてはおしなべて作業時間精算を希望している。掘削長精算やランプサム精算については予見不可能リスクの高さからその受容に否定的であることが確認された。特にランプサム精算に対しては強い抵抗感が示された。

4.1.6 本事業における支払形態の提案

本事業に適用される支払形態を検討するにおいて、「ランプサム方式」は以下の理由により除外するのが妥当と考える。

- (1) 請負者のリスクが非常に大きく入札において不落や不調となる可能性がある。
- (2) 事例調査において「ランプサム方式」の適用例は確認されなかった。
- (3) ヒアリング調査において井戸掘削業者は「ランプサム方式」に対して強く否定的であった。

また、井戸掘削請負者とのヒアリングにおいては、全ての請負者が「掘削長精算方式」の受け入れにも否定的であった。

以上により、本事業に適用される支払形態は、地熱井掘削事業に一般的に採用されている「掘削時間精算方式」とすることが実践的であると考えられる。

4.2 契約条件書

4.2.1 概要

契約条件書は、契約当事者の権利と義務を規定し、契約当事者間のリスク配分を定めることから、契約書全体のなかで中核的な役割を果たしている。

本事業の削井工事契約に推奨される契約約款としては、数量精算方式が適用される場合、以下が候補として挙げられる。

- 1) FIDIC Pink Book (FIDIC Conditions of Contract for Construction, MDB Marmonized Edition)
- 2) IADC 掘削工事契約書 (International Land Daywork Drilling Contract)

4.2.2 FIDIC Pink Book の特徴

JICA 調達ガイドラインでは、借款借入人に対して JICA 標準入札書類の使用を要求しており、標準入札書類（工事）では、契約条件書として FIDIC Pink Book が採用されている。

FIDIC Pink Book の特徴は以下の通り要約される。

- 1) 発注者設計により実施される工事に適用される。
- 2) 支払は数量精算方式（BOQ 方式）による月払いである。
- 3) 発注者と請負者のリスク分担にバランスがとられている。
- 4) 発注者・請負者共に管理できないリスク、また一般的に保険を付保できないようなリスクについては基本的に発注者がリスクを負担する。
- 5) 下記の役割を果たす Engineer が配置されている。
 - (1) 発注者の代理人としての役割
 - (2) 独立した契約管理者としての役割
- 6) クレームおよび紛争の解決手続が詳細に定められている。

4.2.3 IADC 工事契約条件書の特徴

4.1.2 章で記述した通り IADC は支払方式の違い（掘削時間精算、掘削長精算、ランプサム）により 3 種類の契約約款を発行している。

IADC 掘削時間精算方式においては、請負者はリソースの提供および掘削業務を発注者（öOperatoröと称する）の指示・管理のもとに実行することを前提としており、実質的に発注者が施工責任を分担すると考えられる。

一方で、掘削長精算方式やランプサム方式においては、請負者自らが施工責任を負うことを前提としている。

予見不可能な地質条件に対する補償は、IADC の掘削時間精算契約においては、Standby Rate 等を適宜適用することで円滑な精算手続きを可能とする特徴がある。すなわち、現場において発注者の指示のもとで柔軟に工法の変更を行い、それに伴い契約金額や工期をリアルタイムで変動させる仕組みと捉えることができる。

4.2.4 FIDIC Pink Book と IADC 工事契約条件書の比較

FIDIC Pink Book と IADC 標準工事契約条件書（Daily Basis）の各条項の比較を行った。比較により明らかなことは、IADC 標準工事契約条件書は、FIDIC Pink Book と比べ発注者側へのリスク配分が大きいことである。また、工事契約条件書の詳細性についても、FIDIC 契約約款に比べ大きく劣る。

4.2.5 開発援助案件における契約条件書の事例

本調査において収集された米州開発銀行（Inter-American Development Bank : IDB）融資による地熱掘削事業の契約条件書の分析を行った。本事業の工事契約条件書は、MDB 融資案件において標準的に使用される FIDIC Red Book や FIDIC Pink Book それ自体ではないが、支払い手続き、工程管理、遅延損害金、保険付与、完成試験、引渡し手続き等で、FIDIC 契約約款に類似したプロセスが多く規定されている。

4.2.6 本事業における契約条件書の提案

本事業の削井工事契約に推奨される契約条件書としては、下記の理由により FIDIC Pink Book を選択することが妥当と考えられる。

- (1) FIDIC Pink Book は、JICA 標準入札書類（工事）の契約条件書として採用されている。
- (2) IADC 標準工事契約条件書は発注者側へのリスク配分が非常に大きいと判断される。
- (3) IADC 契約約款は、実際の使用においては多くの変更が加えられているケースが多いようである。
- (4) MDB 融資による地熱井掘削工事において FIDIC Pink Book に類似した契約条件書の使用事例がある。

支払形態については、「掘削時間精算方式」とすることが実践的であると考えられる。しかしながら、IADC 時間精算契約に規定されるような「発注者が殆ど全ての指示を請負者に与え最終的な施工責任は発注者が負う」という考え方ではなく、掘削に伴うリスクを契約当事者間で適度にバランスさせるという考え方を導入することが妥当と考えられる。

4.3 契約パッケージ

本事業の削井工事は、下記を勘案した契約パッケージにより実施することが提案される。

- 1) 契約間のインターフェースの調整ならびに実施機関の管理上の負担軽減を考慮すると契約パッケージの数は少ないことが望ましい。
- 2) 準備工事（リグ基礎、アクセス道路、給水施設の整備）は掘削工事請負者のモービライゼーションに先行して発注することで全体工期の短縮を図ることができる。
- 3) 掘削資材を掘削工事から分離して発注することで、中間コストの削減に寄与できる。また、資料の品質についても密接に管理することができる。
- 4) 掘削資材契約については、入札は1回で実施するとしても、入札者は全ての項目または幾つかの項目についてオファーすることも可能な設定とすることができる。
- 5) 掘削契約は付帯する全てのサービスを含めた単一の契約とすることで、各種作業間のインターフェース管理を請負者に負わせることができる。代替案として、掘削資材入札に適用する方法（一回の入札で複数契約も可能とする方法）を掘削契約に適用することも考えられる。

4.4 契約変更と JICA への同意申請

JICA の借款契約書において、通常、借入人は契約の重大な変更と契約金額の変更が生じた場合に JICA の事前合意を得ることが要求されている。

しかしながら、数量精算方式による工事契約では下記の事由により契約金額は頻繁に変動する。

- 1) 数量明細書（BOQ）の見積精度
- 2) 変更（Variation）の指示による工事数量の増減
- 3) 物価変動による契約金額の調整
- 4) 請負者からのクレームに基づく追加費用

また、ランプサム契約においても上記 2), 3), 4) が発生した場合は、契約金額の変動を避けることはできない。

このことから、厳密に言えば毎月の費用精算時に契約金額の変動は生じているが、その度に JICA に同意申請を求めることは現実的ではないことから、実際の運用では最終的な支払金額が契約金額を確実に超過することが判明した時点で同意申請を行っているのが実態と考えられる。

5. ENDE との協議および能力強化

2015 年 3 月 14 日～3 月 30 日の工程で、ボリビアを訪問し、ENDE に対する 2 回のセミナーを開催し、ENDE と協議、能力強化を図った。

5.1 第一回セミナー

3月18日（水）9:00~13:00、ENDE ANDINA のミーティングルームにて実施し、ENDE 側の出席は11名であった。

ENDE は円借款による調達に慣れていないことから、セミナーおける解説は JICA 調達ガイドラインを含む包括的な内容とした。標準入札書類に関わる ENDE の理解促進・能力向上が図られた。

5.2 第二回セミナー

3月26日（木）9:00~13:00、ENDE ANDINA のミーティングルームにて実施し、ENDE 側の出席は13名であった。

第一次現地調査の終盤に開催した第二回ワークショップにおいて、調査結果の内容と最適な掘削業務契約形態を ENDE に提示し、ENDE との協議を通して理解の促進が図られた。

6. 本事業に係る提案事項

6.1 掘削ターゲット選定

(1) 既存の掘削ターゲットの妥当性レビュー結果

地質、地化学結果および物理探査結果等から、地熱系概念モデルの検討を実施し、過去の温度検層や噴出試験から、既存調査井の能力を検証した。

- 本調査では、CGG（2013）による3次元比抵抗構造の解析を行うことにより、より深部までの地熱貯留層の推定が可能となり、地熱貯留層を規制する断層やキャップロックの分布が明らかになった。
- JETRO（2008）にて提唱された地熱系概念モデルと比較すると、地熱貯留層分布に大きな乖離は見られない。また、WNW-ESE 系の断層に沿って熱水流体が上昇すると予想される。従って、現在の新規坑井掘削の位置およびターゲットの方向性はおおむね妥当と判断できる。
- しかしながら、掘削ターゲットやケーシングプログラム、坑口位置などを含めた掘削計画の詳細検討は未だ実施されていない。ラグナ・コロラダ地熱発電所建設事業（第一段階）に掘削が予定されている坑井（生産井4本、還元井3本）について、掘削ターゲット選定および作業工程案作成する必要がある。

(2) 掘削ターゲット選定を実施する上での不足情報や懸念事項

掘削ターゲット選定を実施するにあたり、以下に留意する必要がある。

- 既存坑井の逸水掘削区間が長く、ピンポイントでフラクチャ深度を推定できない。このため、ターゲット深度には幅を持たせる掘削計画が必要である。
- 断層が西側傾斜で緩傾斜の可能性がある。坑跡が断層面を追いかける形となり、最悪の場合、断層に到達しないことが起こり得る。
- 還元井の地質情報が乏しく、透水性、深度の設定、還元能力は明らかではない。

(3) 掘削ターゲット選定を実施する上で必要な検討項目

以上の不足情報や懸念事項を補完するために、以下の検討項目を提案する。

- 流量検層のデータ入手と再解析
- 坑口の位置を断層の西側へシフトさせる可能性検討
- 調査井 SM-4 のデータおよび比抵抗分布の再解析による還元井の掘削計画

(4) 掘削ターゲット選定の提案

以上を考慮した上で、本業務の中で、ラグナ・コロラダ地熱発電所建設事業（第一段階第一期）に掘削が予定されている坑井（生産井 4 本、還元井 3 本）について、掘削ターゲット選定および作業工程案作成を実施し、坑井掘削の技術仕様ための資料整理を早急に行うことを提案する。具体的には、以下の作業を実施し、作業期間は 3 ヶ月程度と考えられる。

- 坑口の位置、ターゲットの座標や坑跡
- ケーシングプログラム
- 図面類作成
- 作業計画案

6.2 施工管理体制の強化

本事業の施工管理体制は以下の点を考慮して計画する必要がある。

- 1) ENDE は坑井掘削の十分経験や技術を有していない。
- 2) 「掘削時間精算方式」を採用する場合、現場の進捗や状況に応じ請負者に適切な指示や変更を与えたり、請負者の責任に帰する進捗の低下について支払の対象としないように、ENDE 側の密接な工事監理が重要となる。
- 3) 契約条件書として JICA 標準入札書類（工事）で採用されている FIDIC Pink Book を採用する場合、工事契約の管理を司る Engineer を配置する必要がある。
- 4) 現在、調達手続きが進められているコンサルタントには請負者に対して直接的に指示を行ったり、各種の証明書を発行するという FIDIC 契約における Engineer の役割は担わせてはいない。

上記より、発注者側の管理体制を強化し FIDIC Pink Book に適合させるためには、新たに Engineer の雇用が必要となる。

代替案としては、コンサルタントの要員を増強して、コンサルタントに Engineer の機能と役割を持たせることが考えられる。この場合においても、ENDE 自体に技術的な判断が求められる局面が生ずるため、ENDE をサポートする技術専門家の配置が必要になると考えられる。

6.3 契約パッケージにおける留意点

契約パッケージは、準備工事、掘削資材供給および掘削工事が提案される。それぞれのパッケージにおける留意事項は以下が挙げられる。

(1) 準備工事

準備工事は、リグ基礎、アクセス道路および給水設備（水井戸から掘削地点まで）等の建設および維持管理を含む。準備工事を掘削業者に委託することも可能ではあるが、委託した場合は掘削業者との契約後に準備工事が開始されることになるため、特に工期短縮を図るためには、掘削業者との契約前から実施機関の責任において準備工事が実施されることが推奨される。なお、建設や補修の設計仕様および範囲は、詳細設計時に測量を実施した上で、数量を確定する必要がある。

- リグ基礎は、5000 m² 程度の整地が必要であり、抗井掘削前に建設を行う。現計画ではリグ基礎の生産井位置は、既存坑井 SM-2 および SM-5 周辺の 2 箇所、還元井は SM-2 から約 2 km 南東側に計画されている。ただし、これら井戸位置は、新規井戸から得られた情報により、必要に応じターゲットの位置を適宜修正する必要がある。従って、全てのリグ基礎建設を、坑井掘削開始前に終了する計画ではなく、計画を修正の可能性を考慮して、次に予定されるリグ基礎整備を坑井掘削と並行作業で行うことが望ましい。ただし、掘削作業開始前には、リグ敷地の整備は完了してはならない。
- アクセス道路は、リグ運搬可能な道幅 4 m 以上を確保する必要がある。路面が悪い箇所は、路面には厚さ 10cm 程度の砂利を敷設する。現地予察によると、ウユニからプロジェクト地点までは、道幅も広く道路は概ね良好であるが、数か所において渡渉が必要であり、特に、南緯 21° 51' 15.8" 西経 67° 30' 45.8" から南緯 21° 59' 25.7" 西経 67° 34' 1.7" の範囲の約 18km 区間は補修が必要と考えられる。さらに、掘削期間中に、冠水や土砂崩れ等で、通行が出来なくなった場合は補修を実施する。
- 坑井掘削に必要な水井戸からの給水量を確保する。本事業において貯水待機無しで掘削工事を進める為には、1 本ずつ掘削を進める場合は約 40L/sec、仮に掘削工期短縮の為に 2 本同時掘削を実施する場合は約 2 倍の 80L/sec の水の供給が必要となる。また、水量が時間とともに低下した場合は、追加の井戸掘削も含め、必要な水量を保つための対策を、実施機関が検討および実施する。

(2) 掘削資材供給および掘削工事（付帯サービス含む）

掘削資材供給と掘削工事を分割して 2 パッケージ、もしくは分割せずに 1 パッケージとすることが考えられる。パッケージ分けにおける実施機関に係るリスクを表 2 にまとめる。

表 2 パッケージ分けによる実施機関に係るリスク比較

項目	2 パッケージ	1 パッケージ
1. 資材の品質の確保		
実施機関の密接な管理による資材品質の確保 ^{*1}	✓	
2. 工期遅延リスクの回避		
資材調達の先行による工期遅延リスクの回避	✓	
契約分割による調達手続き遅延リスク回避		✓
掘削計画変更に伴う資材数量増加への柔軟な対応	✓	
3. コスト低減		
調達管理費の削減によるコスト低減	✓	
資材業者の複数化によるコスト低減	✓	
4. 実施機関の管理上の負担軽減		
管理上の作業の低減		✓
資材の不足や過剰注文の回避		✓

出典：調査団作成

注：優れているものを✓で示す。

*1: 実施機関が、品質確保のため資材の仕様を指定し管理することは可能であるが、1 パッケージにおいては、どうしても掘削業者はコストを削減する方向、つまり品質を下げる方向に意思が働くため、実施機関が完全に品質をコントロールすることは難しい。

実施機関はそれぞれの優劣を考慮して、パッケージ分けを決定する必要がある。表 6-1 に示す通り、2 パッケージは 1 パッケージに比べ、品質管理、工程管理およびコストの面で優れていると考えられる。なお、工程管理においては、1 パッケージの場合、掘削業者が資材を調達するため、2 パッケージの場合に起こり得る実施機関側の調達手続き遅延リスクは回避されるが、坑井掘削中においては、掘削ターゲットやそれに伴う掘削計画は、新規井戸から得られた情報を基に、適宜修正や変更が必要となることが予想される。実施機関の都合による掘削計画変更で、資材の数量に変更が生じた場合、1 パッケージでは、こうした変更に伴う資材調達は、掘削業者のクレームの対象となり、数量が増加した場合は、資材が調達できないことを理由として、掘削工期が遅れる可能性がある。

ただし、2 パッケージの場合、実施機関が資材の品質や調達に責任を持つことから、資材の仕様作成においては、掘削工事において問題が生じないような仕様（十分な品質を確保できる）とし、受け入れ検査を入念に実施する必要がある。

以上

ラグナ・コロラダ地熱発電所建設事業（第一段階第一期）に係 る案件実施支援調査(SAPI)

ドラフトファイナルレポート

目 次

調査対象位置図

略語表

要旨

第 1 章	調査の目的・背景.....	1
1.1	調査の背景.....	1
1.2	業務の目的および範囲.....	1
1.2.1	業務の目的.....	1
1.2.2	対象地域.....	1
1.2.3	調査の範囲.....	2
第 2 章	業務の実施方法.....	2
2.1	既存の調査結果の確認.....	3
2.1.1	既存の関連調査結果の収集・整理およびレビュー.....	3
2.1.2	掘削ターゲットの妥当性の検討.....	5
(1)	物理探査結果からの検証.....	5
(2)	地熱系概念モデルからの検証.....	5
(3)	既存水井戸の補修・追加掘削の必要性検討.....	5
2.2	掘削業務契約形態の分析.....	6
2.3	ボリビア国内市場動向の確認.....	6
2.4	ENDE との協議及び能力強化.....	6
2.5	掘削業務契約形態の提案.....	7
第 3 章	既存調査のレビュー結果.....	7

3.1	既存調査のレビュー	7
3.1.1	地質・地化学調査	7
(1)	地質調査	7
(2)	地化学調査	10
3.1.2	物理探査	15
(1)	重力探査	15
(2)	MT 法探査	18
(3)	物理探査結果からみたボーリング計画の妥当性	23
3.1.3	調査井掘削報告書のデータ分析結果	26
(1)	SM-1	26
(2)	SM-2	26
(3)	SM-3	26
(4)	SM-4	26
(5)	SM-5	26
(6)	各坑井データのまとめ	26
3.1.4	噴気試験結果	33
(1)	1987 - 1990 年の噴気試験	33
(2)	1997 年 5 - 8 月の噴気試験	36
(3)	2012 年 12 月 - 2013 年 4 月の噴気試験	37
(4)	噴気試験結果まとめ	39
3.2	地熱概念モデル・掘削ターゲットの妥当性	41
3.2.1	地熱概念モデルの検証	41
(1)	地熱貯留層構造	44
(2)	熱源	44
(3)	地熱流体	45
3.2.2	既存調査のレビュー結果の統合解釈	45
(1)	地熱貯留層構造	45
(2)	熱源	46
(3)	地熱流体	46

3.2.3	掘削仕様に係る情報整理.....	47
(1)	掘削リグ等機材.....	47
(2)	掘削時のサイトの人員体制.....	48
(3)	計画工程（案）の検討.....	49
(4)	既存水井戸の補修・追加掘削の必要性検討.....	52
第4章	掘削業務形態の検討.....	53
4.1	支払形態.....	53
4.1.1	工事数量精算方式とランプサム方式の特徴.....	53
4.1.2	IADC (国際掘削業者協会)標準契約書における支払形態.....	55
4.1.3	海外の地熱井掘削事業事例における支払形態.....	56
4.1.4	本邦国内の地熱井掘削事業事例における支払形態.....	57
4.1.5	井戸掘削業者からのヒアリング結果.....	58
4.1.6	本事業における支払形態の提案.....	58
4.2	契約条件書.....	59
4.2.1	概要.....	59
4.2.2	FIDIC Pink Book の特徴.....	59
4.2.3	IADC 工事契約条件書の特徴.....	60
4.2.4	FIDIC Pink Book と IADC 工事契約条件書の比較.....	61
4.2.5	開発援助案件における契約条件書の事例.....	66
4.2.6	本事業における契約条件書の提案.....	68
4.3	契約パッケージ.....	69
4.4	契約変更と JICA への同意申請.....	70
第5章	ENDE との協議および能力強化.....	72
5.1	第一回セミナー.....	72
5.2	第二回セミナー.....	73
第6章	本事業に係る提案事項.....	74
6.1	掘削ターゲット選定.....	74
(1)	掘削ターゲットの妥当性レビュー結果.....	74
(2)	掘削ターゲット選定を実施する上での不足情報や懸念事項.....	75

(3)	掘削ターゲット選定を実施する上で必要な検討項目	76
(4)	掘削ターゲット選定の提案.....	77
6.2	施工管理体制の強化.....	77
6.3	契約パッケージにおける留意点.....	78
(1)	準備工事.....	79
(2)	掘削資材供給および掘削工事（付帯サービス含む）	79
第7章	引用文献.....	81

添付資料

Appendix-1	ドリリングチャート
Appendix-2	噴気試験結果
Appendix-3	セミナー資料（第一回、第二回）

図表目次

図 2-1	国内作業と現地調査における作業内容.....	2
図 2-2	業務実施フローチャート	3
図 2-3	調査井および MT 法測点配置図	5
図 3-1	既存地熱井の柱状対比図	8
図 3-2	ラグナ・コロラダ地域の地質図	9
図 3-3	変質断面図	10
図 3-4	主要溶存イオンによる分類	11
図 3-5	水素酸素同位体組成図	12
図 3-6	B-Cl 相関図	13
図 3-7	噴出熱水の地化学温度比較図	14
図 3-8	蒸気ガスの地化学温度比較図	14
図 3-9	ブーゲー異常図（仮定密度 2.2 g/cm ³ ）	17
図 3-10	鉛直一次微分図	17
図 3-11	MT 法 3 次元解析比抵抗平面図（海拔 4,700 m）	18
図 3-12	MT 法 3 次元解析比抵抗平面図（海拔 3,800 m）	19
図 3-13	MT 法 3 次元解析比抵抗平面図（海拔 2,900 m）	19
図 3-14	MT 法 3 次元解析比抵抗平面図（海拔 2,000 m）	20

図 3-15	MT 法 3 次元解析比抵抗俯瞰パネルダイアグラム.....	21
図 3-16	MT 法 3 次元解析比抵抗東西断面図（UTM-Y: 751,900 m）	22
図 3-17	MT 法 3 次元解析比抵抗南北断面図.....	23
図 3-18	MT 法 3 次元解析比抵抗 3 次元分布.....	24
図 3-19	大霧地熱発電所付近の重力分布と地質構造.....	25
図 3-20	大霧地熱発電所付近の MT 法解析断面.....	25
図 3-21	ラグナ・コロラダ地熱地域の地熱系概念モデル（平面図）	41
図 3-22	ラグナ・コロラダ地熱地域の地熱系概念モデル（断面図）	42
図 3-23	ラグナ・コロラダ地熱地域の水理地化学モデル.....	42
図 3-24	レビュー結果から推定された断層分布（平面図）	46
図 3-25	レビュー結果を統合した地熱系概念モデル（断面図）	47
図 3-26	調査井掘削時の人員体制	49
図 6-1	坑井掘削位置計画図	74
図 6-2	坑跡のイメージ図	76
図 6-3	坑井掘削実施体制概念図	78
表 2-1	レビューを実施した参考資料	3
表 2-2	既存調査一覧	4
表 2-3	既存調査結果のレビュー項目	4
表 2-4	質問票の項目例	6
表 3-1	プロジェクト地域の地質層序	8
表 3-2	既存の調査井調査から推定された熱水変質鉱物.....	10
表 3-3	プロジェクト地域で採取された温泉水等の主要溶存イオンによる分類.....	11
表 3-4	地化学温度推定結果のまとめ	13
表 3-5	SM-1 井掘削データまとめ	27
表 3-6	SM-2 井掘削データまとめ	28
表 3-7	SM-3 井掘削データまとめ	29
表 3-8	SM-4 井掘削データまとめ	30
表 3-9	SM-5 井掘削データまとめ	31
表 3-10	調査井データ一覧表	32
表 3-11	1987 年 - 1990 年に実施した噴気試験の概要.....	34
表 3-12	1997 年に実施した噴気試験の概要	34
表 3-13	2012 年 12 月 - 2013 年 4 月に実施した噴気試験の概要.....	34
表 3-14	1997 年以前に実施した噴気試験時における圧力モデリングの概要.....	35

表 3-15	2012年12月 - 2013年4月に実施した噴気試験時における圧力モデリングの概要	35
表 3-16	1997年以前に実施した検層の概要	38
表 3-17	2012年12月 - 2013年4月に実施した検層の概要	38
表 3-18	ラグナ・コロラダ地域 地熱系概念モデル検証結果	43
表 3-19	調査井掘削時に1m掘削するのに要した日数一覧表	50
表 3-20	生産井・還元井の計画掘削仕様および予想掘削日数表	51
表 3-21	計画工程と本調査で算出した工程との比較	52
表 3-22	既存水井戸の状況	52
表 4-1	工事数量精算方式とランプサム方式の特徴	53
表 4-2	地熱井の掘削に関わるトラブルと対応策	54
表 4-3	IADC 標準工事契約条件書 支払方法特徴	55
表 4-4	地熱プロジェクト事例における工事契約条件書の特徴	56
表 4-5	支払い条件、資機材一括調達方式に関する現地請負者からのヒアリング結果	58
表 4-6	FIDIC Pink Book と IADC Daily Basis 工事契約条件書の比較	62
表 4-7	IDB 融資案件における工事契約条件書と FIDIC 契約約款比較	66
表 4-8	契約パッケージ	70
表 5-1	現地調査スケジュール	72
表 6-1	パッケージ分けによる実施機関に係るリスク比較	79

第1章 調査の目的・背景

1.1 調査の背景

ラグナ・コロラダ地熱発電所計画地点は、イタリア政府資金により 1970 年代半ばから調査が開始され、1988 年～1992 年にかけて 5 本の深部地熱井が掘削され、250℃を超える高温の地熱貯留層の存在が確認された。さらに、1997 年には、ENDE はメキシコ電力庁の協力の下、地熱資源量の検討を行い、最大資源量を 350MW～400MW と概算している。

その後、2007 年には 本邦経済産業省によって、「平成 19 年度 地球環境・プラント活性化事業等調査 ポリビア・ラグナコロラダ地熱発電設備建設事業調査」が実施され、既存資料のレビューをもとに、発電容量を 100MW とする概略発電所建設計画策定、事業費の概算が行われた。2008 年～2009 年には、JICA により「ラグナ・コロラダ（ソル・デ・マニャーナ）地熱開発事業準備調査」が実施され、100MW の発電所建設時期を 2 段階に分けて 50MW ずつ段階的に開発することが提案された。さらに、第一段階を、坑井掘削を主体とした第一期と 50MW の発電所（25MWx2 基）建設を目的とする第二期とする実施計画が策定された。引き続き、2011 年～2013 年には、JICA により ENDE の能力強化を目的とした「ラグナ・コロラダ地熱発電所 建設推進プロジェクト」が実施され、既存の調査井を利用した噴気試験結果を基にした地熱貯留層シミュレーションおよび環境モニタリングが行われた。

「ラグナ・コロラダ地熱発電所建設事業」（本事業）の実施については、2014 年に本事業の第一段階第一期(50MW のための坑井掘削)を対象とした円借款貸付契約が結ばれ、50MW の発電のため、生産井 4 本、還元井 3 本の坑井掘削が計画されている。

しかしながら、本事業はポリビア初の地熱発電建設計画であることに加え、本事業の坑井掘削は、地熱掘削が可能な石油や天然ガスの掘削業者を含めた民間の掘削業者の中から調達されると考えられる。

従って、円滑な事業実施には、ENDE の掘削技術に関する知識や地熱掘削の調達プロセス等の能力向上が必要となったことから、円借款事業の本体コンサルタント契約に先だち、本業務が実施されることとなった。

1.2 業務の目的および範囲

1.2.1 業務の目的

本業務は、実施機関による円借款事業の本体コンサルタント契約に先だち、速やかに掘削業務にかかる技術仕様の決定に必要な情報を整理し、同掘削業務の調達プロセスを促進するとともに、地熱掘削業務契約を適切に調達・監理するために必要な能力強化を ENDE に対して実施し、本事業を促進することを目的とする。

1.2.2 対象地域

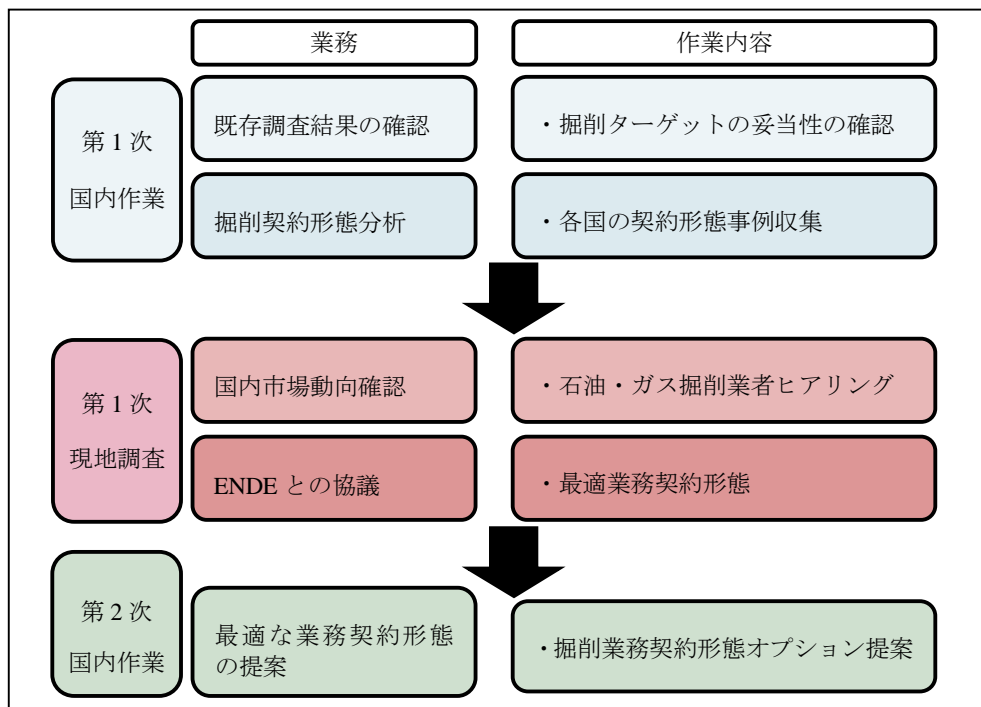
調査対象地域は、ラパス市、コチャバンバ市、サンタクルス市およびラグナ・コロラダ地熱発電所建設プロジェクト地点。調査対象地点および位置を巻頭の位置図に示す。

1.2.3 調査の範囲

- 本調査において統合・整理される既存の調査結果を ENDE へ説明し理解を促すこと。
- 地熱掘削業務契約は、契約形態の違いにより契約単価が大きく異なるため、他国における契約形態や、世界における掘削市場動向に鑑みた上でボリビアにおける掘削市場動向を確認し、本事業に最適な地熱掘削業務契約の形態を整理すること。
- 各契約形態で使用する標準入札書類を整理すること。
- その上で、ENDE が今後本体事業の実施監理を確実にできるよう、ENDE による調査結果の理解を促進するとともに、ENDE に対し地熱掘削業務契約を適切に調達・監理するために必要な能力強化を実施すること。

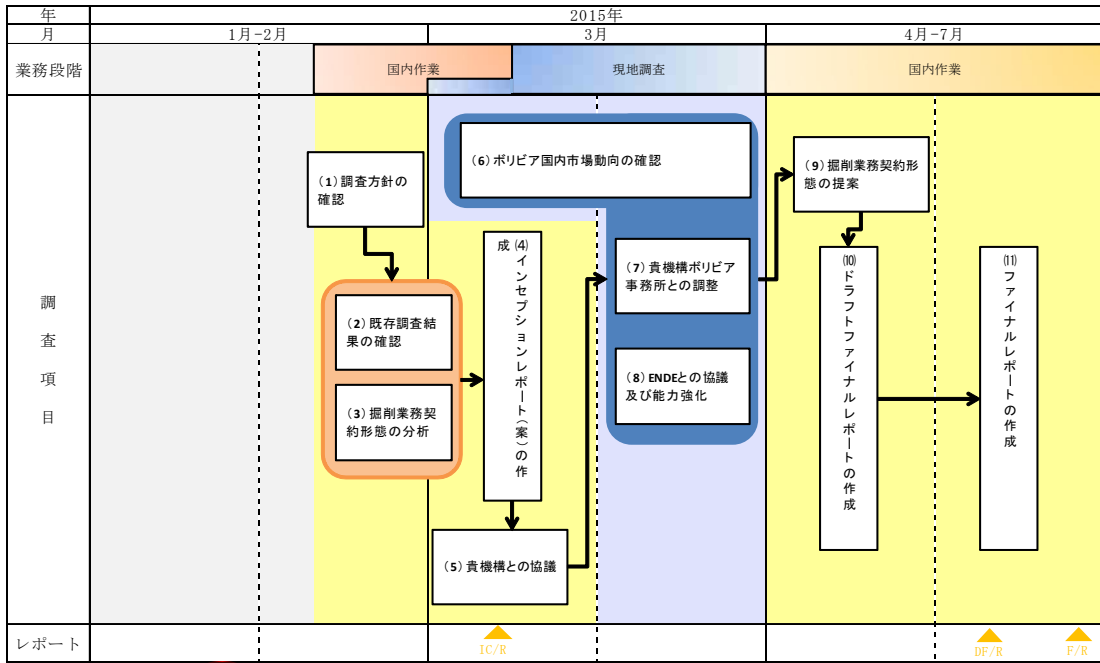
第2章 業務の実施方法

本業務は、2015年1月下旬～2015年7月下旬の約6ヶ月の工程で実施した。国内作業・現地調査の作業内容を図 2-1 に、業務実施フローチャートを図 2-2 に示す。



出典：調査団作成

図 2-1 国内作業と現地調査における作業内容



出典：調査団作成

図 2-2 業務実施フローチャート

2.1 既存の調査結果の確認

2.1.1 既存の関連調査結果の収集・整理およびレビュー

調査団は表 2-1 に示す既存調査結果を入手し、内容のレビューを実施した。表 2-3 に示す既存調査井データ、物理探査結果および噴気試験の資料分析を行い、整理・統合を行った。

表 2-1 レビューを実施した参考資料

	資料名	記載内容
1	JETRO (2008) 平成 19 年度 地球環境・プラント活性化事業等調査 ボリビア・ラグナコロラダ地熱発電設備建設事業調査 報告書	概略発電所建設計画策定、事業費の概算
2	JICA (2010) ボリビア多民族国 ラグナ・コロラダ (ソル・デ・マニャーナ) 地熱開発事業準備調査 報告書	
3	JICA (2013) ボリビア国 ラグナ・コロラダ地熱発電所 建設推進プロジェクト 事業完了報告書	既存調査井噴気試験、環境モニタリング
4	ENEL (1989) Estudio de Factibilidad Geotérmica en el Area de Laguna Colorada - INFORME SOBRE EL POZO SOL DE MAÑANA 1	調査井掘削による地質状況・坑井試験結果
5	ENEL (1989) Estudio de Factibilidad Geotérmica en el Area de Laguna Colorada - INFORME SOBRE EL POZO SOL DE MAÑANA 2	
6	ENEL (1989) Estudio de Factibilidad Geotérmica en el Area de Laguna Colorada - INFORME SOBRE EL POZO SOL DE MAÑANA 3	
7	ENEL (1990) Estudio de Factibilidad Geotérmica en el Area de Laguna Colorada - INFORME SOBRE EL POZO SOL DE MAÑANA 4	
8	ENDE (1994) PROYECTO GEOTERMICO LAGUNA COLORADA AMPLIACION DE PERFORACIONES GEOTERMICAS - PROFUNDIZACION DEL POZO SOL DE MAÑANA -4 (SM -4)	
9	ENDE (1994) PROYECTO GEOTERMICO LAGUNA COLORADA AMPLIACION DE PERFORACIONES GEOTERMICAS - PROFUNDIZACION DEL POZO SOL DE MAÑANA -5 (SM -5)	

出典：調査団作成

表 2-2 既存調査一覧

調査	調査数量						
	番号	位置		標高 (m)	掘進長 (m)	実施年	実施
		X	Y				
調査井	SM-1	628743.58,	7518885.60	4858.8	1178.5	1988	Unocal Corporation (Chevron Corporation at present)
	SM-2	627892.12,	7519428.50	4905.6	1486.5	1988-1989	
	SM-3	628596.10,	7519536.07	4884.8	1406.0	1989	
	SM-4	630813.80	7518915.58	4840.5	1726.2	1989, 1991	
	SM-5	627246.80	7519738.6	4903.5	1705.0	1992	
	AP-1	****	****	****	1602.0	1987-1988	
物理探査	電気探査					1986	ENDE
	重力探査 (260 points)					1986	ENDE
	MT 探査 (69 points) and 3D inversion 解析					2013	ENDE
噴気試験	SM-1, SM-2, SM-3, SM-4, AP-1					1987-1990	UNDTCD
	SM-2, SM-5					1997	CFE
	SM-1, SM-3, SM-2					2012-2013	JICA

出典：調査団作成

注：座標系は UTMZ19 WGS84、AP-1 の正確な位置座標は不明である。また、既存のレポートはローカル座標を用いているため、本報告書では WGS84 座標に統一している。

ラグナ・コロラダ地域の地熱開発のための包括的な調査結果は、JETRO(2008)、JICA(2010)、JICA(2013)にまとめられており、現行の掘削計画の基礎となっている。したがって、これらの資料を基にレビューを行った。また、上記の3回にわたる調査以前に、メキシコ電力庁 CFE およびイタリア ENEL による調査・解析がなされており、その報告書も併せてレビューした。

収集・整理した調査結果を基に、表 2-3 に示す項目についてレビューを行った。レビューに当たっては、生データである調査結果の信頼性と、そのデータの基づく解釈・モデル構築の妥当性について検証を行った。

表 2-3 既存調査結果のレビュー項目

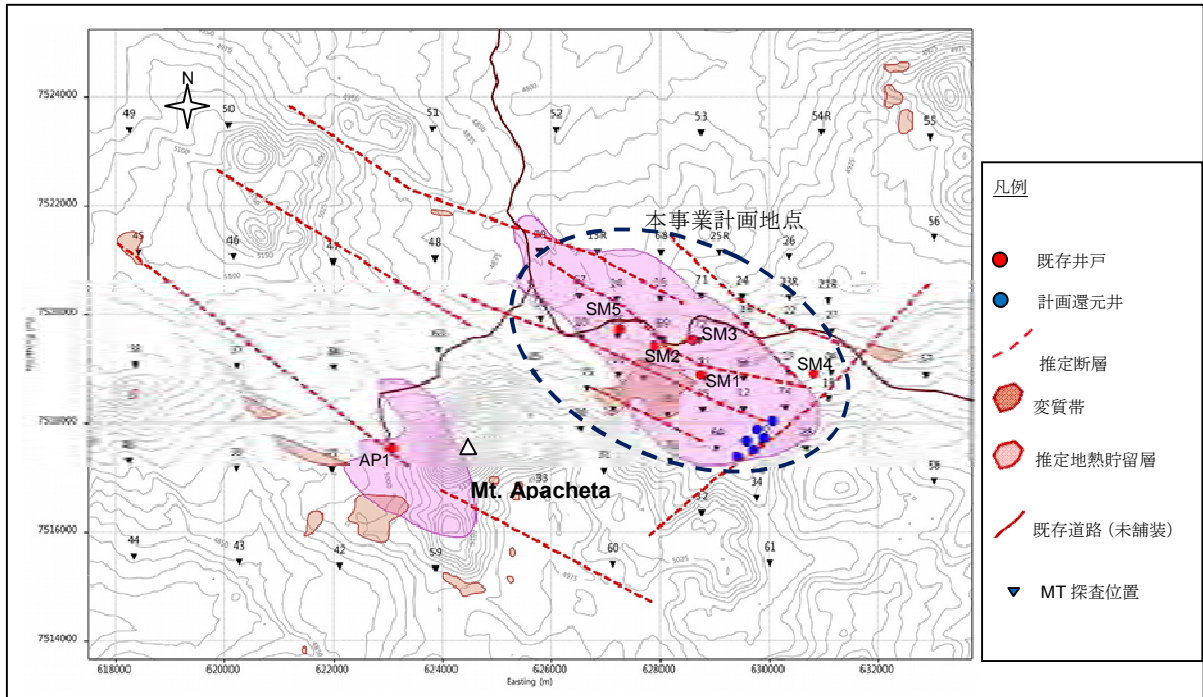
データの種類の	レビュー項目
調査結果(生データ)	地質層序、岩石分布、変質帯分布、地熱微候分布、断層・断裂・リニアメント分布、坑井地質、坑井断裂分布、生産熱水・蒸気化学組成、電気・電磁探査結果、重力探査結果
データ解析・解釈結果	断裂系モデル、キャップロック分布、地熱流体流動、地熱系概念モデル、流体流動シミュレーション(将来予測)、掘削ターゲット座標

出典：調査団作成

ラグナ・コロラダ地熱発電所計画地点では 5 本(SM-1~SM-5)、その約 5km 西方の Mt.Apacheta 山麓では 1 本(AP-1)の地熱調査井が既に掘削されており、良好な地熱貯留層の存在が判明している。これら坑井を用いて地下地質、温度圧力プロファイル、生産能力が調べられており、新規生産井のターゲット選定に最も重要なデータが豊富であることから、これらについて特に着目して検証を行った。

なお、物理探査については、JICA (2013)の調査後、MT 法探査（ソル・デ・マニャーナ地点付近は約 500m 間隔、周辺を約 2km 間隔, 15 km x 8 km 四方）が行われ、フランス CGG 社による高度な 3 次元インバージョン解析も実施された。物理探査の観点から、この MT 法 3 次元インバージョン解析結果を中心に、重力探査結果と合わせてレビューを行った。

調査井および MT 法探査の位置を図 2-3 に示す。



出典：調査団作成。JICA(2010)から変質帯、地熱貯留層を記載。CGG(2013) MT 法 3 次元インバージョン解析結果を基に断層を推定、加筆

図 2-3 調査井および MT 法測点配置図

2.1.2 掘削ターゲットの妥当性の検討

掘削ターゲットの妥当性を確認するため、「物理探査結果」および「地熱系概念モデル」の観点から検証を行った。

(1) 物理探査結果からの検証

MT 法 3 次元インバージョン結果の断面図及び平面図と既往地質調査結果等を統合して、地質構造を検討することで、物理探査の観点からの掘削ターゲットの妥当性検証を行った。

(2) 地熱系概念モデルからの検証

モデルの三つの構成要素である地熱貯留層構造、熱源、地熱流体の観点から検証を行った。

掘削ターゲットは地下高温部の断裂(断層など)であることから、推定地下温度、推定地下断裂分布の解釈結果を主に精査した。特に重要な生データとして、既存井の断裂徴候、温度プロファイル、比抵抗分布、重力異常分布、断層・リニアメント分布を取り上げ、その推定根拠を検証した。

(3) 既存水井戸の補修・追加掘削の必要性検討

本地域において ENDE は 3 本の水井戸を掘削しているが、これらの水井戸から掘削工事に要する水量を取水できるかどうかの検討を実施した。

既存水井戸の補修・追加掘削の必要性を検討するため、現地調査時に、水位計を用いて、既存水井戸の地下水位を計測するとともに、ENDE から既存の水井戸の使用状況の情報を入手した。

2.2 掘削業務契約形態の分析

契約形態は、下記の4点を検討の枠組みとして整理・分析を行った。

- 支払形態の相違
- 契約条件書
- 契約パッケージ
- 契約変更と JICA への同意申請

2.3 ボリビア国内市場動向の確認

ボリビア国内（サンタクルス市内）に拠点を持つ天然ガス関連業者の団体「Cámara Boliviana de Hidrocarburos y Energía」のホームページ（<http://www.cbhe.org.bo/>）に登録されている企業は40社ある。その内、石油・天然ガス井の掘削経験・能力を有すると判断できる企業12社に対して、インタビュー調査を実施し、市場動向の確認をおこなった。質問内容の項目例を表2-4にそれぞれ示す。

国内市場での商習慣・地熱掘削との技術の違いも考慮し、国内の掘削業者が対応可能な契約形態を確認した。

表 2-4 質問票の主要項目

大項目	質問内容
契約形態	対応可能な契約形態
掘削業務経験	掘削本数、掘削深度、地熱井掘削経験の有無、ボリビア国内での掘削経験、高地・寒冷地での掘削経験
保有技術・財産	掘削技術者人数、保有資機材（自社 or リース）、現在の掘削リグ稼働数、傾斜掘削技術・経験の有無
その他	資材（ケーシングパイプ等）調達手段、過去の掘削業務の金額

出典：調査団作成

2.4 ENDE との協議及び能力強化

ENDE は円借款による調達に慣れていないことから、セミナーにおける解説は JICA 調達ガイドラインを含む包括的な内容とした。本調査において、統合・整理された既存調査結果を ENDE に説明し、理解を促した。掘削業務形態の種類、各々のメリット・デメリット、掘削業務調達のための円借関連法規等の説明を行い、ENDE に対し最適な契約形態の理解を促し、標準入札書類について能力向上を図った。以上を実施するため、現地調査期間中に計2回のセミナーを実施した。

2.5 掘削業務契約形態の提案

第一次国内作業の成果ならびに第一次現地作業における確認事項と ENDE との協議内容に基づき、掘削業務契約形態のオプションを提案した。

契約形態は JICA 標準入札書類の使用を第一義として考えるが、坑井掘削工事の特殊性に鑑み、円借款事業ではない地熱プロジェクトにおける掘削契約書を分析し、本事業への適用が有用な条項や規定も部分的なオプションとして提示した。

第3章 既存調査のレビュー結果

3.1 既存調査のレビュー

3.1.1 地質・地化学調査

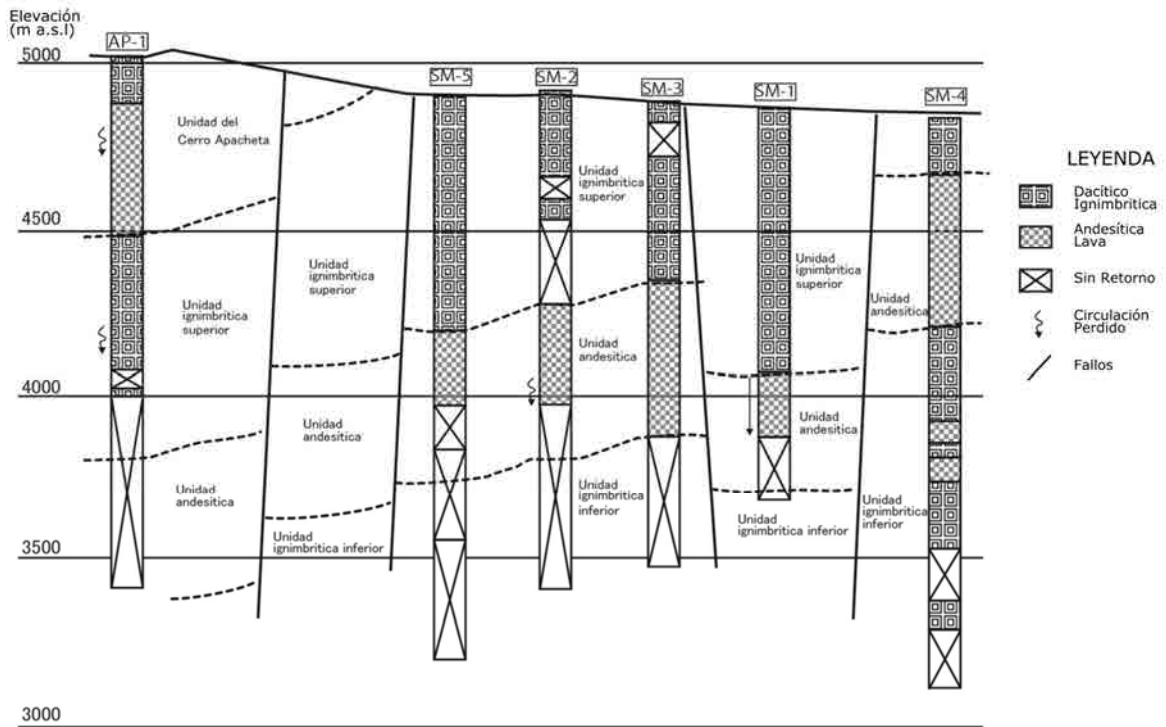
本地域における既存の地質・地化学調査結果は、JETRO（2008）にて整理されているため、このデータを中心にレビューを行った。なお、JICA（2013）では既存調査井を用いた噴気試験による化学組成の再分析が実施されているが、過去の分析結果との差異は見られない。

(1) 地質調査

プロジェクト地域の地熱系の規制に大きく寄与すると考えられる、(a) 地質層序、(b) 地質構造、(c) 熱水変質帯に関する既存調査について整理する。

(a) 地質層序

プロジェクト地域はソル・デ・マニャーナ地熱地域に位置し、これまでに5本(SM-1~SM-5本の地熱調査井が掘削されている。また、プロジェクト地域の約5km西方のアパचेタ山の西側山麓では1本(AP-1)の地熱調査井が掘削されている。図3-1の柱状対比図に示すように、本地域の地質は中新世以降の火山砕屑岩類から構成され4層に分類される。下位から、下部イグニブライト層、安山岩層、上部イグニブライト層、セロアパचेタ層が分布している（表3-1参照）。本地域の坑井掘削では確認できていないが、こうした火山砕屑岩類の下位に、白亜紀以前の堆積岩類の分布が想定されている。



出典：JETRO（2008）をもとに調査団作成

図 3-1 既存地熱井の柱状対比図

表 3-1 プロジェクト地域の地質層序

地層	層厚	備考
セロアパचेタ層	最大約 500m	調査地域東方に向かって薄層化しており、SM-1、SM-2、SM-4 及び SM-5 周辺では確認できない。安山岩溶岩から構成されており、主に斜長石および黒雲母の班晶が見られ、石英、角閃石、輝石などもわずかに晶出している。35 万年前から 50 万年までの間に噴出したものと推定されている。
上部イグニンプライト層	600m～800m	石英、斜長石、黒雲母、およびホルンブレンドの班晶を含むデイサイト質イグニンプライトから構成されている。熱水変質に起因すると考えられる色の変化が見られ、上部では赤褐色を、下部では灰緑色を示す。露頭試料の岩石年代から、120 万年前から 140 万年前に噴出したものと推定される。
安山岩層	350m～500m	地溝状構造のために、坑井 SM-1 周辺では周辺地域より約 300m 深部地域に賦存している。緑色から灰緑色を呈し、斜長石、黒雲母、角閃石および石英などの班晶を含む安山岩から構成されている。
下部イグニンプライト層	-	坑井 SM-4 の 700m 以深でのみ確認されているが、岩相層序対比の結果から坑井 SM-1、SM-2 および SM-5 の深部でも存在するものと思われる。堅硬なデイサイト質イグニンプライトから構成されており、安山岩溶岩を数枚挟んでいる。中新世から暁新世（約 500 万年前）に噴出したもの推定される。

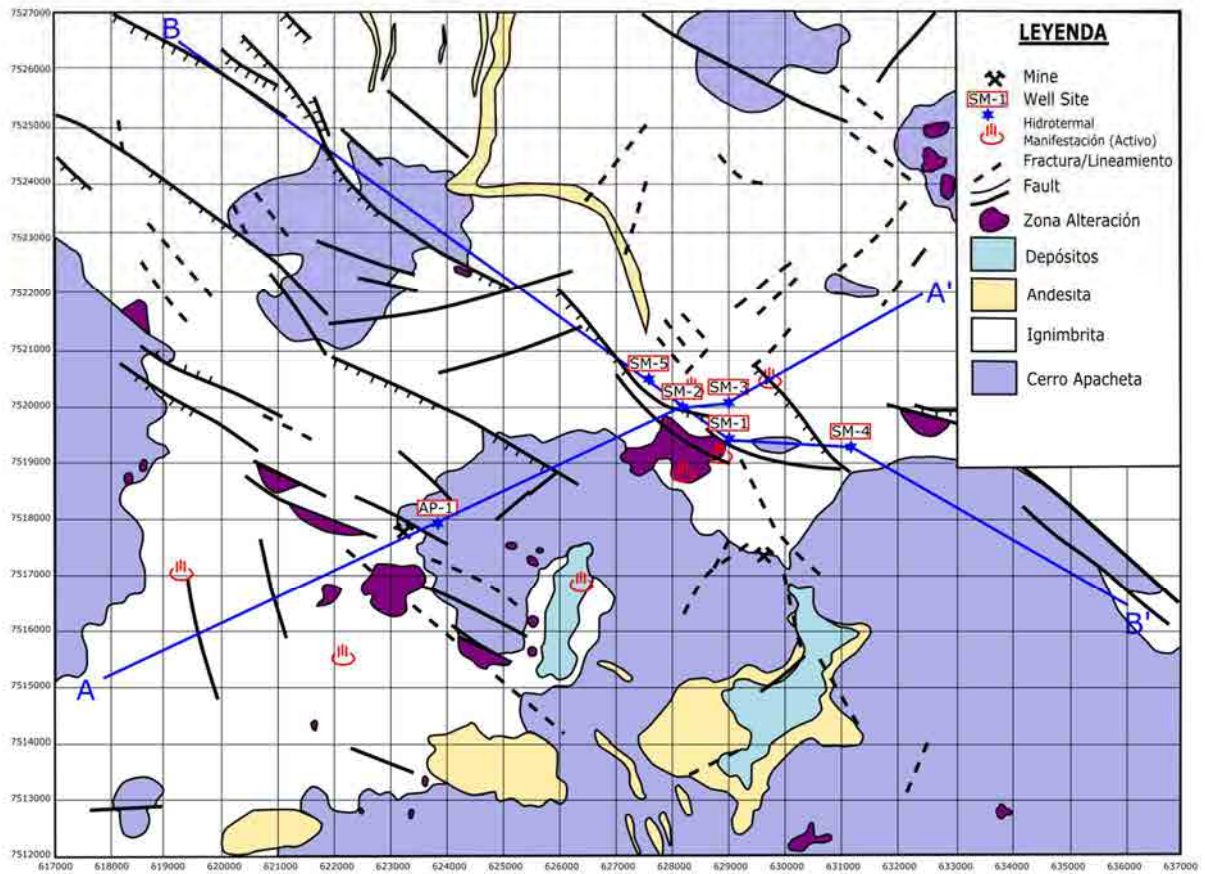
出典：調査団作成

(b) 地質構造

プロジェクト地域においては、WNW-ESE 系及び NE-SW 系の断裂構造が推定されており（図 3-2）、これらの構造が同地域の地熱系を規制していると想定される。特に WNW-ESE 系の構造が卓越しており、地形上の隆起・陥没等の特徴づけている。

WNW-ESE 系断層は本地域中央部において連続した 3 条の分布が推定されている。これらの断層は、岩相柱状対比の結果から正断層と考えられる。NE-SW 系の断層（リニアメントを含む）は、WNW-ESE 系の断層の間に分布している。

坑井 SM-2、SM-3 及び SM-5 周辺の岩相層序は、南方の SM-1 および西方の AP-1 に向かって、それぞれ傾斜している（図 3-1）。坑井 SM-2 及び SM-3 と SM-1 の間には WNW-ESE 方向の断層が存在し、もう一つ同じ走向を有する別の断層が坑井 SM-2 及び SM-5 とセラオパचेタ丘の間に存在する。さらに、調査地域東方の坑井 SM-4 で確認された岩相層序は、その他の坑井の層序に比べて数百 m 程度落ちている。これは SM-1 と SM-4 の間に見られる WNW-ESE 系断層によって画されているためと想定される。



出典：JETRO（2008）をもとに調査団作成

図 3-2 ラグナ・コロラダ地域の地質図

(c) 熱水変質帯

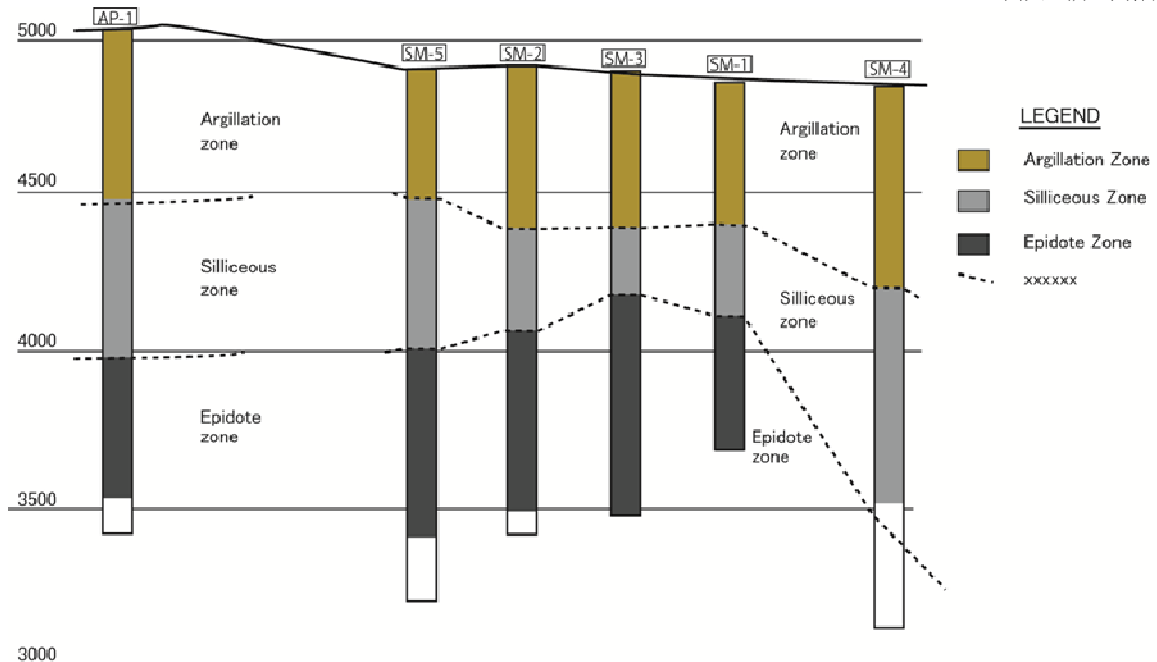
熱水変質鉱物の晶出は、過去または現在の地下温度の推定の指標となり得るとともに、地層中の不透水性部分、つまり地熱貯留層のキャップロックの推定根拠となる。

本プロジェクト地域においては粘土化帯、珪質化帯、緑廉石帯の三つの鉱物分帯が報告されている（表 3-2、図 3-3）。これまでに掘削された 6 本の地熱調査井の岩石中には主要なものとして、粘土鉱物、イライト、スメクタイト、緑泥石、沸石、ローモンタイト、ワイラカイト、方解石、パイライトおよび緑廉石などの二次鉱物が見られ、全体として中から高程度の変質を受けている。

表 3-2 既存の調査井調査から推定された熱水変質鉱物

鉱物帯	析出温度	変質鉱物の産状
粘土化帯	180℃以下の低温度	概して、深度 500m 以浅において、粘土鉱物やシリカー沸石の混合相鉱物が晶出しているが、調査地域東部の坑井 SM-4 付近では深部化している。
珪質化帯	180℃～220℃	シリカ鉱物が、坑井 SM-1、SM-2 および SM-3 では深度 700m から 800m 付近まで、坑井 SM-5 および AP-1 では深度 1,000 程度まで、坑井 SM-4 では深度 1,300m 以上にかけて頻繁に見られる。また、シリカー緑廉石混合層も見られる。
緑廉石帯	200℃以上	本地域内で掘削された深部地熱井の坑底以深まで、緑廉石、緑泥石、シリカや高温熱水変質鉱物である曹長石やワイラカイトなどが分布している。

出典：調査団作成



出典：JETRO（2008）をもとに調査団作成

図 3-3 変質断面図

(2) 地化学調査

プロジェクト地域で採取された温泉水・湧水や噴気ガスのほか、地熱調査井の噴気蒸気・熱水に関する化学データについて整理した。

(a) 地熱貯留層流体の特徴

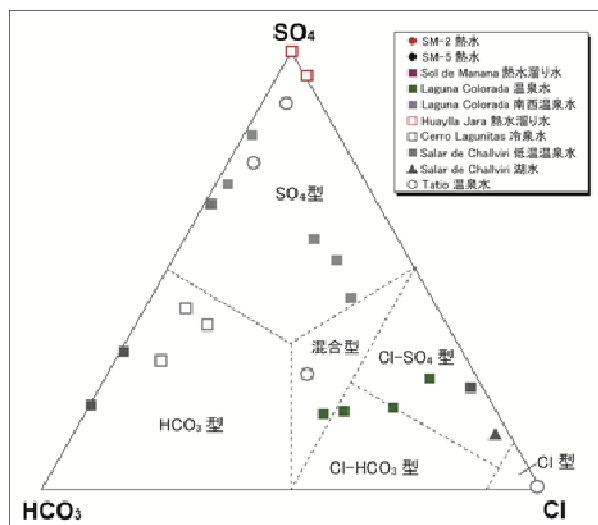
【溶存イオンによる分類】

温泉水・湧水・調査井熱水の主要溶存イオンによる分類を図 3-4 に、それぞれの特徴を表 3-3 に示す。

表 3-3 プロジェクト地域で採取された温泉水等の主要溶存イオンによる分類

流体	分類	特徴
温泉水・湧水	低 Cl 濃度の SO ₄ 型または HCO ₃ 型	ラグナ・コロラダ、Cerro Lagunitas, Salar de Chaliviri 等の調査井周辺温泉等の温泉水は、調査井熱水より Cl 濃度が一般に低い
熱水溜り	酸性 SO ₄ 型	噴気の蒸気やガスにより加熱された浅部地下水や地表水とみなされる
調査井熱水	中性 Cl 型	Cl 濃度は、大気圧下の蒸気分離後で、6,500 ~ 9,500 mg/L（地熱貯留層内熱水で 4,300 ~ 6,600 mg/kg）であり、Cl 溶存成分濃度は比較的高い

出典：調査団作成

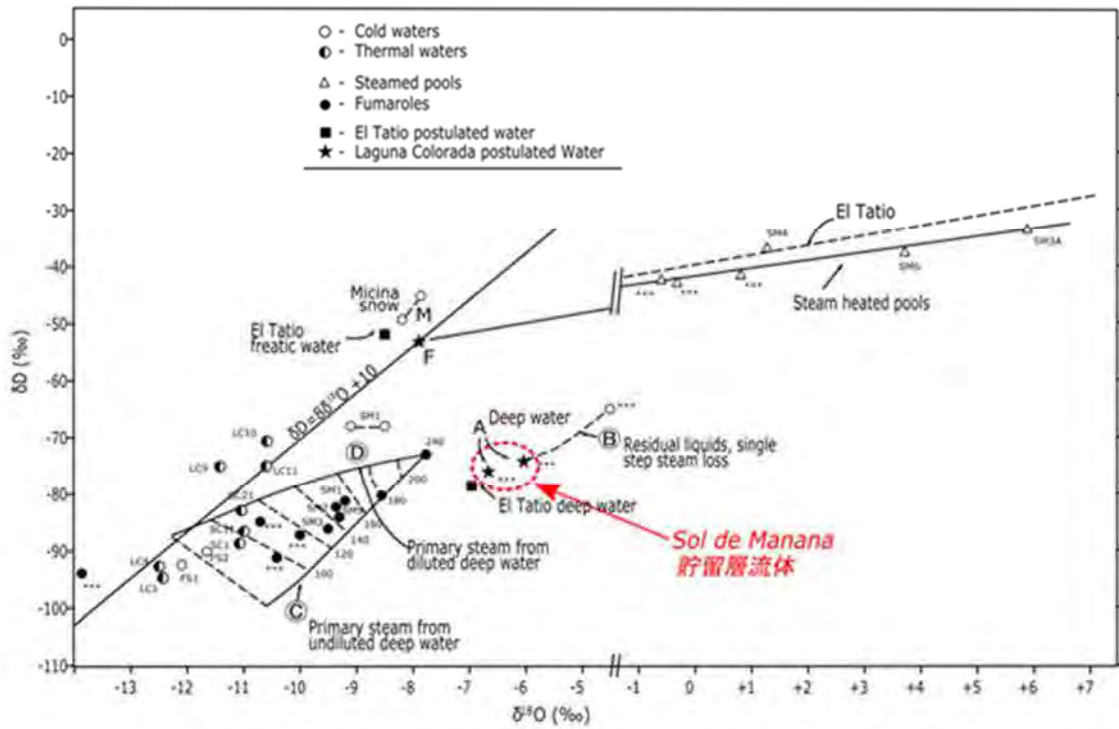


出典：JETRO（2008）をもとに調査団作成

図 3-4 主要溶存イオンによる分類

【水素・酸素同位体データによる検討】

水素・酸素同位体データの検討（図 3-5）から、地熱流体は天水とマグマ起源水の混合したものと推定される。ただし、マグマ起源水の混入割合は約 30%以下であり、天水が主な起源と考えられる。天水の涵養域は、UN-ENDE-ENEL（Geothermal feasibility study in the Laguna Colorada area: Feasibility Report, 1991）等により、プロジェクト地域西側に連なる山地付近である可能性が示されているが、明確ではない。

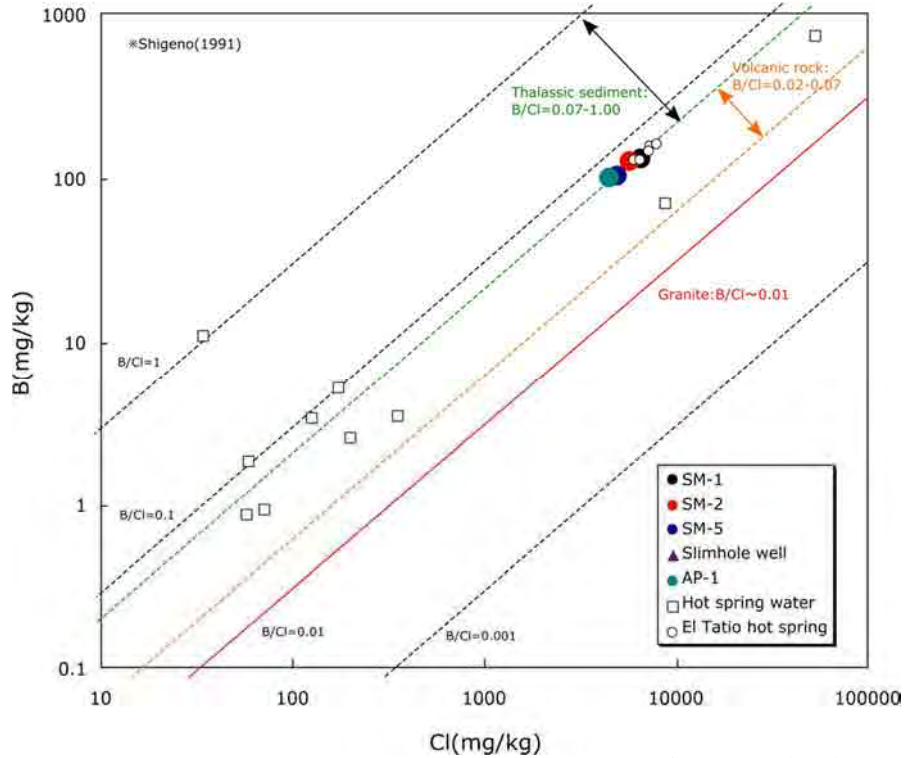


出典：JETRO（2008）をもとに調査団作成

図 3-5 水素・酸素同位体組成図

【ホウ素・塩素（B-Cl） 相関】

B-Cl 相関図から、地熱流体の生成機構及び貯留母岩が推定される。図 3-6 にラグナ・コロラダ地域の既存調査井熱水を用いた B-Cl 相関図を示す。地熱貯留層流体は、熱水の B/Cl 原子比が 0.07 前後と比較的高く、熱水が海成堆積岩と反応していることが想定される（Shigeno, 1991）。プロジェクト地域で実施された坑井掘削では、深度約 1,700m までの地質に海成堆積岩の分布は確認されていないが、深部に新第三紀以前の堆積岩類等の基盤が存在することを示唆している。地熱貯留層流体は、基盤となる堆積岩が存在する深度 1,700m 以深まで循環していると想定されている。



出典：JETRO（2008）をもとに調査団作成

図 3-6 B-Cl 相関図

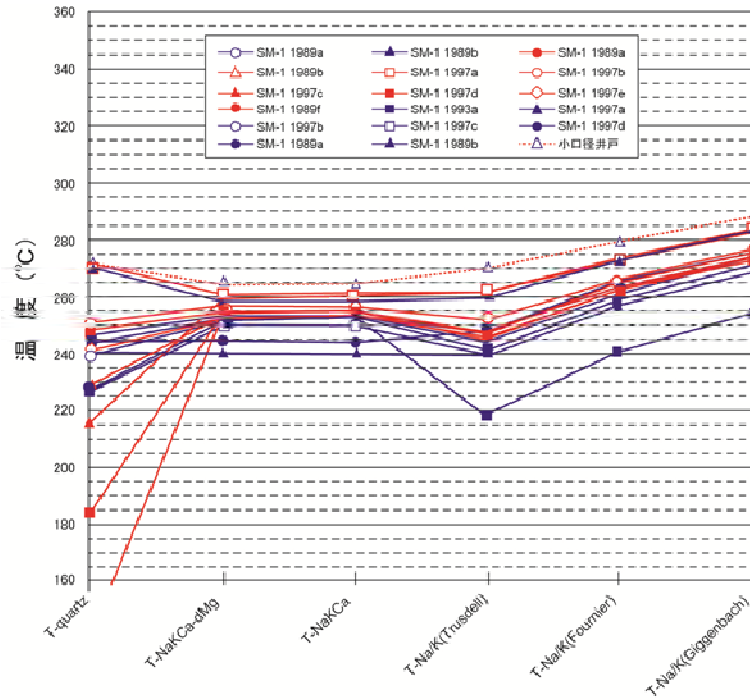
【地化学温度の推定結果】

調査井から噴出した熱水の地化学温度の比較図を図 3-7 に示す。また、調査井噴出蒸気中のガス化学組成に基づく地化学温度を図 3-8 に示す。熱水からは最高 270℃、蒸気ガスからは 250~300℃程度の地化学温度が推定されている。比較結果を表 3-4 にまとめた。

表 3-4 地化学温度推定結果のまとめ

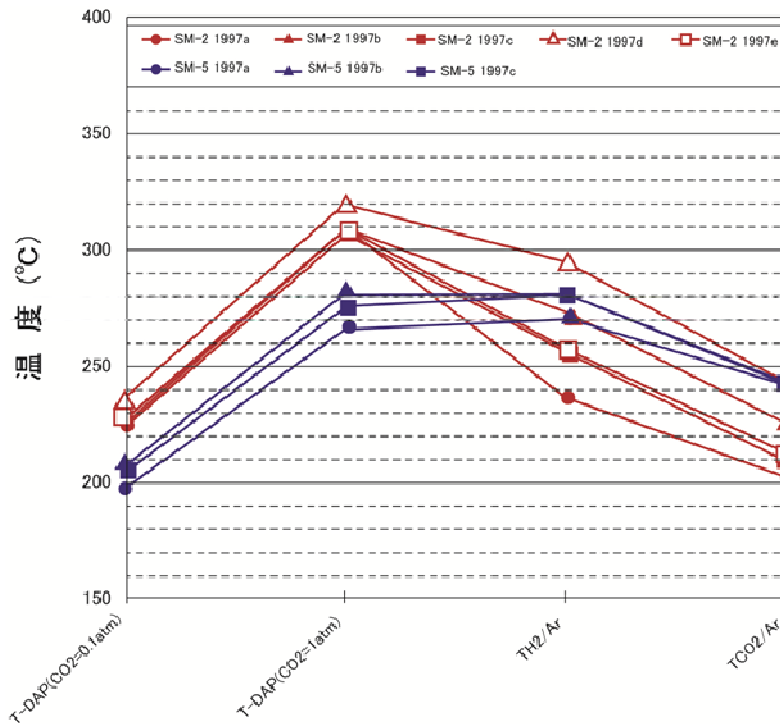
分析流体	概要
噴出熱水	<ul style="list-style-type: none"> ・ NaKCa-dMg 温度は 240~264℃の一定した温度を示しており、調査井坑内の実測温度とはほぼ一致する ・ シリカ温度はバラつきが著しい ・ Na/K (Truesdell) 温度 (Truesdell, 1976) の最高温度は 270℃に達しており、深部の地熱流体が 270℃前後の温度をもつ可能性を示唆する (Na/K 温度は他の地化学温度計と比較して反応速度が遅いため、より深部での情報を有する)
噴出蒸気中ガス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 概ね 250℃前後の坑内実測温度に近い温度を示している ・ T-DAP (Pco₂=1atm) 温度や H₂/Ar 温度は、概ね 250~300℃の範囲にあり、深部にさらに高温の地熱流体が存在している可能性を示唆する

出典：調査団作成



出典：JETRO（2008）をもとに調査団作成

図 3-7 噴出熱水の地化学温度比較図



出典：JETRO（2008）をもとに調査団作成

図 3-8 蒸気ガスの地化学温度比較図

以上の地化学的検討の結果から、プロジェクト地域の地熱流体の特徴として以下の項目が挙げられる。

- 主な起源は天水で、深部高温流体の流入や伝導熱により 270°C またはそれ以上に加熱されている
- 熱源は堆積岩類の存在が想定される 1700m 以深にある可能性が高い
- 高温流体は、深部から上昇し、主に熱水卓越型の地熱貯留層を形成している
- SM-4 では温度が低く、地熱貯留層の東方への広がりには限定されている

(b) スケール生成の可能性

噴出流体からのスケール生成に関しては、過去の調査井の噴出試験中に坑口付近に少量付着したスケールの分析が行われ、食塩 (NaCl) や方解石 (CaCO₃) などが含まれていることが確認されている。しかし、噴出試験（最長 3 ヶ月間）では、スケール付着に伴う噴出量の減少等の障害は認められておらず、スケール付着が重大な問題となる可能性は高くは無いと予想される。

また、還元熱水からのシリカスケール生成により、還元井の能力が低下することが問題となる場合が多い。プロジェクト地域における非晶質シリカに対する飽和度の検討では、地熱貯留層熱水の温度を 260°C と仮定した場合、還元熱水の温度を 162°C 以上に保持すれば、熱水の非晶質シリカは不飽和であり、シリカスケールは生成しないとみなされる。また、地熱貯留層熱水の温度が 250°C の場合は、熱水温度を 150°C 以上に保持すればスケール生成の防止が可能と考えられる。

3.1.2 物理探査

(1) 重力探査

1986 年の ENDE の調査報告書に基づいて、重力探査の調査仕様、データ処理、解析手法、解釈についてレビューし、評価した。JICA を通じ、この時の重力探査の各測点の位置と重力値（ブーゲー異常値）が記載されたデジタルデータファイルを入手し、新たに重力（ブーゲー異常）図および鉛直 1 次微分平面図を作成してレビューに用いた。

(a) 既存重力探査の概要

重力探査は、地質・地熱状況把握、地域の深部構造探査を目的として 1986 年 3 月に地質、地化学、電気探査とともに実施された。重力探査の対象地域は Sol de Mañana を中心とする約 500 km² の範囲であり、計 260 測点で重力測定が行われた。

各測点の重力測定には、米国ラコステ & ロンバーグ社製高精度相対重力計 G 型が用いられた。相対重力計を用いる重力探査では、絶対重力値が既知である基点との重力差を測定して、各点の絶対重力値を求める。この基点として、対象地域中心より北西約 14km の温泉地帯 Huaylla Jara に基点 G0 を設定している。この基点 G0 の絶対重力値 977393.0mgal は、探査に先立ってラグナ・コロラダ湖の軍施設内に設置されている 977500.8mgal の重力基点との相対測定から求められた。

対象地域は地形が悪く、アクセスは困難な測点もあったが、データ取得に際しては十分な管理を行っている。毎日、調査の開始前と終了後に基点の重力測定を行い、両者の測定差である日変化（ドリフト）が基準変化量より小さいことで測定データの信頼性を確認している。各測点

の標高は ENDE の測量器械を使った水準測量で求められた。測量作業結果は十分なチェックを行い、閉塞誤差が基準量以下であることで、精度を確認している。各測点での測定データは潮汐補正、ドリフト補正を行った後で各測点の絶対重力値を求めている。この絶対重力値に緯度補正、地形補正、フリーエア補正、ブーゲー補正を施して各測点の重力値（ブーゲー異常）が求められている。地形補正やブーゲー補正には調査地域内の岩石の平均的な密度が必要であり、この調査では密度 2.2g/cm^3 を仮定して補正を行っている。

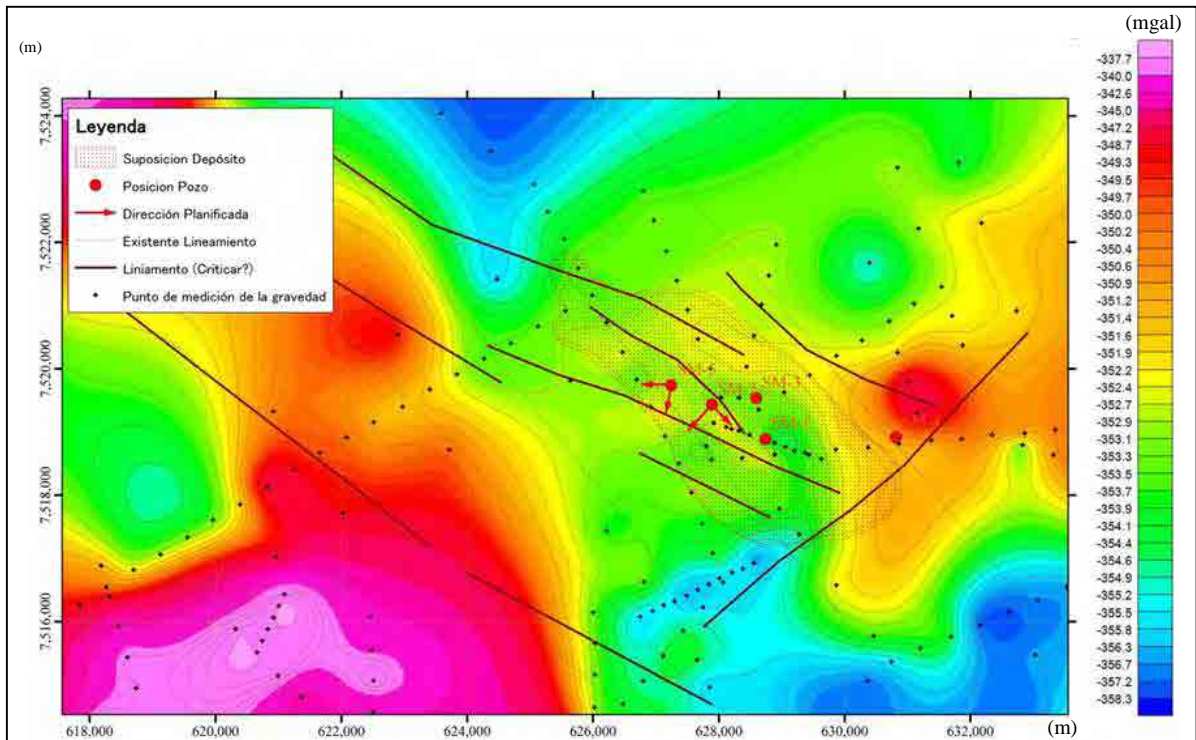
測点は 260 点配置されているが、測点配置に関しては、測点密度のばらつきが大きく、地域全体の重力構造の把握には不十分である。特に地域西部の高異常帯や北東部に関して追加の測定が望まれる。

(b) 重力探査結果の解釈(再評価)

評価対象地域内の各測点の緯度・経度を 19 系の UTM 座標に変換した後、重力データを 25m 間隔の格子データ化して重力図を作成した。さらに、この格子データを使って鉛直一次微分処理を行った鉛直一次微分図を作成した。鉛直一次微分図は、重力図よりも断層や地質境界を際立たせたり、小規模な異常を強調したりする特徴がある。重力図や鉛直一次微分図に、既存資料から抽出した地表変質帯や地熱有望地域の範囲、今回判読したリニアメント、既存および予定ボーリングの位置や掘削方向を重ねた図をそれぞれ図 3-9、図 3-10 に示す。

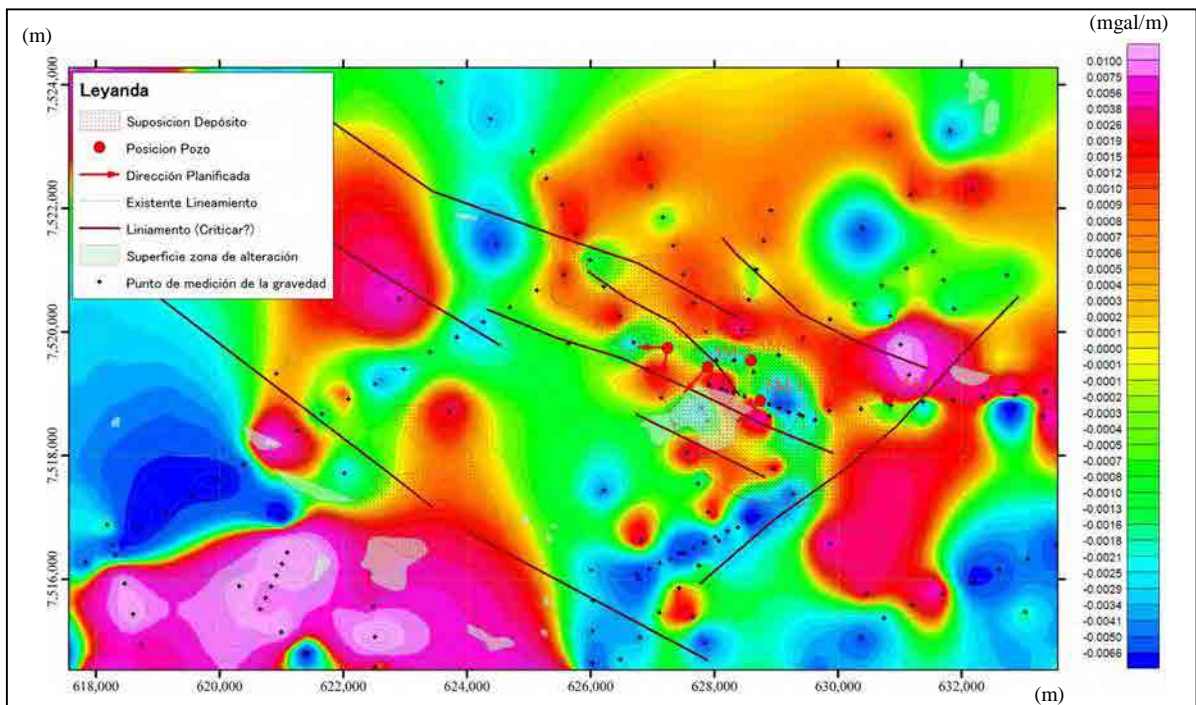
重力探査実施範囲全体では、アンデス山脈の軸と探査範囲中央部の間に SW-NE 方向に伸びる高異常帯が分布している。既存調査の定量解析では、幅 2~3km で密度 $2.6\sim 2.7\text{g/cm}^3$ の高密度岩体の存在を推定している。また、探査範囲の北部と南部には大規模な低重力異常が分布する。

評価対象地域では、南西部に大きな高重力異常、東部に小規模な高重力異常があり、これらの高重力異常を結ぶように中央部には相対的な高異常帯が東西方向に伸びている。この高異常帯の中には小さな高重力異常がある。想定される地熱貯留層は中央部にあるこの高重力の鞍部と、南西部の高重力異常の北東部に位置する。調査井のうち SM-4 を除く 4 孔は中央部の高重力鞍部の中にある NW-SE 方向に伸びる小規模な高重力異常に沿って並んでいる。



出典：ENDE(1986)をもとに調査団作成

図 3-9 ブーゲー異常図（仮定密度 2.2g/cm^3 ）



出典：ENDE(1986)をもとに調査団作成

図 3-10 鉛直一次微分図

鉛直一次微分図では、南西部から北東へ伸びる高異常を分断し、評価範囲中央部を NNW-SSE 方向へ伸びる低異常が特徴的である。想定される 2 つの地熱貯留層はこの低異常を挟むように位置している。調査井は WNW-ESE 方向に伸びる小規模な低異常の上に並んでおり、予定される掘削方向は小規模な高異常へ向かっている傾向がある。

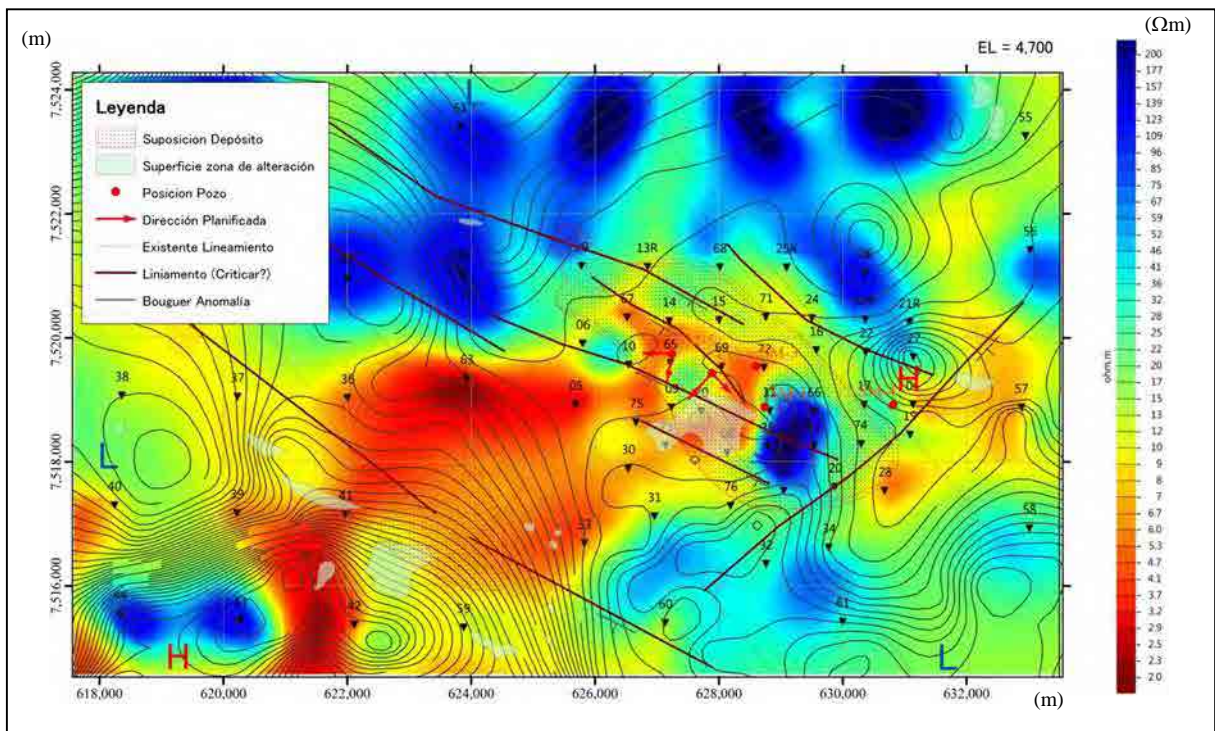
(2) MT 法探査

(a) MT 法探査概要

プロジェクト地域では、ENDE によって 69 点の MT 探査が実施されている。調査井のある想定地熱貯留層周辺では 500m 間隔、その外側では 2km 間隔で格子状に測点が配置されている。入手した資料は 0.005~600Hz の範囲の 12 周波数での見掛け比抵抗平面図と 3 次元インバージョン解析結果一式である。3 次元インバージョン解析結果は海拔 2,000~5,000m の 300m 毎の解析比抵抗平面図、各測点を通る南北方向 13 断面、東西方向 9 断面の解析比抵抗断面図、解析結果の妥当性を示す各測点での測定値と計算値の見掛け比抵抗曲線・位相曲線の比較図、および 3 次元格子解析比抵抗デジタルデータである。

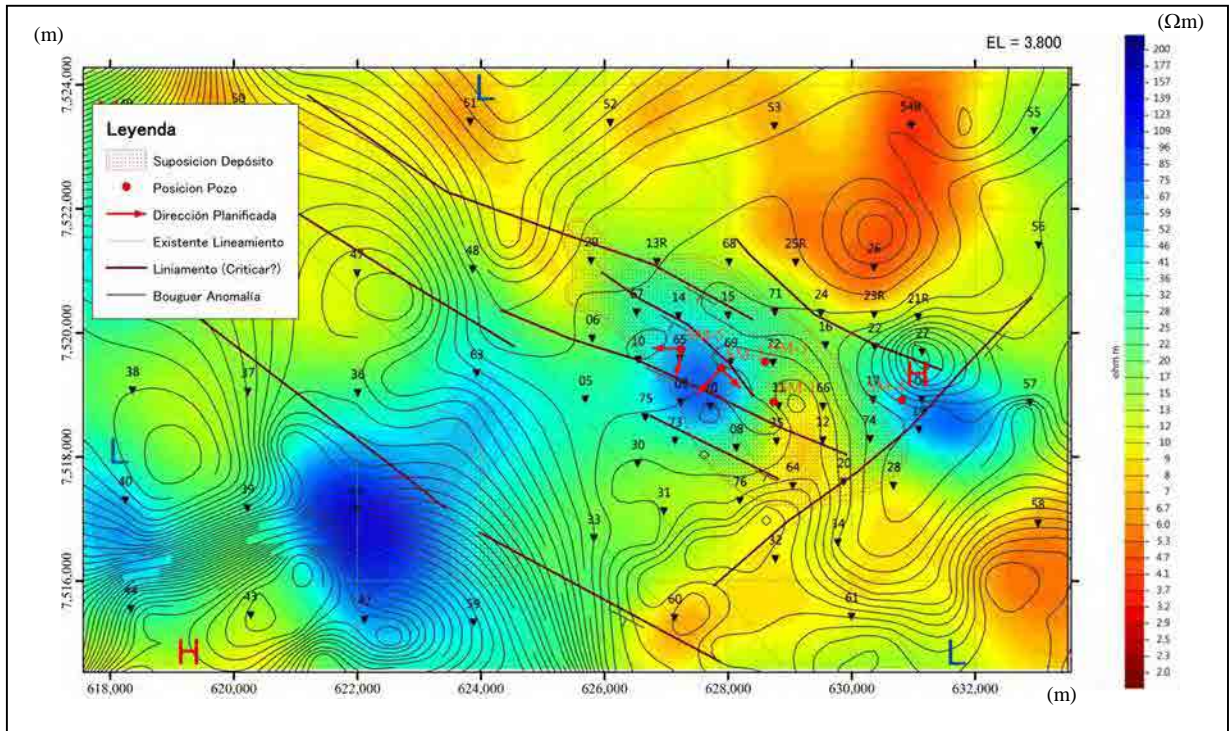
(b) 解析比抵抗分布の解釈(再評価)

データの検討・解釈に用いるため、海拔 4,700、3,800、2,900、2,000m の 4 標高での比抵抗平面図上に既存資料から抽出した地表変質帯や地熱有望地域の範囲、今回判読したリニアメント、既存および予定ボーリングの位置や掘削方向、およびブーゲー異常を重ねた図をそれぞれ図 3-11~図 3-14 に示す。さらに、地熱有望地付近の 3 次元比抵抗分布を把握するために、上記 4 標高の解析比抵抗平面図を標高順に重ねて並べた 3 次元俯瞰パネルダイアグラムを作成して図 3-15 に示した。



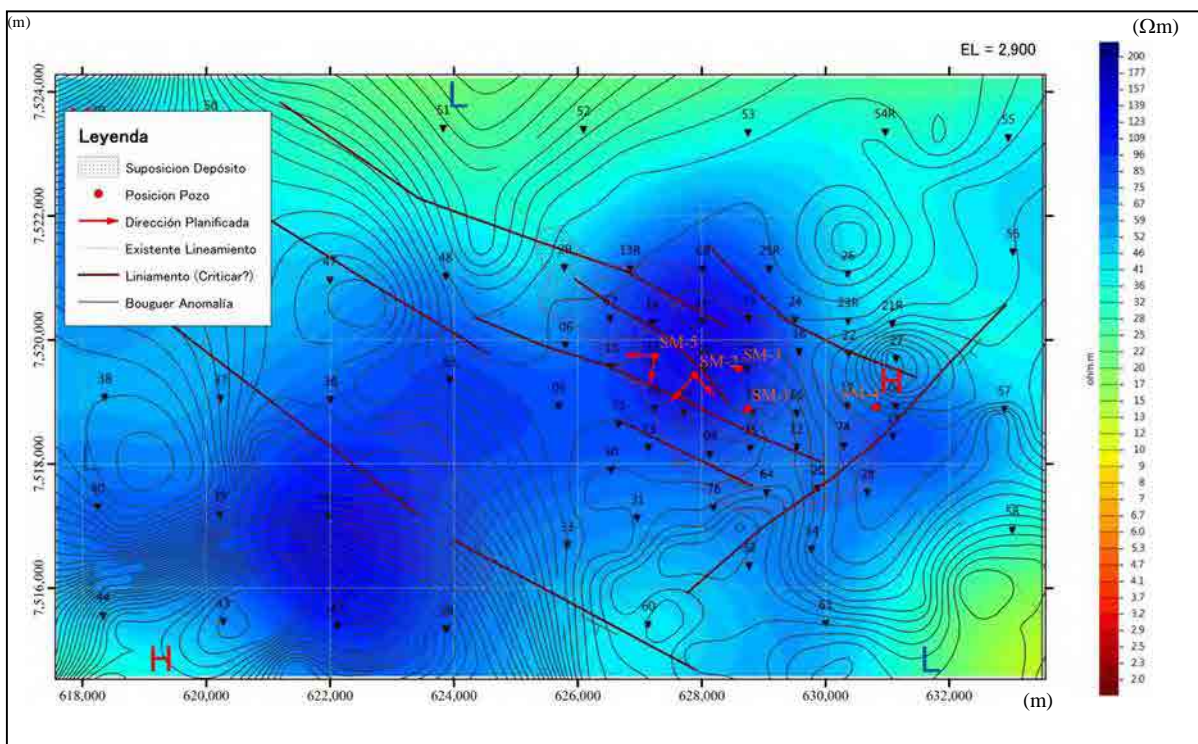
出典：CGG(2013)をもとに調査団作成

図 3-11 MT 法 3 次元比抵抗解析平面図（海拔 4,700m）



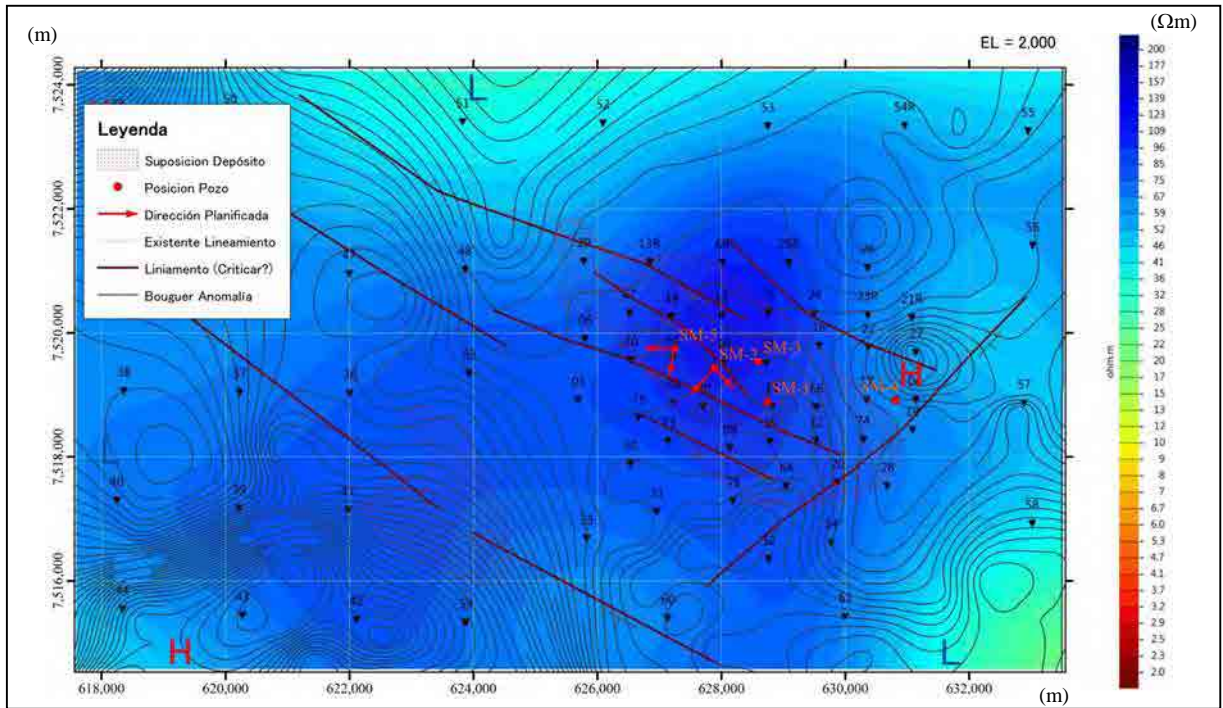
出典：CGG (2013)をもとに調査団作成

図 3-12 MT 法 3 次元解析比抵抗平面図（海拔 3,800m）



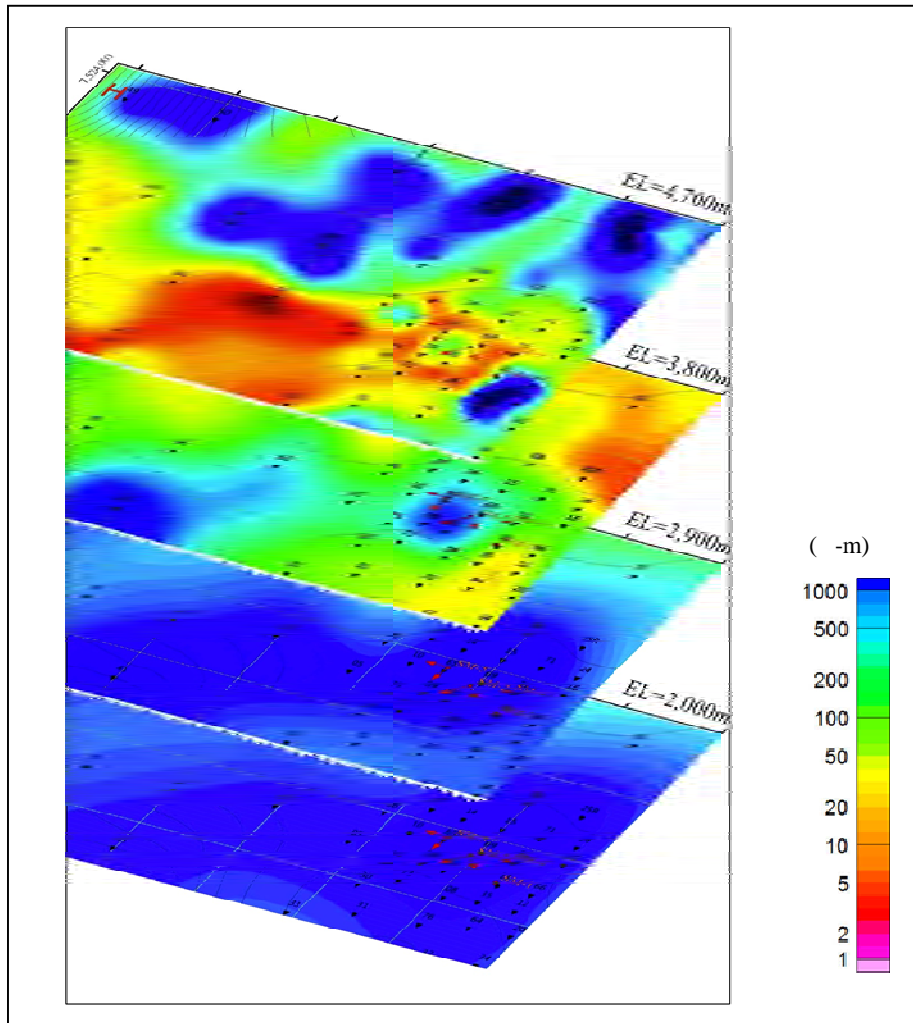
出典：CGG (2013)をもとに調査団作成

図 3-13 MT 法 3 次元解析比抵抗平面図（海拔 2,900m）



出典：CGG (2013)をもとに調査団作成

図 3-14 MT 法 3 次元解析比抵抗平面図（海拔 2,000m）



出典：CGG (2013)をもとに調査団作成

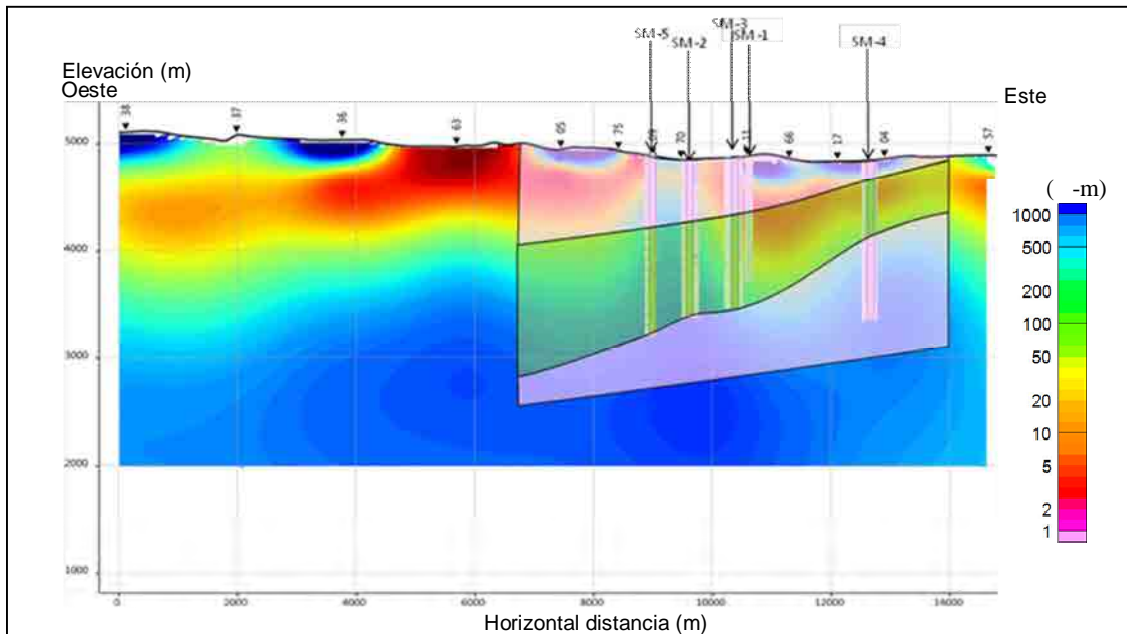
図 3-15 MT法3次元解析比抵抗俯瞰パネルダイアグラム

最も浅い海拔 4,700m の比抵抗分布では、評価範囲南西にある大きな高重力異常の北東部から中央部へ向かって北東方向へ低比抵抗帯が伸びている。この中央部の低比抵抗帯内部の小さな低比抵抗異常の卓越方向は NW-SE 方向を示している。評価範囲東部の高重力異常付近も低比抵抗を示している。2つの想定地熱貯留層及び地表における変質帯はいずれも低比抵抗を示す範囲に位置しており、調査井も低比抵抗異常の内部もしくは縁辺部に位置している。

海拔 3,800m になると、海拔 4,700m では低比抵抗を示していた部分が高比抵抗に、高比抵抗を示していた部分が低比抵抗を示すようになり、比抵抗分布の概観が全く反転している。2つの地熱貯留層のうち南西側の地熱貯留層は高比抵抗異常に対比できるが、中央部の地熱貯留層は高比抵抗異常を低比抵抗異常が取り巻いている地域に当たる。

海拔 2,900m ではさらに比抵抗分布は一変し、評価範囲北部と南東部を除くと高比抵抗帯が広く分布し、高比抵抗帯の分布状況は重力（ブーゲー異常）の分布と類似する。

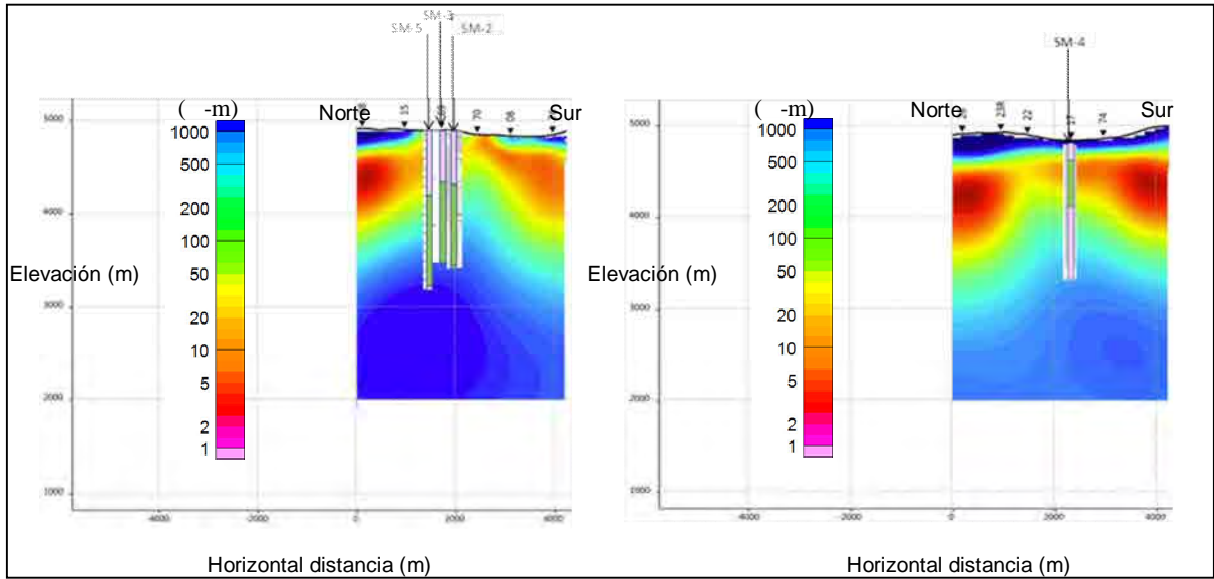
海拔 2,000m は海拔 2,900m よりさらに高比抵抗が広がっているが、傾向はあまり変わっていない。



出典：CGG (2013)をもとに調査団作成

図 3-16 MT 法 3次元解析比抵抗東西断面図（UTM-Y：751,900m）

調査井付近を通る東西方向の解析比抵抗断面を図 3-16 に示す。本断面では、表層の高比抵抗層と最下層の高比抵抗基盤の間に中間低比抵抗層がある 3 層構造を呈している。一部の地域では中間低比抵抗層が地表に露出しており、これらの地域のうち、測点 63 付近、測点 09～70 付近、測点 04 付近では高比抵抗基盤が盛り上がっている。特に、測点 09～70 付近は地表近くまで高く盛り上がり、この盛り上がりの両側は断層によって境界が形成されているように捉えられる。この断面には各ボーリングの既存柱状図を投影して作成した地質断面図を重ねた。この地質断面では全体的に東から西に向かって傾斜するような 3 層構造であり、SM-5～SM-1 では最上層が中間低比抵抗層、第 2 層が高比抵抗基盤と対比できるのに対し、SM-4 では最上層が表層高比抵抗層、第 2 層が中間低比抵抗層、最下層が高比抵抗基盤に対比できる。この違いについては今後のボーリング結果を見て検討すべきと考えられる。



出典：CGG (2013)をもとに調査団作成

図 3-17 MT 法 3次元解析比抵抗南北断面図

調査井 SM-2、3、5 付近を通る南北断面と調査井 SM-4 付近を通る南北断面を図 3-17 に示す。両断面とも東西断面と同様の 3 層構造を呈しており、いずれの断面でも調査井付近で高比抵抗基盤が盛り上がっている。調査井 SM-2、3、5 付近を通る南北断面では SM-2 より南側の高比抵抗基盤の盛り上がりの傾斜がきつく、断層の存在を示唆している。一方、調査井 SM-4 付近を通る南北断面では北側の高比抵抗基盤の盛り上がりの傾斜がきつく、断層の存在を示唆している。

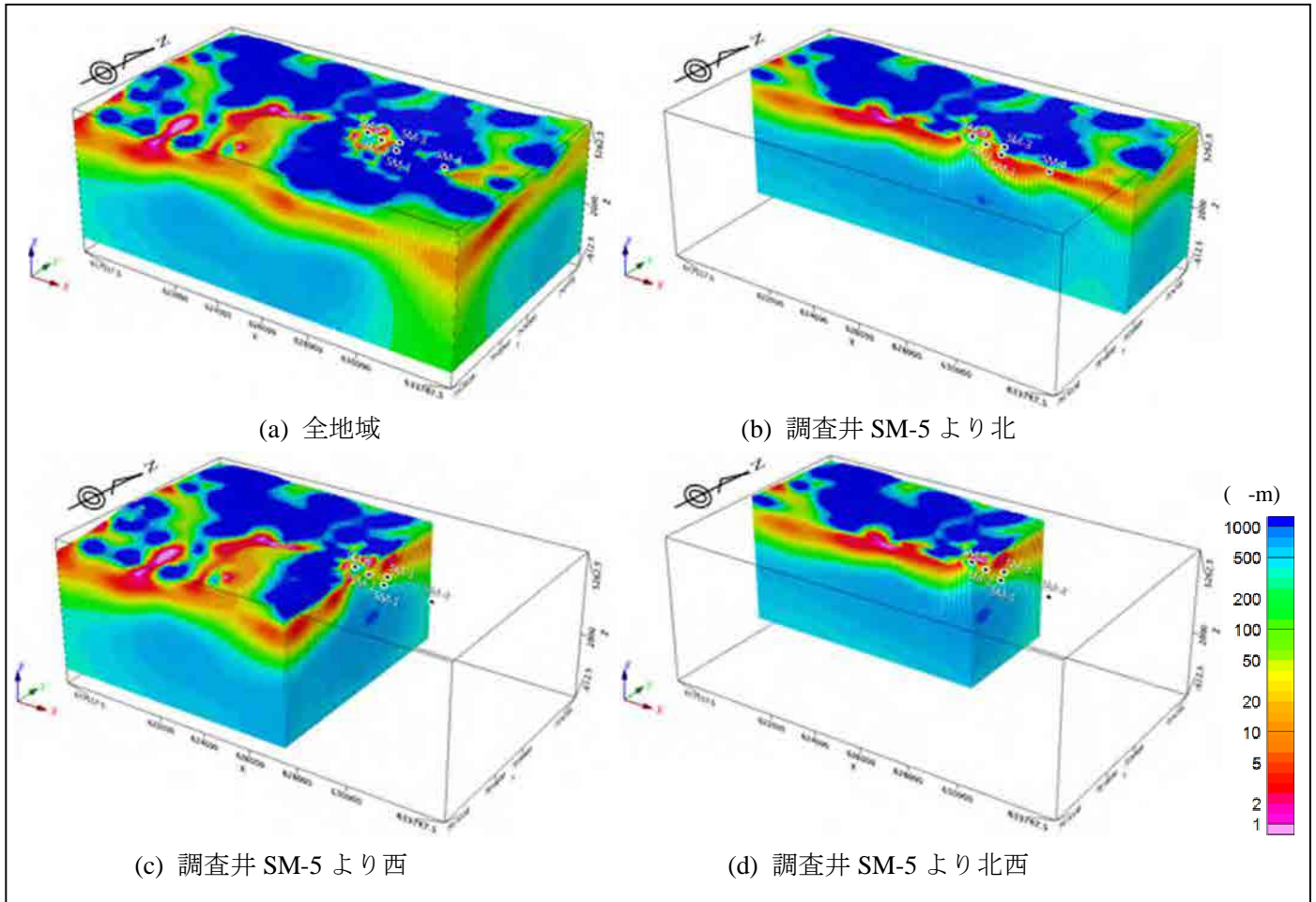
3次元比抵抗解析結果の3次元分布を図 3-18 に示す。これらの図から、本地域は表層の高比抵抗比抵抗層、中間の低比抵抗層、最下位の高比抵抗基盤の3層構造を呈していることがわかる。(a)の全域では地表は地域北西部から中央部にかけて高比抵抗の表層に広く覆われていて、中間低比抵抗層が地表に露出している箇所もしくはその縁辺部に調査井がある。また、調査井 SM-5 を通る断面で(b)~(d)のように切り出すと調査井 SM-1、2、3、5 付近で高比抵抗基盤が円錐状に盛り上がっている状況を捉えることができる。

(3) 物理探査結果からみたボーリング計画の妥当性

MT 法の海拔 2,000m および 2,900m 解析比抵抗平面図における高比抵抗帯の分布は、重力（ブーゲー異常）の分布と大局的に一致している。この高比抵抗帯は高比抵抗基盤の起伏を表しており、高比抵抗基盤は重力（密度）基盤に対比させることができると考えられる。

日本の大霧地熱発電所周辺の重力図、鉛直一次微分図に周辺の地質構造を重ねた図面を図 3-19 に示す。大霧地熱発電所の地熱貯留層は高重力帯の中にあり、鉛直一次微分図で捉えられている断層等による裂隙帯が地熱流体の貯留層になっている。本地域の推定地熱貯留層も同様に高重力帯および鞍部に位置し、調査井周辺には鉛直一次微分図から示唆されるリニアメントがいくつも認められており、重力分布からみた特徴は大霧発電所周辺に類似している。

また、高倉（2014）による大霧発電所付近の MT 法解析断面を図 3-20 に示した。この断面は低比抵抗層の下位にある高比抵抗層が発電所近傍で急に盛り上がっている点が、本地域の調査井 SM-1、2、3、5 周辺の比抵抗構造と共通する。地表付近の低比抵抗の分布は地表で認められる熱水変質帯の分布と対比できることから、調査井周辺の低比抵抗は熱水変質したキャップロック層として機能をもち、その下部にある高比抵抗基盤中の裂隙が地熱貯留層となると考えられる。



出典：CGG (2013)をもとに調査団作成

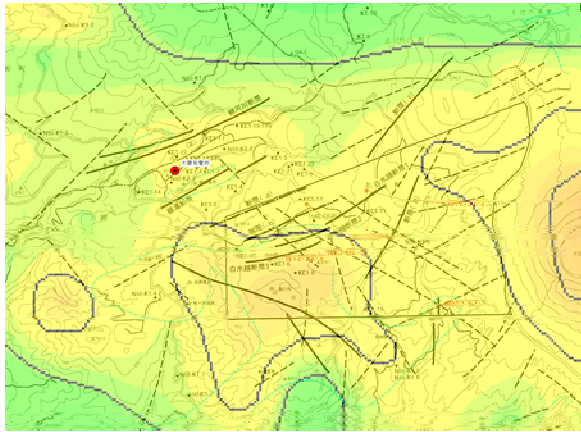
図 3-18 MT 法 3 次元解析比抵抗 3 次元分布

調査井 SM-4 付近も高重力帯の中にあり、低比抵抗層の下で高比抵抗基盤が盛り上がり、地熱貯留層となる可能性がある。いずれの坑井掘削計画位置も構造の変化、裂隙の存在が推定される位置にあり、坑井位置としては妥当と考える。

NW-SE の方向のリニアメントが 8 箇所、NE-SW のリニアメントが記載されている。その性質状況について詳細は不明であるが、変質帯の分布位置や推定される地熱貯留層の位置、方向性を考慮すると、断層や裂隙および熱水活動との関連が推定される。重力基盤の盛り上がり構造部分とも一致している。坑井掘削計画位置はいずれもこれらのリニアメントの近傍にあり、リニアメントを、裂隙帯を伴う断層と想定してターゲットとしたものと考えられる。これらのリニ

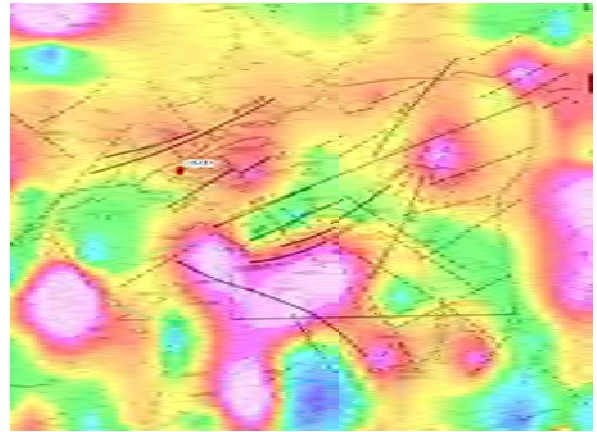
アメントは重力分布や MT 法による比抵抗分布から推定される地質構造とも整合性があり、地熱貯留層としてのポテンシャルはあるものと考えられる。

以上の検討から、現段階においては、物理探査資料からは計画された生産井 4 本の坑井掘削位置は適当と判断され、大幅な変更は必要ないとする。



出典：地質調査総合センター(2004)をもとに調査団作成

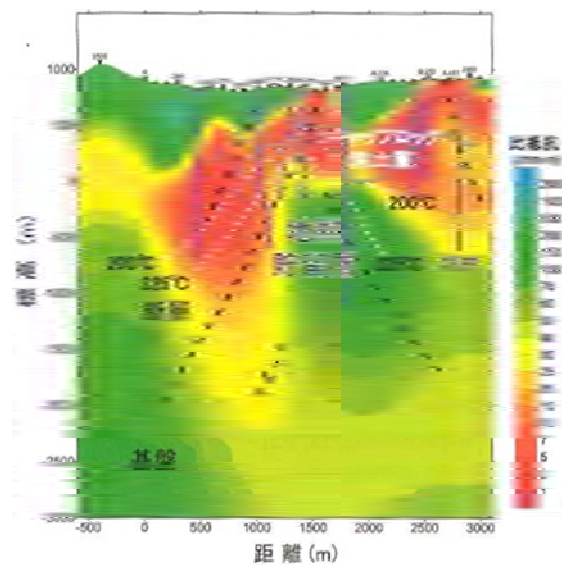
(a) 重力(ブーゲー異常)図



出典：NEDO (1983、2003) をもとに調査団作成

(b) 鉛直一次微分図

図 3-19 大霧地熱発電所付近の重力分布と地質構造



出典：高倉(2014)

図 3-20 大霧地熱発電所付近の MT 法解析断面

3.1.3 調査井掘削報告書のデータ分析結果

本地域には既に 5 本の調査井が掘削されている。本項目では、既存調査井掘削当時の掘削報告書及び現地調査での聞き取り調査等で収集したデータのとりまとめ、分析を実施し、現在の掘削計画の検討を実施した。

(1) SM-1

プロジェクト地域の 5 本の調査井の内、一番深度が浅い割に日数を要している。第一段（246坑）掘削後のケーシング挿入作業にて 3 回ケーシングの抜管及び挿入を繰り返している。このため、浅部での崩壊層に苦勞したと推定される。SM-1 井の掘削データまとめを表 3-5 に示す。

(2) SM-2

SM-1 井に比べ工期が短縮されており、第 1 段のパイロット坑掘削に 12-1/4坑ビットを使用し、その後 246ホールオープナーを用いて拡張掘削を実施した。掘削用水が足りないために、貯水待機をしていることから、水の確保が追いつかなかった様子が見て取れた。SM-2 井の掘削データまとめを表 3-6 に示す。

(3) SM-3

SM-2 同様第 1 段掘削にてパイロット坑掘削を実施しその後 246坑に拡張掘削を実施した。第 2 段掘削と第 3 段掘削の間で 95 日間の休工期間があった。冬期間であったことから気温が低下し作業継続が困難な状況であったと考えられる。本文中の記述には気温低下（-20℃以下）によるマシントラブル等の記述もあった。SM-3 井の掘削データまとめを表 3-7 に示す。

(4) SM-4

第 1 段掘削でパイロット坑掘削の後 246に拡張掘削を実施。深度 1474.0m まで掘削後、工事を一旦終了したが再度 1726.2m まで増掘しており、76ケーシング（一部スリット管）仕上げとなっている。掘削レポートに増掘前の第 4 段掘削中にフィッシング作業の記述がある。SM-4 井の掘削データまとめを表 3-8 に示す。

(5) SM-5

掘削レポートを入手することができなかった為、データの抽出量が他の調査井に比べ少なかった。現地調査においても掘削レポートを入手することができなかった。ドリリングチャート図は入手することができたため、大まかな坑井データは読み取ることができた。第 4 段掘削中に 131 日間の冬期休工期間があった。SM-5 井の掘削データまとめを表 3-9 に示す。

(6) 各坑井データのまとめ

SM-1 から SM-5 の 5 坑井を掘削する為に使用した機械は 3000m 級のリグであり、1 セットの機材ですべての坑井を掘削した。なお、今回収集することができた資料には、機材の運搬方法やリグアップ・リグダウン等の情報の記載は無かった。各調査井のデータ一覧表を表 3-10 に示す。

表 3-5 SM-1 井掘削データまとめ

項目	第1段掘削	第2段掘削	第3段掘削	第4段掘削	備考	
工期	1988.9.8～9.20 (13日間)	1988.9.21～10.5 (15日間)	1988.10.5～10.31 (27日間)	1988.11.1～11.15 (15日間)		
	1988.9.8～11.15(70日間) ※掘削資機材組立解体日数不明					
掘削深度	0.0～75.0m	75.0～307.0m	307.0～762.0m	762.0～1178.5m		
	0.0～1178.5m					
坑径	24"坑	17-1/2"坑	12-1/4"坑	8-1/2"坑		
ケーシングプログラム	Conductor 20"CSG (K55,94lb/ft) 69.0m	Surface 13-3/8"CSG (K55,54.5lb/ft) 302.7m	Production 9-5/8"CSG (K55,40lb/ft) 738.0m	※裸坑仕上げ		
主な使用ビット	17-1/2"インサート (※24"坑掘削)	17-1/2"インサート	12-1/4"インサート	8-1/2"インサート		
	IADCコード	131	131	617, 637	627, 731	
逸泥	状況	※詳細不明	※詳細不明	※詳細不明	※詳細不明	
	対策	※詳細不明	※詳細不明	※詳細不明	※詳細不明	
掘削時 パラメータ	ビット荷重	1～5t	5～15t	7～15t	4～8t	
	ビット回転	70～110rpm	60～80rpm	50～70rpm	60rpm	
	ポンプ流量	1430L/min	1690～2930L/min	1690L/min	780～1950L/min	
掘進率	6.3m/day ※24"坑掘削込み	23.2m/day	28.4m/day	32.0m/day		
掘削流体	ベントナイト泥水	ベントナイト泥水	清水	清水		
傾斜掘削	垂直井	垂直井	垂直井	垂直井		
主な編成	・12-1/4"Bit × 17-1/2"ホールオープナー × 24"ホールオープナー	・17-1/2"Bit × 17-1/2"STAB (沿角編成) ・12-1/4"Bit × 17-1/2"ホールオープナー	・12-1/4"Bit × 12-1/4"STAB (沿角編成)	・8-1/2"Bit × 8-1/2"ローラーリマー × 8-1/2"STAB (沿角編成)		
掘削中における トラブルの有無	※ケーシング挿入時3度 の抜管作業発生	記載無し	記載無し	記載無し		
使用泥剤	ベントナイト: 68963kg, 苛性ソーダ: 545kg, F.M.: 295kg, CMC: 227kg, Cal: 272kg					
使用セメント(トータル)	セメントクラスG: 32500kg, セメントクラスA: 49350kg, シリカフラワー: 24650kg セメント添加剤(R6): 71kg					
坑口装置	※無し	・21-1/4"-2000psi アニュラーBOP ・20"-600lb ゲートバルブ ・21-1/4"-2000psi 坑口ヘッド	・21-1/4"-2000psi アニュラーBOP ・13-3/8"-3000psi ダブルラムBOP ・13-5/8"-900lb ゲートバルブ ・13-5/8"-3000psi 坑口ヘッド	左記載+ ・11"×13-5/8" アダプタースプール ・11"×13-5/8" エキスパンションスプール		
	・11"-900lbゲートバルブ×2個、3-1/8"-3000psiゲートバルブ×2個					
掘削機仕様	・リグ: Massarenti 7000SP ・容量: 5" DP 3600m分 ・巻き上げ能力: 227t ・エンジン: キャタピラー-3408TA(475HP) × 2台 ・マスト高さ: 43m ・マッドポンプ: Massarenti 7" x 8" (750HP) × 2台					3000m級リグ

出典：調査団作成

表 3-6 SM-2 井掘削データまとめ

項目	第1段掘削	第2段掘削	第3段掘削	第4段掘削	備考
工期	1988.12.19～12.28 (10日間)	1988.12.29～1989.1.14 (17日間)	1989.1.15～1.28 (14日間)	1989.1.29～2.17 (20日間)	
	1988.12.19～1989.2.17(61日間) ※掘削資機材組立解体日数不明				
掘削深度	0.0～72.0m	72.0～310.5m	310.5～617.0m	617.0～1486.5m	
	0.0～1486.5m				
坑径	24"坑	17-1/2"坑	12-1/4"坑	8-1/2"坑	
ケーシングプログラム	Conductor 20"CSG (K55,94lb/ft) 69.5m	Surface 13-3/8"CSG (K55,54.5lb/ft) 308.0m	Production 9-5/8"CSG (K55,40lb/ft) 606.0m	※裸坑仕上げ	
主な使用ビット	12-1/4"インサート (※24"坑掘削)	17-1/2"インサート 12-1/4"インサート (※一部17-1/2"坑掘削)	12-1/4"インサート	8-1/2"インサート	
	IADCコード	637	111,114,131(637)	617, 637	627, 731
逸泥	状況	※記載無し	・深度210～310m →全量逸泥	・深度330～617m →全量逸泥	・895～905m →全量逸泥 ・920～1480m →全量逸泥
	対策	※セメンチング	無し	無し	無し
掘削時 ハロメータ	ビット荷重	1～6t	5～14t	5～8t	7～8t
	ビット回転	60～80rpm	60～100rpm	60rpm	50～60rpm
	ポンプ流量	910～2860L/min	780～2600L/min	780～1690L/min	780～1560L/min
掘進率	10.3m/day ※24"坑掘削	19.9m/day ※17-1/2"坑掘削	38.3m/day	54.3m/day	
掘削流体	ベントナイト泥水	清水	清水	清水	
傾斜掘削	垂直掘削 ・72m: 傾斜0°45'	垂直掘削 ・210m: 傾斜1°30' ・310m: 傾斜2°	垂直掘削 ・320m: 傾斜2°15' ・610m: 傾斜2°	垂直掘削 ・990m: 傾斜1° ・1050m: 傾斜2°	
主な編成	・12-1/4"Bit × 17-1/2"ホールオープナー × 24"ホールオープナー	・17-1/2"Bit × 17-1/2"STAB (沿角編成) ・12-1/4"Bit × 17-1/2"ホールオープナー	・12-1/4"Bit × 12-1/4"STAB × 12-1/4"ローラーリマー (沿角編成)	・8-1/2"Bit (スリック編成)	
掘削中における トラブルの有無	※記載無し	貯水待機有り	貯水待機有り	※不明	
使用泥剤	ベントナイト: 55650kg, 苛性ソーダ: 1950kg, CaI: 1816kg				
使用セメント(トータル)	セメントクラスG: 72100kg, セメントクラスA: 7500kg, シリカフラワー: 34450kg セメント添加剤(R6): 30kg				
坑口装置	※無し	・21-1/4"-2000psi アニューラ-BOP ・20"-600lb ゲートバルブ ・21-1/4"-2000psi 坑口ヘッド	・21-1/4"-2000psi アニューラ-BOP ・13-3/8"-3000psi ダブルラムBOP ・13-5/8"-900lb ゲートバルブ ・13-5/8"-3000psi 坑口ヘッド	左記載+ ・11"×13-5/8" アダプタースプール ・11"×13-5/8" エキスションスプール	
	・11"-900lbゲートバルブ×2個、3-1/8"-3000psiゲートバルブ×2個				
掘削機仕様	・リグ: Massarenti 7000SP ・容量: 5" DP 3600m分 ・巻き上げ能力: 227t ・エンジン: キャタピラー3408TA(475HP)×2台 ・マスト高さ: 43m ・マッドポンプ: Massarenti 7"x8" (750HP)×2台				
	3000m級リグ				

出典: 調査団作成

表 3-7 SM-3 井掘削データまとめ

項目	第1段掘削	第2段掘削	第3段掘削	第4段掘削	備考
工期	1989.4.21～5.4 (14日間)	1989.5.5～5.21 (17日間)	1989.5.22～6.15 (25日間)	1989.9.20～10.5 (16日間)	※1989.6.16 ～9.19(95日間) 休工期間
	1989.4.21～1989.10.5(休工期間を除いた日数:72日間) ※掘削資機材組立解体日数不明				
掘削深度	0.0～63.0m	63.0～305.0m	305.0～736.0m	736.0～1406.0m	
	0.0～1406.0m				
坑径	24"坑	17-1/2"坑	12-1/4"坑	8-1/2"坑	
ケーシングプログラム	Conductor 20"CSG (H40,94lb/ft) 58.0m	Surface 13-3/8"CSG (K55,54.5lb/ft) 298.0m	Production 9-5/8"CSG (K55,40lb/ft) 731.0m	※裸坑仕上げ	
主な使用ビット	12-1/4"インサート (※24"坑掘削)	17-1/2"インサート (※一部掘削)	12-1/4"インサート	8-1/2"インサート	
	IADCコード	231	311	231, 616	637
逸泥	状況	・深度44～63m →全量逸泥	・深度64.4～166m →全量逸泥 ・深度166～305m →少量逸泥	※記述無し	・深度971m →少量逸泥(8m ³) ・深度977～1407m →全量逸泥
	対策	セメンチング実施	セメンチング実施	※記述無し	無し
掘削時 ハロメータ	ビット荷重	1～5t	5～12t	11～12t	5～10t
	ビット回転	70～100rpm	60～70rpm	60rpm	50rpm
	ポンプ流量	780～1300L/min	1300～1690L/min	2000L/min	780～1600L/min
掘進率	6.3m/day ※24"坑掘削込み	18.6m/day ※17-1/2"坑掘削含	43.1m/day	51.5m/day	
掘削流体	ベントナイト泥水	ベントナイト泥水	ベントナイト泥水	ベントナイト泥水	
傾斜掘削	垂直掘削 (測定結果無し)	垂直掘削 ・228m: 傾斜3°45' ・304m: 傾斜2°45'	垂直掘削 ・325m: 傾斜3° ・465m: 傾斜1°15'	垂直掘削 ・980m: 傾斜1°30'	
主な編成	・12-1/4"Bit ×17-1/2"ホルオーフナー ×24"ホルオーフナー	・17-1/2"Bit ×17-1/2"STAB (沿角編成) ・12-1/4"Bit ×17-1/2"ホルオーフナー	・12-1/4"Bit ×12-1/4"STAB (沿角編成)	・8-1/2"Bit ×8-1/2"ローラーリマー ×8-1/2"STAB (沿角編成)	
掘削中における トラブルの有無	※記載無し	※記載無し	※記載無し	マシントラブルより休工 (95日間)	
使用泥剤	ベントナイト:59470kg,苛性ソーダ:1750kg,CMC:704kg,Cal:2550kg				
使用セメント(CSG)	・セメントG:9500kg ・セメントA:4000kg ・シリカフラワー:4000kg	・セメントG:26500kg ・シリカフラワー:10600kg	・セメントG:38800kg ・シリカフラワー:15400kg	無し	
使用セメント(トール)	セメントクラスG:76150kg,セメントクラスA:44250kg,シリカフラワー:3000kg 塩化カルシウム:490kg,セメント添加剤(R6):90kg				
坑口装置	※無し	・21-1/4"-2000psi アニュラーBOP ・20"-600lb ゲートバルブ ・21-1/4"-2000psi 坑口ヘッド	・21-1/4"-2000psi アニュラーBOP ・13-3/8"-3000psi ダブルラムBOP ・13-5/8"-900lb ゲートバルブ ・13-5/8"-3000psi 坑口ヘッド	・21-1/4"-2000psi アニュラーBOP ・13-3/8"-3000psi ダブルラムBOP ・13-5/8"-900lb ゲートバルブ ・13-5/8"-3000psi 坑口ヘッド	
	・11"-900lbゲートバルブ×2個,3-1/8"-3000psiゲートバルブ×2個				
掘削機仕様	・リグ:Massarenti7000SP ・容量:5"DP 3600m分 ・巻き上げ能力:227t ・エンジン:キャタピラー3408TA(475HP)×2台 ・マスト高さ:43m ・マッドポンプ:Massarenti7"x8"(750HP)×2台				3000m級リグ

出典:調査団作成

表 3-8 SM-4 井掘削データまとめ

項目	第1段掘削	第2段掘削	第3段掘削	第4段掘削	※第4段増掘	備考
工期	1989.11.1～11.6 (6日間)	1989.11.7～11.17 (11日間)	1989.11.18～11.30 (13日間)	1989.12.1～12.23 (23日間)	1991.11.28～12.16 (19日間)	
	1989.11.1～12.24(54日間) ※掘削資機材組立解体日数不明				累計72日間	
掘削深度	0.0～61.0m	61.0～301.0m	301.0～687.0m	687.0～1474.0m	1474.0～1726.2m	
	0.0～1726.2m					
坑径	24"坑	17-1/2"坑	12-1/4"坑	8-1/2"坑	8-1/2"坑	
ケーシングプログラム	Conductor 20" CSG (X-52,91.5lb/ft) 59.9m	Surface 13-3/8" CSG ・K55,54.5lb/ft 0～238.7m ・JE,61lb/ft 238.7～297.2m	Production 9-5/8" CSG ・K55,40lb/ft 0～303.6m ・N80,43.5lb/ft 303.6～361.5m ・K55,40lb/ft 361.5～681.3m	※裸坑仕上げ	Slotted Liner 7" CSG (N80,23lb/ft) ・フライト管 672.0～1306.0m ・スリット管 1306.0～1724.0m ・ライナーハンガー 672.0m ・バスケット 856m,997m,1096m	
主な使用ビット	17-1/2"インサート (※24"坑拡張)	17-1/2"インサート	12-1/4"インサート	8-1/2"インサート	8-1/2"インサート	
	IADCコード	※不明	311	637, 231	637	
逸泥	状況	※不明	※不明	※不明	・深度1300～1474m →全量逸泥	・深度1510～1515m ・深度1535～1545m ・深度1546～1724m →全量逸泥
	対策	※不明	※不明	※不明	無し	無し
掘削時 ハロメータ	ビット荷重	1～5t	12～15t	5～15t	9～15t	※記載無し
	ビット回転	40～60rpm	70rpm	60～70rpm	50～70rpm	※記載無し
	ポンプ流量	1400～2000L/min	2300～3400L/min	1200～2000L/min	1300～1950L/min	※記載無し
掘進率	15.3m/day ※24"坑拡張込み	48.0m/day	48.3m/day	34.2m/day	不明	
掘削流体	ベントナイト泥水	ベントナイト泥水	ベントナイト泥水	清水	※記載無し	
傾斜掘削	垂直掘削 ・60m: 傾斜1°45'	垂直掘削 ・250m: 傾斜0°45'	垂直掘削 ・670m: 傾斜2°45'	※記載無し	※記載無し	
主な編成	・12-1/4" Bit × 17-1/2" ホールオープナー × 24" ホールオープナー	・17-1/2" Bit × 17-1/2" STAB (沿角編成)	・12-1/4" Bit × 12-1/4" STAB (沿角編成)	・8-1/2" Bit × 8-1/2" STAB (沿角編成)	※記載無し	
掘削中における トラブルの有無	※不明	※不明	※不明	フィッシング履歴有り ※詳細不明	※記載無し	
使用泥剤	ベントナイト: 77750kg, 苛性ソーダ: 2600kg, CMC: 250kg, Cal: 567kg				※記載無し	
使用セメント(トール)	セメントクラスG: 76750kg, シリカフラワー: 27300kg				※記載無し	
坑口装置	※無し	・21-1/4"-2000psi アニュラーBOP ・20"-600lb ゲートバルブ ・21-1/4"-2000psi 坑口ヘッド	・21-1/4"-2000psi アニュラーBOP ・13-3/8"-3000psi ダブルラムBOP ・13-5/8"-900lb ゲートバルブ ・13-5/8"-3000psi 坑口ヘッド	・21-1/4"-2000psi アニュラーBOP ・13-3/8"-3000psi ダブルラムBOP ・13-5/8"-900lb ゲートバルブ ・13-5/8"-3000psi 坑口ヘッド	※記載無し	
	※不明					
掘削機仕様	・リグ: Massarenti7000SP ・容量: 5" DP 3600m分 ・巻き上げ能力: 227t ・エンジン: キャタピラー3408TA(475HP)×2台 ・マスト高さ: 43m ・マッドポンプ: Massarenti7"×8" (750HP)×2台					3000m級リグ

出典：調査団作成

表 3-9 SM-5 井掘削データまとめ

項目	第1段掘削	第2段掘削	第3段掘削	第4段掘削	備考
工期	1992.4.3～4.12 (10日間)	1992.4.13～4.26 (14日間)	1992.4.27～10.15 (41日間)	1992.10.16～11.8 (24日間)	※1992.6.1～10.9 (131日間) 休工期間
	1992.4.3～11.8(休工期間を除いた日数:89日間) ※掘削資機材組立解体日数不明				
掘削深度	0.0～70m付近	70m付近～300m付近	300m付近～900m付近	900m付近～1705.0m	
	0.0～1705.0m				
坑径	24"坑	17-1/2"坑	12-1/4"坑	8-1/2"坑	
ケーシングプログラム	Conductor 20" CSG 69.85m	Surface 13-3/8" CSG 300m付近	Production 9-5/8" CSG 878.3m	※裸坑仕上げ	
主な使用ビット	17-1/2"インサート (※26"坑掘削)	17-1/2"インサート	12-1/4"インサート	8-1/2"インサート	
	IADCコード	不明	不明	637	
逸泥	状況	不明	不明	不明	
	対策	不明	不明	不明	
掘削時 ハロメータ	ビット荷重	不明	不明	不明	
	ビット回転	不明	不明	不明	
	ポンプ流量	不明	不明	不明	
掘進率	不明	不明	不明	不明	
掘削流体	ベントナイト泥水	ベントナイト泥水	ベントナイト泥水	清水	
傾斜掘削	垂直井	垂直井	垂直井	垂直井	
主な編成	不明	不明	不明	不明	
掘削中における トラブルの有無	不明	不明	不明	不明	
使用泥剤	不明				
使用セメント(トール)	不明				
坑口装置	※無し	不明	不明	不明	
	不明				
掘削機仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・リグ: Massarenti 7000SP ・容量: 5" DP 3600m分 ・巻き上げ能力: 227t ・エンジン: キャタピラー 3408TA(475HP) × 2台 ・マスト高さ: 43m ・マッドポンプ: Massarenti 7"x8" (750HP) × 2台 				3000m級リグ

出典：調査団作成

表 3-10 調査井データ一覧表

項目	試掘井坑井名				
	SM-1	SM-2	SM-3	SM-4	SM-5
掘削深度	1178.5m	1486.5m	1406.0m	1726.2m ※1474.0～1726.0m増掘	1705.0m
工期	1988年9月8日 ～1988年11月15日 (70日間)	1988年12月19日 ～1989年2月17日 (61日間)	1989年4月21日 ～1989年10月5日 (72日間) ※1989年6月16日 ～1989年9月19日 (95日間) 休工	1989年11月1日 ～1989年12月24日 (53日間) 1991年11月28日 ～1991年12月16日 (19日間) ※累計72日間	1992年4月3日 ～1992年11月8日 (89日間) ※1992年6月1日 ～1992年10月9日 (131日間) 休工
最終坑径	8-1/2" 坑 (裸坑仕上げ)	8-1/2" 坑 (裸坑仕上げ)	8-1/2" 坑 (裸坑仕上げ)	7" ケーシング ※一部スリット管	8-1/2" 坑 (裸坑仕上げ)
傾斜	垂直井	垂直井	垂直井	垂直井	垂直井
逸泥状況	※詳細不明	※詳細不明	※詳細不明	※詳細不明	※詳細不明
坑内トラブルの有無	ケーシング抜管	貯水待機有り ※詳細不明	※詳細不明	フィッシング履歴有り ※詳細不明	※詳細不明
特記事項	・第1段掘削後、ケーシング設置作業で1週間の日数を要している(3回の抜管作業をした模様)。	特になし	特になし	特になし	特になし
噴気の有無	有	有	有	無	有

出典：調査団作成

3.1.4 噴気試験結果

プロジェクト地域では過去、以下の時期に噴気試験が実施された。実施時期および実施期間は表 2-2 に示した。

- 1987 - 1990 年
- 1997 年 5 - 8 月
- 2012 年 12 月 - 2013 年 4 月

各噴気試験の詳細および結果を以下にまとめる。

(1) 1987 - 1990 年の噴気試験

1987 - 1990 年に実施した噴気試験・注水試験の概要は表 3-11 に示すように Di et al (1990) にまとめられている。ただしこれ以外のデータは同文献には記載されていない。この時期、SM-1、SM-2、SM-3、SM-4、AP-1 において噴気試験・注水試験が実施され、各坑井周辺の岩体温度や噴気時の坑口圧力、噴気流体の比エンタルピ²、総生産流量、気液比³、還元指数⁴が測定された。主要な結果は以下の通りである。

- 各坑井周辺の岩体温度は 250～260℃を観測した。
- 噴気流体の比エンタルピは、SM-1 および SM-2 で 1,050 kJ/kg、AP-1 で 1,400 kJ/kg であった。
- 噴気試験時の総生産流量は、SM-1、SM-2 および SM-3（推測値）で 290～350 t/h を示した。ただし、AP-1 では約 30 t/h しかなかった。SM-1 の噴気特性試験結果を Appendix-2 に示す。
- 気液比は SM-1 および SM-2 で 20% であった。
- SM-1、SM-2、SM-3 は SM-4、AP-1 と比べて 1、2 桁大きい還元指数が測定された。
- SM-1 の噴出はきわめて強かった（JETRO, 2008）。

また、1989 - 1990 年において SM-2 噴気中に SM-1、SM-3 の坑井内圧力を連続的にモニタリングしたが、良好な結果は取得されなかった（表 3-14；JICA, 2013）。

² 比エンタルピ：1kg の物質が保有するエネルギー。単位は（J/kg）

³ 気液比：気体流量と液体流量の比

⁴ 還元指数：還元井の能力を示す指数。還元量を（地熱貯留層圧力-初期圧力）で割ったもの。還元量が多いほどまた、還元中の圧力増加が小さいほど還元指数は大きくなる。（参考：地熱エネルギーハンドブック）

表 3-11 1987年-1990年に実施した噴気試験の概要

坑井	貯留層温度, °C	最大坑口圧力, barA	比エンタルピ, kJ/kg	最大総生産流量, t/h	気液比 @7barA	還元指数, (m ³ /t)/bar	コメント(出典内の記述)	不明瞭な点
SM-1	250	16	1,050	350	20%	90	噴出がきわめて強い。坑口圧力を高く設定した場合に噴出量がセノレータの分離容量を超えたため、直上噴気で測定がなされた(METI, 2007)。	出典内にデータは記載されていない。
SM-2	250	16	1,050	350	20%	80	-	
SM-3	250	16*	N/A	290*	N/A	23	-	
SM-4	250	N/A	N/A	N/A	N/A	1	-	
AP-1	260	4	1,400	30	-	2	-	

*: Inferred, N/A: not available
(出典: DiLuccio and Rico (1990) Geothermal Feasibility study of Laguna Colorado-Bolivia, GRC Transactions, Vol. 14, Part II, p.857-872.)

表 3-12 1997年に実施した噴気試験の概要

坑井	噴出期間	坑口圧力	比エンタルピ, kJ/kg	総生産流量, t/h	熱水流量, t/h	蒸気流量, t/h	コメント(出典内の記述)	不明瞭な点
SM-2	1997年5-8月	0.8 - 1.3 MPaG	1,050	80-255	70-220	10-40	噴気中温度・圧力検層の結果も加味して、坑井シミュレータWELLFLOWでマッチング解析した。その結果推測される事項を以下に示す。 ・地熱流体は深度約1,400mにおいて液相単層で坑内に流入。 ・深度約1,000mでフラッシュして気液二相状態になる。 ・SM-2周辺の浸透率・層厚積kh: 100 darcy-m	マッチング解析において設定したFeed Point Depth(流入深度)の根拠。
SM-5	1997年5-8月	0.9 - 1.3 MPaG	1,050	105-220	95-190	10-35	ビルドアップ試験により得られた結果を以下に示す(Delgado and Puente, 1998)。 ・kh: 130 darcy-m ・貯留係数qch: 2.9E-9 mPa。 噴気中温度・圧力検層の結果も加味して、坑井シミュレータWELLFLOWでマッチング解析した。その結果推測される事項を以下に示す。 ・地熱流体は深度約1,700mにおいて液相単層で坑内に流入。 ・深度約1,000mでフラッシュして気液二相状態になる。 ・SM-5周辺の浸透率・層厚積kh: 20 darcy-m	

(出典: METI (2007) 平成19年度 地球環境・プラント活性化事業等調査 南アメリカ・ラグナコロラダ地熱発電所関係事業調査 報告書、平成20年3月、p.47-50をもとに作成)
Delgado and Puente (1998) The Laguna Colorado (Bolivia) Project: A Reservoir Engineering Assessment, GRC Transactions, Vol. 22, p.257-262.)

表 3-13 2012年12月-2013年4月に実施した噴気試験の概要

坑井	噴出期間	坑口圧力, barA	TFT測定値			コメント(出典内の記述)	不明瞭な点	
			比エンタルピ, kJ/kg	総生産流量, t/h	熱水流量, t/h			蒸気流量, t/h
SM-1	2012/12/11 - 2013/1/5	10.73 - 15.04	1,064.9 - 1,147.9	42.8 - 285.5	30.5 - 234.7	12.3 - 50.8	約25年ぶりの噴気試験。生産特性は過去の噴気試験の結果と整合的。 ・噴出試験の解析結果から、SM-1周辺の浸透率・層厚積kh: 100 darcy-m	解析において設定したFeed Point Depth(流入深度)の根拠。特にSM-2では深度1,400mと設定しているが、検層図を見ると1,260m以深はプラグされている。
SM-3	2013/1/22 - 2013/2/20	8.90 - 13.53	1,022.4 - 1,150	35 - 257.6	26.1 - 215.0	5 - 42.6	今回初めて噴気に成功。 ・噴出試験の解析結果から、SM-3周辺の浸透率・層厚積kh: 50 darcy-m	
SM-2	2013/4/4 - 2013/4/28	9.59 - 14.44	1,072.5 - 1,144.7	40.6 - 280.4	29.8 - 226.2	10.8 - 54.3	約15年ぶりの噴気試験。生産特性は過去の噴気試験の結果と整合的。 ・噴出試験の解析結果から、SM-2周辺の浸透率・層厚積kh: 100 darcy-m	

(出典: JICA (2013) 南アメリカラグナ・コロラダ地熱発電所 建設推進プロジェクト 事業完了報告書、平成25年12月、p.61-67, 114-117をもとに作成)

表 3-14 1997年以前に実施した噴気試験時における圧力モニタリングの概要

観測井	噴出坑井	噴出期間	コメント(出典内の記述)	不明瞭な点
SM-1, SM-3	SM-2噴気試験中	1989-1990年	良好なデータは取得できなかった。	出典内にデータは記載されていない。
SM-1, SM-3	SM-2, SM-5噴気試験中 (噴出熱水の一部をSM-4 に還元)	1997年5-8月	-	噴気試験時におけるSM-2, SM-5の正確な 噴出期間が不明。そのため、両坑井とSM- 1, SM-3との干渉関係の程度(有無)が判 断できない。

(出典: JICA (2013) ポリビア国ラグナ・コロラダ地熱発電所 建設推進プロジェクト 事業完了報告書, 平成25年12月, p.108-112をもとに作成)

表 3-15 2012年12月-2013年4月に実施した噴気試験時における圧力モニタリングの概要

観測井	噴出坑井	噴出期間	コメント(出典内の記述)	不明瞭な点
SM-3	SM-1噴気試験中	2012/12/11 - 2013/1/5	生産井近傍の坑井間の干渉は小さい。	-
SM-1	SM-3噴気試験中	2013/1/22 - 2013/2/20		-
SM-1, SM-3	SM-2噴気試験中	2013/4/4 - 2013/4/28		第4-18図を見ると、SM-2噴気試験開始に 伴いSM-1坑井内圧力が低下しているように 見える。

(出典: JICA (2013) ポリビア国ラグナ・コロラダ地熱発電所 建設推進プロジェクト 事業完了報告書, 平成25年12月, p.87-90をもとに作成)

(2) 1997年5-8月の噴気試験

1997年5-8月に実施した噴気試験の概要を表3-12に示す（JETRO, 2007）。この時期、SM-2およびSM-5において噴気試験が実施され（噴出熱水の一部をSM-4に還元）、噴気時の坑口圧力や噴気流体の比エンタルピ、流量が測定された。また、SM-5ではビルドアップ試験も実施され、SM-5周辺の浸透率-層厚積（kh）が評価された（Delgadillo and Puente, 1998）。主要な結果は以下の通りである。

- 総生産流量の最大値はSM-2が255 t/h、SM-5が220 t/hを示し、蒸気流量の最大値はSM-2が40 t/h、SM-5が35 t/hを示した。両坑井の噴気特性試験結果をAppendix-2に示す。
- 噴気流体の比エンタルピは、SM-2およびSM-5共に1,050 kJ/kgであった。
- SM-5のビルドアップ試験の結果、khは130 darcy-mと非常に高い値が求められた。また、貯留係数 ϕ chは 2.9×10^{-9} m/Paと評価された。

両坑井では噴気特性試験結果に加えて、噴気中温度・圧力検層の結果（詳細は後述）を加味して坑井シミュレータ「WELLFLOW」でマッチング解析を実施し、各坑井周辺のkh等を求めている。その結果は以下の通りである。

(a) SM-2

- 地熱流体は深度約1,400 mにおいて約250°Cの液相単層で坑内に流入。
- 深度約1,000 mでフラッシュして気液二相状態になる。
- SM-2周辺のkhは100 darcy-mと非常に高い値が求められた。

(b) SM-5

- 地熱流体は深度約1,700 mにおいて約250°Cの液相単層で坑内に流入。
- 深度約1,000 mでフラッシュして気液二相状態になる。
- SM-5周辺のkhは20 darcy-mと高い値が求められた。
- なお、マッチング解析において設定したFeed Point Depth（流入深度）の根拠は不明である。

上記期間においてSM-1およびSM-3で坑井内圧力測定が実施された（表3-14；JICA, 2013）。この期間における両坑井の圧力測定結果、およびSM-2、SM-5噴気流体の比エンタルピ測定結果をAppendix-2に示す（地熱貯留層シミュレーションの結果も併せて図示）。

ただし、報告書では、SM-2、SM-5の正確な噴気期間の記載が無く不明である。そのため、両坑井とSM-1、SM-3との圧力干渉の程度（有無）が判断できない。

上記期間には噴気試験に合わせて噴気中検層や、各坑井で静止中検層が実施された（AP-1のみ1988年測定；JETRO, 2007）。これら検層の概要を表3-16に、静止中検層の温度・圧力プロファイルをおよびSM-2、SM-5の噴気中検層の温度・圧力プロファイルをAppendix-2に示す。主要な結果は以下の通りである。

- SM-4以外の坑井（SM-1、SM-2、SM-3、AP-1）では240～250°Cの坑井周辺の岩体温度を観測した。SM-4では、上記坑井と同程度かそれ以深の深度でも220°C程度であった。
- 各坑井の静止時における水位以深の圧力プロファイルはほぼ同様であった。このことは、これら坑井の流出入点は同じ圧力系に支配されていることを示唆する。

(3) 2012年12月 - 2013年4月の噴気試験

2012年12月 - 2013年4月に実施した噴気試験の概要を表 3-13 に、噴気特性試験結果を Appendix-2 に示す。この時期、SM-1、SM-2 および SM-3 において噴気試験が実施され、噴気時の坑口圧力や噴気流体の比エンタルピ、流量が測定された。主要な結果は以下の通りである。

- 各坑井の総生産流量の最大値は 255～285 t/h を、蒸気流量の最大値は 40～55 t/h を示した。
- 噴気流体の比エンタルピの最大値は、SM-1、SM-2 および SM-3 共に約 1,150 kJ/kg であった。
- SM-1 および SM-2 はそれぞれ前回実施した噴気試験（SM-1 は約 25 年ぶり、SM-2 は 15 年ぶり）の結果と整合的であった。

これら 3 坑井では噴気特性試験結果を解析し、各坑井周辺の kh を求めている。各坑井の特性解析結果を Appendix-2 に示す。その結果、SM-1 および SM-2 周辺の kh は 100 darcy-m、SM-3 周辺の kh は 50 darcy-m と非常に高い値が求められた。

ただし、報告書における噴気特性試験の記載では以下の点が不明瞭である。

- 解析において設定した Feed Point Depth（流入深度）の根拠。
- 特に SM-2 では流入深度を 1,400m と設定しているが、検層図（Appendix-2）を見ると同坑井の 1,260m 以深はプラグされている。

上記期間において実施された噴気試験に合わせて SM-1 および SM-3 で坑井内圧力測定が実施された。この結果の概要を表 3-15 に、両坑井の圧力測定結果および SM-1、SM-2、SM-3 噴気流体の比エンタルピ測定結果を Appendix-2 に示す（地熱貯留層シミュレーションの結果も併せて図示）。JICA(2013)では圧力測定結果から、SM-1、SM-2、SM-3 各坑井間の干渉は小さいと判断している。ただし、SM-2 噴気試験開始に伴い SM-1 坑井内圧力が低下しているように見える。

上記期間には噴気試験に合わせて 3～4 段階の流量における噴気中検層や、静止中検層、SM-4 では 4 段階の流量における注水中検層が実施された。これら検層の概要を表 3-17 に、各検層の結果を Appendix-2 にまとめた。主要な結果は以下の通りである。なお、SM-5 は坑口装置に重炭酸アンモニアのスケールが析出して坑内が閉塞していて、スケール除去を試みたが十分に除去できなかったため、検層を実施できなかった。

- SM-4 以外の坑井（SM-1、SM-2、SM-3）では 236～250℃程度の坑井周辺の岩体温度を観測した（ただし SM-2 の 236℃は注水停止後の値であるため、実際はこれより高いと考える）。一方、SM-4 では 224℃程度であった。
- 各坑井の静止時における水位以深の圧力プロファイルはほぼ同様であった。このことは、これら坑井の流出入口は同じ圧力系に支配されていることを示唆する。
- SM-4 の注水中検層の結果、注水流量と坑井内圧力の関係から、同坑井は大気圧で 600 m³/h 程度以上還元できると予想する。

表 3-16 1997 年以前に実施した検層の概要

坑井	種目	坑井状況	実施日	降下深度	水位, m	フラッシュ開始深度, m	坑口圧力, barA	最高温度	最高圧力
SM-1	PT	静止中	1997/5/5	3,700 m.asl	4,000 m.asl	-	26	248°C@3,700m.asl	55 barA@3,700m.asl
SM-2	PT	静止中	1997/5/2	3,650 m.asl	4,150 m.asl	-	18	243°C@3,650m.asl	57 barA@3,650m.asl
SM-2	PT	噴氣中	1997	1,250 m	-	1,000m付近	12	250°C@1,250m	60 barA@1,250m
SM-3	PT	静止中	1997/5/8	3,500 m.asl	4,300 m.asl	-	2	245°C@3,500m.asl	65 barA@3,500m.asl
SM-4	PT	静止中	1997/5/3	3,100 m.asl	4,250 m.asl 以浅	-	N/A	220°C@3,100m.asl	97 barA@3,100m.asl
SM-5	PT	静止中	1997/5/1	3,200 m.asl	4,300 m.asl	-	2	248°C@3,200m.asl	93 barA@3,200m.asl
SM-5	PT	噴氣中	1997	1,700 m	-	1,000m付近	12	250°C@1,700m	90 barA@1,700m
AP-1	T	静止中	1988/5/13, 1988/5/9	3,380 m.asl	N/A	-	N/A	245°C@3,380m.asl	-
AP-1	P	静止中	1988/4/11	3,630 m.asl	4,180 m.asl 以浅	-	N/A	-	55 barA@3,630m.asl

*降下深度、水位、フラッシュ開始深度、坑口圧力、最高温度、最高圧力は各検層結果図より読み取った値。

(出典: METI(2007) 平成19年度 地球環境・プラント活性化事業等調査 ポリビア・ラグナコロラダ地熱発電設備間接事業調査 報告書, 平成20年3月, p.45-50をもとに作成)

表 3-17 2012 年 12 月-2013 年 4 月に実施した検層の概要

坑井	種目	坑井状況	実施日	降下深度	水位, m	フラッシュ開始深度, m	坑口圧力, barA	最高温度	最高圧力	コメント(出典内の記述)
SM-1	PT	静止中	2012/12/5	984 m(降下不能)	870	-	30	242°C@984m	40 barA@984m	-
SM-1	PTS	噴氣中(2オリフィス)	2012/12/17	984 m(降下不能)	-	965	15	250°C@984m	40 barA@984m	-
SM-1	PTS	噴氣中(1オリフィス)	2012/12/21	981 m(降下不能)	-	981 m以深	15	250°C@981m	40 barA@981m	-
SM-1	PTS	噴氣中(6オリフィス)	2012/12/29	984 m(降下不能)	-	984 m以深	12	245°C@984m	38 barA@984m	-
SM-2	PT	静止中(注水停止後)	2013/3/3	1,105 m(降下不能)	630	-	14	236°C@910m	44 barA@1,105m	-
SM-2	PTS	噴氣中(2オリフィス)	2013/4/12	1,170 m(降下不能)	-	1,082	12	250°C@1,170m	46 barA@1,105m	-
SM-2	PTS	噴氣中(4オリフィス)	2013/4	1,260 m(降下不能)	-	1,034	15	250°C@1,260m	54 barA@1,260m	-
SM-2	PTS	噴氣中(6オリフィス)	2013/4/18	1,260 m(降下不能)	-	1,097	N/A	250°C@1,260m	51 barA@1,260m	-
SM-3	PT	静止中	2012/12/3	1,385 m(降下不能)	535	-	2	247°C@1,385m	70 barA@1,385m	-
SM-3	PTS	噴氣中(2オリフィス)	2013/1/28	1,385 m(降下不能)	-	1,000	12	247°C@1,385m	70 barA@1,385m	-
SM-3	PTS	噴氣中(4オリフィス)	2013/2/5	1,385 m(降下不能)	-	1,000	12	247°C@1,385m	68 barA@1,385m	-
SM-3	PTS	噴氣中(6オリフィス)	2013/2/12	1,376 m(降下不能)	-	1,000	11	247°C@1,376m	67 barA@1,376m	-
SM-3	PTS	噴氣中(8オリフィス)	2013/2/25	1,386 m(降下不能)	-	1,040	12	247°C@1,386m	64 barA@1,386m	-
SM-4	PT	静止中	2012/12/4	1,517.5 m(降下不能)	550	-	0	224°C@1,517.5m	84 barA@1,517.5m	-
SM-4	PTS	注水中(SM-3からの還元熱水; 2オリフィス)注水流量2.5t/h	2013/1/28	1,645 m(降下不能)	640	-	0	75°C@1,645m	97 barA@1,645m	注水流量と坑井内圧力の関係から、SM-4は大気圧で600m ³ /h程度以上還元できる予想する。
SM-4	PTS	注水中(SM-3からの還元熱水; 4オリフィス)注水流量9.5t/h	2013/2/3	1,645 m(降下不能)	500?	-	0	77°C@1,645m	106 barA@1,645m	
SM-4	PTS	注水中(SM-3からの還元熱水; 6オリフィス)注水流量142t/h	2013/2/13	1,645 m(降下不能)	550?	-	0	80°C@1,645m	108 barA@1,645m	
SM-4	PTS	注水中(SM-3からの還元熱水; 10オリフィス)注水流量182t/h	2013/2/17	1,645 m(降下不能)	450?	-	0	80°C@1,645m	108 barA@1,645m	

*降下深度、水位、フラッシュ開始深度、坑口圧力、最高温度、最高圧力は各検層結果図より読み取った値。

(出典: JICA(2015) ポリビア国ラグナ・コロラダ地熱発電所 建設推進プロジェクト 事業完了報告書, 平成26年12月, p.8/8をもとに作成)

(4) 噴気試験結果まとめ

噴気試験および検層から得られた結果を以下にまとめる。

(a) SM-1

- 最新の噴気試験（2012年12月-2013年1月）の結果、総生産流量および蒸気流量の最大値はそれぞれ約285 t/h、約50 t/hであった。また、噴気流体の比エンタルピの最大値は約1,150 kJ/kgであった。この結果は、SM-1で前回（約25年前）実施した噴気試験の結果と整合的であった。
- SM-1坑内では埋没等の問題は発生しておらず、生産能力は高い状態を維持できていると考える。
- 同試験結果を解析したところ、SM-1周辺のkhは100 darcy-mと非常に高い値が求められた。
- 最新の検層（2012年12月）の結果、SM-1周辺の岩体温度の最大値は242°Cを観測した。この値は、約25年前の観測値（250°C）と同程度であった。

(b) SM-2

- 最新の噴気試験（2013年4月）の結果、総生産流量および蒸気流量の最大値はそれぞれ約280 t/h、約54 t/hを示した。また、噴気流体の比エンタルピの最大値は約1,150 kJ/kgであった。この結果は、SM-2で前回（約15年前）実施した噴気試験の結果と整合的であった。
- 同試験結果を解析したところ、SM-2周辺のkhは100 darcy-mと非常に高い値が求められた。この値は、1997年の噴気試験等の結果から求めたkhと同じ値である。
- SM-2坑内では埋没等の問題は発生しておらず、生産能力は高い状態を維持できていると考える。
- 最新の検層（2013年3月）の結果、SM-2周辺の岩体温度の最大値は236°Cを観測した。ただし、この値は注水停止後の観測値であるため実際はこれより高いと考える。これを考慮すると、SM-2周辺の岩体温度は約15年前（243°C）と同程度であると考えられる。

(c) SM-3

- 最新の噴気試験（2013年1-2月）の結果、総生産流量および蒸気流量の最大値はそれぞれ約258 t/h、約43 t/hを示した。また、噴気流体の比エンタルピの最大値は約1,150 kJ/kgであった。
- SM-3坑内では埋没等の問題は発生しておらず、生産能力は高い状態を維持できていると考える。
- 同試験結果を解析したところ、SM-3周辺のkhは50 darcy-mと非常に高い値が求められた。
- 最新の検層（2012年12月）の結果、SM-3周辺の岩体温度の最大値は247°Cを観測した。この値は、約15年前の観測値（245°C）と同程度であった。

(d) SM-4

- 最新の検層（2012年12月）の結果、SM-4周辺の岩体温度の最大値は224°Cを観測した。この値は、SM-4以外の坑井周辺の岩体温度240～250°C程度と比べて低い。また、この値は約15年前の観測値（220°C）と同程度であった。
- SM-4周辺の温度だけ他坑井周辺と比べて低いことから、SM-4と他坑井とは水理的なつながりが非常に小さい可能性がある。

- 最新の注水中検層（2013年1-2月）の結果、注水流量と坑井内圧力の関係から、SM-4は大気圧で600 m³/h程度以上還元できると予想する。

(e) SM-5

- 1997年5-8月の噴気試験の結果、総生産流量および蒸気流量の最大値はそれぞれ約220 t/h、約35 t/hを示した。また、噴気流体の比エンタルピの最大値は約1,050 kJ/kgであった。
- ビルドアップ試験の結果、SM-5周辺のkhは130 darcy-mと非常に高い値が求められた。また、噴気試験等の結果からkhを求めた結果、20 darcy-mと高い値が求められた。
- 1997年5月の検層の結果、SM-5周辺の岩体温度の最大値は248°Cを観測した。

(f) AP-1

- 1987-1990年の噴気試験の結果、噴気流体の比エンタルピの最大値は、約1,400 kJ/kgであった。ただし、総生産流量の最大値は約30 t/hしかなかった。
- したがって、AP-1周辺の温度は高いものの、AP-1自身の生産能力は低い。
- 1997年5月の検層の結果、AP-1周辺の岩体温度の最大値は245°Cを観測した。

(g) 各坑井間の干渉

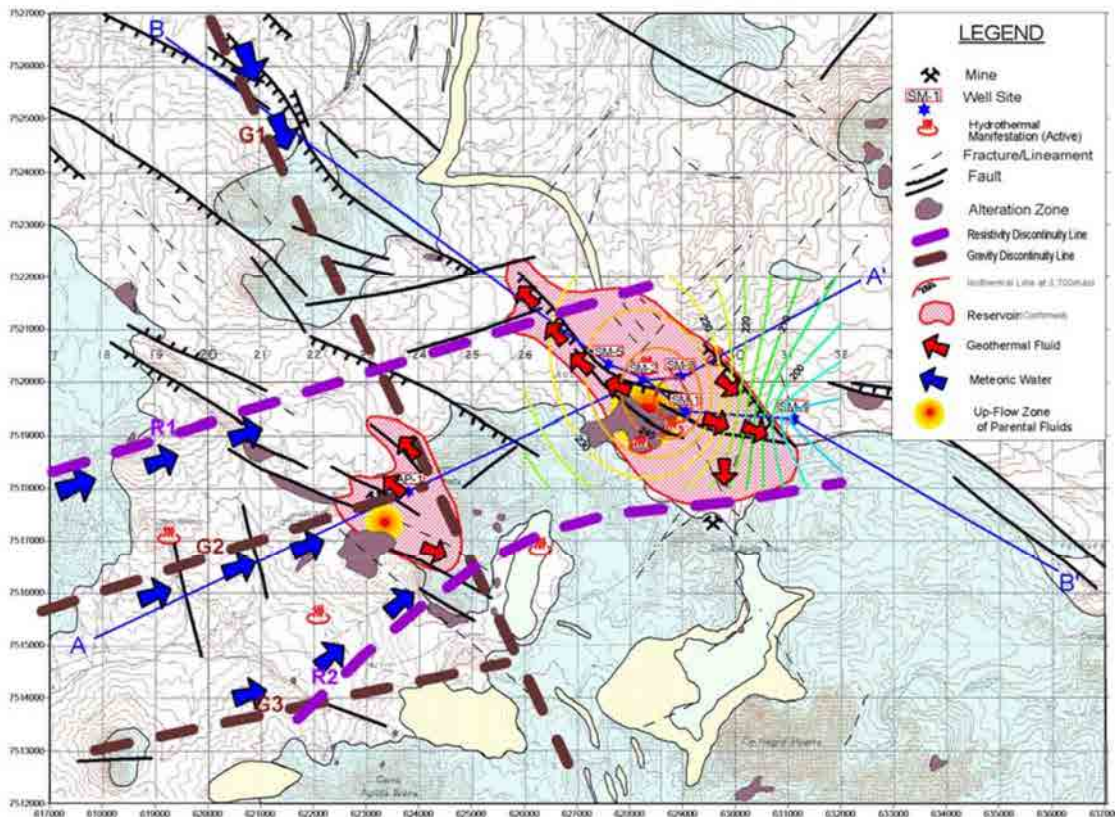
- JICA(2013)では噴気試験中に実施した圧力測定の結果から、SM-1、SM-2、SM-3各坑井間の干渉は小さいと判断している。
- ただし、2013年4月の測定結果をみると、SM-2噴気試験開始に伴いSM-1坑井内圧力が低下傾向にあるように見える。このことから、SM-1とSM-2は干渉していることが懸念される。

3.2 地熱概念モデル・掘削ターゲットの妥当性

3.2.1 地熱概念モデルの検証

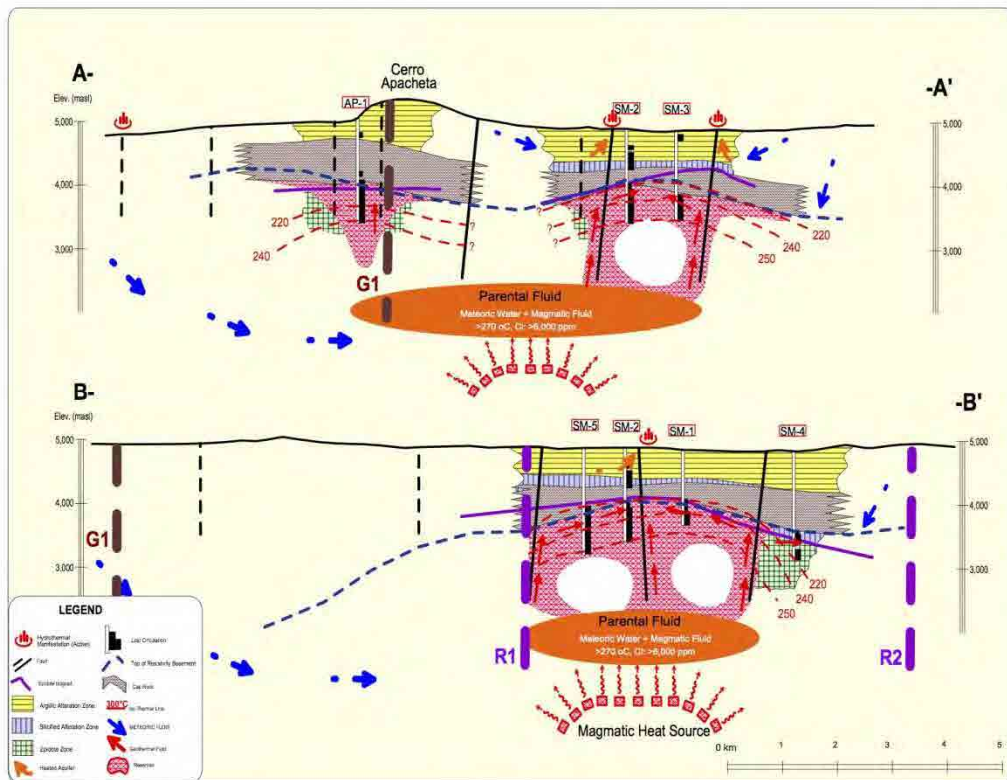
掘削ターゲットの妥当性を評価するにあたり、ターゲット選定の前提となる地熱系概念モデルの検証を行った。検証を行うモデルはJETRO (2008)により提唱されているものである。また、検証にあたり、JICA (2010, 2013)の内容も引用した。検証対象のモデルを図 3-21 (平面図)および図 3-22 (断面図)に、また水理地化学モデルを図 3-23 示す。

モデルの三つの構成要素である地熱貯留層構造、熱源、地熱流体の項目ごとにモデル(一つの解釈結果)の検証を行った。検証では、妥当と判断される解釈の項目を整理するとともに、引用文献から読み取れる情報を抽出した。検証の結果を表 3-18 にまとめる。



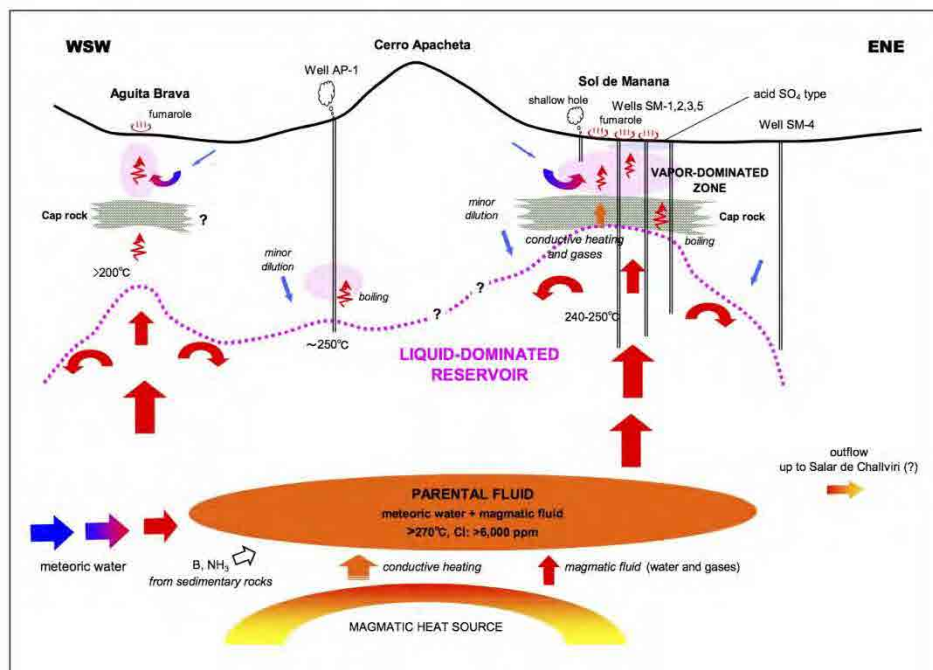
出典: JICA (2010)

図 3-21 ラグナ・コロラダ地熱地域の地熱系概念モデル (平面図)



出典: JICA(2010)

図 3-22 ラグナ・コロラダ地熱地域の地熱系概念モデル (断面図)



出典: JICA (2010)

図 3-23 ラグナ・コロラダ地熱地域の水理地化学モデル

表 3-18 ラグナ・コロラダ地域 地熱系概念モデル検証結果

構成要素	要素細分	機能	妥当と判断される既存の考え方	資料から読み取る追加情報
1. 地熱貯留層構造	断層分布	地熱流体の流動範囲を規制する。	(1) 見かけ比抵抗分布から、地熱貯留層(開発有望地域)は比抵抗不連続線R1とR2で囲まれる領域、すなわちソルデマニヤ地域とアパチェタ山西麓地域にかかる範囲に限定される。 (2) 見かけ比抵抗分布から、ソルデマニヤ地域とアパチェタ山西麓地域それぞれに独立した地熱貯留層が存在する。 (3) 断層、熱水変質鉱物分布、低見かけ比抵抗分布、坑井地質情報に基づくと、ソルデマニヤ地域とアパチェタ山西麓地域それぞれにおいて、WNW-ESE系の断層が地熱流体の流動・分布を規制している。 (4) 坑井SM-1とSM-4の間にNW-SE系断層による水理的な遮へい構造が存在する。 (5) NE-SW系断層は西傾斜の正断層である。	(1) ソルデマニヤ地域にはWNW-ESE系の断層が密に三条分布することから、高透水性断層の発達を期待できる。 (2) WNW-ESE系断層は南西傾斜の正断層であることから、南西へ傾斜する坑跡の場合、断層に遭遇するために十分な偏距を設定する必要がある。ただし、断層傾斜角の情報が不足している(モデル図では垂直に近い傾斜であるが根拠が不明である)。 (3) 比抵抗構造は電気探査法(シュランベルジャー法)によっている。測線長は1000 mと読み取れることから、可探深度は比較的浅いと考えられる。後に実施された電磁探査(MT探査)による比抵抗構造と差が生じる可能性がある。 (4) 上のほか、NE-SW系断層(リニアメント)も地熱系の構成要素と指摘されているが、その分布域は貯留層の分布域から外れており、現時点で重要度は低いと考えられる。
	キャップロックおよび貯留層の深度分布	地熱流体の流動範囲(深さ方向)を規制する。	(1) 見かけ比抵抗分布から、ソルデマニヤ地域とアパチェタ山西麓地域それぞれに独立したキャップロックが存在する。 (2) 熱水変質鉱物(粘土化帯・珪化帯)、逸水、コアロスの分布から、深度800 m付近までは透水性が低く、キャップロックと見なすことができる。 (3) 深度900 mから1000 mより深部では透水性が高く貯留層といえる。	(1) 坑井地質情報を見ると逸水掘進の区間が長い可能性があり、このため逸水が生じた断裂(蒸気生産を担う断裂)の分布深度が特定されていない可能性がある。
	地下温度分布	高温の地熱流体の分布範囲を反映する。	(1) 坑井内温度検層による実測値から、SM-4を除いて、貯留層温度は240℃から250℃と考えられる。 (2) 貯留層深部の熱水変質鉱物(ワライカイト、緑簾石、緑泥石)分布からも200℃以上の貯留層温度が推定できる。	(1) 既存坑井はWNW-ESE系の断層に沿って掘削されており、この断層から東西に離れた地点の地下温度は不明である。また、ソルデマニヤ地域とアパチェタ山西麓地域の貯留層が連続していないこと、両地域間に地熱微候が分布しないことから、断層から離れるにつれ、地下温度が急激に低下することが想定可能である。事前に確かめることは不可能であるが、掘削の成功に深く関与する事項である。
2. 熱源	—	地熱系へ熱を供給する。	(1) 当地域の熱源は第四期火山活動に伴う地下深部のマグマ溜まりを想定する。当地域内の最も若い火山岩としてセロアパチェタ丘の安山岩(35万年～50万年前)が分布する。また、本地域周辺の活発な火山としてセロデスリンデ、セロボルカン、セロスデルタチオ、ボルカントチオからなるアンデス西側山脈があり、これらの火山活動を支えるマグマ溜まりからの広域の熱供給が想定できる。	特記事項なし
3. 地熱流体	地熱流体起源水	貯留層を涵養する。	(1) 本地域の地熱流体の起源の主体は天水であり、西方および北西方の高地から供給されている。	特記事項なし
	流体流動	地熱流体の加熱と流動経路を反映する。	(1) 地表から地下深部に浸透した天水は東方または南東方に向かって流動し、マグマからの熱によって加熱される。 (2) 同時に天水は、マグマ水(安山岩水)およびマグマ性ガスを取り込みつつ、周辺の岩石と反応し、中性のC1型熱水と変化する。ここで熱水は250℃以上まで加熱される。 (3) 地熱流体はWNW-ESE断層に沿って流動することで、北西方に分布する。この地熱流体の主な上昇域はソルデマニヤ地域のSM-1周辺とアパチェタ山西麓地域のAP-1周辺に想定できる。ただし、SM-1からMS-4の間には地熱流体の流動を妨げるバリア(NW系断層)が分布する。 (4) 地熱流体は流動過程において天水(地下水)による希釈を幾分か受ける。また、地熱流体は熱水変質作用を引き起こし、キャップロックとして機能する粘土化帯を形成する。 (5) 地表に湧出する地熱流体によって温泉、噴気、地表変質帯が形成される。	特記事項なし

出典：調査団作成

(1) 地熱貯留層構造

地熱貯留層構造は、地表地質、断層/リニアメント分布、熱水変質鉱物分布、地熱微候分布、坑井地質情報、見かけ比抵抗分布を組み合わせて解釈されている。その解釈結果に基づいて、掘削ターゲットとなる断層分布、キャップロック・地熱貯留層の深度分布、地下温度分布が推定されており、その結果はおおむね妥当と判断する。モデルから抽出されるターゲット選定に有効な条件は以下のとおりである（表 3-18 も参照のこと）。

- ソル・デ・マニャーナ地域とアパचेタ山西麓地域それぞれにおいて、WNW-ESE 系の断層が地熱流体の流動・分布を規制している。
- 坑井 SM-1 と SM-4 の間に NW-SE 系断層による水理的な遮へい構造が存在する。
- 深度 800 m 付近までは透水性が低く、キャップロックと見なすことができる。深度 900 m から 1000 m より深部では透水性が高い地熱貯留層といえる。
- 坑井内温度検層による実測値から、SM-4 を除いて、坑井周辺の岩体温度は 240℃ から 250℃ と考えられる。SM-4 周辺の岩体温度は約 220℃ と相対的に低い。

上記の各項目に加え、資料から以下の項目を追加情報として抽出した。

- ソル・デ・マニャーナ地域には WNW-ESE 系の断層が密に三条分布することから、地下に高透水性の断裂分布が期待できる。
- WNW-ESE 系断層は西傾斜の正断層であることから、現計画での坑口位置からでは、坑井は断層面を追うように掘削することになり、断層面に遭遇できない可能性がある。このため、断層に遭遇するためには、断層の傾斜角を考慮して十分な偏距を設定する必要がある。モデル図では垂直に近い傾斜が示されるが、この根拠は不明なため、計画坑跡に不確実性が残る。
- 坑井地質情報を見ると逸水掘進の区間が長い可能性があり、このため蒸気を生産する断裂の分布深度の推定精度が低い可能性がある。この精査には、既存調査井の掘削時の逸泥等の記録が ENDE に保存されていれば、参考にすることは可能である。また、データが得られない場合、既存調査井を利用した PTS 検層の実施が考えられる。
- 既存坑井は WNW-ESE 系の断層に沿って掘削されており、この断層から東西に離れた地点の地下温度は不明である。また、ソル・デ・マニャーナ地域とアパचेタ山西麓地域の地熱貯留層が連続していないこと、両地域間に地熱微候が分布しないことから、断層から離れるにつれ、地下温度が急激に低下することが想定可能である。リスクを回避するには断層に近い範囲でターゲットを設定することになるが、このとき坑井間距離が短くなることで、生産干渉の発生が懸念される。
- 地熱貯留層構造の推定根拠の一つは電気探査(シュランベルジャー法)による比抵抗構造である。この探査での測線長は 1000 m と読み取れることから、可探深度は比較的浅く、地熱貯留層深度の推定精度はそれほど高くはないと考えられる。ターゲット選定時には、電磁探査(MT 探査)の解釈結果と比較検討することが必要となる。

(2) 熱源

熱源の分布は第四紀火山活動の特徴をまとめることにより妥当な推定がなされている。すなわち、当地域内の最も若い火山岩としてセロアパचेタ丘の安山岩(35 万年～50 万年前)が分布し、本地域周辺にはセロデスリンデ、セロボルカン、セロスデルタチオ、ボルカントチオといった活発なアンデス西側山脈が分布する。これらの火山活動を支えるマグマ溜まりからの広域な熱供給が想定できる。

(3) 地熱流体

地熱流体は地熱貯留層から熱を運搬する媒体であり、その起源と地下での賦存状態について、前述の地熱貯留層構造および熱源との関連例をもって考察を行う必要がある。既存の地熱系概念モデルでは、地熱貯留層を涵養する起源流体としての天水の役割と、それが地下深部に浸透し、加熱され、再び地表へ湧出する対流過程について妥当な推定が為されている。掘削ターゲットは地熱流体が流動する可能性が高い範囲に設定されるため、そのような範囲が持つべき条件を地熱系概念モデルから抽出すると以下ようになる。

- 地熱流体の主な上昇域はソル・デ・マニャーナ地域の SM-1 周辺とアパチュタ山西麓地域の AP-1 周辺に想定できる。
- 地熱流体は WNW-ESE 断層に沿って北西方および南東方に流動・分布する。このうち、北西方への流れがより高温を保っており、生産井のターゲットとして有効と考えられる。
- SM-1 から SM-4 の間には地熱流体の流動を妨げるバリア(NW 系断層)が分布する。

3.2.2 既存調査のレビュー結果の統合解釈

既存調査結果のレビュー内容を統合し、地熱系概念モデルの再検討を行った。地形判読、調査井結果、重力探査結果（ENDE,1986）及び MT 探査結果（CGG,2013）から断層位置を推定した。図 3-24 では、推定された断層分布と地熱貯留層の広がりを示している。図 3-25 には地熱系概念モデルの断面図を示す。なお、断面図の位置は図 3-24 平面図に表示している。

本調査では、CGG（2013）による MT 法 3 次元比抵抗構造解析結果をもとに、地熱貯留層構造の詳細な解釈を行った。主な解析の成果として、地熱貯留層を規制する断層やキャップロック・地熱貯留層の深度分布をより明確に推定することができた。

本調査での解釈結果と JETRO（2008）報告書にて提唱された地熱系概念モデル（3.2.1 参照）を比較すると、地熱貯留層構造、熱源、地熱流体の基本的な考え方には、大きな乖離は見られない。従って、既存の地熱系概念モデルに基づく、現在の新規坑井掘削の方針（掘削ターゲットの範囲）は概ね妥当と判断できる。

既存のデータおよび MT 法 3 次元データ比抵抗構造を統合して得られた解析結果の詳細を以下にまとめる。

(1) 地熱貯留層構造

(a) 断層系

- プロジェクト地域全域において、WNW-ESE 系の断層が卓越しており、また、これを切るように NE-SW 系の断層が発達している。これらの断層系が地熱貯留層を規制していると想定される。
- 地表に現れた段差、MT 法 3 次元探査結果、既存調査井の地質から推定される落差から、WNW-ESE 系の断層の多くは正断層と推定される。この内、掘削ターゲットとなる WNW-ESE 断層は 既存井戸（SM-1, SM2, SM-5）の西側に分布し、SW 側に傾斜すると予想される。
- プロジェクト地域に発達する断層系は急傾斜と推定されているが、露頭や既存調査井で確認できていないため、断層の性状や傾斜角は不明である。

- 坑井内温度検層による実測値から、SM-4 を除いて、坑井周辺の岩体温度は 240℃から 250℃と考えられる。SM-4 周辺の岩体温度は約 220℃と相対的に低い。このことから、SM-1 と SM-4 の間に存在する WNW-ESE 系断層が、地熱貯留層の東方への広がり規制していると推定される。

(b) キャップロック

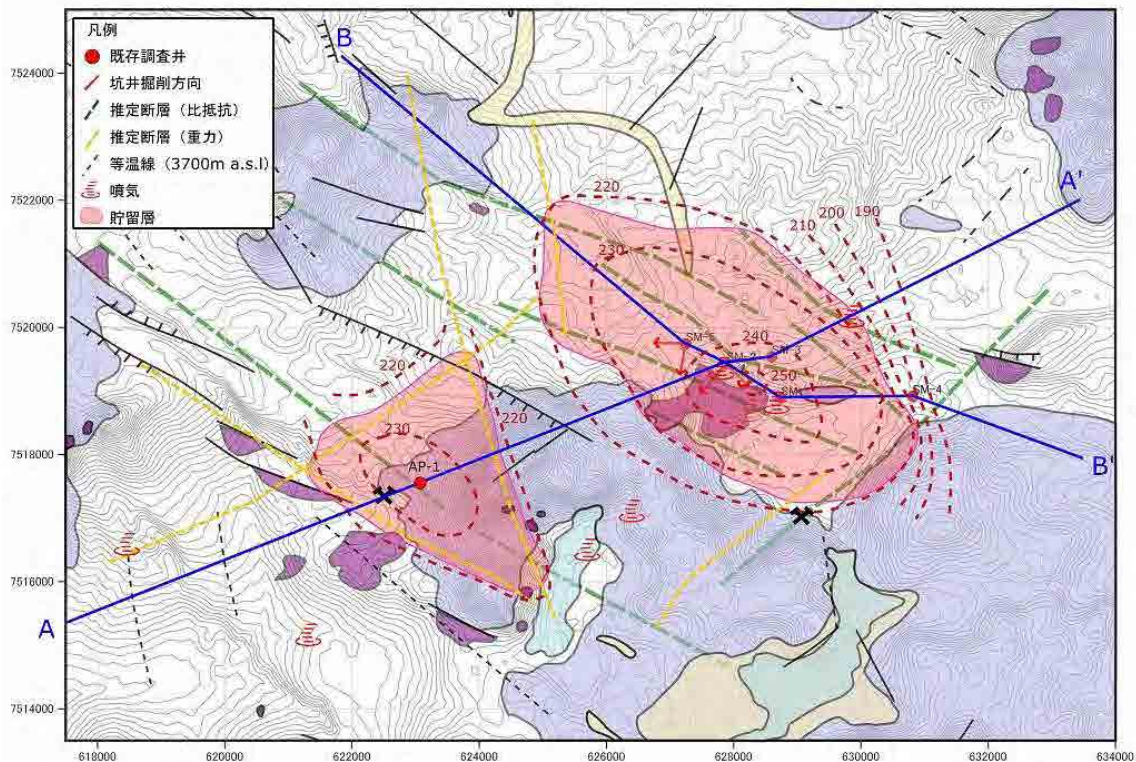
- 調査井で確認された粘土化帯～一部珪化帯は、既存の調査井で透水性が低く、キャップロックを形成すると想定される。このキャップロックの分布は、MT 法 3 次元解析結果における約 10Ω m 以下の低比抵抗帯に相当する。
- 低比抵抗帯分布および調査結果から、深度 800 m 付近までは透水性が低く、キャップロックと見なすことができる。深度 900 m から 1000 m より深部では透水性が高い地熱貯留層といえる。

(2) 熱源

- 既存レポートの地質情報から、当地域内の最も若い火山岩としてセロアパचेタ丘の安山岩(35 万年～50 万年前)が分布し、本地域周辺にはセロデスリンデ、セロボルカン、セロスデルタチオ、ボルカントチオといった活発なアンデス西側山脈が分布する。これらの火山活動を支えるマグマ溜まりからの広域な熱供給が想定される。

(3) 地熱流体

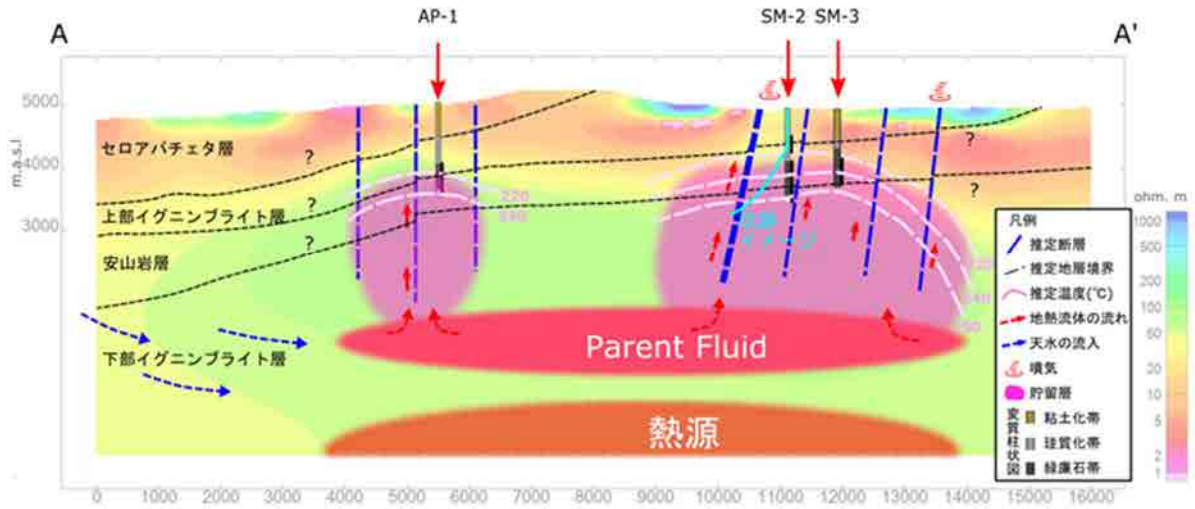
- 熱水の既存の地化学分析結果から、地熱流体の起源は主として天水であり、堆積岩類の存在が想定される 1700m 以深まで浸透・循環し、地熱流体の主な上昇域はソル・デ・マニャーナ地域の SM-1 周辺とアパचेタ山西麓地域の AP-1 周辺で、断層に沿って上昇していると想定できる。



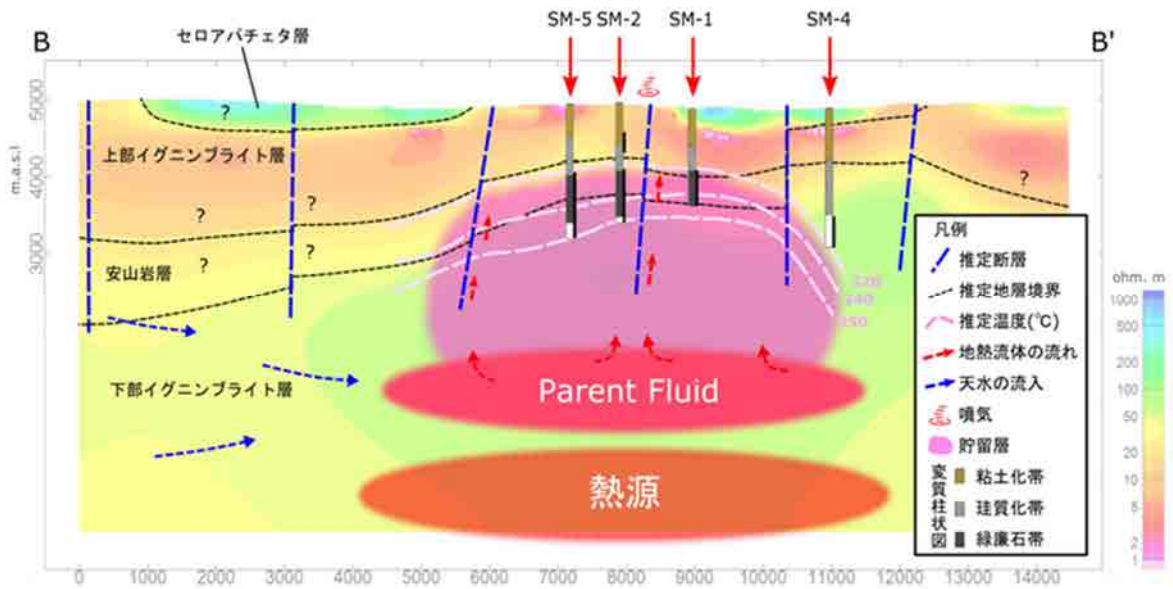
CGG (2013)に調査団加筆

図 3-24 レビュー結果から推定された断層分布 (平面図)

1) A-A' 断面



2) B-B' 断面



CGG (2013)をもとに調査団作成
図 3-25 レビュー結果を統合した地熱系概念モデル (断面図)

3.2.3 掘削仕様に係る情報整理

(1) 掘削リグ等機材

(a) 掘削リグのエンジン性能

既存調査井掘削時に使用したリグの動力は 950HP であり、3000m 級と呼ばれるリグである。調査井の掘削深度は、1170~1700m 程度、また、垂直井であった。

しかしながら、新規生産井のための掘削リグは 1500HP を推奨する。

- 一般にエンジンの性能は、1000 HP では 3000 m class, 1500 HP では 4000 m class とされ、平地であれば、1000 HP で掘削可能と考えられるが、プロジェクト地点は、約 5000 m の高標高部に位置し、機械効率の低下が懸念される。ボリビア国の現地の掘削業者へインタビュー調査を実施したところ、標高 4000m 以上の地域での掘削経験がある業者が数社あり、各社とも 30～40 パーセントのパワーダウンを考慮すべきとの回答があった。また、このような高所の作業では、燃料消費量も 30～40 パーセント増加したとの回答があり、本プロジェクト地域でも、機械効率の低下が考えられる。
- 本プロジェクトでは、2000 m 以上の坑井掘削を計画しており、さらに、傾斜掘削を行う必要がある。このことから、大きなエンジンを搭載した掘削リグが必要と考えられる。

(b) 機材選考の留意点

機械を高地で使用するに当たっての留意点は以下が考えられる。

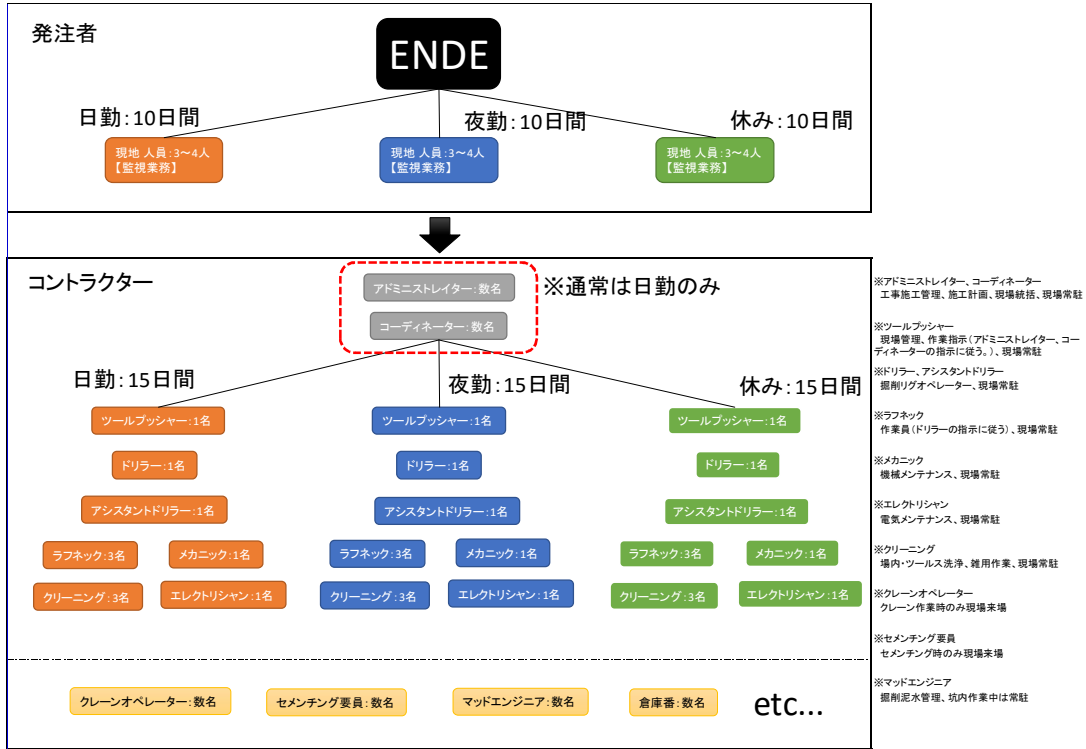
- エンジンの能力が 30-40%ダウンすることを考慮し、発電機やポンプの能力も同程度低減すると想定される。
- 全ての機材は寒冷地仕様のもとする。特に 6 月～9 月の冬季の低温においても問題なく稼動するものとする必要がある。
- ポンプや配管関係の凍結を防ぐ必要がある。特に坑井掘削のための水井戸からの給水は、水抜きバルブや電熱線を施す等の処置が必要となる。

(2) 掘削時のサイトの人員体制

本プロジェクト地域は、標高が高く、冬期間は気温が氷点下 20℃程度まで冷え込こともあり、掘削工事を実施する上で非常に過酷な環境であるといえる。このため、掘削クルーの人員体制、体調管理には十分な配慮をする必要がある。調査井掘削時にどのような人員体制で工事を推進していたのかについて、現地調査時に情報収集を実施した。調査井掘削時の人員体制を図 3-26 に示す。

発注者側は、3-4 人の監督員が 1 班として、3 班を 10 日シフトの 2 交代制、コントラクター側は管理をする数名の（Administrator/Coordinator）の下、11 名程度で 15 日シフトの 2 交代制を採用していた。

現地作業を実施する上では、ENDE、コンサルタント、およびコントラクターの協力の下、安全体制を確保する必要がある。2015 年 3 月の ENDE とミーティング上で、ENDE からプロジェクトサイト近傍にある空港の整備を行う旨の発言があった。プロジェクトサイトは過酷な環境にあり、町から離れているため、緊急の場合の搬送に、空港は非常に有効と考えられる。



出典：調査団作成

図 3-26 調査井掘削時の人員体制

(3) 計画工程（案）の検討

坑井掘削は地質の状況（地層の硬さや逸泥の状況）、気候、標高等により工期が変動する。このため、掘削工事において工程の計画を立てる際にはその地域の地質状況及び気候条件、作業環境等を加味する必要がある。本項目では、過去に掘削された調査井の掘削レポートの分析や現地調査での情報収集結果から新規掘削井の工程を予想し、本プロジェクトで現在計画されている坑井掘削工程を検討した。

(a) 予想掘削日数の算出

本プロジェクトで掘削予定の新規坑井は、過去に掘削した調査井の近傍であり、その地質状況や気候条件を参考にすることでより現実に近い計画工程を予想できると考える。調査井の掘削レポートよりデータを抽出し、各坑井、各段毎の掘進率から1m掘削するのに要した日数を算出し、これらの数値の各段毎の平均値を算出した。1m掘削するのに要した日数一覧表を表 3-19 に示す。この平均値から現在計画されている掘削仕様でどのくらい掘削日数を要するかを求めた。この結果、生産井の掘削が現在の計画工程 90 日に対し 92 日程度、還元井の掘削が計画工程 60 日に対し 71 日程度となった。生産井・還元井掘削時の計画掘削仕様及び予想掘削日数表を表 3-20 に示す。

表 3-19 調査井掘削時に 1m 掘削するのに要した日数一覧表

Item	Well name	SM-1	SM-2	SM-3	SM-4	SM-5
Depth		1178.5m	1486.5m	1406.0m	1726.2m ※1474.0~1726.0m Additional drilling	1705.0m
Period ※Does not contain Rig mobilization		70 days (Sep. 8, 1988 ~ Nov. 15, 1988)	61 days (Dec. 19, 1988 ~ Feb. 17, 1989)	72 days (Apr. 21, 1989 ~ Oct. 5, 1989) ※95 days (Jun. 16, 1989 ~ Sep. 19, 1989) Holiday Engineering	※Total 72 days 53 days (Nov. 1, 1989 ~ Dec. 24, 1989) 19 days (Nov. 28, 1991 ~ Dec. 16, 1991)	89 days (Apr. 3, 1992 ~ Nov. 8, 1992) ※131 days (Jun. 1, 1992 ~ Oct. 9, 1992) Holiday Engineering
1st Section	Well diameter	24"				26"
	Drilling section	0.0 ~ 75.0m ※75.0m	0.0 ~ 72.0m ※72.0m	0.0 ~ 63.0m ※63.0m	0.0 ~ 61.0m ※61.0m	0.0 ~ 70.0m ※70.0m
	Casing size (Conductor)	20"				
	Casing section	0.0 ~ 69.0m ※69.0m	0.0 ~ 69.5m ※69.5m	0.0 ~ 58.0m ※58.0m	0.0 ~ 59.9m ※59.9m	0.0 ~ 69.85m ※69.85m
	Period	13 days (Sep. 8, 1988 ~ Sep. 20, 1988)	10 days (Dec. 19, 1988 ~ Dec. 28, 1988)	14 days (Apr. 21, 1989 ~ May. 4, 1989)	6 days (Nov. 1, 1989 ~ Nov. 6, 1989)	10 days (Apr. 3, 1992 ~ Apr. 12, 1992)
	day/m	0.173 day/m	0.139 day/m	0.222 day/m	0.098 day/m	0.143 day/m
	Average	0.155 day/m				
2nd Section	Well diameter	17-1/2"				
	Drilling section (m)	75.0 ~ 307.0m ※232.0m	72.0 ~ 310.5m ※238.5m	63.0 ~ 305.0m ※242.0m	61.0 ~ 301.0m ※240.0m	70.0 ~ 300.0m ※230.0m
	Casing size (Surface)	13-3/8"				
	Casing section (m)	0.0 ~ 302.7m ※302.7m	0.0 ~ 308.0m ※308.0m	0.0 ~ 298.0m ※298.0m	0.0 ~ 297.2m ※297.2m	0.0 ~ 295.0m ※295.0m
	Period	15 days (Sep. 21, 1988 ~ Oct. 5, 1988)	17 days (Dec. 29, 1988 ~ Jan. 14, 1989)	17 days (May. 5, 1989 ~ May. 21, 1989)	11 days (Nov. 7, 1989 ~ Nov. 17, 1989)	14 days (Apr. 13, 1992 ~ Apr. 26, 1992)
	day/m	0.065 day/m	0.071 day/m	0.070 day/m	0.046 day/m	0.061 day/m
	Average	0.063 day/m				
3rd Section	Well diameter	12-1/4"				
	Drilling section (m)	307.0 ~ 762.0m ※455.0m	310.5 ~ 617.0m ※306.5m	305.0 ~ 736.0m ※431.0m	301.0 ~ 687.0m ※386.0m	300.0 ~ 900.0m ※600.0m
	Casing size (Production)	9-5/8"				
	Casing section (m)	0.0 ~ 738.0m ※738.0m	0.0 ~ 606.0m ※606.0m	0.0 ~ 731.0m ※731.0m	0.0 ~ 297.2m ※681.3m	0.0 ~ 878.3m ※878.3m
	Period	27 days (Oct. 5, 1988 ~ Oct. 31, 1988)	14 days (Jan. 15, 1989 ~ Jan. 28, 1989)	25 days (May. 22, 1989 ~ Jun. 15, 1989)	13 days (Nov. 18, 1989 ~ Nov. 30, 1989)	41 days (Apr. 27, 1992 ~ Oct. 15, 1992)
	day/m	0.059 day/m	0.046 day/m	0.058 day/m	0.034 day/m	0.068 day/m
	Average	0.053 day/m				
4th Section	Well diameter	8-1/2"				
	Drilling section (m)	762.0 ~ 1178.5m ※416.5m	617.0 ~ 1486.5m ※869.5m	736.0 ~ 1406.0m ※670.0m	687.0 ~ 1726.2m ※1039.2m	900.0 ~ 1705.0m ※805.0m
	Casing size (Slotted Liner)	-	-	-	7" ※Slotted Pipe	-
	Casing section (m)	-	-	-	672.0 ~ 1724.0m ※1052.0m	-
	Period	15 days (Nov. 1, 1988 ~ Nov. 15, 1988)	20 days (Jan. 29, 1989 ~ Feb. 17, 1989)	16 days (Sep. 20, 1989 ~ Oct. 5, 1989)	42 days (Dec. 1, 1989 ~ Dec. 23, 1989) (Nov. 28, 1991 ~ Dec. 16, 1991)	24 days (Oct. 16, 1992 ~ Dec. 8, 1992)
	day/m	0.036 day/m	0.023 day/m	0.024 day/m	0.040 day/m	0.030 day/m
	Average	0.031 day/m				

出典：調査団作成

表 3-20 生産井・還元井の計画掘削仕様および予想掘削日数表

	生産井		還元井	
		予想日数		予想日数
第1段掘削深度	35m(区間:0~35m)	5.4日	35m(区間:0~35m)	5.4日
※20" Conductor CSG設置深度	※0~30m		※0~30m	
第2段掘削深度	370m(区間35~405m)	23.3日	270m(区間35~305m)	17.0日
※13-3/8" Surface CSG設置深度	※0~400m		※0~300m	
第3段掘削深度	600m(区間405~1005m)	31.8日	500m(区間305~805m)	26.5日
※9-5/8" Production CSG設置深度	※0~1000m		※0~800m	
第4段掘削深度	1000m(区間1005~2005m)	31.0日	700m(区間805~1505m)	21.7日
※7" Slotted Liner CSG設置深度	※950~2000m		※750~1500m	
掘削深度	2005m	92日	1505m	71日

出典：調査団作成

(b) 坑井掘削計画

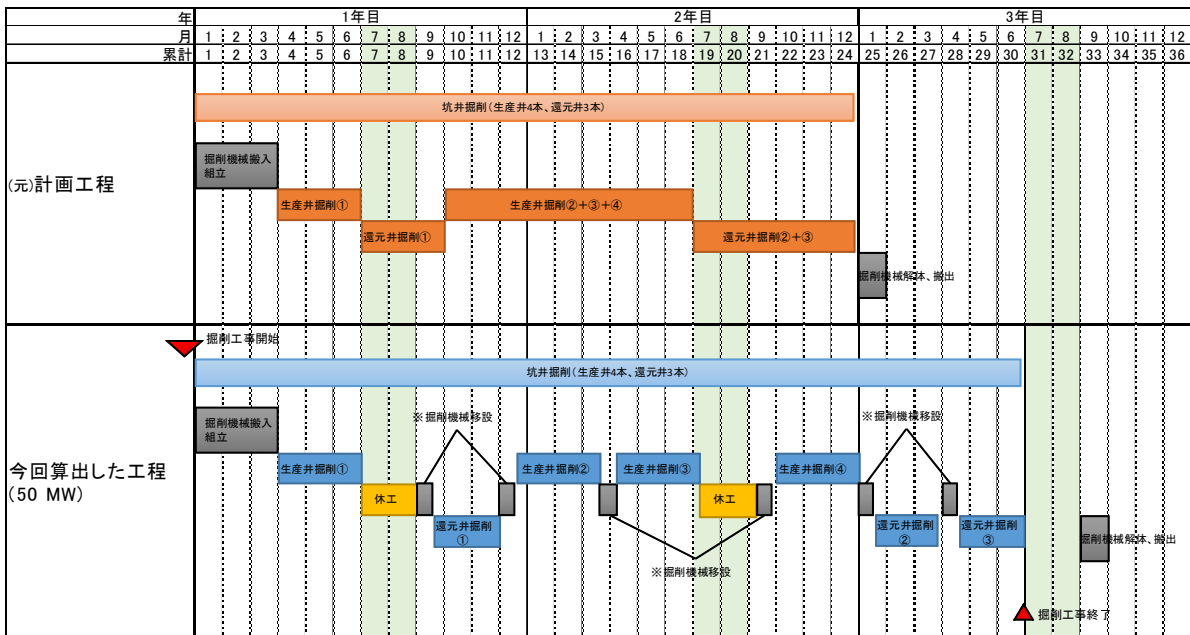
本事業第一段階第一期における坑井掘削計画の算出に当たり、以下を考慮した。

- 調査井掘削当時は冬期間の6月～10月は休工となっていた。これは、気温の低下によるマシントラブルや掘削用水の凍結等により、掘削が困難であったためと考えられる。このため、もっとも気温の低い7月～8月に2ヶ月間の休工期間を設けた。
- 各坑井の掘削毎に掘削機械の移設作業が発生することも考慮し、掘削機械の移設期間を20日間程度と設定した。
- 新規坑井掘削は既存調査井掘削時と同程度の掘進率とする。前項の試算結果から、掘削予想日数は、生産井92日、還元井71日とした。

この結果、現在の計画工程では24ヶ月での掘削終了を予定しているが、今回算出した工程では30ヶ月を要する結果となった。既存の計画工程と本調査で算出した工程との比較工程表を表3-21に示す。

算出した予想掘削日数は、30年以上前の掘削技術で掘削したデータを元に算出したものであるため、現在の掘削技術や、より高いスペックの掘削リグを使用した場合は、より少ない工期で工事を完遂できる可能性は十分にあると思われる。しかしながら、新規坑井では傾斜掘削を計画しており、キック・オフ・ポイント（KOP）の深度、傾斜角度、地質状況により工程が変動すると考えられる。また、既存調査井より深い深度の地質状況は良くわかっておらず、地質状況によっては逸泥対策の回数増加により、坑井掘削の日数が増える可能性もある。さらに、掘削計画工程の精度を上げるためには、掘削ターゲット選定を行った上で、詳細な坑井仕様を決定し、再度計画工程計画を立案する必要がある。

表 3-21 計画工程と本調査で算出した工程との比較



出典：調査団作成

(4) 既存水井戸の補修・追加掘削の必要性検討

本プロジェクト地域内では、第一次現地調査によって、2つの水井戸(PP-1 および PP-2)の存在が確認された。ENDE からの聞き取りによると、PP-1 井は現在取水がなく、PP-2 井は 2011 年 5 月の時点で 7L/sec の取水量が確認されている。本地域内の水井戸の状況まとめを表 3-22 に示す。

現在の取水量では、新規坑井掘削を実施にするにあたり、貯水待機等による掘削工程の遅延が懸念される。また、掘削中に大容量の逸泥が発生した場合に、掘削困難に陥るだけでなく、最悪の場合掘削編成がスタックされる危険がある。このため、本プロジェクトにおける水井戸の補修及び追加掘削は必要であると判断する。なお、貯水待機無しで掘削工事を進める為には、1本ずつ掘削を進める場合、40L/sec の水の供給が必要であると考え。仮に掘削工期短縮の為に2本同時掘削を実施する場合は、2倍の 80L/sec の水の供給が必要となる。

表 3-22 既存水井戸の状況

井戸名	PP-1	PP-2
坑底深度	130m	150m
水位	100m 以深	88.15m
掘削年	不明	1987 年
取水量	無し	7L/sec
備考	1994 年頃までは取水可能であったが、2010 年に取水テストを実施したところ、取水不能となっていることが確認された。	2011 年 5 月に SM-4 の還元テストを実施する際に取水量を測定したところ、7L/sec であった。現在も使用可能

出典：調査団作成

第4章 掘削業務形態の検討

4.1 支払形態

4.1.1 工事数量精算方式とランプサム方式の特徴

工事契約における支払方式は、一般的に、(1)工事数量精算方式（再計測方式）、(2)ランプサム方式、(3)コストプラスフィー方式（実費払い方式）に分類される。「コストプラスフィー方式」は先進国における公共工事で採用されることがあるが、開発援助案件では採用されていないことから、本調査においては、(1)工事数量精算方式と(2)ランプサム方式に絞り込んで検討を行う。これら方式の特徴は概ね以下のとおり整理される。

表 4-1 工事数量精算方式とランプサム方式の特徴

支払方式	JICA 事業における代表的な契約約款	設計者	工事数量リスク
工事数量精算	<ul style="list-style-type: none"> ・ FIDIC Red Book ・ JICA Works 契約（FIDIC MDB 調和化版 / FIDIC Pink Book） ・ JICA Small Works 契約 	発注者	発注者
ランプサム	<ul style="list-style-type: none"> ・ JICA Plant 契約（ENAA フォーム） ・ FIDIC Yellow Book ・ FIDIC Silver Book 	請負者 （デザインビルド）	請負者

出典：調査団作成

掘削工事における工事数量精算方式は、更に「掘削時間に基づく精算（daily/hourly）」と「掘削延長に基づく精算（footage）」に分類することができる。掘削作業時間は工事实施のための資源（リソース）であり純粋な工事数量ではないが、本検討では工事数量精算方式の一類型と見なすこととする。

デザインビルド契約では、発注者は入札時に工事数量を見積もることはできないため、必然的にランプサム支払となる。翻れば、発注者が設計する場合は工事数量精算とすることが最も合理的である。本プロジェクトの掘削工事は、デザインビルド方式を採らず、坑路、掘削径、ケーシング配置等の技術的要件は全て発注者が指定することが想定されている。

ランプサム方式は、契約金額の変動が工事数量精算方式と比べ抑制されるため、建設中に予見不可能事象が発生する可能性が小さい案件に適していると考えられる。予見不可能事象の発生は工事進捗に悪影響を及ぼし工事費用の上昇をもたらすが、契約金額が固定的である場合に入札者はこのリスクを入札金額に含めるため、入札金額は工事数量精算の場合に比べ高く提案される。

地熱井掘削は、地質に関わる予見不可能事象の発生可能性が非常に高い工事の典型と考えられる。掘削作業の進捗を支配する主な要素としては岩盤の硬度や地質状況が挙げられるが、この他に著しい影響を及ぼす事象として、逸泥、坑壁崩壊、暴墳、抑留、遺留等が挙げられる（これら事象の詳細については表 4-2 を参照）。特に、逸泥、坑壁崩壊、暴墳、抑留については、それらの発生確率、規模や程度が様々であることから事前の予測や防止策を採ることは困難である。

以上より、本事業に適用される支払形態は工事数量精算方式を選択することが合理的と考えられる。

表 4-2 地熱井の掘削に関わるトラブルと対応策

	掘削中のトラブル	原因と現象	発生後の対応策	費用への影響	工期への影響
1	逸泥 (Lost Circulation)	・坑内の泥柱圧が、地層圧に対しオーバーバランスとなる事によって坑内の泥水が地層内へ流出してしまう現象。 ・大規模になると泥水が地上に回帰出来ないため、掘削ゲートを地上にあげることができなくなり、掘削が困難となる。また、崩壊や暴噴、抑留等の原因となる。未然に防ぐことは困難である。	①LCM(逸泥防止剤: Lost Circulation Material) 泥水のスポット 地層の空隙や亀裂を目詰まりさせる目的で、逸泥防止剤を泥水に加えてスポットする工法。逸泥防止剤の種類として、粒(塊)状、繊維状、フレーク状、その他形や大きさが異なったものがあり、それらを数種類以上混ぜ合わせて使用する方法が広く行われている。逸泥の規模によって使用する逸泥防止剤を選定する必要がある。小規模～中規模の逸泥に有効。 ②セメントフラッシュ 逸泥層付近にセメントを放置し、地層の空隙、亀裂の中に入り込んだセメントが固結して逸泥を止める。大規模の逸泥に有効。逸泥があまりにも大規模な場合は、LCMで中規模程度まで逸泥を止め、その後セメントフラッシュを行う等併用する場合もある。 ③その他 水ガラスを使用したセメントフラッシュ等の工法もあるが、施工に多くの手間がかかる上、高い技術力が求められる。超大規模逸泥に有効である。	①対策に使用したLCMやセメントの費用 ②工事日単価 × 対策に要した日数	・対策に要した日数(数日～数週間)
2	坑壁崩壊 (Well Collapse)	・坑内の地層(礫層、砂層等)が崩れ、坑底に落下する現象。ドリルストリングやビット、スタビライザー等に崩れたものが堆積してスタックの原因となる。逸泥に起因するが多い。	①セメントフィルアップ 崩壊層深度区間にセメントスラリーを充填し、坑壁をセメントで補強する工法。 ②ケーシング挿入 ケーシングを挿入しケーシングセメンチングを実施する。一般的に当該掘削段のケーシング挿入深度を浅くする等して対応するため、次段の掘削長が増加することになる。	①対策に使用したセメントの費用 ②工事日単価 × 対策に要した日数 ③計画していたケーシング挿入深度より浅くなった分の工期短縮分費用及び余剰ケーシング費用	①対策に要した日数(数日～数週間) ②工期短縮(数日～数週間)
3	暴噴 (Blow Out)	・坑内の泥柱圧が、地層圧に対しアンダーバランスとなる事によって、坑内に油・ガス・熱水・蒸気等の流体が浸入し、坑内の泥水を浸入流体が駆逐してしまい、激しく噴出してコントロールできなくなった状態をいう。 ・泥水比重の不足や坑内液面の低下、スワビング(ビットやカラーの様に、坑径に近いサイズのものは、ピストンの働きをするため、揚管の際のスピードが速すぎると泥柱圧が大きく低下し、圧力バランスが崩れる)等が原因で発生する。 ※1:地熱の場合は主に揚管時の補泥ミスによる坑内液面の低下及び温度回復による暴噴が一般的である。 ※2:掘削工事における暴噴事故は、人命にも関わる非常に重大な事故である。	①暴噴防止装置(Blow Out Preventer)を稼働させ、坑内を密閉し泥水や清水等を坑内注入して噴出流体と置換し、坑内泥柱圧を増加または冷却して抑圧する。事前に暴噴防止装置を取り付けておくことが必要不可欠であり、仮に暴噴防止装置を可動させることが出来ない場合、暴噴を止めることは非常に困難である。 ②リリーフウェル(当該坑井と地下で導通させる目的で別途掘削する坑井)を掘削し、別坑井から抑圧する(メキシコ湾油流出、鬼首地熱発電所等の事例あり)。	①暴噴防止対策に要した日数 × 工事日単価 ②暴噴により地上に噴出した流体が飛散した場合の処理費用 ③リリーフウェル掘削費用	・増加対策日数(数日～数週間) ※リリーフウェル掘削の場合数ヶ月
4	抑留 (Stuck Pipe)	①崩壊による抑留 坑内の崩壊によりビットやスタビライザー、ドリルストリングが埋まってしまうもの、もしくはビットやスタビライザーと坑壁の間に石等がくさびになって挟まれて、掘削編成を上下動することができなくなる状態。 ②差圧抑留 泥柱圧と地層圧力との差によってドリルストリングが浸透性地層面にできている泥壁に押しつけられることによって生じる抑留。 ③キーシート 坑井が急に曲がっている区間では、掘進中あるいは揚管中にドリルパイプがその内側の坑壁を削り取り、坑井に平行な小口径の孔を形成することがある。断面が鍵穴のような形状をしていることから、キーシートと呼ばれる。キーシートが形成されると、ドリルストリングと坑壁の摩擦が増大したり、ドリルカラーがこの部分にせり込み、抑留される原因となる。	①強引 掘削編成を強引または降下させる(それらを繰り返す)。 ②ジャーリング Jar(抑留された掘削ツールに瞬間的な衝撃を与えるツール)により、編成に衝撃を与えて強引または降下させる(それらを繰り返す)。 ③バックオフ 抑留から離脱できなかった場合、抑留箇所より下を残してその上からネジをもどして揚管する工法。その後、遺留ツール上までセメント等で埋立を行いサイドトラックを実施することになる場合が多い。 ④オイルスポット 抑留箇所に浸透性、潤滑性機能のある界面活性剤を加えた軽油を放置して抑留パイプを油漬けにし、差圧や抑留係数を小さくすることによりパイプを離脱させる工法。特に差圧抑留において高い効果を発揮する。なお、既設発電所が稼働中の場合、オイルスポットで使用した油分が貯留層を通じ生産井から噴出され、タービントリップを引き起こした事例がある。そのような懸念がある場合、離脱できる能力は低下するが、油分を含まない界面活性剤のみをスポットするケースもある。日本国内の地熱掘削現場の場合、環境上の問題があるため、オイルスポットは厳禁となっている。	①対策に要した日数 × 工事日単価 ②対策に使用したツール、資材の費用	・対策に要した日数(数日～数週間) ※サイドトラック実施の場合数ヶ月
5	遺留	・ドリルストリングが破断またはネジ戻りにより坑内に落下し、坑内に置いてきてしまうこと。 ・地上から、作業中に誤って物(工具、ボルトナット等)を坑内に落下させてしまうこと。	・探撈器(Fishing Tool)を使用し、遺留物をキャッチして回収する。遺留物や遺留頭部の形状によってオーバーショット、タップ、マグネット等ツールを選定する。 ・回収できなかった場合は遺留頭部上までセメント等で埋立を行いサイドトラックを実施する。	①対策に要した日数 × 工事日単価 ②対策に使用したツール、資材の費用	対策に要した日数(数日～数週間) ※サイドトラック実施の場合数ヶ月

(注釈) サイドトラックとは、坑井途中から坑跡を変更して傾斜掘削を実施すること。新たな別ターゲットを狙う場合と再度坑跡を元のターゲット方向に向けて掘削する場合の2種類がある。

出典：調査団作成

4.1.2 IADC (国際掘削業者協会)標準契約書における支払形態

表 4-1 では、代表的な契約約款として JICA 円借款事業に標準として使用される入札図書や FIDIC 契約約款を取り上げたが、1940 年に油井や地熱井等の掘削業者により設立された International Association of Drilling Contractors (IADC：国際掘削業者協会) 発行の標準工事契約条件書においても、「掘削時間精算方式」、「掘削長精算方式」ならびに「ターンキー（ランプサム）方式」が用意されている。

IADC 標準工事契約条件書は 4.1.3 章に示すとおり、特に、「掘削時間精算方式」は、数多くの地熱井掘削事業で利用されている。これら 3 種類の支払方式の概要を表 4-3 に纏める。

表 4-3 IADC 標準工事契約条件書 支払方法特徴

項目	工事数量精算方式		ランプサム方式 ⁷ (Lump Sum)
	掘削時間精算 ⁵ (Daily Rate)	掘削長精算 ⁶ (Footage)	
工期設定	あり	着工時期のみ指定	着工時期のみ指定
工期延長	双方の合意による	記載なし	記載なし
掘削深度	<ul style="list-style-type: none"> Maximum Well Depth の特定 	<ul style="list-style-type: none"> Contract Footage Depth の特定 Maximum Depth (Contract Footage Depth 以外の掘削の最大深度)の特定 	<ul style="list-style-type: none"> Turnkey Depth の特定 Contract Depth/Maximum Depth (Turnkey Depth 以外の掘削深度/最大深度)の特定
単価	<ul style="list-style-type: none"> Mobilization Fee Demobilization Fee Operating Rate Standby Rate Rate During Repair Force Majeure Rate 等 天候を理由とした追加支払も規定 単価の見直しも規定 	<ul style="list-style-type: none"> Footage Rate Standby Time Rate Work Stoppage Rate Operating Rate Drilling Fluid Rates Reimbursable Costs 等 掘削長精算と掘削時間精算の併用も可能（掘削長精算においては、請負者による監理）であり、この場合、Operating Rate を用いる。 	<ul style="list-style-type: none"> Turnkey Amount Standby Time Rate Work Stoppage Rate Operating Rate Drilling Fluid Rates Reimbursable Costs 等 ランプサム精算と掘削時間精算の使い分けも可能（ランプサム精算においては、請負者による監理）であり、この場合、Operating Rate を用いる。
支払い	<ul style="list-style-type: none"> 月次請求（請求受領後 30 日以内の支払い） 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削長精算（Contract Footage Depth）のサービスの完了時、Daily Basis は月次請求可能 	<ul style="list-style-type: none"> ランプサム精算（Turnkey Depth）のサービス完了時、Daily Basis は月次請求可能
予見不可能な地質条件に対する補償	<ul style="list-style-type: none"> 発注者判断による中断、変更等、各種単価にて精算する。 	<ul style="list-style-type: none"> 1 日当たりの掘削進捗が芳しくない場合は別途設定する Operating Rate の 1 日分の額が保証される。 	<ul style="list-style-type: none"> Turn Key Depth 以外の掘削には別途設定する Operating Rate で対応する。
資機材調達	<ul style="list-style-type: none"> Checklist of Contractor's 	<ul style="list-style-type: none"> Equipment, Materials and 	<ul style="list-style-type: none"> Equipment, Materials and

⁵ International Land Daywork Drilling Contract (2010 年 3 月)

⁶ Drilling Bid Proposal and Footage Drilling Contract ó U.S. (2003 年 4 月)

⁷ Model Trunkey Contract (2003 年 4 月)

項目	工事数量精算方式		ランプサム方式 ⁷ (Lump Sum)
	掘削時間精算 ⁵ (Daily Rate)	掘削長精算 ⁶ (Footage)	
	and Operator's Obligations にて資機材調達主体を明記	Services to be Furnished by Operator にて発注者による資機材調達項目を明記 ・ Equipment, Materials and Services to be Furnished by Designated Party(契約当事者の一方)にて資機材調達主体を明記	Services to be Furnished by Designated Party(契約当事者の一方)にて資機材調達主体を明記

出典：調査団作成

上表に示される通り、掘削時間精算において支払のベースとなる料率は、実際の掘削時間に適用される **Operating Rate**、待機時間に適用される **Standby Rate**、修理時間に適用される **Rate during Repair** の 3 種類があり、稼働状況の違いにより異なる料率が適用される。

さらに、IADC 標準工事条件書では、掘削長精算やランプサム精算においても、部分的に掘削時間精算を組み合わせて用いること（**Operating Rate** による精算）を可能としている。例えば、地質リスクが十分に解明されているセクションについては掘削長精算やランプサム精算を適用し、リスクが高いセクションは掘削時間精算とすることで請負者のリスクを低減することができる。即ち、IADC 標準工事条件書ではランプサム方式といえども、契約金額を固定するという考えではなく、状況に応じて契約金額の変動を許容するという立場をとっている。

4.1.3 海外の地熱井掘削事業事例における支払形態

既存の海外地熱井掘削事業を対象に、どのような契約形態・支払い条件が適用されているかの調査を行った。その結果を表 4-4 に示す。資金源は事業主体の自己資金であるプロジェクトが大半を占めていると考えられ、国際融資機関からの援助によるものは極めて少ない。これらは、近年地熱開発の実績のある国からの事例である。

表 4-4 地熱プロジェクト事例における工事契約条件書の特徴

国名 案件名（実施年）	支払方式	特徴
ニカラグア San Jacinto ó Tizate Geothermal Power Project (2013)	掘削時間精算 (Daily Rate)	<ul style="list-style-type: none"> ・ IADC 標準工事契約条件書（Daily Basis）の条項を部分的に引用 ・ 工期設定/遅延関連条項なし ・ 予見不可能な状況に際し、別途定義した単価にて精算（発注者判断による） ・ Casing 等一部資機材は発注者による手配
ルワンダ Rwanda Geothermal Exploration Program (2011)	掘削時間精算 (Daily Rate)	<ul style="list-style-type: none"> ・ Daily Basis の支払条件であるが、Technical Specifications は、IADC 標準工事契約条件書（Footage Basis）の条項を引用していると見受けられる。 ・ 工期は 6 ヶ月 ・ Advance Payment : 20% ・ 予見不可能な状況に際し、別途定義した単価にて精算（発注者判断による） ・ Casing 等一部資機材は発注者手配

国名 案件名（実施年）	支払方式	特徴
ジブチ Geothermal Well Drilling Services (2009)	掘削時間精算 (Daily Rate)	<ul style="list-style-type: none"> • Daily Basis の支払条件であるが、IADC 工事標準契約条件書 (Footage Basis) を引用していると見受けられる。 • 工期設定/遅延関連条項なし • Casing 等一部資機材は発注者手配
エルサルバドル Drilling Services for Berlin Geothermal Project (1995)	掘削時間精算 (Daily Rate)	<ul style="list-style-type: none"> • IDB による融資 (4.2.5 章参照)
チリ Suministro de equipo de Perforaci n para las concesiones geotérmicas nevados de chillan, apacheta, la torta y el tatio (実施年不明)	掘削時間精算 (Daily Rate)	<ul style="list-style-type: none"> • IADC 標準工事契約条件書 (Daily Basis) の条項を部分的に引用
アイスランド 特定の案件は無し	掘削長精算 (Footage)	<ul style="list-style-type: none"> • IADC に準拠
インドネシア Sarulla Geothermal IPP Project (2014) ※	掘削時間精算 (Daily Rate)	<ul style="list-style-type: none"> • Well pad (坑井元地上設備) の Civil 部分は工事日数・作業量に依らず Lump Sum • 総合的マネジメント (Integrated Project Management (IPM)) を適用

※契約条件書類未入手（ヒアリングによる情報のみ）

出典：調査団作成

上表に示されるとおり、支払方式については掘削時間精算が大半を占めていることが確認された。アイスランドについては、契約書自体は入手されていないが、掘削長精算が主流であることが、ヒアリングにより明らかになっている。ランプサム支払を採用している事例は確認されなかった。

4.1.4 本邦国内の地熱井掘削事業事例における支払形態

既存の国内地熱井掘削事業を対象に、どのような契約形態・支払い条件が適用されているかの調査を行った。基本的にはランプサム支払を採用しているが、別途設定された単価による実費精算を可能としている。実費精算の精算金額は、リグ損料や人件費、レンタル代、各種管理費等より決定される日単価を坑径毎に予め決定しておき精算される。特に、崩壊対策や逸泥対策費用は、坑内の状況によって大幅に変動することから、実費精算とするのが通常である。また、別途掘削深度の単価も坑径毎に予め決めておき、計画掘削深度と実績掘削深度の差を精算対象とするケースもある。以上のことから、国内地熱井掘削事業においては、掘削時間精算が実質的に採用されていると見なすことができる。

なお、契約条件書に詳細な取り扱いの記載のない事項については、個別に協議することとなっており、主な事項として以下が挙げられる。

- (1) 設計変更、工事追加、一部工事打ち切り（追加コストおよび工期延長）
- (2) 発注者都合での工事中断と契約終了（追加コスト）
- (3) 天災、不可抗力（工期延長のみ）
- (4) 見積り数量超過時の実績精算（追加コスト）

4.1.5 井戸掘削業者からのヒアリング結果

サンタクルスにおいて井戸掘削請負者 12 社を対象に市場調査を実施した。12 社全てが本事業への参画の意思を示しているが、支払条件についてはおしなべて掘削時間精算を希望しており、掘削長精算やランプサム精算については予見不可能リスクの高さからその受容に否定的であることが確認された。特にランプサム精算に対しては強い抵抗感が示された。

表 4-5 支払い条件、資機材一括調達方式に関する現地請負者からのヒアリング結果

井戸掘削業者	希望する支払い条件			IPM [※] 希望有無
	Daily	Footage	Turn Key (Lump Sum)	
1		—	—	
2		—	—	
3		—	—	
4		—	—	—
5		—	—	—
6		—	—	—
7		—	—	
8		—	—	—
9		—	—	—
10		—	—	—
11		—	—	—
12		—	—	—

※IPM（Integrated Project Management）：請負者が資機材等一括調達する総合的マネジメント

出典：調査団作成

さらに、これらの掘削請負者が実施した過去の案件においても、掘削時間精算による精算が一般的であることが確認された。掘削長精算については、同じ現場であるならば多数の井戸の掘削を自ら実施し、地質状況が十分に把握された後に掘削時間精算から掘削長精算に変更するオプションは考えられる、との意見は聞かれた。

4.1.6 本事業における支払形態の提案

本事業に適用される支払形態を検討するにおいて、「掘削時間精算方式」、「掘削長精算方式」ならびに「ランプサム方式」の 3 種類の支払形態のなかで、「ランプサム方式」は以下の理由により先ず除外するのが妥当と考えられる。

- (1) 請負者のリスクが非常に大きく入札において不落や不調となる可能性がある。

- (2) 事例調査において「ランプサム方式」の適用例は確認されなかった。
- (3) ヒアリング調査において井戸掘削業者は「ランプサム方式」に対して強く否定的であった。

発注者にとっては請負者にある程度リスクを負わせる「掘削長精算方式」が望ましい支払形態であると考えられる。しかしながら、井戸掘削請負者12社とのヒアリングにおいては、以下の条件を提示したにも拘わらず、全ての請負者が「掘削長精算方式」の受け入れに否定的であった。

- (1) 過去に実施した試掘データを入札時に全て開示する。
- (2) 予見不可能な事象に遭遇した場合は「掘削時間精算方式」に切り替える。

以上により、本事業に適用される支払形態は、地熱井掘削事業に一般的に採用されている「掘削時間精算方式」とすることが実践的であると考えられる。

この場合、請負者の責任に帰する進捗の低下について支払の対象としないように、発注者側の密接な工事管理が重要であることに留意する必要がある。

4.2 契約条件書

4.2.1 概要

契約条件書は、契約当事者の権利と義務を規定し、契約当事者間のリスク配分を定めることから、契約書全体のなかで中核的な役割を果たしている。

契約条件書の選択においては、以下の理由により業界における標準契約約款を使用することが適切と考えられる。

- 1) 数多くのプロジェクトで使用実績があり完全度が高い。
- 2) 継続的な改良がなされていることが多い。
- 3) 発注者、請負者共に馴染みがあることから当事者のリスクの把握が容易である。

本事業の削井工事契約に推奨される契約約款としては、数量精算方式が適用される場合、以下が候補として挙げられる。

- 1) FIDIC Pink Book (FIDIC Conditions of Contract for Construction, MDB Marmonized Edition)
- 2) IADC 掘削工事契約書 (International Land Daywork Drilling Contract)

4.2.2 FIDIC Pink Book の特徴

FIDIC Red Book は 1957 年に初版が発行され、国際的に数多くの工事契約で使用されている。FIDIC は 1999 年に Red Book の 5 回目の改訂を行っているが、この FIDIC 1999 年版をベースとして国際金融機関 (MDB) 融資のプロジェクト用に編纂された契約条件書が FIDIC Pink Book である。世界銀行は 2005 年から FIDIC Pink Book を採用している。

JICA 調達ガイドラインでは、以下の通り借款借入人に対して JICA 標準入札書類の使用を要求しており、標準入札書類（工事）では、契約条件書として FIDIC Pink Book が採用されている。

Section 4.01 General

(2) *Borrowers shall use the appropriate Standard Bidding Documents (SBDs) of the latest version issued by JICA with minimum changes acceptable to JICA, as necessary to address project-specific conditions. Any such changes shall be introduced only through bid data sheets, or through special conditions of contract, and not by introducing changes in the standard wording of JICA's SBDs. When no relevant SBDs have been issued, the Borrower shall use other internationally recognized standard conditions of contract and contract forms acceptable to JICA.*

このように FIDIC Pink Book は 2005 年以降、MDB や JICA が融資する数多くのプロジェクトにおいて使用されており、その特徴は以下の通り要約される。

- 1) 発注者設計により実施される工事に適用される。
- 2) 支払は数量精算方式（BOQ 方式）による月払いである。
- 3) 発注者と請負者のリスク分担にバランスがとられている。それぞれのリスクをより良く管理できる当事者がそのリスクを負担するという思想に基づいている。
- 4) 発注者・請負者共に管理できないリスク、また一般的に保険を付保できないようなリスクについては基本的に発注者がリスクを負担する。
- 5) 下記の役割を果たす Engineer が配置されている。

(1) 発注者の代理人としての役割

- ・ 発注者の代理人として、工事の遂行に必要な技術的支援または管理面での支援を提供する。

(2) 独立した契約管理者としての役割

- ・ 請負者の契約履行に関わる様々な証明書（例：支払証明書、引渡証明書）を独自の権限で発行する
- ・ 契約当事者からのクレームを評価し決定する。

- 6) クレームおよび紛争の解決手続が詳細に定められている。プロセスは重層的であり、早期の解決を目指している。

4.2.3 IADC 工事契約条件書の特徴

4.1.2 章で記述した通り IADC は支払方式の違い（掘削時間精算、掘削長精算、ランプサム）により 3 種類の契約約款を発行している。

IADC 掘削時間精算方式においては、契約条項 501. Contractor's Standard of Performance に明示されるとおり、請負者はリソースの提供および掘削業務を発注者（öOperatorö と称する）の指示・管理のもとに実行することを前提としており、実質的に発注者が施工責任を分担すると考えられる。

501. Contractor's Standard of Performance

"Contractor shall carry out all operations hereunder on a daywork basis. For purposes hereof the term "daywork basis" means Contractor shall furnish equipment, labor, and perform services as herein provided for a specified sum per day under the direction and supervision of Operator (inclusive of any employee, agent, consultant or subcontractor engaged by Operator to direct drilling operations). When operating on a daywork basis, Contractor shall be fully paid at the applicable rates of payment and assumes only the obligations and liabilities stated herein. Except for such obligations and liabilities specifically assumed by Contractor, Operator shall be solely responsible and assumes liability for all consequences of operations by both parties while on a daywork basis, including results and all other risks or liabilities incurred in or incident to such operations, notwithstanding any breach of representation or warranty, either expressed or implied, or the negligence or fault of any degree or character of Contractor Contractor's Personnel, its subcontractors, consultants, agents or servants, including sole, concurrent or gross negligence, either active or passive, latent defects (whether or not preexisting) and any liability based on any theory or tort, breach of contract, breach of duty (whether statutory, contractual or otherwise), regulatory or statutory liability, or strict liability, including defect or ruin of premises, either latent or patent."

一方で、掘削長精算方式やランプサム方式においては、

"Contractor shall direct, supervise and control drilling operations and assumes certain liabilities to the extent specifically provided for herein."

と規定されており、請負者自らが施工責任を負うことを前提としている。（部分的に掘削時間精算を用いる場合、その該当部分においては、上記掘削時間精算方式と同様の責任分担となる。）

FIDIC 契約約款においては、予見不可能な地質条件に対する補償はクレーム手続きを経て適否が判断されるが、IADC の掘削時間精算契約においては、Standby Rate 等を適宜適用することで円滑な精算手続きを可能とする特徴がある。すなわち、IADC 工事契約条件書ではクレームというプロセスは経ずに、現場において発注者の指示のもとで柔軟に工法の変更を行い、それに伴い契約金額や工期をリアルタイムで変動させる仕組みと捉えることができる。

4.2.4 FIDIC Pink Book と IADC 工事契約条件書の比較

円借款事業の工事契約で標準的に使用される FIDIC Pink Book と IADC 標準工事契約条件書（Daily Basis）の各条項の比較を表 4-6 に示す。

表 4-6 FIDIC Pink Book と IADC Daily Basis 工事契約条件書の比較

項目	FIDIC Pink Book	IADC Daily Basis ⁸	IADC 条項の特徴
一般規定	1. General Provisions		Contractor's Personnel, Operator's Personnel 等、9 用語の定義のみ。
	・ 用語定義	・ Definitions (101)	
	・ 解釈	・ 記載なし	
	・ コミュニケーション	・ 記載なし	
	・ 法律と言語	・ Governing Law (108) / Governing Language (109)	
	・ 書類の優先順位	・ Conflicts (103)	
	・ 契約合意書	・ Entire Agreement (1309) / Effective Date (201)	
	・ 譲渡	・ Assignment (1102)	
	・ 書類の保管及び供与	・ 記載なし	
	・ 図面または指示の遅延	・ 記載なし	
	・ 請負者の書類の発注者による使用	・ 記載なし	
	・ 発注者の書類の請負者による使用	・ 記載なし	
	・ 機密事項	・ Confidential Information (1301)	
	・ 法律の遵守	・ Governing Law (108)	
	・ 連帯責任	・ 記載なし	
・ 銀行による検査及び監査	・ 記載なし		
発注者	2. Employer		・ アクセス提供後も管理責任は発注者が負う。 ・ アクセス困難/補修に伴うコストは請求可。
	・ 現場への立ち入り権	・ Drilling Site and Access (605)	
	・ 許可、免許又は承認	・ 記載なし	
	・ 発注者の要員	・ 記載なし	
	・ 発注者の資金手配	・ Financial Guarantee (804)	
	・ 発注者のクレーム	・ 記載なし	
エンジニア	3. Engineer	関連する記載なし	・ 第三者専門家による契約管理や工事監理を想定していない。 ・ 発注者と請負者の純粋 2 者構造である。
請負者	4. Contractor		・ Drilling Fluid/Casing Program は発注者指示に従う。(505. Drilling Fluids and Casing Program) ・ 請負者の雇用する下請業者業務の責任は発注者が負う。(601.
	・ 請負者の一般的義務	・ Contractor's Standard of Performance (501)	
	・ 履行保証	・ 記載なし	
	・ 請負者の代理人	・ Contractor's Representative (303)	

⁸括弧内数字は、IADC 標準工事条件契約書（Daily Basis）における条項番号。

項目	FIDIC Pink Book	IADC Daily Basis ⁸	IADC 条項の特徴
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下請者 ・ 下請契約の利便の譲渡 ・ 協力 ・ 計画位置の設定 ・ 安全の手続き ・ 品質保証 ・ 現場データ ・ 承諾契約金額の充足性 ・ 予見不可能な物理的条件 ・ 通行権及び施設 ・ 妨害の回避 ・ 進入路 ・ 物資の輸送 ・ 請負者の機器 ・ 環境の保護 ・ 電力、給水およびガス ・ 発注者の機器と無償供与資材 ・ 進捗報告書 ・ 現場の安全 ・ 現場における請負者の作業 ・ 化石 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Subcontracts (1101) ・ 記載なし ・ 記載なし ・ Operation of Drilling Unit (502) ・ Compliance with Operator's Instructions (503) ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ Inspection of Materials Furnished by Operator (510) ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし 	Equipment and Personnel)
指定下請者	<u>5. Nominated Subcontractor</u>	関連する記載なし	
要員及び労働者	<u>6. Staff and Labour</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・ Obligation to Supply Personnel (301) ・ Number, Selection, Hours of Labor and Remuneration (302) ・ Replacement of Contractor's Personnel (305) 	・ 発注者は、請負者の飲酒や禁制品の持ち込みに関する方針に干渉しない。(603. Operator's Representatives)
プラント、資材及び施工技術	<u>7. Plant, Materials and Workmanship</u>	・ Article IV - Contractor's Item	・ 資機材のテスト、サンプリング等の詳細記述はない。
工事の開始、遅延及び中断	<u>8. Commencement, Delays and Suspension</u>		<ul style="list-style-type: none"> ・ "Commencement Date" とは、"Drilling Unit" が最初の掘削地点に向けて移動開始した時点。 ・ 請負者要員の増加は発注者が指示でき、規定単価にて精算する。(304. Increase in Contractor's Personnel)
	・ 工事の開始	・ Definitions (101)	
	・ 工事完成期限	・ Duration (202)	
	・ 工程計画	・ 記載なし	
	・ 完成期限の延長	・ Option to Extend (204)	
・ 公共機関に起因する遅延	・ 記載なし		

項目	FIDIC Pink Book	IADC Daily Basis ⁸	IADC 条項の特徴
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 工事の進捗度 ・ 遅延損害賠償 ・ 工事の中断 ・ 工事中断の結果 ・ 工事中断の場合のプラン ト及び資材の支払い ・ 長期にわたる中断 ・ 工事の再開 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし 	
完成試験	<u>9. Tests on Completion</u>	関連する記載なし	
発注者への引き渡し	<u>10. Employer's Taking Over</u>	関連する記載なし	
欠陥保証責任	<u>11. Defects Liability</u>	関連する記載なし	<ul style="list-style-type: none"> ・ Drilling Unit が現場から退去した時点で請負者の欠陥補償責任は消滅する。
検測と費用算定	<u>12. Measurement and Evaluation</u>		<ul style="list-style-type: none"> ・ 稼働時間の記録から支払いを行う。
	・ 検測の対象となる工事	・ 記載なし	
	・ 検測の方法	・ 記載なし	
	・ 費用算定	・ Variation of Rates (709)	
	・ 省略	・ 記載なし	
変更の調整	<u>13. Variations and Adjustments</u>		<ul style="list-style-type: none"> ・ 発注者による掘削ルート変更指示に従い掘削工事を遂行する。FIDIC Pink Book では、工事段階での指示を変更として扱う。
	・ 変更の権利	<ul style="list-style-type: none"> ・ Payment (701) / Variation of Rates (709) 	
	・ バリュエエンジニアリング	・ 記載なし	
	・ 変更の手続き	・ Payment (701)	
	・ 当該通貨による支払い	・ Currency (102)	
	・ 暫定金額	・ 記載なし	
	・ 常備作業	・ 記載なし	
	・ 法令の変更による調整	・ Change in Law (710)	
・ 費用の変更による調整	・ Additional Payments (708)		
契約価格と支払い	<u>14. Contract Price and Payment</u>		<ul style="list-style-type: none"> ・ Advance Payment は規定なし。 ・ 請求書は月次、或いは、坑井完成時に提出する。 ・ 支払い遅延に際しては、契約終了権利が発生する。
	・ 契約価格	・ 記載なし	
	・ 前渡金	・ 記載なし	
	・ 中間支払い証明書の申請	・ Monthly Invoices (801)	
	・ 支払い予定表	・ 記載なし	
	・ 工事用プラントと工事用資材	・ 記載なし	
	・ 中間支払い証明書の発行	・ 記載なし	
	・ 支払い	・ Payment (802)	
	・ 支払いの遅延	・ Payment (802)	
・ 保留金の支払い	・ 記載なし		

項目	FIDIC Pink Book	IADC Daily Basis ⁸	IADC 条項の特徴
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 完工計算書 ・ 最終支払い証明書の申請 ・ 契約上の債務の確定 ・ 最終支払い証明書の発行 ・ 発注者の債務の消滅 ・ 支払い通貨 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 記載なし ・ Monthly Invoices (801) ・ 記載なし ・ 記載なし ・ 記載なし ・ Currency (102) / Local Currency Expenditures (806) 	
発注者による契約終了	<u>15. Termination by Employer</u>	・ Force Majeure Rate (707)	
請負者による工事中断と契約終了	<u>16. Suspension and Termination by Contractor</u>	・ Termination (203) / Force Majeure Rate (707) / Payment (802)	
リスクと責任	<u>17. Risk and Responsibility</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・ Article IX ó Liability ・ The Hole (902) ・ Pollution and Contamination (905) ・ Debris Removal and Cost of Control (906) 	
保険	<u>18. Insurance</u>	・ Article X - Insurance	<ul style="list-style-type: none"> ・ FIDIC 契約約款では契約当事者の一方が共同被保険で手配する。 ・ 一方、IADC 工事契約条件書では、発注者、請負者がそれぞれに負うべき責任に対する保険を付保する。互いに保険証書を提供し保付内容が十分であるか確認する。 ・ 相手の要請に応じて、被保険者に含めるケースもある。
不可抗力	<u>19. Force Majeure</u>		<ul style="list-style-type: none"> ・ 契約当事者は Force Majeure が 30 日以上継続する場合、契約終了できる。
	・ 不可抗力の定義	・ Force Majeure (1303)	
	・ 不可抗力の発生通知	・ Force Majeure (1303)	
	・ 遅延最小化の義務	・ 記載なし	
	・ 不可抗力の結果	・ Force Majeure Rate (707)	
	・ 下請者に影響する不可抗力	・ 記載なし	
	・ 任意契約終了、支払い及び解除	・ Force Majeure Rate (707)	
・ 履行からの解放	・ Force Majeure Rate (707)		
クレーム、紛争及び仲裁	<u>20. Claims, Disputes and Arbitration</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・ Notices (1201) ・ Jurisdiction and Venue (110) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ クレーム手続きは規定されていない。 ・ 紛争は最終的に管轄裁判所で解決される。

出典：調査団作成

IADC 契約における FIDIC Pink Book との顕著な相違は以下のとおり要約される。

- ① アクセス道路の維持管理責任は発注者に帰属する
- ② 第三者専門家による契約管理や工事監理を想定していない
- ③ 請負者の雇用する下請業者の業務責任は発注者が負う
- ④ 履行保証は要求されていない
- ⑤ 保留金は要求されていない
- ⑥ 工期遅延賠償の規定はない
- ⑦ 瑕疵担保期間の設定はない
- ⑧ 工事引渡し (Taking-Over) に関する規定はない
- ⑨ 紛争は仲裁ではなく裁判で決着する

上記の比較により明らかなことは、IADC 標準工事契約条件書は、FIDIC Pink Book と比べ発注者側へのリスク配分が大きいことである。また、工事契約条件書の詳細性についても、FIDIC 契約約款に比べ大きく劣ることから、仮に IADC 標準工事契約条件書を円借款事業に用いる場合には、契約条件書の大幅な書換えや追記が必要になることに留意が必要である。

4.2.5 開発援助案件における契約条件書の事例

本調査において収集された米州開発銀行 (Inter-American Development Bank : IDB) 融資による地熱掘削事業の契約条件書の分析を行った。契約書の主要条項における規程内容と FIDIC Pink Book との対比は下表のとおりである。

表 4-7 IDB 融資案件における工事契約条件書と FIDIC 契約約款比較

項目	条項	詳細	FIDIC Pink Book	
			関連条項	記載内容
Bond	CG 18	Advance Payment Bond	SC 14.2	Similar
		Performance Bond	SC 4.2	Performance Security covers these two bonds.
		Quality Guarantee Bond	SC 4.2	
Payment	CG16	Advance Payment 20% (deduction shall be made from each interim payment.)	SC 14.2	Similar
		Interim Payment - Procurements: milestone basis - Construction: work volume basis	SC 14.3	Similar
Retention Money	CG 17	- Percentage of Retention: 5% - Limit of Retention Money: 5%	SC 14.3 (c)	Similar
Subcontractors	CG 12	- Some parts of the work may be subcontracted - List of subcontractors shall be submitted to the Employer within 7 days after issuance of Notice of award. (for approval)	SC 4.4	Similar
Insurance	CG 14	- Insurance against all risks for	SC 18.2	Similar

項目	条項	詳細	FIDIC Pink Book	
			関連条項	記載内容
		Contractor - Insurance against Employer's risk and civil responsibility shall be procured by the Contractor in the name of the Employer and the Contractor	SC 18.3 SC 18.4	
Commencement of Works	CG 36	Within 10 days after Inception Order	SC 8.1	Similar
Work Execution Program	CE 30	Within 10 days after the signing of the Contract (for approval)	SC 8.3	Approval is not required by the Employer.
Final Acceptance and Contract Liquidation	CG 24	- Certification of Final Acceptance shall be issued within 30 days after the guarantee period is expired. - Quality Guarantee Bond shall be returned to the Contractor.	SC 11.9	Similar
Delays and Deadline Extensions	CG 19	- Deadline might be extended due to Force Majeure or an act of God - Written notice is required within 7 days after an event causing delay occurs. Such extension shall be established by means of Order of Change.	SC 8.4	Similar
Orders of Change	CG 20	The Contractor shall not carry out unscheduled works without Orders of Change, except in emergency situation.	SC 13.1	Similar
Suspension	CG 27	- At the Employer's convenience - Due to Contractor's nonfulfillment of the Contract - Due to Force Majeure by both Parties	SC 16.1	Similar
Termination	CG 27 CG 28	- At the Employer's convenience - If no instructions to the Contractor is made within 30 days after the date of suspension	SC 15.1 SC 15.2 SC 15.5 SC 16.2	Similar
Claims for Damages	CG 11	- Notice within 15 days after an event causing delay occurs. (Claims submitted after the above mentioned deadline shall not be considered.) - Claim Settlement Process 1st step: Amicable settlement 2nd step: Arbitration	SC 20.1	The Engineer evaluates and determines claims in the first place. Supporting documents shall be submitted within 42 days.
Dispute	CG 29 CG 30	- Claim Settlement Process 1st step: Amicable settlement 2nd step: Arbitration	SC 20.5 SC 20.6	Dispute Board provides decision on disputes before attempt to amicable settlement.
Sanction of Simple Delay	CG 25	- 0.5% per day - Maximum amount: 10%	SC 8.7	Similar

出典：調査団作成

上記 IDB 融資案件の工事契約条件書は、MDB 融資案件において標準的に使用される FIDIC Red Book や FIDIC Pink Book それ自体ではないが、支払い手続き、工程管理、遅延損害金、保険付与、完成試験、引渡し手続き等で、FIDIC 契約約款に類似したプロセスが多く規定されている。地熱掘削事業においては、IADC 標準工事契約条件書に準じた契約書が広く利用されているが、MDB 融資案件で FIDIC 契約約款に類似する契約条件書も使用されていることが確認された。

しかしながら、以下に示すとおり、いくつかの点において、FIDIC 契約約款の建付けと異なる点も確認された。

- 工事監理は、発注者、Project Director、Consultants、Engineer、Supervisor 等が規定された範囲において実行することとなっている。ただし、それらのいずれも、FIDIC Pink Book における中立的な立場で第三者として監理する the Engineer のような位置付けである旨の明示がなく、発注者の介入を多く認める契約条件であると読み取れる。
- 予見不可能な物理的条件については、請負者の通知を元に発注者の判断による変更手続きがなされる建付けとなっている点は FIDIC Pink Book と類似しているが、具体的な判断根拠、手続きについて言及されていない。また、上記のとおり、第三者による判断が入る仕組みとはなっていない。
- 物価上昇等に対応する価格調整条項が設定されていない。
- また、紛争が Amicable Settlement で決着しない場合、直ちに、仲裁へ進むこととなっている。FIDIC Pink Book 等では the Engineer による「決定」や、Dispute Board（紛争委員会）への付託プロセスを含めることで、仲裁の前に問題を解決する仕組みが備えられている。

4.2.6 本事業における契約条件書の提案

本事業の削井工事契約に推奨される契約条件書としては、下記の理由により FIDIC Pink Book を選択することが妥当と考えられる。

- (1) FIDIC Pink Book は、JICA 標準入札書類（工事）の契約条件書として採用されている。
- (2) 4.2.4 章に記述した通り IADC 標準工事契約条件書は発注者側へのリスク配分が非常に大きいと判断される。
- (3) IADC 契約約款は油井や地熱井の掘削契約に数多く使用されているが、実際の使用においては多くの変更が加えられているケースが多いようである。
- (4) 4.2.5 章に記述した通り MDB 融資による地熱井掘削工事において FIDIC Pink Book に類似した契約条件書の使用事例がある。

支払形態については、4.1.6 章に記述した通り「掘削時間精算方式」とすることが実践的であると考えられる。しかしながら、掘削作業の実施においては、IADC 時間精算契約に規定されるような「発注者が殆ど全ての指示を請負者に与え最終的な施工責任は発注者が負う」という考え方ではなく、請負者に掘削作業のイニシアティブを与えるという考え方を導入することが妥当と考えられる。これにより、発注者側の管理負担は軽減され、掘削に伴うリスクも契約当事者間で適度にバランスされるものと考えられる。

具体的には、以下の手順を踏むことでこれが実現可能と考える。

1) 入札書類作成段階

- ・ 発注者（そのコンサルタントを含む）は試掘などの現場調査で得られた情報を基に、詳細な施工計画と工程計画を作成する。
 - ・ 上記計画に基づき工期を決定し、掘削契約の与条件とする。
- 2) 入札・入札評価段階
- ・ 発注者は過去に実施した試掘データを全て入札者に開示する。
 - ・ 入札者は施工計画と工程計画をその根拠資料と共に提出する。
 - ・ 発注者は自ら作成した計画との対比により入札者の計画の妥当性と合理性を検証する。疑義がある場合は、必要に応じて入札評価期間中にクラリフィケーションを行ったり、契約交渉時に確認と調整を行う。
 - ・ 入札者の計画書は契約の一部と位置づける。
- 3) 工事実施段階
- ・ 掘削中に、請負者が契約の前提条件と異なる地盤状況に遭遇し工事進捗に影響を与えると考える場合、請負者は 4.12 条「Unforeseeable Physical Condition」に従いエンジニアに通知を行う。
 - ・ エンジニアは状況を検証し、必要に応じて発注者合意のもと 13.1 条「Right to Vary」に従い変更の指示（例：工事の中断、工法変更、対策工の実施、復旧工事の実施）を行う。
 - ・ 請負者は、変更に伴う追加費用の支払と工期の延長を受ける。

4.3 契約パッケージ

本事業の削井工事は、下記を勘案して表 4-8 に示される契約パッケージにより実施することが提案される。

- 1) 当事業の実施機関は地熱発電プロジェクトの経験を有していないため、契約間のインターフェースの調整ならびに実施機関の管理上の負担軽減を考慮すると契約パッケージの数は少ないことが望ましい。
- 2) 準備工事（リグ基礎の建設、アクセス道路建設及び維持修繕、給水施設建設）は掘削工事請負者のモービライゼーションに先行的して発注することで全体工期の短縮を図ることができる。アクセス道路の維持修繕については、実施機関の負担軽減を意図して契約に含めている。
- 3) 掘削資材を掘削工事から分離して発注することで、調達管理費重複の削減に寄与できる。また、資材の品質についても密接に管理することができる。
- 4) 掘削資材契約については、入札は 1 回で実施するとしても、入札者は全ての項目または幾つかの項目についてオファーすることも可能な設定とすることができる。入札後に、実施機関は費用的に最も低価格となる契約の組み合わせを検討することで経済性を追求できる。また、このような入札方法をとることにより、メーカーからの直接購入の可能性も生まれる。

- 5) 掘削契約は付帯する全てのサービスを含めた単一の契約とすることで、各種作業間のインターフェース管理を請負者に負わせることができる。主請負者は、専業下請者の工事/サービスの全てに責任を負うこととなる。代替案として、掘削資材入札に適用する方法（一回の入札で複数契約も可能とする方法）を掘削契約に適用することも考えられる。

表 4-8 契約パッケージ

分類	Package No.	工事/供給品	入札 ^{*1}	資金	備考
A. 準備工事	A1	Rig platform preparation	LCB	ENDE	・ マッドピットは Package-C の Dewatering Service に含めることも可能。
	A2	Access Road (Construction and Maintenance)	LCB	ENDE	・ 維持補修については発注者が自ら実施する場合は除外する。
	A3	Water Supply System	LCB	ENDE	・ 業務内容は水井戸の建設と機器（ポンプ、発電機、リグまでのパイプライン等）の据え付け。
B. 掘削資材供給	B	1) Fluid Materials: Bentonite and Chemical additives 2) Drilling Bits 3) Casing 4) Wellhead Equipment and Accessories: Master valves, lateral valves, casing head, Expansion Spool, etc. 5) Casing Accessories: Shoes, Float Collars, centralizers, etc. 6) Others.	ICB	円借款	・ Fluid Material については、Package-C の Mud Engineering に含めることも可能。 ・ 入札は1回で実施するが、入札者は全ての項目または幾つかの項目についてオファーすることが可能な設定とする。 ・ 実施機関は費用的に最も低価格となる契約の組み合わせを検討することで経済性を追求できる。
C. 掘削工事（付帯サービスを含む）	C	1) Drilling (with rig supply) 2) Directional Drilling 3) Mud Logging: Drilling Parameter and Cutting Control (Geology) 4) Mud Engineering 5) Wire Line /Well Logging (CBL, Caliper, etc.) 6) Casing Running 7) Fishing tools and service 8) Drilling Tools rental (those not included in the equipment of the RIG) 9) Coring 10) Non Rotate Casing Protectors (if necessary) 11) Transportation of Materials at the Site from warehouse, if needed. 12) Dewatering Service (cutting and mud waste management) 13) Others	ICB	円借款	・ 主請負者は、専業下請者の工事/サービスの全てに責任を負う。 ・ 代替案として、Package-B で示唆された「一回の入札で複数の契約を結ぶことを可能とする方法」を探ることも考えられる。 ・ Mud Engineering には Fluid Materials の供給を含めることも可能。または、Package-B の Fluid Materials に Mud Engineering を含めることも可能。

注 (*1): LCB : Local Competitive Bidding
ICB : International Competitive Bidding

出典：調査団作成

4.4 契約変更と JICA への同意申請

JICA の借款契約書には通常以下の様な規定が記述され、借入人は契約の重大な変更と契約金額の変更が生じた場合に JICA の事前合意を得ることが要求されている。

“Any modification or cancellation of a contract reviewed by JICA shall require the prior written concurrence of JICA thereto; provided however, that any change which does not constitute an important modification of the contract and which does not affect the contract amount shall not require such concurrence of JICA.”

しかしながら、数量精算方式による工事契約では下記の事由により契約金額は頻繁に変動する。

- 1) 数量明細書（BOQ）の見積精度
- 2) 変更（Variation）の指示による工事数量の増減
- 3) 物価変動による契約金額の調整
- 4) 請負者からのクレームに基づく追加費用

また、ランプサム契約においても上記 2), 3), 4) が発生した場合は、契約金額の変動を避けることはできない。

このことから、厳密に言えば毎月の費用精算時に契約金額の変動は生じているが、その度に JICA に同意申請を求めることは現実的ではないことから、実際の運用では最終的な支払金額が契約金額を確実に超過することが判明した時点で同意申請を行っているのが実態と考えられる。

尚、FIDIC Pink Book においてエンジニアは、3.1 条により契約を変更する権限は有しないが、13.1 条により工事の変更（Variation）を指示する権限は有している。

3.1 Engineer's Duties and Authority

The Engineer shall have no authority to amend the Contract

13.1 Right to Vary

Variation may be initiated by the Engineer at any time prior to issuing Taking-over Certificate for the Works, either by instruction or by a request for the Contractor to submit proposal.

このことは一見矛盾しているように見えるが、変更（Variation）は契約で規定された手続きであるので、変更によって契約金額や工期が変動しても、これは契約の変更には該当しないと解釈されている。

第5章 ENDE との協議および能力強化

2015年3月14日～3月30日の工程で、ボリビアを訪問し、ENDE に対する2回のセミナーを開催し、ENDE と協議、能力強化を図った。

現地調査参加団員は以下の4名である。なお、サウル・パディージャ(掘削市場動向調査)は、2月8日～2月21日にサンタクルスの掘削業者のインタビュー調査を実施している。

メンバー（担当）

林 幸伸（総括・調達）

百瀬 泰（地熱貯留層評価(地質)）

サウル・パディージャ(掘削市場動向調査)

相ノ山 翼(地熱井掘削)

表 5-1 現地調査スケジュール

Fechas	Programa	Ciudad	TL/Especialista en Contratos	Estudio de Tendencia de Mercado de Empresas de Perforación	Especialista en Perforación de Pozos	Geólogo
			Nobuyuki HAYASHI NK	Saul Padilla NKLAC	Tsubasa AINOYAMA GEO-E	Yasushi MOMOSE NK
15-Mar Dom		La Paz	Arribo a La Paz			
16-Mar Lun		La Paz	Por la tarde: Reunión con JICA en Oficina de Bolivia			
17-Mar Mar		Cochabamba	Por la mañana: Reunión con ENDE			
18-Mar Mié		La Paz	Por la tarde: Seminario 1 (Normas de préstamo JICA ODA, Proceso de Contratación, etc. (Guías Generales de Contratación)). En tránsito a La Paz			
19-Mar Jue		ENDE Camp	En tránsito al Sitio: Laguna Colorada			
20-Mar Vie		Uyuni	Inspección del Sitio: Laguna Colorada			
21-Mar Sáb		Uyuni	Preparación de Seminario			
22-Mar Dom		Sta Cruz	En tránsito a Sta. Cruz,			
23-Mar Lun		Sta Cruz	Entrevistas (Compañías de Perforación de Pozos)			
24-Mar Mar		Sta Cruz	Entrevistas (Compañías de Perforación de Pozos)			
25-Mar Mié		Cochabamba	Preparación de Seminario			
26-Mar Jue		Cochabamba	Seminario 2 (resultados del estudio, Mercado de Compañías de Perforación en Bolivia, Tipo de Contrato recommendable, Aspectos Técnicos, etc.)			
27-Mar Vie		La Paz	Reunión con JICA en Oficina de Bolivia			
28-Mar Sáb		Uyuni	En tránsito a La Paz			
29-Mar Dom			En tránsito a Japón/Elsalvador			
30-Mar Lun			Arribo en Tokyo			

出典：調査団作成

5.1 第一回セミナー

第一次現地調査の初めの段階で、第一回セミナーを通して、標準入札書類に関わる ENDE の理解促進・能力向上を図った。ENDE は円借款による調達に慣れていないことから、セミナーおける解説は JICA 調達ガイドラインを含む包括的な内容とした。第一回セミナーで使用した資料を、Appendix-3 に付す。3月18日(水) 9:00~13:00、ENDE ANDINA のミーティングルーム

にて実施。ENDE 側の出席は 11 名。第一回現地調査において実施したセミナープログラムを以下に示す。



セミナー
実施状況

第一回セミナープログラム

1. JICA 調達ガイドライン概要
2. 調達プロセス
 - 1) 入札書類の作成
 - 2) 事前資格審査
 - 3) 入札
 - 4) 入札評価
3. JICA 標準入札書類の概要
 - 1) JICA Works 契約(FIDIC MDB 調和化版)
 - 2) JICA Plant 契約
 - 3) JICA Goods 契約
 - 4) FIDIC Yellow Book
4. 数量精算契約とランブサム契約
5. 発注者・コントラクターの責任範囲とリスク配分
6. エンジニアの役割
7. クレームの処理プロセス
8. 紛争の処理プロセス（特にディスピュートボード）
9. IADC の掘削工事契約条件書の概要

5.2 第二回セミナー

第一次現地調査の終盤に開催した第二回セミナーにおいて、調査結果の内容と最適な掘削業務契約形態を ENDE に提示し、ENDE との協議を通して理解の促進を図った。第二回セミナーで使用した資料を Appendix-3 に付す。3月26日（木）9:00~13:00、ENDE ANDINA のミーティングルームにて実施。ENDE 側の出席は 13 名。第二回現地調査において実施したセミナープログラムを以下に示す。

第二回ワークショッププログラム

1. ボリビア国内市場動向
 - 1) ボリビアにおける坑井掘削市場
 - 2) ボリビアにおける坑井掘削契約の特徴
 - 3) ボリビアにおける坑井業者
2. 本事業の技術面での特性
3. 推奨される掘削業務契約形態
 - 1) 支払形態
 - 2) 契約条件書
 - 3) 契約パッケージ

第6章 本事業に係る提案事項

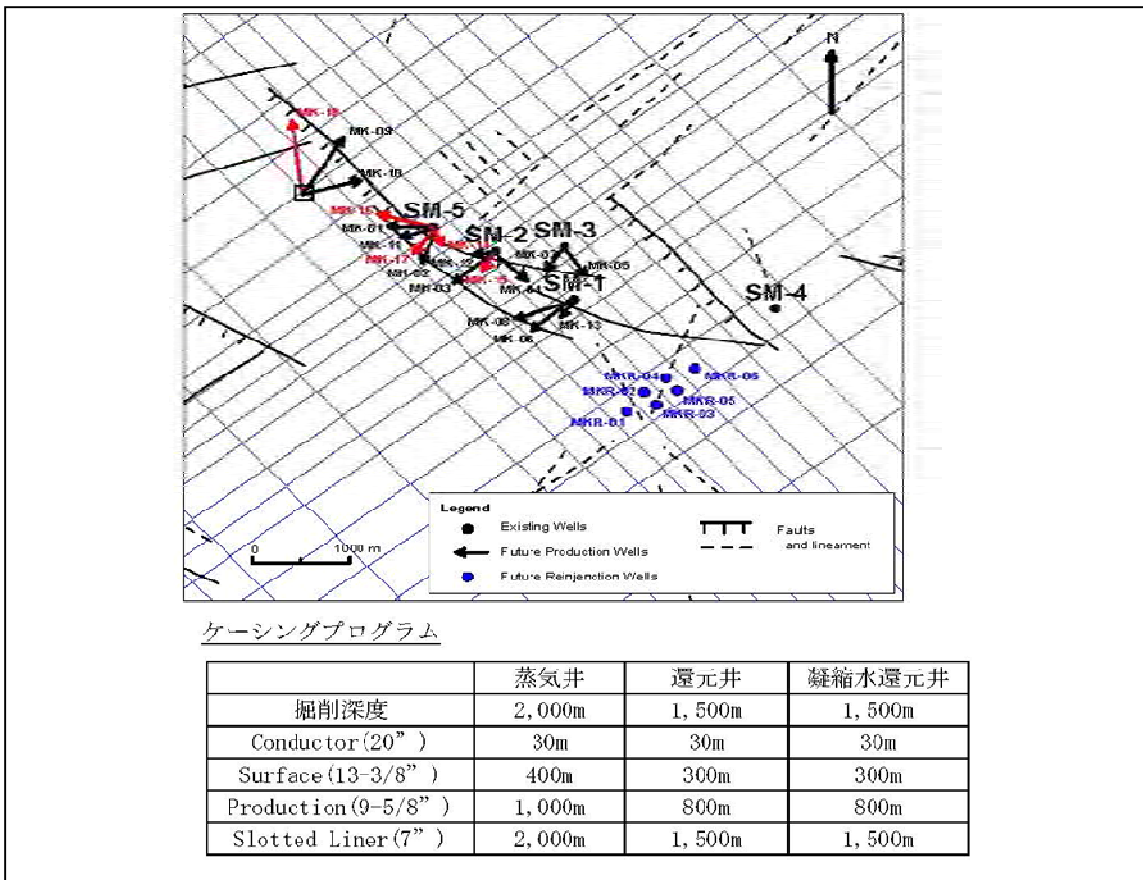
6.1 掘削ターゲット選定

(1) 掘削ターゲットの妥当性レビュー結果

地質、地化学結果および物理探査結果等から、地熱系概念モデルの検討を実施し、過去の温度検層や噴出試験から、既存調査井の能力を検証し、掘削ターゲットの妥当性を検討した。

- 本調査では、CGG（2013）による3次元比抵抗構造の解析を行うことにより、より深部までの地熱貯留層の推定が可能となり、地熱貯留層を規制する断層やキャップロックの分布が明らかになった。
- JETRO（2008）にて提唱された地熱系概念モデルと比較すると、地熱貯留層分布に大きな乖離は見られない。また、WNW-ESE系の断層に沿って熱水流体が上昇すると予想される。従って、現在の新規坑井掘削の位置およびターゲットの方向性はおおむね妥当と判断できる。
- しかしながら、掘削ターゲットやケーシングプログラム、坑口位置などを含めた掘削計画の詳細検討は未だ実施されていない。ラグナ・コロラダ地熱発電所建設事業（第一段階）に掘削が予定されている坑井（生産井4本、還元井3本）について、掘削ターゲット選定および作業工程案作成する必要がある。

現時点で設定されているのは、地熱貯留層シミュレーションに用いた下図の通りである。



出典：JICA(2010)より抜粋

図 6-1 坑井掘削位置計画図

(2) 掘削ターゲット選定を実施する上での不足情報や懸念事項

今後掘削ターゲット選定を実施するにあたり、以下に留意して実施する必要がある。

- (a) 既存坑井の逸水掘削区間が長く、ピンポイントでフラクチャ深度を推定できない。このため、ターゲット深度には幅を持たせる掘削計画が必要である。

既存調査井では、表 3-5~表 3-10 に示したように、逸水掘削区間が長くフラクチャ深度をピンポイントで特定できない。このため、下記に示す各調査井の裸坑部の中で、どの深度が生産ゾーンとなっているかは絞り込めていない。このため、掘削ターゲットは、深度区間を点としては特定できず、約数百mの深度区間として設定せざるを得ない。

調査井	生産区間（区間長）
SM-1	738 m-1178.5 m (440.5 m)
SM-2	606 m-1486.5 m (880.5 m)
SM-3	731 m-1406.0 m (675.0 m)
SM-4	681.3 m-1726.2 m (1044.9 m)
SM-5	878.3 m-1705.0 m (826.7 m)

なお、既存調査井で実施されている PTS 検層結果のグラフ(Appendix-2)を見直した所、以下の2か所においては、フラクチャ - が有る可能性が高いと考えられる。ただし、本調査では報告書に記載されたグラフ図しか利用できなかったため、断言することはできない。元データが入手できれば、同深度付近以外も含め、更に詳細な検討が可能となる。

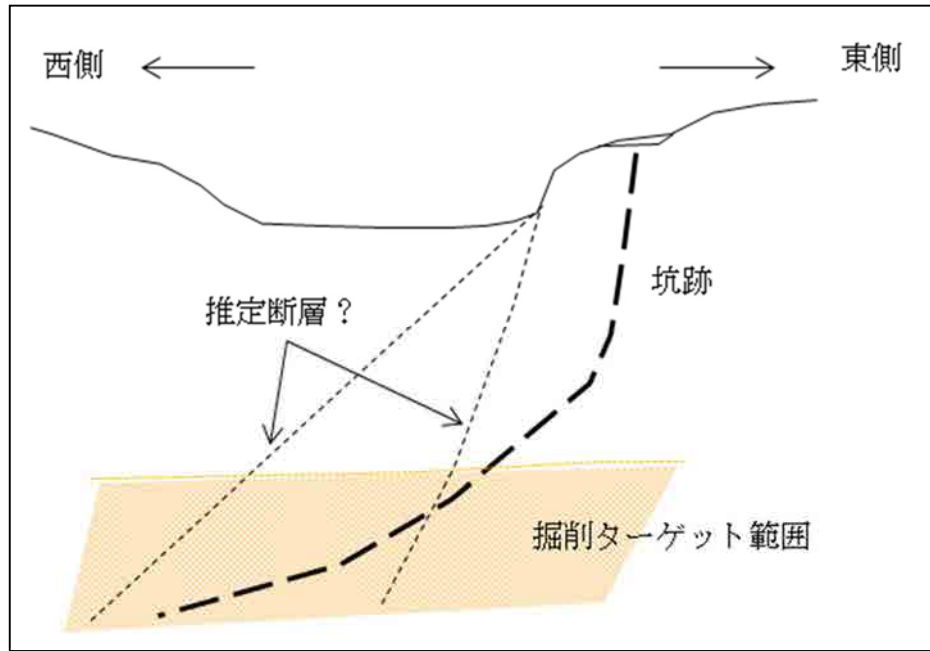
フラクチャ - 想定深度 理由

SM-3 深度 1275 m 付近： 同深度でスピナー回転数が不連続である。

SM-4 深度 1520 m 付近： 同深度以深でスピナー回転数が深くなるほど低下している。

- (b) 断層が西側傾斜で緩傾斜の可能性はある。

既存報告書では、断層面は西側への急傾斜であると想定されているが、根拠は示されていない。断層の傾斜が緩い場合、坑井は断層の東側から掘削予定のため、下図に示すように、坑跡が断層面を追いかける形となり、最悪の場合、断層に到達しないことが起こり得る。



出典：調査団作成

図 6-2 坑跡のイメージ図

- (c) 還元井の地質情報が乏しく、透水性、深度の設定、還元能力は明らかではない。

これまで、生産井の調査は実施されているが、還元井の調査は殆ど実施されていない（利用できる情報としては SM-4 に熱水を還元した際のデータのみである）。既存の電気探査結果、MT 探査結果および地形判読によると、還元井近傍に断層が想定されるが、断層の方向性、透水性等は明らかではない。

- (3) 掘削ターゲット選定を実施する上で必要な検討項目

以上の不足情報や懸念事項を補完するために、以下の検討項目を提案する。

- (a) 流量検層のデータ入手と再解析

流量検層データの再解析を行うことにより、逸泥深度を特定することが可能な場合がある。本業務内では、流量検層の元データを入手することが出来なかったが（入手できたのはグラフのみ）、検層元データがあれば、再解析が可能である。利用できない場合、ターゲットはある程度の深度幅を持つものとなる。

この場合、本事業の一本目の坑井掘削中に逸水深度データを詳細に記載し、また地質情報をできる限り高頻度に収集し、その後の坑井掘削の基礎資料を蓄積することが望ましい。地質情報の面では、例えば、カッティングスの流体包有物の均質化温度を、50m 間隔若しくはそれ未満毎に調べることにより、地熱貯留層温度を比較的容易に推定することができる。

- (b) 坑口位置を断層の西側へシフトさせる可能性検討

地形やパイプラインの条件を検討する必要があるが、坑跡が断層に高確率で遭遇するように計画することが可能になる。しかしながら、本事業第一段階第一期における新規井戸は、既存の SM-2 および SM-5 プラットフォーム付近からの掘削を計画しており、谷側へ移動するのは、景観影響面も含め難しいという障害がある。

- (c) 調査井 SM-4 のデータおよび比抵抗分布の再解析による還元井の掘削計画

調査井 SM-4 が比較的、還元ゾーンに近いため、還元井掘削計画上の参考にすることは可能である（噴気試験時に SM-4 に還元した実績がある）。また、還元井掘削計画には、比抵抗分布の再解析による検討が有効と考えられる。

(4) 掘削ターゲット選定の提案

以上を考慮した上で、本業務の中で、ラグナ・コロラダ地熱発電所建設事業（第一段階第一期）に掘削が予定されている坑井（生産井 4 本、還元井 3 本）について、掘削ターゲット選定および作業工程案作成を実施し、坑井掘削の技術仕様ための資料整理を早急に行うことを提案する。具体的には、以下の作業を実施し、作業期間は 3 ヶ月程度と考えられる。

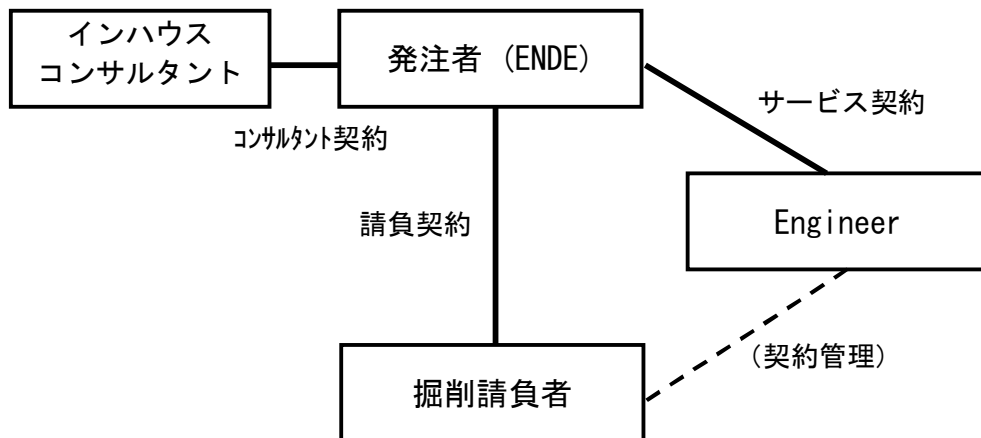
- 坑口の位置、ターゲットの座標や坑跡
- ケーシングプログラム
- 図面類作成
- 作業計画案

6.2 施工管理体制の強化

本プロジェクトは、今後請負者の調達と施工の段階に入るが、プロジェクトを円滑に進めるためには、発注者側にしっかりとした施工管理体制を築く必要がある。管理体制は以下の点を考慮して計画する必要がある。

- 1) ボリビアでは、80 年代後半から 90 年代前半にプロジェクト地域で実施した調査井以降、地熱坑井開発の実績は無く、ENDE は坑井掘削の経験や技術が十分ではない。
- 2) 4.1.6 章で述べたように、本事業に適用される支払形態は、地熱井掘削事業に一般的に採用されている「掘削時間精算方式」とすることが実践的であると考えられる。この場合、現場の進捗や状況に応じ請負者に適切な指示や変更を与えたり、請負者の責任に帰する進捗の低下について支払の対象としないように、ENDE 側の密接な工事監理が重要となる。
- 3) 4.2.6 章で述べたように、本事業に適用される契約条件書は JICA 標準入札書類（工事）で採用されている FIDIC Pink Book が適切であると考えられ、工事契約の管理を司る Engineer を配置する必要がある。Engineer は上記 2) に記述した工事監理を引き受けることになる。
- 4) ENDE は現在、円借款資金によりコンサルタントの調達を進めている。コンサルタントの立場は、基本的に ENDE に技術的なアドバイスを提供するインハウスコンサルタントであり、請負者に対して直接的に指示を行ったり、各種の証明書を発行するという FIDIC 契約における Engineer の役割は担わせてはいない。また、現時点で想定されているコンサルタントの要員投入量も Engineer の役割を担うには十分とはいえない。

上記より、発注者側の管理体制を強化し FIDIC Pink Book に適合させるためには、新たに Engineer の雇用が必要となる。従って、工事が開始される時点までに Engineer を選定・配置することを提案する。坑井掘削作業時の実施体制のイメージを図 6-3 に示す。



出典：調査団作成

図 6-3 坑井掘削実施体制概念図

上記の強化策は、Engineer を新たに配置するという提案であるが、代替案としてコンサルタントの要員を増強して、コンサルタントに Engineer の機能と役割を持たせることも考えられる。

FIDIC Pink Book では、3.1 条において Engineer が自らの裁量を行行使する前に発注者の事前承認を要する項目を以下の通り定めており、この中には、4.2 条に規定される予見不可能事象に遭遇した場合のクレームの決定や、13.1 条に規定される変更の指示が含まれている。

3.1 Engineer's Duties and Authority

The Engineer shall obtain the specific approval of the Employer before taking action under the following Sub-Clauses of these Conditions:

- (A) *Sub-Clause 4.12: agreeing or determining an extension of time and/or additional cost.*
- (B) *Sub-Clause 13.1: instructing a Variation, except;*
 - (i) *in an emergency situation as determined by the Engineer, or*
 - (ii) *if such a Variation would increase the Accepted Contract Amount by less than the percentage specified in the Contract Data.*
- (C) *Sub-Clause 13.3: approving a proposal for Variation submitted by the Contractor in accordance with Sub-Clause 13.1 or 13.2.*
- (D) *Sub-Clause 13.4: specifying the amount payable in each of the applicable currencies.*

即ち、ENDE には事前承認の是非を判断するための技術的な知見と経験が必要となる。従って、コンサルタントに Engineer の機能を担わせる場合においても、ENDE をサポートする技術専門家の配置が必要になると考えられる。

6.3 契約パッケージにおける留意点

契約パッケージは、準備工事、掘削資材供給および掘削工事が提案される。それぞれのパッケージにおける留意事項は以下が挙げられる。

(1) 準備工事

準備工事は、リグ基礎、アクセス道路および給水設備（水井戸から掘削地点まで）等の建設および維持管理を含む。準備工事を掘削業者に委託することも可能ではあるが、委託した場合は掘削業者との契約後に準備工事が開始されることになるため、特に工期短縮を図るためには、掘削業者との契約前から実施機関の責任において準備工事が実施されることが推奨される。なお、建設や補修の設計仕様および範囲は、詳細設計時に測量を実施した上で、数量を確定する必要がある。

- リグ基礎は、5000 m² 程度の整地が必要であり、抗井掘削前に建設を行う。現計画ではリグ基礎の生産井位置は、既存坑井 SM-2 および SM-5 周辺の 2 箇所、還元井は SM-2 から約 2 km 南東側に計画されている。ただし、これら井戸位置は、新規井戸から得られた情報により、必要に応じターゲットの位置を適宜修正する必要がある。従って、全てのリグ基礎建設を、坑井掘削開始前に終了する計画ではなく、計画を修正の可能性を考慮して、次に予定されるリグ基礎整備を坑井掘削と並行作業で行うことが望ましい。ただし、掘削作業開始前には、リグ敷地の整備は完了してはならない。
- アクセス道路は、リグ運搬可能な道幅 4 m 以上を確保する必要がある。路面が悪い箇所は、路面には厚さ 10cm 程度の砂利を敷設する。現地予察によると、ウユニからプロジェクト地点までは、道幅も広く道路は概ね良好であるが、数か所において渡渉が必要であり、特に、南緯 21° 51' 15.8" 西経 67° 30' 45.8" から南緯 21° 59' 25.7" 西経 67° 34' 1.7" の範囲の約 18km 区間は補修が必要と考えられる。さらに、掘削期間中に、冠水や土砂崩れ等で、通行が出来なくなった場合は補修を実施する。
- 坑井掘削に必要な水井戸からの給水量を確保する。本事業において貯水待機無しで掘削工事を進める為には、1 本ずつ掘削を進める場合は約 40L/sec、仮に掘削工期短縮の為に 2 本同時掘削を実施する場合は約 2 倍の 80L/sec の水の供給が必要となる。また、水量が時間とともに低下した場合は、追加の井戸掘削も含め、必要な水量を保つための対策を、実施機関が検討および実施する。

(2) 掘削資材供給および掘削工事（付帯サービス含む）

掘削資材供給と掘削工事を分割して 2 パッケージ、もしくは分割せずに 1 パッケージとすることが考えられる。パッケージ分けにおける実施機関に係るリスクを表 6-1 にまとめる。

表 6-1 パッケージ分けによる実施機関に係るリスク比較

項目	2 パッケージ	1 パッケージ
1. 資材の品質の確保		
実施機関の密接な管理による資材品質の確保 ^{*1}	✓	
2. 工期遅延リスクの回避		
資材調達の先行による工期遅延リスクの回避	✓	
契約分割による調達手続き遅延リスク回避		✓
掘削計画変更に伴う資材数量増加への柔軟な対応	✓	
3. コスト低減		
調達管理費の削減によるコスト低減	✓	
資材業者の複数化によるコスト低減	✓	
4. 実施機関の管理上の負担軽減		
管理上の作業の低減		✓
資材の不足や過剰注文の回避		✓

出典：調査団作成

注：優れているものを✓で示す。

*1: 実施機関が、品質確保のため資材の仕様を指定し管理することは可能であるが、1 パッケージにおいては、どうしても掘削業者はコストを削減する方向、つまり品質を下げる方向に意思が働いたため、実施機関が完全に品質をコントロールすることは難しい。

実施機関はそれぞれの優劣を考慮して、パッケージ分けを決定する必要がある。表 6-1 に示す通り、2 パッケージは 1 パッケージに比べ、品質管理、工程管理およびコストの面で優れていると考えられる。なお、工程管理においては、1 パッケージの場合、掘削業者が資材を調達するため、2 パッケージの場合に起こり得る実施機関側の調達手続き遅延リスクは回避されるが、坑井掘削中においては、掘削ターゲットやそれに伴う掘削計画は、新規井戸から得られた情報を基に、適宜修正や変更が必要となることが予想される。実施機関の都合による掘削計画変更で、資材の数量に変更が生じた場合、1 パッケージでは、こうした変更に伴う資材調達は、掘削業者のクレームの対象となり、数量が増加した場合は、資材が調達できないことを理由として、掘削工期が遅れる可能性がある。

ただし、2 パッケージの場合、実施機関が資材の品質や調達に責任を持つことから、資材の仕様作成においては、掘削工事において問題が生じないような仕様（十分な品質を確保できる）とし、受け入れ検査を入念に実施する必要がある。

以上

第7章 引用文献

CGG, 2013. LAGUNA COLORADA MT DATA INVERSION Report (未公表).

Delgadillo and Puente, 1998. The Laguna Colorada (Bolivia) Project: A Reservoir Engineering Assessment.

Di Paola M, Luccioli F. and Rico Calderon G., 1990. Geothermal Feasibility Study of Laguna Colorada-Bolivia, Geothermal Resources Council, vol.14, Part II, pp.867-872.

ENDE, 1986. Seccion C Invetigacion gravimetroia,1986 Informe Geofisico, pp.34-43.

ENDE, 1994. PROYECTO GEOTERMICO LAGUNA COLORADA AMPLIACION DE PERFORACIONES GEOTERMICAS - PROFUNDIZACION DEL POZO SOL DE MAÑANA -4 (SM -4).

ENDE, 1994. PROYECTO GEOTERMICO LAGUNA COLORADA AMPLIACION DE PERFORACIONES GEOTERMICAS - PROFUNDIZACION DEL POZO SOL DE MAÑANA -5 (SM -5).

ENEL, 1987. APPLICATION OF ISOTOPE AND GEOCHEMICAL EXPLORATION IN THE LATIN AMERICAN REGION.

ENEL, 1989. Estudio de Factibilidad Geotérmica en el Area de Laguna Colorada - INFORME SOBRE EL POZO SOL DE MAÑANA 1.

ENEL, 1989. Estudio de Factibilidad Geotérmica en el Area de Laguna Colorada - INFORME SOBRE EL POZO SOL DE MAÑANA 2.

ENEL, 1989. Estudio de Factibilidad Geotérmica en el Area de Laguna Colorada - INFORME SOBRE EL POZO SOL DE MAÑANA 3.

ENEL, 1990. Estudio de Factibilidad Geotérmica en el Area de Laguna Colorada - INFORME SOBRE EL POZO SOL DE MAÑANA 4.

JETRO, 2008. 平成 19 年度 地球環境・プラント活性化事業等調査 ポリビア・ラグナコロラダ地熱発電設備建設事業調査 報告書.

JICA, 2010. ポリビア多民族国 ラグナ・コロラダ（ソル・デ・マニャーナ）地熱開発事業準備調査 報告書

JICA, 2013. ポリビア国 ラグナ・コロラダ地熱発電所 建設推進プロジェクト 事業完了報告書

NEDO, 1984. 地熱開発促進調査報告書 No.3 栗野・手洗地域

NEDO, 2003. 平成 14 年度 地熱開発促進調査 No.C-4 白水越地域 資源評価（第 4 次）報告書

高倉, 2014, Verification of the Effectiveness of the Audio-magnetotelluric Method for Geothermal Exploration óBased on its Demonstration Experiment in the Ogiri Geothermal Field, Kagoshima, Japan-

地質調査総合センター, 2004. Gravity CD-ROM of Japan Ver. 2, digital geological map P-2.