

ジブチ国

ジブチ国地熱開発のための
情報収集・確認調査
(物理探査)

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

産公
JR
15-087

ジブチ国

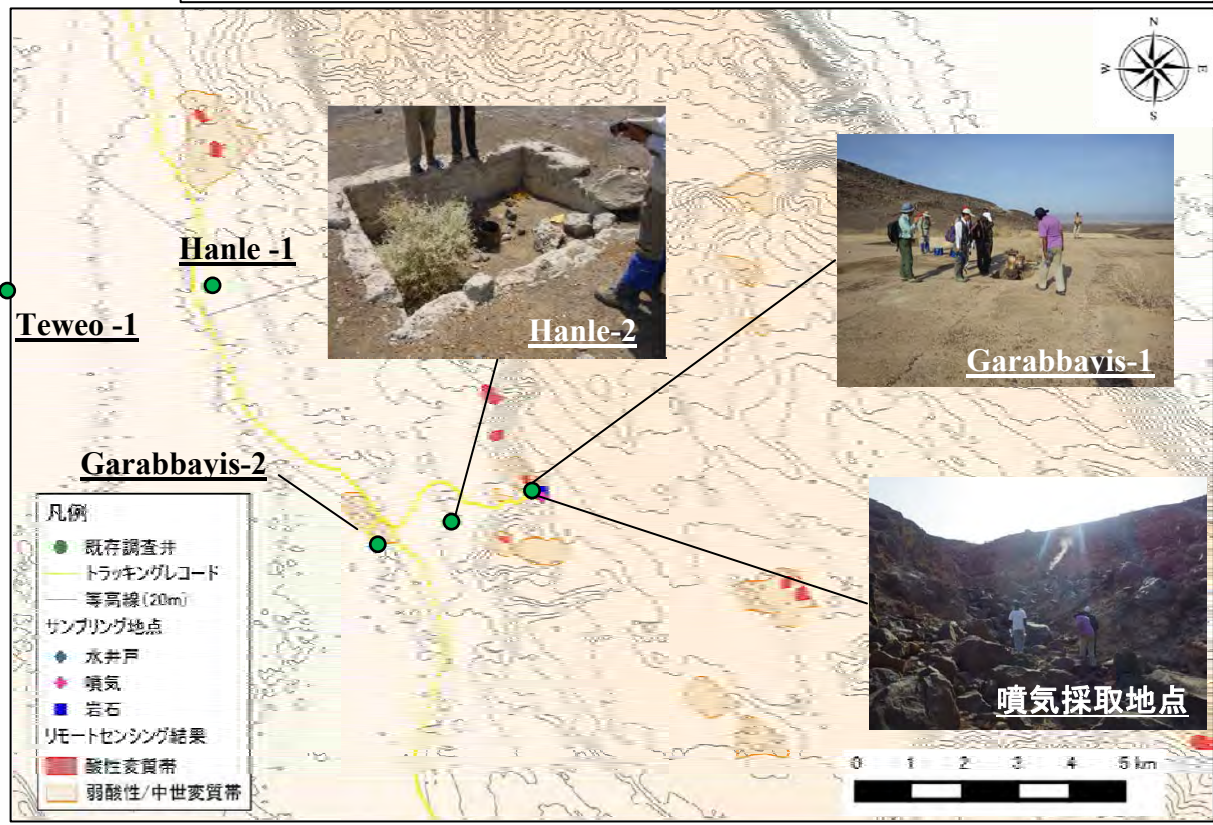
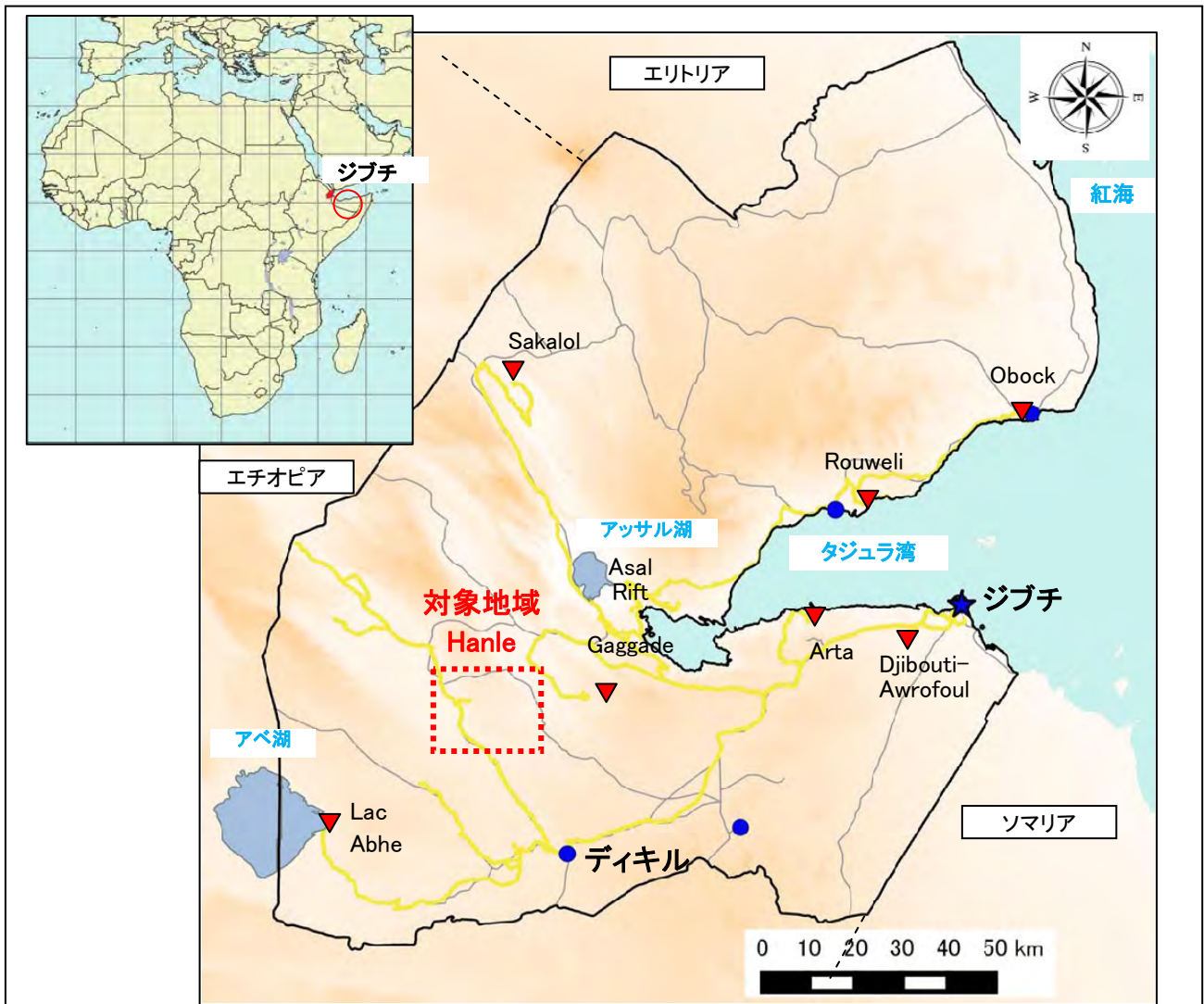
ジブチ国地熱開発のための
情報収集・確認調査
(物理探査)

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



調査対象地域位置図

略語表

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CERD	Centre for the Study and Research of Djibouti
DEM	Digital Elevation Model
EDD	Electricite de Djibouti
ESIA	Environmental and Social Impact Assessment
EIS	Environmental Impact Statement
GENZL	Geothermal Energy New Zealand Ltd.
GRMF	Geothermal Risk Mitigation Facility
ICEIDA	Iceland International Development Agency
IPP	Independent Power Producer
ISOR	Iceland Geosurvey
JICA	Japan International Cooperation Agency
a.s.l	Above Sea Level
MT	Magneto-Telluric Method
NCG	Non Condencible Gas
ODDEG	Djiboutian Office for Development of Geothermal Energy
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PPP	Public-Private Partnership
R gas	Residual Gas
TD	Total Depth
TEM	Transit Electro-magnetic Method
TOR	Terms of Reference
TVD	True Vertical Depth
USAid	US Agency for International Development
WB	The World Bank

ジブチ国地熱開発のための情報収集・確認調査 ファイナルレポート 要 旨

1. 調査の概要

1.1 調査の背景

ジブチ国における地熱開発は、1970年代から Asal Rift を中心に進められている。しかし、地熱流体の塩分濃度が海水の7倍近い値を示すことから、スケール付着の問題が想定されている。また、ジブチ国内の地熱開発の実施体制や民間企業の投資環境の未整備も要因となり、事業の実現には未だ至っていない。係る状況下、2013年8月の安倍総理によるジブチ国訪問の際、グレ大統領から地熱開発への協力要請がなされた。これを受けて、我が国は技術協力を通じた地熱開発事業化への支援を表明している。

この様な背景から、JICAは2014年に「地熱開発にかかる情報収集・確認調査」(JICA(2014))を実施し、ジブチ国全土の地熱有望地域にて地質・地化学調査を行った。その結果、複数の開発有望地域が確認され、地熱資源量・作業性・環境的側面の評価から、Hanle、Arta、Nord Goubet が開発優先順位の高い地域として位置づけられた。

1.2 目的

本調査では、JICA(2014)で提案された有望地点である Hanle 地域を対象に物理探査や地熱概念モデルの構築等を行い、更なる調査(試掘・資源量評価)の是非を検討するのに必要な情報を収集・整理することを目的とする。

2. 既存調査のレビュー

Hanle 地域を対象とした既存調査において実施された、地表調査(地質・地化学調査、物理探査)結果および既存調査井データの収集・分析および考察を行った。

Aquater(1989)、Jalludin(2009)では、上記の調査結果から、Hanle 平原にはマグマ溜りや貫入岩に起因する熱異常はないと結論付けており、地熱系の存在が否定されている。ただし、台地側に複数個所みられる噴気の存在は、その供給源となる地熱系が対象地域に存在する可能性を示唆している。

上述の既存調査結果を踏まえ、Hanle 地域の地熱系について想定される項目は以下の通りである。

1. 既存調査井の温度分布から、地表で見られる噴気の原因となる熱源が、Hanle 平原の地下ではなく、平原北東の台地部に存在する可能性が示唆される。これは、噴気帯が台地で観察されることと一致する。
2. Hanle 平原で掘削された試掘井の温度が深部まで低温である理由は、Hanle 平原の地下水流動の存在によるものと推定される。

3. JICA（2014）の地化学調査では、最高 250℃程度の貯留層が存在する可能性が指摘されている。

以上より、Hanle 平原の北東に広がる台地部を中心に地熱構造の存在を想定できるものと考えられる。このことを明らかにするため、同台地部において MT/TEM 探査を実施した。

3. 物理探査（MT/TEM 探査）

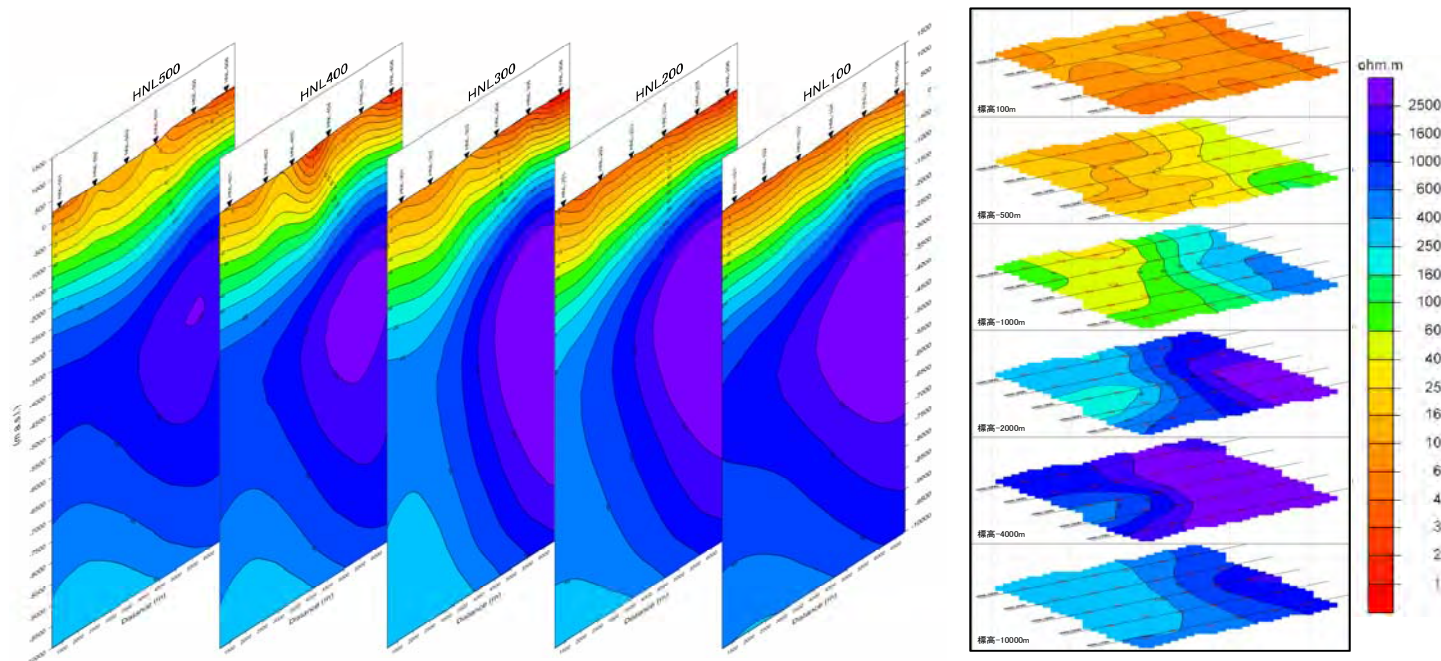
3.1 探査の目的

調査対象地域において、地下の比抵抗構造を把握するために電磁探査法の一手法である MT 法探査を実施した。また MT 法で得られたデータの補正を行うために TEM 法探査をあわせて実施した。次いで、取得データの処理・解析を行い、調査対象地域地下の比抵抗構造を求めた。得られた比抵抗分布は地質構造の推定、地熱貯留層モデルの構築および調査ボーリング計画に使用した。

3.2 解析結果

MT/TEM 探査結果より作成した比抵抗分布断面および比抵抗分布平面パネルダイヤグラムを図 1 に示す。Hanle 地域の比抵抗構造の特徴は以下の通りである。

- ・比抵抗構造は地表から深部に向かって浅部の低比抵抗層、厚い中間部の高比抵抗層、深部の低比抵抗層の三層構造を成し、比抵抗値は概ね $1\ \Omega\text{m}$ から $2500\ \Omega\text{m}$ 程度までの比抵抗が分布する。
- ・浅部の低比抵抗層と中間部の高比抵抗層の境界としての $100\ \Omega\text{m}$ のコンターラインは南西側で標高-1500m から-2000m あたりに位置し、大局的には北東側へ向かって浅くなる傾向を示し、北東側では標高-500m から-1000m あたりに位置する。
- ・調査地域全体で見ると大局的には南西側から北東側に向かって相対的に低比抵抗から高比抵抗に変化する傾向が認められるが、標高-1000m から-2000m にかけてはコンターラインの間隔が相対的に狭くなっており、比抵抗が急激に変化する比抵抗の不連続構造を示唆する。
- ・調査地域の平原側で浅部の低比抵抗層は厚く、台地側で薄くなっている。また中間部の比抵抗分布は台地側で高比抵抗を示し、平原側では低比抵抗を示す。比抵抗が急激に変化する比抵抗の不連続部は主に平原と台地の境界部に一致している。
- ・すべての測線で北東側の標高-4000m から-5000m 付近で $2500\ \Omega\text{m}$ 以上の最も高い比抵抗を示し、その高比抵抗部は HNL200 から HNL300 を中心として広く分布する。



出典：調査団

図1 比抵抗分布パネルダイヤグラム（左図：断面、右図：平面）

4 地質・地化学補足調査

4.1 地形地質概説

調査地域における主な地形地質の特徴は、以下に示すとおりである。

- ・ 調査地域は第四紀の Afar Stratoid の火山岩類が広く分布する。主な地質は下位から下部玄武岩層（2.0-2.7 Ma）、上部玄武岩層（1.8-2.2 Ma）、最上部玄武岩層（1.25-1.65 Ma）であり、北部には流紋岩層（1.9-2.6 Ma）が分布する。
- ・ 断層の走行は北西-南東方向が支配的である。特に、溶岩台地の北東、南西端には大規模な断層が認められ、それぞれ平原側へ傾斜している。

4.2 現地調査および室内解析

調査地域における地熱徴候の分布を確認するために、地表踏査を実施した結果、物理探査実施範囲周辺の3箇所にて噴気帯が確認された。このうち、最も規模の大きい地点では、NW-SE 方向約 500m にわたり地表高温域の分布が確認された。

本調査では地熱蒸気の供給範囲とガス性状の時間変化をより詳細に把握するために、JICA (2014) と同地点を含む 2 箇所の噴気ガス採取・分析を行った。分析結果をもとに作成した噴気ガスの He-Ar-N₂ 三成分系図から、本調査と JICA (2014) で採取した噴気ガスが同じ化学組成を示し、地熱貯留層に起源を持つ地熱蒸気が供給されていることが明らかである。また、地化学温度計の計算結果から、同地区の地下には最高で 230~260℃程度の地熱貯留層が賦存する可能性がある。

5 貯留層概念モデル・掘削ターゲットの提案

5.1 貯留層概念モデルの構築

(1) 調査結果の整理

Hanle 地域の地熱貯留層概念モデルの要素を、既存調査および物理探査結果をもとに解釈し、表 1 に整理した。

表 1 既存調査結果・物理探査結果から得られる地熱構造

Observation	Geothermal System	Interpretation
既存坑井 5 本の 500 m 深における温度は、平原から台地方向に向かい 40°C =>90°C =>120°C と変化する	熱源	熱源は、台地の地下に存在する。
噴気は台地部にのみ確認される		
確認済みの噴気地点は、支配的な断層の延長上に位置する	貯留層	噴気は（流紋岩/下位玄武岩）断層に沿って生じている。
噴気は上位玄武岩の末端部に位置する	貯留層	上位玄武岩がキャップロックの一部となっている。
地化学調査の結果、地表噴気はマントル起源ガスを含み、最高温度は 260°C 程度を示す	流体	高温流体の存在。
Hanle 平原側坑井（Garabbayis-2: GL-73m）の地下水位が台地側坑井（Garabbayis-1: GL-112m）より高い	流体涵養	Hanle 平原側から台地側への地下水涵養がある。
平原と台地の境界で比抵抗構造が急変する	大規模構造	平原と台地の境界部で大きな断層が存在する。→貯留層の境界
台地深部（海拔標高約-3000m 以深）に 1000 Ωm 以上の高比抵抗帯がある	熱源	玄武岩または流紋岩の貫入岩による温度上昇帯の可能性はある

出典：調査団

(2) 地熱貯留層概念モデルの提案

現段階において、Hanle 地域の地熱貯留層が形成直後の早期、熱水対流系が安定して存在できる中期、地熱系が衰退する晩期のいずれに相当するかは不明である。そこで、それぞれの時期について個別に地熱貯留層概念モデルを構築し、それぞれケース(a), (b), (c)として表2にまとめる。また、各ケースの概念図を図2、図3および図4にそれぞれ示す。

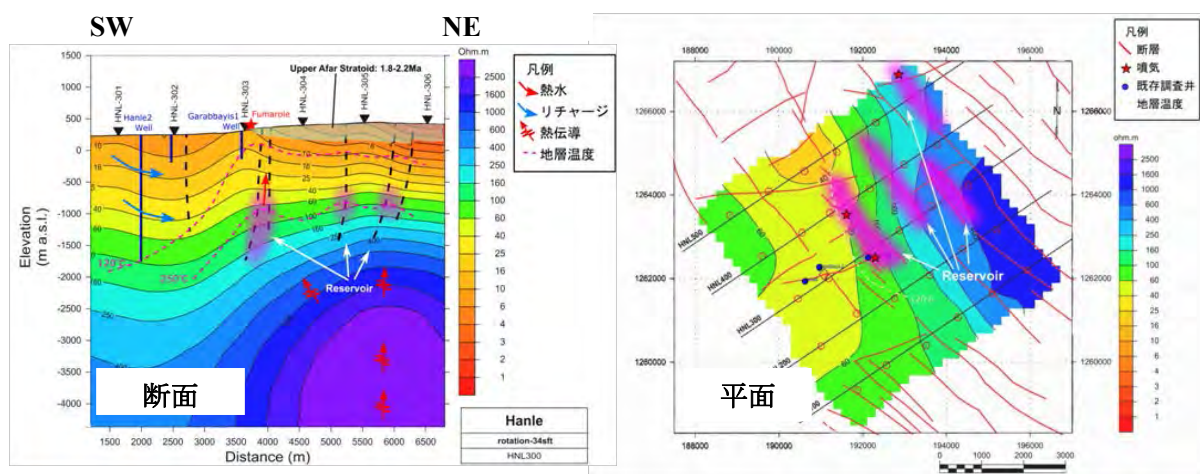
表 2 貯留層概念モデル

		ケース(a)	ケース(b)	ケース(c)
貯留層の状態		熱源貫入から時間がたつておらず、高温貯留層が局所的に存在する	地熱系が十分に発達し、天水起源地熱流体が対流することで、広範囲に貯留層が形成される	熱源からの熱供給が減衰に伴い、貯留層温度が低下する
貯留層	分布域	台地下の断層周辺の狭い範囲にのみ分布する	台地下の主要な断層によって区切られた範囲に、面的に分布する	台地下の断層周辺の狭い範囲にのみ分布する
	透水性	低	高	低
	温度	最高 260°C程度	最高 260°C程度	最高 260°C程度
流体	起源	Hanle 平原起源の地下水涵養が想定される	Hanle 平原起源の地下水涵養が想定される	Hanle 平原起源の地下水涵養が想定される
	上昇域	熱源上部の断層に沿って上昇域が形成される	熱源上部の断層に沿って上昇域が形成される	熱源上部の噴気が確認される断層に限り上昇域が形成される
熱源		深度 3km 以深に分布する玄武岩もしくは流紋岩質の貫入岩と想定される		

出典：調査団

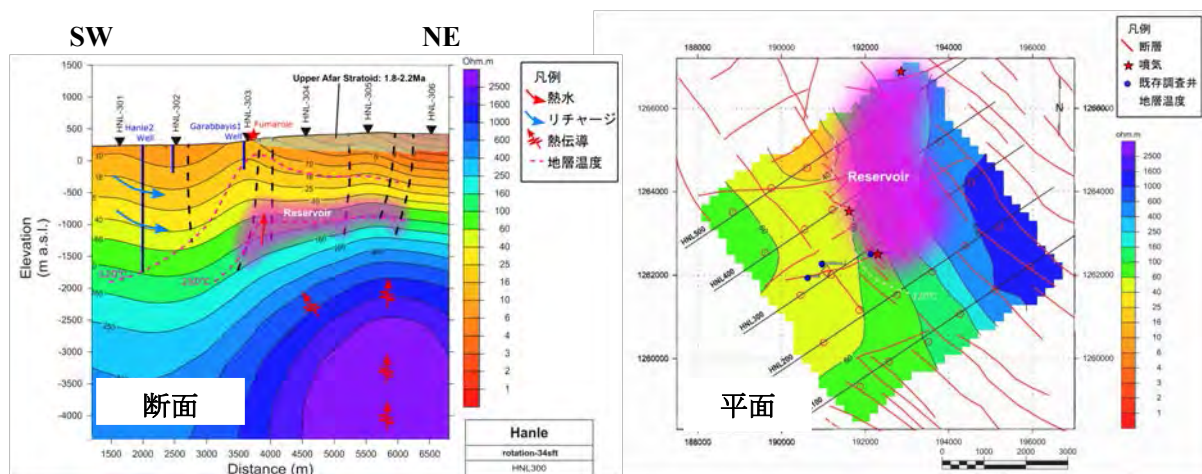
(3) 地熱資源量の概算

前述の地熱貯留層概念モデルをもとに、確率的手法を用いた「容積法」による資源量の概算評価を行った結果、「推定される地熱資源量 (Inferred Geothermal Resource)」は、最頻値で約 33 MW、生起確率 80%で約 17MW、生起確率 20%で約 86 MW となった。



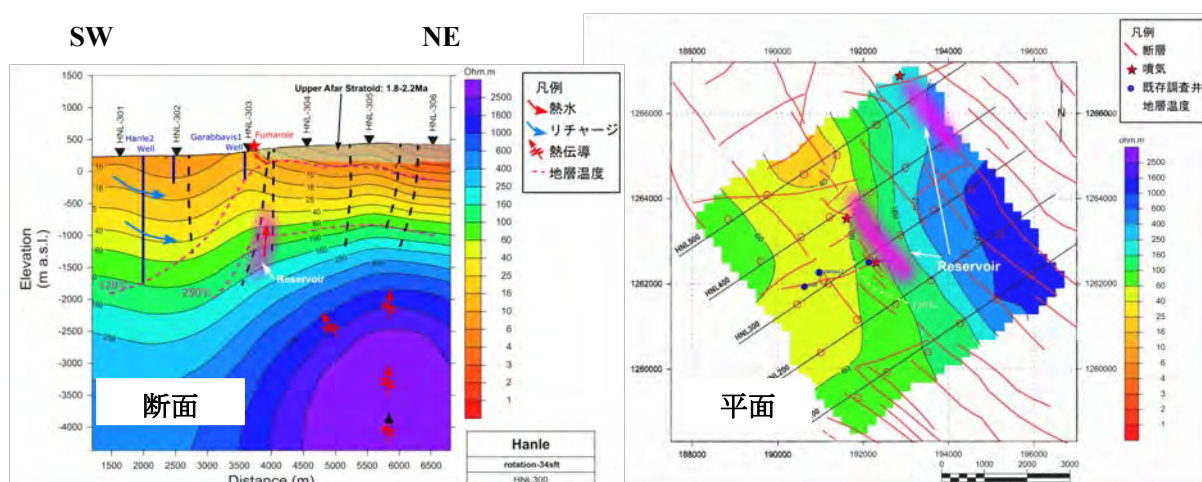
出典：調査団

図 2 地熱貯留層概念モデル：ケース (a)



出典：調査団

図3 地熱貯留層概念モデル：ケース (b)



出典：調査団

図4 地熱貯留層概念モデル：ケース (c)

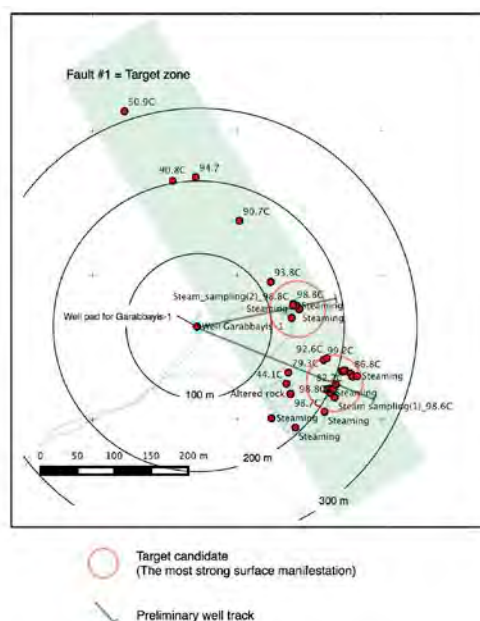
5.2 掘削ターゲットの選定

掘削ターゲットを、前述の3つの地熱系概念モデルを用いて検討する。

考案した3つの地熱系概念モデルでは、いずれも地熱貯留層は断層沿いに発達すると考えた。そのうち、Fault-1はどのモデルにおいても貯留層として捉えられる。同断層は地表で見られる優勢な地熱兆候と重なることから、Fault-1はGarabbayis地区において最も優先度の高いターゲットと認識できる。掘削ターゲットの検討では、平面におけるターゲット位置、ターゲット深度、および坑口位置の三つの要素を考慮する必要がある。

(1) ターゲット位置

Fault-1の地熱兆候地のうち、最も優勢な地熱兆候地を平面図上のターゲット候補とし、その位置を図5中に示した。

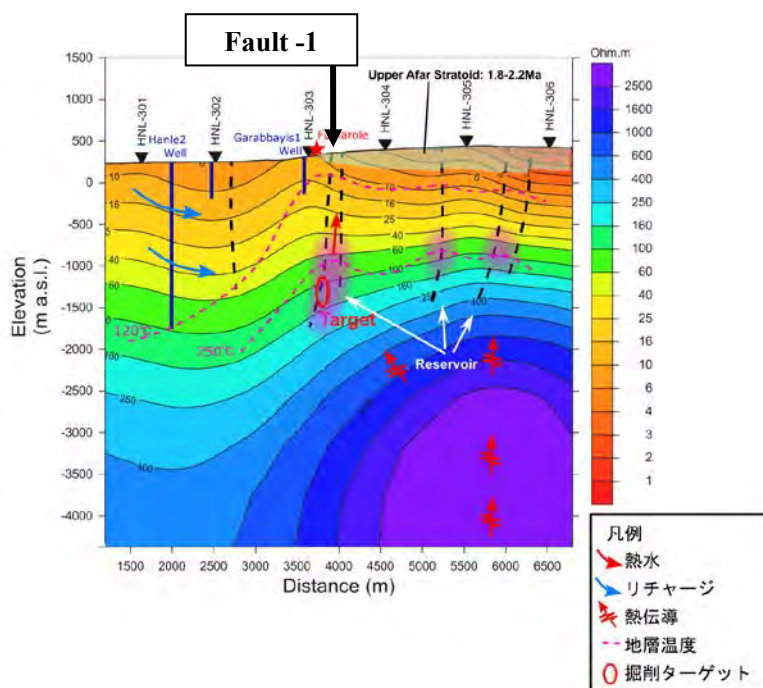


出典: 調査団

図5 Garabbayis 地区における試掘井のターゲット平面図

(2) ターゲット深度

ターゲットの深度は、地熱系概念モデルにおける高温の深度とする。モデルでは海拔-1,200 m 付近に 250°Cの等温線が引かれることから、地表（海拔約 300 m）からの垂直深度は最低でも 1,500 m を確保したい。概念モデルにおける等温線の不確実性を考慮すれば、図 6 に示すように、垂直深度は 1,500 m から 1,800 m（海拔-1,500 m）とすることが望ましい。



出典: 調査団

図6 地熱貯留層モデルにおけるターゲット候補地点

(3) 坑口位置

既存井 Garabbayis-1 の敷地はコンクリートベースであり、掘削リグの設置に適した硬く平らな敷地のため、新規テスト井掘削にも利用可能と思われる。

(4) 予察的な掘削計画案

上述の掘削ターゲット位置から、予察的な掘削計画を検討した。既存井 Garabbayis-1 の敷地を新規テスト井の坑口位置として利用できる場合、最も遠い掘削ターゲットに到達するには約 300 m の掘削偏距が必要である。この掘削偏距と 1,800 m の垂直深度を同時に達成するには、30° 未満の傾斜で 2,000 m の掘削深度が必要である。この掘削は一般的な 2,000 m 級の掘削リグで十分に達成できると考えられる。

6. IPP 損益分岐発電価格と地熱発電所の優位性検討

ジブチ国では、現在電力の多くをエチオピアからの買電によって賄っている。ただし、エチオピア国が乾期の場合の売買契約は成立していない等、電力供給の安定性に課題を有している。また、現在ジブチ国内で生産可能な電力はジーゼル発電のみとなっており、実質的に地産の発電エネルギーを有していない。このため、地産エネルギーである地熱発電所の建設は喫緊の課題となっている。

Hanle における資源量評価の結果、IPP の参入目安である P=80%の資源量は 15MW 程度となり、小水力発電規模の出力となる見通しである。しかし、前述の検討の結果、地熱発電所の建設は電気売買価格の検討からみ既存のジーゼル発電に優位であるという結果を得た。さらに、送電線建設費を無償資金協力等で支援すれば、さらにその優位性が上がるという結果ともなった。

このため、Hanle 地熱発電所の建設推進は、エネルギーセキュリティーのみならず経済的観点からも合理的であると結論することができる。

7. 環境社会配慮

7.1 環境社会配慮のプロセス

ジブチ国で適用される環境社会影響評価に関連する最新の法令は、2011 年に発令された政令「Decree 2011-029/PR/MHUEAT」であり、ESIA の作業手順について記載されている。また、同法令では、評価対象の規模や種類に応じて、ESIA を簡易と詳細の 2 つのカテゴリーに分けている。試掘調査や地熱発電プラント建設に対しては詳細 ESIA が適用される。

ESIA の一連の手続きの中である程度の期間を要するものとして、(1) 環境省による TOR の確認および承認、(2) ESIA レポートのレビューおよび承認が挙げられる。(1) については、TOR 承認申請から最長 1 ヶ月必要となる。(2) については、レポートの提出後、約 3 ヶ月要するため、ESIA 調査を 2 ヶ月程度で実施するとした場合、全体の工程としては最低 6 ヶ月程度必要となる

8. 追加調査の提案

8.1 試掘調査を実施する上での課題

試掘調査を実施する上での課題は次のとおりである。

- ・地質構造解釈の妥当性検討（平原と台地の地質特性（岩種、成因、等）

本調査から得られた比抵抗構造では、断層と思われる構造は台地と Hanle 平原の境界部分でのみ確認され、その他の箇所の構造は不明瞭であった。そのため、他の物理探査を実施し、当地の断層の構造、特に断層の傾斜方向に関する検討が必要となる。

- ・貯留層特性（貯留層構造、分布、等）

本調査では地熱系概念モデルとして3つのケースを想定したものの、その妥当性を検証する必要がある。また、実際の地熱系がどのケースに相当するかにより開発資源量が大きく変化するが、最も可能性の高いケースを選定する判断要素は、現時点の調査では不十分である。

- ・台地部の深部高比抵抗域（熱源）、表層低比抵抗帯（キャップロック）の分布範囲の把握

台地部に見られる高比抵抗域と表層低比抵抗帯は、本調査ではそれぞれ熱源、キャップロック構造に対応すると推定している。しかし、これらの構造は探査範囲の北東側に向かってさらに広がりを持つことが想定されるため、貯留層の広がりや資源量を評価するための正確な分布範囲を推定する必要がある。

8.2 追加調査項目の提案

上述の課題を解決するために、次の3つの地表調査を行う：(1) 重力探査、(2) 追加 MT/TEM 探査、(3) 微小地震観測。また、試掘調査を実施する上で事前に実施する必要のある次の2つの調査も同時に行う：(4) ESIA 調査、(5) 試掘関連準備調査。

8.3 試掘までの調査工程

すべての追加調査を同時に開始した場合のタイムスケジュールを表3に示す。

表3 追加調査工程案

		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
1 重力探査	仕様							
	準備							
	測定 解析 報告書							
2 微小地震観測	準備							
	設置							
	測定							
	解析 報告書							
3 追加MT/TEM探査	準備							
	測定							
	解析 報告書							
4 総合解析								
5 ESIA	スコーピング							
	TOR審査							
	現地調査							
	審査							
6 試掘関連準備調査	市場調査							
	土木計画							
	仕様書作成							
	積算							

出典: 調査団

9. 他ドナーの動向確認

9.1 USAid

- 2014年10月に、エネルギーセクターにおけるIPP、PPPの導入に関するワークショップを開催した。
- IPP、PPP促進のための法制度整備のために、専門家が一人派遣された。これは、オバマイニシアティブのパワーアフリカを推進するために受け入れ素地を作ることを目的としている。この専門家は2015年2月にジブチ国から離任している。
- 代替の女性専門家が赴任したが、常駐ベースではなく、ジブチ国を適時訪問し、情報収集や情報交換を行っている。話題は、Asal地熱プロジェクトが中心となっている。法制度整備などに関する具体的な提案等はなされていない。

9.2 WB その他ドナーのAsal支援

- Asalにおける地熱開発はEDDが取り扱うことになり、ODDEGとCERDは技術的な協力を行っている。
- ただし、ODDEGの非公式情報によれば下記の通りである。
 - ◇ 2015年7月現在、プロジェクトダイレクターが選任されている。
 - ◇ 現在は、掘削業者の選定を行っている段階である。
 - ◇ 各段階の手続きには、7つのドナーの承認を取り付ける必要があり、時間を要している。
 - ◇ 掘削開始時期の情報は得ていない。

9.3 ICEIDAの支援

ODDEGから入手した資料によれば、ICEIDAの支援か以下の4つのカテゴリーで行われている。

- Improved project management capacity for geothermal projects and project management system in place at ODDEG (from May 2015)
- Geothermal drill training (year of 2016)
- Improved capacity for surface exploration - Lac Abhe (from October 2015)
- Technical assistance (finalization of GRMF application and other matters as might be applicable)

Nord Goubet地熱サイトの地表調査を行うべく、ICEIDAの資金援助でISORが進めていたGRMFへのApplication作成支援は取りやめとなり、次期GRMF申請ラウンドで申請することとなった。

9.4 GRMF

Nord Goubet地熱サイトと同様、GRMFの資金援助で地表調査を実施すべくODDEGは、外部コンサルタントの協力を得て、Applicationを提出した。審査結果は2016年1月までには通知される予定である。採択されれば、外部コンサルタントの助言を得つつ、主にODDEGの職員によって調査が行われる計画である。

10. 自国資金での活動

10.1 掘削リグ調達

ジブチ国では、独自資金によって掘削リグの購入を進めている。調達先はトルコ国であり、現況は以下の通りとなっている。

- 掘削能力2000m級のリグは、現在契約交渉中である。ジブチ国への到着は2017年を予定している。

- 掘削能力 900m 級の中古リグが、トルコ側から寄贈されるとのことである。2015 年 9 月までに ODDEG に納入される計画である。ODDEG はこのリグを使い、トレーニングを行う予定としている。

11. 結論と提言

11.1 結論

【資源評価】

- Hanle 平原とその北西側の台地は主要断層で隔されている。
- 熱源及び貯留層は、台地の地下に存在すると推定される。
- 今回得られた物理探査の結果は、他の地域で見られる一般的な貯留層の比抵抗構造とは異なる。
- 地熱系を構成する熱源、貯留層、流体涵養は以下の通りと推定される、
 - 熱源は高比抵抗を示す深部の貫入岩と推定する。
 - 貯留層は、断層破碎帯に限定される局所的なものかあるいは各断層を連結するような層状玄武岩（下部玄武岩）の透水性が高い部分で構成されるものと推定する。地化学調査によれば、この貯留層には最高 260°C の地熱流体が賦存している可能性がある。キャップ構造は、下部玄武岩を被覆する上部玄武岩と推定する。
 - 流体涵養は、Hanle 平原側から行われているものと推定する。
- 今回の調査範囲で推定した資源量を、容積法を用いて評価した結果は以下の通りである。

Capacity (MW)		
80%	Most Probable	20%
16.9	32.8	86.4

ただし、後述する課題を解明することによって、ここに示した数値は随時見直していく必要があり、最終結論ではない。

【IPP 損益分岐発電価格と地熱発電所の優位性検討】

ジブチ国では、試掘によって地熱資源が確認されれば、地熱発電の建設運営のために IPP を導入する方針としている。このため、Hanle 地熱資源量を 15MWe と仮定して、IPP 参入の可能性検討のための経済分析を実施した。その結果、生産井戸成功率 60% 以上の場合には、Hanle 地熱発電が既設ジーゼル発電に経済的に優位であることが判明した。送電線建設費用を EDD の負担とならないような支援が得られれば、地熱発電の優位性はさらに高くなる。

15 MW の Hanle 地熱発電所は、既存ジーゼル発電より優位性は高いが、エチオピアから輸入する安価な水力エネルギーに比較すると劣っている。しかし、自国エネルギー資源を持たないジブチ国にとっては、エネルギーセキュリティの観点から、Hanle 地熱発電所の建設は、合理的であると結論することができる。

【環境社会配慮】

ジブチ国では、試掘調査および地熱発電プラント建設については詳細 ESIA を実施する必要があ

る。ESIA は TOR 申請からレポートの認可まで最短 6 ヶ月程度必要となる。本件では Asal 地熱開発における EIA レポートをレビューし、試掘調査にかかる ESIA の TOR 案を作成して添付した。

11.2 課題と推奨

【貯留層評価と試掘調査への判断】

物理探査終了後の次の開発段階は試掘調査である。しかし、Hanle 地熱サイトにおいては、貯留層の比抵抗構造が、他の地熱地域で見られる一般的な構造と異なっていることが明らかになった。一方、貯留層は基本的には断裂構造に支配されていると推定されるものの、加えて、層状玄武岩の透水性の高い部分にも広がっている可能性も否定できない。これらの貯留層の性質をより明確に把握して試掘ターゲットを見極めた後に、試掘調査の段階に進むか否かを判断することが現実的である。この目的のため、以下の追加調査を提案した。

- ・ 重力探査
- ・ 追加 MT/TEM 探査、3D インバージョン解析
- ・ 微小地震観測

【環境社会影響評価】

ジブチ国では、試掘を行う場合も環境社会影響評価が必要となっている。これには約半年を要する。地熱開発を滞りなく行うためには、環境社会影響評価を、上記貯留層調査と同時に実施することを提案する。

【試掘調達関連調査】

ジブチ国では、1980 年代に Asal、Hanle 地域において調査井が掘削されて以来、約 30 年間地熱井の掘削業務は実施されていない。そのため、試掘調査の速やかな実施のために、ジブチ国において最適な掘削業務の調達プロセスや契約形態の提案、試掘調査にかかる技術仕様の決定に必要な情報を整理・収集する必要がある。そのための本報告書では、具体的な調査項目を提案した。

【事業化の可能性のための予備調査】

ジブチ国では、地熱資源確認後の地熱発電事業を IPP 導入で実施することを基本方針としている。本件では、既存情報によって IPP 参入の損益分岐発電コストを概算した。これに加え、追加提案した地表調査結果で資源量の再評価を行った後に、この概算値を見直す必要がある。また、送配電の概略検討が行ってジブチ国政府の役割分担を示す必要がある。

以上

ジブチ国地熱開発のための 情報収集・確認調査（物理探査）

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	調査の概要.....	1-1
1.1	調査の背景.....	1-1
1.2	業務の目的および範囲.....	1-2
1.2.1	業務の目的.....	1-2
1.2.2	対象地域.....	1-2
1.2.3	調査の範囲.....	1-2
第 2 章	既存調査のレビュー.....	2-1
2.1	資料収集.....	2-1
2.2	地表調査.....	2-1
2.2.1	地質・地化学調査.....	2-1
2.2.2	物理探査.....	2-3
2.3	既存調査井.....	2-4
2.3.1	概要.....	2-4
2.3.2	地質構造.....	2-6
2.3.3	変質鉱物.....	2-6
2.3.4	透水性分布.....	2-7
2.3.5	坑内温度.....	2-7
2.4	考察.....	2-9
2.4.1	既存調査の考察.....	2-9
2.4.2	本調査における解釈.....	2-9
第 3 章	物理探査(MT/TEM 探査).....	3-1

3.1	探査の目的	3-1
3.2	探査結果	3-1
3.2.1	探査概要.....	3-1
3.2.2	探査結果.....	3-1
3.2.3	解析結果.....	3-2
3.2.4	解析結果のまとめ.....	3-4
第4章	地質・地化学補足調査.....	4-1
4.1	地形地質概説.....	4-1
4.1.1	地質構造.....	4-1
4.1.2	断層分布.....	4-1
4.2	現地調査および室内解析.....	4-4
4.2.1	地熱徴候調査.....	4-4
4.2.2	地化学調査.....	4-6
第5章	貯留層概念モデル・掘削ターゲットの提案.....	5-1
5.1	貯留層概念モデルの構築.....	5-1
5.1.1	地熱貯留層と比抵抗構造の対比.....	5-1
5.1.2	Hanle における貯留層構造と比抵抗構造	5-2
5.1.3	地熱貯留層概念モデル.....	5-3
5.1.4	地熱資源量の概算.....	5-8
5.2	掘削ターゲットの選定.....	5-10
第6章	IPP 参入の損益分岐発電コストの概算	6-1
6.1	前提条件	6-1
6.2	IPP 損益分岐売電価格.....	6-2
6.3	送電費用	6-2
6.4	Ali Sabieh 変電所で受電する買電価格（EDD 負担価格）	6-2
6.5	現行発電コストとの比較.....	6-3
6.6	まとめ	6-3
第7章	環境社会配慮.....	7-1
7.1	環境社会配慮のプロセス.....	7-1
7.2	Asal 地熱にかかる ESIA レポートのレビュー.....	7-2
第8章	追加調査の提案.....	8-1
8.1	試掘調査を実施する上での課題.....	8-1
8.2	追加調査項目の提案.....	8-2
8.3	ポートフォリオアプローチ- ODDEG の要請	8-6
8.4	試掘までの調査工程.....	8-7
第9章	他ドナーの動向確認.....	9-1

9.1	USAid:	9-1
9.2	WB その他ドナーの Assal 支援:	9-1
9.3	ICEIDA の支援	9-1
9.4	GRMF	9-2
第 10 章	自国資金での活動	10-1
10.1	掘削リグ調達	10-1
10.2	事務所建設	10-1
第 11 章	結論と提言	11-1
11.1	結論	11-1
11.2	課題と推奨	11-2

図表目次

図 1-1	地熱開発の流れと本業務の位置付け	1-2
図 2-1	地化学分析結果に基づく Hanle 平原の流体流動	2-2
図 2-2	地表調査に基づく流体流動系	2-2
図 2-3	Hanle 平原を対象とした電気探査測点位置図	2-3
図 2-4	電気探査結果断面と解釈図	2-4
図 2-5	既存調査井位置図	2-5
図 2-6	変質鉱物出現深度	2-7
図 2-7	想定温度コンター (- 500 m a.s.l)	2-8
図 2-8	坑内温度分布図	2-8
図 3-1	探査箇所位置図	3-5
図 3-2	測定点位置図	3-6
図 3-3 (1)	比抵抗分布断面図 (HNL100)	3-7
図 3-4 (1)	比抵抗分布平面図 (標高 100m)	3-12
図 3-5	比抵抗分布断面パネルダイヤグラム	3-15
図 3-6	比抵抗分布平面パネルダイヤグラム	3-16
図 4-1	調査地域周辺地質図	4-1
図 4-2	傾斜量と傾斜方向分布図	4-2
図 4-3	断層分布推定図	4-3
図 4-4	地質断面概念図	4-3

図 4-5	地表地熱徴候位置図	4-4
図 4-6	地熱徴候分布図	4-5
図 4-7	地化学調査位置	4-6
図 4-8	Garabbayis の地熱徴候	4-7
図 4-9	Garabbayis 噴気ガスの He-Ar-N ₂ 三成分系図	4-9
図 5-1	典型的な地熱貯留層の比抵抗構造	5-1
図 5-2	比抵抗構造と出現鉱物の対比	5-3
図 5-3	地熱貯留層概念モデル：ケース (a)	5-5
図 5-4	地熱貯留層概念モデル：ケース (b)	5-6
図 5-5	地熱貯留層概念モデル：ケース (c)	5-7
図 5-6	Garabbayis 地区における試掘井のターゲット平面図	5-11
図 5-7	地熱貯留層モデルにおけるターゲット候補地点	5-12
図 7-1	EIA 手続き	7-1
図 8-1	重力探査測点配置図	8-2
図 8-2	追加 MT/TEM 測点配置図	8-3
図 8-3	微小地震観測点配置図	8-4
図 8-4	微小地震発生位置図	8-5
図 8-5	試掘までの ESIA 調査の工程	8-5
表 1-1	「情報収集・確認調査」において提案された開発優先順位	1-1
表 2-1	収集資料一覧	2-1
表 2-2	既存試掘井データ一覧	2-5
表 2-3	帯水層深度一覧	2-7
表 4-1	地熱徴候諸元	4-4
表 4-2	Garabbayis 噴気ガスの化学分析結果	4-8
表 5-1	地熱地域における比抵抗値と変質鉱物および温度の関係	5-1
表 5-2	比抵抗分布に基づく Hanle 地域の地熱構造	5-2
表 5-3	既存調査結果・物理探査結果から得られる地熱構造	5-3
表 5-4	貯留層概念モデル	5-4

表 5-5	容積法で使したパラメータ	5-9
表 5-6	資源量算出結果	5-9
表 6-1	IPP 損益分岐売電価格算出前提条件	6-1
表 6-2	IPP 事業損益分岐売電価格	6-2
表 6-3	送電費用概算前提条件	6-2
表 6-4	ハンレ地熱発電所の電気の Ali Sabieh 変電所での買電価格	6-3
表 8-1	追加調査工程案	8-7

添付資料

添付資料-1	収集資料リスト
添付資料-2	写真集
添付資料-3	既存調査井データ
添付資料-4	物理探査
添付資料-5	損益分岐送電コスト計算シート
添付資料-6	合理的実用的な容積法計算の提案

第1章 調査の概要

1.1 調査の背景

ジブチ国における地熱開発は、1970年代から Asal Rift を中心に進められている。しかし、当該地域では地熱流体が海水の7倍近い高塩分濃度を示すことから、生産井や配管へのスケール付着の問題が想定されている。そのため、事業の経済性に大きな問題を及ぼす可能性があり、事業の実現には未だ至っていない。また、ジブチ国内の地熱開発の実施体制や民間企業の投資環境の未整備も、事業の実現を滞らせる要因となっている。係る状況下、2013年8月の安倍総理によるジブチ国訪問の際、ゲレ大統領から地熱開発への協力要請がなされた。これを受けて、我が国は技術協力を通じた地熱開発事業化への支援を表明している。

このような背景から、JICAは2014年に「地熱開発にかかる情報収集・確認調査」（以下「情報収集・確認調査」、またはJICA(2014)）を実施し、ジブチ国全土の地熱有望地域にて地質・地化学調査を行った。その結果、複数の開発有望地域が確認され、地熱資源量・作業性・環境的側面の評価から、開発優先順位が提案された。結果は表1-1に示す通り、Hanle、Arta、Nord Goubetの開発優先順位が高い。

表 1-1 「情報収集・確認調査」において提案された開発優先順位

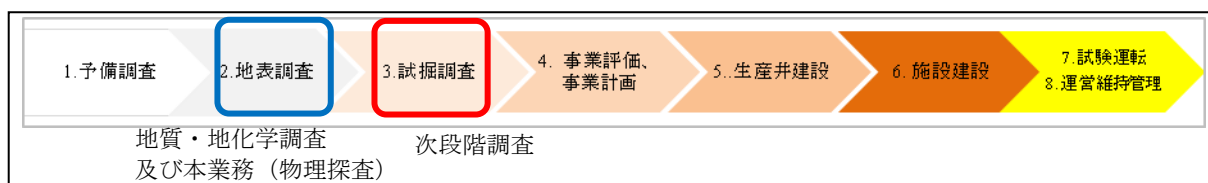
有望サイト	地熱資源評価		開発効率性			社会環境		(参考)		優先順位	次期調査	その他
	資源量	塩分濃度 (mg/L)	アクセス	地形	掘削水	自然環境	居住	送電線変電所への距離	ジブチ側優先順位			
Hanle	A	A ±1,000	C	B 平地— 溶岩台地	A Hanle 平原 の地下水	A 荒地	A なし	45 km to Dikhil	2	1	MT 探査	
Arta	A	D >30,000	B	B 平地— 山岳地	C 海水	A 荒地	B 僅か	6 km to N.1	4	2	MT 探査	GRMF に 申請中
Nord Goubet	A	D >30,000	C-D	C 平地— 山岳地	C 海水	A 荒地	B 僅か	50 km to P.K. 51	1	2	CERD MT 探査 レビュー	GRMF に 申請中
Gaggade	A	B <5,000	D	D 山岳地	A Hanle 平原 の地下水	A 荒地	A なし	40 km to P.K. 51	2	3	MT 探査	
Obock	B	C 10,000～ 20,000	A	A 海岸平地	C 海水	B 海岸	D 都市 近郊	孤立	3	4	CERD MT 探査 レビュー	
Djiouti- Awrofooul	C	A ±1,000	A	A 平地	C 海水	-	-	-	-	5	MT 探査	

評価：A:非常に良好(Excellent), B:良好(Good), C:普通(Fair), D:不可・困難(Poor)

出典：JICA(2014)

この「情報収集・確認調査」は、地熱発電所運用までの地熱開発の全体の流れの中では「地表調査」段階に相当する（図 1-1）。通常、次段階である試掘調査に進むためには、更なる地表調査（物理探査、地熱概念モデルの構築）を実施することで地下構造を推定して、試掘ターゲットを選定する必要がある。そのため、本業務では表 1-1 で上位に優先順位付けられた Hanle 地域を対象として物理探査を実施し、地熱概念モデルの構築を行うことで、開発に不可欠な試掘

調査の早期実施を支援するものである。



出典：調査団

図 1-1 地熱開発の流れと本業務の位置付け

1.2 業務の目的および範囲

1.2.1 業務の目的

本調査では、「情報収集・確認調査」で提案された有望地点を対象に、物理探査や地熱概念モデルの構築等を行い、更なる調査（試掘・資源量評価）の是非を検討するのに必要な情報を収集・整理することを目的とする。

1.2.2 対象地域

調査対象地域の Hanle 地域はジブチ市街地のほぼ西方約 110km に位置し、地熱徴候帯を中心とする約 10km 四方の地域である。調査地域は主に標高約 400m の玄武岩溶岩・火砕岩から構成される平坦な台地状の地形からなり、西南方には標高約 200m の Hanle 平原が広がる。

1.2.3 調査の範囲

以下の調査を実施する。

- ① Hanle を対象とした、MT/TEM 探査の実施及び地熱概念モデルの構築
- ② 掘削ターゲットの選定
- ③ さらなる調査（試掘・資源量評価）実施の妥当性の検討

第2章 既存調査のレビュー

2.1 資料収集

Hanle 地域を対象として実施された調査資料一覧を表 2-1 に示す。本章では、これらの調査において実施された地表調査結果および既存調査井のデータの収集・分析および考察を行った。

表 2-1 収集資料一覧

No	文献名	著者	年	地質	地化学	物理探査	掘削
1	Projet Pour L'Evaluation Des Ressources Geothermiques	Aquater	1981	○	○		
2	Ressources Geothermiques Etudes Effectuees Par Aquater 1980 - 1982	Aquater	1982	○		○	
3	Interpretation Of Gradient Wells Data – Hanle Plain	Geotermica	1985	○	○		○
4	Geothermal Exploration Project Hanle-Gaggade Republic Of Djibouti – Hanle 1 Report	Aquater	1987 a	○	○		○
5	Geothermal Exploration Project Hanle-Gaggade Republic Of Djibouti – Hanle 2 Report	Aquater	1987 b				○
6	Carte Geologique De La Republique De Djibouti A 1:100000 - Dikhil	ORSTOM	1987	○	○		
7	Djibouti Geothermal Exploration Project Republic Of Djibouti – Draft Final Report	Aquater	1989				○
8	Data Collection Survey On Geothermal Development In The Republic Of Djibouti	JICA	2014	○	○		

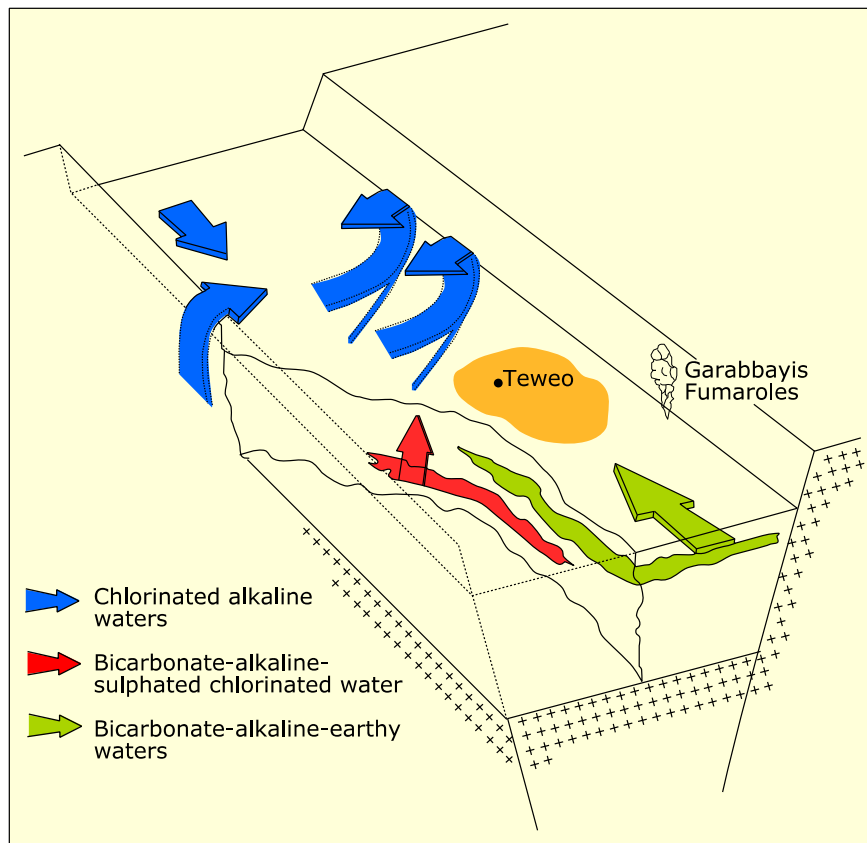
出典：調査団

2.2 地表調査

2.2.1 地質・地化学調査

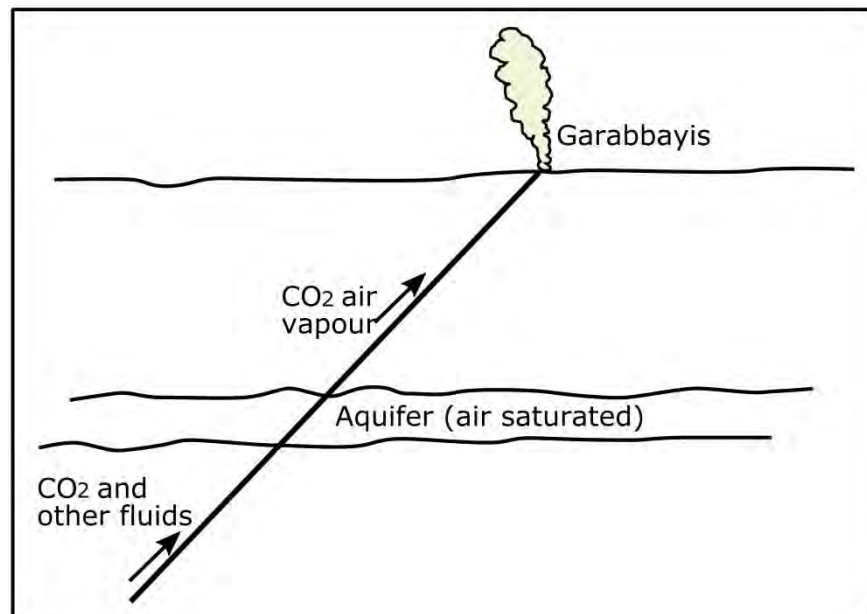
Aquater (1981) では、Hanle 平原全域を対象とした地質・地化学調査を行った。地質調査では 22 地点で採取した岩石サンプルの観察、分析を実施している。地化学調査では、温泉水、湧水、噴気ガスの採取分析を実施している。

その結果、沖積帯水層（アルカリ土類炭酸塩泉）、火山帯水層（アルカリ炭酸塩-硫酸塩-塩化物泉）、堆積帯水層（アルカリ塩化物泉）3種の帯水層の存在を示した（図 2-1）。また、地下深部から CO₂ を含む流体の上昇が示唆されており、噴気の供給源として図 2-2 に示すモデルが提案された。



出典：Aquater (1981)をもとに調査団が作成

図 2-1 地化学分析結果に基づく Hanle 平原の流体流動



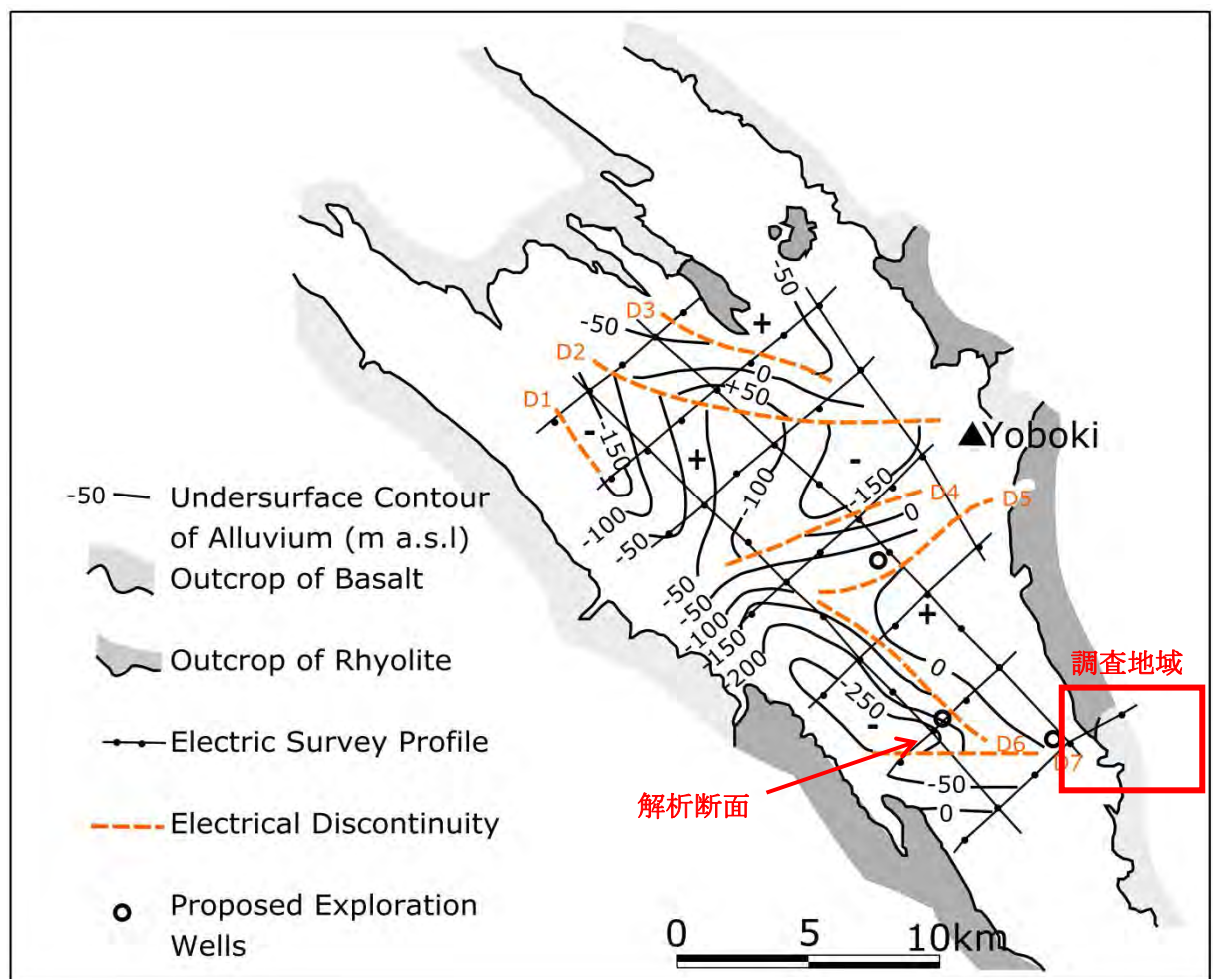
出典：Aquater (1982)に調査団が加筆

図 2-2 地表調査に基づく流体流動系

2.2.2 物理探査

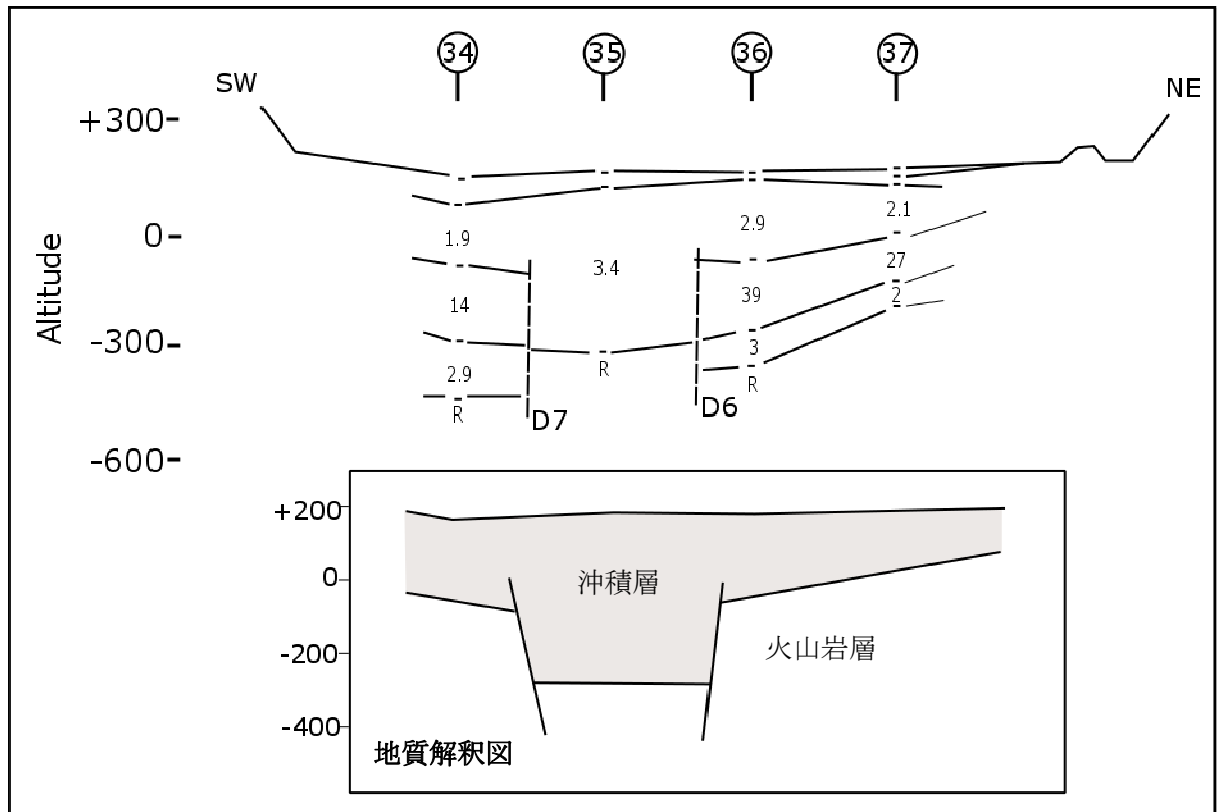
Hanle 地域では、Aquater（1982）によって電気探査が実施されている。この調査は図 2-3 に示す測点配置で Hanle 平原全体を対象としている。JICA（2014）等で確認されている噴気地点は対象範囲の南東端に位置する。

解析結果の NE-SW 方向の比抵抗断面を図 2-4 に示す。浅部に低比抵抗層（数 Ωm ）、深部に高比抵抗層（数十 Ωm ）が確認され、低比抵抗（浅部）は堆積層および沖積層に、高比抵抗（深部）は火山岩層に対応すると結論付けられた。また、可探深度が -600m 以浅という比較的浅部ではあるが、Hanle 平原の中央部に断層構造を示唆する不連続な比抵抗構造が確認され、この断層をターゲットとした調査井掘削が提案されている。



出典：Aquater（1982）に調査団が加筆

図 2-3 Hanle 平原を対象とした電気探査測点位置図



出典：Aquater (1982)に調査団が加筆

図 2-4 電気探査結果断面と解釈図

2.3 既存調査井

2.3.1 概要

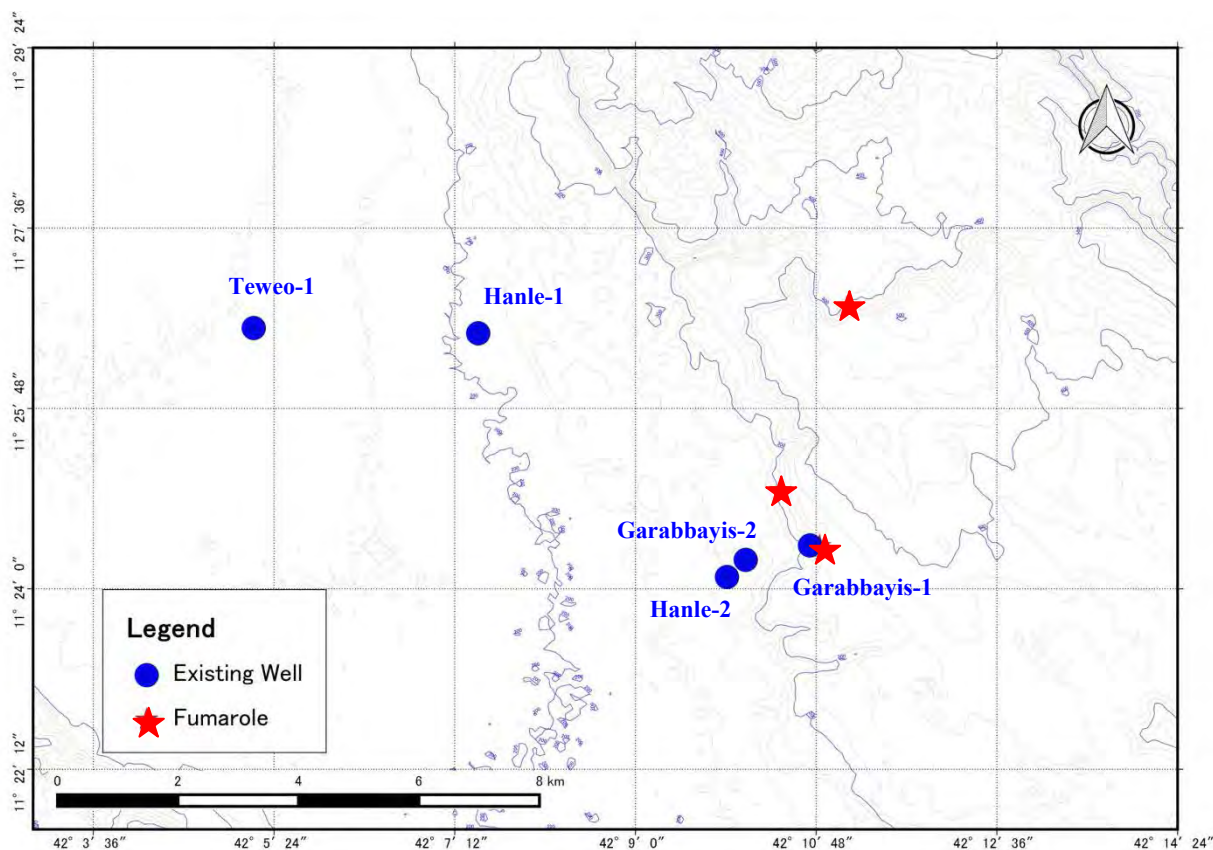
Hanle 地域では 1980 年代に 5 本の坑井掘削が実施されている。これらの坑井掘削は、上述の地表調査の結果を受けて主に平原部を対象として実施されている（図 2-5）。表 2-2 に各坑井の主要データを示す。

Garabbayis-1、Garabbayis-2、Teweo-1 の 3 坑井は掘削深度が 450m 程度の構造試錐井であり、主に地質確認と地下温度を評価するために実施された。これら調査井の結果は Aquater (1982)、Geotermica (1985) で整理されている。大深度調査井 Hanle-1（掘削深度 1623.8m）、Hanle-2（掘削深度 2038m）の掘削は構造試錐井の結果を反映して実施された。調査結果は Aquater (1987 a, b, 1989) で報告されている。

表 2-2 既存試掘井データ一覧

Item	Well Name				
	Garabbayis-1	Garabbayis-2	Teweo-1	Hanle-1	Hanle-2
Coordinate	N11°24'26.0" E42°10'44.3" Elevation : 299m	N11°24'17.5" E42°10'06.0" Elevation : 245m	N11°26'36.2" E42°05'11.9" Elevation : 142m	N11°26'33.0" E42°07'26.0" Elevation : 210m	N11°24'07.1" E42°09'54.7" Elevation: 236.8m
Depth	437m	452.2 m	452 m	1623.8 m	2038 m
Drilling Period	1982 (Period is unknown)	1984/11/9 – 1984/11/28 (20days)	1984/10/30 – 1984/11/08, 1984/11/29 – 1984/12/15 (27days)	1987/01/02 – 1987/03/02 (32days)	1987/03/11 – 1987/04/23 (44days)
Well Diameter (Bottom)	5-5/8"	5-7/8"	5-7/8"	8-1/2"	8-1/2"
Temperature at Bottom hole (°C)	121.7	80.8	43.7	72	122.7
Contractor	GENZL	GENZL	GENZL	INTAIRDRIL	INTAIRDRIL

出典：調査団



出典：調査団

図 2-5 既存調査井位置図

以下に既存調査井の特徴を整理した。

2.3.2 地質構造

地質柱状図から読み取れる特徴は以下の通りである。

- ・ 何れの調査井においても、玄武岩層が厚く分布する。
- ・ Tewe-1、Hanle-1 には流紋岩層が玄武岩層に挟まれる。分布深度は Tewe-1 で 257-278m、Hanle-1 で 98-220m、230-310m、610-680m である。
- ・ Tewe-1、Hanle-1、Hanle-2 の表層部に沖積層が確認される。
- ・ Tewe-1 の深度 65m-257m には泥岩層が確認される。

各調査井の地質柱状図を巻末に添付する。

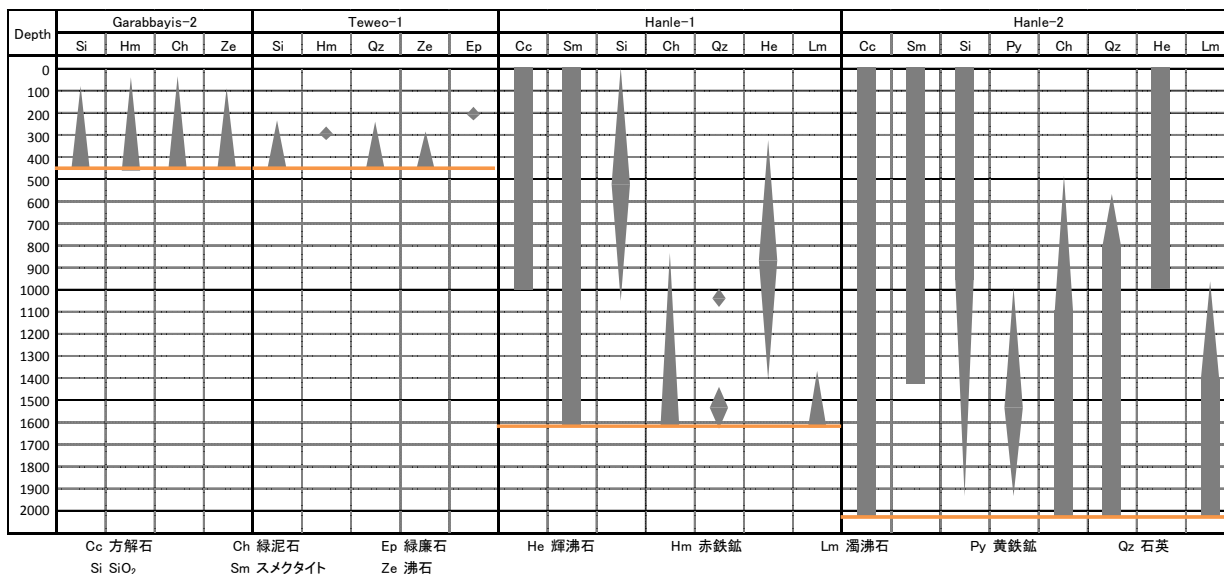
2.3.3 変質鉱物

各調査井における変質鉱物出現深度を図 2-6 に整理した。なお、Garabbayis-1 については変質鉱物分布を示す資料を入手できなかったため、未記載である。

変質鉱物全体の特徴として、沸石類の出現に特徴される低度の変質作用が認められる。また、変質鉱物の組み合わせから次の温度が推定される。

- ・ Hanle-1 では輝沸石と濁沸石の出現境界が GL-1400m 付近に、Hanle-2 では GL-1000m 付近に見られ、変質当時の境界部の温度は 140°C 前後と推定される。
- ・ Hanle-2 では GL-1400m 付近でスメクタイトの出現がなくなり、緑泥石が安定して出現することから、同深度での生成温度は 180°C~200°C 前後であったと推定される。
- ・ Tewe-1 では、GL-200m に緑簾石、GL-300m に赤鉄鉱の局所的な出現が記載されている。これらの変質鉱物の生成温度は概ね 200°C 程度であることから、脈状の熱水変質帯の形成にともなって生成された変質鉱物である可能性がある。
- ・ Hanle-2 では GL-1000m から GL-1900m にかけて黄鉄鉱が部分的に出現し、酸性流体による熱水変質があったものと考えられる。
- ・ Garabbayis-2 および Tewe-1 では、沸石鉱物および緑泥石の詳細な同定がなされておらず、データの信憑性に疑問が残る。

以上より、Hanle 地域では GL-1500m 以深において見られる変質鉱物の組み合わせは、200°C 以上の生成温度を示していると考えられる。



出典：Geotermica (1985), Aquater(1989)をもとに調査団作成

図 2-6 変質鉱物出現深度

2.3.4 透水性分布

各調査井において、高透水性を示し、帯水層の存在が認められる深度を表 2-3 にまとめた。1000m 以浅では 80-90m や 130-200m、250-350m における帯水層の分布が複数の調査井で認められ、水平方向に発達した帯水層の分布を示す可能性がある。一方、1000m 以深では Hanle-1 の深度 1300m 付近に示唆されるのみであり、透水性は低いと想定されている (Aquater(1987 b))。ただし、深度 1000m 以深の調査井は 2 本のみであるほか、必ずしも断裂系をターゲットとしたわけではないため、貯留層評価として考察する根拠としては十分ではない。

なお、Garabbayis-1, Garabbayis-2, Teweo-1 における 1984 年 12 月の地下水位はそれぞれ 113m、60m、17m であり、平原側から台地側に向かって水位低下の傾向がみられる。これは、平原側から台地側に向かって地下水が流動している可能性を示している。

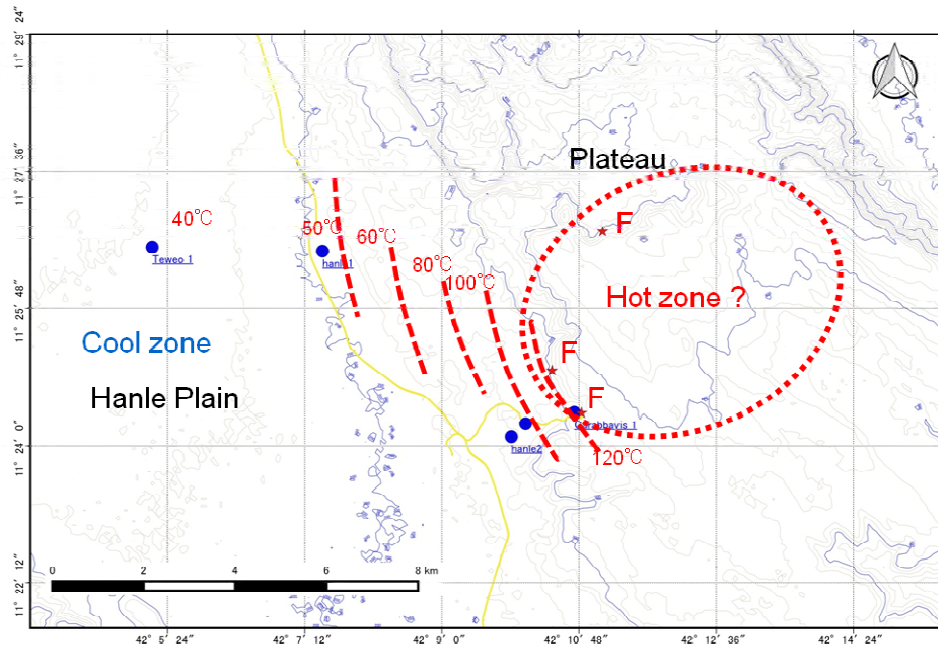
表 2-3 帯水層深度一覧

	Garabbayis-1	Garabbayis-2	Teweo-1	Hanle-1	Hanle-2
1000m 以浅	83m	95m 150m 180m	90m 130m 364m	95m 130-200m 310m 680-800m	140-170m 260m 405m
1000m 以深	-	-	-	約 1300m	-

出典：調査団

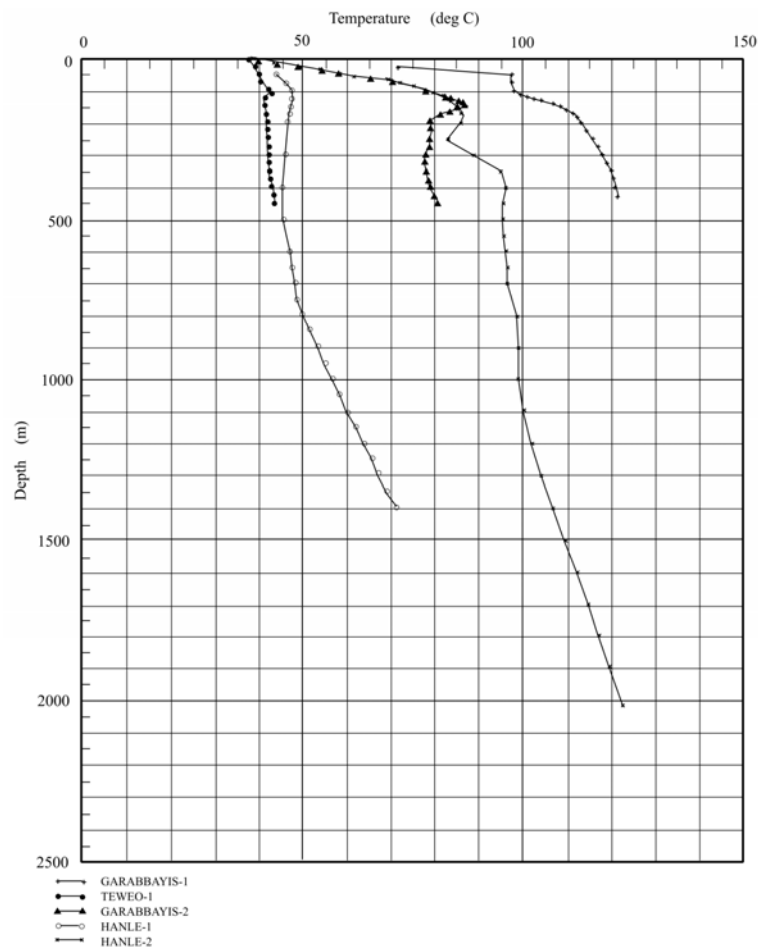
2.3.5 坑内温度

各調査井の坑内温度分布を図 2-8 にまとめた。また、各調査井において確認された坑内温度分布から想定される、海拔標高-500m における温度コンターを図 2-7 に示す。推定に当たっては、等温線は NNW-SSE の構造と調和的であると仮定した。Hanle 平原側が低温で、台地側に向かって温度が上昇する傾向が見て取れる。



出典：調査団

図 2-7 想定温度コンター (- 500 m a.s.l)



出典：Aquater(1989)をもとに調査団作成

図 2-8 坑内温度分布図

2.4 考察

2.4.1 既存調査の考察

上記の調査結果に対して、Aqater (1989) では次のような結論を述べている。

- ・ Hanle 平原の熱構造は、低温の地下水流動によって支配されている。
- ・ Hanle-2 調査井において、深度 400m から 1000m の区間でみられる一定温度域 (90°C-100°C) は、Garabbayis の噴気の供給源である熱流体の上昇流に伴う、局所的な熱異常である。
- ・ Hanle 平原では、地熱発電開発に有望な高エンタルピー流体が確認される可能性は極めて低い。

また、Jalludin (2009) では、次のように結論付けている。

- ・ Hanle 平原には、マグマ溜りや貫入岩に起因する浅部の熱異常はない。
- ・ Garabbayis の噴気は深部の高温異常域に通ずる主要な断層においてのみ現れる徴候であり、同地域では例外的なものである。

以上のように、既存調査の結果から、Hanle 平原における地熱系の存在が否定されている。ただし、台地側に複数個所みられる噴気の内容はその供給源となる地熱系が対象地域に存在する可能性を示唆している。

2.4.2 本調査における解釈

上述の既存調査結果を踏まえ、Hanle 地域の地熱系について、想定される項目を以下に述べる。

1. 試掘調査の結果、Hanle 平原の深部の孔内温度が低く、平原の北東部（調査地域中央部）の調査井の孔内温度がやや高い結果が得られている（図 2-7）。
2. この調査井の温度分布の結果は、地表で見られる噴気の原因となる熱源が、Hanle 平原の地下ではなく、平原北東の台地部に存在することを示唆するものと考えられる。これは、噴気帯が台地部で観察されることと一致する。
3. Hanle 平原で掘削された試掘井の温度が深部まで低温である理由は、Hanle 平原の地下水流動の存在によるものと推定される。また、調査井の地下水位勾配は地熱開発に必要な流体となる地下水の供給源が Hanle 平原側にある可能性を示している。
4. JICA (2014) での地化学調査では、最高 250°C 程度の貯留層が存在する可能性が指摘されている。

以上より、Hanle 平原の北東に広がる台地部を中心に地熱構造の存在を仮定できるものと考えらる。このことを明らかにするため、同台地部において MT/TEM 探査を実施した。

第3章 物理探査(MT/TEM 探査)

3.1 探査の目的

調査対象地域において、地下の比抵抗構造を把握するために電磁探査法の一手法である MT 法探査を実施した。また MT 法で得られたデータの補正を行うために TEM 法探査をあわせて実施した。次いで、取得データの処理・解析を行い、調査対象地域地下の比抵抗構造を求めた。得られた比抵抗分布は地質構造の推定、地熱貯留層モデルの構築および調査ボーリング計画に使用した。

3.2 探査結果

3.2.1 探査概要

本調査で実施した MT/TEM 探査の調査内容は以下の通りである。

- 1) 調査手法（調査原理および調査方法の詳細は巻末に添付）
 - リモートリファレンス方式 MT 法探査
 - セントラルループ方式 TEM 法探査（MT データのスタティック補正）
- 2) 調査エリア・測定点配置
 - 既存の地質情報および調査井掘削調査結果を踏まえ、Hanle 平原の北東に広がる台地部を中心に、噴気帯を囲むように測定点を配置した。
- 3) 調査期間
 - 2015 年 3 月 28 日～2015 年 5 月 5 日
- 4) 測定点数
 - 30 点、リモートリファレンス点は Dikhil 郊外に設置した。
- 5) 取得データ
 - MT 法探査：磁場 3 成分(H_x 、 H_y 、 H_z)、電場 2 成分(E_x 、 E_y)の時系列データ
(測定時間：1 測定点当たり 14 時間以上)
 - TEM 法探査：磁場 1 成分(H_z)の過渡応答データ
- 6) データ処理・解析周波数
 - MT 法探査：320Hz～0.00034Hz の範囲の 80 周波数
 - TEM 法探査：リピートレート 25Hz、2.5Hz の主に 2 周波数
- 7) データ処理・解析内容
 - MT 法探査：スタティックシフト補正を行ったデータを用いて、5 測線について 2D インバージョン解析を実施した。
 - TEM 法探査：取得データについて 1D インバージョン解析を実施し、その結果を用いて MT 法データのスタティックシフト補正量を算出した。

3.2.2 探査結果

(1) TEM 法探査

MT 法探査を実施したすべての測定点において TEM 法探査を実施した。測定値については、時間ウィンドウの最後の部分においてデータにばらつきが見られる測定点が数点存在したが、データの

補正に必要な 1 次元層構造解析には支障のない概ね良好なデータを取得することができた。各測定点で得られた測定データを用いて 1 次元層構造解析を実施した。探査深度は 500m 程度で、大局的にはほとんどの測定点で地表から深部に向かって高・低・高の変化を示す比抵抗層構造が求められた。この結果を用いて MT 法の見掛比抵抗・位相曲線を作成し、MT 法探査から求められた見掛比抵抗曲線のスタティックシフト補正に必要なシフト量を算出した。このスタティックシフト補正量を MT 法で得られた見掛比抵抗に適用して 2 次元比抵抗構造解析を求めた。各測定点のスタティックシフト量を示す一覧表および TEM 法探査データによる 1 次元層構造解析結果を巻末に添付する。

(2) MT 法探査

取得データのローカル処理およびリファレンス処理を実施し、見掛比抵抗・位相曲線を作成し、データの品質を確認した。作成した見掛比抵抗・位相曲線を巻末に添付する。ほとんどすべての測定点のデータについて高周波数域から低周波数域にわたって、リファレンス処理の必要がない程度の高品質のデータが取得できた。一部の測定点のデータについて、ローカル処理で多少のばらつきが認められたもののリファレンス処理およびエディット処理を行うことによってノイズの除去が行われ、良好なデータを取得することができた。また、見掛比抵抗曲線において TE・TM 成分の値が高周波側で一致している一方、低周波側では一致しないことから、探査地域深部では 2 次元あるいは 3 次元的な構造が示唆される。

3.2.3 解析結果

調査位置図と測定点位置図をそれぞれ図 3-1、図 3-2 に示すとともに、測点位置座標一覧表を巻末に添付した。

上述の通り、高周波数域から低周波数域にわたって良好なデータが取得できたため、解析結果として標高-10000m までの比抵抗構造が得られたが、以下では、貯留層モデルを構築する上で重要となる、地表から標高-5000m までの構造について特徴を述べる。また、比抵抗分布の傾向を説明するために、比抵抗値の高低の大まかな目安として 100 Ωm を用いる。

(1) 比抵抗分布断面図

各測線の比抵抗分布断面図から読み取れる比抵抗構造の特徴は以下の通りである。

HNL100 測線（図 3-3(1)）

地表から標高-5000m までの深部に向かって浅部は低比抵抗、深部は高比抵抗の比抵抗変化を示し、4 Ωm から 2500 Ωm 以上の比抵抗が分布する。100 Ωm 以下の浅部低比抵抗の分布は南西側で地表から標高-1500m 程度まで分布し、北東側では標高-800m 程度まで分布する。この 100 Ωm 以下の低比抵抗層は南西側から北東側に向かって徐々に薄くなる傾向を示す。標高-5000m レベルでは北東側で最大の比抵抗を示し、北東側から南西側に向かって比抵抗が下がっていく。-5000 m レベルから最深部へ向かっては比抵抗が下がる傾向を示す。

HNL200 測線（図 3-3(2)）

HNL100 と同様、浅部は低比抵抗、深部は高比抵抗が分布する。比抵抗値は $2\Omega\text{m}$ から $2500\Omega\text{m}$ 以上の範囲にある。 $100\Omega\text{m}$ 以下の浅部低比抵抗の分布は南西側で地表から標高-1800m 程度まで分布し、北東側では標高-900m 程度まで分布する。この $100\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗層は南西側から北東側に向かって徐々に薄くなる傾向を示す。標高-5000m レベルでは北東側で最大の比抵抗を示し、北東側から南西側に向かって比抵抗が下がり、HNL100 と同様の傾向を示す。

HNL300 測線（図 3-3(3)）

HNL100、HNL200 と同様、浅部は低比抵抗、深部は高比抵抗が分布する。比抵抗値は $1\Omega\text{m}$ から $2500\Omega\text{m}$ 以上の範囲にある。HNL-306 の表層付近で最も低い比抵抗値を示す。 $100\Omega\text{m}$ 以下の浅部低比抵抗の分布は南西側で地表から標高-1700m 程度まで分布し、北東側では標高-900m 程度まで分布する。この浅部の $100\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗層は南西側から北東側に向かって薄くなる傾向を示す。標高-5000m レベルでは北東側で最大の比抵抗を示し、北東側から南西側に向かって比抵抗が下がっていき、HNL100、HNL200 と同様の傾向を示す。

HNL400 測線（図 3-3(4)）

HNL100、HNL200、HNL300 と同様、浅部は低比抵抗、深部は高比抵抗が分布する。比抵抗値は $2\Omega\text{m}$ から $2500\Omega\text{m}$ 以上の範囲にある。HNL-403 から 404 にかけておよび HNL-406 の表層付近で最も低い比抵抗値を示す。 $100\Omega\text{m}$ 以下の浅部低比抵抗の分布は南西側で地表から標高-1500m 程度まで分布し、北東側では標高-1000m 程度まで分布する。この $100\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗層は南西側から北東側に向かって薄くなる傾向を示すが、コンターラインは多少の起伏を示す。標高-4500m レベルで北東側に最大の比抵抗を示し、北東側から南西側に向かって比抵抗が下がっていき、HNL100、HNL200、HNL300 と同様の傾向を示す。

HNL500 測線（図 3-3(5)）

HNL100、HNL200、HNL300 および HNL400 と同様、浅部は低比抵抗、深部は高比抵抗が分布する。比抵抗値は $3\Omega\text{m}$ から $2500\Omega\text{m}$ 以上の範囲にある。HNL-506 の表層付近で最も低い比抵抗値を示す。 $100\Omega\text{m}$ 以下の浅部低比抵抗の分布は南西側で地表から標高-1400m 程度まで分布し、北東側では標高-800m 程度まで分布する。この $100\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗層は南西側から北東側に向かって徐々に薄くなる傾向を示す。標高-4500m レベルで北東側に最大の比抵抗を示し、北東側から南西側に向かって比抵抗が下がっていき、HNL100、HNL200、HNL300 および HNL400 と同様の傾向を示す。 $2500\Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗分布の範囲は他の測線と比較して小さくなっている。

(2) 比抵抗分布平面図

比抵抗分布平面図から読み取れる比抵抗構造の特徴は以下の通りである。

標高 100m（図 3-4(1)）

調査地域全体に $16\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗が分布する。大局的には調査地域の西側から東側に向かって比抵抗が下がる傾向を示す。北東端において $4\Omega\text{m}$ 以下の最も低い比抵抗を示す。

標高-500m（図 3-4(2)）

分布する比抵抗値は $10\ \Omega\text{m}$ から $100\ \Omega\text{m}$ の範囲にある。調査地域の西側から東側に向かって比抵抗が徐々に大きくなり、HNL100 の北東側で最大の比抵抗を示す。コンターラインはほぼ北西-南東方向に伸び、ほぼ等間隔に並び、比抵抗が徐々に変化する。

標高-1000m（図 3-4(3)）

$25\ \Omega\text{m}$ から $600\ \Omega\text{m}$ までの比抵抗が分布する。西側から東側へ向かって比抵抗が大きくなる。比抵抗のコンターラインは標高-500m の平面図と同様、主に北西-南東方向を示すが、HNL300 と HNL400 の中央から北東寄りコンター間隔が狭くなっており、比抵抗不連続構造を示唆している。

標高-2000m（図 3-4(4)）

$160\ \Omega\text{m}$ から $2500\ \Omega\text{m}$ 以上の比抵抗が分布する。HNL300 の南西端で最も低い比抵抗値を示し、西側から東側へ向かって比抵抗が高くなる。コンターラインの形状は標高-2000m の場合とほぼ同様で、主に北西-南東方向を示す。また、HNL300 と HNL400 の中央から北東寄りコンター間隔が狭くなっており、比抵抗不連続構造を示唆している。

標高-4000m（図 3-4(5)）

調査地域全体に $400\ \Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗が分布する。HNL200 と HNL300 の南西端で最も低い比抵抗値を示し、南西側から北東側に向かって比抵抗が大きくなる。調査地域の北東側には $2500\ \Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗が広く分布するのが特徴的である。

標高-10000m（図 3-4(6)）

分布する比抵抗の範囲は $250\ \Omega\text{m}$ から $2500\ \Omega\text{m}$ である。標高-4000m の場合と比較して全体的に比抵抗が小さくなっている。調査地域の南西側には $400\ \Omega\text{m}$ 以下の比抵抗が広く分布し、北東側に向かって比抵抗が大きくなる。コンターラインは主に北西-南東方向を示す。

3.2.4 解析結果のまとめ

Hanle 地域の比抵抗構造の特徴をまとめると以下の通りである。また、上述の解析結果をもとに作成した、比抵抗分布の断面パネルダイヤグラムおよび平面パネルダイヤグラムを、図 3-5 および図 3-6 に示す。

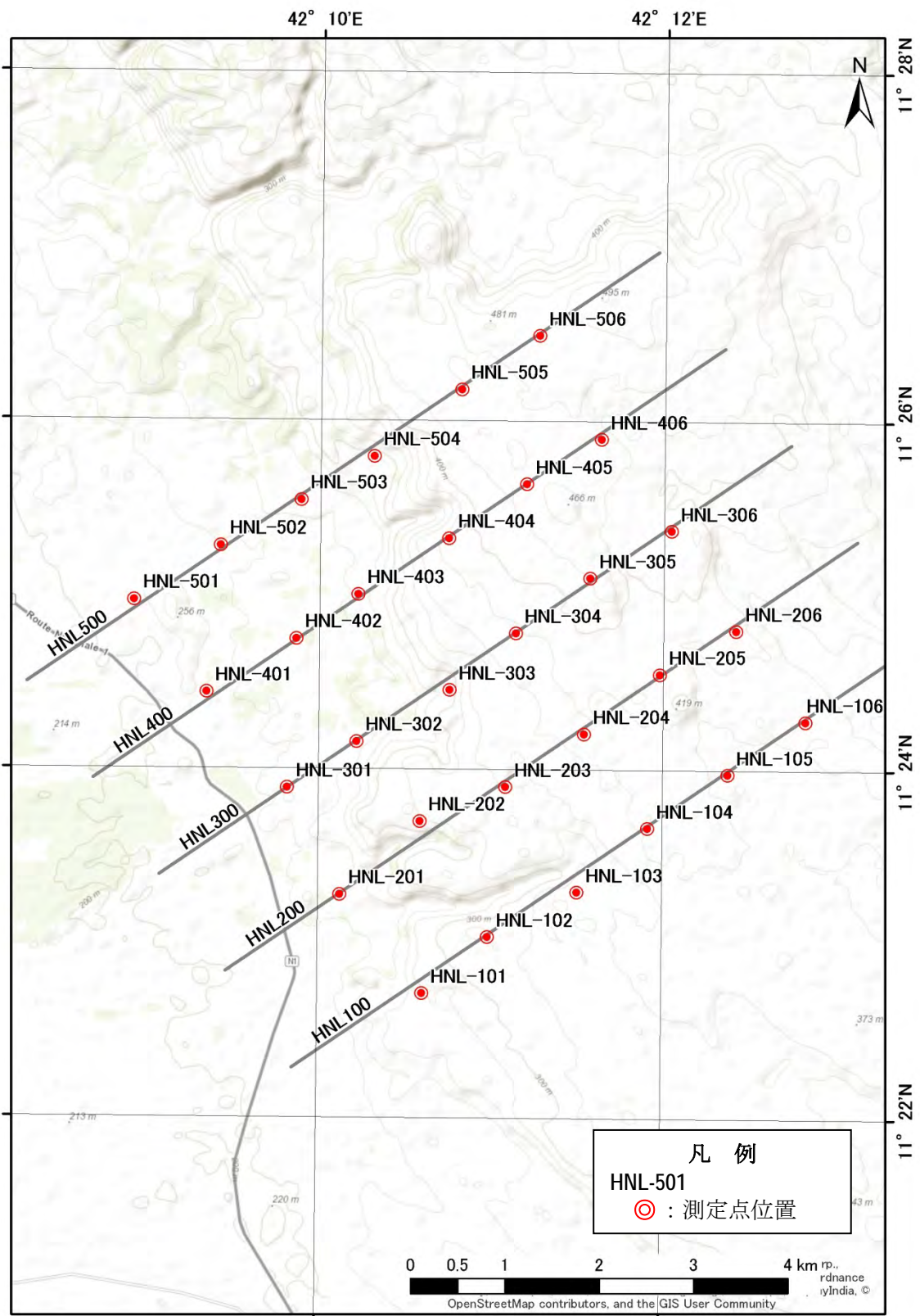
- ・比抵抗構造は地表から深部に向かって浅部の低比抵抗層、厚い中間部の高比抵抗層、深部の低比抵抗層の三層構造を成し、比抵抗値は概ね $1\ \Omega\text{m}$ から $2500\ \Omega\text{m}$ 程度までの比抵抗が分布する。
- ・浅部の低比抵抗層と中間部の高比抵抗層の境界としての $100\ \Omega\text{m}$ のコンターラインは南西側で標高-1500m から-2000m あたりに位置し、大局的には北東側へ向かって浅くなる傾向を示し、北東側では標高-500m から-1000m あたりに位置する。
- ・調査地域全体で見ると大局的には南西側から北東側に向かって相対的に低比抵抗から高比抵抗に変化する傾向が認められるが、標高-1000m から-2000m にかけてはコンターラインの間隔が相対的に狭くなっており、比抵抗が急激に変化する比抵抗の不連続構造を示唆する。

- ・調査地域の平原側で浅部の低比抵抗層は厚く、台地側で薄くなっている。また中間部の比抵抗分布は台地側で高比抵抗を示し、平原側では低比抵抗を示す。比抵抗が急激に変化する比抵抗の不連続部は主に平原と台地の境界部に一致している。
- ・すべての測線で北東側の標高-4000m から-5000m 付近で $2500 \Omega m$ 以上の最も高い比抵抗を示し、その高比抵抗部は HNL200 から HNL300 を中心として広く分布する。



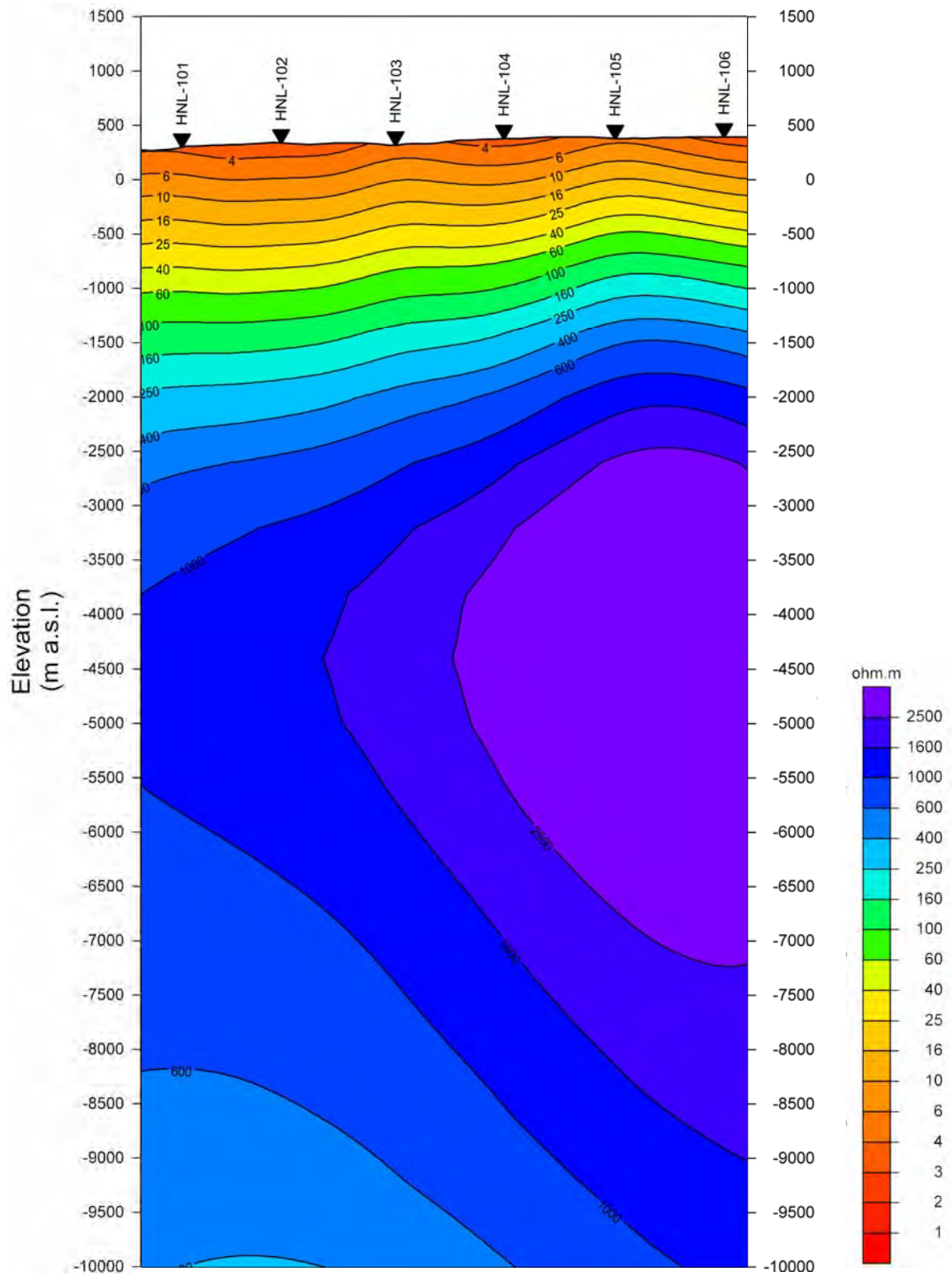
出典：調査団

図 3-1 探査箇所位置図



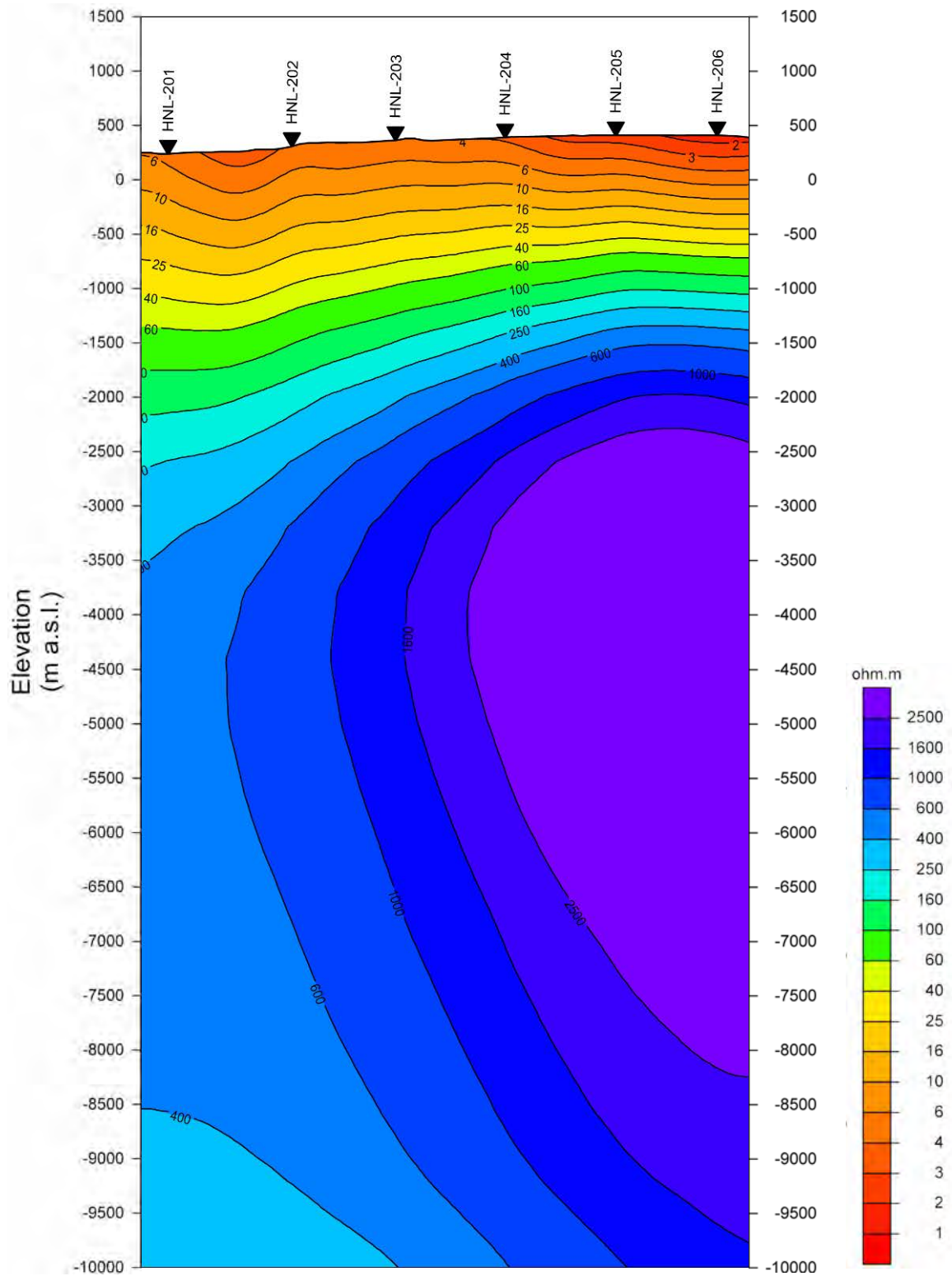
出典：調査団

図 3-2 測定点位置図



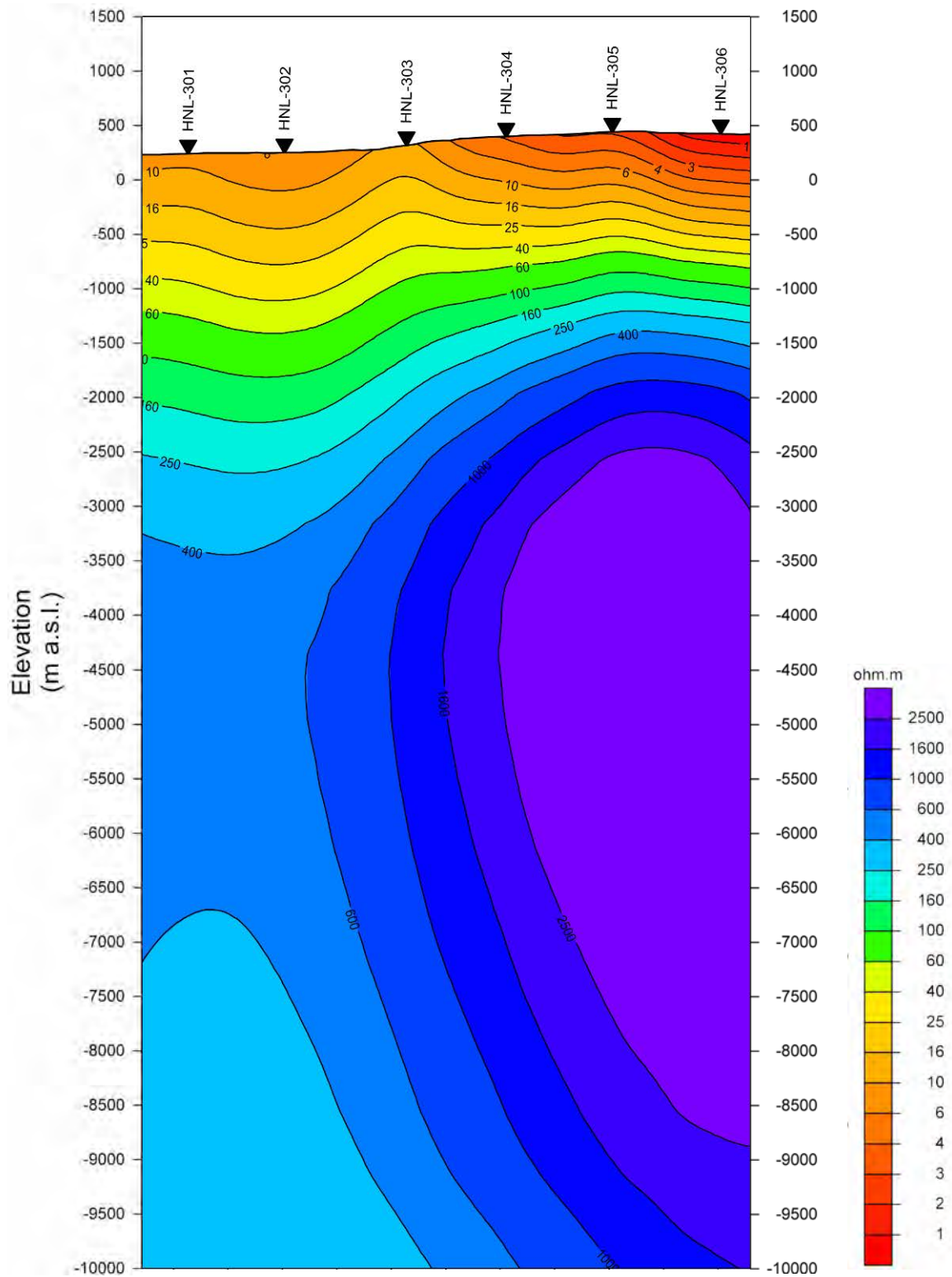
出典：調査団

図 3-3 (1) 比抵抗分布断面図 (HNL100)



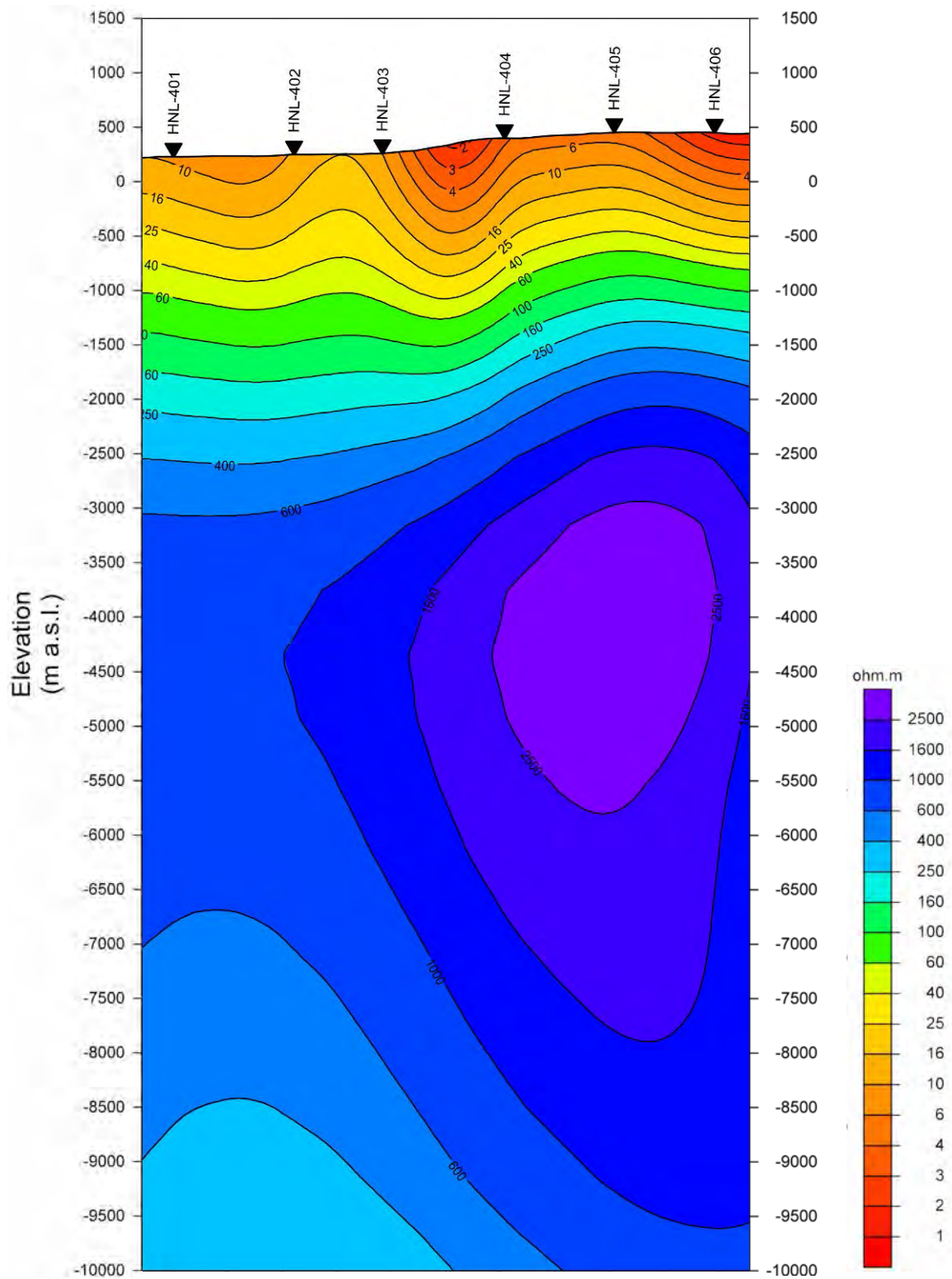
出典：調査団

図 3-3 (2) 比抵抗分布断面図 (HNL200)



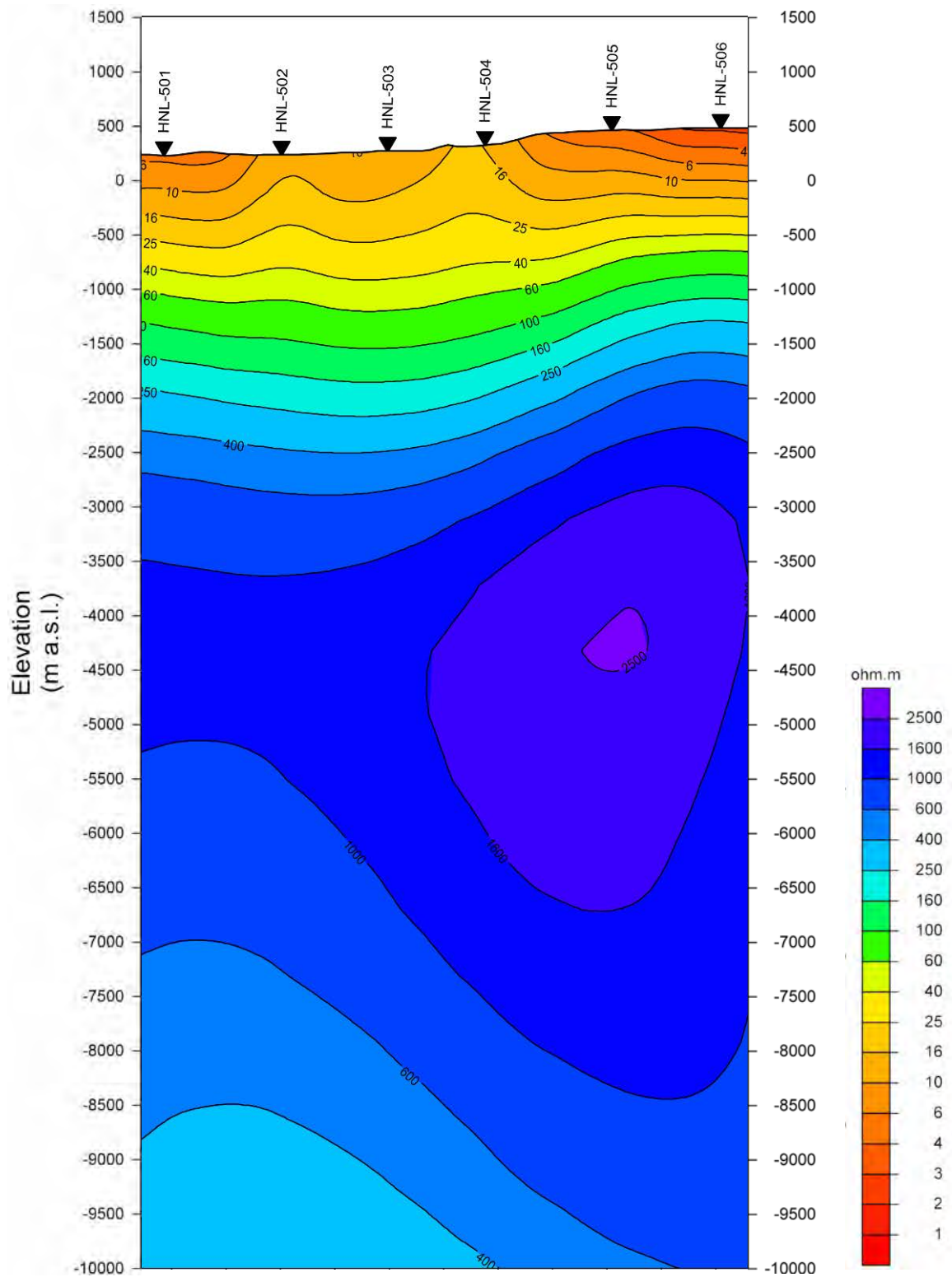
出典：調査団

図 3-3 (3) 比抵抗分布断面図 (HNL300)



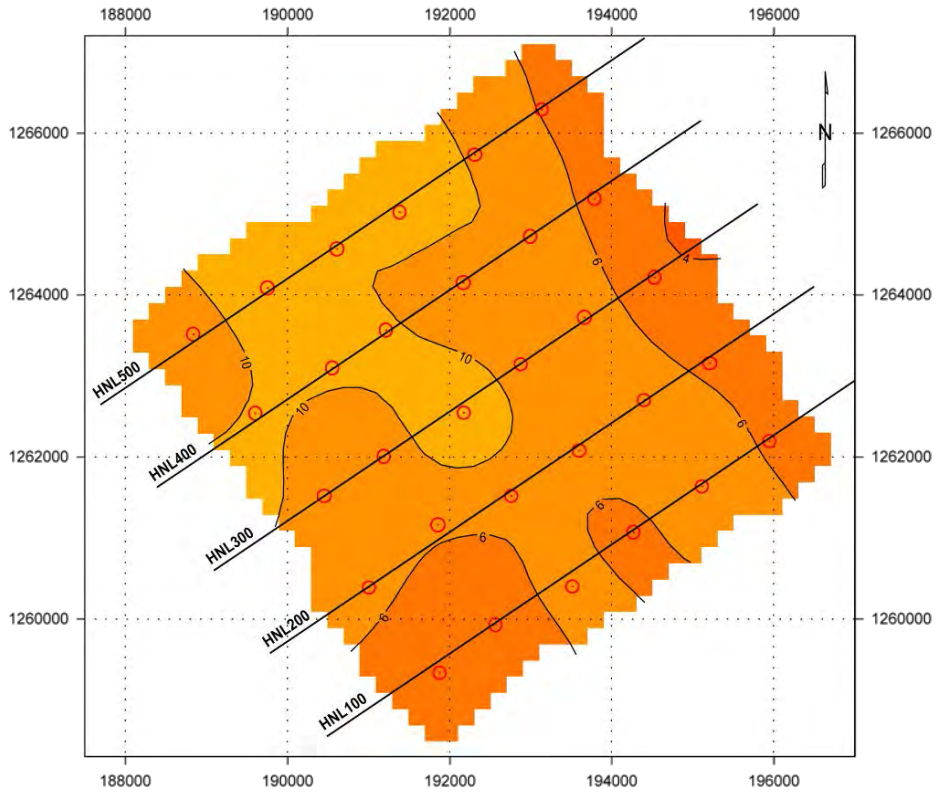
出典：調査団

図 3-3 (4) 比抵抗分布断面図 (HNL400)



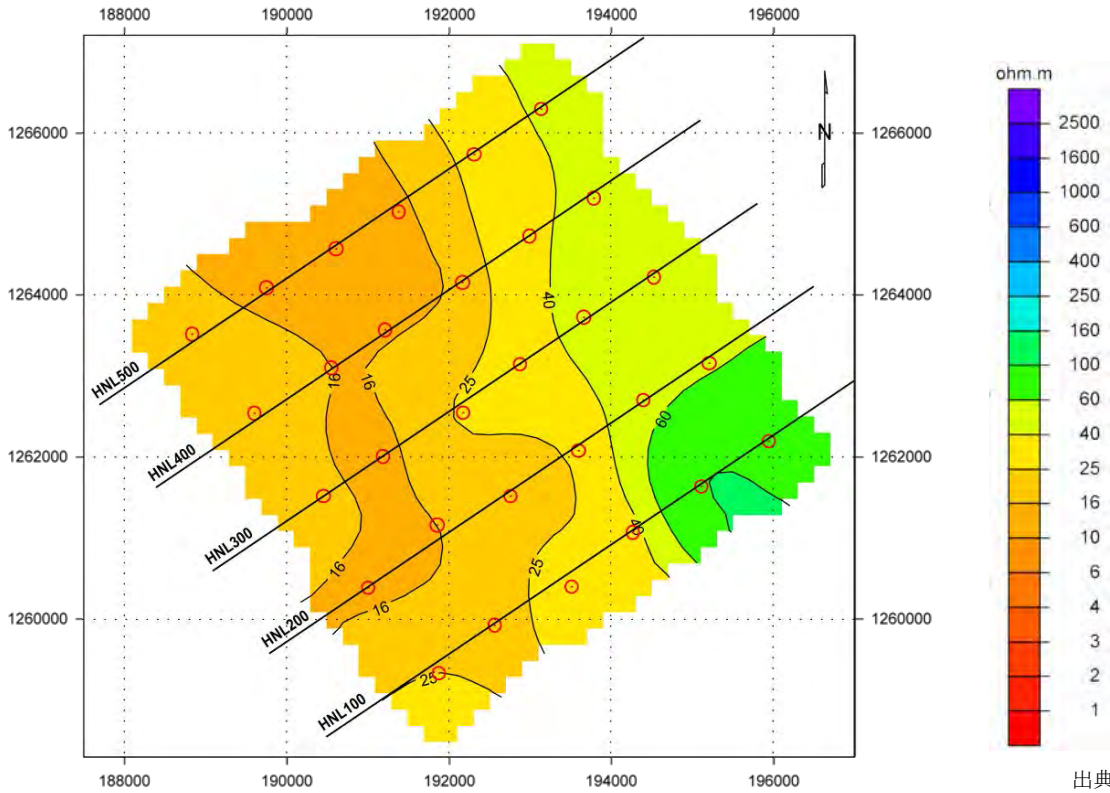
出典：調査団

図 3-3 (5) 比抵抗分布断面図 (HNL500)



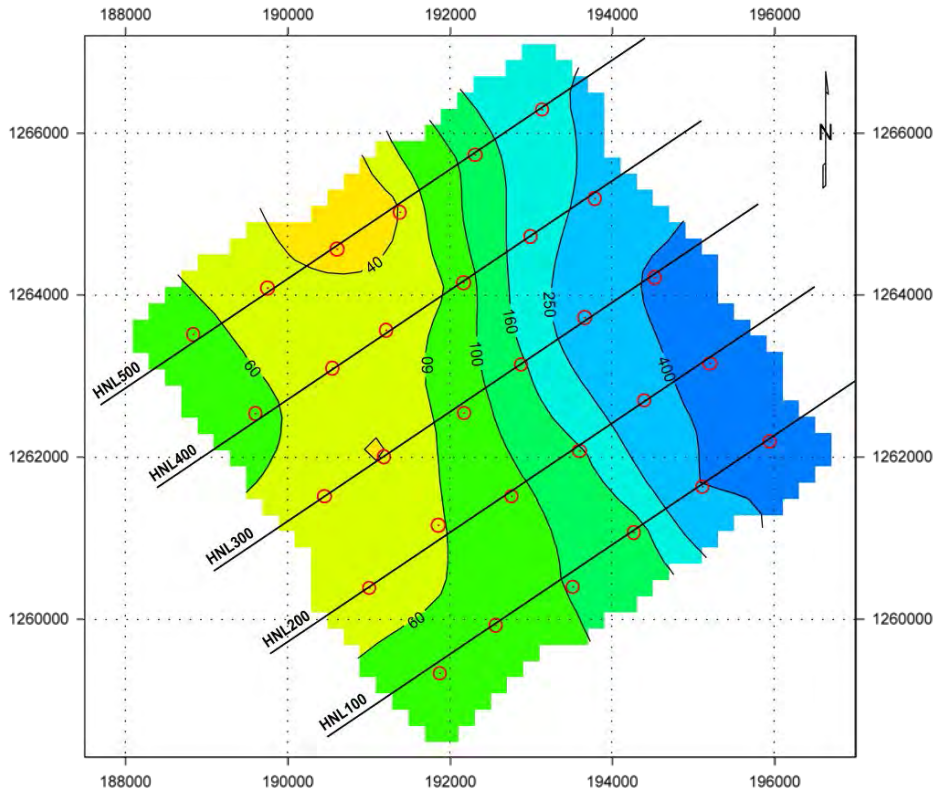
出典：調査団

図 3-4 (1) 比抵抗分布平面図 (標高 100m)



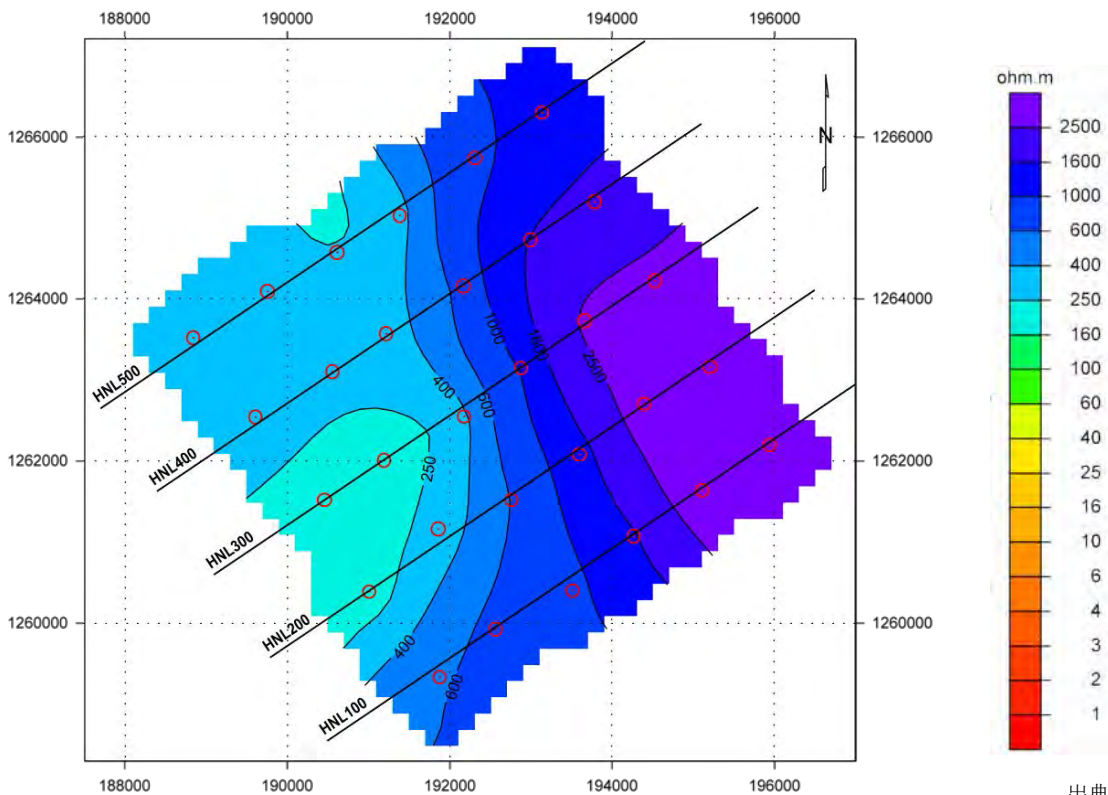
出典：調査団

図 3-4 (2) 比抵抗分布平面図 (標高-500m)



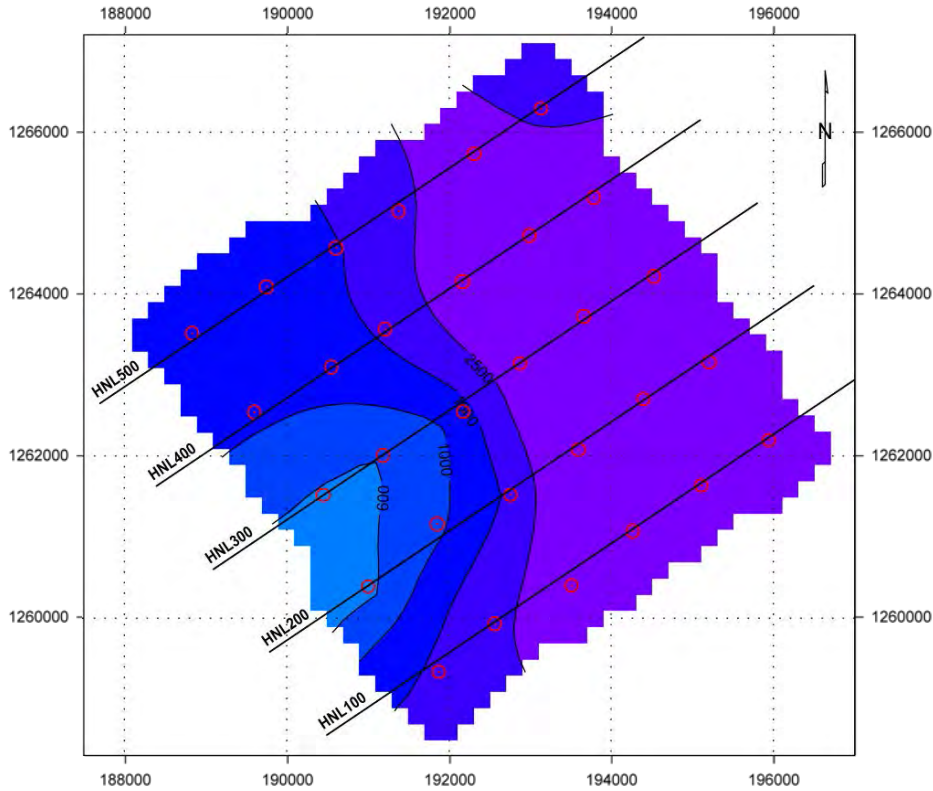
出典：調査団

図 3-4 (3) 比抵抗分布平面図（標高-1000m）



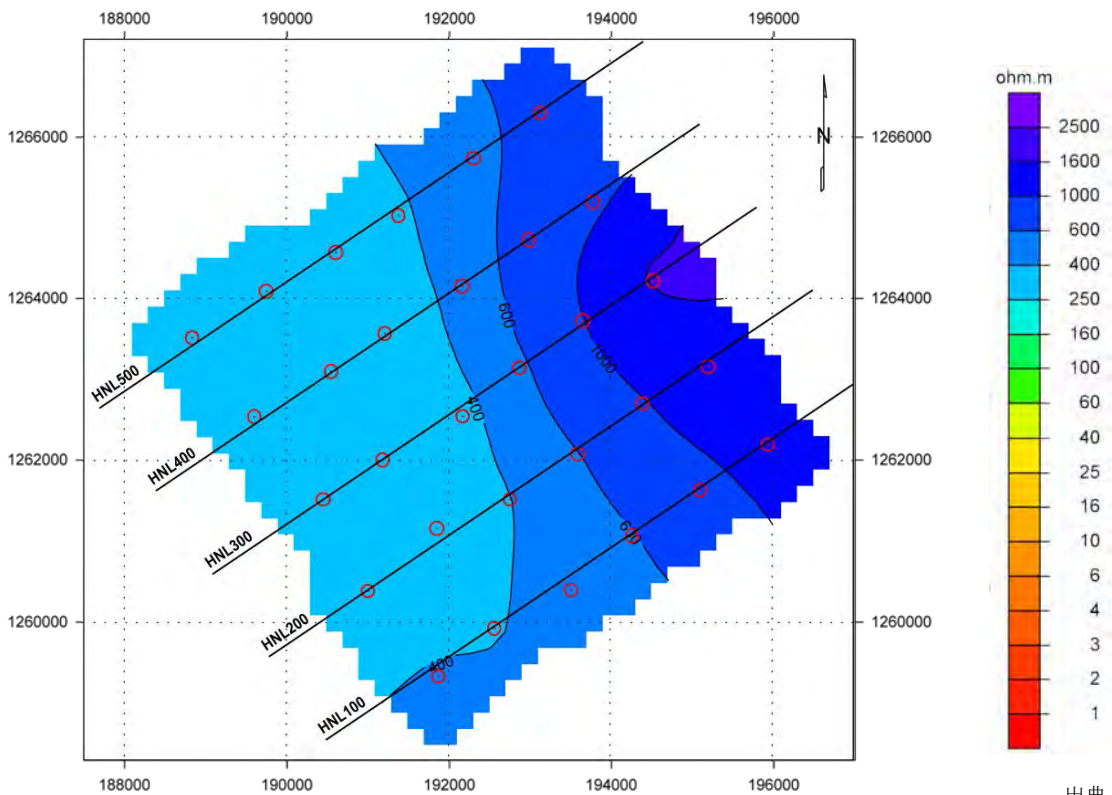
出典：調査団

図 3-4 (4) 比抵抗分布平面図（標高-2000m）



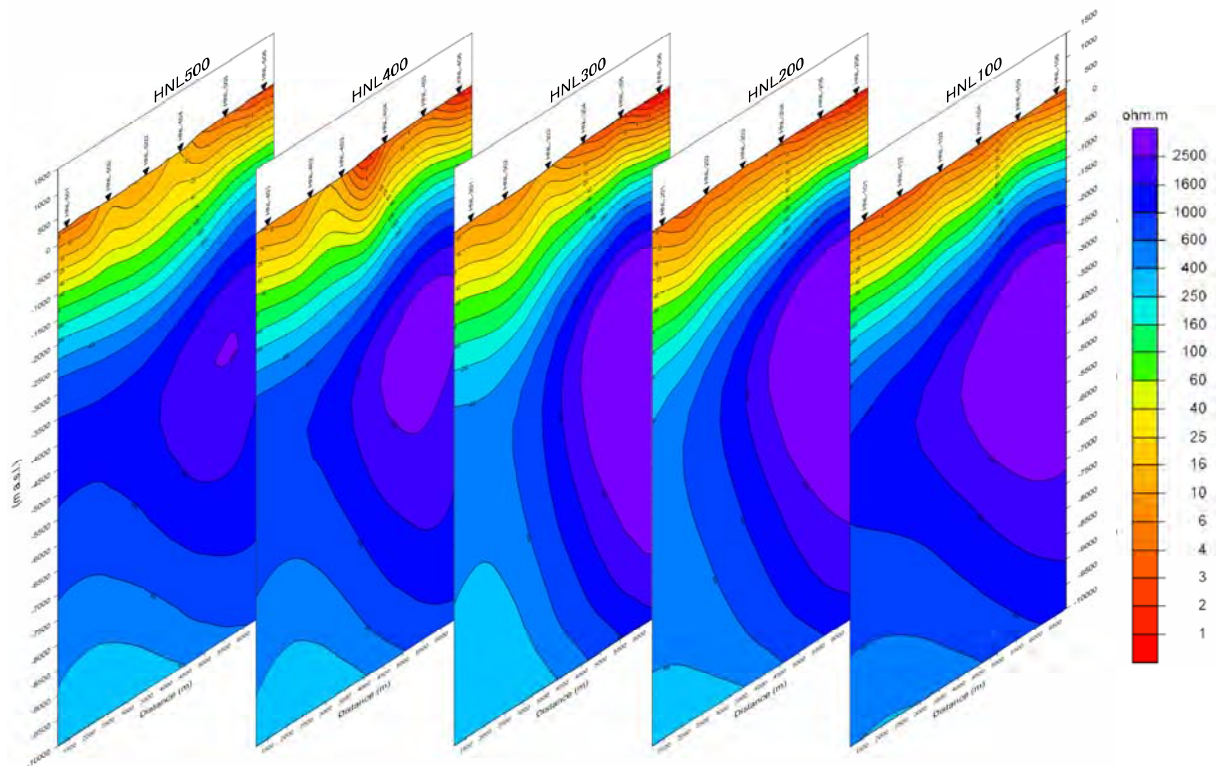
出典：調査団

図 3-4 (5) 比抵抗分布平面図（標高-4000m）



出典：調査団

図 3-4 (6) 比抵抗分布平面図（標高-10000m）



出典：調査団

図 3-5 比抵抗分布断面パネルダイヤグラム

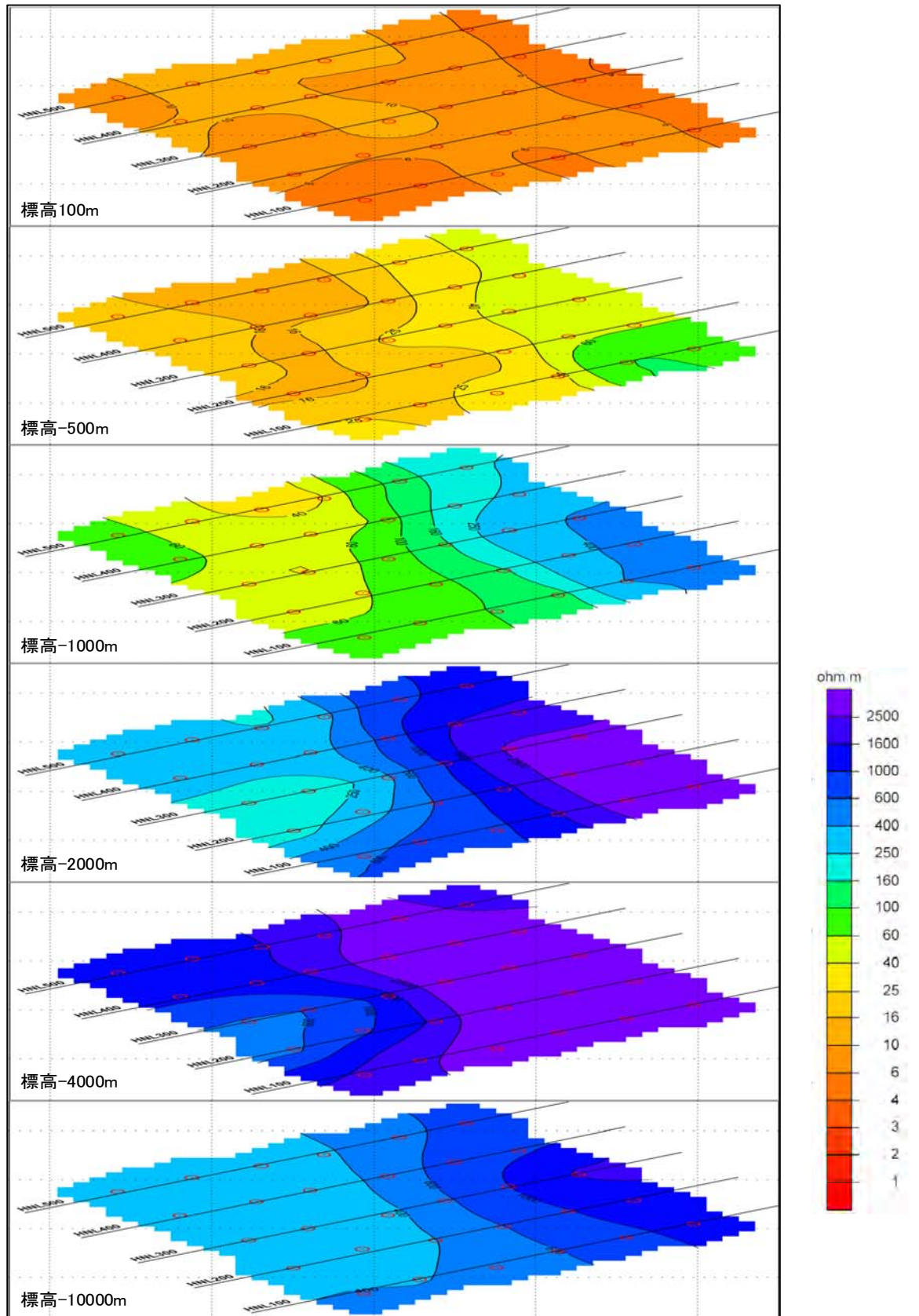


図 3-6 比抵抗分布平面パネルダイアグラム

出典：調査団

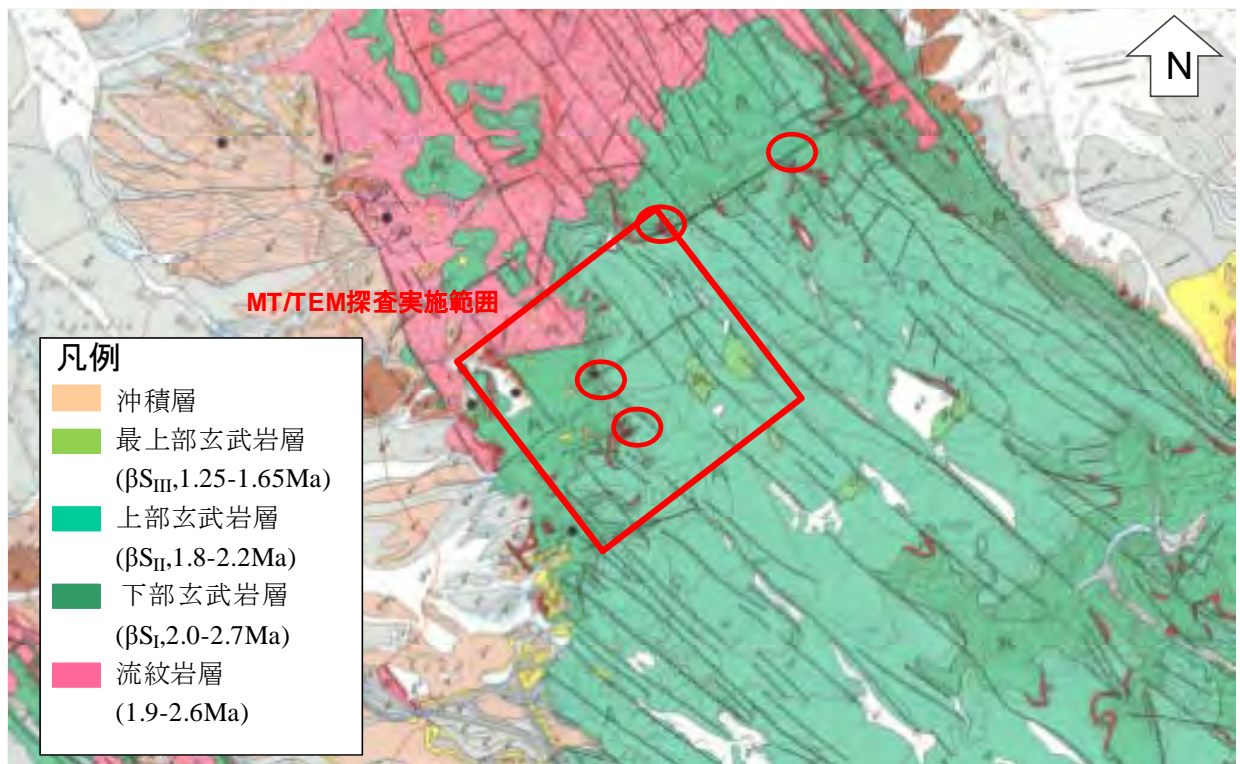
第4章 地質・地化学補足調査

4.1 地形地質概説

4.1.1 地質構造

図 4-1 に調査地域周辺の地質図（ORSTOM, 1987）を示す。調査地域には第四紀の Afar Stratoid の火山岩類が広く分布し、主な地質は下位から下部玄武岩層（2.0-2.7 Ma）、上部玄武岩層（1.8-2.2 Ma）、最上部玄武岩層（1.25-1.65 Ma）であり、北部には下部玄武岩層と同年代の流紋岩層（1.9-2.6 Ma）が分布している。玄武岩類は台地を形成し、MT/TEM 探査範囲を含む広い範囲を覆う。また、最上部玄武岩層は台地上で NW-SE 方向に円頂丘として点在している。

なお、ORSTOM（1987）では、調査地域の溶岩台地上に複数の噴気を確認している。これらは下部玄武岩層と上部玄武岩層の境界部に点在するが、上部玄武岩層が被覆する範囲には認められない。



出典：ORSTOM(1987)より抜粋、加筆

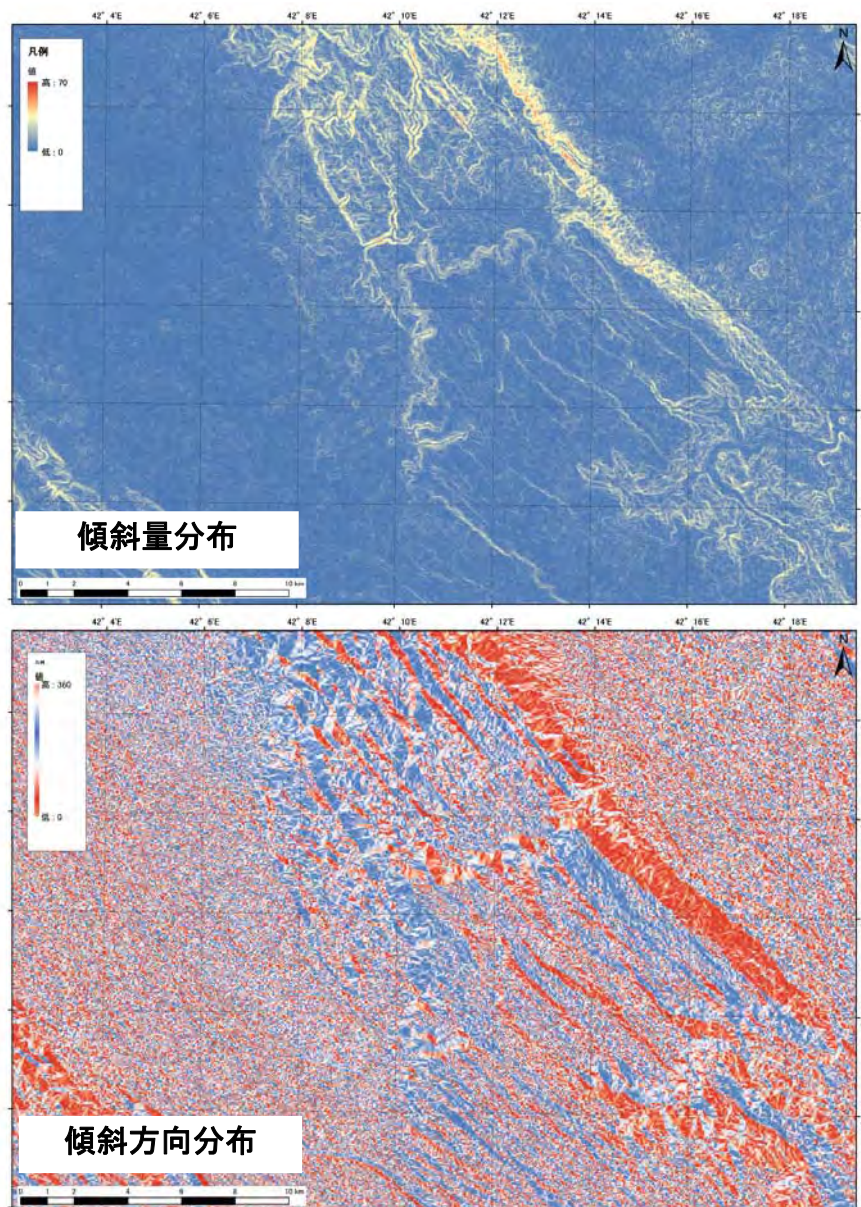
図 4-1 調査地域周辺地質図

4.1.2 断層分布

調査地域において地熱系を構成する断層構造を求めめるため、地形データを用いて断層分布の解析を行った。解析には ASTER GDEM 30m グリッドデータを使用し、調査地域の傾斜量分布、傾斜方向を作図した（図 4-2）。傾斜量分布図から断層と考えられる部分を抽出し、傾斜方向図を用いて各抽出部の傾斜方向を推定した。

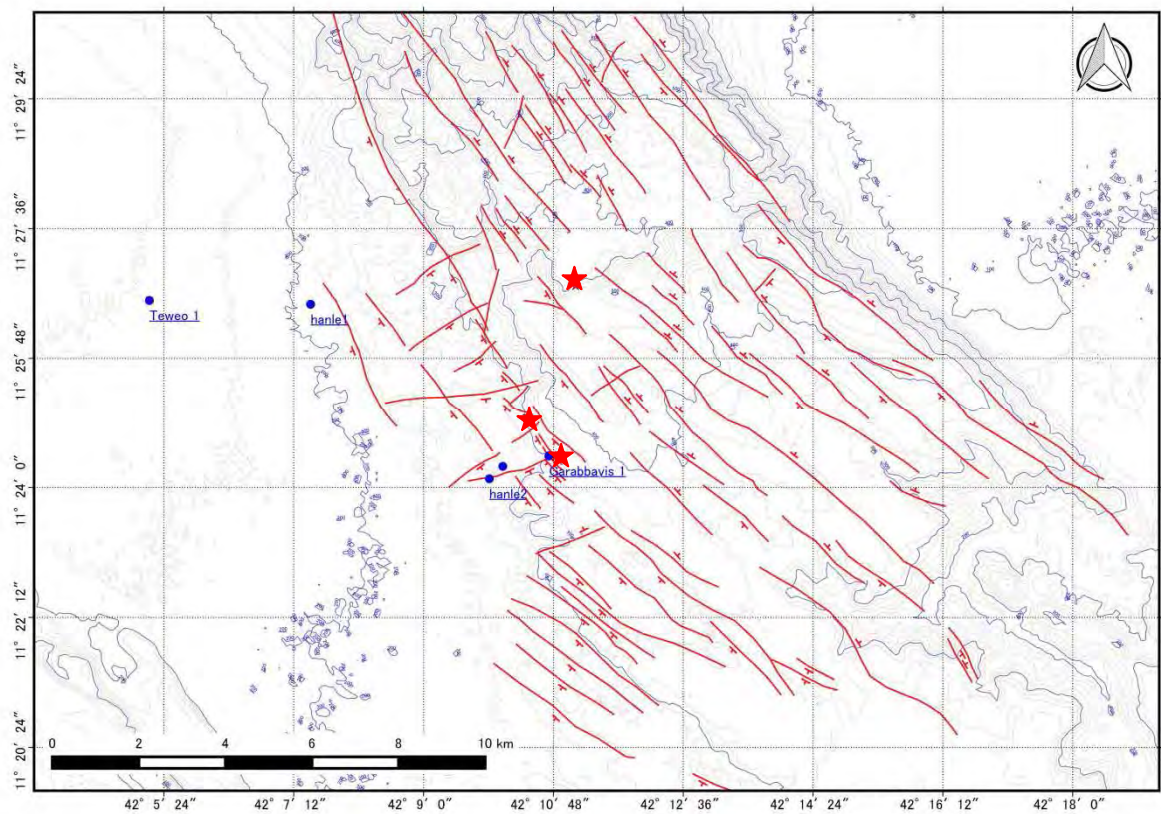
図 4-3 に推定した断層分布を示す。断層の走向は北西-南東が支配的である。特に、溶岩台地の北東、南西端には大規模な断層が認められ、それぞれ平原側へ傾斜している。溶岩台地は、地塁構造を形成している。以下に主な特徴を記述する。

- 傾斜量分布図で溶岩台地北部の流紋岩南西を隔する断層は、溶岩台地南部の上部玄武岩層分布域には連続しない。
- 流紋岩層にみられる断層は、下部玄武岩層や上部玄武岩層分布域には連続しない。
- 地質図には上位玄武岩層境界部に断層が描かれているが、図 4-2 では確認できない。上部玄武岩層が下部玄武岩層を被覆していると考えられる。
- この地域の地形の形成史は、(i) 流紋岩南西縁断層の形成、(ii) 下部玄武岩、上部玄武岩が噴出、(iii) 溶岩台地の北東縁を区切る大規模断層の形成、と推定される。



出典：調査団

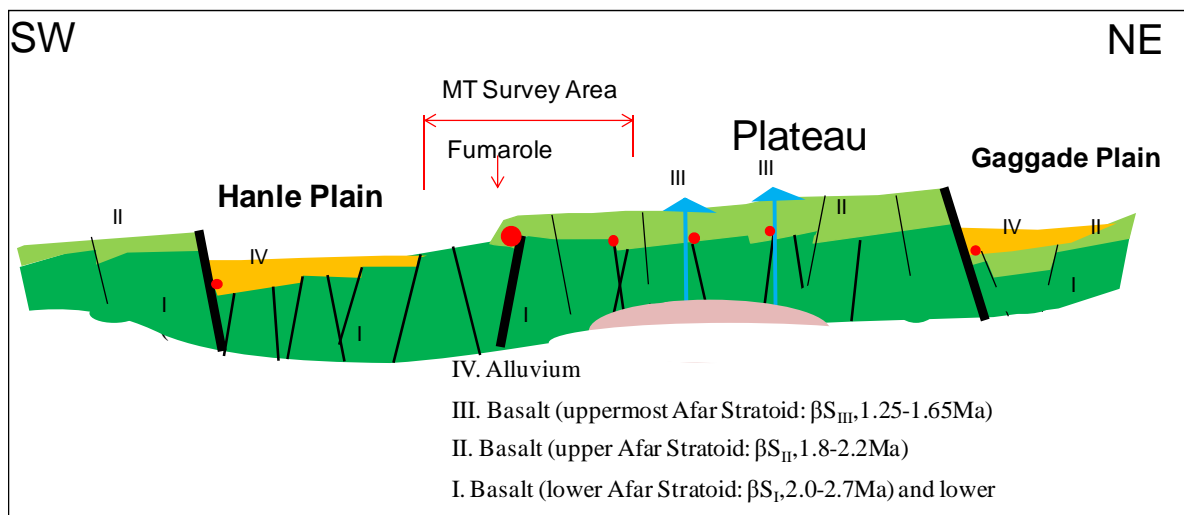
図 4-2 傾斜量と傾斜方向分布図



出典: 調査団

図 4-3 断層分布推定図

地質構造、リニアメント推定結果をもとに、調査地域周辺の地質断面概念図を作成すると、図 4-4 のようになる。



出典: 調査団

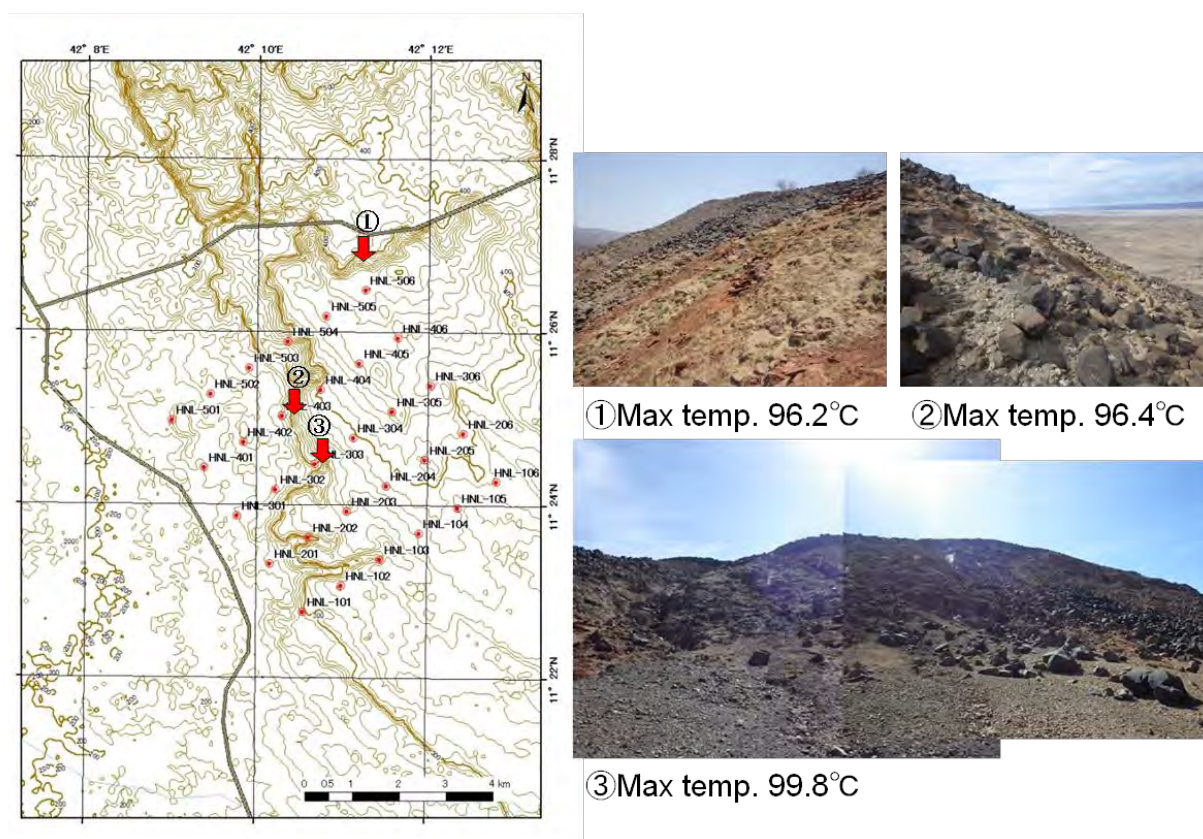
図 4-4 地質断面概念図

4.2 現地調査および室内解析

4.2.1 地熱徴候調査

調査地域における地熱徴候の分布を確認するために、前述の物理探査と並行して地表踏査を実施した。その結果、物理探査実施範囲周辺の3箇所にて噴気帯が確認された。図4-5に位置図を示す。

各地点の最高温度および地熱徴候の広がりを表4-1にまとめた。最も大規模な徴候は③地点であり、NW-SE方向約500mにわたって地表高温域の分布が確認された（図4-6）。なお、③地点の南端に見られる噴気ではJICA（2014）でガス分析を実施している（後述の4.2.2 地化学調査を参照）。



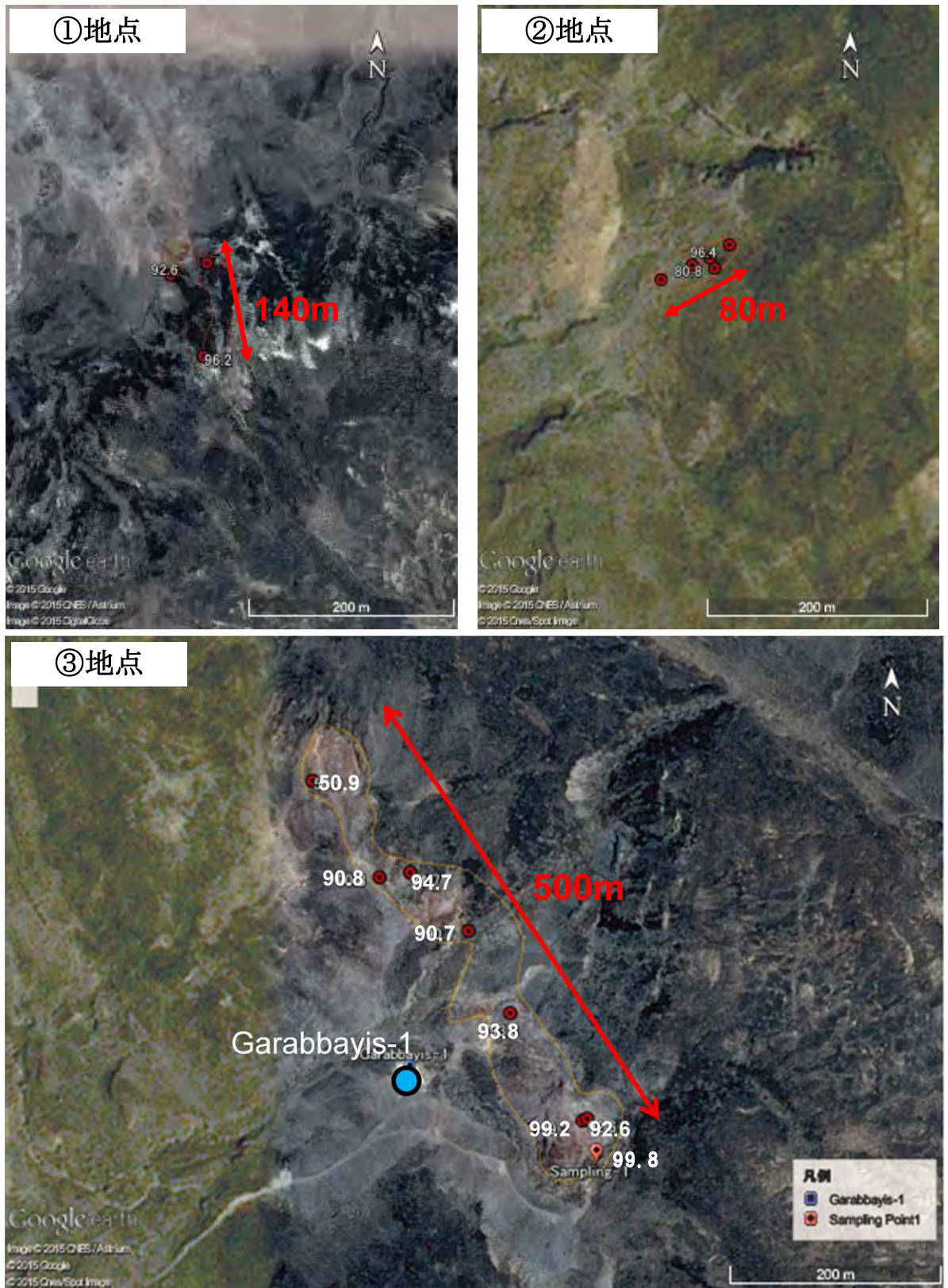
出典：調査団

図 4-5 地表地熱徴候位置図

表 4-1 地熱徴候諸元

地点番号	最高温度	長さ	幅	分布方向
①	96.2°C	約 140m	最大 30m	NNW-SSE
②	96.4°C	約 80m	最大 30m	NE-SW
③	99.8°C	約 500m	最大 130m	NW-SE

出典：調査団



出典：調査団

図 4-6 地熱徴候分布図

4.2.2 地化学調査

(1) 目的

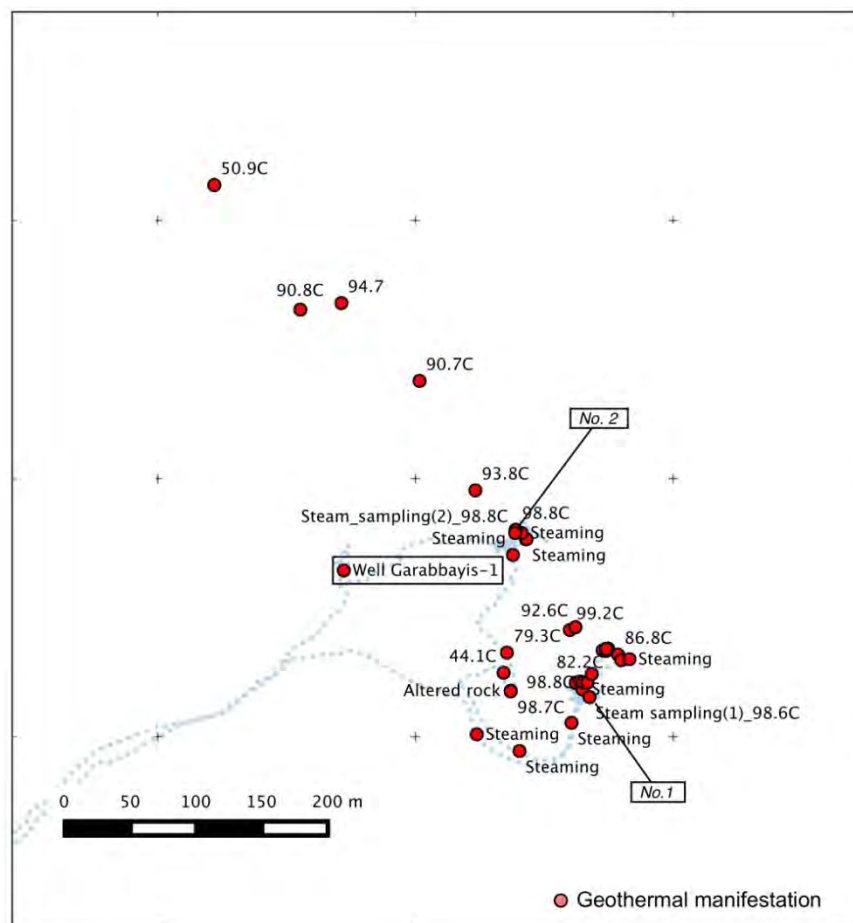
JICA（2014）において、Hanle 地域の Garabbayis 地区の 1 地点において噴気ガス採取・分析を実施した。本調査はこの前回調査の補足調査であり、地熱蒸気の供給範囲と化学性状の時間変化をより詳細に把握することを目的とした。このため、昨年度と同じ地点を含む 2 地点で噴気ガス採取・分析を行った。

(2) 調査地点位置

調査範囲を図 4-7 に示す。調査範囲は既存調査井 Garabbayis-1（深度 435 m）とその東側に分布する地熱徴候地（噴気帯）を含む。図 4-7 に地熱徴候の温度分布を、図 4-8 に採取地点周辺の地熱徴候写真を示す。これらの地熱徴候のうち、比較的勢いの強い噴気 2 地点（下記）で噴気ガスを採取した。

噴気 No. 1：昨年度の噴気ガス採取地点の噴気。

噴気 No. 2：No. 1 から北北西に約 130 m 離れた地点の噴気。



出典：調査団

図 4-7 地化学調査位置



Sampling at No. 1 fumarole



Spots of hot wet soil (98.7°C)

出典：調査団

図 4-8 Garabbayis の地熱徴候

(3) 調査結果と考察

本調査で採取した噴気の化学分析結果を、JICA(2014)の調査結果とともに表 4-2 に示す。また、これらの噴気ガスの He-Ar-N₂ 三成分系図を図 4-9 に示す。同図には参考として、当地域以外のジブチ国の噴気ガス（JICA、2014）も合わせてプロットした。

図 4-9 から、噴気 No. 2 は、噴気 No. 1 の地点で昨年度に採取した噴気ガスと同じ化学組成を示すことがわかる。これらの組成は地表付近で噴気蒸気に混入する大気の影響が少ないことから、これらの噴気には地熱貯留層に起源を持つ地熱蒸気が供給されていることが明らかである。また、これらの噴気の周辺には多数の噴気地点が確認される。これらの地熱徴候は北西-南東方向に配列し、その長さは約 500 m、幅は最大約 130 m に達する（図 4-6 および図 4-7）。このことから、噴気 No. 2 と、JICA(2014)の噴気 No. 1 で採取された地熱蒸気は、地熱徴候が連続して分布する長さ約 500 m の範囲に定常的に供給されていると考えられる。

本調査において噴気 No. 1 の地点で採取した噴気ガスは、JICA(2014)とは異なり、ほぼ大気の組成を示した（図 4-9）。これは本調査時には本地点に対する地熱蒸気の供給が少なく、その分噴気ガスへの大気成分の混入割合が増加したためと解釈する。

表 4-2 Garabbayis 噴気ガスの化学分析結果

Survey Site			Hanle	Hanle	Hanle ^{*2}
Sampling Point			Garabbayis	Garabbayis	Garabbayis
Location No.			No. 1	No. 2	No. 1
Date			2015/4/7	2015/4/7	2014/5/30
Latitude			N 11°24'23.33"	N 11°24'27.22"	N 11°24'23.33"
Longitude			E 42°10'50.48"	E 42°10'48.72"	E 42°10'50.48"
T air	(°C)		36.2	39.3	32.3
T fumarole	(°C)		98.6	98.8	99.8
Boiling Point	(°C)		99.0	99.0	99.5
Intensity of Fumarole			relatively strong	relatively strong	relatively strong
H ₂ O and NCG	H ₂ O (vol%)		97.17	99.98	99.98
(total 100%)	NCG (vol%)		2.83	0.02	0.02
NCG composition (total 100%)	H ₂ S (vol%)		4.1	12.1	0.0
	CO ₂ (vol%)		0.0	15.0	45.0
	R gas (vol%)		95.9	72.9	55.0
R gas composition (total ~100%)	H ₂ (vol%)		0.002	0.063	0.054
	N ₂ (vol%)		78.7	95.1	93.5
	CH ₄ (vol%)		<0.01	0.98	1.0
	O ₂ (vol%)		20.4	2.0	3.6
	He (vol%)		0.0010	0.018	0.019
	Ar (vol%)		0.93	1.8	1.8
R gas composition (total ~100%, Air correct)	H ₂ (vol%)		--	0.070	0.066
	N ₂ (vol%)		--	96.9	96.7
	CH ₄ (vol%)		--	1.1	1.2
	He (vol%)		--	0.020	0.022
	Ar (vol%)		--	1.9	2.0
³ He/ ⁴ He	(× 10 ⁻⁶)		--	--	7.13 ± 0.06
⁴ He/ ²⁰ Ne	-		--	--	11.6
δ ¹³ C (CO ₂)	(‰ PDB)		--	--	-15.1
t _{CA} ^{*1}	(°C)		--	121	159
t _{HA} ^{*1}	(°C)		--	74	72
t _{MC} ^{*1}	(°C)		--	234	266

*1 Giggenbach (1991)

*2 JICA (2014)

出典：調査団

大気成分の混入が少なかった噴気 No. 2 のガス化学組成に基づく地化学温度を計算し、JICA(2014)における噴気 No.1 の地化学温度と比較した。地化学温度計は、 H_2/Ar 温度計(t_{HA})、 CO_2/Ar 温度計(t_{CA})、および CH_4/CO_2 温度計(t_{MC})の 3 種類を用いた。これらガス地化学温度計は、地熱蒸気の上昇過程における温度および酸化還元状態の変化に影響を受ける。この変化への応答の速さは t_{HA} 、 t_{CA} 、 t_{MC} の順に大きい。言い換えると、 t_{MC} が最も深部の温度(一般に最も高温)を反映し、 t_{HA} が最も浅部の温度(一般に最も低温)を反映すると想定できる。

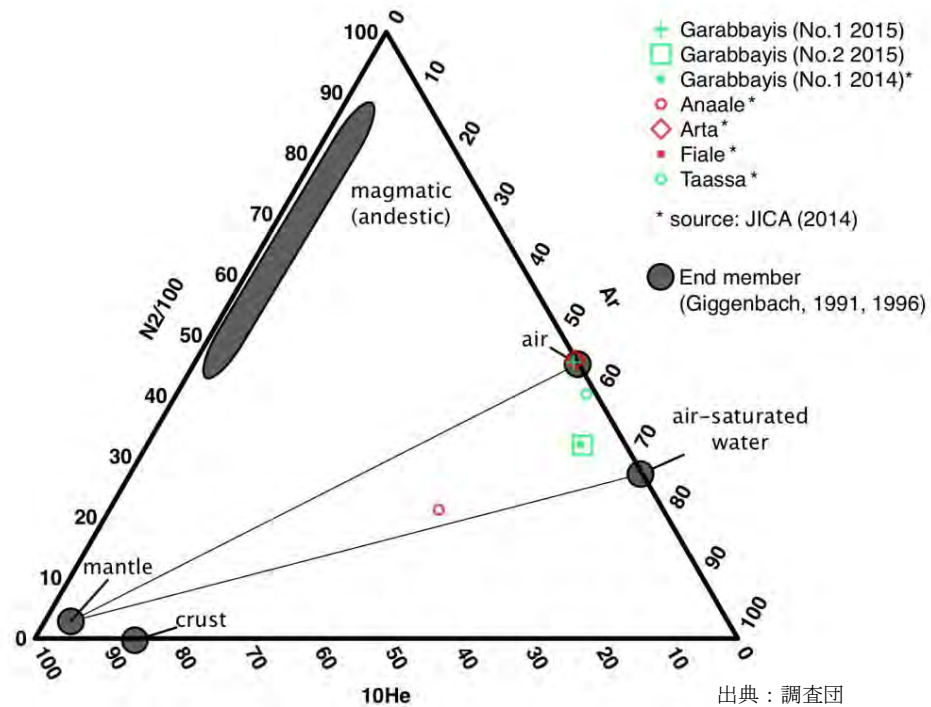


図 4-9 Garabbayis 噴気ガスの He-Ar-N₂ 三成分系図

JICA(2014)の噴気 No. 2 と噴気の地化学温度計計算結果を見ると t_{MC} 、 t_{CA} 、 t_{HA} の順に高く、上で述べたガス地化学温度計の特徴を示す。 t_{HA} は約 70°C と地表の噴気温度(約 98°C)よりも低く、貯留層の温度の推定に用いない。 t_{CA} は約 120°C から 160°C の範囲を、 t_{MC} は約 230°C から 260°C の範囲をそれぞれ示す。このことから、当地区の地下には最高で 260°C 程度の地熱貯留層が賦存する可能性がある。

(4) 考察

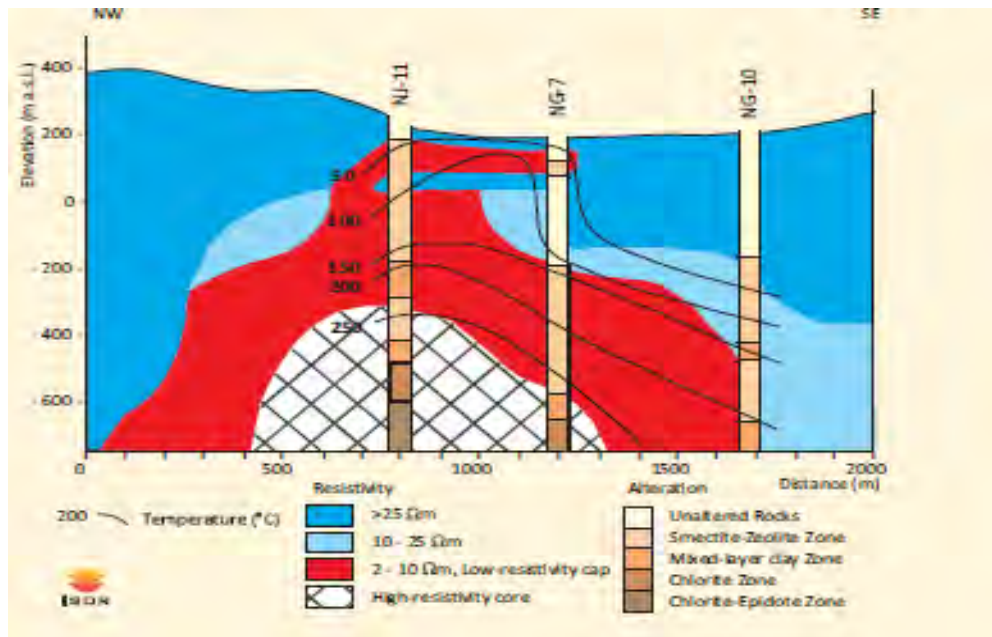
既存井 (Garabbayis-1) の東方には、長さ約 500 m にわたって北西-南東方向に配列する噴気帯が確認される。これらを形成する噴気ガスは、地下深部に賦存する最高で約 260°C と推定される地熱貯留層から定常的に供給されていると考えられる。

第5章 貯留層概念モデル・掘削ターゲットの提案

5.1 貯留層概念モデルの構築

5.1.1 地熱貯留層と比抵抗構造の対比

地熱地域に見られる典型的な地下比抵抗構造の例として、アイスランドの調査結果を引用する（Arnason et al (1987)：図 5-1）。この比抵抗構造の特徴として、1) 上部から上部層、低比抵抗帯、高比抵抗帯の3つのゾーンに区分されること、2) 水平的に不連続な箇所（縦型断層）が出現すること、3) 数Ωm から数百Ωm までの比抵抗を示すこと、が挙げられる。



Arnason et al. (1987)

図 5-1 典型的な地熱貯留層の比抵抗構造

この貯留層の比抵抗構造と、変質鉱物・変質帯および貯留層推定温度の関係は表 5-1 のようにまとめられている。

表 5-1 地熱地域における比抵抗値と変質鉱物および温度の関係

名称	比抵抗値	変質鉱物・変質帯との関係	推定温度
上部層	数百-数千 Ωm	<非変質帯> 火山灰、表土堆積物、非変質火山岩等	50-100°C
低比抵抗帯	10 Ωm (または 5 Ωm)以下	<粘土化帯 (キャップロックに相当) > スメクタイト、混合層粘土鉱物、沸石類を含む変質帯	100-250°C
高比抵抗帯	数十-数百 Ωm	<緑泥石-緑れん石帯 (貯留層に相当) > 緑泥石、イライト、緑れん石 (およびガーネット) を含む変質帯	250-300°C

出典：経済産業省ほか(2010)をもとに調査団が加筆

本業務で得られた比抵抗構造と上述の一般的な地熱地帯で見られる比抵抗構造を比較すると、比抵抗が全体的に高い値を（～2500Ωm）示すことが大きく異なる点であり、表 5-1 の分類をそのまま適応することは出来ない。

しかし、本調査地域では以上に記述してきた様な明瞭な地熱徴候が存在することから、アイスランドの例とは異なる比抵抗構造の地熱貯留層の存在が推定される。

本業務で得られた比抵抗構造では、浅部の数十Ωm 以下の低比抵抗帯が熱水活動に伴う変質帯すなわちキャップ構造を形成し、深部の 1000Ωm 以上の比抵抗帯が熱源となる貫入岩に対応すると考えられ、地熱貯留層はその間の比抵抗帯に形成されると推察される。そこで、本業務では次項に示す方法で貯留層分布域を推定した。

5.1.2 Hanle における貯留層構造と比抵抗構造

既存調査井における熱水変質鉱物分布と MT/TEM 探査から得られた比抵抗分布を比較し、両者の関係から貯留層分布域の比抵抗値を推定した。

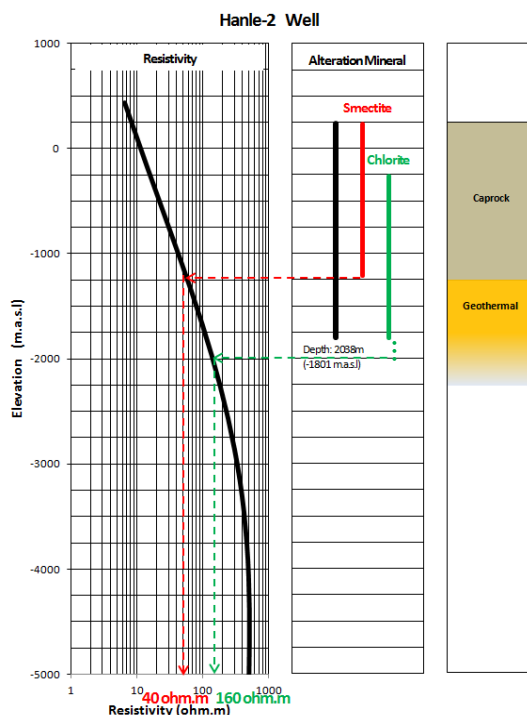
MT/TEM 探査地域西部（HNL301 の北東約 400m）で掘削された既存調査井 Hanle-2（掘削深度 2038m）では、キャップロックを構成する鉱物の一種と考えられるスメクタイト(Smectite)と、貯留層分布域に含まれる緑泥石(Chlorite)が確認されている。この 2 種類の鉱物の分布深度と同地点における比抵抗値の対比を図 5-1 に示す。

スメクタイトが分布する深度の比抵抗値が 40 Ωm 以下を示すことから、調査地域におけるキャップロックに相当する比抵抗値を 40 Ωm 以下と推定した。また、Hanle-2 では緑泥石が坑底まで確認されており、さらに深部まで出現する可能性が考えられる。このため、本調査では同様の鉱物組成が海拔深度-2000m まで続くと仮定し、貯留層に相当する比抵抗値を 40 Ωm から 160 Ωm と設定した。

表 5-2 比抵抗分布に基づく Hanle 地域の地熱構造

名称	比抵抗値	対応する地熱構造	海拔深度
低比抵抗帯	40 Ωm 以下	キャップロック	-500m 以浅
高比抵抗帯	40 - 160 Ωm	地熱貯留層	約-500 - -2000m
超坑比抵抗帯	1000 Ωm 以上	熱源	-2000m 以深

出典：調査団



出典：調査団

図 5-2 比抵抗構造と出現鉱物の対比

5.1.3 地熱貯留層概念モデル

(1) 調査結果の整理

Hanle 地域の地熱貯留層概念モデルの要素を、既存調査および物理探査結果をもとに解釈し、表 5-3 に整理した。

表 5-3 既存調査結果・物理探査結果から得られる地熱構造

Observation	Geothermal System	Interpretation
既存坑井 5 本の 500 m 深における温度は、平原から台地方向に向かい 40°C =>90°C =>120°C と変化する	熱源	熱源は、台地の地下に存在する。
噴気は台地部にのみ確認される		
確認済みの噴気地点は、支配的な断層の延長上に位置する	貯留層	噴気は（流紋岩/下位玄武岩）断層に沿って生じている。
噴気は上位玄武岩の末端部に位置する	貯留層	上位玄武岩がキャップロックの一部となっている。
地化学調査の結果、地表噴気はマンテル起源ガスを含み、最高温度は 260°C 程度を示す	流体	高温流体の存在。
Hanle 平原側坑井（Garabbayis-2: GL-73m）の地下水位が台地側坑井（Garabbayis-1: GL-112m）より高い	流体涵養	Hanle 平原側から台地側への地下水涵養がある。
平原と台地の境界で比抵抗構造が急変する	大規模構造	平原と台地の境界部で大きな断層が存在する。→貯留層の境界
台地深部（海拔標高約-3000m 以深）に 1000 Ωm 以上の高比抵抗帯がある	熱源	玄武岩または流紋岩の貫入岩による温度上昇帯の可能性はある

出典：調査団

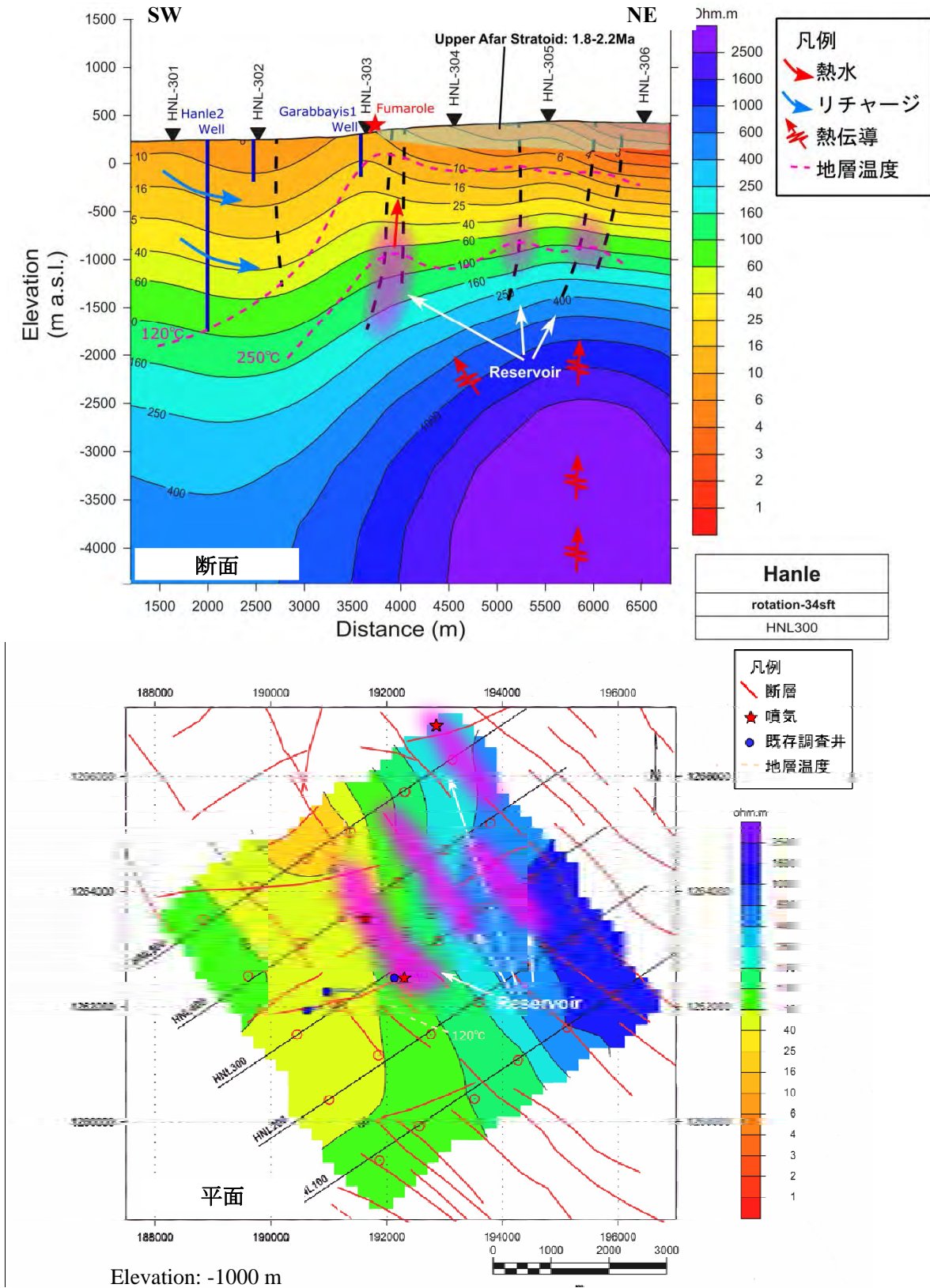
(2) 地熱貯留層概念モデルの提案

現段階において、Hanle 地域の地熱貯留層が形成直後の早期、熱水対流系が安定して存在できる中期、地熱系が衰退する晩期のいずれに相当するかは不明である。そこで、それぞれの時期について個別に地熱貯留層概念モデルを構築し、それぞれケース(a), (b), (c)として表 5-4 にまとめる。また、各ケースの概念図を図 5-2、図 5-3 および図 5-4 にそれぞれ示す。

表 5-4 貯留層概念モデル

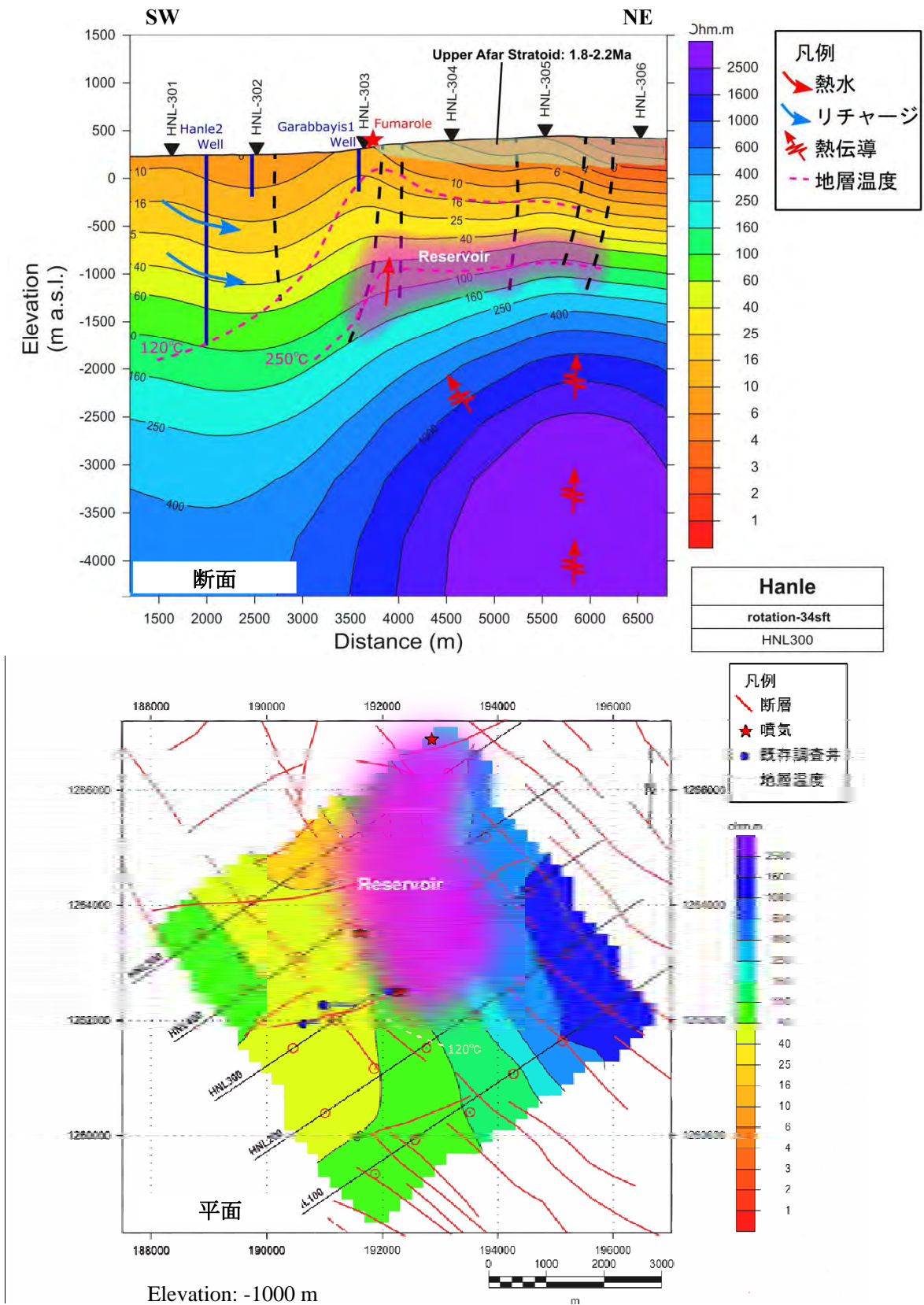
		ケース(a)	ケース(b)	ケース(c)
貯留層の状態		熱源貫入から時間がたつておらず、高温貯留層が局所的に存在する	地熱系が十分に発達し、天水起源地熱流体が対流することで、広範囲に貯留層が形成される	熱源からの熱供給が減衰に伴い、貯留層温度が低下する
貯留層	分布域	台地下の断層周辺の狭い範囲にのみ分布する	台地下の主要な断層によって区切られた範囲に、面的に分布する	台地下の断層周辺の狭い範囲にのみ分布する
	透水性	低	高	低
	温度	最高 260°C程度	最高 260°C程度	最高 260°C程度
流体	起源	Hanle 平原起源の地下水涵養が想定される	Hanle 平原起源の地下水涵養が想定される	Hanle 平原起源の地下水涵養が想定される
	上昇域	熱源上部の断層に沿って上昇域が形成される	熱源上部の断層に沿って上昇域が形成される	熱源上部の噴気が確認される断層に限り上昇域が形成される
熱源		深度 3km 以深に分布する玄武岩もしくは流紋岩質の貫入岩と想定される		

出典：調査団



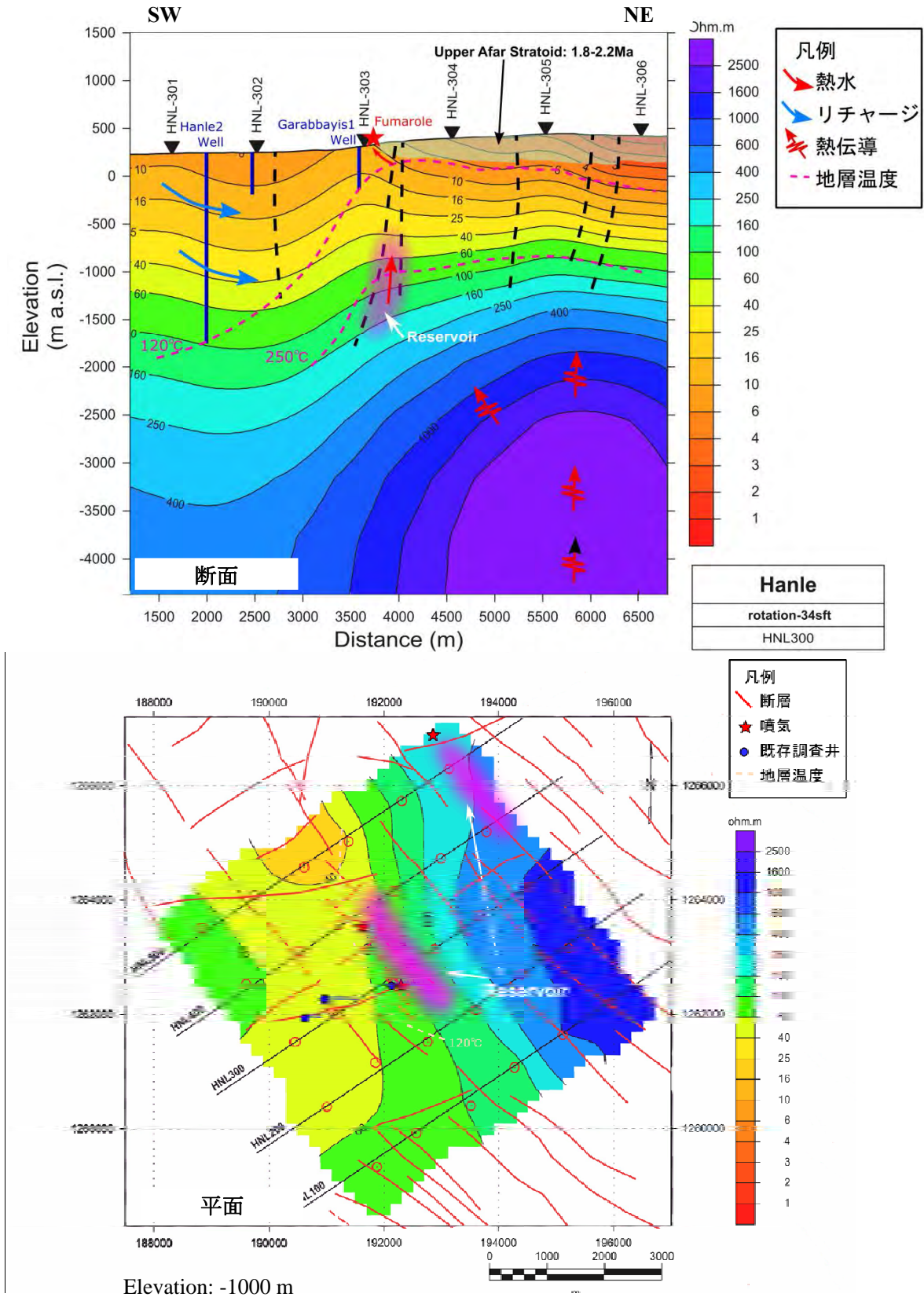
出典：調査団

図 5-3 地熱貯留層概念モデル：ケース (a)



出典：調査団

図 5-4 地熱貯留層概念モデル：ケース (b)



出典：調査団

図 5-5 地熱貯留層概念モデル：ケース (c)

5.1.4 地熱資源量の概算

前述の地熱概念モデルをもとに、確率的手法を併用した「容積法」を用いて資源量の概算評価を行った。確率的手法は「モンテカルロシミュレーション」を用いた。

(1) 容積法

本調査では容積法の各パラメータの算出根拠を明確にするため下記の通りとした。

貯留層温度が 200°C 以上と推定される場合には、典型的な様式であるシングルフラッシュ地熱発電施設を仮定して、下記計算式を提案することにした。下記方法の導入は巻末に添付した論文に詳述した。

$$E = \eta_{ex} \zeta R_g \rho C V (T_r - T_{ref}) / (FL) \quad [\text{kJ/s or kW}] \quad (1)$$

$$\rho C = (1 - \phi) C_r \rho_r + \phi C_f \rho_f \quad [\text{kJ/s or kW}] \quad (2)$$

ここに、 η_{ex} エクセルギー効率、 ζ : 有効エネルギー配分関数、 ϕ : 貯留層岩石の空隙率、 ρ_r : 貯留層岩石の密度、 C_r : 貯留層岩石の比熱、 ρ_f : 貯留層空隙の流体の密度、 C_f : 貯留層空隙の流体の比熱

汽水分離器の圧力は典型的な地熱発電システムを仮定して 5 気圧 (151.8°C) とした。また、復水器の温度 (系に寄与する熱水の最終温度) はジブチの気温条件を考慮して 50°C とした。このときは下記の通りである。なお、式(1)の $R_g \rho C V (T_r - T_{ref})$ は坑口で回収される貯留層地熱エネルギーのが熱を失うことなく汽水分離器に投入されるため $T_{ref} = 0.01^\circ\text{C}$ である。

$$\zeta = 1.14 \times 10^{-8} T_r^3 - 1.13 \times 10^{-5} T_r^2 + 4.19 \times 10^{-3} T_r - 4.59 \times 10^{-1} \quad (3)$$

また、エクセルギー効率は、既存の地熱発電所のデータを統計処理して汽水分離器と復水器の温度差から求めることができる。汽水分離器温度を 151.8°C、復水器温度を 50°C とすると、下記の通りとなる。

$$\eta_{ex} = 0.77 \pm 0.05 \quad (4)$$

回収率は下記の通りとする。

$$R_g = 0.05 \sim 0.20 \quad (5)$$

(2) 使用する確率手法 —モンテカルロ法

モンテカルロシミュレーションには、オラクル社の Crystal Ball を用いた。変動させるパラメータは初期貯留層温度 (T : initial reservoir temperature°C)、空隙率 (Φ : porosity)、貯留層容積 (V : reservoir volume m³) の 3 つを三角分布 (Triangular Distribution) で仮定して、賦存熱量を求めた。同時に、回収率をパラメータとして変動させて、回収可能熱量を求め、そして電力変換することで地熱資源量 (MWe) を計算した。

(3) 貯留層体積の推定

貯留層体積は、構築した地熱概念モデルをもとに推定した。地熱貯留層概念モデルのケース(a)～ケース(c)の全てを包含する確率的手法とするため、貯留層の体積の最低値は、貯留層が全く存在しない（見つからない）場合を想定しゼロとした。

(4) 貯留層平均温度の設定

貯留層の平均温度は、地化学調査結果をもとに、最高 260°C、最低 200°Cとし、最可能値はその中間値 230°Cと設定した。

(5) 貯留層評価結果

上述の内容を含めた、容積法の計算に使用するパラメータを表 5-5 に整理した。

表 5-5 容積法で使用したパラメータ

Parameter	Symbol	Unit	Range			Probabilistic distribution
			Min.	M.L.	Max.	
Volume	V	m ³	0	9.50E+09	1.50E+10	Triangle
Reservoir temperature	T _r	°C	200	230	260	Triangle
Rock density	ρ _r	kg/m ³	-	2600	-	fixed
Rock volumetric specific heat	C _r	kJ/kg	-	1	-	fixed
Fluid volumetric density	ρ _f	kg/m ³	-	950	-	fixed
Fluid specific heat	C _f	kJ/kg	-	5	-	fixed
Porosity	Φ	%	5	-	10	Uniform
Recovery factor	R _g	%	5	-	20	Uniform
Reference temperature for flash type	T _{ref}	°C	-	0.01	-	fixed
Rejection temperature (condenser temperature)*	T ₀	°C	-	50	-	fixed
Separator temperature*	-	°C	-	151.8	-	fixed
Exergy efficiency for flash	η _{ex}	%	72	77	82	Triangle
Plant factor	F	%	-	90	-	fixed
Plant life	L	year	-	30	-	fixed

Min.: Minimum; Max.: Maximum, M.L.: Most likely; *tbp*: to be proposed; *: given in the heat allocation

出典：調査団

資源量算出結果を表 5-6 に示す。

「推定される地熱資源量 (Inferred Geothermal Resource)」は、最頻値で約 33 MW、生起確率 80% で約 17MW、生起確率 20% で約 86 MW となった。

表 5-6 資源量算出結果

Capacity (MW)		
80%	Most Probable	20%
16.9	32.8	86.4

出典：調査団

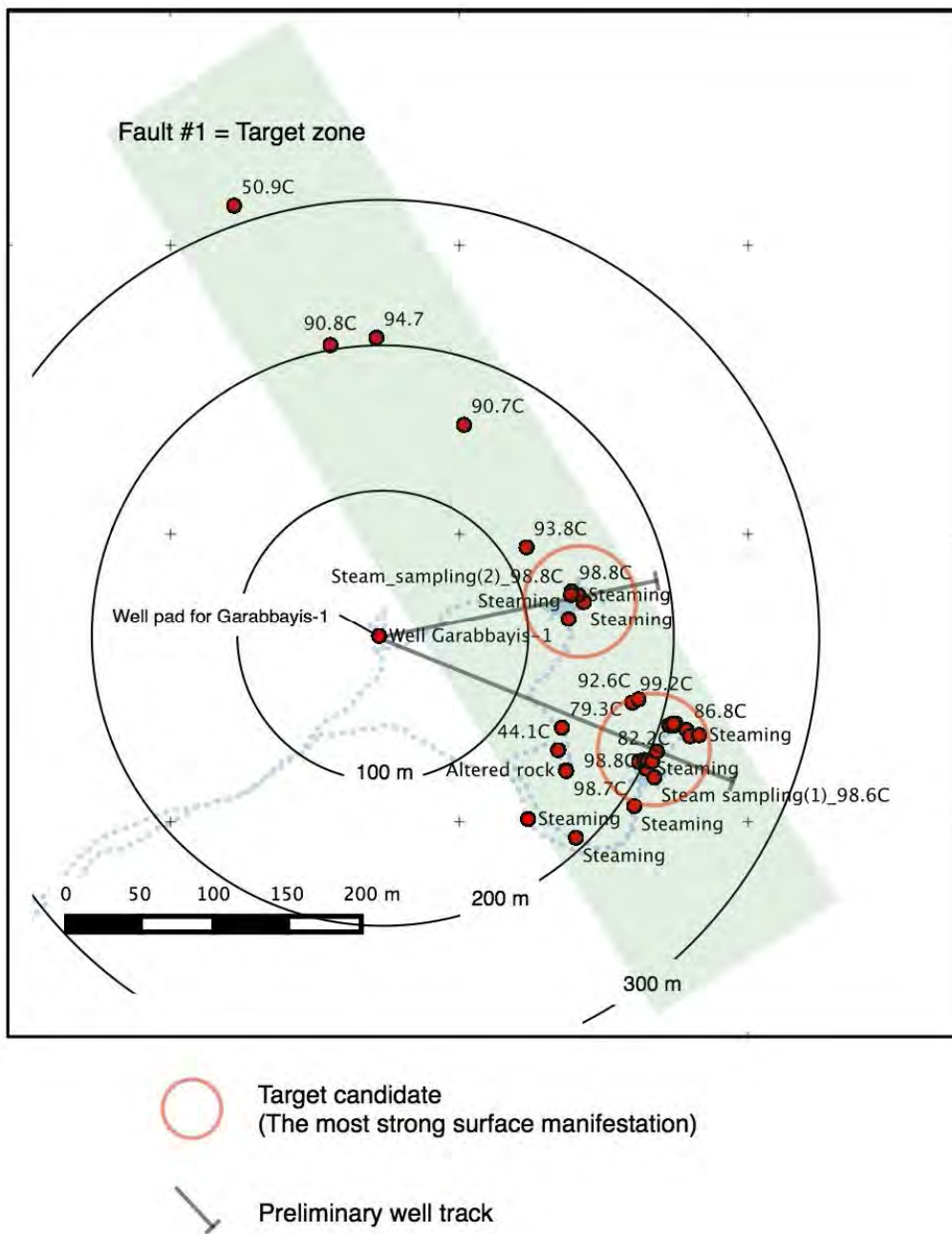
5.2 掘削ターゲットの選定

掘削ターゲットは可能性の高い地熱系概念モデルを用いて検討する。坑井掘削は高温・高透水性の断裂帯に遭遇することが求められ、その断裂帯は断層に付随すると考えられる。このため、Hanle 地域 Garabbayis 地区における新規掘削ターゲットは 5.1 節で述べた推定断層を含む 3 つの概念モデルを用いて検討する。

考案した 3 つの地熱系概念モデルでは、いずれも地熱貯留層は断層沿いに発達すると考えた。そのうち、Fault-1 はどのモデルにおいても貯留層として捉えられる。同断層は地表で見られる優勢な地熱兆候と重なることから、Fault-1 は Garabbayis 地区において最も優先度の高いターゲットと認識できる。掘削ターゲットの検討では三つの要素を考慮する必要がある。それらは、平面におけるターゲット位置、ターゲット深度、および坑口位置である。この検討のため図 5.1 に示す Garabbayis 地区周辺の平面図を用いる。この平面図は Fault-1、地熱兆候地および既存調査井 Garabbayis-1 の坑口位置（コンクリートベース）を示す。

(1) ターゲット位置

図 5-5 に示すように、Fault-1 の地熱兆候地と重なる範囲は有望なターゲットゾーンと考えられる。そのうち、最も優勢な地熱兆候地を平面図上のターゲット候補とし、その位置を図 5-5 中に示した。

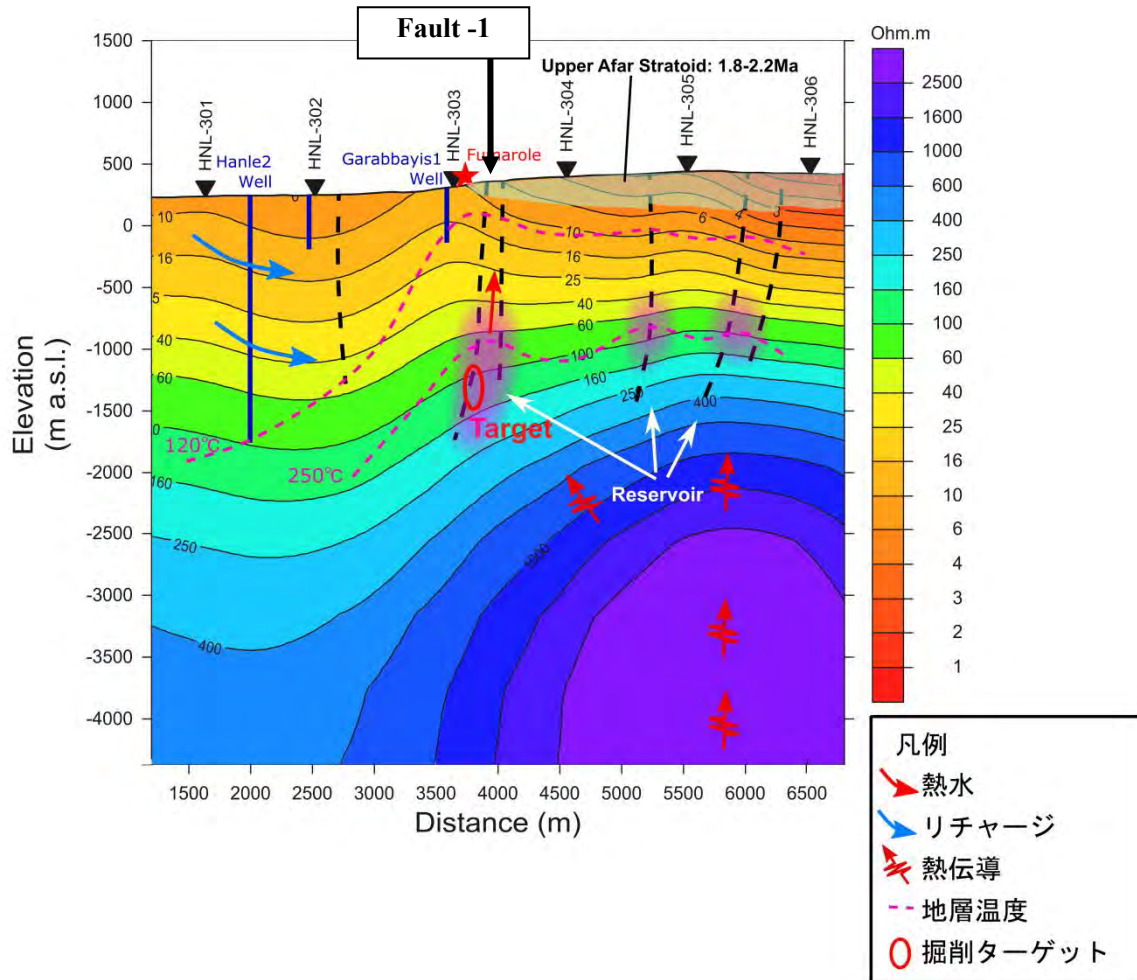


出典: 調査団

図 5-6 Garabbayis 地区における試掘井のターゲット平面図

(2) ターゲット深度

ターゲットの深度は、地熱系概念モデルにおける高温の深度とする。モデルでは海拔-1,200 m 付近に 250°C の等温線が引かれることから、地表（海拔約 300 m）からの垂直深度は最低でも 1,500 m を確保したい。概念モデルにおける等温線の不確実性を考慮すれば、図 5-6 に示すように、垂直深度は 1,500 m から 1,800 m（海拔-1,500 m）とすることが望ましい。



出典: 調査団

図 5-7 地熱貯留層モデルにおけるターゲット候補地点

(3) 坑口位置

既存井 Garabbayis-1 の敷地は新規テスト井掘削にも利用可能と思われる。同敷地はコンクリートベースであり、掘削リグの設置に適した硬く平らな敷地である。

(4) 予察的な掘削計画案

上述の掘削ターゲット位置から、予察的な掘削計画を検討した。掘削計画立案では、掘削深度（TD）、垂直深度（TVD）および掘削偏距を検討する必要がある。既存井 Garabbayis-1 の敷地を新規テスト井の坑口位置として利用できる場合、最も遠い掘削ターゲットに到達するには約 300 m の掘削偏距が必要である。この掘削偏距と 1,800 m の垂直深度を同時に達成するには、30° 未満の傾斜で 2,000 m の掘削深度が必要である。この掘削は一般的な 2,000 m 級の掘削リグで十分に達成できると考えられる。

第6章 IPP 参入の損益分岐発電コストの概算

ジブチ国では、地熱発電所の運営は IPP を採用する方針としている。

今回の確率的手法を用いた地熱資源量評価では、生起最頻値で 32.8 MWe、生起確率 80%と 20%では、それぞれ 86.4 MWe および 16.9 MWe と算出されている。IPP 事業を検討する場合は、通常生起確率 80%の場合の資源量で検討されることから、ここでは資源量を 15MWe と仮定して、Hanle 地熱地熱発電所で IPP 参入の可能性を検討する。

検討は、IPP 事業が成り立つ損益分岐売電価格と現在のジブチ国の発電費用を比較することによって行う。また、Ali Sabieh にある既存の変電所で EDD が受電する場合の送電費用と IPP 損益分岐売電価格を加えた EDD 買電価格（EDD 負担価格）についても検討する。

6.1 前提条件

検討の前提条件を表 6-1 とする。

表 6-1 IPP 損益分岐売電価格算出前提条件

Items	Assumptions	Notes
Plant capacity	15 MW	P = 80 %
Plant factor	80 %	Standard of Japan
Cost bearing body	IPP except for cost of test wells	
Well success rate	60 %, 70 %	(for 2 cases)
Cost of test wells	Grant (8.4 M USD)	3 slim holes
Use of test wells	Not used for production wells	

出典：調査団

設備利用率は、ESMAP(2010)では 90%を採用している。ここでは、安全側をみて日本で採用されている 80%を使用する。

試掘は、スリムホールとし 2.6 m-USD/坑井とするが、無償資金協力等で実施するものと仮定して、IPP の損益分岐売電価格の検討には含めない。なを、試掘が成功井戸となった場合でも、生産井や還元井などには転用しないものとする。

建設費は、試験坑井を除き IPP が負担するものとする。

生産坑井の成否は、プロジェクトの便益に大きく影響する可能性があるため、成功率が 60%の場合と 70%場合の 2 ケースを検討する。

6.2 IPP 損益分岐売電価格

算出した IPP 損益分岐売電価格を表 6-2 に示す。計算に使用した各種表計算シートは巻末資料に添付した。

検討の結果、井戸成功率が 60% の場合の IPP 損益分岐売電価格は 0.161 USD/kWh となり、井戸成功率が 70% の場合は 0.146 USD/kWh となった。

表 6-2 IPP 事業損益分岐売電価格

Well Successful Rate	60 %	70 %
Construction cost	104.5 M-USD (7.0 M-USD/MW)	98.4 M-USD (6.6 M-USD/MW)
Breakeven price at power station	0.161 USD/kWh	0.151 USD/kWh

出典：調査団

6.3 送電費用

ハンレ地熱発電所に最寄りの送電線は、PK12 から Ali Sabieh に伸延する 63kV 送電線である。Ali Sabieh には 63/20kV の変電設備が既存する。送電費用の概算は、ハンレ地熱発電所(15MW)をこの変電所に接続することを想定し、次の仮定を行う。

表 6-3 送電費用概算前提条件

Items	Assumptions
From and to	From Hanle to Ali Sabieh
Distance	70 km
Capacity	63 kV
Construction cost	17.5 M-USD (0.25 M-USD/km)
Cost bearing body	EDD

出典：調査団

送電線は、距離は約 70km、63kV とする。建設費用は 0.25 m-USD/km とし、EDD が建設し保有するものとする

算出の結果、送電費用は 0.021 USD/kWh となった。計算シートは巻末に示した。

6.4 Ali Sabieh 変電所で受電する買電価格（EDD 負担価格）

ハンレ地熱発電所で IPP が起電した電力を EDD が Ali Sabieh で受電するための買電価格は、ハンレ地熱発電所における IPP 損益分岐売電価格と送電費用の和とし、以下の通りである。

IPP が建設運営するハンレ地熱発電所の初期生産坑井の成功率が 60% の場合、EDD が Ali Sabieh で受電する買電価格は 0.182 USD/kWh となった。また、成功率が 70% の場合は 0.172 USD/kWh となった。

表 6-4 ハンレ地熱発電所の電気の Ali Sabieh 変電所での買電価格

Well successful rate	60 %	70 %	Note
IPP breakeven cost (USD/kWh)	0.161	0.151	IPP minimum sailing price of electricity at power station
Transmission Cost (USD/kWh)	0.021	0.021	63 kV, 70 km
EDD bearing cost (USD/kWh)	0.182	0.172	Minimum cost of electricity at Ali Sabieh substation from Hanle geothermal

出典：調査団

6.5 現行発電コストとの比較

Euei odf (2013)¹によれば、2012年におけるジブチの発電コスト（燃料費）は 180.4 USD/MWh (0.180 USD/kWh)とされている。燃料費は発電コストの大半を占めている。既存発電施設とハンレ地熱発電所（15MW）を IPP で開発運営する場合の優位性を電気売買価格で比較すれば、以下の通りである。

- 生産井戸の成功率が 60% の場合は、ほぼ同等の優位性である。
- 生産井戸の成功率が 70% の場合は、地熱発電が優位である。

ただし、送電線建設費を無償資金協力等で建設し、EDD の費用負担としない場合は、井戸成功率 60% と 70% のいずれの場合も、地熱発電所が優位となる。

6.6 まとめ

ジブチ国では、現在電力の多くをエチオピアからの買電によって賄っている。ただし、エチオピア国が乾期の場合の売買契約は成立していない等、電力供給の安定性に課題を有している。また、現在ジブチ国内で生産可能な電力はジーゼル発電のみとなっており、実質的に地産の発電エネルギーを有していない。このため、地産エネルギーである地熱発電所の建設は喫緊の課題となっている。

ハンレにおける資源量評価の結果、IPP の参入目安である P=80% の資源量は 15MW 程度となり、小水力発電規模の出力となる見通しである。しかし、前述の検討の結果、地熱発電所の建設は

¹ Page 45, “Elaboration d’une strategie nationale et d’un plan d’action pour le developpement du secteur electrique a Djibouti”; Rapport Scenarios (Version Finale)

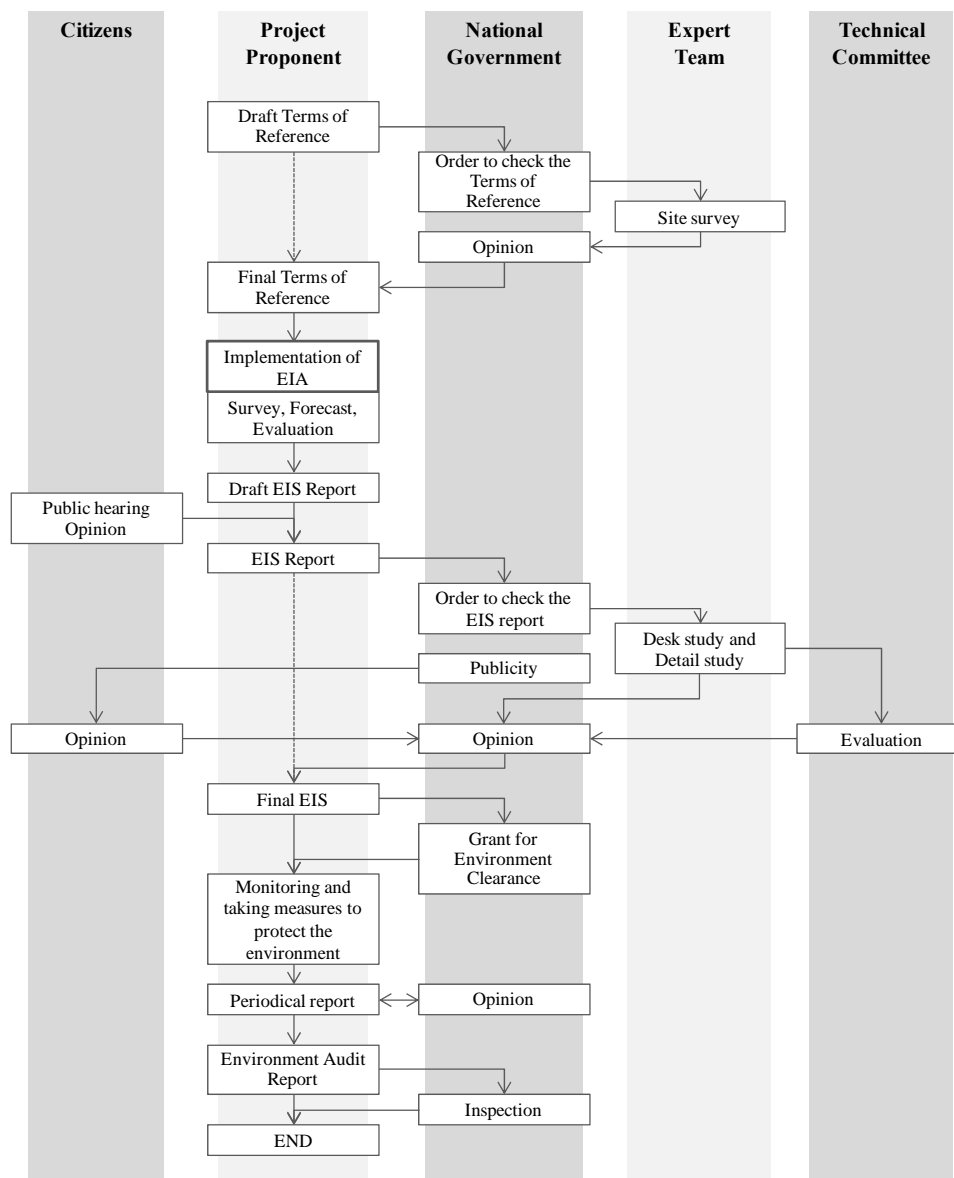
電気売買価格の検討からみ既存のジーゼル発電に優位であるという結果を得た。さらに、送電線建設費を無償資金協力等で支援すれば、さらにその優位性が上がるという結果ともなった。

このため、ハンレ地熱発電所の建設推進は、エネルギーセキュリティーのみならず経済的観点からも合理的であると結論することができる。

第7章 環境社会配慮

7.1 環境社会配慮のプロセス

ジブチ国で適用される環境社会影響評価に関連する最新の法令は、2011年に発令された政令「Decree 2011-029/PR/MHUEAT」であり、ESIAの作業手順について記載されている。また、同法令では、評価対象の規模や種類に応じて、ESIAを簡易と詳細の2つのカテゴリーに分けている。試掘調査や地熱発電プラント建設に対しては詳細ESIAが適用される。図7-1にESIA手続きを示す。



出典: JICA(2014)

図 7-1 EIA 手続き

ESIA の一連の手続きの中である程度の期間を要するものとして、（1）環境省による TOR の確認および承認、（2）ESIA レポートのレビューおよび承認が挙げられる。（1）については、TOR 承認申請から最長 1 ヶ月必要となる。また、（2）については、レポートの提出後、約 3 ヶ月要するため、ESIA 調査を 2 ヶ月程度で実施するとした場合、全体の工程としては最低でも 6 ヶ月程度必要となる。

7.2 Asal 地熱にかかる ESIA レポートのレビュー

ジブチ国では Asal 地域の地熱資源開発のために世銀等の資金源による試掘調査を計画している。同調査にかかる ESIA は、ドイツ FICHTNER 社によって 2012 年に実施されており、世銀サイトにてレポートが公開されている。

当該 ESIA レポートでは、社会条件調査に関する現地調査を実施している。大気放出等に関する記述は、既存試掘井における調査結果に基づいてなされている。その他内容についてはヒアリングおよび文献調査の結果を整理している。

Hanle 地域における試掘調査に対して Asal 地域と同様の ESIA を行うことを想定し、レビュー結果に基づいて ESIA の TOR 案を作成した。作成した TOR 案を巻末に添付する。

第8章 追加調査の提案

本調査では、Hanle 地域を対象として MT/TEM 探査を実施した。この結果と合わせて既存の地表調査、調査井掘削結果を考慮することで地熱貯留層モデルを構築し、掘削ターゲットの提案を行った。次調査としては試掘調査を実施する段階であるが、今回得られた比抵抗構造は典型的な地熱貯留層の比抵抗構造と異なるため、推定した地熱貯留層構造の妥当性を追加調査する必要がある。また、掘削資機材の調達に関する事前調査等を行うことで、試掘調査をより確実かつ円滑なものとするのが望まれる。

本章では、試掘調査を実施するにあたり現時点で課題となる項目を述べた上で、より確実な試掘調査に資するための追加調査内容について提示する。

8.1 試掘調査を実施する上での課題

試掘調査を実施する上での課題は次のとおりである。

- ・地質構造解釈の妥当性検討（平原と台地の地質特性（岩種、成因、等）

本調査では、DEM データを用いて Hanle 地域の断層構造を推定した。しかし、MT/TEM 探査から得られた比抵抗構造では、断層と思われる構造は台地と Hanle 平原の境界部分でのみ確認され、その他の箇所は不明瞭であった。このため、他の物理探査を実施し、当地の断層の構造、特に断層の傾斜方向に関する検討が必要となる。

- ・貯留層特性（貯留層構造、分布、等）

MT/TEM 探査で得られた比抵抗構造は、他の地域にみられる一般的な貯留層の比抵抗構造と異なる。本調査では地熱系概念モデルとして3つのケースを想定したものの、その妥当性を検証する必要がある。また、実際の地熱系がどのケースに相当するかによって開発資源量が大きく変化するが、最も可能性の高いケースを選定するための判断材料は、現時点の調査では不十分である。

- ・台地部の深部高比抵抗域（熱源）、表層低比抵抗帯（キャップロック）の分布範囲の把握

比抵抗構造の台地部に見られる高比抵抗域と表層低比抵抗帯は、それぞれ熱源、キャップロック構造に対応すると推定され、Hanle 地域の地熱構造を考える上で重要である。これらの構造は、探査範囲の北東側に向かってさらに広がっていることが、MT/TEM 探査の結果から想定されるため、貯留層の広がりや資源量を評価するための正確な分布範囲を推定する必要がある。

8.2 追加調査項目の提案

上述の課題を解決するために、次の3つの地表調査を行う：(1) 重力探査、(2) 追加 MT/TEM 探査、(3) 微小地震観測。また、試掘調査を実施する上で事前に実施する必要のある次の2つの調査も同時に行う：(4) ESIA 調査、(5) 試掘関連準備調査。

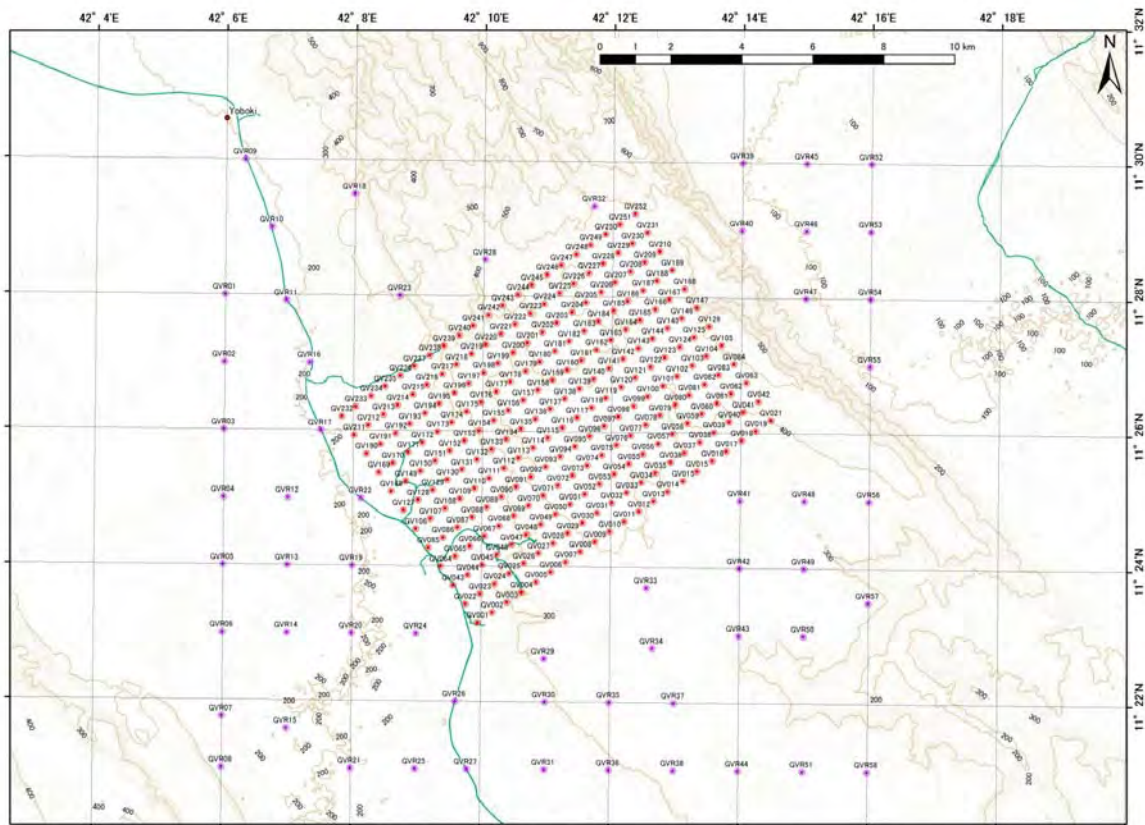
各調査の内容は以下の通りである。

(1) 重力探査

重力探査は、今回の調査で得られなかった次の項目を明らかにするために実施する。

- ・ 比抵抗構造では明瞭に確認されなかった断層構造の確認と推定
- ・ 台地東方の深部に現れる高比抵抗領域が熱源の可能性がある貫入岩であることの確認

探査の観測点数は 300 点程度を想定する。測点は MT 探査実施範囲内（噴気の分布範囲内）では密に配置する（500 m 間隔）。また、その他の周辺部では 約 1000 m 間隔で配置する。測点配置図を図 8-1 に示す。



出典：調査団

図 8-1 重力探査測点配置図

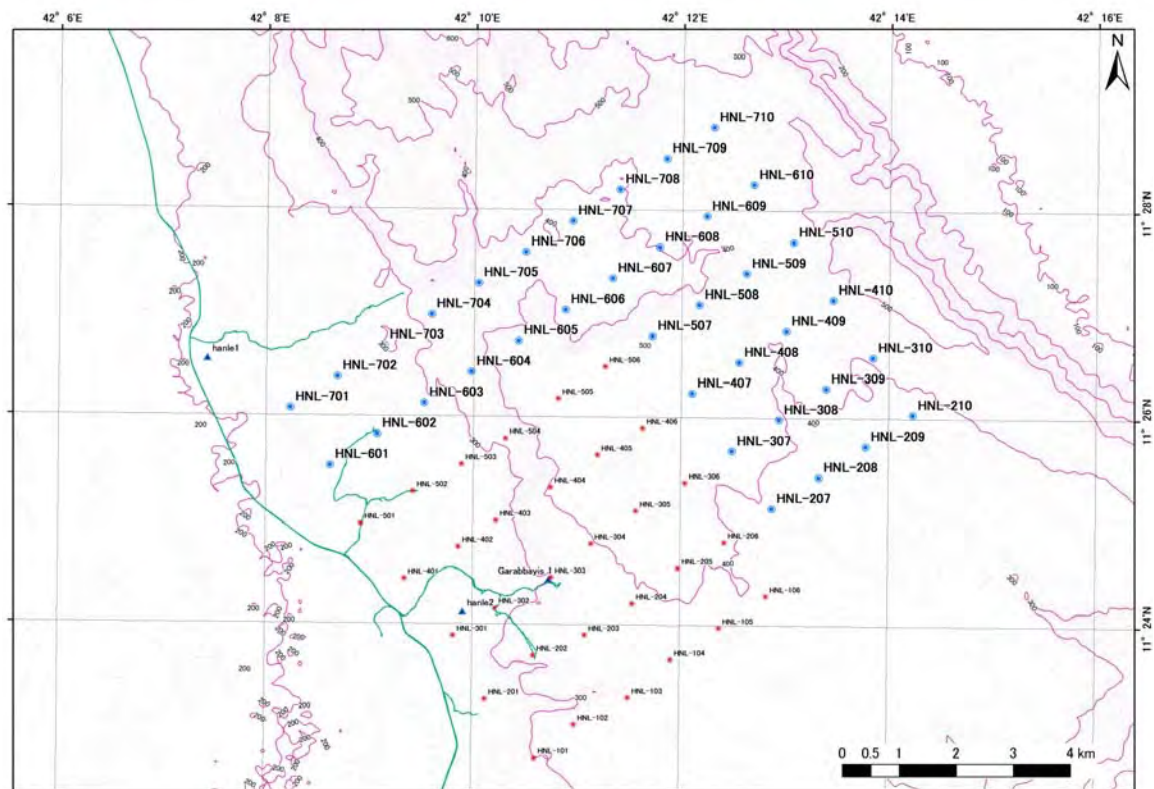
(2) 追加 MT/TEM 探査

追加 MT/TEM 探査は、今回の調査で得られなかった次の項目を明らかにするために実施する。

- ・ 台地東方の深部に現れる高比抵抗領域（貫入岩を想定）の分布、形状の確認
- ・ 表層部の低比抵抗帯の分布範囲（キャップロックを想定）の広がり確認

観測点数は 36 点程度とし、図 8-2 に示すように本調査で実施した測点の北部に配置する。測点間隔は本調査と同様に約 1km とする。なお、既存の地質図等で台地北部に存在が確認されている未確認の噴気を包括する測点配置とする。

解析は、3次元インバージョン解析を行う。



出典: 調査団

図 8-2 追加 MT/TEM 測点配置図

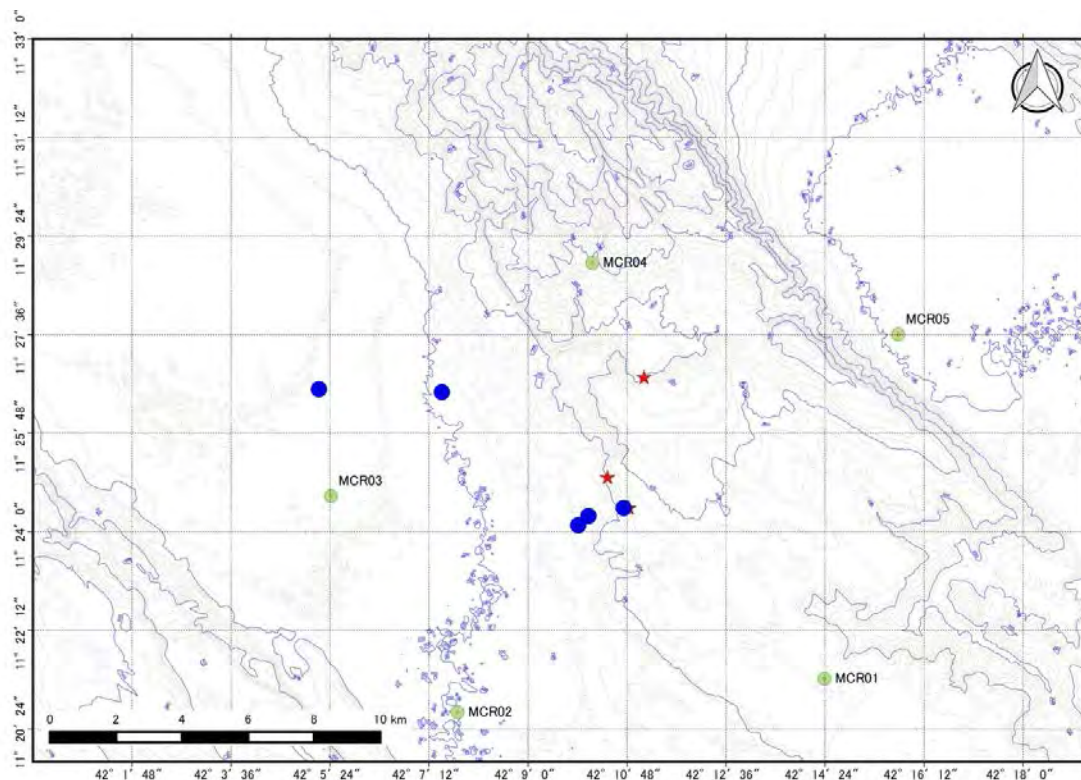
(3) 微小地震観測

微小地震観測は、今回の調査で得られなかった次の項目を明らかにするために実施する。

- ・ 地熱貯留層内の地熱流体の流動域の確認

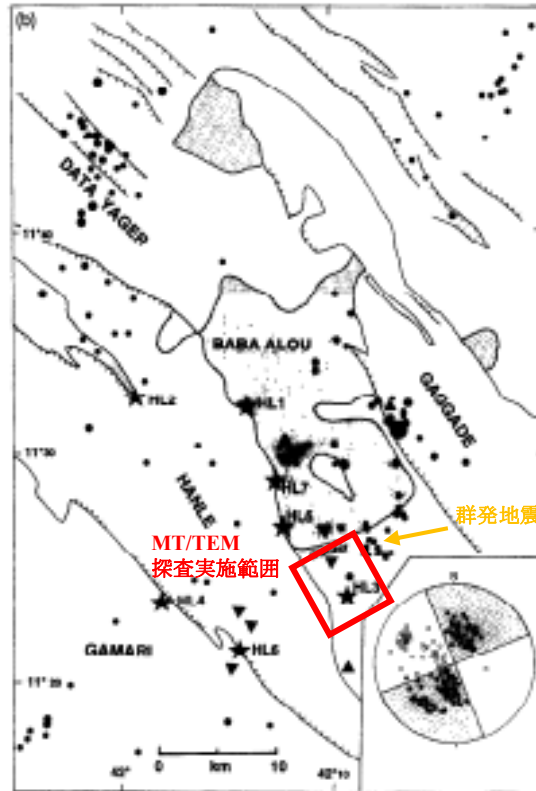
観測点 5 点を本調査で確認した噴気を取り囲むように配置し、3ヶ月間の連続観測を行う（図 8-3）。

Lépine and Hirn (1992)によると、同地域では過去に2度の微小地震観測が実施されている。1回目は1985年3月から1986年6月の期間に7観測点を用いて実施された（図8-4）。その際、地熱活動に起因すると考えられる群発地震が、本業務で確認した噴気地点（図4-5、①地点）の直下、深度3kmで観測されている。また2回目の観測は、1986年終盤3ヵ月間に観測点30点を用いて実施された。この際には発生深度8km以深のイベントが10回観測されている。このように、時期によって観測されるイベントの回数、起源が異なるものの、測定期間中に微小地震を観測する可能性は十分にある。



出典：調査団

図 8-3 微小地震観測点配置図

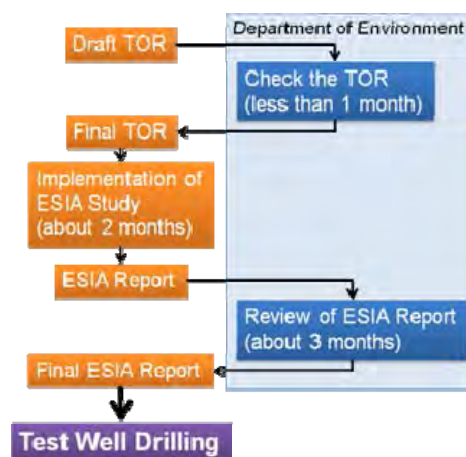


出典: Lépine and Hirn (1992)

図 8-4 微小地震発生位置図

(4) ESIA 調査

7章で示した TOR 案に基づき、試掘調査に必要な ESIA 調査を実施する。図 8-5 に示すように、TOR 案の環境省への申請から ESIA レポートの環境省の承認・最終化までには最短で 6 カ月程度が必要となる。



出典: 調査団

図 8-5 試掘までの ESIA 調査の工程

(5) 試掘調達関連調査（契約・調達）

ジブチ国では、1980年代に Asal、Hanle 地域において調査井が掘削されて以来、約 30 年間地熱井の掘削業務は実施されていない。そのため、試掘調査の速やかな実施のために、ジブチ国において最適な掘削業務の調達プロセスや契約形態の提案、試掘調査にかかる技術仕様の決定に必要な情報を収集・整理する必要がある。想定される調査項目を以下に示す。

- 掘削業務契約（支払）形態の整理・分析
- 最適な掘削業務契約形態の提案
- 掘削業者（掘削市場）の確認
- 工事計画
 - 予備試掘計画（掘削計画、資材調達計画等）
 - 予備土木計画（アクセス道路、配水計画等）
- 工事金額概算

8.3 ポートフォリオアプローチ- ODDEG の要請

JICA（2014）では、フラッシュタイプを想定できるサイトとして、本件で調査を実施した Hanle の他に、Arta および Nord Goubet の 3 サイトが抽出されている。このうち Hanle については、JICA による物理探査が提案されてこのほど実施されたが、Arta および Nord Goubet では、ODDEG を主体とした調査を並行して進めるよう提案されている。このアプローチは、試掘調査を実施する地点を複数のサイトで比較して選定し、試掘リスクの低減を図ろうとするアプローチである（ESMAP 2010）。

ODDEG では、この提言に従って Nord Goubet において物理探査を実施するための予算を確保し、本年後半に現地調査を実施する計画である。Nord Goubet では 2010 年に物理探査を含むプレフィールドビリティ調査が実施されている。今回の調査では 2010 年の調査を補完する計画となっている。しかし、ODDEG では適切な解析ソフトを保有しておらず、解析の経験も少ないことから、日本側にその支援を要請してきている。また、現地でのデータ取得方法についても指導を受けたいと要望している。

この支援を、Hanle の調査と同時に行うことによって、調査の終了時にはこれら 2 サイト（Hanle と Nord Goubet）を比較して試掘サイトを選定することができる。

なお、Arta サイトに関しては、ODDEG は GRMF への Full Application を提出済みであり、その採否の結果は、2016 年 1 月に明らかになる予定である。

8.4 試掘までの調査工程

すべての追加調査を同時に開始した場合のタイムスケジュールを表 8-1 に示す。

表 8-1 追加調査工程案

		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
1	重力探査							
	仕様							
	準備	■						
	測定	■	■	■				
	解析 報告書			■	■			
2	微小地震観測							
	準備	■						
	設置	■	■	■	■	■		
	測定	■	■	■	■	■	■	
	解析 報告書					■	■	■
3	追加MT/TEM探査							
	準備	■						
	測定	■	■	■	■			
	解析 報告書			■	■			
4	総合解析						■	■
5	ESIA							
	スコーピング	■						
	TOR審査	■	■	■				
	現地調査		■	■	■	■	■	■
	審査				■	■	■	■
6	試掘関連準備調査							
	市場調査	■	■	■				
	土木計画		■	■	■			
	仕様書作成		■	■	■			
	積算			■	■	■		

出典：調査団

第9章 他ドナーの動向確認

他ドナーの動向について、ODDEG の担当者からヒアリングした結果について下記に報告する。ジブチ国にはドナーが常駐していないので、直接のヒアリングによっては確認できていない。

9.1 USAid:

- 2014 年 10 月に、エネルギーセクターにおける IPP、PPP の導入に関するワークショップを開催した。
- IPP、PPP 促進のための法制度整備のために、専門家が一人派遣された。これは、オバマイニシアティブのパワーアフリカを推進するために受け入れ素地を作ることを目的としている。この専門家は 2015 年 2 月にジブチ国から離任している。
- 代替の女性専門家が赴任したが、常駐ベースではなく、ジブチ国を適時訪問し、情報収集や情報交換を行っている。話題は、Assal 地熱プロジェクトが中心となっている。法制度整備などに関する具体的な提案等はなされていない。

9.2 WB その他ドナーの Assal 支援 :

- Assal における地熱開発は EDD が取り扱うことになり、ODDEG は直接は関与していない。
- 元 CERD のジャルディン所長とエネルギー省のカヤッド氏が、Assal 地熱開発事業の担当に任命されている。両者への面談は実現していない。
- ただし、ODDEG の非公式情報によれば下記の通りである。
 - ◇ 2015 年 7 月現在、プロジェクトダイレクターが選任されている。
 - ◇ 現在は、掘削業者の選定を行っている段階である。
 - ◇ 各段階の手続きには、7 つのドナーの承認を取り付ける必要があり、時間を要している。
 - ◇ 掘削開始時期の情報は得ていない。
(調査団はこれ以上の情報は入手していない。)

9.3 ICEIDA の支援

ODDEG から入手した資料によれば、ICEIDA の支援が以下の 4 つのカテゴリーで奥なわれている。

- Improved project management capacity for geothermal projects and project management system in place at ODDEG (from May 2015)
- Geothermal drill training (year of 2016)
- Improved capacity for surface exploration - Lac Abhe (from October 2015)
- Technical assistance (finalization of GRMF application and other matters as might be applicable)

Nord Goubet 地熱サイトの地表調査を行うべく、ICEIDA の資金援助で ISOR が進めていた GRMF への Application 作成支援は取りやめとなり、次期 GRMF 申請ラウンドで申請することとなった。

9.4 GRMF

Nord Goubet 地熱サイトと同様、GRMF の資金援助で地表調査を実施すべく ODDEG は、外部コンサルタントの協力を得て、Application を提出した。審査結果は 2016 年 1 月までには通知される予定である。採択されれば、外部コンサルタントの助言を得つつ、主に ODDEG の職員によって調査が行われる計画である。

第10章 自国資金での活動

10.1 掘削リグ調達

ジブチ国では、独自資金によって掘削リグの購入を進めている。調達先はトルコ国であり、現況は以下の通りとなっている。

- 掘削能力 2000m 級のリグは、現在契約交渉中である。ジブチ国への到着は 2017 年を予定している。
- 掘削能力 900m 級の中古リグが、トルコ側から寄贈されるとのことである。2015 年 9 月までに ODDEG に納入される計画である。ODDEG はこのリグを使い、トレーニングを行う予定としている。
- ただし、どのような体制でリグの運用を行うかについての明確な情報を調査団は得ていない。

10.2 事務所建設

ジブチ市郊外の PK 20 に建設中の ODDEG 新事務所がほぼ完成しており、完成次第、職員も移動する予定である。

第11章 結論と提言

JICA (2014)によって提案された最優先順位の Hanle (Garabbayis) 地熱サイトにおいて MT/TEM 探査、補足地質調査と地化学調査を行い、既存情報を含めた解析による結果の結論と提言は以下の通りである。

11.1 結論

【資源評価】

- 1) Hanle 平原とその北西側の台地は主要断層で隔されている。
- 2) 熱源及び貯留層は、台地の地下に存在すると推定される。
- 3) 今回得られた物理探査の結果は、他の地域で見られる一般的な貯留層の比抵抗構造とは異なる。この理由を既存試掘調査のデータ等から推定すれば、Hanle 地熱サイトにおいては熱水変質作用が十分に進行していないためであると考えられる。
- 4) 地熱系を構成する熱源、貯留層、流体涵養は以下の通りと推定される、
 - (ア) 熱源は高比抵抗を示す深部の貫入岩と推定する。
 - (イ) 貯留層は、断層破碎帯に限定される局所的なものかあるいは各断層を連結するような層状玄武岩（下部玄武岩）の透水性が高い部分で構成されるものと推定する。地化学調査によれば、この貯留層には最高 260°C の地熱流体が賦存している可能性がある。キャップ構造は、下部玄武岩を被覆する上部玄武岩と推定する。
 - (ウ) 流体涵養は、Hanle 平原側から行われているものと推定する。
- 5) 今回の調査範囲で推定した資源量を、モンテカルロ手法を用いて評価した結果は以下の通りである。

Capacity (MW)		
80%	Most Probable	20%
16.9	32.8	86.4

ただし、後述する課題を解明することによって、ここに示した数値は随時見直していく必要があり、最終結論ではない。

【IPP 損益分岐発電価格と地熱発電所の優位性検討】

ジブチ国では、試掘によって地熱資源が確認されれば、地熱発電の建設運営のために IPP を導入する方針としている。このため、Hanle 地熱資源量を 15MWe と仮定して、既存の情報を利用して IPP 参入の可能性検討のための経済分析を実施した。Hanle 地熱発電所で発電された電気は Ali Sabieh の変電所で EDD が買電すると仮定した。送電線は EDD が建設するものとした。その結果、生産井戸成功率 60%以上の場合には、Hanle 地熱発電が既設ジーゼル発電に経済的に優位であることが判明した。送電線建設費用を EDD の負担とならないような支援が得られ

れば、地熱発電の優位性はさらに高くなる。

15 MW の Hanle 地熱発電所は、既存ジーゼル発電より優位性は高いが、エチオピアから輸入する安価な水力エネルギーに比較すると劣っている。しかし、自国エネルギー資源を持たないジブチ国にとっては、エネルギーセキュリティの観点から、Hanle 地熱発電所の建設は、合理的であると結論することができる。

【環境社会配慮】

ジブチ国では、試掘調査および地熱発電プラント建設については詳細 ESIA を実施する必要がある。ESIA は TOR 申請からレポートの認可まで最短 6 ヶ月程度必要となる。本件では Asal 地熱開発における EIA レポートをレビューし、試掘調査にかかる ESIA の TOR 案を作成して添付した。

11.2 課題と推奨

【貯留層評価と試掘調査への判断】

物理探査終了後の次の開発段階は試掘調査である。しかし、Hanle 地熱サイトにおいては、貯留層の比抵抗構造が、他の地熱地域で見られる一般的な構造と異なっていることが明らかになった。一方、貯留層は基本的には断裂構造に支配されていると推定されるものの、加えて、層状玄武岩の透水性の高い部分にも広がっている可能性も否定できない。試掘調査は高価なうえ投資リスクも高いことから、これらの貯留層の性質をより明確に把握して試掘ターゲットを見極めた後に、試掘調査の段階に進むか否かを判断することが現実的である。この目的のため、以下の追加調査を提案した。

- ・ 重力探査
- ・ 追加 MT/TEM 探査、3D インバージョン解析
- ・ 微小地震観測

【環境社会影響評価】

ジブチ国では、試掘を行う場合も環境社会影響評価が必要となっている。これには約半年を要する。地熱開発を滞りなく行うためには、環境社会影響評価を、上記貯留層調査と同時に実施することを提案する。

【試掘調達関連調査】

ジブチ国では、1980 年代に Asal、Hanle 地域において調査井が掘削されて以来、約 30 年間地熱井の掘削業務は実施されていない。そのため、試掘調査の速やかな実施のために、ジブチ国において最適な掘削業務の調達プロセスや契約形態の提案、試掘調査にかかる技術仕様の決定に必要な情報を整理・収集する必要がある。そのための本報告書では、具体的な調査項目を提案した。

【事業化の可能性のための予備調査】

ジブチ国では、地熱資源確認後の地熱発電事業を IPP 導入で実施することを基本方針としている。本件では、既存情報によって IPP 参入の損益分岐発電コストを概算した。これに加え、追加提案した地表調査結果で資源量の再評価を行った後に、この概算値を見直す必要がある。また、送配電の概略検討が行ってジブチ国政府の役割分担を示す必要がある。

以上