

グレナダ国

グレナダ国
地熱開発に係る情報収集・確認調査
ファイナルレポート

平成 28 年 8 月
(2016 年)

独立行政法人
国際協力機構 (JICA)

日本工営株式会社
地熱エンジニアリング株式会社
住鉱資源開発株式会社

中南
JR
16-024

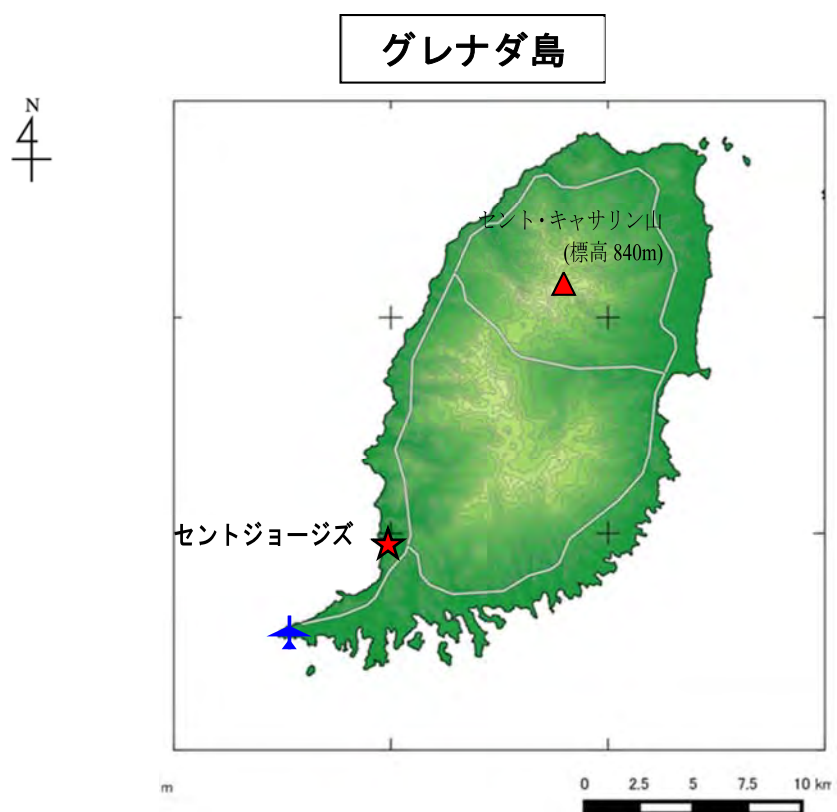
グレナダ国

グレナダ国
地熱開発に係る情報収集・確認調査
ファイナルレポート

平成 28 年 8 月
(2016 年)

独立行政法人
国際協力機構 (JICA)

日本工営株式会社
地熱エンジニアリング株式会社
住鉱資源開発株式会社



調査対象地域位置図

(出典：調査団作成—SRTM-DEM データを使用)

略語表

API	American Petroleum Institute/米国石油協会
BOT	Build Operate Transfer/建設・移転・運営方式
CARICOM	Caribbean Community/カリブ共同体
CDB	Caribbean Development Bank/カリブ開発銀行
CDC	Commonwealth Development Corporation/コモンウェルス開発公社
CFCs	Chlorofluorocarbon/フロン類
CIF	Caribbean Investment Facility/カリブ投資基金
CSAMT	Controlled Source Audio-frequency Magneto Telluric Method/地磁気地電流法
DEM	Digital Elevation Model/数値標高モデル
DFID	Department of International Development/英国国際開発庁
ECERA	Eastern Caribbean Energy Regulation Authority/東カリブエネルギー調整機構
EPC	Engineering, Procurement and Construction/設計・調達・建設方式
ESCO	Energy Service Company/ESCO 事業
ESIA	Environmental and Social Impact Assessment/環境社会配慮
EU	European Union/ヨーロッパ共同体
F/S, FS	Feasibility Study/フィージビリティ調査
GEF	Global Environmental Facility/地球環境ファシリティ
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit/ドイツ国際協力協会
GPS	Global Positioning System/全地球測位システム
GRENLEC	Grenada Electricity Services Ltd./グレナダ電力サービス会社
HOT	Head of Terms/覚書
IDB	Inter-American Development Bank/米州開発銀行
IFC	International Financial Corporation/国際金融公社
IPP	Independent Power Producer/独立発電事業者
IRR	Internal Rate of Return/内部収益率
IWRM	Integrated Water Resource management/総合水資源管理
JICA	Japan International Cooperation Agency/国際協力機構
MT	Magnetotelluric Method/MT 電磁探査法
NAWASA	National Water and Sewage Authority/上下水道公社
NZ	New Zealand/ニュージーランド
OAS	Organization of American States/米州機構
OECS	Organization of Eastern Caribbean States/東カリブ諸国機構
O&M	Operation and Maintenance/維持管理
PPA	Power Purchase Agreement/電力売買契約
PPDA	Physical Planning and Development Control Authority/施設計画開発管理局
PPP	Public Private Partnership/官民連携
PPU	Physical Planning Unit/計画・調査ユニット
RESPV	Renewable Energy Special Purpose Vehicle/再生可能エネルギー特別目的会社
SEEC	Sustainable Energy for Eastern Caribbean/東カリブ再生可能エネルギープログラム

SEF	Sustainable Energy Facility/再生可能エネルギー基金
SEP	Stakeholder Engagement Plan/ステークホルダーエンゲージメント計画
SGAS	Steamfield Above Ground System /集蒸気配管設備
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission/シャトルレーダー地形ミッション
SVG	Saint Vincent and the Grenadines/セントビンセント及びグレナディーン諸島国
TEM	Transient Electro Magnetic Method/TEM 電磁探査法
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization/国際連合工業開発機関
UTM	Universal Transverse Mercator/ユニバーサル横メルカトル図法
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission/スペースシャトル立体地形データ
XRD	X-ray Diffraction/X 線回折

グレナダ国

地熱開発に係る情報収集・確認調査

ファイナルレポート

要 旨

第1章 調査概要

1-1 調査の目的

- ✓ 地熱エネルギー開発に必要な技術的、財政的支援案件を形成するために必要な情報の収集。収集する情報は、国家政策や関連法律、制度、ガイドラインなどで外国企業が開発に参入に必要なものも含む。
- ✓ 地熱開発のための地質地化学調査などを含む現地調査や予備的環境関連調査、および組織制度等に関する調査の実施。

1-2 調査対象地域

グレナダ国グレナダ島

1-3 グレナダ国関係機関

調査に関連するグレナダ国の関連機関は下記の通りである。

表 1-1 グレナダ国関連機関

機関名	業務分掌
財務・経済開発、エネルギー、貿易および政策支援省エネルギーおよび持続可能開発局	政策の策定、実施および監督
グレンレック (GRENLEC)	発電、送電、配電を一貫する組織。 株式保有構成 米国民間企業 WRB: 50% グレナダ政府、国民保険機構: 21% 従業員: 4.5% その他資本金家: 24.5%

出典: 調査団

第2章 エネルギーセクターの現況と課題

2-1 グレナダ国電力政策概要

グレナダ国では、国家エネルギー政策 - 低炭素型開発戦略（The National Energy Policy of Grenada – A low Carbon Development Strategy for Grenada, Carriacou and Petite Martinique, November 2011）を策定している。この国家政策は以下の原則に従って策定されている。

表 2-1 国家政策 策定の原則

• Energy Security • Energy Independence • Energy Efficiency • Energy Conservation	• Environmental Sustainability • Resource Exploitation • Energy Prices • Energy Equity and Solidarity
---	---

出典：The National Energy Policy of Grenada November 2011

上記のゴールのうち、特に地熱開発に関係のあるゴールは以下の通りである。

- 持続可能なエネルギー開発を可能にする法規規則の確立
- 2020年までに家庭用エネルギーの20%を再生可能エネルギーから供給する

低炭素型開発戦略によれば、地熱発電は2013年までに20MWの運転開始、2018年までに追加の20MWの運転開始が計画されている。ただし、2016年現在、実現はされていない。

グレナダ国エネルギー開発国家政策には、地熱開発にかかる関係組織の関係が提案されている。これによれば、地熱開発は、民間会社のGRENLECとGeothermal PartnerからなるGRENADA Geo Inc. によって行われ、建設後の一定期間は、発電された電力はGRENLECに売電され、その後地熱発電施設はGRENLECに移管されるという仕組みが想定されている。

2-2 電力セクターの現況

2-2-1 法制度

グレナダ国ではGRENLECが発電送電事業を独占している。

GRENLECは1960年9月27日にコモンウェルス開発公社（CDC）とグレナダ政府の補助金で設立された有限会社に起源を発している。1994年に成立した新「電力供給法（1994）」では電力会社の排他的ライセンスの保有期限が2073年12月31日までとなっている。

近年グレナダ政府は「電力供給法案（2015）」を公表している。本法案では、現在 GRENLEC 社が独占している電力セクター市場を、国内、国外の投資家に開くことが定められており、民間企業へのライセンス付与に関して規定されている。

グレナダ政府は 2015 年 9 月、公的ユーティリティ規制委員会法案（2015）を公表している。目的は、特に再生可能エネルギーにかかる投資を電力セクターに呼び込むことである。この法案は 2015 年に発表された電力供給法とともに電力セクター規制の基本となるものである。

2-2-2 組織体制

(1) 政策立案機関

エネルギーセクターを所管する国家機関は 1982 年に、財務・計画・経済開発・貿易・エネルギー・政策決定支援省（Ministry of Finance, Planning, Economic Development, Trade, Energy & Cooperatives）以下「財務省」に設立された「エネルギーおよび持続可能開発局」（Department of Energy & Sustainable Development）である。再生可能エネルギーと代替省エネルギーを開発・促進させることを一つの業務としており、地熱資源開発の担当部局となっている。

(2) 発電送電事業者

グレナダ国では、GRENLEC が主要島嶼であるグレナダ島、カリコー島、プティ・マリティニク島における唯一の電気供給事業者である。課題は以下の通りである。

(3) 運営現況と課題

GRENLEC は発送配電の一貫した電力供給サービスを行い、グレナダ国人口の約 99.5% にサービスを提供している。電気料金は GRENLEC によって決められており、現行法規では政府は関与できないしくみとなっている。これに対して、高い電気料金と発電資源の多様化の不足が、独占による弊害と指摘されている。

(4) 政府の方針

グレナダ国政府では、規制機能を東カリブエネルギー規制機関（Eastern Caribbean Energy Regulatory Authority: ECERA）に移管することを検討中である。主要課題は、高い電力料金と発電資源の多様化である。同時に、グレナダ政府では電力セクターへの民間投資を促進して競争原理を導入することによって発送配電の効率を向上させるために必要な法制度を導入しつつある。さらに、政府は 2030 年までにグレナダ国の電力供給をすべて再生可能エネルギーにて行う目標を設定している。

2-2-3 電力需給現況と予測

(1) 現況

グレナダ国における発電は、99%以上がディーゼル発電所によるものであり、全て GRENLEC が保有・運転している。そのうち、グレナダ島の設備容量は 45.89 MW である。セントジョージ大学には予備電源として 2.8MW の発電設備がある。発電された電気は、7 系統の送電線 (33kV) にて島内に送電される。流通ネットワークとしては 11kV の配電線 (総延長約 220 マイル) が敷設されている。

(2) 電力需給現況と予測

GRENLEC の 2010 年におけるピーク需要は 30.8 MW であった。この需要は GRENLEC の現有の発電設備によって充足されている。売電は、41,222 の顧客に対して 185.79 GWh であり、需要は年率 4%の増加が見込まれている。

(3) 電力料金の現況と課題

燃料価格が最も高騰した 2008 年の使用量 99 kWh 未満の家庭用電気料金は、燃料費 EC\$ 0.3908 と非燃料費 EC\$ 0.4155 の合計、EC\$ 0.8063 (=US\$ 0.30/kWh) である。この料金は世界的にみても高い水準となっている。

第3章 自然条件調査概要

3-1 調査の目的、アプローチ

グレナダ国における地熱発電のポテンシャルを評価するにあたり開発有望地域の自然条件調査を実施した。本調査団の現地作業開始時にはすでにニュージーランドの支援によって Jacobs(2015)が地表地質・地化学・物理探査（MT 探査）を終了していた。このため、本調査団は調査項目の重複を避けるために現地調査項目を必要最小限とする方針とした。これらの相方の調査結果は共有して相互の解析に資することとした。

3-2 地表調査結果概要

3-2-1 沈み込み帯、火山活動

グレナダ島は中米の小アンティル諸島の南側に位置する火山島（～344km²）である。小アンティル諸島はカリブ海プレートと南アメリカプレートの東縁部にあり、この地域では北東ないし東側から北アメリカプレートが沈みこんでいる。グレナダ島では中新統の地質を覆って Saint Catherine 火山を含む複数の火山からの火山噴出物が分布している。グレナダ島から St. Lucia にかけては約 1 万年前以降に火山フロントが形成されたと考えられている。

3-2-2 地質

グレナダ島の地質は下位より後期始新世～前期漸新世の Tufton Hall 層、中新世～更新世の火山噴出物、更新世～完新世の火山噴出物からなる。最も若い火山はグレナダ島北部にある Saint Catherine 火山である。1000 年以内に形成されたとみられる集落がこの火山の噴出物によって覆われているのが報告されている。

3-2-3 断裂

本地域では地形解析によるリニアメント、地表踏査で確認した地熱徴候分布、褶曲軸、地層の走向が概ね北東-南西方向に卓越している。

3-2-4 地熱徴候

グレナダ国の地熱徴候は Saint Catherine 火山周辺（Hapsack、Clabony）およびその北部（Castle Hill、Pegi's Whim）に集中している。これらの地熱徴候は、グレナダ島北部の地質層序、断裂系（NE-SW 系が卓越）にそって密集していることが確認されている。

3-3 本調査で実施した現地調査

3-3-1 地表地質調査

(1) 方法

地熱徴候地について現地調査を行い、岩石の種類、湧水・温泉・噴気の有無、熱水変質の有無、変質帯の性状・規模、断裂の分布および特徴を観察し記載した。必要に応じて岩石試料を採取し、粉末 X 線回折分析、岩石薄片観察を実施した。

(2) 結果

Huttrer and Michels(1995)で報告されている 6 箇所の地熱徴候地のうち、南部の Adelphi-StCYR を除く以下の 5 箇所について調査を実施し、岩石薄片観察 3 枚、X 線回折分析 11 試料を分析した。Adelphi-StCYR では現地でのヒアリングから高温の地熱徴候地はないと判断されたため、現地調査は実施していない。調査結果の要点は以下の通りである。

- 調査地域の中央には Saint Catherine 火山があり、山頂には溶岩ドームが形成されている。また、Saint Catherine 火山の北西山麓には複数の溶岩ドームが火山噴出物及び Tufton Hall 層を覆っている (Jacobs,2015)。
- Saint Catherine 火山には今から 1,000 年前までに火山活動を起こした可能性がある。また、Saint Catherine 火山周辺には Hapsack 等の地熱徴候地が密集する。Saint Catherine 火山のマグマ溜まりは熱源になり得る。
- Saint Catherine 火山周辺のいくつかの地熱徴候地では岩石が変質している。このうち、Hapsack では珪化変質を受け、硫黄が析出している。Peggy's Whim、Castle hill 及び Clabony ではスメクタイトあるいは混合層粘土鉱物の変質により岩石に生じている。
- 地形解析によるリニアメント、地表踏査で確認した地熱徴候分布、褶曲軸、地層の走向は主に北東-南西走向が卓越する。リニアメントについては北西-南東、北北西-南南東走向のものも分布する。

3-3-2 地化学調査

グレナダの地熱徴候を概査し、その結果を既存の調査結果と比較することを目的に、調査団は地化学調査を実施し、試料採取と現地測定(温度、pH、電気伝導率)を行った。調査結果の要点は以下のとおりである。

- 本調査では Saint Catherine 火山周辺には Hapsack、Peggy's Whim、Castle hill、Clabony 及び Chambord で試料採取と現地測定(温度、pH、電気伝導率)を実施し、Jacobs(2015)とほぼ同じ値を示すことを確認した。Hapsack では最も高い温泉水温度 61.4℃を示す。
- グレナダの温泉水は pH と陽イオンの情報から 3 タイプに分類できる。これら 3 タイプの温泉の湧出は、安山岩質火山地域の高温地熱系において共通して認められるものである。このうち、硫酸酸性型温泉である Hapsack 及び Plaisance-Red River では温泉水に伴

って H₂S ガスのバブリングを伴い、温泉水は酸性である。これらの温泉は他タイプの温泉に比べて Saint Catherine 火山の近くに位置し、標高は高い。

- グレナダの温泉水は水-岩石反応において未成熟である。しかし、温泉の Na-K-Mg 三成分系でのプロットから、グレナダの温泉水は地熱貯留層から湧出した温度約 220℃の平衡に達した (熟成した) 熱水を起源に含んでいると解釈することが可能である (Jacobs,2015)。
- グレナダの温泉のうち、含気泡温泉(バブリングプール)が産する気泡中のガスについてはマグマ性ガスの寄与を認められる。ガス温度計からは 290℃と推定される (Jacobs,2015)。

3-3-3 重力探査

(1) 目的

調査地域の地熱探査において広域的な重力を測定し、地熱貯留層となる断裂帯を把握する一助とすることを目的とした。

(2) 調査方法

【調査対象地域】

重力探査は、グレナダ島北部の Saint Catherine 火山を含む地域で、地熱兆候の認められる地域を含む島の北半分程度を調査対象とした。

【重力探査解析図】

ブーゲ異常図を作成した数値データを用いて、本件調査の目的に合致するように、傾向面残差重力図、水平一次微分図、および垂直一次微分を作成した。

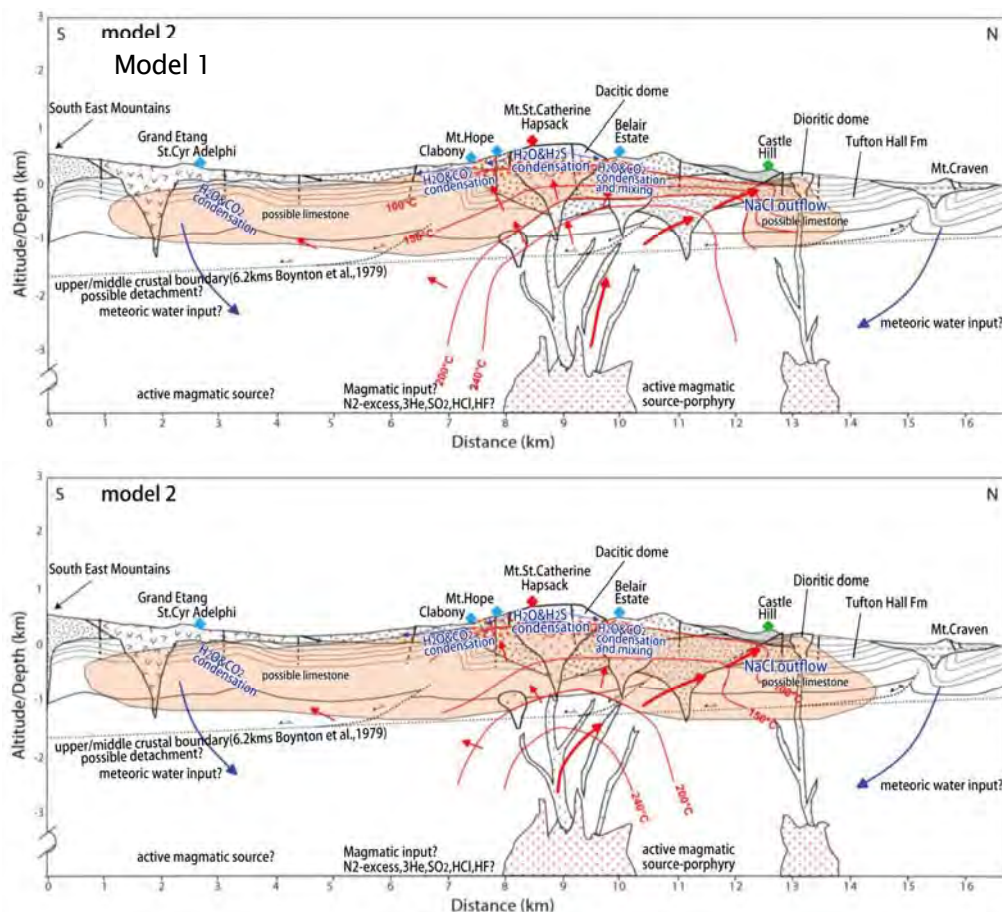
(3) 調査結果概要

- 本地域の重力分布は、Hapsack、Pegg's Whim を含む調査地域の北側は概ね-150mgal 以上の高重力異常であり、特に Hapsack から Victoria の間では調査範囲内で最も高い(-136mgal 以上) 高重力異常を示す。これらの高重力異常の周囲にはブーゲ異常値が急激に変化する重力急傾斜部が分布し、Hapsack 及び Pegg's Whim 付近には重力急傾斜部が北東-南西方向にほぼ直線状に伸びている。
- Hapsack から北東の Pegg's Whim、chambord の間には北東-南西方向に垂直一次微分のゼロを示すコンター線、高い水平一次微分値を示すエリアが重なるように点在しており、地表においても北東-南西方向に分布するリニアメントとも重なっていることから、高傾斜で北東-南西走向の断層が存在していると考ええる。さらに、推定された断層付近では地表において地熱徴候 (Hapsack、Pegg's Whim) が分布することから、地熱流体の流動も規制している可能性が高いと考える。
- なお、Jacobs (2015) が実施した MT 調査で示されている本地域の比抵抗分布について、10Ωm 以下を示す低比抵抗層の層厚は地形標高の高い部分では薄く、その周辺では厚くなっており、その下端面はドーム状の構造を示す。地表の地熱徴候地は低比抵抗層が薄

くなっているエリア及びその周辺に分布しており、地表の地熱徴候地では比抵抗を下げるスメクタイト、混合層粘土鉱物が分布しているこのから、低比抵抗層は地熱貯留層のキャップロックであるとの解釈がなされている。

3-4 地熱系概念モデル、貯留層概念モデル

以上の調査結果を踏まえた地熱系概念モデルを下記に示す。



出典：Jacobs(2016)に JICA 調査団が加筆

*Model11 は貯留層の温度は地表での温泉の地化学組成、比抵抗分布の検討から概ね 200～290℃の地熱貯留層が地下浅部まで広がり、調査地域北部では側方に地熱流体が流動していると推定するモデルであり、Model12 は地表において沸騰泉を伴う噴気帯がないことから貯留層の温度が低い(200℃未満)の可能性を示唆したモデルである。

図 3-1 地熱系概念モデル

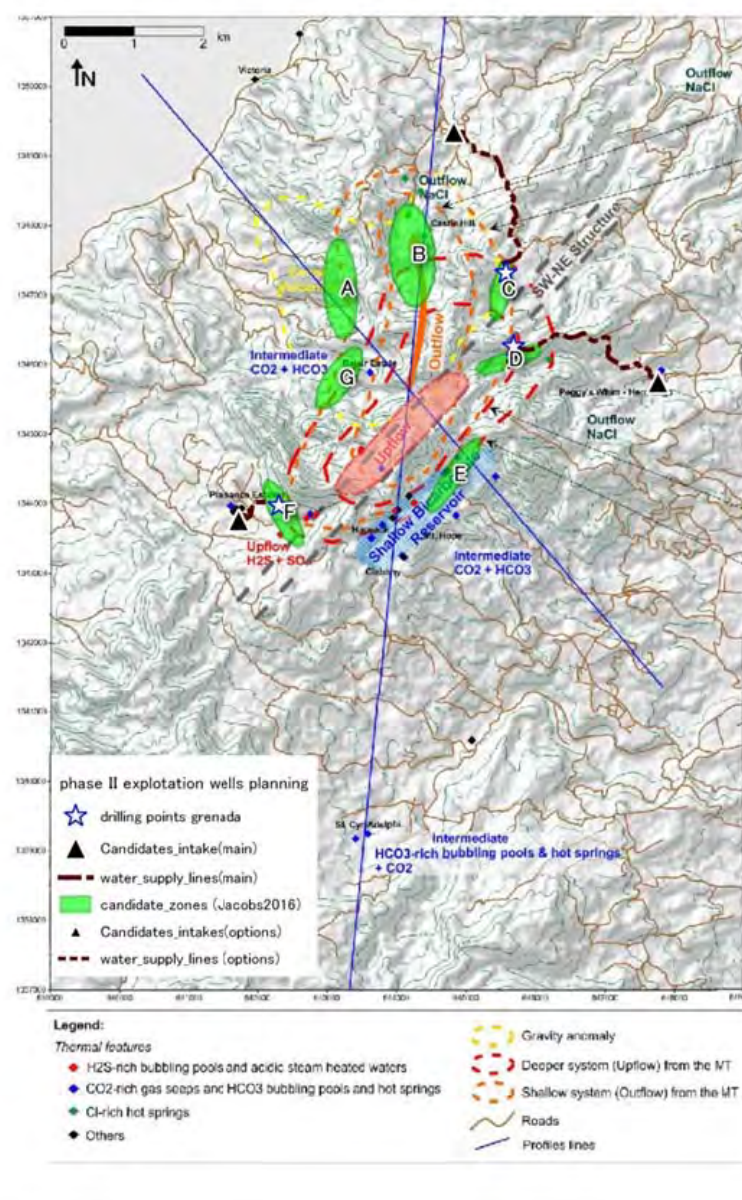
3-5 貯留層評価

Jacobs(2016)では Saint Catherine 火山周辺に想定される地熱貯留層 20-90 MW と試算している。

3-6 試掘計画

3-6-1 試掘ターゲット（構造試錐井）選定

本地域で推定されている地熱貯留層は規模、温度構造及び透水性分布に不確定要素がある。そのため、生産井仕様の坑井掘削を実施するまえに、より安価で簡易に実施可能な小口径の構造試錐井を数本掘削することを推奨する。構造試錐井では地下の温度・圧力分布、地質及び断裂等を調査して地熱流体流動や貯留層の有無を推定することとする。



出典：Jacobs(2016)に調査団が加筆

図 3-2 推定される地熱貯留層範囲と構造試錐井掘削位置の平面図

図 3-2 に、推定される貯留層と調査井分布と関係平面を示す。

地形解析で抽出された A～G のゾーンから現地踏査により調査井掘削が可能と判断される C、D 及び F の 3 ゾーンでそれぞれ深度 2,000m の構造試錐井を 3 本掘削することを計画する

3-6-2 掘削計画

(1) 構造試錐井のケーシングレイアウト

構造試錐井のケーシング検討では以下の条件を満たすように設計した。

- a) 温度・圧力検層が可能な範囲でできるだけ小口径で掘削すること。
- b) 深部の情報を得るために垂直で掘削すること。
- c) ケーシング及び坑口装置には高温高压、腐食に対する抵抗力がある材質のものを使う。

構造試錐井の掘削方法としてロータリーテーブルタイプのリグで掘削する場合とスピンドルタイプの掘削器で掘削する場合の 2 通りがある。どちらを選択しても本調査の目的を達成可能である。

(2) 構造試錐井の掘削敷地

スリムホールでの構造試錐井掘削において掘削工事で要する敷地の面積は作業効率を考慮すると、掘削機材用として約 2,000m³ (約 40×50m) 程度の掘削敷地が必要と考える。ただし、ロータリーテーブル式のリグで掘削する場合には別途、給水用のピット (最大坑内容量の約 5 倍である約 150m³、すなわち、約 12m×12m×深さ 1m 程度) を設置するスペースが必要と考える。また、上述の敷地の他に掘削資機材を仮置きするスペースを設置する。実際の施工の際には掘削業者の保有する掘削装置、土地利用状況を考慮して敷地を確保することが必要である。

3-7 土木工事関連調査

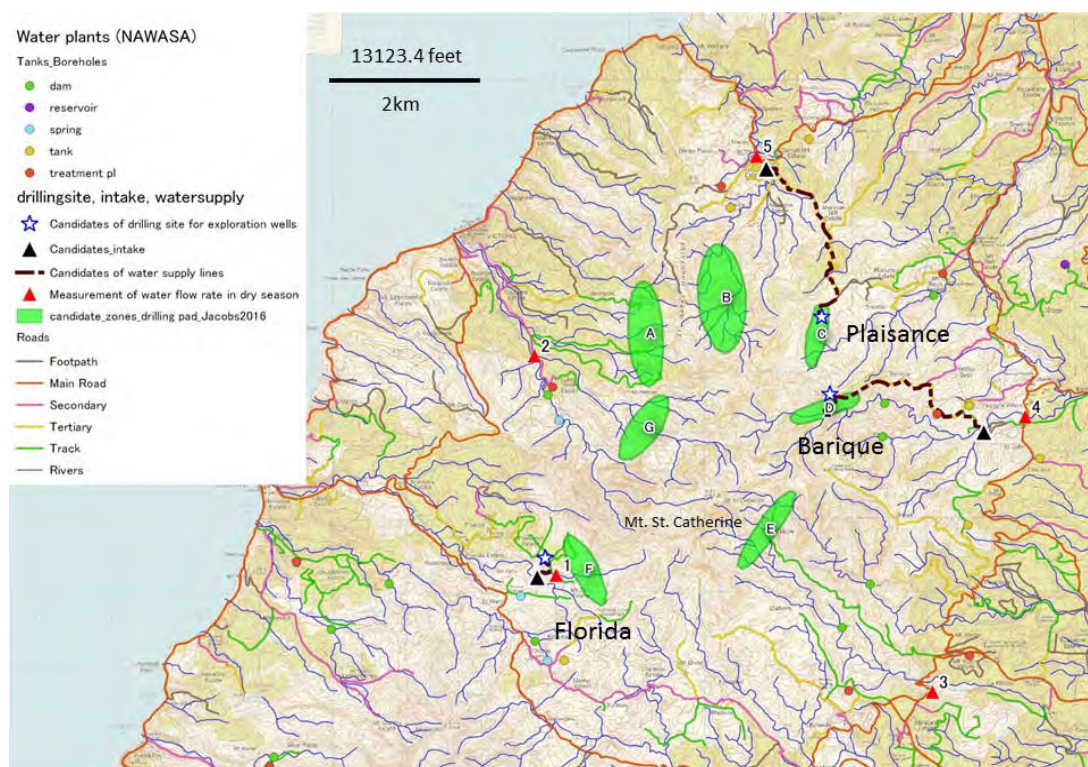
Jacobs (2016) により推定された地熱貯留層、および本調査における現地踏査結果を基に、現状のグレナダ国内のインフラ状況を加味し、次の 3 箇所を構造試錐井の試掘候補地点として提案する。

- ✓ Plaisance (C エリア)
- ✓ Barique (D エリア)
- ✓ Florida (F エリア)

以下、これらの地点は、以下の条件を検討して選定した：すなわち (a) 掘削基地、(b) 掘削用水の確保、(c) 自然保護区との位置関係、(d) アクセス道路の状況を検討項目とした。

3-7-1 掘削基地の造成

掘削基地は、道路の補修・拡張が比較的安く、車でのアクセスビリティがよい場所という条件に加え、掘削用地や貯水タンク等を造成するため 2,000m² 程度の平坦な敷地が必要となる。



出典：調査団

図 3-3 掘削敷地候補と河川流量測定箇所

3-7-2 掘削用水

掘削作業中に使用する水量は作業により異なる。給水は掘削作業（全量逸泥掘進を含む）、坑内抑圧、坑内冷却作業及びセメンチング作業を遂行するに十分な量を確保する。

本調査では、上述の掘削用水を河川からの取水で賄うことを想定し、乾期における河川流量を調査し、確保が可能と思われる地点を抽出した。ただし、グレナダ国の生活用水は、河川水の利用が大半を占める。そのため、掘削用水を確保する際には、生活用水の取水・浄化施設に影響を与えないよう注意する必要がある。

いずれの取水箇所とも NAWASA の施設とは別の河川あるいは施設の下流から採取するように計画しているが、実施に際しては NAWASA 及び地元地権者と十分に協議する必要がある。

3-7-3 自然保護区

グレナダ国では、St. Catherine 火山の中心部や、一部の海岸を自然保護区としている。試掘候補地点は自然保護区の範囲外に位置している。ただし、Barique 地点は自然保護区の近傍に位置している。実施にあたっては再確認が必要である。

3-7-4 アクセス道路

グレナダ国で掘削を行う際には、すべての掘削資機材を国外から海路で搬入することになる。グレナダ国で大型輸送船が入港可能な港はセントジョージズのみであるため、同港からの資機材搬入を想定し、アクセス道路の検討を行った。なお、陸上の輸送には 20 t クラスのトレーラーを想定した（長さ 15m×幅 2.4m×荷台高さ 1.1m 程度）。

何れの候補地点についても近傍 500m 程度まで舗装道路が整備されている。また、もっとも狭い道路で 3.5 m 程度であり、大規模なアクセス道路の建設は不要と考えられる。

第4章 環境社会配慮関連調査

4-1 環境関連法制度

4-1-1 EIA 制度の概要

グレナダ国の EIA 制度は、2002 年に制定された Physical Planning and Development Control Act No.25、および 2001 年に制定された Waste Management Act No 16 に規定されている。

表 4-1 EIA 関連法規

No.	Legislation	Description
1	Physical Planning and Development Control Act, No 25, of 2002	To make provision for the control of physical development, to require the preparation of physical plans for Grenada, to protect the natural and cultural heritage, and for related matters.
2	Waste Management Act No 16 of 2001	To provide for the management of waste in conformity with best environmental practices and related matters

出典：法規文書

Physical Planning and Development Control Act の中で、EIA の対象となる開発行為として 18 項目が挙げられている。地熱発電事業（掘削および発電所）は、第 10 項目（水力発電および発電所）、および第 15 項目（排ガス、廃水、廃棄物、騒音、振動、または放射性物質の発生を伴う開発行為）に該当するため、EIA の作成が求められる。

4-1-2 EIA の TOR (Terms of Reference)

EIA 報告書には、以下の 10 個の項目が網羅されている必要がある。

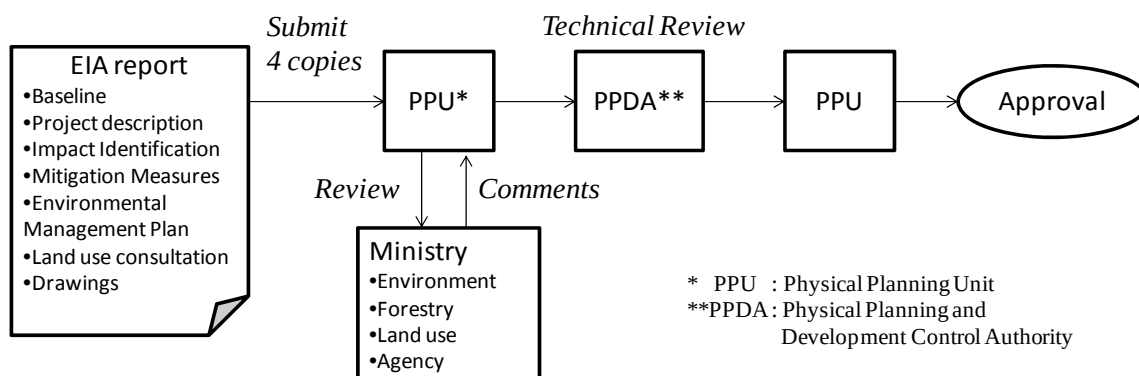
表 4-2 EIA の TOR

No.	Terms of Reference
1	The background to and the objectives of the Project.
2	Specification of the binaries of the EIA Study Area.
3	A description of the Project from inception to operational phases.
4	A description of the physical, chemical, biological, socio-economic and cultural characteristics of the existing environment of the study area.
5	Legislative and Regulatory Requirements
6	Description and quantification of potential environmental effects of the project
7	Assessment of alternatives
8	Mitigation Plan
9	Management and Monitoring Plan
10	A list of References, data sources etc.

出典：Physical Planning Unit 提供資料

4-1-3 EIA の手順

EIA 報告書の準備、および審査は下図に示すプロセスで実施される。EIA は Physical Planning Unit に提出し、通常のケースで承認まで約 6 週間を要する。



出典: 調査団

図 4-1 EIA 手順の概要

4-1-4 環境関連法規

グレナダ国では 1940 年代より環境関連の法規制が進んでいる。下表に開発行為の際に配慮すべき主な環境関連法規を挙げる。

表 4-3 環境関連法規

No.	Legislation	Description
1	The Beach Protection Amendment Act of 2009	To prohibit sand mining in Grenada
2	Litter Abatement Act of 1973	It has been supplemented by the passage of the waste management Act of 2001, addressing pollution control and abatement of litter
3	Solid waste management act No 11 of 1995	It has established the Solid Waste Management Authority, charged with the duty of developing the solid waste management facilities, and improving the coverage and effectiveness of solid waste storage, collection and disposal facilities of Grenada
4	National parks and Protected Areas Act of 1991	To designate and maintenance of National Parks and protected areas.
5	Environmental Levy Act No 5 of 1997	To impose and collect Environmental Levy on certain goods and services
6	Fisheries Act of 1986	To provide for the protection of the marine resources in Grenada, amended in 1999
7	Forest, soil and water conservation act, 1949	To make provision for the conservation of the forest, soil, water and other natural resources of Grenada, amended in 1984

出典: 法規文書

4-2 環境関連組織

4-2-1 環境関連組織

環境管理に関わるグレナダ国の政府組織は、主に以下に示すとおり 5 つの省（Ministry）と 3 つの行政局（Authority）である。

表 4-4 環境関連の行政組織

No.	Institutions
1	Physical Planning Unit, Ministry of Ministry of Communication, Works and Physical Planning
2	The Ministry of Communication, Works and Physical Planning
3	Forestry Department, Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries, Public Utilities, Marketing Board and Energy
4	Land Use Department, Ministry of Agriculture, Forestry, Fisheries, and Marketing Board
5	Environmental Health Department, Ministry of Health and the Environment
6	Physical Planning and Development Control Authority
7	Solid Waste Management Authority
8	National Water and Sewage Authority (NAWASA)

出典: グレナダ国政府, 2010

4-2-2 開発局（Physical Planning Unit）

グレナダ国で EIA を管轄する開発局（Physical Planning Unit）である。開発局は 2015 年現在、Ministry of Communication, Works, Physical Development, Public Utilities, ICT & Community Development 内にある。また、グレナダ国の水資源を管理する NAWASA（National Water and Sewage Authority）も同じ政府組織内に配置されている。

4-2-3 Physical Planning and Development Control Authority (PPDA)

法令 No.25 で組織される EIA 審査機関である PPDA の構成メンバーは以下に示す通りである。

- (a) A Chairperson (who may be a public officer) appointed by the Minister;
- (b) An executive secretary (who may be a public officer) appointed by the Minister;
- (c) 3 other members appointed by the Minister from the private sector;
- (d) The following public officers as ex officio members-
 - (i) The head of the Physical Planning Unit;
 - (ii) The Environmental Protection Officer;
 - (iii) The Director of Housing;
- (e) 2 senior public officers dealing with the following matters and nominated by the respective Ministers-
 - (i) Agriculture;
 - (ii) Public works,
 As ex officio members;

- (f) The manager of the National Water and Sewerage Authority as an ex officio member.

4-3 環境社会配慮関連調査

本項では、地熱開発ポテンシャルが高いとされる St. Catherine 火山周辺を中心に自然環境、ならびに社会環境に関する現状を主に既存資料を用いて分析し、今後の掘削調査において配慮すべき項目について考察した。

4-3-1 自然環境

(1) 気象

グレナダは湿潤熱帯地域に位置し、貿易風の季節変動の影響を受けて、雨期(6 月から 12 月)と乾季 (1 月から 5 月) に分けられる。年間平均降水量は約 2,000mm である。海岸部の年平均気温は 28.3~33.3 °C であり、山岳部の冬季は 20°C 程度となる。

(2) 自然・文化遺産¹

グレナダには現在 7 箇所の保護区が設定されている。

- (1) Grand Etang Forest Reserve
- (2) Annandale Forest Reserve
- (3) High North Forest Reserve
- (4) Perseverance Protected Area
- (5) Woburn/Clarks Court Bay Marine Protected Area
- (6) Moliniere/Beausejour Marine Protected Area
- (7) Unspecified Crown lands at Pearls are designated as a protected area

また、グレナダ国内の保護地域については、2009 年に東カリブ諸国連合により“東カリブ諸国における保護地域のシステム計画 (Systems Plans for the Protected Areas in the OECS)” が策定されている。7 箇所の保護地域ならびにシステム計画で新たに提案された保護地域は以下の 4 つのカテゴリーに分類されている。

¹ OECS Protected Areas and Associated Livelihoods (OPAAL), Grenada Protected Area System Plan, 2009
(世界銀行とフランス開発銀行の出資による GEF (Global Environmental Facility) の支援により実施された。)

表 4-5 保護地域の種類

カテゴリー	属性	代表地域	指定の種類
✓ 指定保護地域 ✓ Designated Protected Area	✓ すでに政府により保護指定を受けている 7 地域	Grand Etang	Forest Reserve
✓ 地域計画エリア ✓ Local Area Planning	✓ PPU の地域計画の中で適切に管理される 14 地域	Mt. St. Catherine Addition	Mt. St. Catherine Forest Reserve Addition
✓ 優先地域 ✓ Priority Area of Interest	✓ 調査がされたが、住民生活・観光・開発のために影響が懸念されている 8 地域	South Carriacou Islands	Marine Protected Area
✓ 緊急指定地域 ✓ Immediate Designation	✓ 過去に環境管理計画が策定され調査が実施された地域で、希少種や生態系が存在し至急保護すべき 16 地域	Mount Hartman	National Park
		Mt. St. Catherine	Forest Reserve

出典: OPAAL, 2009

(3) 植物相²

グレナダの森林を構成する植生に関する詳細な情報の記載は、一部の草本類を除いてなされていない。そのため希少種や絶滅危惧種に関する情報もまとめられていないが 3 種類の絶滅危惧種の存在が知られている。

(4) 動物相

グレナダの動物相に関しても、その種類、棲息域ならびに現在の状況を示すデータはほとんど存在していない。その中でも Groome 1970 では、4 種の両生類、8 種のトカゲ、5 種のヘビ、150 種の鳥（このうち 18 種が絶滅危惧）、4 種の固有種の陸生哺乳類と 11 種の固有種であるコウモリが存在するとされている。現在、グレナダで希少種として知られているグレナダハト（Grenada Dove）はグレナダ島南部の Hartman 山周辺に生息するとされている。

4-3-2 社会環境

(1) 土地利用

グレナダ島南西部および、島の周囲の主要開発地を除き、ほとんどが農地または耕作放棄地、および山岳地域の森林地帯である。農作物の代表的なものは、カカオ、ナツメグ、バナ

² The Convention on Biological Diversity in Grenada, Biodiversity Strategy & Action Plan, 2011

ナ、さとうきび、果実等である。地熱開発の候補地である St. Catherine 火山周辺も大部分が農地として利用されている私有地が広がる。

(2) 住民の生活区域

グレナダ国の人口は約 10 万人である。居住区は主に首都セントジョージズのある南西地域（5,000~25,000 人/km²）、および島の周囲ならびに東西を横断する幹線道路沿いの主要な町および集落（500~5,000 人/km²）である。

St. Catherine 火山周辺の地熱開発候補地あるいはアクセス地については、数は多くはないが住民の居住地域に該当する可能性がある。

4-3-3 環境社会配慮項目の洗い出し

本プロジェクトに対する環境社会配慮項目を洗い出すために、予備的スコーピングを実施した。環境社会影響の分析を行った項目は、「国際協力機構環境社会配慮ガイドライン」（JICA、2010 年 4 月）に示されるチェック項目を参照して選定した。影響は、準備段階（試掘、用地取得）、建設段階（施設の建設）、供用段階（施設の稼働）について、回避・緩和策を講じなかった場合を想定してその程度を評価した。

予備的スコーピングの結果、大気質、水質、廃棄物、騒音、保護区、生態系/生物相、水象、地形・地質、景観について影響が生じることが想定された。また、貧困層、雇用や生計手段等の地域経済、土地利用や地域資源利用、水利用、HIV/AIDS 等の感染症、労働環境、事故、気候変動についても正ないし負の影響が想定されるが、住民移転、地盤沈下および文化遺産に関しては、試掘計画が策定されたのち、詳細な調査が必要であるとされた。

第5章 プレフィージビリティースタディ

5-1 プロジェクトの目的

5-1-1 上位目標（案）

グレナダ国の再生可能エネルギー源の割合を高める

【参考：グレナダ国国家エネルギー開発計画（The National Energy Policy of Grenada – A low Carbone Development Strategy For Grenada, Carriou and Petite Martinique, November 2011 (抜粋)）

Renewable Energy

Goal: 20% of all domestic energy usage (electricity & transport) will originate from renewable energy sources by 2020.

2020 年までに、家庭用エネルギー（電気、交通）の 20%を再生可能エネルギー源とする。

Power Sector

Goal: Transition to an efficient, low-carbon, national electricity generation and interconnection network that ensures safe, efficient, affordable and environmentally friendly energy services

効率的で安全、廉価かつ環境親和型のエネルギーサービスを確実にする効率的で低炭素型の発電と相互接続網への移送

5-1-2 プロジェクト目標（案）

グレナダ国グレナダ島において地熱発電所を建設する。

5-2 プロジェクトの計画概要

5-2-1 地熱発電所

(1) 地熱発電形式

本事業では、地熱資源のエンタルピーを考慮して、構造がシンプルで世界的に最も普及している復水式フラッシュサイクル方式とする。

(2) 設備容量

本事業で建設する地熱発電所の設備容量は 15MW と計画する。単機容量 5MW の機器を 3 ユニット導入するものと計画する。タービンはシングルフラッシュ復水型とし発電機は空冷の三相同期発電機とする。

5-2-2 地熱流体生産・還元システム (FCRS)

(1) 生産井、還元井

生産井 3 本、還元井 1 本により 15MW の発電所運用を行う。生産・還元井ともに 2,000m 級の坑井を想定し、すべて傾斜掘削とする。

(2) 蒸気輸送管

生産・還元井の掘削地域の選定結果次第では蒸気輸送管の延長は変化する。ここでは 3 掘削基地から平均長を 3 km 程度、合計 9km 程度敷設することとする。主蒸気配管の配管径は 500 mm とする。

(3) 電力輸送設備概要

設備容量 15MW の発電所から最大消費地のセントジョージズまでの電力輸送距離は国道に沿って敷設した場合でも 40km 未満である。このため、送電線容量は 33kV が適切であり、既存国道沿いに敷設する。本計画では、Grand Etang Lake を通る既存 11kV の電力輸送ルートを想定し、100%の冗長性をもつ 2 基系統の電力輸送線の敷設を想定する。

5-3 事業費概算

事業費の概算を表に示す。

通常、地熱発電開発の事業費には地表調査費(地質・地化学調査、物理探査)は、すでに完了しているため、本検討には含めない。

検討の結果、概算総工費は約 123 MUSD となった。

表 5-1 事業費概算結果

Cost Items		Cost (US\$)
Slimhole Drilling	3 Wells	7,500,000
	Civil Works & Preparation	4,000,000
Appraisal Drilling	4 Wells	20,800,000
	Civil Works & Preparation	9,200,000
Production Drilling	2 Wells & Production Test	12,400,000
	Civil Works & Preparation	3,900,000
Field Development	FCRS Construction	6,000,000
	Civil Works & Preparation	600,000
Construction of Power Plant		35,200,000
Transmission Line (2 lines)		18,000,000
Consultancy Services (DD, SV)		5,800,000
Total		123,400,000

掘削費用、FCRS 建設費用は過去事例を参考にした。土木工事費は Physical Planning からの情報を参考に積算した。

出典：調査団

5-4 実施体制モデル

グレナダ国での地熱開発では、いずれかの段階で民間企業の参加を得ることが必須条件であると考えられる。本検討では、表に示す4つのモデルを想定した。

いずれのモデルにおいても、地上プラント（FCRS、発電所）と送電線の建設事業推進には、民間企業の参入を仮定した。また、試掘（スリムホール）の掘削には、グレナダ政府に対する無償資金支援が投入されることを仮定した。

表 5-2 事業実施モデルの想定

モデル	政府／民間	作業区分
Model-1	政府	試掘井、資源量評価井掘削、生産井掘削、入札（期間1年）
	民間	地上プラント（FCRS、発電所）建設
Model-2	政府	試掘井、資源量評価井掘削、入札（期間1年）
	民間	生産井掘削、地上プラント（FCRS、発電所）建設
Model-3	政府	試掘井、入札（期間2年）
	民間	資源量評価井掘削、生産井掘削、地上プラント（FCRS、発電所）建設
Model-4	政府	入札（期間2年）
	民間	試掘井、資源量評価井掘削、生産井掘削、地上プラント（S FCRS、発電所）建設

出典：調査団

5-5 財務分析

5-5-1 グレナダにおける地熱開発プロジェクトの財務分析

グレナダ政府は地熱資源の開発を促進するにあたって、官民連携での開発を目指している。政府が官民連携のためにおこなう投資オプションを比較し、プロジェクトの財務的実施可能性を評価するための財務分析結果を示す。

5-5-2 プロジェクトスキーム

財務分析にあたっては、表 5-2 のモデルを想定した。ただし、モデル4は、民間企業がスリムホールの実施を行わない場合のモデル3と財務分析上同等に扱うことができるので財務分析からは除外する。

表にプロジェクトスキームの諸前提を示す。

表 5-3 プロジェクトスキーム

項目		モデル 1	モデル 2	モデル 3
		発電所分離 (PPP モデル no.1)	生産井分離 (PPP モデル no.2)	評価井分離 (PPP モデル no.3)
Development Activity & Entity	1. スリムホール	無償資金による 政府実施	無償資金による 政府実施	無償資金による 政府実施
	2. 評価井	政府実施	政府実施	民間企業実施
	3. 生産井	政府実施	民間企業実施	民間企業実施
	4. 発電設備開発	民間企業実施	民間企業実施	民間企業実施
	5. オペレーション	民間企業実施	民間企業実施	民間企業実施
借入金	政府	譲許性融資	譲許性融資	譲許性融資
	民間企業	商業ローン	商業ローン	商業ローン
政府の資金回収方法		蒸気売買契約もしくは 生産井戸の売却	発電会社に対する評 価井の費用移転	費用移転は発生し ない
民間の資金回収方法		発電した電力を GRENLEC に販売		

出典：調査団

5-5-3 財務分析にかかる前提条件

条件は現時点での類似プロジェクトを参照に標準的な設定とした。借入金については、国際金融機関などの援助機関、商業銀行などにおける公的機関、民間企業への貸付実績や現行のトレンドを参考に譲許性融資と商業貸付けのそれぞれについて条件を仮定した。また、民間企業のエクイティ IRR として 20%を前提とした。また減価償却については発電所の耐用年数と同等の期間を設定した。

5-5-4 財務分析結果

(1) GRENLEC への売電単価を US 15.0 cents/kWh とした場合

GRENLEC へのヒアリングによれば、地熱発電での売電価格が US 15.0 cents/kWh 程度であれば地熱発電所から買電してもよいとしている。従い、本分析では、これを地熱発電での売電価格と仮定する。ただし、本計画では送電線建設費も含める必要があるのでこれを送電端単価とする。

すべてのモデルにおいて政府は民間企業から投資費用を回収できることを前提とする。財務分析の評価は、加重平均資本コスト (WACC) とプロジェクト IRR を比較することによって行い、プロジェクト IRR が WACC を下回らないときに、プロジェクトは財務的にフィージブルであると判断する。

これによる財務分析の結果を表 5-4 に示す。

表 5-4 財務分析結果

(GRENLEC への売電価格を 0.15 US\$/kW と仮定した場合)				
組織	項目	モデル 1	モデル 2	モデル 3
政府	借入金	US\$ 41.5 mil.	US\$ 27.1 mil.	US\$ 0.6 mil.
	資本金	US\$ 20.1 mil.	US\$ 13.5 mil.	US\$ 0.3 mil.
	加重平均資本コスト	2.6%	2.6%	2.6%
	プロジェクト FIRR	3.8%	3.9%	4.4%
	エクイティ FIRR	0.1%	0.0%	2.0%
民間	借入金	US\$ 50.3 mil.	US\$ 66.3 mil.	US\$ 92.6 mil.
	資本金	US\$ 12.6 mil.	US\$ 19.1 mil.	US\$ 23.1 mil.
	加重平均資本コスト	8.4%	8.7%	8.4%
	プロジェクト FIRR	13.9%	11.0%	8.5%
	エクイティ FIRR	34.9%	31.8%	22.2%
官民合計	プロジェクト FIRR	8.9%	8.4%	8.4%

出典: 調査団

分析の結果、すべてのモデルにおいて、プロジェクト IRR は WACC を上回る結果となった。このため、本プロジェクトはすべてのモデルにて財務的に実施可能である判断される。

(2) エクイティ IRR を 20% と固定した場合の売電価格分析

発電会社のエクイティ IRR を 20% と固定して、プロジェクトの経済性を分析した結果は、表 5-5 のとおりとなる。

表 5-5 売電価格分析

Assumption	Indicator		Model-1	Model-2	Model-3
Equity IRR (20%)	Power Sales Tariff	US\$/kW	12.1	12.9	14.3

出典: 調査団

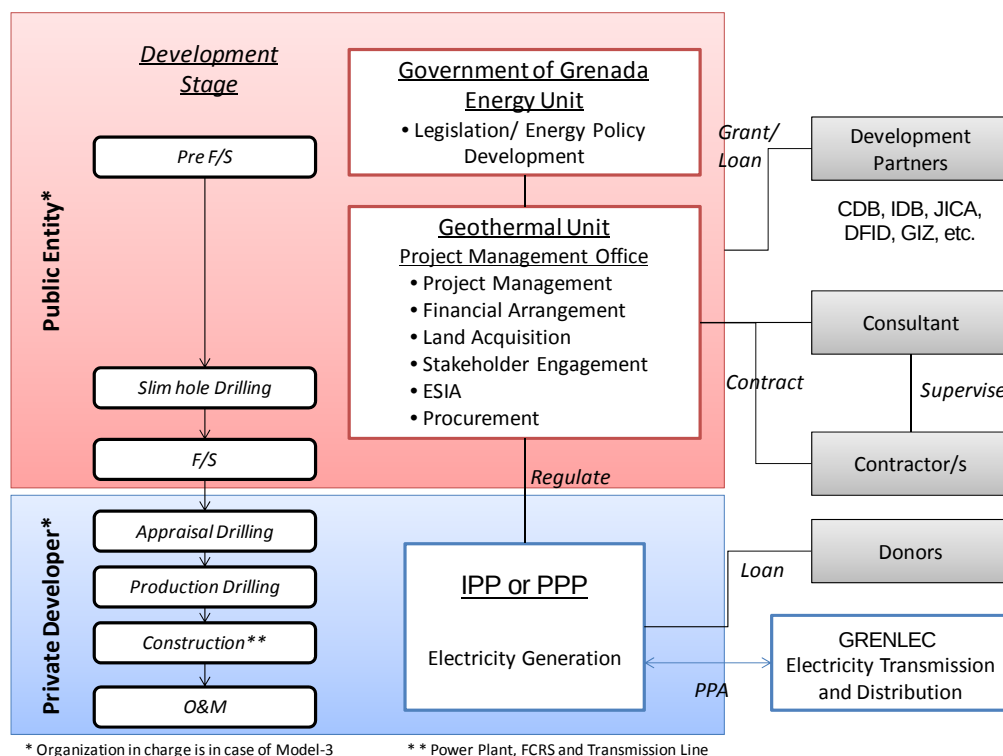
売電価格は、モデル 1 においては約 US 12 cents/kWh まで、モデル 3 では約 US 14 cents/kWh まで低減が可能であることがわかる。GRENLEC の受電端価格が US 15 cents/kWh 程度であれば買電できる範囲であると述べているので、これらの分析結果は地熱発電の実施によって現行の電力価格を低減できる可能性があることを示している。

5-6 プロジェクトの実施体制

グレナダ国における地熱開発プロジェクトの実施体制を下図に示す。ここでは典型的な例として、モデル 3 を仮定する。

プロジェクトの実施は、アウトソーシングを基本とすると想定する。すなわち、政府は地熱開発プロジェクトの推進に必要な法整備等の整備、必要な資金や技術支援の調達、並びに ESIA にかかるステークホルダーとの調整などをおこなう。事業の運開に至るまでは相応の作業が生ずるので、Energy Unit 配下に地熱開発の特別組織 (Geothermal Unit) の設置を推奨する。掘削工

事、ならびに ESIA 調査の技術的管理は専門コンサルタントにより実施されるものとし、コンサルタントは直接グレナダ政府、または各ドナーにより調達される。



出典: 調査団

図 5-1 地熱開発プロジェクトの実施体制

5-7 プロジェクト評価 DAC 評価 5 項目

下記に示す、DAC の評価 5 項目の視点の基づき、プロジェクト評価を実施した。

- 妥当性 (Relevance)
- 有効性の予測 (Effectiveness)
- 効率性の予測 (Efficiency)
- インパクトの予測 (Impact)
- 持続性の予測 (Sustainability)

その結果、本計画の実施は妥当なものと判断することができた。ただし、下記に示す外部条件を満足する必要がある。

5-8 外部条件 (External Conditions)

想定される主な外部条件は以下の通り。

- 関連法制度が施行される。

- 事業促進のための無償資金ないしは有償資金が調達される。
- 資源確認および地熱発電所建設にかかる技術支援が行われる。
- 地熱資源が確認され、開発される。
- 民間企業が参入し、IPP ないしは PPP による事業が組成される。
- ESIA 関連の条件が満たされる。

5-9 プロジェクト資金の見通し

プロジェクト資金として、下記の様なソースが想定される。

表 5-6 プロジェクト資金の見通し

種類	開発パートナー	適 用
無償資金；	CDB, IDB, Bilateral donors (e.g. UK)	－試掘井掘削
融資；	CDB, IDB (e.g. Clean Technology Fund), Bilateral donors (e.g. JICA), IRENA	－資源評価井掘削、 －生産井掘削、 －発電所建設、 －送電線建設 －コンサルティングサービス
技術協力；	Bilateral donors (e.g. NZ, JICA), Other organizations (e.g. UN organizations)	－プロジェクト推進能力向上支援 －ESIA 実施 －掘削を含む建設工事にかかる技術支援 (仕様書作成、入札支援、施工監理、 井戸試験実施などを含む)

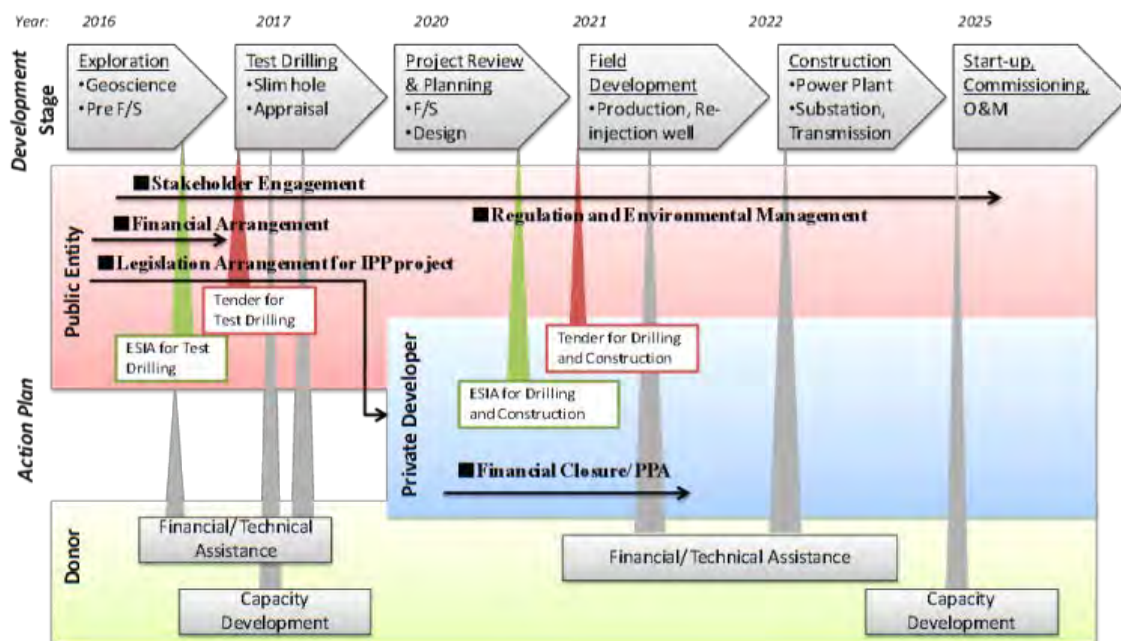
出典: 調査団

第6章 案件実施に向けたアクションプランと課題

6-1 案件実施に向けたアクションプランと課題案件実施に向けたグレナダ政府のアクションプラン

グレナダにおいて地熱開発プロジェクトを実現するにあたって、政府機関、ドナーならびに民間事業者、それぞれにアクションが示される（図 6-1）。

プロジェクトの開発ステージは 2016 年現在で Exploration まで終了しており、今後はテスト井（スリムホール）掘削に向けた準備が開始される。2025 年の地熱発電所の運転開始をターゲットにしたアクションプランを以下に示す（モデル 3）。



出典: 調査団

図 6-1 地熱開発に向けたアクションプラン

6-2 本邦からの支援

上記で記述したグレナダ政府のアクションのうち、本邦からの支援が考えられる項目は下記の通りである。

- 試掘にかかる ESIA 実施のための技術支援
 - ベースライン調査、スコーピング
 - 試掘のための ESIA（Stakeholder Engagement を含む）

- 無償技術支援の調達
 - 試掘のための入札図書作成と業者調達支援（施工監理、技術管理、次期計画策定も含む）
- 試掘のための無償資金の調達

6-3 結論

- (1) 地熱資源開発の必要性
 - グレナダ島の電力は、ディーゼルエンジン発電施設で発電されている。このため、電力価格は原油価格の変動を強く受けている、2008 年には一般家庭用電気料金が 0.81 EC\$ (US\$ 0.30/kWh)を超える水準まで高騰した。
 - この様な背景から、自国地産資源である地熱資源の開発が急務である。
- (2) 地熱資源
 - グレナダ島には、20-95 MW 程度と推定される、地熱資源が賦存する可能性がある。
- (3) 地熱開発計画
 - この資源を利用して、設備容量15 MW の地熱発電所の建設は、財務的にフィージブルと判断される。
 - DAC の評価 5 項目の観点でプロジェクト評価を行った結果、本プロジェクトの実施はフィージブルと判断される。
 - ただし、外部条件として掲げた 6 項目がクリアされる必要がある。
- (4) 構造試錐井掘削
 - 地熱開発計画を確実にするため、3 本の構造試錐の掘削が必要である。

6-4 提言

プロジェクトを速やかに実施するために以下の項目の実施を提言する。

- (1) 地熱開発ユニットの創設および事業推進にかかる能力向上プログラムの導入
- (2) 関連法制度の整備
- (3) 試掘にかかる技術支援ないし無償資金調達、
- (4) 試掘にかかる ESIA の実施、試掘調査の実施および資源賦存有無の確認
- (5) 資源量評価井掘削にかかる融資元サウンディング
- (6) 地熱発電事業にかかる民間企業、融資策等のマーケット・サウンディング

グレナダ国 地熱開発に係る情報収集・確認調査

ファイナルレポート

調査対象地域位置図

略語表

要 旨

目 次

第 1 章	調査概要.....	1-1
1-1	調査の背景.....	1-1
1-2	調査の目的.....	1-1
1-3	調査対象地域.....	1-1
1-4	グレナダ国関係機関.....	1-1
1-5	JICA 調査団	1-2
1-6	全体調査工程.....	1-3
第 2 章	エネルギーセクターの現況と課題.....	2-1
2-1	グレナダ国の一般状況.....	2-1
2-2	グレナダ国電力政策概要	2-2
2-3	電力セクターの現況.....	2-6
2-3-1	法制度.....	2-6
2-3-2	組織体制.....	2-7
2-3-3	設備の現況と課題.....	2-9
2-3-4	電力需給現況と予測	2-9
2-3-5	ドナー、国際機関、民間の活動	2-11
第 3 章	自然条件調査.....	3-1
3-1	調査概要.....	3-1
3-1-1	調査の目的	3-1
3-1-2	調査内容.....	3-1
3-2	既存調査結果のレビュー	3-1
3-2-1	地形地質調査レビュー	3-2
3-2-2	地化学調査レビュー	3-7
3-2-3	物理探査のレビュー	3-11
3-3	本調査で実施した現地調査	3-14

3-3-1	地表地質調査	3-14
3-3-2	地化学調査	3-23
3-3-3	重力探査.....	3-29
3-3-4	NZ 支援 地表調査結果概要	3-41
3-3-5	試掘計画.....	3-50
3-3-6	土木工事関連調査.....	3-64
第 4 章	環境社会配慮関連調査	4-1
4-1	環境関連法制度	4-1
4-1-1	EIA 制度の概要	4-1
4-1-2	EIA の TOR (Terms of Reference)	4-2
4-1-3	EIA の手順.....	4-3
4-1-4	環境関連法規.....	4-3
4-2	環境関連組織.....	4-4
4-2-1	環境関連組織	4-4
4-2-2	開発局 (Physical Planning Unit)	4-5
4-2-3	Planning and Development Authority (PDA)	4-5
4-3	環境社会配慮関連調査.....	4-6
4-3-1	環境社会面における現状分析.....	4-6
4-3-2	環境社会配慮項目の洗い出し.....	4-13
4-3-3	試掘候補地の周辺環境	4-16
4-3-4	JICA ガイドラインとの整合性.....	4-16
4-3-5	環境関連組織の能力評価.....	4-17
第 5 章	プレフィージビリティースタディ	5-1
5-1	プロジェクトの目的.....	5-1
5-1-1	上位目標 (案)	5-1
5-1-2	プロジェクト目標 (案)	5-1
5-2	プロジェクトの計画概要	5-1
5-2-1	地熱発電所	5-1
5-2-2	地熱流体生産・還元システム (FCRS)	5-5
5-2-3	電力輸送設備概要	5-6
5-3	事業費概算	5-6
5-4	実施体制モデル	5-8
5-5	モデル毎の事業費配分	5-9
5-6	モデル毎の事業実施スケジュール	5-10
5-7	財務経済分析	5-14

5-7-1	グレナダにおける地熱開発プロジェクトの財務分析	5-14
5-8	プロジェクトの実施体制	5-23
5-9	プロジェクト評価 DAC 評価 5 項目	5-24
5-9-1	妥当性 (Relevance)	5-24
5-9-2	有効性の予測 (Effectiveness)	5-24
5-9-3	効率性の予測 (Efficiency)	5-25
5-9-4	インパクトの予測 (Impact)	5-25
5-9-5	持続性の予測 (Sustainability)	5-25
5-9-6	外部条件 (External Conditions)	5-25
5-9-7	総合評価	5-25
5-10	プロジェクト資金の見通し	5-26
第 6 章	案件実施に向けたアクションプランと課題	6-1
6-1	案件実施に向けたグレナダ政府のアクションプラン	6-1
6-1-1	直近のアクション	6-1
6-1-2	試掘終了後の事業推進に備えるアクション	6-1
6-1-3	資源量評価井の掘削に係るアクション	6-2
6-1-4	施設建設工事開始に備えるアクション	6-2
6-2	本邦からの支援	6-4
6-3	結論	6-4
6-4	提言	6-5

添付資料

添付資料-1	協議議事録
添付資料-2	現地写真
添付資料-3	プレゼンテーション資料
添付資料-4	収集資料リスト
添付資料-5	容積法計算方法

図表目次

図 2-1	グレナダ国エネルギー開発戦略（2010－2020）	2-4
図 2-2	想定される地熱開発のためのストラクチャー	2-5
図 2-3	年間発電量	2-10
図 3-1	グレナダ島および小アンティル諸島周辺のプレート分布	3-3
図 3-2	グレナダ島および小アンティル諸島周辺における火山フロントの変遷	3-4
図 3-3	グレナダ島の地質図	3-4
図 3-4	グレナダ島北部の断裂系解析（上：地形解析、下：地表調査）	3-5
図 3-5	グレナダ島の地熱微候位置図	3-6
図 3-6	Jacobs (2015)によるグレナダの地熱系概念モデル	3-8
図 3-7	温泉の $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$ 三成分系	3-9
図 3-8	温泉の $\text{Na}-\text{K}-\text{Mg}$ 三成分系	3-9
図 3-9	ガスの $\text{He}-\text{Ar}-\text{N}_2$ 三成分系	3-10
図 3-10	MT 測点位置図	3-13
図 3-11	キャップロック下面標高平面図	3-13
図 3-12	代表的な比抵抗構造断面図(SN および WE 断面) -	3-13
図 3-13	現地調査位置図	3-16
図 3-14	Chambord で観察されるトラバーティン	3-17
図 3-15	Castle Hill で観察されるトラバーティン	3-17
図 3-16	Hapsack で観察される変質帯	3-18
図 3-17	Hapsack に分布する凝灰角礫岩の偏光顕微鏡写真	3-18
図 3-18	Peggy's Whim に分布する凝灰角礫岩	3-19
図 3-19	Peggy's Whim の凝灰角礫岩中の礫の偏光顕微鏡写真	3-19
図 3-20	Clabony に分布するデブリ堆積物	3-20
図 3-21	Clabony に分布する凝灰角礫岩中の偏光顕微鏡写真	3-20
図 3-22	地熱微候地に分布する変質岩中の変質鉱物分布	3-22
図 3-23	変質岩中の変質鉱物分布と比抵抗分布 (-250masl)	3-22
図 3-24	地化学調査地点	3-23
図 3-25	温泉の $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$ 三成分系	3-26
図 3-26	温泉の $\text{Na}-\text{K}-\text{Mg}$ 三成分系	3-27
図 3-27	断層構造に対する鉛直一次微分と水平一次微分の比較	3-31
図 3-28	重力測点位置図	3-32
図 3-29	G-H 図	3-33
図 3-30	ブーゲ異常図（補正密度 $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ ）	3-34
図 3-31	グレナダ北部の地図	3-35
図 3-32	傾向面（上）及び傾向面残差図（下）	3-36
図 3-33	水平一次微分図	3-38
図 3-34	垂直一次微分図	3-38
図 3-35	重力測定から推定した地下での解釈密度分布	3-39

図 3-36	水平一次微分図と垂直一次微分図の重ね合わせ.....	3-40
図 3-37	グレナダ北部の地質図.....	3-40
図 3-38	3次元解析による比抵抗分布図（海拔-1,000m）.....	3-43
図 3-39	推定される地熱貯留層範囲平面図.....	3-44
図 3-40	推定される地熱貯留層断面図.....	3-45
図 3-41	掘削計画案-1：アップフローゾーン上で試掘を行う場合.....	3-52
図 3-42	掘削計画案-2：C、D、Fゾーンで掘削案.....	3-53
図 3-43	掘削計画案-2：地熱貯留層と構造試錐井掘削位置.....	3-54
図 3-44	掘削計画案-3：アップフローゾーンへの傾斜掘削案の平面図.....	3-56
図 3-45	掘削計画案-3：アップフローゾーンへの傾斜掘削案.....	3-57
図 3-46	構造試錐井のケーシングプログラム案（ロータリーテーブル掘削機の場合）...3-59	
図 3-47	構造試錐井のケーシングプログラム案（スピンドルタイプ掘削器で掘削する場合）	3-60
図 3-48	ロータリーテーブルタイプ（S-32）のリグ写真（岩手県葛根田）.....	3-61
図 3-49	スピンドルタイプ掘削器.....	3-61
図 3-50	ロータリーテーブルタイプのリグで掘削した場合の敷地配置の例.....	3-62
図 3-51	スピンドルタイプのリグで掘削した場合の敷地配置の例.....	3-63
図 3-52	掘削敷地候補と河川流量測定箇所、NAWASA 施設との位置関係.....	3-64
図 3-53	A エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査.....	3-66
図 3-54	B エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査.....	3-66
図 3-55	C エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査.....	3-67
図 3-56	D エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査.....	3-67
図 3-57	E エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査.....	3-68
図 3-58	F エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査.....	3-68
図 3-59	G エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査.....	3-69
図 3-60	掘削計画（敷地および給水ライン）と保護地域との関係図.....	3-71
図 3-61	試掘候補地点までのアクセス道路.....	3-72
図 4-1	EIA 手順の概要.....	4-3
図 4-2	組織図.....	4-5
図 4-3	月降水量（2014 年）.....	4-6
図 4-4	年平均降水量.....	4-7
図 4-5	流域と給水施設位置図.....	4-8
図 4-6	保護地域（既往・提案）.....	4-10
図 4-7	土地利用の状況.....	4-12
図 4-8	人口分布.....	4-13
図 5-1	発電所の配置図例.....	5-4
図 5-2	FCRS 概念図.....	5-5
図 5-3	送電線レイアウト案.....	5-6
図 5-4	財務分析結果「民間企業」.....	5-20
図 5-5	地熱開発プロジェクトの実施体制.....	5-24

図 6-1	地熱開発に向けたアクションプラン	6-3
表 1-1	グレナダ国関連機関	1-2
表 1-2	JICA 調査団	1-2
表 1-3	全体調査工程	1-3
表 2-1	グレナダ国の一般社会状況	2-1
表 2-2	国家政策 策定の原則	2-2
表 2-3	国家政策の 11 のゴール	2-2
表 2-4	グレナダにおける発電容量	2-9
表 2-5	電気料金 (2015, EC\$)	2-11
表 3-1	既存調査資料一覧	3-2
表 3-2	Jacobs (2015)における MT 探査概要	3-11
表 3-3	現地地質調査結果一覧	3-16
表 3-4	X 線回折分析による鉱物同定結果 (石英指数)	3-21
表 3-5	地化学調査地点と現地測定結果	3-24
表 3-6	化学分析成分と分析方法	3-25
表 3-7	温泉水の化学分析結果	3-25
表 3-8	地化学温度計計算結果	3-28
表 3-9	重力探査解析図一覧	3-30
表 3-10	測定結果一例	3-33
表 3-11	容積法 (改良式) による資源量評価	3-48
表 3-12	容積法計算に使用したパラメーター	3-49
表 3-13	構造試錐井ターゲット一覧	3-55
表 3-14	提案するケーシングプログラム	3-58
表 3-15	各掘削候補地点の検討項目	3-65
表 3-16	各掘削候補地点の位置情報	3-65
表 3-17	乾期における取水候補地の河川流量測定結果	3-65
表 4-1	EIA 関連法規	4-1
表 4-2	EIA 対象となる開発行為	4-2
表 4-3	EIA の TOR	4-3
表 4-4	環境関連法規	4-4
表 4-5	環境関連の行政組織	4-4
表 4-6	保護地域の種類	4-9
表 4-7	予備的スコーピングの結果	4-14
表 4-8	グレナダの法制度における ESIA 手続きのまとめ	4-17
表 4-9	社会配慮項目における JICA ガイドラインとの相違点	4-17
表 5-1	地熱発電の方式	5-2
表 5-2	単機容量検討表	5-3
表 5-3	事業費概算結果	5-7
表 5-4	事業実施モデルの想定	5-9

表 5-5	モデル毎の事業費配分	5-11
表 5-6	事業の実施スケジュール	5-13
表 5-7	プロジェクトスキーム	5-15
表 5-8	開発計画概要	5-16
表 5-9	分析にかかる前提条件	5-18
表 5-10	財務分析結果	5-19
表 5-11	売電価格分析	5-21
表 5-12	プロジェクト資金の見通し	5-26

換算レート（2016 年 7 月末時点）

1.0 US\$ = 2.689 XC\$ (EC\$) = 102.28 JPY

第1章 調査概要

1-1 調査の背景

グレナダ国は東カリブ諸島に位置する島嶼国である。この地域の島嶼国では、いずれもエネルギーを輸入の化石燃料に依存しているため、地産の再生エネルギーの開発が喫緊の課題となっている。グレナダ国では地熱資源が賦存しているとされ、同国はその開発を計画している。しかし、地熱開発には大きな初期投資が必要となる上に、同国特有の電力セクターの課題もあり、具体的な計画として進展はしていない。

一方、JICA は東カリブ地域の再生可能エネルギー開発を支援する目的で、IDB をパートナーとして CORE スキーム（Cofinancing for Renewable Energy and Energy Efficiency）を立ち上げ（2012 年 3 月）、続いて JICA、IDB および CDB の 3 者で、同分野における協力覚書が署名された（2014 年 7 月）。

このような背景から、グレナダ国の地熱資源開発に関して、JICA の直接技術協力ないしは CDB、IDB を通した迂回融資等の可能性を調査するための情報収集確認調査の実施が要請された。これに対して JICA は本邦コンサルタントを調達して本件調査を開始したものである。

1-2 調査の目的

- ✓ 地熱エネルギー開発に必要な技術的、財政的支援案件を形成するために必要な情報の収集。収集する情報は、国家政策や関連法律、制度、ガイドラインなどで外国企業が開発に参入に必要なものも含む。
- ✓ 地熱開発のための地質地化学調査などを含む現地調査や予備的環境関連調査、および組織制度等に関する調査の実施。

1-3 調査対象地域

グレナダ国グレナダ島

1-4 グレナダ国関係機関

調査に関連するグレナダ国の関連機関は表 1-1 の通りである。

表 1-1 グレナダ国関連機関

機関名	業務分掌
財務・経済開発、エネルギー、貿易および政策支援省エネルギーおよび持続可能開発局	政策の策定、実施および監督
グレンレック（GRENLEC）	発電、送電、配電を一貫する組織 （株式保有構成） ➤ 米国民間企業 WRB: 50% ➤ グレナダ政府、国民保険機構：21% ➤ 従業員：4.5% ➤ その他資本家：24.5%

出典：JICA調査団

1-5 JICA 調査団

調査団の構成メンバーは下表のとおりである。

表 1-2 JICA 調査団

氏 名	担当分野
高橋信也	総括/地熱開発計画/貯留層評価
赤塚貴史	副総括/地質/掘削計画
福田大輔	地化学
川崎潔/武田祐啓	物理探査
寺本雅子	環境社会配慮
菊川武	電力政策/投資政策
百瀬泰/吉田怜史	土木計画

出典：JICA調査団

1-6 全体調査工程

調査全体工程を以下に示す。工程は、調査対象国の状況と調査の進捗に従い、適宜調整した。

表 1-3 全体調査工程

No.	Position	Name											2016									
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8			
1	Team Leader/Geothermal Development Plan/Reservoir	TAKAHASHI		■			■	■									■					
2	Sub-Team Leader/Geology/Drilling Engineer	AKAT SUKA		■				■								■		■				
3	Geochemistry	FUKUDA		■																		
4	Geophysics	KAWASAKI/ TAKEDA		■				■														
5	Environmental and Social Considerations Evaluation	TERAMOTO		■				■				■	■		■	■		■				
6	Energy Policy Analysis/Project Finance	KIKUKAWA		■			■					■	■		■			■				
7	Civil Engineering Planning	MOMOSE/ YOSHIDA		■				■							■	■						
Report			△ IC/R								△ PR						△ DF/R		△ F/R			

*Intermittent

IC/R: Inception Report, P/R: Progress Report, DF/R: Draft Final Report, F/R: Final Report

出典：JICA調査団

第2章 エネルギーセクターの現況と課題

2-1 グレナダ国の一般状況

グレナダ国の一般社会状況を下表に示す。グレナダ国は 1974 年に英国から独立した総国土面積 345 km 人口約 10.5 万人の、英語を公用語とする島嶼国である。面積は鹿児島県種子島の約 0.75 倍、北海道利尻島の約 2 倍に相当している。

表 2-1 グレナダ国の一般社会状況

1	一般			
a.	面積	345 km ²		(2014年世銀資料)
b.	人口	106000人		(2014年世銀資料)
c.	首都	セントジョージズ		
d.	言語	英語(公用語)、フランス語系パトワ語		
e.	独立	1974年、英国から		
2	政治			
a.	政治体制	立憲君主制		
b.	元首	女王エリザベス2世		
c.	議会	二院制(上院13名、下院15名)		
d.	主な政党	新国民党(NNP)、国民民主党(NDC)		
3	外交			
a.	カリブ共同体(CARICOM)加盟国			
b.	東カリブ諸国機構(OECS)加盟国			
4	経済			
a.	主要産業	農業、観光		
b.	GNI	840百万USD		(2014年世銀資料)
c.	一人当たりのGNI	7,910 USD		(2014年世銀資料)
d.	GDP成長率			(世銀資料)
	i)	2012年	-1.20%	
	ii)	2013年	2.40%	
	iii)	2014年	5.70%	
e.	インフレ率			(消費者物価比 IMF)
	i)	2012年	2.40%	
	ii)	2013年	-0.04%	
	iii)	2014年	-0.80%	
f.	失業率	未詳		
g.	総貿易額			(2014年 WTO資料)
	i)	輸出	37百万 USD	
	ii)	輸入	340百万 USD	
h.	主要貿易品目			
	i)	輸出	バナナ、ココア、ナツメグ、果実、野菜、衣類、魚介類	
	ii)	輸入	食料品、機械・輸送機器、工業製品、科学製品、燃料	
i.	主要貿易相手国			(2013年 WTO資料)
	i)	輸出	ドミニカ、米国、EU、セントルシア、バルバドス	
	ii)	輸入	米国、トリニダード・トバコ、EU、ベネズエラ、日本	
j.	通貨	東カリブドル(EC\$)		
k.	為替レート	1USD = 2.7 EC\$ (固定相場)		
l.	主要援助国			(2013年 OECD/DAC)
	i)	(1) ドイツ、(2) オーストラリア、(3) 米国		
	ii)	(4) カナダ、(5) 日本		

(出典: 日本国外務省ウェブサイトから(閲覧2016年6月15日版))

政体は、エリザベス女王を元首とする立憲君主制の2院議会制民主主義を採用しており、2 大政党のうちいずれかが選挙により政権を担っている。近隣諸国とはカリブ共同体および東カリブ諸国機構を構成しており、特に東カリブ諸国とは共通の通貨を使用している。

主要産業は農業および観光となっているが、2004 年にハリケーン Ivan の来襲で農産物は大きな被害を受け、以来産業構造は観光とサービス業に変化してきている。このため物質的取引額を表わす総貿易額では輸入が輸出の約 10 倍となっている。なお、農産物の内ナツメグは世界第二位の生産量を誇っている。

上位の輸入品目には燃料があげられている。このうち約 50%は発電のために消費されている¹。

2-2 グレナダ国電力政策概要

グレナダ国では、国家エネルギー政策 - 低炭素型開発戦略（The National Energy Policy of Grenada – A low Carbon Development Strategy for Grenada, Carriacou and Petite Martinique, November 2011）を策定している。この国家政策は以下の原則に従って策定されている。

表 2-2 国家政策 策定の原則

• Energy Security • Energy Independence • Energy Efficiency • Energy Conservation	• Environmental Sustainability • Resource Exploitation • Energy Prices • Energy Equity and Solidarity
--	--

出典：The National Energy Policy of Grenada November 2011

策定された国家政策には、以下の 11 のゴールが示されている。

表 2-3 国家政策の 11 のゴール

Subject	Goal
1. Institutional Issues	Build and establish the adequate human capacity and institutional regime to guarantee the appropriate allocation and management of resources to achieve the energy policy goals.
2. Legal and Regulatory Framework	Establish an appropriate and enabling legal architecture on which the policy can rest and be implemented to achieve the Government's national development policy objectives and creating the climate to materialize the long-term vision of achieving a sustainable energy development.
3. Hydrocarbons	Exploit indigenous hydrocarbon resources in the most efficient way as part of a long-term transition version; using such resources as export commodities for revenue generation and allocate financial resources to the achieve National Energy Policy goals.
4. Renewable Energy	20% of all domestic energy usage (electricity & transport) will originate from renewable energy sources by 2020.
5. Energy Efficiency and Conservation	Reduce the national rate of energy consumption while increasing the economic growth (decoupling), by adopting best practices in energy efficiency and conservation.

¹ 出典：Energy Policy and Sector Analysis in the Caribbean 2010-2011, NREL US

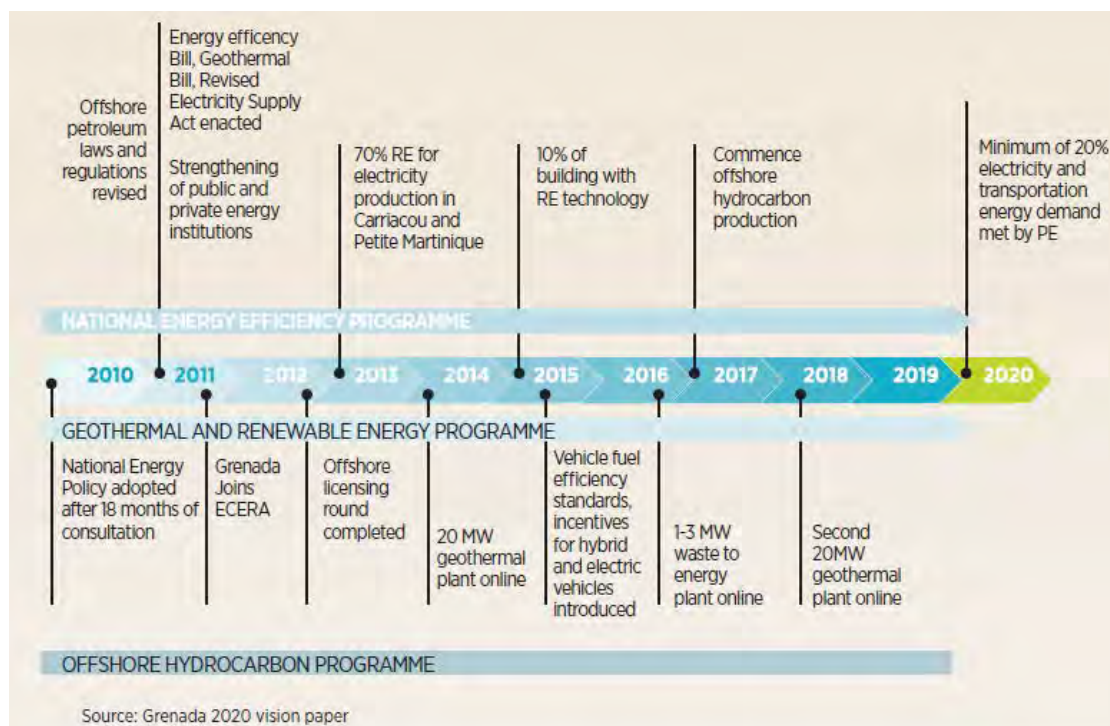
Subject	Goal
6. Power Sector	Transition to an efficient, low-carbon, national electricity generation and interconnection network that ensures safe, efficient, affordable and environmentally friendly energy services.
7. Transport Sector	Establish an affordable and reliable public transport sector and increased use of more efficient public and private vehicles and transport alternatives to reduce energy consumption.
8. Agricultural Sector	Facilitate the production and manufacturing of primary, value added agricultural and tertiary good and products in the most efficient and sustainable manner deemed viable under Genadian conditions.
9. Hotel and Commercial Sector	Ensure that the Hotel and Commercial sectors lead the national thrust for sustainable energy use., green procurement, and protection of natural resources from rapid consumption and depletion.
10. Manufacturing Sector	Encourage the manufacturing sector to incorporate and use energy efficiency and sustainable production methods in their operations.
11. Household Sector	Achieve a diversified supply of energy services, with lower energy intensity and carbon emissions that will result in lower prices for household and domestic purposes.

出典：The National Energy Policy of Grenada November 2011

上記の 11 のゴールのうち、特に地熱開発に関係のある項目は以下の通りである（表 2-3 の網掛けの項目）。

- 人的資源を適切に配置する組織制度の構築と能力向上
(1. Institutional Issues)
- 持続可能なエネルギー開発を可能にする法規規則の確立
(2. Legal and Regulatory Framework)
- 2020 までに家庭用エネルギーの 20%を再生可能エネルギーから供給する
(4. Renewable Energy)
- 経済成長を遂げつつエネルギー消費増加を抑制する省エネの実践
(5. Energy Efficiency and Conservation)
- 効率的で安全、廉価かつ環境親和型のエネルギーサービスを確実にする効率的で低炭素型の発電と相互接続網への移送
(6. Power Sector)

国家戦略（2011）での到達目標を図 2-1 に示す。

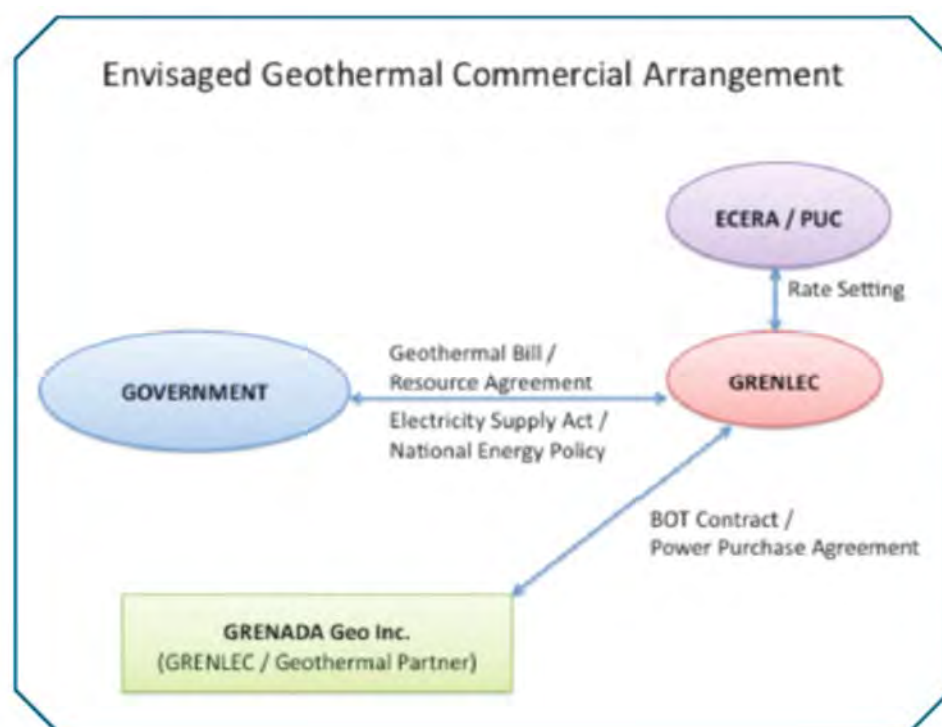


出典：GRENADA Renewables Readiness Assessment, 2012 IRENA

図 2-1 グレナダ国エネルギー開発戦略（2010 - 2020）

この戦略によれば、地熱発電は 2013 年までに 20MW の運転開始、2018 年までに追加の 20 MW の運転開始が計画されている。ただし、2016 年現在ではまだ実現されていない。

グレナダ国エネルギー開発国家政策には、地熱開発にかかる関係組織の関係も提案されている（図 2-2）。この図によれば、地熱開発は、GRENLEC と Geothermal Partner からなる GRENADA Geo Inc. によって行われて、建設後の一定期間は発電された電力は GRENLEC に売電され、その後、地熱発電施設は GRENLEC に移管されるという仕組みが想定されている。



ECERA: Eastern Caribbean Energy Regulatory Authority
PUC: Public Utility Commission

出典：The National Energy Policy of Grenada November 2011

図 2-2 想定される地熱開発のためのストラクチャー

IRENA（2012）の GRENADA Renewables Readiness Assessment には、次の様に述べられている。

地熱資源探査権及び地熱発電事業権は、直接 GRENLEC に付与されるのではなく、再生可能エネルギー特別目的会社（RESPV）に与えられるものとする。

An exclusive license to explore geothermal resources and to produce electricity from a geothermal resource will be granted to the geothermal RESPV (Renewable Energy Special Purpose Vehicle) and NOT directly to GRENLEC.

GRENLEC は、RESPV によって発電された電力を合理的な価格で購入しなければならない。購入価格は ECERA によって提案されるものとする。

GRENLEC must purchase electricity from the RESPVs at a reasonable rate to be determined by the proposed independent regulatory authority, ECERA (Eastern Caribbean Energy Regulatory Authority).

出典：The National Energy Policy of Grenada November 2011

2-3 電力セクターの現況

2-3-1 法制度

(1) 概要

グレナダ国では GRENLEC と呼ばれる民間会社が発電送電事業を独占している。GRENLEC は、1960 年 9 月 27 日に、コモンウェルス開発公社（CDC）とグレナダ政府の補助金で設立された有限会社に起源を発している、この有限会社は 1961 年の「電力供給条例（Electric Supply Ordinance）」によって、80 年間の発送配電の排他的ライセンスが与えられた。その後 1982 年にグレナダ政府は CDC 保有の株式を買い上げて単独債権者となったが、1994 年に構造改革の一環として政府保有の株式を 10%に減じ、50%を米国の企業に、他 50%を従業員やグレナダ国を含むカリブ諸国の投資家に売却した。また同年 1994 年に成立した新「電力供給法（1994）」によって排他的ライセンスの保有期限がさらに 80 年間延長され、2073 年 12 月 31 日までとなった。

これに対して、グレナダ政府は電力事業の多様化を目的として、現在新しい「電気供給法（2015）」を国会に提出しているところである。また地熱開発を進めるために政府は新しい「地熱開発法」を準備している。これらの法律は再生可能エネルギー開発促進のために多様な民間企業の参入を促進する目的で提案されているものである。さらに、政府は民間セクターによる開発のための法的根拠を整備するために、「民間連携パートナーシップ法」を制定する計画である。ただし、地熱開発法、PPP 法については現在本省にて検討中であるものの、制定に向けた具体的なスケジュールは示されていない。しかしながら試掘以降のフェーズにおいては、地熱利用にかかる権利、許認可が課題になってくることから法整備が急務となっている。

想定される地熱開発法の概要は次のように考えられる。(i) 地熱資源の所有権、地熱利用権（ライセンス）のスコープ、(ii)ライセンスにかかる許認可（発行者、プロセス、許認可期間など）、(iii)開発区域の設定方法、(iv)地熱利用にかかる権利・義務など。

(2) 公的ユーティリティ規制委員会法案 2015

グレナダ政府は 2015 年 9 月、公的ユーティリティ規制委員会法案（2015）を公表している。法案は「新電力法（1994）」を置き換えるものである。目的は、特に再生可能エネルギーにかかる投資を電力セクターに呼び込むことである。この法案は 2015 年に発表された電力供給法（後述）とともに電力セクター規制の基本となるものである。

規制委員会法案は電力セクターの規制緩和と電気料金制定の手順を規定している。また委員会は裁判所としての機能も有し、裁判所と同等の強制力を持つと規定されている。ただし、規制緩和と密接な関係にある民間企業のライセンスについては、電力供給法案（2015）にて取り扱われている。

電気料金の設定にあたっては、電気料金の公平性と電力会社の公正な利益の確保を実現・維持することと規定され、規制委員会の重要な役割となっている。この規制委員会がおこなう電気料金の制定については、適切な制度設計がなされている。

なお、委員会のメンバーは閣僚会議の助言を受けて Governor-General の任命で選定される。一般市民や消費者団体からの代表者も委員には含まれる。

(3) 電力供給法案 2015

グレナダ政府は「電力供給法案（2015）」を発表している。この法案は 1994 年の「電力供給法案（1994）」を置き換えるものである。本法案では、現在 GRENLEC 社が独占している電力セクター市場を、国内、国外の投資家を開くことが定められており、民間企業へのライセンス付与に関して規定されている。同時に、ライセンス付与に関する大臣の裁量権についても規定されている。これに比して、電気料金設定に関する大臣の裁量権に関する既述は少ない（電気料金については、公的ユーティリティ規制委員会法案に定められている）。この法案によれば、GRENLEC は現在のライセンスを継続するものの、排他的な経営権は解消されて、今後は電力供給法案のすべての条項に従うとされている。従い、この法案の実施によって、電力セクターに競争原理が働き、電気料金が低減されるものと期待されている。

なお、グリッドコードについては現在のところ特に示されていない。特に、民間投資に係る、ライセンス法案とともに規定する必要がある。また、電力セクター開発戦略は現在のところ示されていない。別途、定められる可能性がある。

2-3-2 組織体制

(1) 政策立案機関

エネルギーセクターを所管する国家機関は 1982 年に、財務・計画・経済開発・貿易・エネルギー・政策決定支援省（Ministry of Finance, Planning, Economic Development, Trade, Energy & Cooperatives）以下「財務省」に設立された、「エネルギーおよび持続可能開発局（Department of Energy & Sustainable Development）」である。エネルギーおよび持続可能開発局は、発電、送配電、石油価格、石油輸入などのエネルギー関連の情報を収集・分析して、エネルギー政策を立案することを主な役割としている。また、この任務の遂行に必要なカリブ域内ないしは地域内の諸機関あるいは国際機関との協力や連携も重要な役割となっている。

エネルギーおよび持続可能開発局の重要な役割は次の通りである（ウェブサイトから）。

- 適切で信頼性の高い経済的なエネルギーサービス提供を確実にすること。
- 再生可能エネルギーと代替省エネルギーを開発・促進させること。
- 経済活動のすべての分野において省エネルギーとエネルギーの効率化を進めること。
- モントリオールプロトコールに従い CFCs の使用を漸減させること。
- ESCO サービスを活性化し確立すること。
- すべてのセクターにおいてエネルギー供給とサービスを向上させること。
- 環境に優しい手法により石油試掘と開発を支援、強化、促進すること。

(2) 発電送電事業者

既述のように、グレナダ国では、GRENLEC が主要島嶼であるグレナダ島、カリコー島、プティ・マリティニク島における唯一の電気供給事業者である。その設立経緯や現況、課題は以下の通りである。

(3) 運営現況と課題

GRENLEC は発送配電の一貫した電力供給サービスを行い、グレナダ国人口の約 99.5%に当たる 40,000 以上の接続顧客に対してサービスを提供している。GRENLEC の株式保有者は、米国フロリダ・タンパに本社を置く WRB 社が普通株式の 50%、グレナダ政府と国家保険機構が合わせて 21%、従業員が 4.5%、残りの 24.5%がカリブ地域の約 1,600 の投資家が有する構成となっており、同社株式は、東カリブ株式市場の上場企業である。電気料金は、GRENLEC によって決められており現行法規では政府は関与できない仕組みとなっている。

このような背景から、GRENLEC は基本的に自己規制の方法で営業を行っている。これに対して、高い電気料金と発電資源の多様化の不足が、独占による弊害と指摘されている。

(4) 政府の方針

グレナダ国政府では、規制機能を東カリブエネルギー規制機関 (Eastern Caribbean Energy Regulatory Authority: ECERA)に移管することを検討中である。ECERA は東カリブ諸国に共通する電力課題に対応するために 2009 年に設立されたものである。主要課題は、高い電力料金と発電資源の多様化である。

また、既述のとおり、2015 年に政府は規制委員会を設立し、電力セクターのモニタリングと規制を実施する方針である。財務大臣は継続して政策形成を担当し、首相へのアドバイザーとしての職責にある。

同時に、グレナダ政府では電力セクターへの民間投資を促進して競争原理を導入することによって発送配電の効率を向上させるために必要な法制度を導入しつつある。さらに、政府は 2030 年までにグレナダ国の電力供給をすべて再生可能エネルギーにて行う目標を設定し、次のようなイニシアティブを検討している。

- GRENLEC を含む企業・専門家により、100 の再生可能エネルギー開発事例を実施する。
- 国際再生可能エネルギー機関により、政策、規制、インフラ、財務などの点で再生可能実施準備評価を行う。
- 地球持続可能エネルギーアイランドイニシアティブ (ビジョン 20/30) を通じて関係諸国とのパートナーシップを構築する。

(5) 地熱開発の現況

グレナダ国の地熱資源調査は、Arclus (1976 年) や Geotermica Italiana (1981 年)、あるいは Hutterer and Michels (1995 年) になされているが、具体的な開発に向けての動きはなされていない。

ない。これに対して、2015年にニュージーランドの支援によって、物理探査を含む地表調査による資源量調査が実施されている。地質地化学調査、物理探査からなり、物理探査（MT探査）では、3D解析が実施されている。技術的レビューは後述する。

2-3-3 設備の現況と課題

(1) 現況

グレナダ国における発電は、殆どがディーゼル発電所によるものであり、全て GRENLEC が保有・運転している。詳細は以下の通りである。なお、セントジョージズ大学には予備電源として 2.8MW の発電設備がある。

表 2-4 グレナダにおける発電容量

場所	発電容量 (kW)
Queens Park	45,890
St. George's University	2,800
Carriacou	3,200
Petit Martinique	480
合計	52,370

出典: GRENLEC

ディーゼル発電に加えて、島内には約 0.1MW の太陽光発電がある（ピーク需要の約 0.3%）。グリッドに接続した太陽光発電システム専門の発電会社（GRENSOL）が運営をしている。

発電された電気は、7系統の送電線（33kV）にて島内に送電される。電圧は商業向けには 400V、家庭用には 230V に降圧され、最終需要家に配電される。流通ネットワークとしては、11kV の配電線（総延長約 220 マイル）が敷設されている。

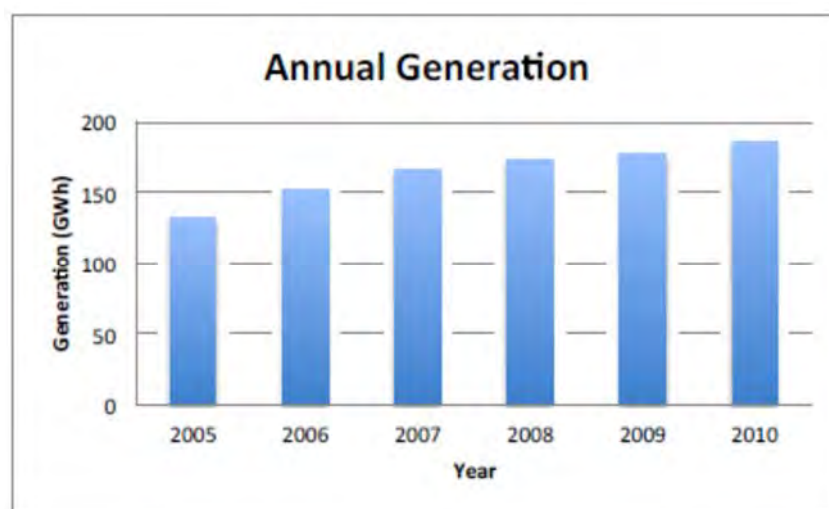
(2) 課題

グレナダ国を含むカリブ島嶼国では、電源の多様化と送配電の効率化／安定化が主要な課題となっている。このため、輸入化石燃料への依存からの脱皮は喫緊の課題である他、熱帯低気圧は送配電設備に対して大きな脅威となっている。このため、政府では、特に地熱、風力、太陽光などの再生可能エネルギーの開発を大きな国家開発目標の一つとしている。

2-3-4 電力需給現況と予測

(1) 供給

GRENLEC は、約 52,400 kW の発電設備を所有している。また小規模分散電源として約 380kW（太陽光 300 kW、風力 80 kW）がある。いくつかの商業、家庭用需要家が小規模ディーゼル発電を所有しているが、これらは非常用予備電源の位置付けである。年間発電量を以下にまとめる。



出典: GRENLEC (2011)

図 2-3 年間発電量

GRENLEC は 2020 年までに、総発電容量のうち 20%を再生可能エネルギーで供給することを計画している。このため、積極的な再生可能エネルギーのイニシアティブ推進とクリーンエネルギー技術の導入を図っている。GRENLEC の再生可能エネルギー戦略計画と政府の国家エネルギー政策は、共通のクリーンエネルギー開発達成に向け、密接に関連付けられている。基本的な目的は、エネルギーコストを安定させ最終的には低減させること、輸入燃料への依存度を低減させること、経済開発を支援すること、再生可能エネルギー利用の拡大によって環境保全を進めることなどである。

(2) 需要

GRENLEC の 2010 年におけるピーク需要は 30.8MW であった。この需要は GRENLEC の現有の発電設備によって充足されている。売電は、41,222 の顧客に対して 185.79GWh であり、需要は基本ケースで年率 4%の増加が見込まれている。

グレナダ国における電力需要は主に商業セクターによるもので、全体の 57%を占めている。次いで家庭需要であり全体の 38%となっている。産業用は 3%、街灯は 2%程度となっている。

(3) 電力料金の現況と課題

グレナダにおける電気料金を次にまとめる。

表 2-5 電気料金 (2015, EC\$)

項目	家庭用	商業用	工業用	街灯用
適用	非商用住居	非居住家屋あるいは業務用家屋	工業用あるいは通常午後6時から10 時の間に非使用の5馬力以上の電動モーター	中央政府、地方政府の街灯ないし街灯申請の民間
付加価値税	99 消費単位超過毎に非燃料課金の15%	非燃料課金の15%	非燃料課金の15%	非燃料課金の15%
環境課税	99 kWh 未満: \$0 99 – 149 kWh: \$5.0 150kWh 以上: \$10.0	非適用	非適用	非適用
燃料費 (2015 年 6 月 8 日発行)	\$0.3908 / kWh or unit (月ごと)	\$0.3908 / kWh or unit (月ごと)	\$0.3908 / kWh or unit (月ごと)	\$0.3908 / kWh or unit (月ごと)
非燃料費	\$0.4155 / kWh or unit 下限金- \$4.00	\$0.4480 / kWh or unit	\$0.3284 / kWh or unit	\$0.3931/kWh or unit
床面積課金 (50 sq.ft 毎)	非適用	\$0.02/月	非適用	非適用
馬力課金	非適用	非適用	\$0.02/馬力 下限金: \$10.00	非適用

出典: GRENLEC (2015)

燃料価格が最も高騰した 2008 年には、電気料金が 0.81 EC\$ (US\$ 0.30/kWh)を超える水準まで上昇した。この料金は世界でも最も高い水準に属する。電気料金の高騰は、商業や産業に与える負の影響は大きい。従って、電気供給サービス料金を引き下げ、合理的で効率性の高い市場を確保することは極めて重要である。

2-3-5 ドナー、国際機関、民間の活動

(1) CDB/IDB

東カリブ諸国で地熱開発と維持可能エネルギー開発事業を進めるために、IDB と CDB は Sustainable Energy Facility (SEF)に合意している (2015 年)。SEF は、東カリブ 6 カ国を対象に、再生可能エネルギー開発資金源となるものであり、地熱開発、エネルギー効率向上及び組織制度の能力向上を含む事業を対象としている。この合意は、71.5 百万米ドルの借款と無償パッケージからなっている。SEF は CDB が進める GeoSMART Facility の資金源となるものである。GeoSMART Facility は、地熱開発に伴う種々のリスクに対応する目的の資金支援となるものである。

グレナダにおいてはまだ地熱プロジェクトは具体的な案件として成立していないことから、CDB/IDB の活動は情報提供、アドバイスの段階となっている。現時点では政府が JICA、NZ の支援にて実施中の調査の技術内容をレビューしながら、今後の試掘フェーズに向けて検討を行っているところである。2016 年 6 月に実施された政府主催のワークショップでは、

政府からドナー側に試掘にかかる無償資金供与の依頼があった。これに対して CDB は現在他国で実施・検討を行っている Contingent Grant などの支援プログラムを紹介するにとどまっている。

(2) CDB/DFID、EU/CIF

DFID は、CDB が進める Sustainable Energy for the Eastern Caribbean (SEEC) Programme を支援するため、2.5 百万 UK ポンドを支援している (2015)。SEEC は、再生可能エネルギーと省エネルギー向上のために、DFID の他に European Union-Caribbean Investment Facility (EU-CIF)からの無償資金で運用されるプログラムである。ただし、DFID が SVG 国で掘削を支援している資金プログラムとは異なる。

DFID は 2016 年 6 月に実施された政府主催のワークショップに出席し、グレナダ政府の要望を聞くにとどまっている。

(3) ニュージーランド政府

ニュージーランド政府はセントルシアに地熱専門家を派遣しており、カリブ諸国への技術協力を行っている。コンサルティング会社 (Jacobs) はグレナダにおける地熱開発の技術調査を実施しており、SVG 国にも政府支援のため訪問している。

(4) 世界銀行

世銀は“Regional Disaster Vulnerability Reduction Project”によって災害対策への融資を行った。プロジェクトは、河川管理や交通インフラ、公共建築のリハビリを含む緊急改修や再建活動を支援するものである。

(5) 米州機構(OAS)

米州機構(OAS) は、グレナダ国を含む加盟国に対して、カリブ持続可能エネルギープログラムという技術支援を実施している。プロジェクトはカリブ地域 7 カ国におけるクリーンで持続可能なエネルギー利用を加速させることを目的としている。またプロジェクトは再生可能エネルギー利用および省エネルギー促進の障害を少なくすることによって、開発を進めるための市場環境改善に対応している。特に、エネルギーセクターにおけるガバナンスやプロジェクト国におけるマネジメントの改善に注力している。主なアクションには次のようなものが挙げられる。(a) 持続可能なエネルギー計画の採用を通じた、国家的な持続可能なエネルギー目標の確立、および (b) 特定の障害や課題に対応する活動への支援。

また、OAS はグレナダ政府に対し、国内の地熱開発のための法的枠組みを確立するため、Heads of Terms (HOT) を草稿・交渉することについて支援を行った。これらには、次のような活動が含まれる。すなわち、

- (i) 政府と GRENLEC への事前コンサルテーションを通じて、将来の地熱資源開発に取り込むべき重要事項を指摘すること。
- (ii) 事前コンサルテーションの結果をベースに HOT をドラフトすること。

- (iii) まず、政府が HOT に関して GRENLEC との交渉を支援し、HOT の協議、最終化を図る。また両者が合意した重要商業事項に関し、最終 HOT を取りまとめる。
- (iv) 必要なフォローアップ支援を行う。例えば、地熱開発法案ドラフトや環境規制に関し、追加法律条項を提言すること、地熱資源開発合意書をまとめるにあたり、次のステップなどのロードマップを提供することなどである。

(6) 国際連合工業開発機関 (UNIDO)

UNIDO は、OAS と協同で、グレナダ公共サービス組合に対して太陽熱温水ヒーターのローン向けに US\$ 65,000 を提供した。プログラムには、融資選択肢について需要家に情報提供を行うコンポーネントも含まれている。組合の従業員は太陽熱温水ヒーターのローンを管理するための教育も受けている。プログラムの目標は、太陽熱温水ヒーターの融資を行うことによって、国民の啓蒙や組織能力の向上を図ることに資することである。

(7) 地球環境ファシリティ (GEF)

GEF は、他の 6 つの金融機関とともに、カリブのビルにおける持続可能な開発プログラムを実施した。これは 2012 年 11 月から始まる 48 ヶ月のプログラムであり、地球温暖化ガスの排出を 20%低減する技術を提示し、市場にその技術を普及するための政策やプログラムを実施するものである。

(8) 中国政府

中国政府は気候変動適用パイロットプログラムを通じて省エネルギーにかかる支援を行っている。この 2012 年から 2017 年までの技術移転プログラムは、公的セクターの機関に対して、中国から提供される資機材や技術支援などのための資金援助を行っている。返済は輸入燃料の低減にリンクして決められる。

(9) ドイツ国際協力協会(GIZ)

GIZ は現在、技術支援プロジェクト (Reform of the Electricity Sector to support Climate Policy in Grenada (G-RESCP)) を実施中である。このプロジェクトでは、再生可能エネルギーの利用と省エネルギーの促進に対しての投資を促進させることを目的とし、これによりグレナダ政府の気候変動対策の政策目標の達成を支援しようとするものである。

プロジェクトの 4 つの重要な項目は次の通りである。

- (i) 電気供給法と公共ユーティリティ委員会法の改定実施にかかり政府の支援を行う。これにはセクター運営のための規制モデル、競争モデル、グリッド接続ルール、再生可能エネルギー利用促進のための手順策定等への支援などが含まれる。新法案は世銀の資金による地域 ECERA プロジェクトによってドラフトされているものの、これに加え、G-RESCP ではこの法案の実施を確実にするための支援を行う。
- (ii) GRENLEC と政府との間の対話を確立し、法的枠組みの改訂を協力的に進める支援を行う。共通の利害事項の指摘や、新規制や新組織への転換に必要な支援などが含まれる。

- (iii) 再生可能エネルギー利用促進と省エネルギー促進に必要な手順や課題の抽出、必要な方策の提示およびロードマップの作成のための支援を行う。これらには、グリッドの安定化やネット・メーターリング促進に必要な支援、また再生可能エネルギーの技術基準の提案などが含まれる。
- (iv) 再生可能エネルギー利用促進と省エネルギー促進にかかる情報や知見などを交換するためのプラットフォームを構築する。これは GRENLEC、政府、民間セクターおよび投資家などが参加できるものとする。また CDB と連携した、投資資金を呼び込むための新しい財務モデルの提案が含まれる。

第3章 自然条件調査

3-1 調査概要

3-1-1 調査の目的

グレナダ国における地熱発電のポテンシャルを評価するにあたり、開発有望地域の自然条件調査を実施した。地熱資源量の評価にあたっては、地質・地化学・物理探査を含む既存地表調査結果のレビューを行い、地熱系を明らかにするために必要な追加現地調査を行った。

また、今後の掘削調査における掘削基地の造成、取水、アクセスを含む掘削計画策定のための現地調査を実施した。

3-1-2 調査内容

本調査で実施した地熱資源量評価のための調査は以下の通りである。

- ✓ 既存調査結果のレビュー
 - 地形、地質、断裂、地熱徴候
 - 地化学
 - 物理探査（MT 探査）
- ✓ 現地調査
 - 地表地質調査（踏査、岩石薄片、X 線回析）
 - 地化学調査（温泉水化学分析）
 - 重力探査

掘削計画にかかる土木関連調査は以下の内容を実施した。

- ✓ 掘削候補地の検討
 - 掘削基地
 - 掘削用水
 - 自然保護地区
- ✓ アクセス道路の検討

3-2 既存調査結果のレビュー

グレナダ国を対象とした主な既存地表調査資料を表 3-1 に示す。本節では、これらの調査結果のレビューを地形地質調査、地化学調査、物理探査のそれぞれについて行い、調査内容の妥当性や追加調査が必要な項目等を検討した。

表 3-1 既存調査資料一覧

調査内容	資料名
全般	Geotermica Italiana S.r.l. (1981) Reconnaissance study of the geothermal resources of the Republic of Grenada: Final Report to Latin American Energy Organization
	Jacobs (2015) Grenada Geothermal Surface Exploration, Integrated Report: Geology, Geochemistry and Geophysics
地質	Arculus (1976) Geology and Geochemistry of the alkali basalt – andesite association of Grenada, Lesser Antilles island arc. Geological Society of America Bulletin
	Huttrer and Michels (1995) Potential for Geothermal Development in Grenada, West Indies. Proceedings of the 1995 World Geothermal Congress, Florence, Italy
地化学	Huttrer and Michels (1993) Final Report Regarding Prefeasibility Studies of the Potential for Geothermal Development in Grenada, W.I.: Prepared under Geothermal MgMt Co., Inc, Frisco, Colo., Submitted to National Geothermal Association

出典：JICA調査団

3-2-1 地形地質調査レビュー

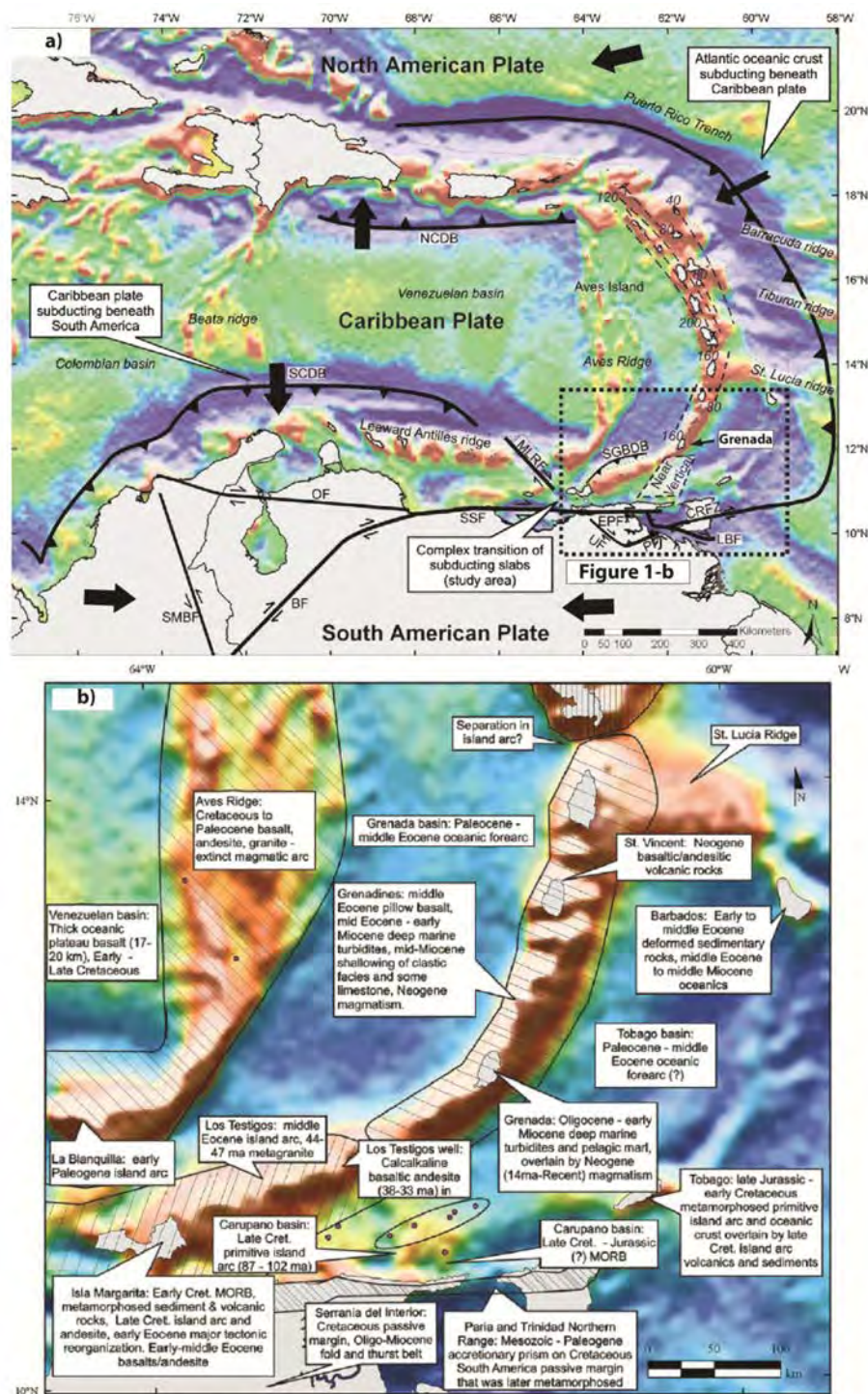
グレナダ国の地質については、Arculus (1976)、Geotermica Italiana (1981)、Huttrer and Michels (1995)、Jacobs (2015)で調査されている。特に Jacobs (2015)は、上述した調査結果を総括するとともに、約 2 週間の現地調査を通して地熱開発の視点を踏まえた地形地質調査を実施している。ここでは主に Jacobs (2015)の成果を中心に、地質に関するこれまでの調査結果をとりまとめる。

(1) 地形

グレナダ島は中米の小アンティル諸島の南側に位置する火山島（～344km²）である。小アンティル諸島はカリブ海プレート（図 3-1(a)）の東縁部にあり、この地域では北東ないし東側から北アメリカプレートが沈みこんでいる（図 3-1(a)）。カリブ海プレートは北アメリカプレートおよび南アメリカプレートに対して相対的に東側に移動しており、小アンティル諸島付近では数枚のマイクロプレートに分かれて地下の岩石は複雑に変形を受けている（図 3-1(b)）。グレナダ島では中新統の地質を覆って Saint Catherine 火山を含む複数の火山からの火山噴出物が分布している（図 3-2）。小アンティル諸島には少なくとも 5600 万年前より火山フロントが形成されており、グレナダ島から St. Lucia にかけては約 1 万年前以降に火山フロントが形成されたと考えられている（図 3-2）。

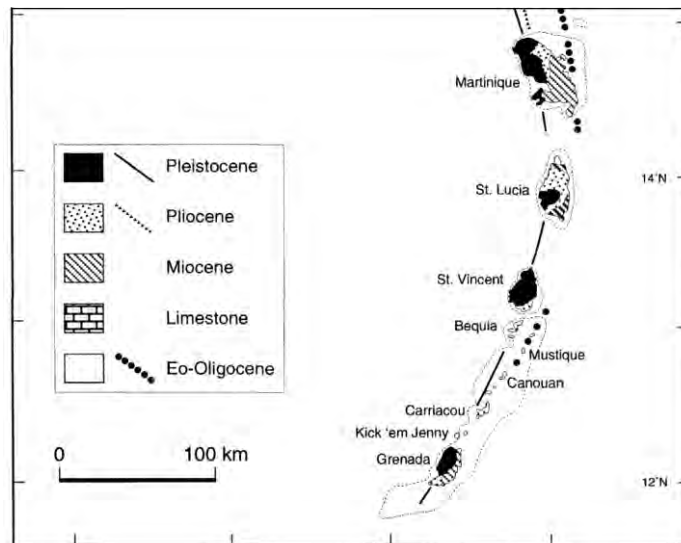
(2) 地質

グレナダ島の地質は下位より後期始新世～前期漸新世の Tufton Hall 層、中新世～更新世の火山噴出物、更新世～完新世の火山噴出物からなる（図 3-3）。グレナダの火山噴出物は前期中新世（21Ma）～完新世（0.9Ma）にかけてグレナダ島内の主に 5 箇所（図 3-3）で噴出しており、最も若い火山はグレナダ島北部にある Saint Catherine 火山である。Saint Catherine 火山は歴史時代に噴出した記録はないが、今から 1000 年以内に形成されたとみられる集落を火山噴出物が覆っているのが報告されている（Global volcanic program, 2015）。



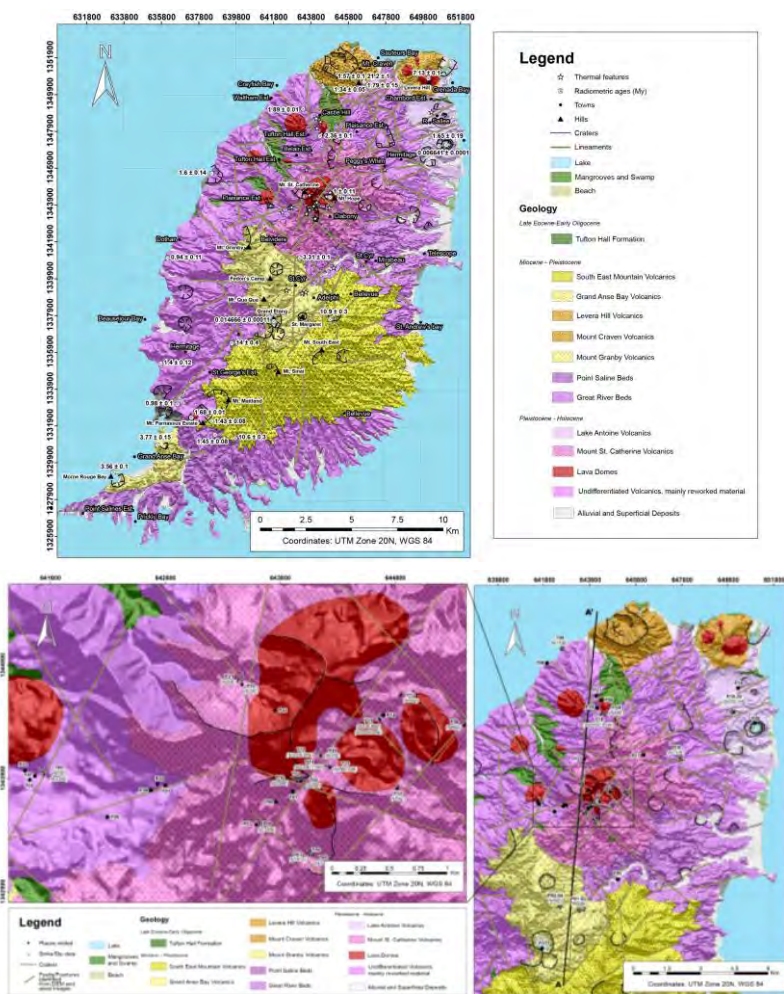
出典 : Jacobs (2015)

図 3-1 グレナダ島および小アンティル諸島周辺のプレート分布



出典：Jacobs (2015)

図 3-2 グレナダ島および小アンティル諸島周辺における火山フロントの変遷

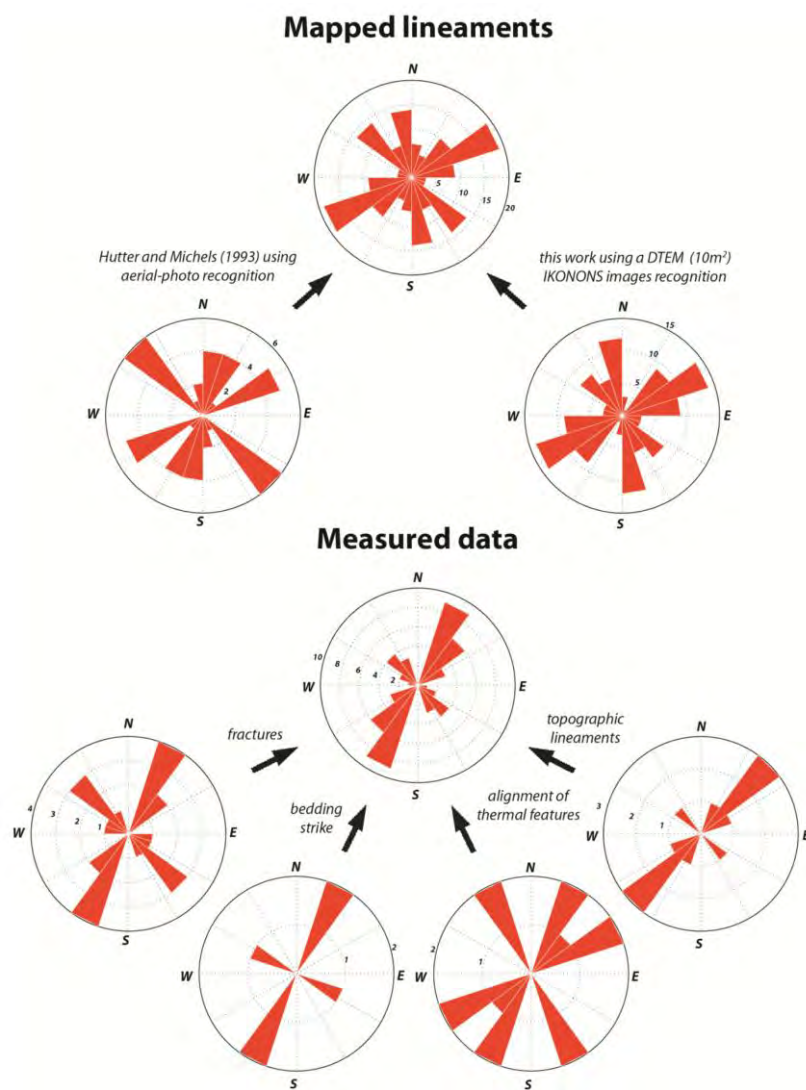


出典：Jacobs (2015)

図 3-3 グレナダ島の地質図

(3) 断裂

本地域では地形解析によるリニアメント、地表踏査で確認した地熱徴候分布、褶曲軸、地層の走向が概ね北東-南西方向に卓越している。

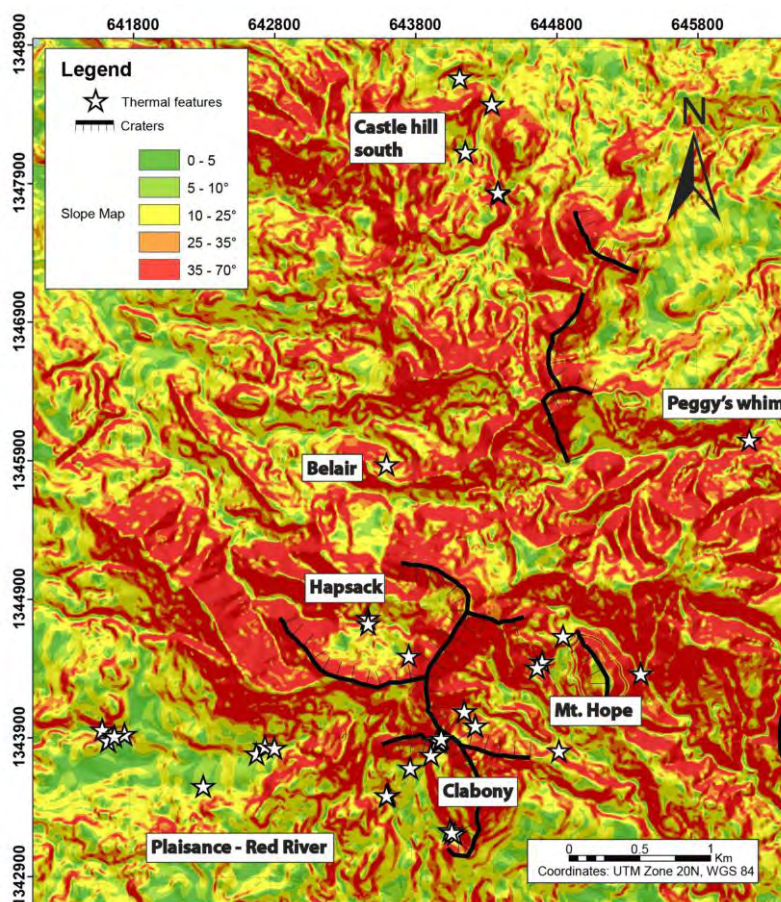


出典：Jacobs (2015)

図 3-4 グレナダ島北部の断裂系解析（上：地形解析、下：地表調査）

(4) 地熱徴候

グレナダ国の地熱徴候は Saint Catherine 火山周辺 (Hapsack、Clabony) およびその北部 (Castle Hill、Pegi's Whim) に集中している（図 3-5）。



出典:傾斜区分図 (Jacobs 2015)

火山位置図: Global volcanism program(2015) <http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=360170>

図 3-5 グレナダ島の地熱徴候位置図

Jacobs (2015) はグレナダ島北部について詳細な地質層序、地質構造、地形解析および断裂系調査を実施し、地熱徴候が密集しているグレナダ島北部の地質層序、断裂系 (NE-SW 系が卓越) の特徴を明らかにした。また、グレナダ島北部の基盤岩 (Tufton hill rock) については調査地域北部の海岸沿いの露頭から採取した岩石についてスメクタイトが含まれていることを明らかにし、グレナダ島北部の深部では Tufton hill rock に元々含まれている碎屑性の粘土鉱物と地熱活動により生じた粘土鉱物が混在することで地熱貯留層に伴う比抵抗分布が不明瞭になる可能性、具体的には地熱活動で生じた粘土化変質帯の拡がりを実際よりも広く見積もってしまう可能性があることを指摘している。この見解は調査団も同意するところである。

一方、Jacobs (2015) では地熱徴候地に伴う岩石の変質分布、鉱物分布が調査されていない。Jacobs (2015) が実施した MT 法による比抵抗分布では Saint Catherine 火山西脇の Hapsack とその周辺にある別の地熱徴候地 (Peggy's Castle hills) で比抵抗に差があることが判明しており、それぞれの地熱徴候地における変質岩を分析して変質鉱物の種類を特定することで、比抵抗分布の解析の一助とした。

3-2-2 地化学調査レビュー

(1) 調査内容の概略

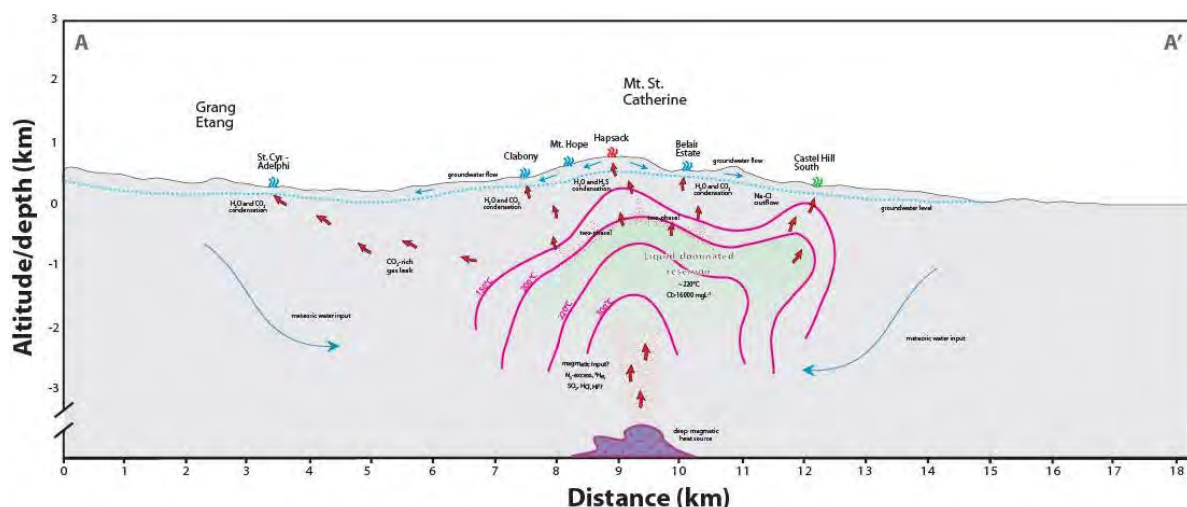
Jacobs (2015) 調査では、水・ガス試料の採取、試料の化学分析、および得られたデータの地化学的解釈を行い、地熱発電に利用可能な高温の地熱系の存在について検討がなされている。地化学的解釈においては、Geotermica Italiana (1981) および Hutterer and Michels (1993) からの既存データを適切に引用している。このことから、Jacobs (2015)の地化学調査の章は、地化学手法による総括的な地熱資源についての調査結果と捉えることができる。

Jacobs (2015)は次の 10 地域で調査を行った。

Castle Hill South, Chambord, Belair Estate, Peggy's Whim, Hermitage, Hapsack, Mount Hope, Clabony, Plaisance Estate, Adelphi-Saint Cyr

地化学的解釈のうち最も重要な結論は、「グレナダの地熱徴候の全体の印象として、Saint Catherine 火山を中心としたマグマ活動による熟成した地熱系が存在する」というものである。貯留層温度としては、地化学温度計を基にして、浅部で 200–220°C、深部で 290°C 未満が推定されている。また、Jacobs (2015)は気泡を産する温泉(bubbling pool: 以後、含気泡温泉)の分布から、地熱資源が賦存する範囲として 8 km²の面積を試算している。地熱徴候の地球化学的特徴は図 3-6 の地熱系概念モデルに反映されており、このモデルは安山岩質火山に胚胎する典型的な高温の地熱系のものとなっている。それらの地球化学的特徴は以下のようにまとめられる。

- ・ 温泉水のタイプと分布から解釈される地熱流体の上昇域と側方流動域
- ・ 含気泡温泉のガスに見られるマグマ性ガスの寄与
- ・ 地化学温度計に基づく高温条件での水-岩石反応
- ・ 安定同位体比から解釈される天水による地熱流体の涵養
- ・ 含気泡温泉のガスの分析値に基づく、火山環境ではなく、熱水対流系に相当する酸化還元状態
- ・ 貯留層底部へのマグマ性ガス(HCl, SO₂等)の付加がある場合での、マグマ性ガスのスクラビング(中和)過程の可能性



出典: Jacobs (2015)

図 3-6 Jacobs (2015)によるグレナダの地熱系概念モデル

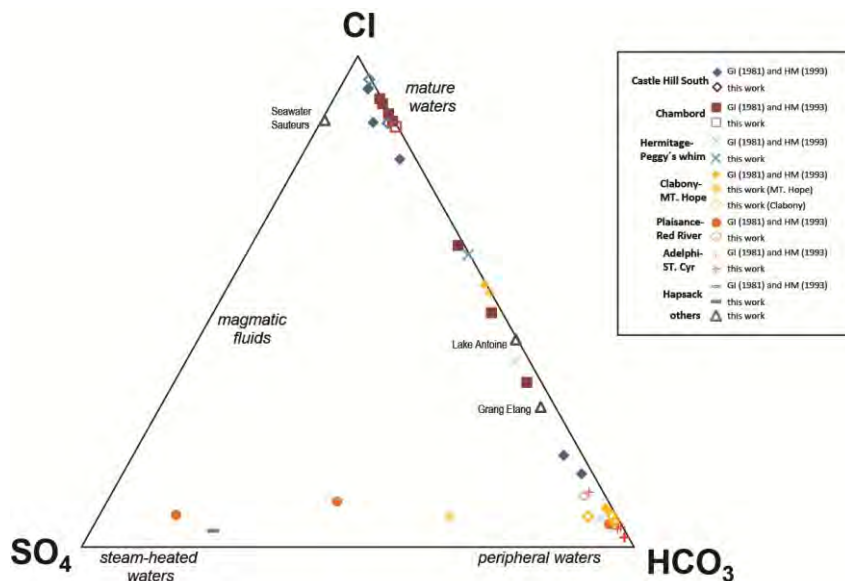
これらのうち、特に重要な点について以下に詳細を述べる。

【温泉水の起源】

温泉水の起源を解釈する最も基本的な手法は、温泉水の起源を反映する化学タイプへの分類である。図 3-7 は主要な陰イオンである Cl、SO₄ および HCO₃ の濃度比を示したもので、この三成分系を用いて温泉水を分類する。

この図は、pH と陽イオンの情報を加味して、グレナダの温泉水を三つのタイプに分類する。すなわち、硫酸酸性型温泉、中性から弱アルカリ性の食塩(Na-Cl)型温泉および重炭酸型温泉の三つである。これら三つのタイプの温泉の湧出は、安山岩質火山地域の高温地熱系において共通して認められるものである。硫酸酸性型温泉は地熱系の上昇域に相当する条件を反映する。これは、安山岩質火山地域の高温地熱系においては、地熱蒸気が硫化水素を含み、この蒸気が地下水と混合し凝縮することで、硫化水素から硫酸が生じ、硫酸酸性型温泉が生成するためである。このタイプの温泉は、Hapsack と Plaisance-Red River 地域に認められる(図 3-7)。

また、食塩型温泉は高エンタルピーの熱水卓越型地熱貯留層の最もよい指標といわれる。なぜなら、こういったタイプの温泉水は世界中の高温熱水卓越型地熱貯留層に認められるためである。Castle Hill South、Chambord および Peggy's Whim にはこの食塩型温泉が認められる。Saint Catherine 火山(地熱流体上昇域と仮定される)からの距離(3–8 km)と、シリカ地化学温度計および K-Mg 地化学温度計が Na-K 地化学温度計よりも低い値を示すことから、これらの食塩型温泉は地下深部を循環する地熱流体の側方流動の結果と捉えられる。この食塩型温泉は上昇域から長い距離を流動するものと見込まれる。硫酸酸性型温泉の周辺でより標高の低い範囲には重炭酸型の含気泡温泉が湧出する。この温泉の高い重炭酸濃度は地熱系の縁辺域に認められることが多く、二酸化炭素に富む蒸気が地下水に吸収されることで生じると考えられる。

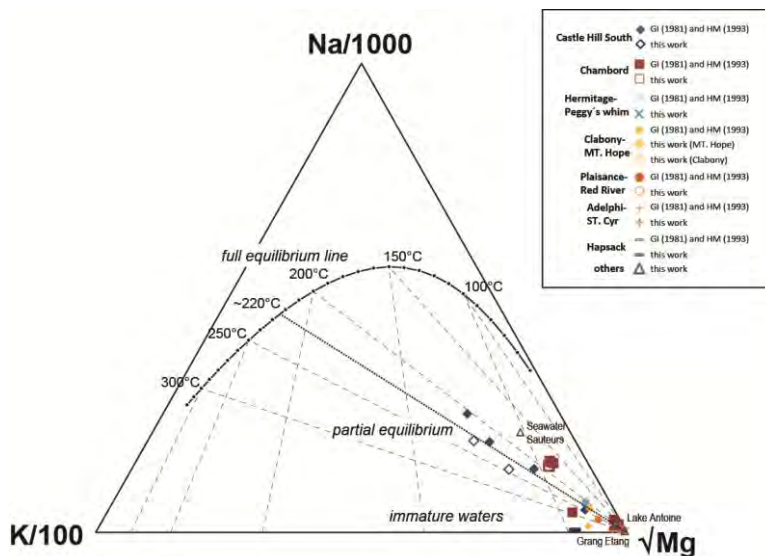


出典: Jacobs (2015)

図 3-7 温泉の Cl-SO₄-HCO₃ 三成分系

【温泉水の平衡状態、水岩石反応熟成度】

温泉水の平衡状態、もしくは水岩石反応の熟成度を検討するために、Na、K および Mg の濃度比を三成分系図にプロットした。図 3-8 が示す様に、グレナダの温泉の中に貯留岩と完全に平衡にあるものは認められない。しかし、Castle Hill South と Chambord の食塩型温泉には部分的な平衡を示すものがある。また、これらは図の中で一つの直線に沿う傾向を示す。Jacobs (2015)はこの傾向を未成熟(immature)な水(重炭酸型温泉、硫酸酸性型温泉に相当する)が温度約 220℃の平衡に達した (熟成した) 熱水への遷移と解釈している。

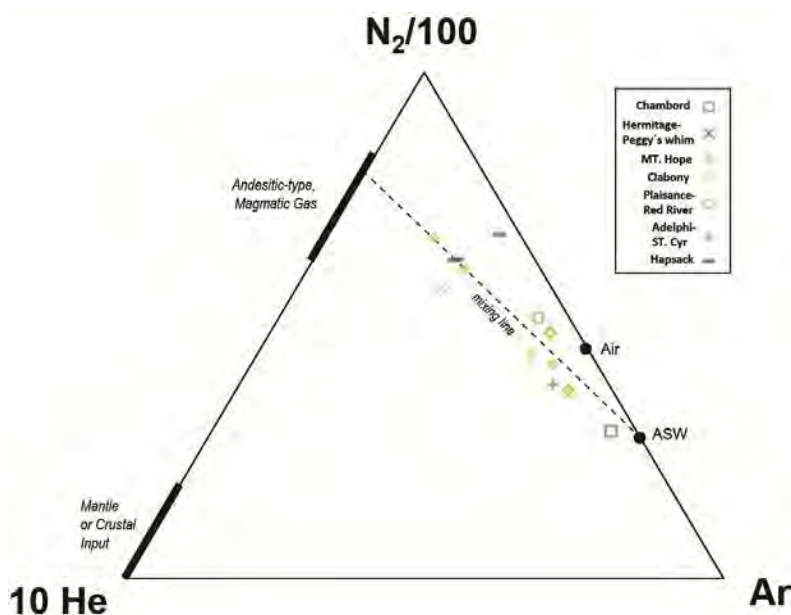


出典: Jacobs (2015)

図 3-8 温泉の Na-K-Mg 三成分系

【ガス分析】

Jacobs (2015)は含気泡温泉(バブリングプール)が産する気泡中のガスについても検討を行っている。図 3-9 はこのガスの化学成分のうち、He、Ar および N_2 の濃度比を示したものである。図よりマグマ性ガスの寄与が明らかであり、この事実から安山岩質火山分布域の高温の地熱系に相当する状態が推測できる。



出典: Jacobs (2015)

図 3-9 ガスの He-Ar- N_2 三成分系

(2) 調査団見解

以上のように、Jacobs (2015)は合理的にまた科学的に、グレナダの地熱徴候が高温の熱水卓越型地熱系の徴候に相当することを説明していると考えられる。しかしながら、ここで高温地熱系の特徴に完全には沿わない事例をまとめておくことは価値のあることと思われる。

そのような特徴の一つとして、食塩型温泉に顕著な濃度で Mg が含まれることが挙げられる。通常、典型的な高温の地熱流体には Mg はごく低濃度でしか含まれない。これは Mg を含む鉱物(Mg 炭酸塩、Mg 珪酸塩)の溶解度が高温ほど低くなることが理由である。Jacobs (2015)はこの高い Mg 濃度の理由として、基盤岩でありかつ貯留層と思われる Tufton Hall 層に含まれる Mg に富む鉱物と水とが反応する過程を想定している。しかしながら、この過程は高温下における水-岩石反応のメカニズムに反すると思われる。これは先に述べたように、Mg 鉱物の溶解度が高温ほど小さいことが理由である。

この他、高温地熱系の特徴に沿わないグレナダの地熱徴候の特徴として、噴気や沸騰泉の欠如が挙げられる。これらの活動的で沸騰を伴う地熱徴候は高エンタルピーの地熱系では高頻度で認められるものである。これらの地熱徴候の欠如について、Jacobs (2015)は非常によく発達したキャップロック構造もしくは上昇する蒸気を急冷させる大規模な地下水流動を想定している。これらの条件に加え、上昇する地熱流体の流束(フラックス)自体が小さいこ

とも同様に考えられる。この小さな流束は熱源が小さいことに起因し、この場合、上昇する地熱流体は周辺岩石への熱の散逸もしくは地下水流動によって容易に冷却されてしまう。その結果、沸騰を伴うような活発な地熱活動は地表では見られない。

これらの特徴（高い Mg 濃度および噴気、沸騰線の欠如）は高温地熱系のそれとは異なり、従って地熱系概念モデルを構築する際に非常に重要な条件となる。現在まで地表調査で得られたデータからは、グレナダで沸騰を伴う活発な地表の地熱活動が見られない疑問に対する答えは得られない。その答えはテスト井掘削とそれに付随する検層/噴気試験によって明らかになると考えられる。これは、この掘削によって地下の実際の物理的、地化学的条件が明らかになるからである。こういった理由から、本プロジェクトの次の段階として、グレナダの地熱系に対する現段階の理解を検証しまた改善するために、テスト井掘削を検討する意義は大きいと考える。

3-2-3 物理探査のレビュー

(1) 調査内容の概略

グレナダ島では地下の比抵抗構造を解明するために、Jacobs(2015)において MT 探査が実施されている。調査内容は下表の通りである。

表 3-2 Jacobs (2015)における MT 探査概要

目的	地下の比抵抗構造を把握することにより地熱貯留層構造に係わる地質・地質構造を推定する
調査手法	リモートリファレンス方式 MT 探査
調査地域	Saint Catherine 火山および周辺地域
調査期間	2015 年 3 月～4 月
測定点数	59 点、リモートリファレンス点は調査地域から 5km 程離れたグレナダ島南東部 (Crochu 近郊)に設置
使用機器	Metronix Geophysics ADU-07e System
取得データ	・磁場 3 成分(Hx, Hy, Hz)、電場 2 成分(Ex, Ey)の時系列データ ・測定周波数範囲：10000 Hz～0.001 Hz ・測定時間：各観測点で夜間を含む 8～15 時間、最大 2 日間
データ処理 ・解析内容	・インバリエントモードの MT データを用いた 1D インバージョンおよび 3D インバージョン解析を実施 ・スタティックシフトの問題については細かい 3D グリッドモデルを用いることにより対応 ・1D および 3D インバージョンの解析結果から調査地域全体の比抵抗構造を求め、地熱貯留層構造を構成する地形・地質構造を推定

出典：JICA調査団

(2) 調査結果要約

実施された MT 探査について、図 3-10 に測点位置図、図 3-11 にキャップロック下面標高平面図、図 3-12 に代表的な比抵抗構造断面図を示す。

【取得データについて】

MT 法データについては多くの測点において高周波数域から低周波数域 (10000～0.01 Hz) まで、良好な品質のデータが取得されている。

【解析方法】

取得データの構造指標は、高周波数域 (10～0.1Hz) では 1 次元性を示し、中間から低周波数域 (0.1Hz 以下) では 2、3 次元性を示している。解析は、インバリエントモードの MT データを用いた 1D インバージョン解析、および極浅部の不均質構造に起因するスタティックシフトに対応するために、細かいグリッドを用いた 3D インバージョン解析が実施されている。地形データとして SRTMDEM データを使用し、等高線間隔を 20m としている。その結果、1D 解析および 3D 解析共に、それぞれの長所と限界の違いにより細かいところでは異なるものの、貯留層の存在を示唆する低比抵抗層が特徴的に分布することが明らかになっている。

【低比抵抗層の分布と解釈】

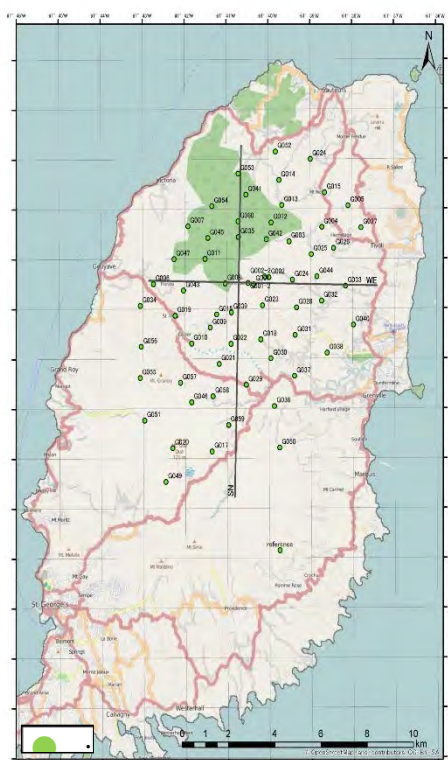
10Ωm 以下を示す低比抵抗層の層厚は地形標高の高い部分では薄く、その周辺では厚くなっており、その下端面はドーム状の構造を示す。この低比抵抗層は地熱貯留層のキャップロックであるとの解釈がなされている。低比抵抗層の下端面は Saint Catherine 火山北部の Belair や Hapsack 付近で上昇し、Saint Catherine 火山の北部から北西部にわたって標高が最も高くなりドーム状の構造をなす。このドーム状構造は Saint Catherine 火山の山腹直下における熱水の上昇の可能性を示唆しており、地表の地熱兆候と直接関係があると考えられる。

比抵抗値が 10Ωm 以下のキャップロックの、下部にみられる高比抵抗域が本調査地域の地熱貯留層構造モデルとして提案されている。

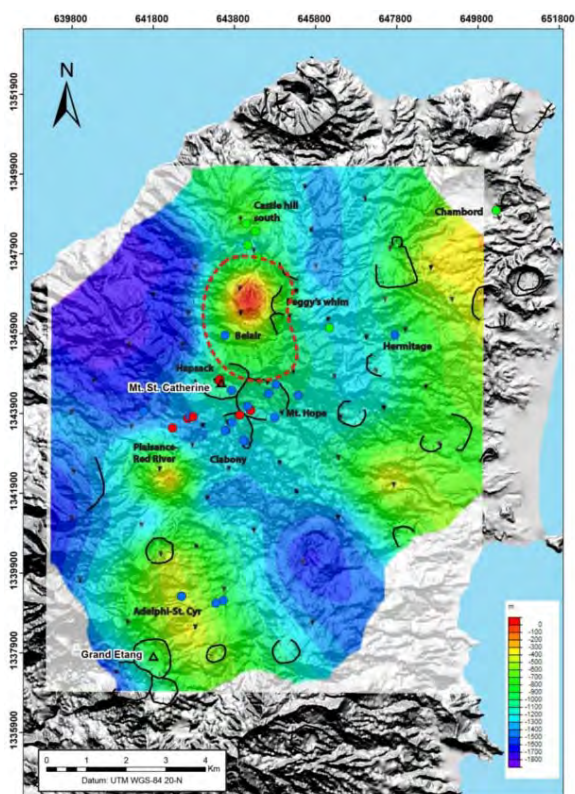
(3) 調査団見解と調査方針

取得されたデータが良好であること、また 3D インバージョン解析も実施されていることから、解析結果の信頼性は高いと考えられる。解析の結果認められる低比抵抗層とその下部の高比抵抗部およびドーム状の構造から推定される比抵抗構造が典型的な地熱貯留層構造と推定され、さらに、調査地域の地質・地質構造に関する情報や地化学探査等の調査結果とを比較検討することにより、提案されている地熱貯留層構造モデルに特段のコメントはない。さらに解析精度を高めるためには MT 探査の追加測定、あるいは重力探査などの他の物理探査手法による、比抵抗とは異なる地下の物性値情報取得のための追加調査が必要であるという提案にも賛同する。

追加 MT 探査は Jacobs が実施するとの方針を受けて、調査団は重力探査を実施する方針とする。ただし、測点数や測点地点などについては、協議を行いつつ決定する方針とした。



出典：Jacobs (2015)



出典：Jacobs (2015)

図 3-10 MT 測点位置図

図 3-11 キャップロック下面標高平面図

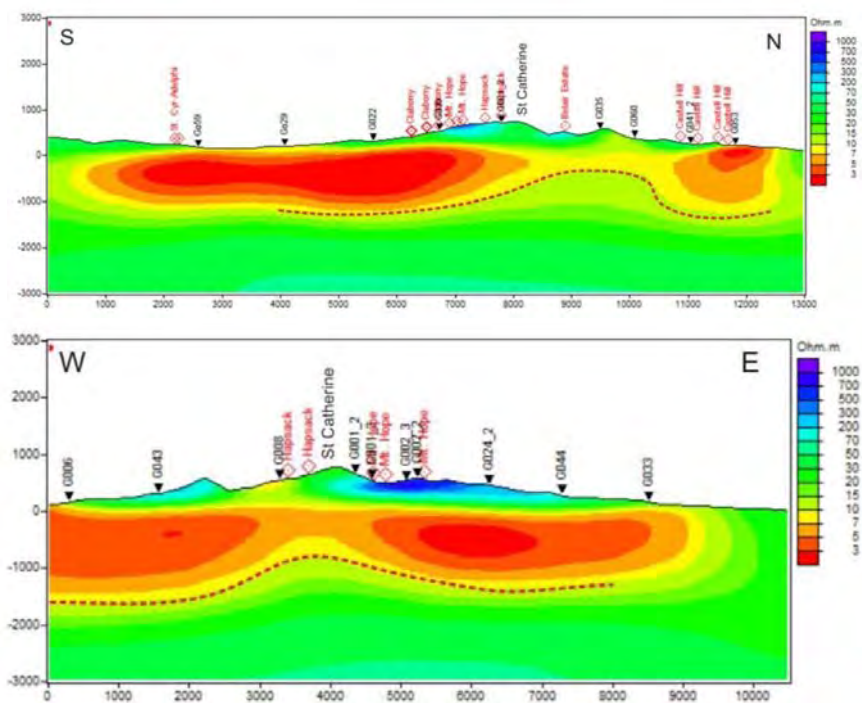


図 3-12 代表的な比抵抗構造断面図(SN および WE 断面) -
(3D インバージョン解析 - 出典：Jacobs (2015))

3-3 本調査で実施した現地調査

3-3-1 地表地質調査

(1) 目的

グレナダ島北部に分布が報告されている地熱徴候地について、地質、変質および断裂系を明らかにし、地熱モデル検討のためのデータを得ることを目的とする。

(2) 方法

グレナダ島北部に分布する地熱徴候地について現地調査を行い、岩石の種類、湧水・温泉・噴気の有無、熱水変質の有無、変質帯の性状・規模、断裂の分布および特徴を観察し、記載する。必要に応じて岩石試料を採取し、粉末 X 線回折分析、岩石薄片観察を実施する。

【岩石薄片作製および鑑定】

岩石薄片は、岩石試料を約 35×25mm に切り出し作製する。偏光顕微鏡観察は、単ニコルおよび直交ニコルにて岩石全体の鉱物名、組織および変質を記載する。特に、変質鉱物および鉱物脈については構成鉱物種、他の鉱物脈や変質鉱物との新旧関係を詳細に記載する。鉱物の量比は目分量とする。

【粉末 X 線回折分析】

粉末 X 線回折分析は、無定方位試料および定方位試料を作成して実施する。定方位試料は水ひ法により作成する。

X 線回折分析の結果、14~15Å の反射が認められた試料については水ひ法により定方位試料を作成して、エチレングリコール（以下 EG）処理を行う。また、7Å の反射が認められた試料のうち、カオリナイトの有無を確認する必要がある試料については塩酸（以下 HCl）処理を行う。測定条件は次のとおりとする。

・ 対陰極		: CuKα1
・ 管電圧		: 40kV
・ 管電流		: 20mA
・ 走査速度	全岩無定方位試料	: 2°/min
	定方位試料（未処理、EG 処理、HCl 処理）	: 1°/min
・ 走査範囲	全岩無定方位試料	: 2θ=2~62°
	定方位試料（未処理、EG 処理、HCl 処理）	: 2θ=2~32°

(3) 結果

Huttrer and Michels(1995)で報告されている 6 箇所の地熱徴候地のうち、南部の Adelphi-StCYR（図 3-13、6 番）を除く 5 箇所について調査を実施し、岩石薄片観察 3 枚、X 線回折分析 11 試料を分析した（図 3-13、表 3-3）。Adelphi-StCYR では現地でのヒアリングから高温の地熱徴候地はないと判断されたため、現地調査は実施しなかった。

【Chambord】

Chambord はグレナダ島北東部に分布し、Lake Antonie 火山噴出物（凝灰岩-砂岩）を覆うように方解石からなるトラバーティンが生成している（図 3-14）。岩石の変質、鉱物脈は確認されない。

【Castle Hill】

Castle hill はグレナダ島北部に位置し、火山噴出物（Undifferentiated volcanics）から温泉（35.9～46℃）が数箇所川沿いに湧出している。近傍には溶岩ドームが分布する。炭酸塩鉱物からなるトラバーティンが火山噴出物を覆うことがある（図 3-15）。Castle hill に分布する火山噴出物は凝灰角礫岩であり、粘土化変質した岩石片を多量に含む。凝灰角礫岩からはスメクタイトが X 線回折分析により同定される（表 3-4）。断層、鉱物脈は確認されない。

【Hapsack】

Hapsack は Saint Catherine 火山の西麓に位置し、火山噴出物から温泉（47.7～61.4℃）が数箇所川沿いに湧出している。ガス噴出を伴い、変質岩には硫黄が析出している（図 3-16～17）。Jacobs(2015)によると、Hapsack では数カ所でガスを伴う温泉の存在が知られており（図 3-5）、Hapsack はグレナダの中で最も高温な温泉が湧出している。Hapsack では Saint Catherine 火山噴出物（火砕岩）が白色変質を受けて珪化変質し、基質には石英、クリストバル石、硫黄が変質により生成している（図 3-16～17）。断層、鉱物脈は確認されない。

【Peggy's Whim】

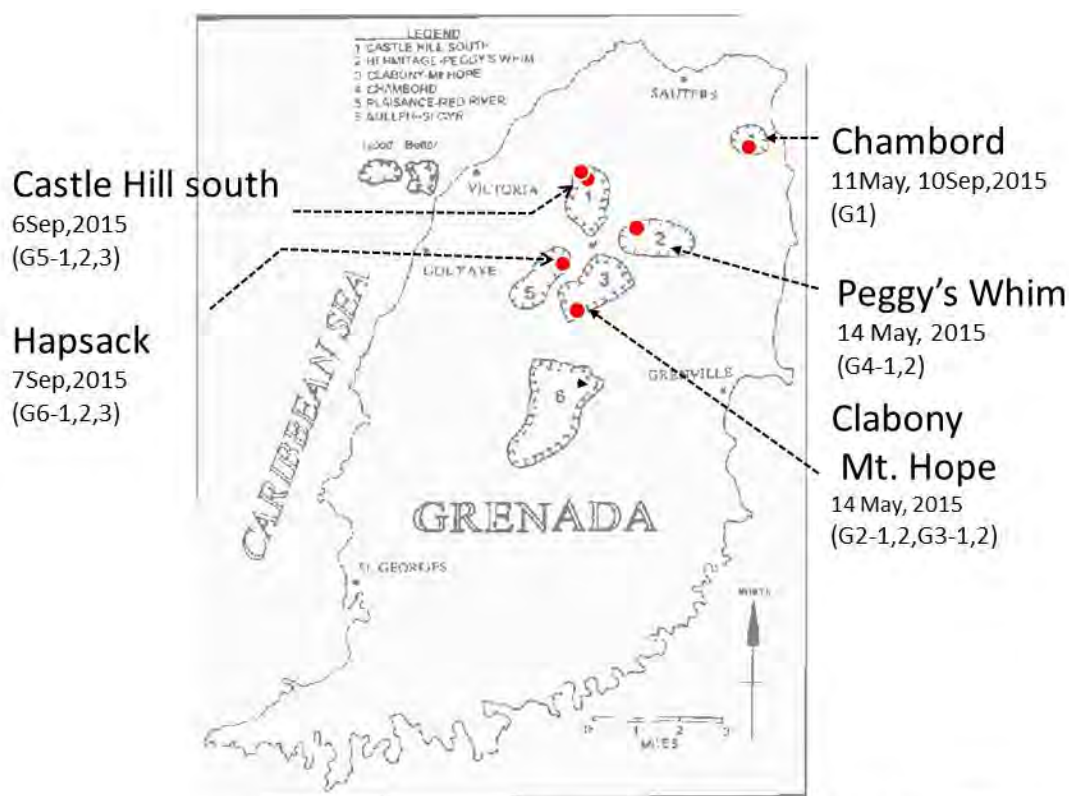
Peggy's Whim は Saint Catherine 火山の北東に位置し、Saint Catherine 火山噴出物から温泉（38.7℃）が川沿いに湧出している。岩石は緑色に弱く変質しており、X 線回折分析によりスメクタイト、ハロイサイトが岩石中に生成しているのが確認される（図 3-18～19）。断層、鉱物脈は確認されない。

【Clabony】

Clabony は Saint Catherine 火山の南東に位置し、Saint Catherine 火山噴出物（デブリ）から温泉（33.6～34.9℃）が主に 2 箇所でバブリングを伴って湧出している（図 3-20）。岩石は肉眼観察においては概ね新鮮であるが、X 線回折分析および薄片観察によりセリサイト/スメクタイト混合層粘土鉱物、カオリナイト、ハロイサイト、二次石英が基質および岩石片に生成しているのが確認される（図 3-21、表 3-4）。断層、鉱物脈は確認されない。

Saint Catherine 火山の周辺および北西側には、Saint Catherine 火山以前に堆積した可能性のある火山噴出物（Undifferential volcanics）、中新世の Tufton hill 層、Saint Catherine 火山噴出物を貫くように溶岩ドームが生成している（図 3-22）。上述した地熱徴候のうち、3 箇所は溶岩ドームの近傍に位置しているように見える（溶岩ドームの地質構造が温泉湧出と関係がある可能性を示唆する）。

グレナダ島北部の浅部の比抵抗分布（-250masl）と地質および変質分布を比較すると、スメクタイトあるいは混合層粘土鉱物が同定された地熱徴候地では、同定されなかった Hapsack（珪化変質）に比べて比抵抗が低い（図 3-23）。スメクタイトおよび混合層粘土鉱物は岩石中の電気抵抗を下げる事が知られている。Saint Catherine 火山の浅部での比抵抗構造は岩石中のスメクタイトあるいは混合層粘土鉱物の分布が規制している可能性が考えられる。



Source:Huttrer & Michels (1995)

図 3-13 現地調査位置図

表 3-3 現地地質調査結果一覧

sample no.	location(UTM Zone 20N)			field name	geology	memo					labo	
loc	X	Y	elev.		formation	mechanical name	descriptive name	alteration	Manifestation	XRD	TS	
G1	650269	1349059	40	Chambord	lake Antonie Volcanics	debris flow	wacke	none	Hot spring	Yes		
G2-1	644090	1343227	426	Clabony	Mt. Catherine volcanics	debris flow	Gravel with clay	none	Hot spring			
G2-2	644062	1343251	430	Clabony	Mt. Catherine volcanics	debris flow	Gravel with clay	none	Hot spring	Yes		
G3-1	644071	1343244	432	Clabony	Mt. Catherine volcanics	debris flow	Conglomerate	none	Hot spring	Yes	Yes	
G3-2	643996	1343049	426	Clabony	Mt. Catherine volcanics	Tuff	Tuff	none	none			
G4-1	646174	1346072	298	Peggy's Whim	Mt. Catherine volcanics	debris flow	tuff breccia	green	Hot spring	Yes	Yes	
G4-2	646174	1346072	298	Peggy's Whim	Mt. Catherine volcanics	debris flow	tuff breccia	none	Hot spring	Yes		
G5-1	644140	1348137	215	Castle Hill south	Undifferentiated volcanics	rework	tuff breccia	none	Hot spring	Yes		
G5-2	644384	1347861	264	Castle Hill south	Undifferentiated volcanics	travertine	none	none	Hot spring	Yes		
G5-3	644123	1348692	209	Castle Hill south	Undifferentiated volcanics	rework	tuff breccia	none	Hot spring	Yes		
G6-1	643475	1344773	580	Hapsack	Mt. Catherine volcanics	rework(breccia)	pyroclastic rock	Silicification	Hot spring	Yes		
G6-2	643475	1344773	580	Hapsack	Mt. Catherine volcanics	rework(matrix)	pyroclastic rock	Silicification	Hot spring	Yes	Yes	
G6-3	643480	1344757	568	Hapsack	Mt. Catherine volcanics	rework(matrix)	pyroclastic rock	Silicification	Hot spring	Yes		

出典：JICA調査団



location(UTM Zone 20N) :650269,1349059,40

Chambord

Rank: Good by Huttner & Michels (1995)
Temperature : 32.7 degrees C (field)
pH:6.02 (field)
EC:3.99< mS/cm (field)
Remarks: salty. Travertine (Calcite by XRD)
Date: 6 Sep, 2015

Geological
Formation is overlaid
by Travertine

Lake Antonie Volcanics
*Tuff-sandstone(wacke)
*Partially bedding



location(UTM Zone 20N) :650269,1349059,40

出典：JICA調査団

図 3-14 Chambord で観察されるトラバーティン



location(UTM Zone 20N) :644140,1348137,215



location(UTM Zone 20N) :644384,1347861,264

Castle Hill south

Rank: Better by Huttner & Michels (1995)
Temperature : 35.9-46.0 degrees C (field)
pH:5.7-5.9 (field)
EC:4.0< mS/cm (field)
Remarks: Travertine (Carbonate).
Hot water flow out from the debris overlying undifferentiated volcanics.
Date: 6 Sep, 2015

Travertine consist of
Carbonate mineral(Calcite,
Aragonite, Vaterite).

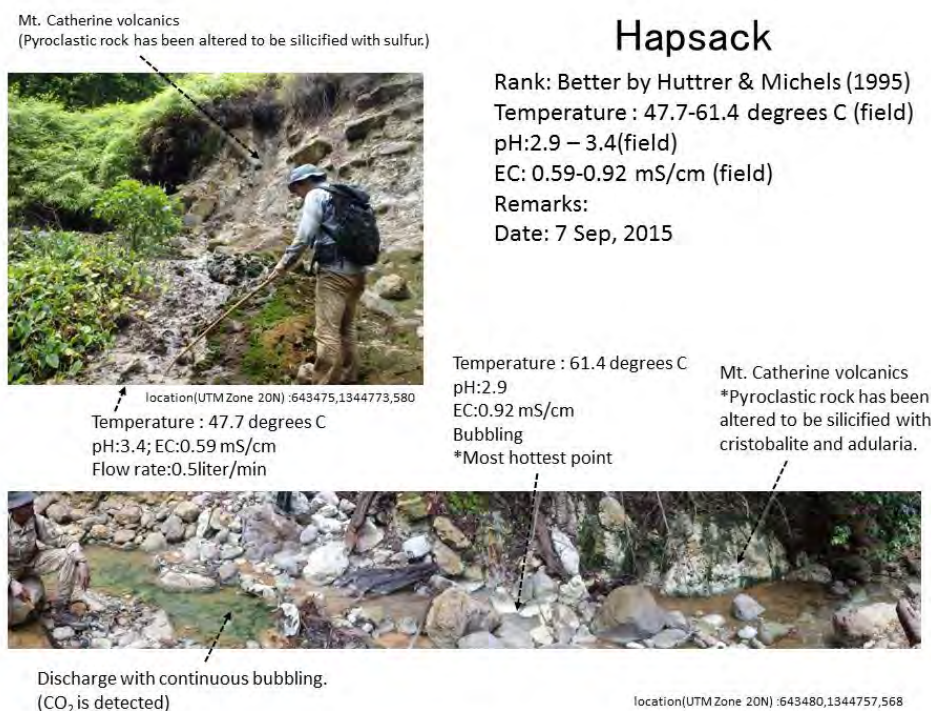
Temperature : 39.8
degrees C
pH:5.9
EC:4.0< mS/cm



location(UTM Zone 20N) :644123,1348692,209

出典：JICA調査団

図 3-15 Castle Hill で観察されるトラバーティン



出典：JICA調査団

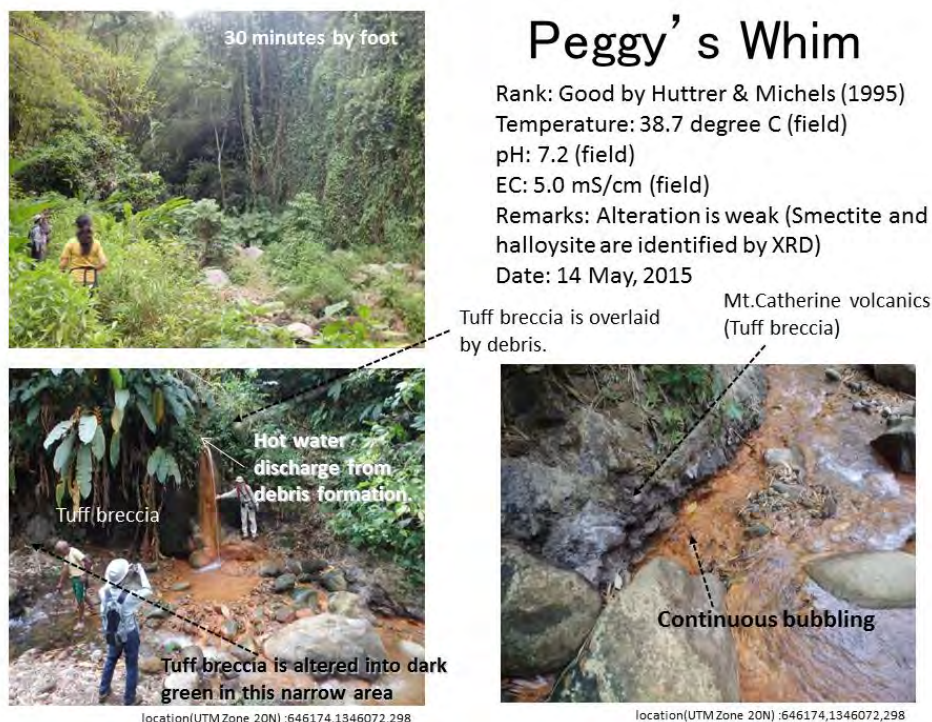
図 3-16 Hapsack で観察される変質帯



Locality: Hapsack
Rock name: Tuff breccia
Remarks
Small amount of Plagioclase(primary mineral), pseudomorphs of mineral crystal and brown-colored lithic fragments are contained. Matrix of tuff breccia and lithic fragments are altered to be amorphous material, fine quartz and opaque mineral(pyrite). Several plagioclase altered to feldspar(adularia).
Note: A large amount of fine abrasive compounds (high refractive) are contaminated.

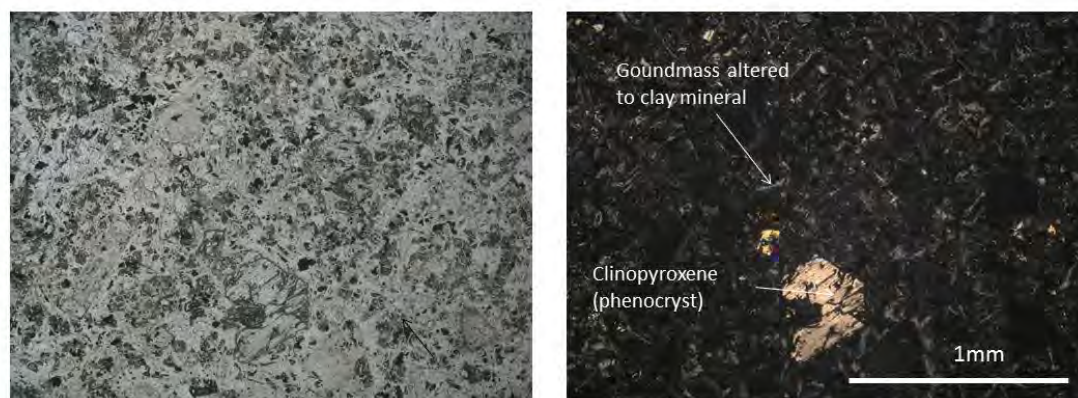
出典：JICA調査団

図 3-17 Hapsack に分布する凝灰角礫岩の偏光顕微鏡写真



出典：JICA調査団

図 3-18 Peggy's Whim に分布する凝灰角礫岩



Locality: Peggy's Whim (G4-1)

Rock name: pyroxene andesite (fragment of tuff breccia)

Remarks

Many pseudomorph crystals and small amount of plagioclase and pyroxene are contained as phenocryst in andesite. Some parts of groundmass and phenocrysts are altered to fine quartz and fine brown-colored clay mineral (smectite is detected by X-ray diffractometer).

出典：JICA調査団

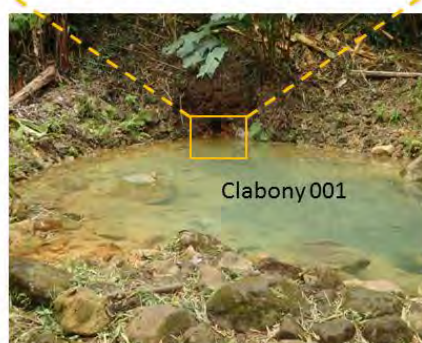
図 3-19 Peggy's Whim の凝灰角礫岩中の礫の偏光顕微鏡写真



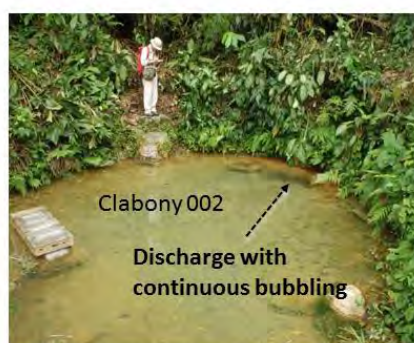
Clabony Mt. Hope

Rank: Better by Huttner & Michels (1995)
Temperature : 33.6 – 34.9 degrees C(field)
pH:5.8 – 5.9 (field)
EC:0.51 – 0.65 mS/cm (field)
Remarks: No altered rock
Date: 14 May, 2015

Hot water discharge from debris
formation with bubbling.



location(UTM Zone 20N) :644090,1343227,426



location(UTM Zone 20N) :644071,1343244,432

出典：JICA調査団

図 3-20 Clabony に分布するデブリ堆積物



Locality: Clabony (G3-1)

Rock name:Tuff breccia (Conglomerate)

Remarks

Small amount of quartz, plagioclase, hornblende, biotite, clinopyroxene and lithic fragments are contained. Most of plagioclase and mafic mineral are fresh. Some parts of matrix are altered to fine quartz and fine clay mineral (halloysite and sericite-smectite mixed-layered clay mineral are detected by X-ray diffractometer). Small veins of clay mineral and calcedony are distributed in the matrix and fragments.

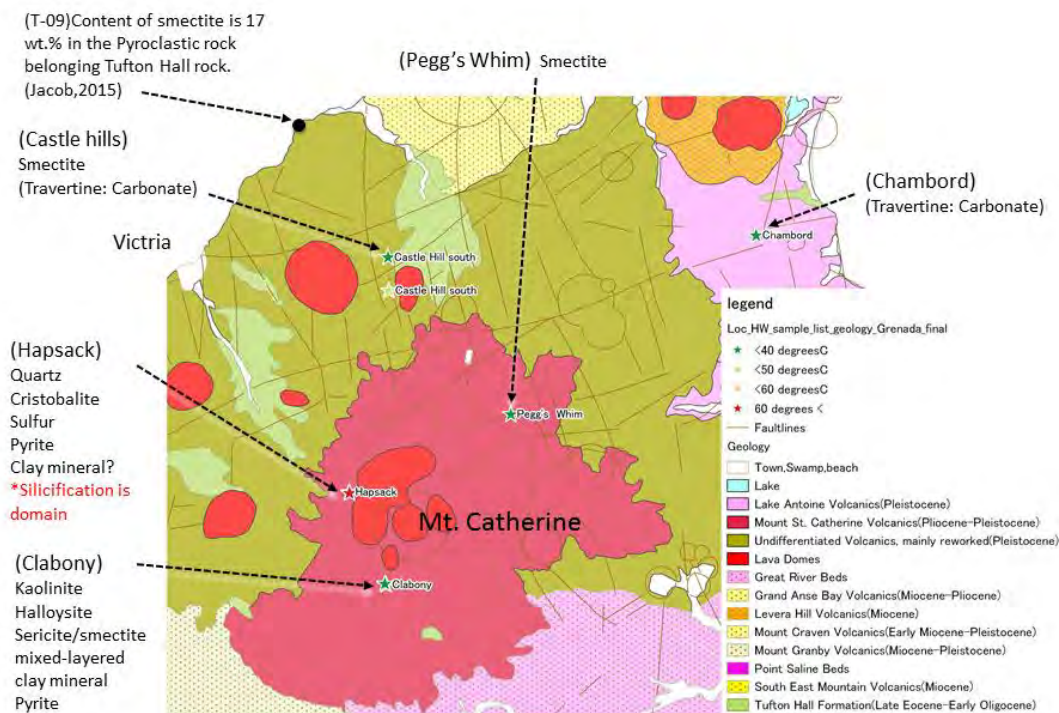
出典：JICA調査団

図 3-21 Clabony に分布する凝灰角礫岩中の偏光顕微鏡写真

表 3-4 X線回折分析による鉱物同定結果（石英指数）

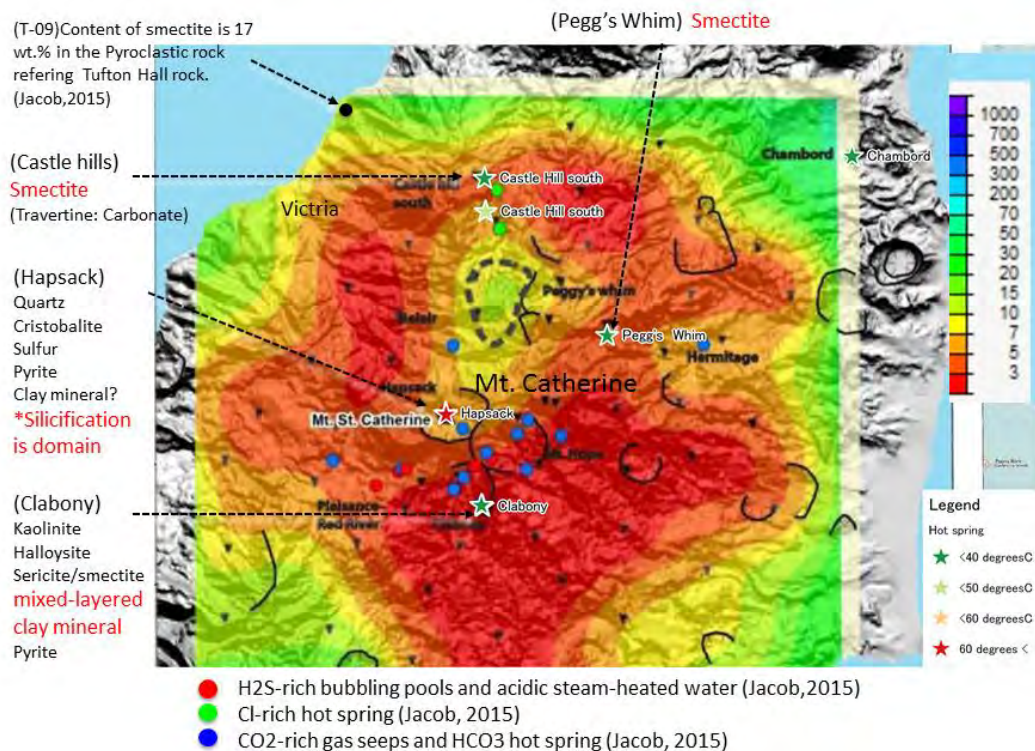
Mineral (2 theta to intensity)				Clay mineral					Silica mineral			Silicate mineral			Carbonate			element mineral		Sulfide mineral		oxide mineral		unidentified diffraction line (2 Theta)	
				Smectite	S/S	clay mineral	kaolinite	Halloysite	Quartz	Cristobalite	Tridymite	Plagioclase	Alkali Feldspar	Hornblende	Clinopyroxene	Calcite	Aragonite	Vaterite	Sulfur		Pyrite		Magnetite		Goethite
No.	Locality	Rock	state	5.2~ 6.2°	7.0~ 8.8°	6.2~ 7.0°	12.4°	12.4°	36.6°	22.0°	22.0°	27.8~ 28.0°	27.4~ 27.5°		30.0°	29.4°	°	°	°		33.1°		35.1°		
1	G1 Travertine	Chambord	Bulk													34.7									
			UT																						
			EG																						
			HCl																						
2	G2-2	Clabony	Bulk				0.1					2.4		0.2									0.1		
			UT				Yes																		
			EG				Yes			0.8															
			HCl																						
3	G3-2		Bulk		0.7			0.6													1.1		0.5		
			UT		Yes			Yes		7.5	10.0		0.8	1.2	1.3										
			EG		Yes			Yes																	
			HCl																						
4	G4-1	Pegg's Whim	Bulk	0.5												0.7					0.4		2.1		
			UT	Yes									9.5												
			EG	Yes																					
			HCl																						
5	G4-2		Bulk	0.4																					
			UT	Yes							7.8		5.9	0.9		1.3									
			EG	Yes																					
			HCl																						
6	G5-1		Bulk	0.7																					
			UT	Yes						2.9			16.8		0.7										
			EG	Yes																					
			HCl																						
7	G5-2 Travertine	Castle Hill south	Bulk													2.3	3.2	0.5						15.1	
			UT										2.6												
			EG																						
			HCl																						
8	G5-3		Bulk	0.6																					
			UT	Yes							9.7	5.2	14.0		1.4										
			EG	Yes																					
			HCl																						
9	G6-1		Bulk							19.5				1.1							8.3				
			UT																						
			EG																						
			HCl																						
10	G6-2	Hapsack	Bulk			0.2?																			
			UT							20.7				1.4					1.7						
			EG																						
			HCl																						
11	G6-3		Bulk																						
			UT								32.0		1.9	0.6											
			EG																						
			HCl																						
				UT:Air dried sample by preferred orientation method																					
				EG:Ethylene glycol solvated																					
				HCl:acidum hydrochloricum solvated																					

出典：JICA調査団



出典：JICA調査団

図 3-22 地熱微候地に分布する変質岩中の変質鉱物分布



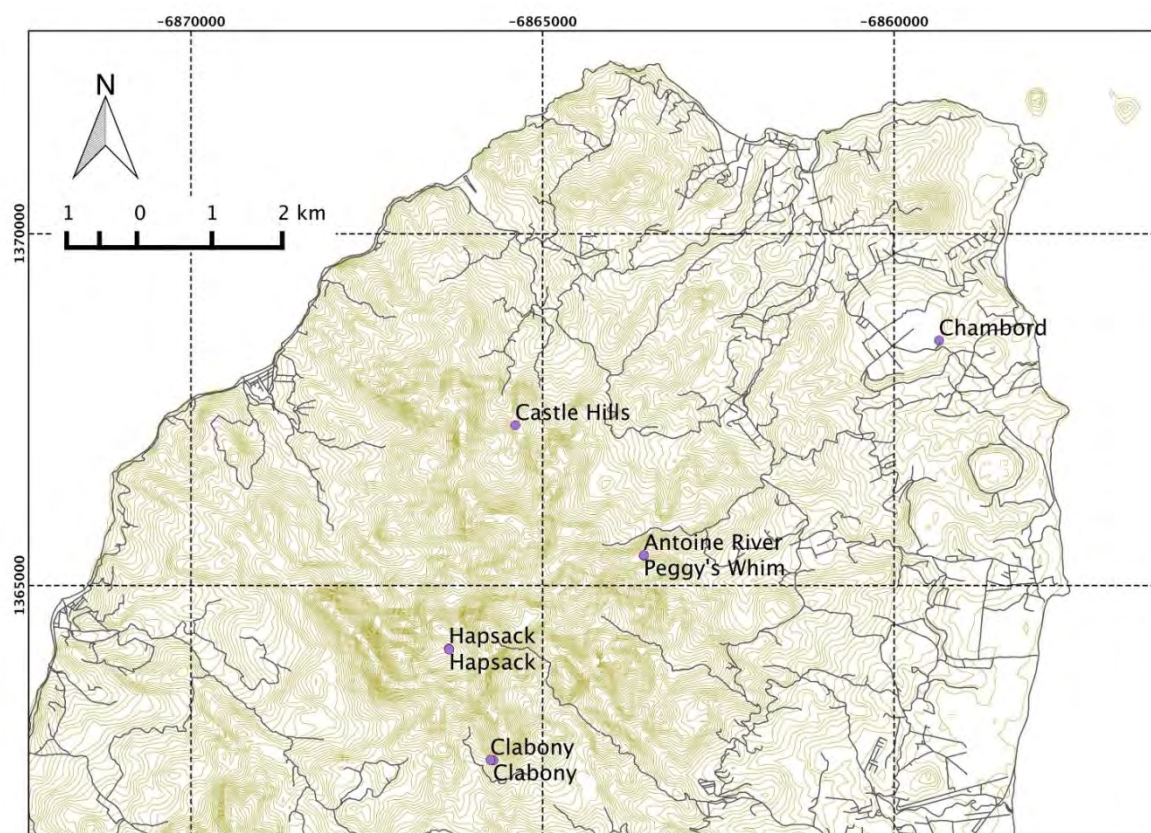
出典：JICA調査団

図 3-23 変質岩中の変質鉱物分布と比抵抗分布 (−250masl)

3-3-2 地化学調査

グレナダの地熱徴候を概査し、その結果を既存の調査結果と比較することを目的に、調査団は地化学調査を実施し、試料採取と現地測定(温度, pH, 電気伝導率)を行った。調査地点位置(携帯型 GPS レシーバーによる座標)と現地測定結果を表 3-5 に示す。調査地点位置は図 3-24 の地図上に示す。現地調査における温度は Jacobs (2015)にまとめられている既存データと同等であった。

温泉水試料と Antoine 川の河川水試料は、地熱エンジニアリング(株)の化学実験室にて分析を行った。分析成分と分析方法を表 3-6 に、分析結果を表 3-7 に記す。



出典：JICA調査団

図 3-24 地化学調査地点

表 3-5 地化学調査地点と現地測定結果

Location	Sample name	Type of manifestation	Sample	Date	Longitude (N)	Latitude (W)	Elevation (masl)	T atm (°C)	P atm (hPa)	T water (°C)	pH	EC (mS/cm)	Note
Clabony	CBN 001	Thermal water	Yes	2015/05/14	12.147650	61.675667	400	26.0	971	34.9	5.9	0.51	—
Clabony	CBN 002	Thermal water	Yes	2015/05/14	12.147708	61.676018	466	26.0	971	33.6	5.8	0.65	—
Peggy's Whim	Chacha	Thermal water	Yes	2015/05/14	12.173224	61.656430	287	23.8	983	38.7	7.2	5.0	A hot spring flows out from a hole in debris covering andesite lava.
Peggy's Whim	Antoine river	River water	Yes	2015/05/14	12.173269	61.656415	297	23.8	983	24.4	6.8	0.69	Taken from the river bank close to the Chacha thermal feature
Castle Hills	AG001-2	Thermal water	Yes	2015/09/06	12.189496	61.672834	264	25.7	—	46.0	5.67	> 4.0	Hot water flows out from the debris overlying undifferentiated volcanics.
Hapsack	AG016-1	Thermal water	Yes	2015/09/07	12.161614	61.681328	580	24.4	—	47.7	3.35	0.593	Hot water flows out from altered pyroclastic rock (Mt. Catherine volcanics).
Hapsack	AG016-3	Thermal water	Yes	2015/09/07	12.161476	61.681283	568	24.4	—	61.4	2.86	0.923	bubbling pool
Chambord	Chambord	Thermal water	Yes	2015/09/10	12.200061	61.618701	40	20.5	—	32.7	6.02	> 4.0	Calcite deposits to form Travertine.

出典: JICA調査団

表 3-6 化学分析成分と分析方法

Aqueous species	Analytical method
pH	pH meter
EC	Conductivity meter
Cl, SO ₄	Ion chromatography
HCO ₃	Infrared spectroscopy
Na, K	Flame emission spectroscopy
SiO ₂ , Ca, Mg, Fe, Al, B	ICP/AES

出典：JICA調査団

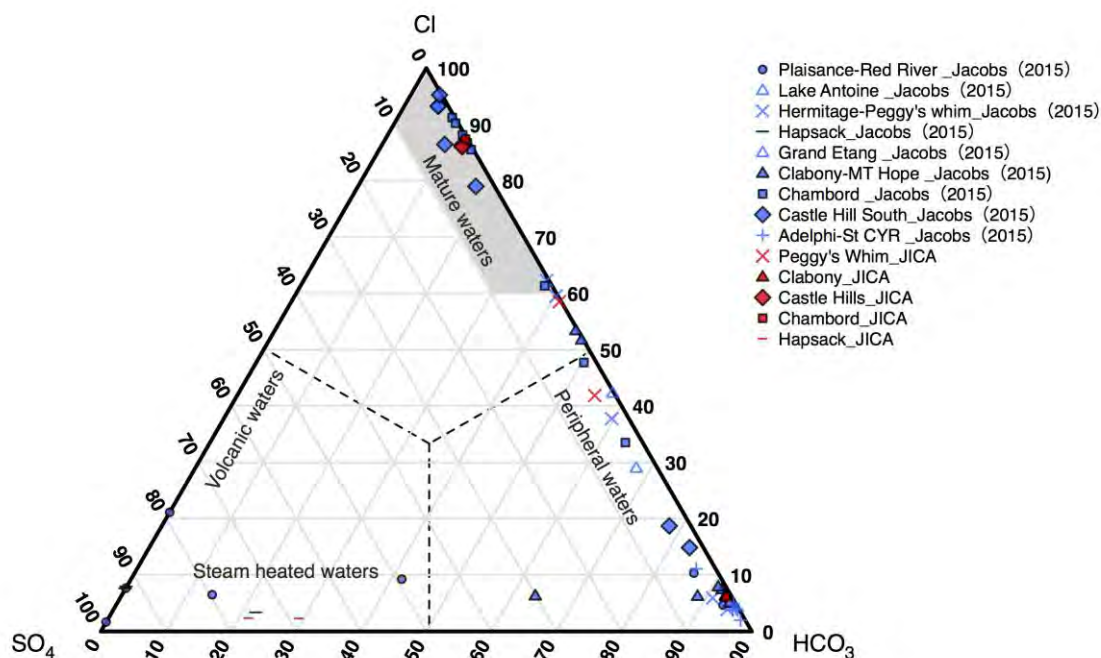
表 3-7 温泉水の化学分析結果

Sample	Location	Type	Date	pH	EC μS/cm	SiO ₂ mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	t-HCO ₃ mg/L
CBN 001	Clabony	Thermal water	2015/5/14	6.3	694	152	31	4.6	456
CBN 002	Clabony	Thermal water	2015/5/14	6.1	648	147	31	4.2	466
Chacha	Peggy's Whim	Thermal water	2015/5/14	6.8	5180	167	1320	6.9	928
Antoine river	Peggy's Whim	Thermal water	2015/5/14	7.0	693	43	132	9.9	173
AG001-2	Castle Hills	Thermal water	2015/9/6	6.0	9880	136	3190	55	463
AG016-1	Hapsack	Thermal water	2015/9/7	3.1	755	117	8.5	259	111
AG016-3	Hapsack	Thermal water	2015/9/7	3.2	823	117	9.8	329	93
Chambord	Chambord	Thermal water	2015/9/10	6.2	21800	114	7820	28	1101

Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Al mg/L	Fe mg/L	B mg/L
53	6.0	56	25	<0.01	<0.01	1.1
50	5.7	52	22	<0.01	<0.01	0.96
668	44	126	86	<0.01	<0.01	17
71	5.2	37	14	<0.01	<0.01	2.0
1470	153	470	59	<0.01	<0.01	39
11	20	5.2	3.6	15	5.4	0.02
23	5.3	31	8.3	17	2.4	0.0
3610	166	798	333	<0.01	<0.01	54

出典：JICA調査団

調査団が現地調査を通じて取得した温泉の化学組成(以後、調査団データ)と Jacobs (2015)にまとめられている既存データの比較を行うため、両データを図 3-25 の Cl-SO₄-HCO₃ 三成分系図と図 3-26 の Na-K-Mg 三成分系図にそれぞれプロットした。

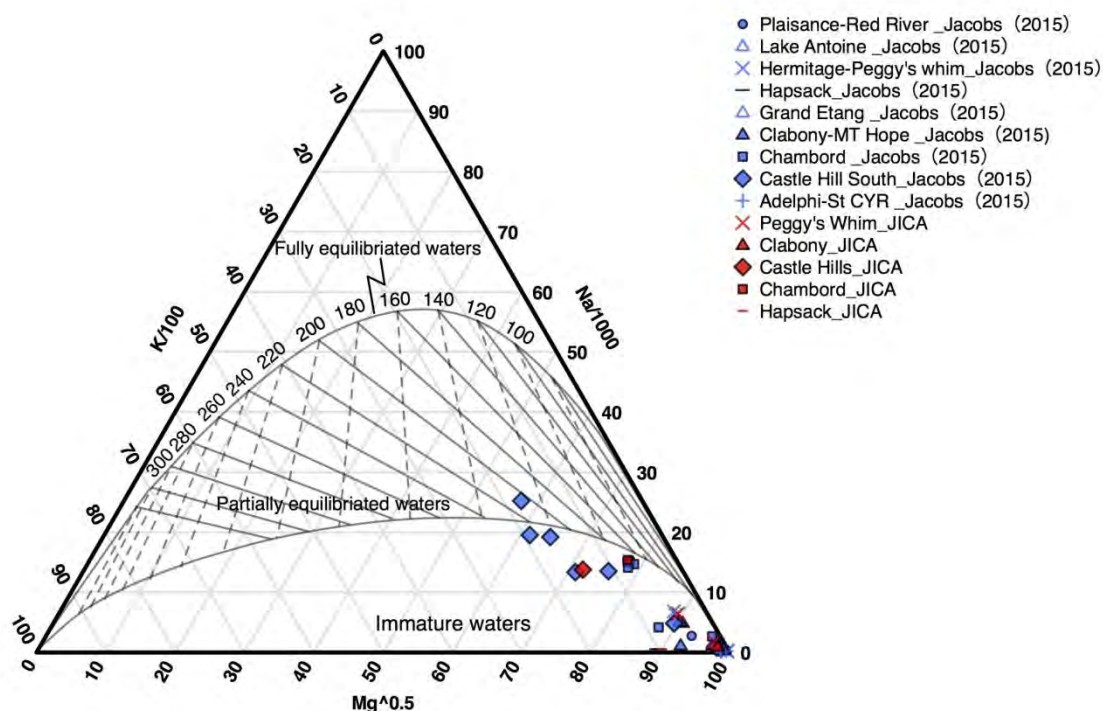


出典：JICA調査団

図 3-25 温泉の Cl-SO₄-HCO₃ 三成分系

図 3-25 において、調査団データは既存データとほぼ同じ位置にプロットされる。このことは両データが互いに整合し、温泉の起源を反映していることを示唆する。

図 3-26 は Giggenbach (1988) による水-岩石反応の平衡状態(反応の熟成度)を評価する図である。図は Na、K および Mg の濃度比を示した三成分系図である。この図において fully equilibrated waters と記された曲線が完全な平衡状態を表し、この曲線ともう一つの曲線の間は partially equilibrated waters, すなわち部分的な平衡状態にあると評価される。partially equilibrated waters の下には immature waters の領域であり、ここにプロットされる流体は未成熟な流体と評価される。調査団データと既存データのほとんどは immature waters の領域にプロットされ、ゆえに水-岩石反応において未成熟と考えられる。



出典：JICA調査団

図 3-26 温泉の Na-K-Mg 三成分系

表 3-8 に示すように、調査団データに対して地化学温度計を計算した。石英温度計(Fournier and Potter, 1982)、Na-K 温度計 (Giggenbach, 1988)、Na-K-Ca 温度計 (Fournier and Truesdell, 1973) および K-Mg 温度計 (Giggenbach, 1988)の計算結果を比較したところ、各温度計に対して調査団データと既存データは整合的な結果であった。

これまでの議論の結果、調査団データはグレナダ国の地熱徴候に対する既存の地化学データと、Jacobs (2015)による地化学的解釈の妥当性を確認するものと判断する。

表 3-8 地化学温度計計算結果

Sample	Location	Water Type	Date	Quartz	Quartz	Chalcedony	Chalcedony	Cristobalite	Na-K	Na-K	Na-K	Na-K	Na-K-Ca	K-Mg
				Fournier and Potter (1982)	Arnorsson et al. (2000)	Fournier (1977)	Arnorsson et al. (1983)	Fournier (1977)	Truesdell (1976)	Fournier (1979)	Giggenbach (1988)	Arnorsson (2000)	Fournier and Truesdell (1973)	Giggenbach (1988)
				°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
CBN 001	Clabony	Thermal water	2015/5/14	162	152	138	134	112	201	228	242	212	54	46
CBN 002	Clabony	Thermal water	2015/5/14	160	150	136	132	110	202	229	243	214	54	46
Chacha	Peggy's Whim	Thermal water	2015/5/14	168	159	145	141	118	147	184	201	168	166	76
AG001-2	Castle Hills	Thermal water	2015/9/6	155	145	131	127	105	192	220	236	205	193	114
AG016-1	Hapsack	Thermal water	2015/9/7	(146)	(135)	(120)	(118)	(96)	(1135)	(713)	(653)	(748)	(342)	(95)
AG016-3	Hapsack	Thermal water	2015/9/7	(146)	(135)	(120)	(118)	(96)	(304)	(304)	(312)	(296)	(54)	(54)
Chambord	Chambord	Thermal water	2015/9/10	145	133	119	117	94	117	158	177	144	161	92

Hapsack (AGO16-1, 16-3)のpHは約3と低く、地化学温度計の適用条件を外れるため、その地化学温度は括弧内に示し参考値として扱う。出典: JICA調査

3-3-3 重力探査

(1) 目的

調査地域の地熱探査において広域的な重力を測定し、地熱貯留層となる断裂帯を把握する一助とすることを目的とする。

(2) 調査方法

【測定機器】

重力測定は米国 Scintrex 社製相対重力計を用いて実施した。位置情報は D-GPS にて取得した。

【現地調査】

重力探査は、グレナダ島北部の Saint Catherine 火山を含む地域で、地熱兆候の認められる地域を含む島の北半分程度を調査対象とした。測点間隔は、水平距離 500m～1km 程度とした。各重力測点は D-GPS 測量で測点の位置と高度を求めた。高度の精度は±5cm 程度とした。

ただし、調査対象地域はいずれも測点までのアクセス道路がない場合や地形が急峻な場所が多く、かつ植生が繁茂していた。このため、測点によっては予定した地点に到達できない、あるいは到達しても植生により GPS を用いた測量ができないことが想定される場合には、測点配置に偏りが生じないように配慮しつつ、予定測点周辺の複数箇所に新たに測点を設けた。現地調査は 2015 年 8 月 25 日から 2015 年 9 月 13 日、測定点数は 105 点の計画に対して、116 点で測定を実施した。

図 3-28 に測点位置図を示した。表 3-10 に測定結果の一例を示す。測定結果一覧は巻末に添付する。

【測定基点と標準重力値、測点と相対重力値】

ある地点での重力測定値は、時々刻々と種々の影響を受けるため、通常は一定の値を示さず変動（ドリフト）する。このため、現地での重力測定においては、基準となる固定点（基準点）を設けて「標準重力値」を測定し、それを用いて各地点の測定値の補正を行う方法が取られる。具体的には、基準点の測定値（標準重力値）をある一定の固定値と見なした時の「相対重力値」を計算する手法がとられる。

本調査における各地点の「相対重力値」の基準とする基点は、調査地域最北部 Laurant Point にあるホテルの敷地（図 3-28 中の 1412 及び 1111 番）に設けた。基点では、毎朝、測定を開始する前と毎夕の測定終了後の 2 回の測定を行い、その日の「標準重力値」とした。また、その測定値の差（ドリフト量）が許容範囲を超えていないことを毎回の測定で確認した。グレナダ国内には、世界標準の「絶対重力値」と対応させる基点が設けられていないので、本件の重力値は、基点での「標準重力値」との「相対重力値」として表わされることになる。

各測点で測定した重力計測値は、測定時刻や計測器高、緯度経度、周辺地形などの情報とともに補正したうえで、基点での「標準重力値」と対比させることにより、その測点での「相対重力値」に補正した。「相対重力値」は、本調査でのみ適応可能な「各地点の仮の絶対重力値」という換えることができる。なお、普遍的な絶対重力値に補正するためには、本調査で設けた基点で測定した標準重力値を、近隣国（バルバドス国）に設置されている「絶対重力基点」の関係を測定する必要がある。

【ブーゲ補正】

上記で求められた各測点での相対重力値は地形の起伏による重力加速度値の違いの影響を受けており、地下重力構造による重力値の変化を適切には表わしていない。このため、補正が行われる。この補正はブーゲ補正と呼ばれる。

ブーゲ補正においては本調査地域における岩石種を考慮していくつかの岩石密度を設定してブーゲ異常図を作成しその上で重力－高度相関図(G-H correlation)を作成した。これに基づき、ブーゲ異常図が地形の起伏に最も影響されてないときの岩石密度を「最適補正密度」として採用した。本地域における最適補正密度は2.2g/cm³と評価した（図3-29）。その時のブーゲ異常図を図3-30に示した。このブーゲ異常図が、重力探査の基本解析図となる。

【重力探査解析図】

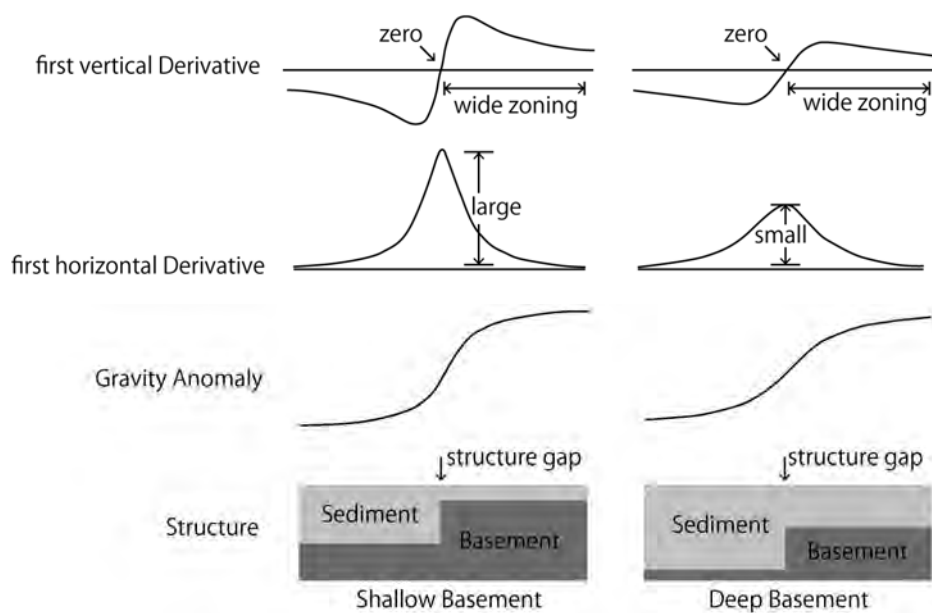
ブーゲ異常図を作成した数値データを用いて、本件調査の目的に合致するように、以下の解析図を作成した。

表 3-9 重力探査解析図一覧

解析図名	解析方法	表現される主な情報	適応
傾向面残差重力図	探査対象外となる地下深部の重力（密度）情報を除外する。	探査対象となる比較的浅い深度の重力（密度）情報を示す。	3次元的な重力異常を把握する。基盤深度を推定する。
水平一次微分図	ブーゲ異常値に示される重力値を水平方向に微分する。	水平方向の重力値変化の「傾斜」の度合いの絶対値を示す。	微分値が大きいほど地下の密度変化が大きい。断層などの岩石境界を示す
垂直一次微分図	重力値変化率を微分する。	垂直一次微分値がゼロ地点は、重力値変化のピークを示す。	微分値がゼロ地点が最大の密度変化地点と一致する。断層などの岩石境界の中心を示す。

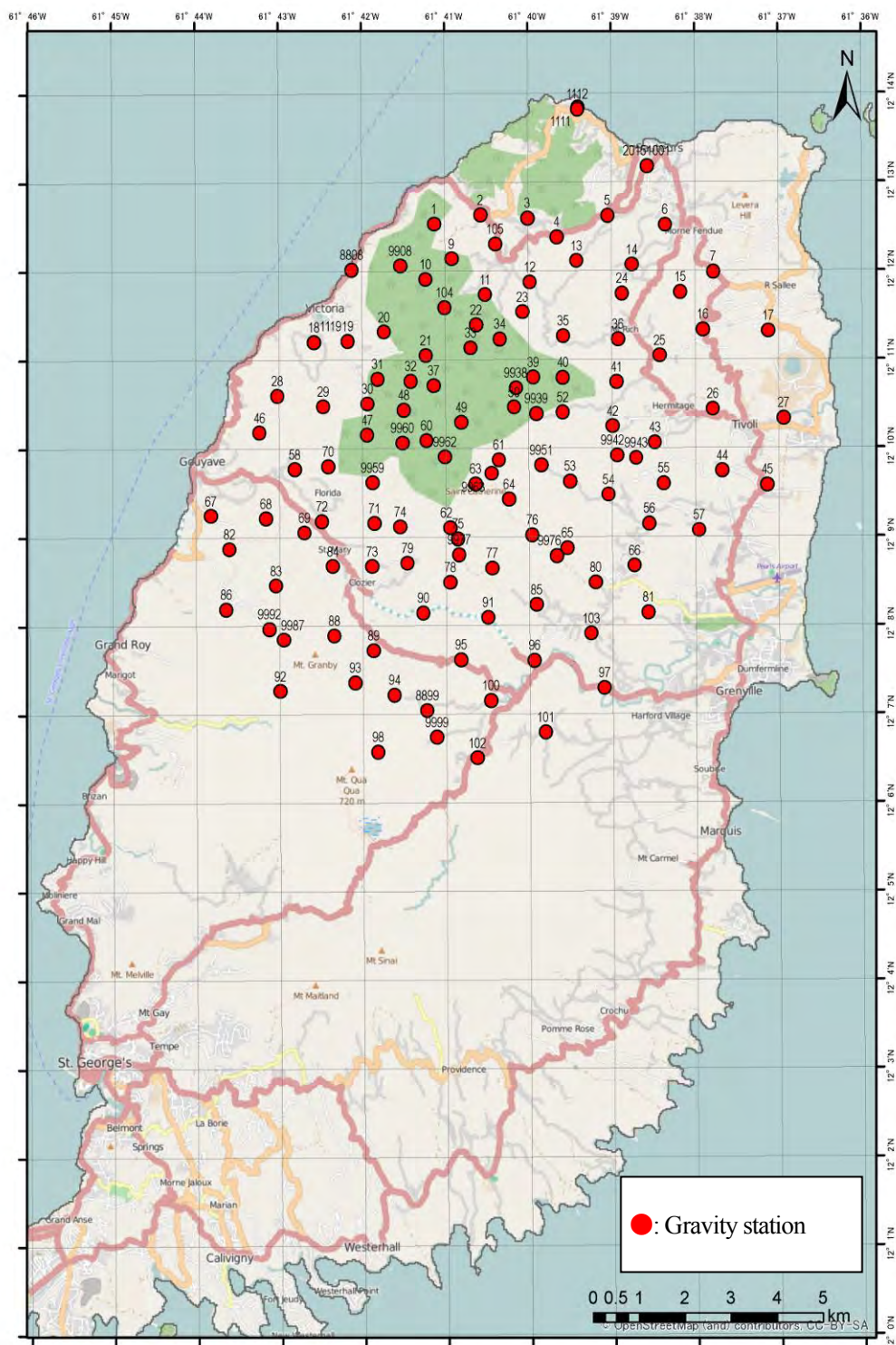
出典：JICA調査団

水平一次微分図及び垂直一次微分図で表わされる等高線情報と地下密度構造との関係を図3-27に示す。



出典：物理探査学会（1998）

図 3-27 断層構造に対する鉛直一次微分と水平一次微分の比較



出典：JICA調査団

図 3-28 重力測点位置図

表 3-10 測定結果一例

GRAVITY LOOP PROCESSING REPORT

Project: GrenadaGravity_2015

Date: 2015/08/29

No. of stations: 6

Gravity formula: IGS 1980

Loop: 62_Aug29.TXT

Instrument type: Scintrex CG-5

No. of readings: 7

Coordinate system: WGS 84 / UTM zone 20N

Processing status: Solved (s.d. = 0.000 mGal)

Serial No. 41062

Reduct. density: 2.67g/cm3

Elevation datum: Ellipsoidal

Loop closure processing:

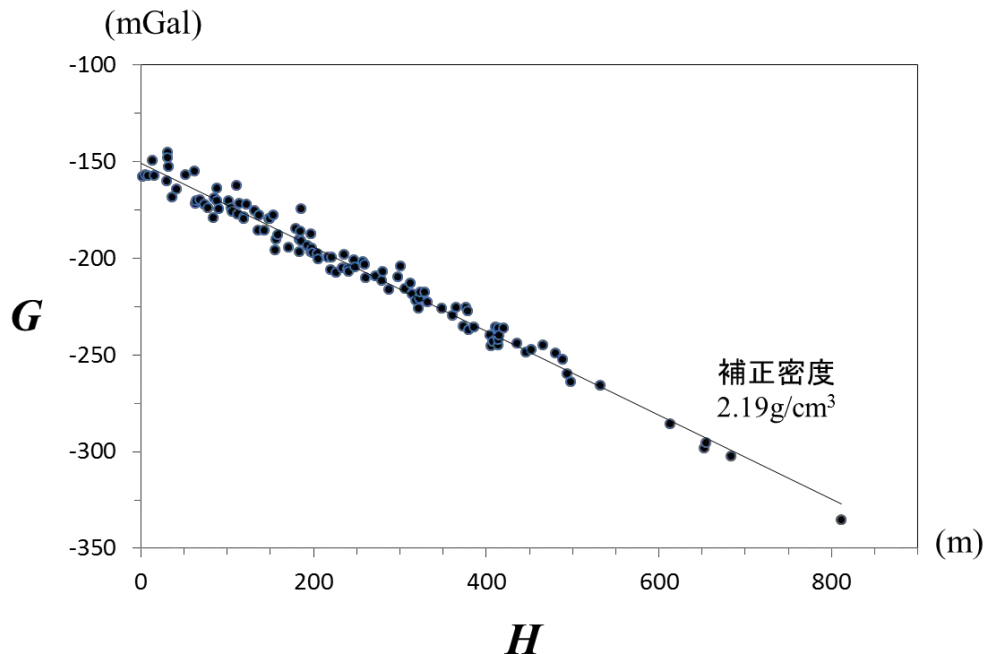
Line No.	Station No.	Local time	Instr. reading	Instr. height [m]	Tidal corr. [mGal]	Drift corr. [mGal]	Abs. gravity [mGal]	Resid. [mGal]	Remarks
0	1111	16:50:46	3316.881	0.160	0.192	0.000	979000.000	0.000	BASE
0	6	17:44:12	3306.604	0.170	0.151	0.010	978989.695	0.000	
0	14	18:33:25	3288.674	0.110	0.096	0.019	978971.701	0.000	
0	35	19:46:47	3281.551	0.160	0.002	0.033	978944.513	0.000	
0	36	20:40:48	3287.785	0.180	-0.057	0.043	978970.704	0.000	
0	24	21:37:49	3285.455	0.170	-0.097	0.054	978968.342	0.000	
0	1111	22:28:20	3317.115	0.160	-0.105	0.063	979000.000	0.000	BASE

Legend: BASE - gravity base, REP - in-loop repetition

Stations results summary:

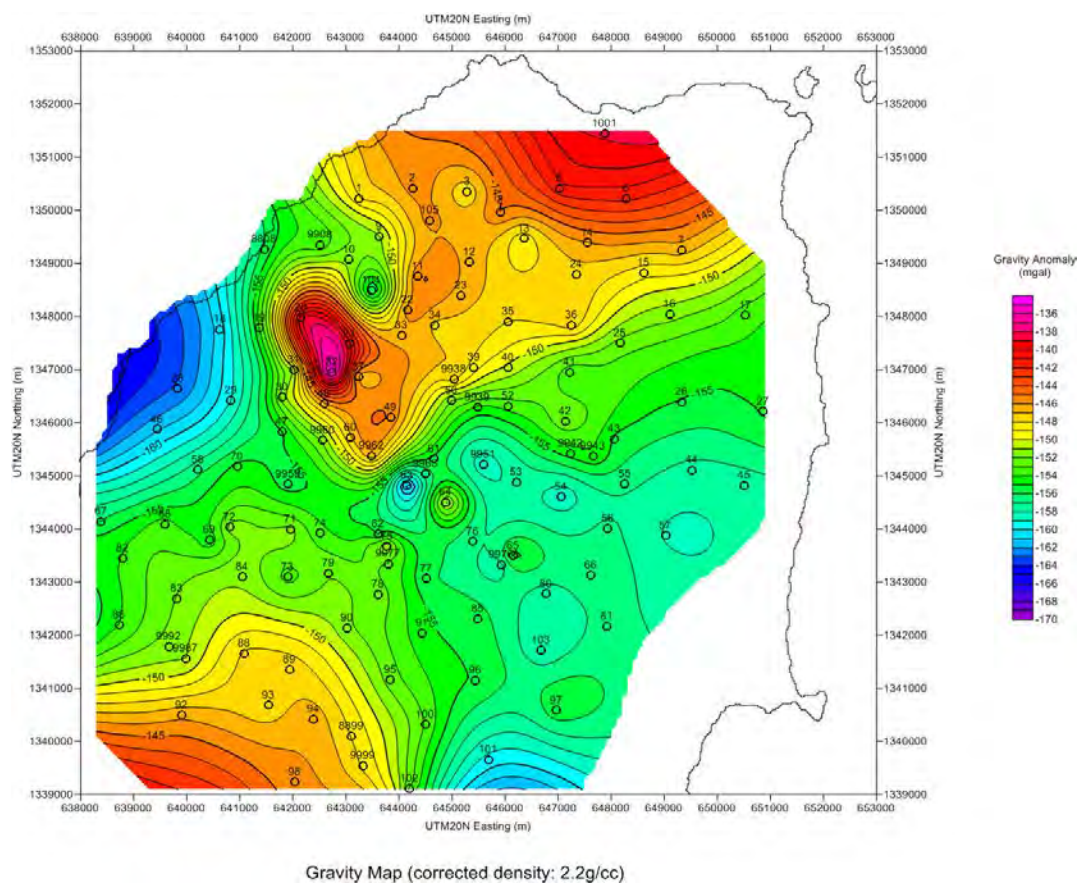
Line No.	Station No.	Geodetic latitude [°]	Geodetic longitude [°]	Altitude [m]	Number of obs.	Abs. gravity [mGal]	RMS [mGal]	Max. error [mGal]	Theor. gravity [mGal]	Free air anom. [mGal]	Bouguer anom. [mGal]	Local [mGal]	Regional [mGal]	Total corr. [mGal]	Complete Bouguer [mGal]	Remarks
0	1111	12.23277749	61.65429942	-5.621	6	979000.000	0.000	0.000	978264.518	733.747	734.376	N/A	N/A	N/A	N/A	BASE
0	14	12.20316952	61.64366593	122.706	1	978971.701			978263.414	746.154	732.423	N/A	N/A	N/A	N/A	
0	24	12.19779141	61.64559346	131.665	1	978968.342			978263.214	745.760	731.027	N/A	N/A	N/A	N/A	
0	35	12.18980949	61.65742295	235.214	1	978944.513			978262.917	754.183	727.863	N/A	N/A	N/A	N/A	
0	36	12.18918468	61.64645173	114.002	1	978970.704			978262.893	742.992	730.235	N/A	N/A	N/A	N/A	
0	6	12.21066138	61.63689578	62.702	1	978989.695			978263.693	745.352	738.335	N/A	N/A	N/A	N/A	

出典：JICA調査団



出典：JICA調査団

図 3-29 G-H 図



出典：JICA調査団

図 3-30 ブーゲ異常図（補正密度 2.2g/cm³）

(3) 調査結果

最適補正密度を 2.2g/cm^3 として作成したブーゲ異常図を図 3-30 に示す（図 3-31 に地形図を示す）。Hapsack、Pegg's Whim を含む調査地域の北側は概ね -150mgal 以上の高重力異常であり、特に Hapsack から Victoria の間では調査範囲内で最も高い（ -136mgal 以上）高重力異常を示す。これらの高重力異常の周囲にはブーゲ異常値が急激に変化する重力急傾斜部（図 3-30 中におけるコンターが密な部分）が分布しており、Hapsack 及び Pegg's Whim 付近には重力急傾斜部が北東-南西方向にほぼ直線上に伸びている。また、Hapsack 付近から北西～北北西方向にも重力急傾斜部が伸びている。一方、調査範囲の東側、Pearls 付近ではブーゲ異常の変化が小さいエリアが広がっている。

このブーゲ異常図を基に下部地殻やマントルなど深部での密度分布に起因する影響を除去して作成した傾向面残差図、フィルター処理した垂直一次微分図、水平一次微分図を作成した。

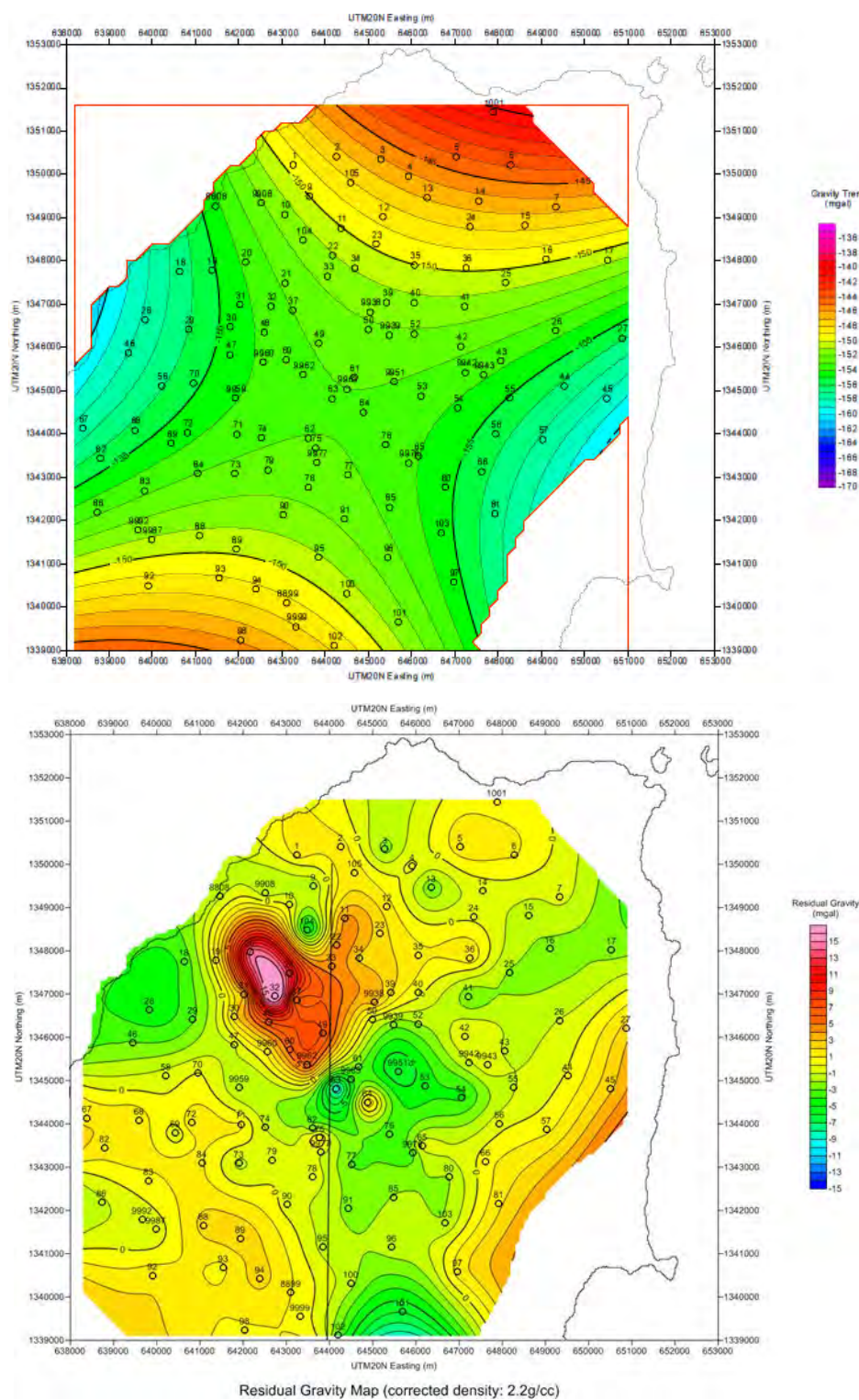


出典：Physical planning Unit 提供データにJICA調査団加筆

図 3-31 グレナダ北部の地図

最適補正密度 2.2g/cm^3 のブーゲ異常図から作成した傾向面及び傾向面残差図を図 3-32 に示す。傾向面残差図では地下浅部の密度分布に比較的強く反映された密度構造をしめす。Hapsack、Pegg's Whim を含む調査地域の北側は概ね 1mgal 以上であり、特に Hapsack から Victoria の間では 5mgal 以上の顕著な高重力異常が北西-南東方向に伸びて分布する。これらの高重力異常の周囲にはブーゲ異常値が急激に変化する重力急傾斜部（図 3-31 中におけるコ

ンターが密な部分) が分布している。一方、Hapsack 及び Pegg's Whim 付近には重力急傾斜部が上記の方向と直角方向の北東-南西方向にほぼ直線状に伸びている。



出典：JICA調査団

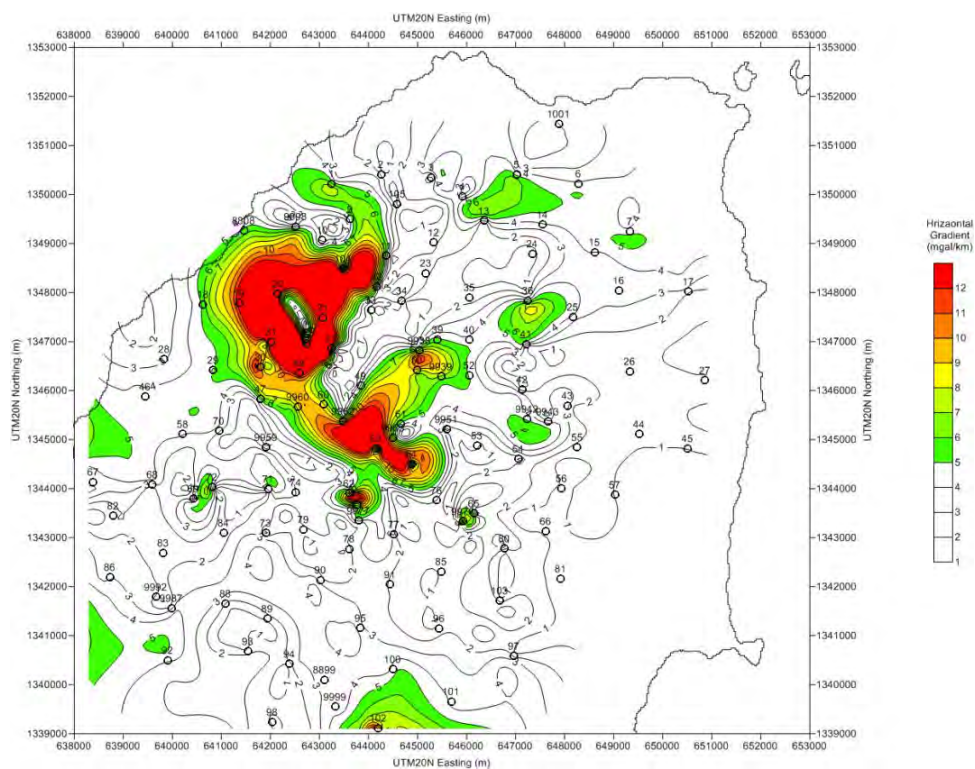
図 3-32 傾向面（上）及び傾向面残差図（下）

最適補正密度 2.2g/cm^3 のブーゲ異常図から作成した水平一次微分図を図 3-33 に示す。水平一次微分図は重力値の水平方向変化を微分した値であり、水平一次微分値が大きいほど地下における密度差（ギャップ）が大きい（図 3-27）。Hapsack 付近では水平一次微分値が高いゾーンが認められ、Pegg's Whim に向かう北東-南西方向と Victoria に向かう北西-南東方向の 2 方向に延びていることがわかる。また、グレナダ北西部の Waltham と Victoria 間にも局所的に高い水平一次微分値を示している地点が認められる。

最適補正密度 2.2g/cm^3 のブーゲ異常図から作成した垂直一次微分図を図 3-34 に示す。垂直一次微分図は重力値の変化率を微分した値であり、地下における密度差（ギャップ）が最も大きい箇所ではゼロを示す（図 3-27）。垂直一次微分値がゼロを示すコンターは Hapsack から北東の Pegg's Whim、Cambord にかけての北東-南西方向や、Hapsack から北西の Victoria にかけての北西方向、および Hapsack の南における Gouyave から Clabony を通る北西-南東方向に沿って分布している。また、Castle hill 付近にも垂直一次微分値がゼロを示すコンターが分布しているコンターの伸びは全体的に北西-南東方向及び北東-南西方向が卓越している。

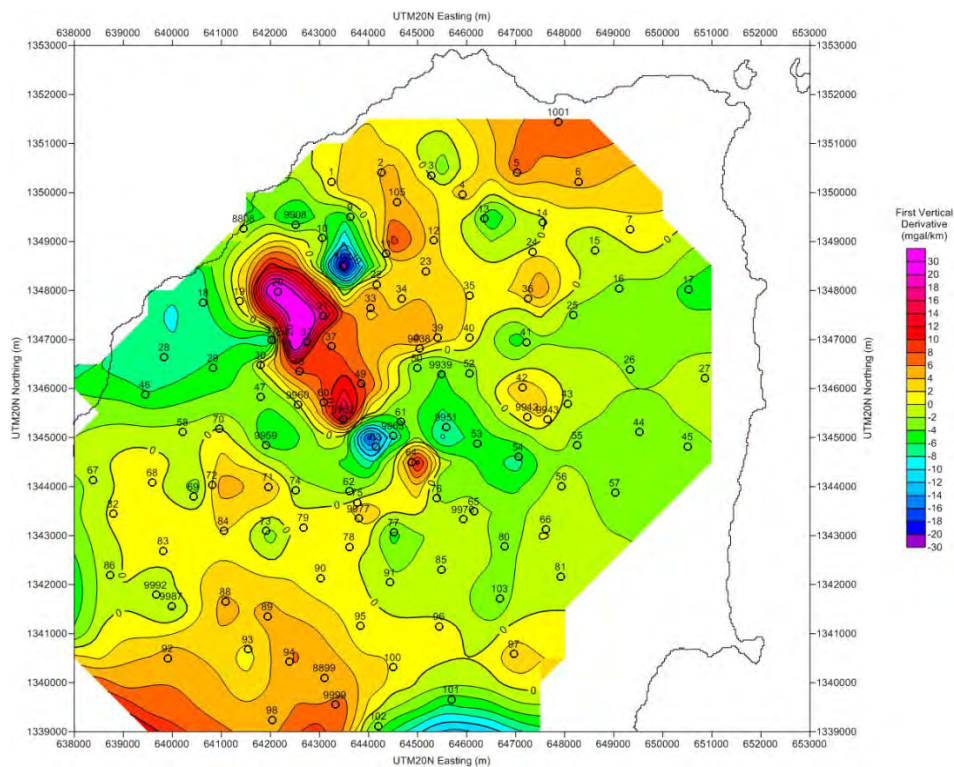
傾向面残差図から推定した解釈密度分布を図 3-35 に示す。この解釈密度分布は地下での密度分布を 3 次元的に検討したものである（地下の密度分布を 2 層構造として解析したものが基盤密度分布である）。図示した密度は 2.2g/cm^3 を基準に作成したものであり、地下での実際の密度を反映しているものではない。顕著な高重力異常が分布する Hapsack から Victoria の間では浅部（0 msl）において比較的高密度を示すスポットが多数分布しており、地下深部（-2000msl）になるにつれてそれぞれのスポットが互いに連係して北西-南東方向に高密度ゾーンとして繋がっているように見える。いくつかのスポットには地上で貫入岩の分布とも重なることから、Hapsack から Victoria の間には貫入岩体が密集していると解釈できる。

一方、地下深部（海拔 0msl 以深）では St.Catherine 山及び周辺がその外側に比べて解釈地層密度が相対的に小さくなっている（図 3-35 の下図）。地下深部において解釈地層密度が小さい部分は傾向面残差図において低重力異常となっており（図 3-32 下）、第四紀の St.Catherine 火山噴出物（溶岩ドームを除く）及び未区分の火山噴出物（undifferential volcanics）の分布とほぼ重なっている（図 3-3）。このような重力構造は St.Catherine 山周辺の地下に多角形のカルデラ構造の伏在を示唆していると考えられる。この場合、未区分の火山噴出物（undifferential volcanics）がカルデラ充填物、St.Catherine 火山噴出物が後カルデラ火山噴出物に対比されると推定する。



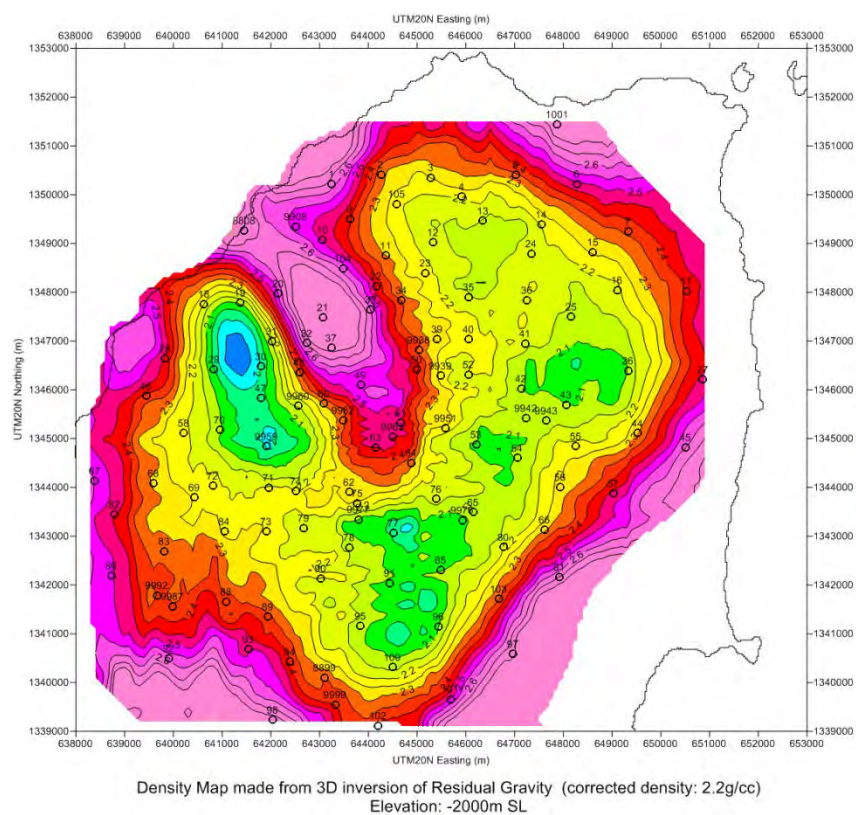
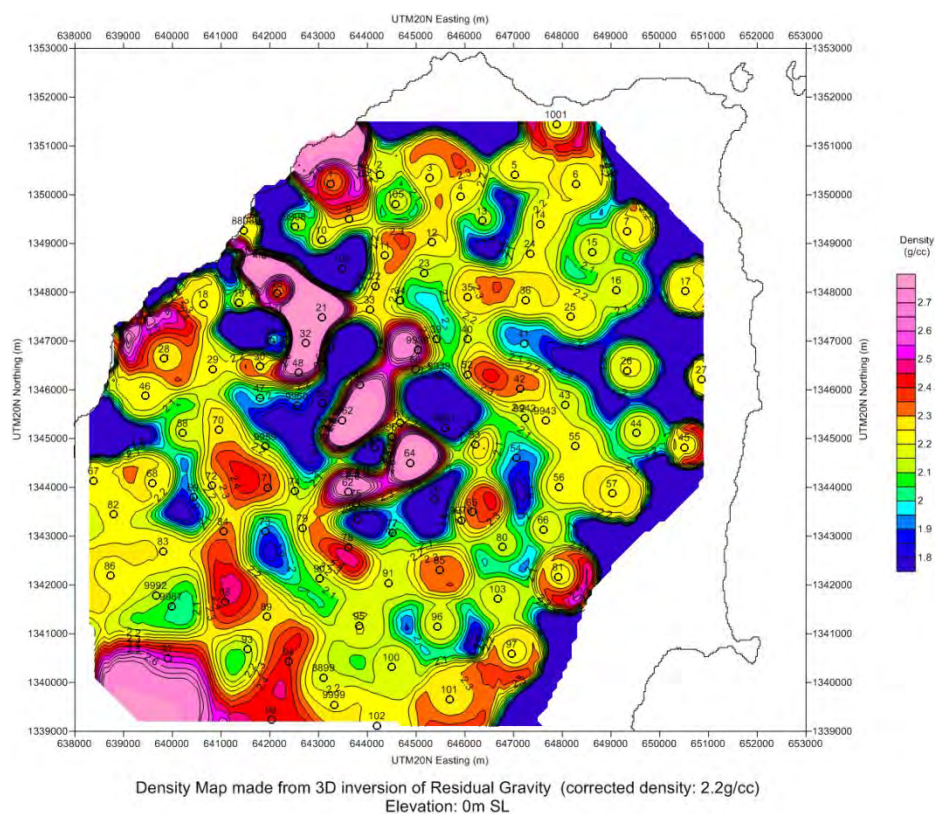
出典：JICA調査団

図 3-33 水平一次微分図



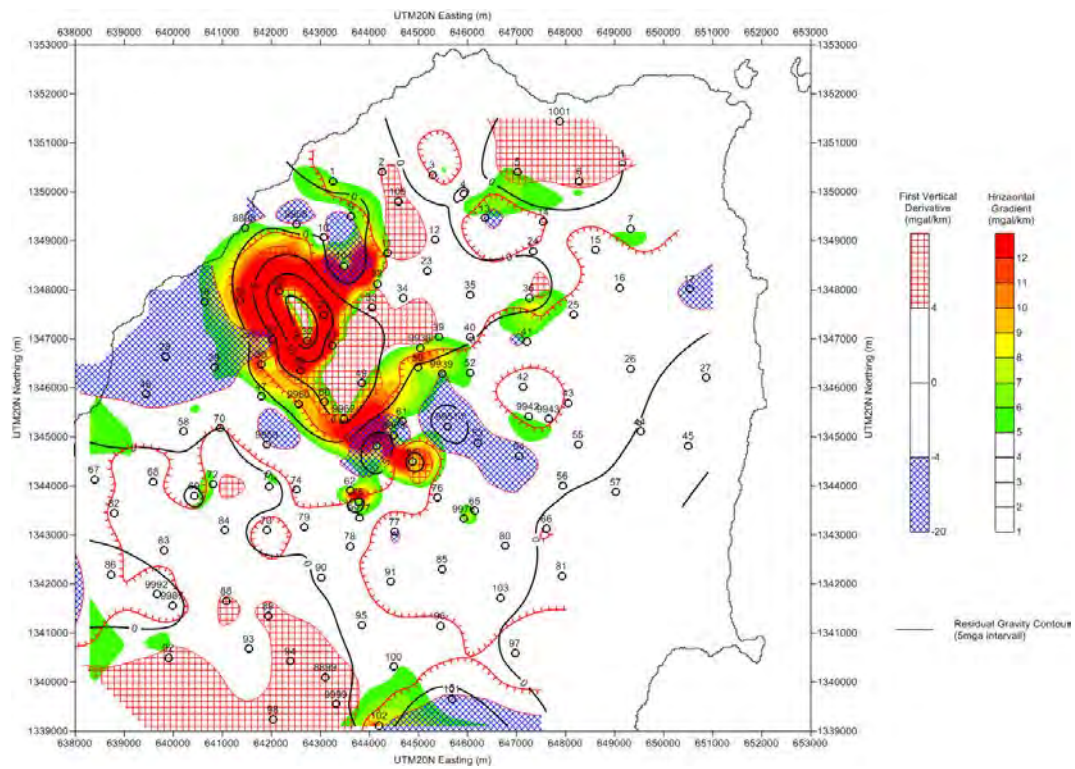
出典：JICA調査団

図 3-34 垂直一次微分図



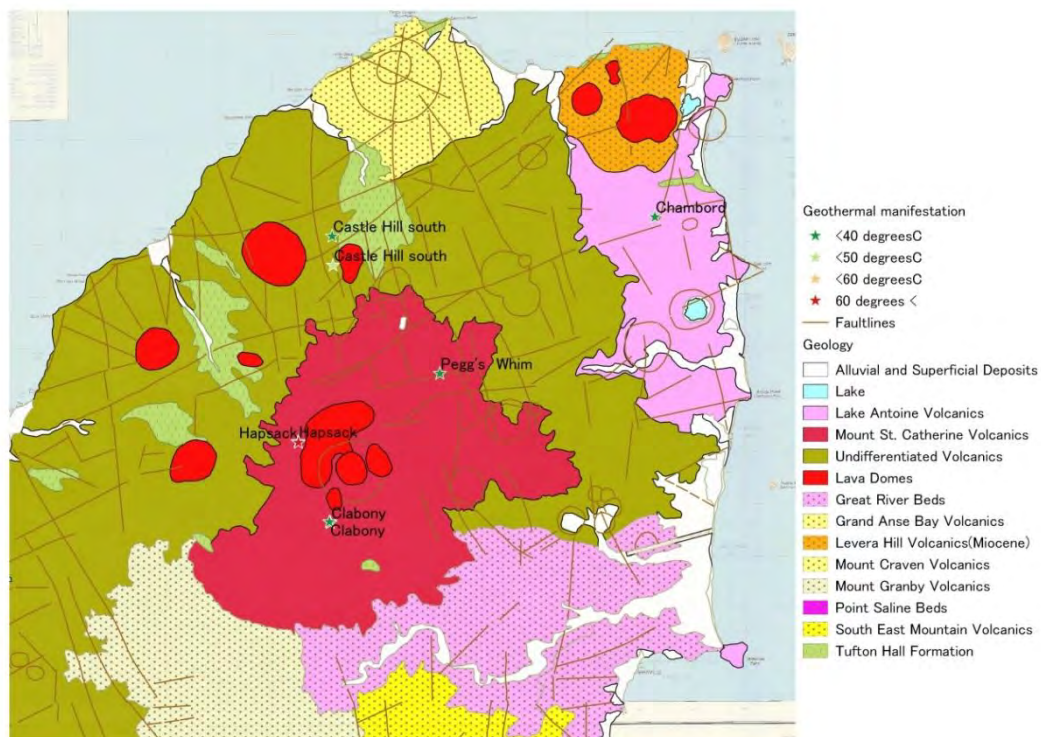
出典：JICA調査団

図 3-35 重力測定から推定した地下での解釈密度分布



出典：JICA調査団

図 3-36 水平一次微分図と垂直一次微分図の重ね合わせ



出典：JICA調査団

図 3-37 グレナダ北部の地質図

垂直一次微分及び水平一次微分を重ねたものを図 3-36、対比される地質図を図 3-37 に示す。Hapsack から北東の Pegg's Whim、Chambord の間には北東-南西方向に垂直一次微分のゼロを示すコンター線、高い水平一次微分値を示すエリアが重なるように点在している。この方向は地表においても北東-南西方向に分布するリニアメントとも重なっていることから、高傾斜で北東-南西走向の断層が存在していると考ええる。さらに、推定された断層付近では地表において地熱徴候（Hapsack、Pegg's Whim）が分布することから、地熱流体の流動も規制している可能性が高いと考ええる。

一方、Hapsack から北西の Victroia 間にも St. Marks 川に沿うように垂直一次微分のゼロを示すコンター線、高い水平一次微分値を示すエリアが重なるように分布している。このため、St. Marks 川に沿うように断層が存在する可能性がある。ただし、Hapsack から北西の Victroia 間には地表において多数の溶岩ドームが密集していることから、地下における溶岩ドーム直下の火道を充填する貫入岩や地下に伏在する貫入岩と母岩との密度境界分布を反映している可能性もある。

3-3-4 NZ 支援 地表調査結果概要

(1) 調査内容概要

本調査で実施した地表調査の結果概要は以下の通りである。

1) 地質調査結果

- 調査地域では下位より後期始新世～前期漸新世の Tufton Hall 層、中新世～更新世の火山噴出物、更新世～完新世の火山噴出物からなる(図 3-3)。調査地域の中央には Saint Catherine 火山があり、山頂には溶岩ドームが形成されている。また、Saint Catherine 火山の北西山麓には複数の溶岩ドームが火山噴出物及び Tufton Hall 層を覆っている (Jacobs,2015)。
- Saint Catherine 火山には今から 1,000 年前までに火山活動を起こした可能性がある (Global volcanic program, 2015)。また、Saint Catherine 火山周辺には Hapsack 等の地熱徴候地が密集する。Saint Catherine 火山のマグマ溜まりは熱源になり得ると考える。
- Saint Catherine 火山周辺のいくつかの地熱徴候地では岩石が変質している。このうち、Hapsack では珪化変質を受け、硫黄が析出している。Peggy's Whim、Castle hill 及び Clabony ではスメクタイトあるいは混合層粘土鉱物の変質により岩石に生じている。
- 地形解析によるリニアメント、地表踏査で確認した地熱徴候分布、褶曲軸、地層の走向は主に北東-南西走向が卓越する。リニアメントについては北西-南東、北北西-南南東走向のものも分布する (Jacobs,2015)。

2) 地化学調査結果

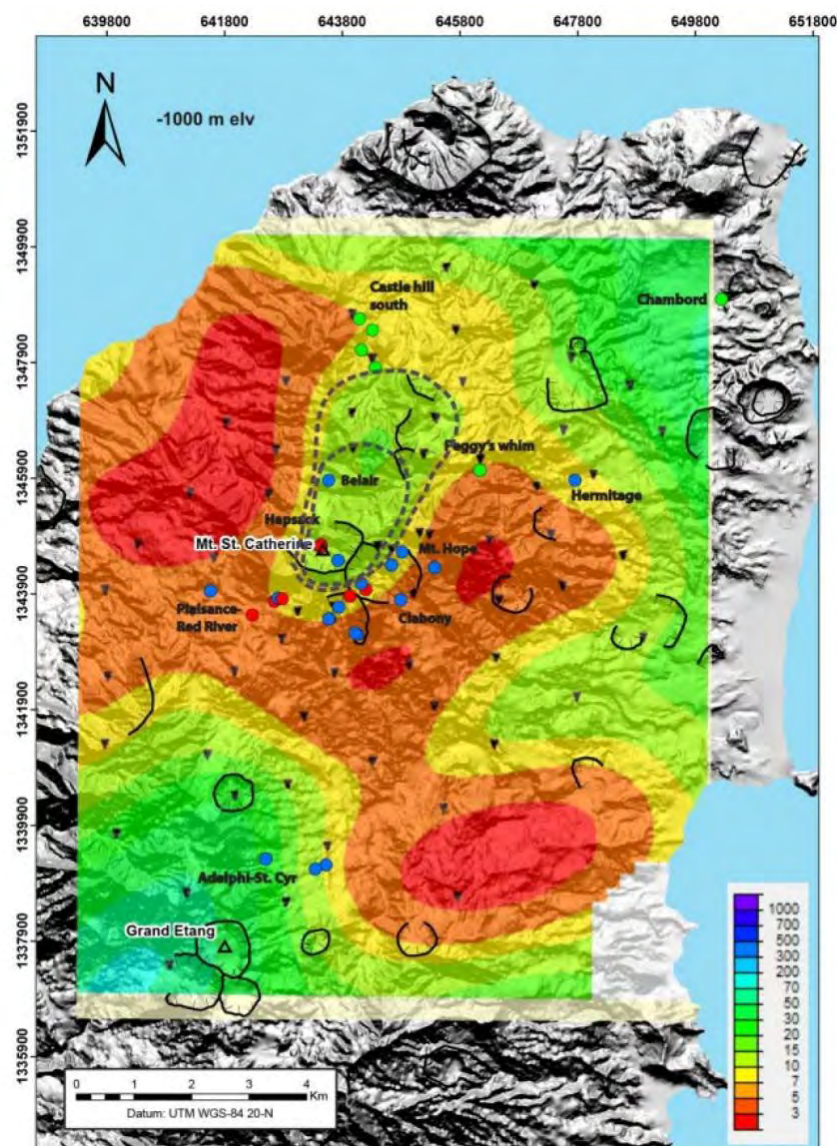
- 本調査では Saint Catherine 火山周辺には Hapsack、Peggy's Whim、Castle hill、Clabony 及び Chambord で試料採取と現地測定 (温度、pH、電気伝導度) を実施し、Jacobs(2015)

とほぼ同じ値を示すことを確認した。Hapsack では最も高い温泉水温度 61.4℃を示す。

- グレナダの温泉水は pH と陽イオンの情報から 3 タイプに分類できる。Hapsack 及び Plaisance-Red River に分布する硫酸酸性型温泉、Peggy's Whim、Castle hill 及び Chambord に分布する中性から弱アルカリ性の食塩(Na-Cl)型温泉、そして Clabony に代表される重炭酸型温泉の 3 つである。これら 3 つのタイプの温泉の湧出は、安山岩質火山地域の高温地熱系において共通して認められるものである。
- 硫酸酸性型温泉である Hapsack 及び Plaisance-Red River では温泉水に伴って H₂S ガスのバブリングを伴い、温泉水は酸性である。これらの温泉は他タイプの温泉に比べて Saint Catherine 火山の近くに位置し、標高は高い。
- グレナダの温泉水は水-岩石反応において未成熟である (図 3-26)。しかし、温泉の Na-K-Mg 三成分系でのプロット (図 3-8) から、グレナダの温泉水は地熱貯留層から湧出した温度約 220℃の平衡に達した (熟成した) 熱水を起源に含んでいると解釈することが可能である (Jacobs,2015)。
- グレナダの温泉のうち、含気泡温泉(バブリングプール)が産する気泡中のガスについてはマグマ性ガスの寄与が認められる (図 3-9)。ガス温度計からは 290℃と推定される (Jacobs,2015)。

3) 物理探査結果

- 本地域の比抵抗分布について、10Ωm 以下を示す低比抵抗層の層厚は地形標高の高い部分では薄く、その周辺では厚くなっている。その下端面はドーム状の構造を示す。地表の地熱徴候地は低比抵抗層が薄くなっているエリア及びその周辺に分布しており、地表の地熱徴候地では比抵抗を下げるスメクタイト、混合層粘土鉱物が分布していることから、低比抵抗層は地熱貯留層のキャップロックであるとの解釈がなされている (図 3-38)。
- 本地域の重力分布をみると、Hapsack、Peggy's Whim を含む調査地域の北側は概ね -150mgal 以上の高重力異常であり、特に Hapsack から Victoria の間では調査範囲内で最も高い (-136mgal 以上) 高重力異常を示す。これらの高重力異常の周囲にはブーゲ異常値が急激に変化する重力急傾斜部 (図 3-30 中におけるコンターが密な部分) が分布し、Hapsack 及び Peggy's Whim 付近には重力急傾斜部が北東-南西方向にほぼ直線状に伸びている。

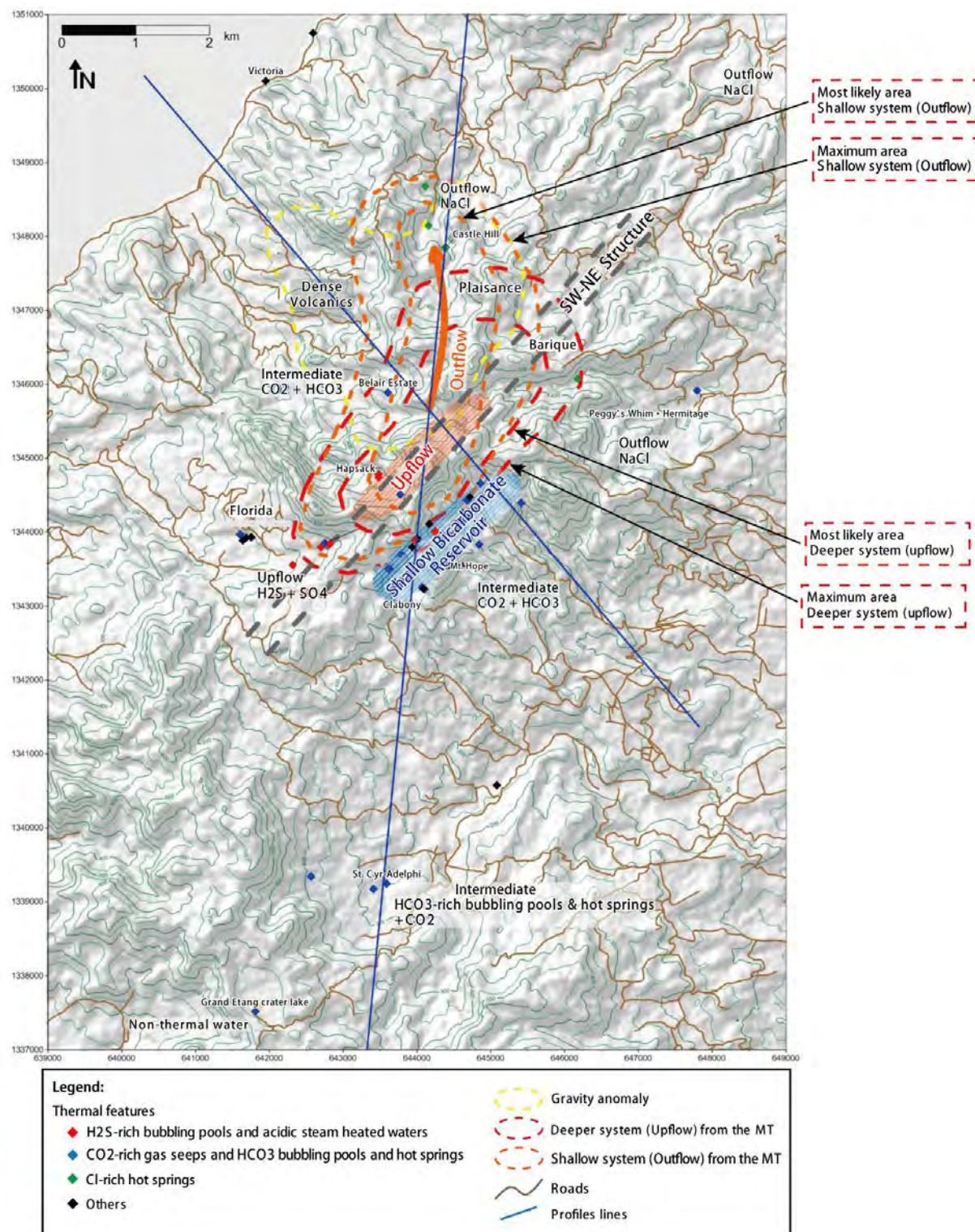


出典：Urzua et al., 2015

図 3-38 3次元解析による比抵抗分布図（海拔-1,000m）

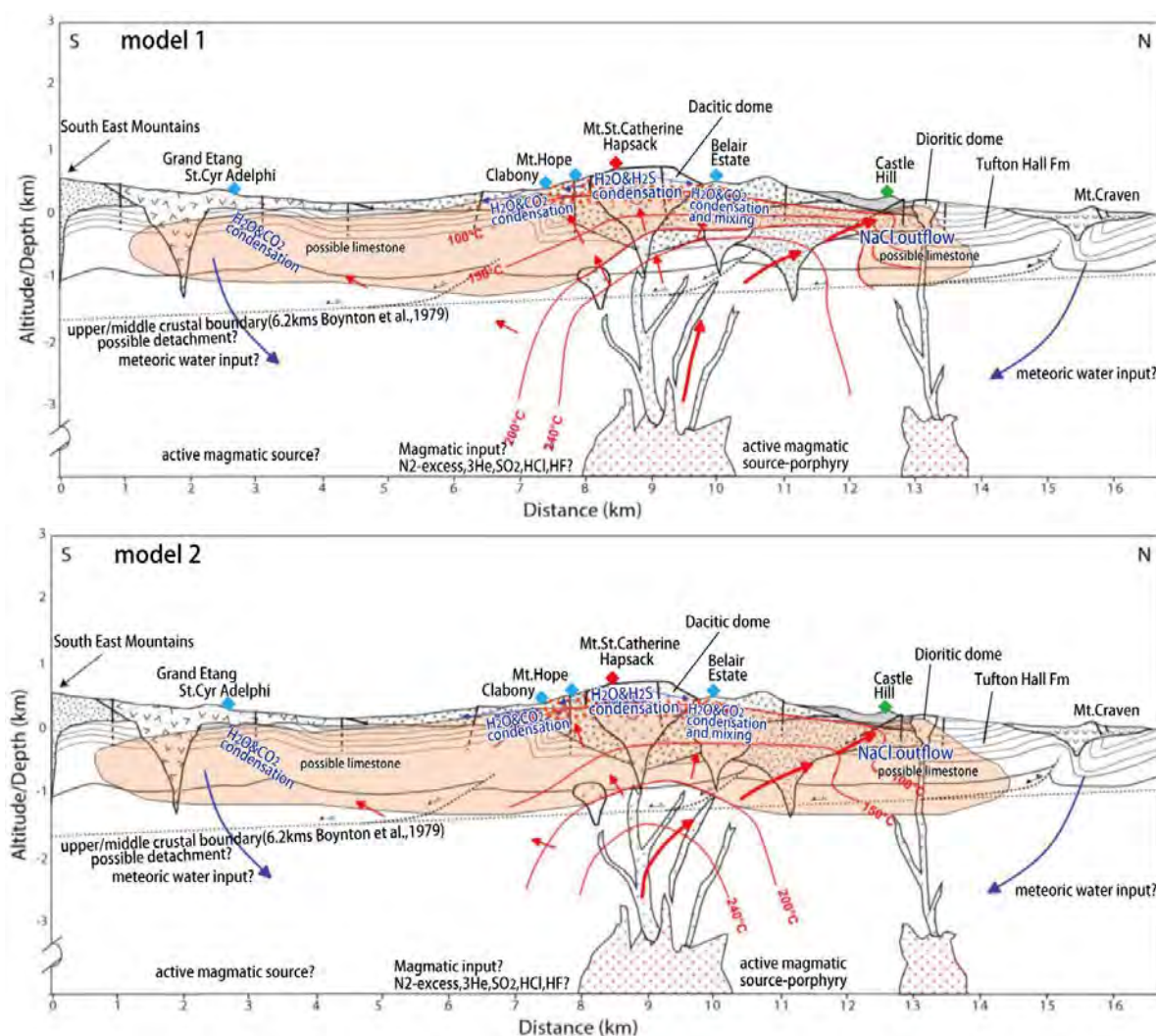
(2) 地熱系概念モデル、貯留層概念モデル

図 3-39～40 に地熱系概念モデルを示す。



出典：Jacobs(2016)にJICA調査団が加筆

図 3-39 推定される地熱貯留層範囲平面図



出典：Jacobs(2016)にJICA調査団が加筆

図 3-40 推定される地熱貯留層断面図

モデル 1 は貯留層の温度は地表での温泉の地化学組成、比抵抗分布の検討から概ね 200～290℃の地熱貯留層が地下浅部まで広がり、調査地域北部では側方に地熱流体が流動していると推定するモデルであり、モデル 2 は地表において沸騰泉を伴う噴気帯がないことからキャップロックが厚く、高温の地熱貯留層が地下深部にのみ分布するという可能性を示唆したモデルである。

Jacobs (2016) の既存調査及び JICA 調査団の調査（地質、地化学、重力）結果を踏まえて 2 つの貯留層概念モデルを作成した（図 3-39～40）。両方の貯留層概念モデルとも断裂構造及び推定される地熱貯留層のタイプ（Cl-rich 熱水卓越型地熱貯留層）はほぼ同じである。ただし、地表に沸騰泉を伴う自然噴気帯が存在しないことの解釈の違いから異なる貯留層概念モデルが考えられる。以下に各モデルの根拠を述べる。

1) 貯留層モデル 1

【断裂構造】

- 地形解析や断裂解析、重力分布から推定される St.Catherine 火山周辺に分布する北東-南西走向の断層に伴う断裂群、溶岩ドームの下に伏在する貫入岩（火道）に伴う断裂群は主に地熱流体の上昇に寄与していると考える。特に、Hapsack から北東の Pegg's Whim 付近では重力解析や地形解析から北東-南西走向の断層が推定され（図 3-32）、地熱流体の主な上昇域になっている可能性が高いと考える。
- St.Catherine 火山から北側では主にリニアメントから推定される北西-南東走向の断層に伴う断裂も北東-南西走向の断層とともに地熱水の側方流動に寄与している可能性があると考ええる。

【流体流動】

- St.Catherine 火山の近くで標高の高いところに Hapsack と Plaisance-Red River 地域に見られるような硫酸酸性型温泉、火山の北側でやや標高が低いところに Castle Hill South、Chambord および Peggy's Whim で見られるような食塩型温泉が点在していることから、Hapsack と Plaisance-Red River 付近の下に地熱熱水の上昇域が存在して Cl-rich の熱水卓越型貯留層が形成されていると考ええる。
- St.Catherine 火山の北側には食塩型温泉が分布する。このことから Hapsack 付近で地下深部から上昇した地熱流体は北側に流動して浅部貯留層を形成し、更に Castle Hill South、Chambord および Peggy's Whim に向かって表層地下水により希釈されつつ側方流動していると考ええる。
- Hapsack と Plaisance-Red River 地域に見られる硫酸酸性型温泉分布域の直下では上昇してくる地熱流体から分離した水蒸気及びガス（CO₂、H₂S）が上昇し、地表付近を流動する天水を加熱して硫酸酸性型温泉を形成していると考ええる。ただし、St. Catherine 火山周辺は表層近くの地下水流動が多く、貯留層から上昇してきた水蒸気＋ガスを凝縮させているために、地上では沸騰泉を伴う噴気帯は存在しないと考ええる。
- St.Catherine 火山の外側では、主に天水が断層や褶曲構造に伴う断裂に沿って地下に浸透し、リチャージ域になっていると考ええる。

【温度】

- 温泉の地化学温度、比抵抗分布及び変質鉱物（図 3-22：地層中にスメクタイトを含む）のデータから、低比抵抗（主に 10 Ω・m 未満）分布の下限は約 200℃の地層温度を反映している可能性を考える。
- 地表の地熱徴候、温泉水及びガスの地化学温度からは約 200℃以上、あるいは 290℃未満の貯留層温度が想定できる。

【地熱貯留層】

- 硫酸酸性型温泉と食塩型温泉の分布状態から判断すると、食塩型温泉の側方流動は浅い深度で生じている可能性がある。このため貯留層深度は推定海拔-1,000m より浅い位置に分布する可能性がある（Jacobs の NZ での経験）。
- 地熱徴候分布と低比抵抗分布（図 3-39：キャップロックを反映していると解釈）から貯留層の範囲は約 4～8km² と推定される。

2) 貯留層モデル 2

【断裂構造】

断裂構造に関する根拠はモデル 1 と同じである。

【流体流動】

- Saint Catherine 火山の近くで標高の高いところに Hapsack と Plaisance-Red River 地域に見られるような硫酸酸性型温泉、火山の北側でやや標高が低いところに Castle Hill South、Chambord および Peggy's Whim で見られるような食塩型温泉が点在していることから、Hapsack と Plaisance-Red River 付近の下に地熱熱水の上昇域が存在して Cl-rich の熱水卓越型貯留層が形成されていると考えるのはモデル 1 とおなじである。
- Hapsack と Plaisance-Red River 地域に見られる硫酸酸性型温泉分布域には沸騰泉は確認されない。この解釈としてモデル 2 ではモデル 1 に比べてキャップロックが厚く、高温の地熱貯留層の分布深度が深いために、地熱流体から分離した水蒸気及びガス（CO₂、H₂S）が上昇中に冷やされていると考える。
- Saint Catherine 火山の北側には食塩型温泉が分布することから上昇した地熱流体は北側に流動して浅部貯留層を形成し、更に Castle Hill South、Chambord および Peggy's Whim に向かって表層地下水により希釈されつつ側方流動していると考えるのはモデル 1 と同様である。ただし、モデル 1 に比べて高温の地熱貯留層の分布深度が深い可能性があるため、側方流動する地熱流体の温度は比較的低いと予想する。
- Saint Catherine 火山の外側からは主に天水が断層や褶曲構造に伴う断裂に沿って地下に浸透し、リチャージ域になっていると考えるのはモデル 1 と同じである。

【温度】

- 地表の地熱徴候、温泉水及びガスの地化学温度からは 200℃程度、あるいは 290℃未満の貯留層温度が想定できる。しかし、高温の地熱貯留層に伴うことが多い沸騰泉を伴う噴気帯が地表にないことから、高温の地熱貯留層は地下深部に分布すると推定する。

【地熱貯留層】

- Jacobs(2016)はニュージーランドでの地熱開発の経験から地表に沸騰泉を伴わない場合では深度約 1,500mより深部に高温の地熱貯留層が存在すると予想している。この場合、St. Catherine 火山深部の北東-南西走向の断層のみに高温の地熱貯留層が分布していると予想する。

(3) 貯留層評価

Huttrer and Michels(1993)では Saint Catherine 火山周辺に想定される地熱貯留層 (200°C 程度) について 30-50MW と試算している。

一方、Jacobs(2015、2016)は、地表調査結果を踏まえ、貯留層範囲及び貯留層温度を推定し、Power Density も参考にして 20－95MW のポテンシャルを有している可能性を示した。

【容積法による資源量評価】

調査団は容積法を用いて資源評価を行った。計算式は、下記地上条件を明確に設定できる改良式を使用した。式の説明は巻末論文に示した。

- プラントタイプ：フラッシュ復水式
- セパレーター温度：151.8 °C
- コンデンサー温度：40 °C
- エクセルギー係数：0.77±0.05 （上記2 温度条件の時）

計算結果は表表 3-11 の通りとなった。その他計算に利用したパラメーターは、表 3-12 に示した。その結果、モデル 2 が Jacobs(2015,2016)評価とほぼ一致することが分かった。

表 3-11 容積法（改良式）による資源量評価

Occurece probability	80%	最頻値	20%
Model-1	30 MW	53 MW	121 MW
Model-2	21 MW	39 MW	87 MW

出典：JICA調査団

表 3-12 容積法計算に使用したパラメーター

Parameters		unit	min	mode	max	distribution	note
Size of Area		A	km ²	4	6	8	triangle
Thickness	Model-1	d	m	-	1500	-	fixed
	Model-2	d	m	-	1000	-	
Reservoir temperature		t _r	°C	200	245	290	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	%	3	-	17	uniform
Separator temperature		t _{sd}	°C	-	151.8	-	fixed
Condensor temperature		t _{cd}	°C	-	40	-	fixed
Exergy efficiency		η _{ex}	%	72	77	82	triangle Included in the equation
Plant factor		F	%	-	96	-	fixed
Plant life		L	year	-	25	-	fixed

出典：JICA調査団

ただし、これらの評価は、現時点では地下温度分布、透水性に関する直接的データは得られていない。試掘後に再評価をすべきであるとする。

【引用文献】

- Hutterer, G., W. and Michels, D., E. (1993) Final report regarding prefeasibility studies of the potential for development in Grenada. W., I.: Prepared under geothermal mgmt. Co. Inc., Frisco Colo., submitted to national geothermal association, march, 73pp.
- 物理探査学会（1998）物理探査ハンドブック 手法編（第8章～第12章）.物理探査学会.
- Jacobs (2015) Grenada geothermal surface exploration. Integrated report: Geology, Geochemistry & Geophysics. VH00001.04-TEC-RPT-004C. 30 August 2015.
- Jacobs (2016a) Government of Grenada. Geothermal resources development roadmap. Conceptual 3*5MWe project at Mount St. Catherine.
- Jacobs (2016b) Grenada geothermal surface exploration. Integrated report: Geology, Geochemistry & Geophysics. RZ020300.04-TEC-RPT-007 C. 24 March 2016.
- Urzua, L., Benavente, O., Brookes, A. and Ussher, G. (2015) Grenada geothermal surface exploration. Proceedings 37th New Zealand Geothermal workshop 18-20 November 2015.
- Takahashi, S. and Yoshida, S (2016) Improvement of calculating formulas for volumetric resource assessment. Geothermics 64: 187 – 195, November 2016 (DOI: 10.1016/j.geothermics.2016.04.011)

3-3-5 試掘計画

(1) 構造試掘井の提案

グレナダ国北部、キャサリン山麓には既存調査及び本調査結果から地熱貯留層が存在する可能性があることが示されている。しかし、現時点では以下の3点に不確定要素がある(Urzua et al., 2015)。

- ・ 貯留層温度：地表の地熱微候、温泉水及びガスの地化学温度からは 200℃程度、あるいは 290℃未満の貯留層温度が想定できるが、高温の地熱貯留層に伴うことが多い沸騰泉を伴う噴気帯が地表にないことから、貯留層温度が想定よりも低い可能性がある。
- ・ 透水性：火山に伴う地熱貯留層は主に火砕岩に貯留していることが多く、そこでは火砕岩が破碎されて比較的高い透水性を有していることが多い。しかし、グレナダの場合、開発対象となりうる地層は、主に頁岩 (shale)、シルト岩及び泥灰岩等の堆積岩からなり、さらに下位には石灰岩の分布が予想されている。このような岩石からなる地層にも高透水性ゾーンが存在するかどうかは不明である。
- ・ 貯留層の規模：貯留層の規模は地熱微候分布と比抵抗分布、特に低比抵抗（主に 10 $\Omega \cdot m$ 未満）分布をもとに、地熱熱水変質で生じたスメクタイトが低比抵抗分布を規制、すなわち、Cap rock を形成しているという推定を踏まえて見積もっている。しかし、開発対象の地層にはもともとスメクタイト (native smectite) が含まれていることから、低比抵抗分布から推定した Cap rock が実際よりも広く見えている可能性がある。

以上のように、地熱資源の有無や規模に不確定要素があるため、生産井仕様の試掘井を掘削するまえに、比較的安価で小規模な工事となる小口径の構造試掘井を数本掘削するステップを推奨する。構造試掘井は、地下の温度・圧力分布や貯留層の有無を確認する目的で掘削するものである。

(2) 掘削位置の選定

地形解析および現地調査により、掘削作業用地が確保できる可能性がある地域を選定した(図 3-41 の A~G ゾーン)。そのうち、掘削位置の候補として大規模な土木工事を必要とせずにリグの運搬や設置および掘削作業が可能な C、D 及び F の 3 ゾーンを選定した(3-3-6 章詳述)。掘削計画は、掘削を C、D 及び F の 3 ゾーンから行うこと原則として立案した。ただし、これら 3 ゾーンは推定されるアップフローの周縁部に位置するため、可能な限りアップフローの中心部で掘削する案についても検討した。以下に次の 3 案について検討した結果を記述する。

- ① 掘削計画案 -1：可能な限りアップフローの中心部で掘削する案
- ② 掘削計画案 -2：C、D 及び F から垂直掘削する案
- ③ 掘削計画案 -3：C、D 及び F から傾斜掘削する案

このうち、構造試錐井として、掘削計画案-2 が最も適切であると考ええる。

【掘削計画案 -1：可能な限りアップフローの中心部で掘削する案】

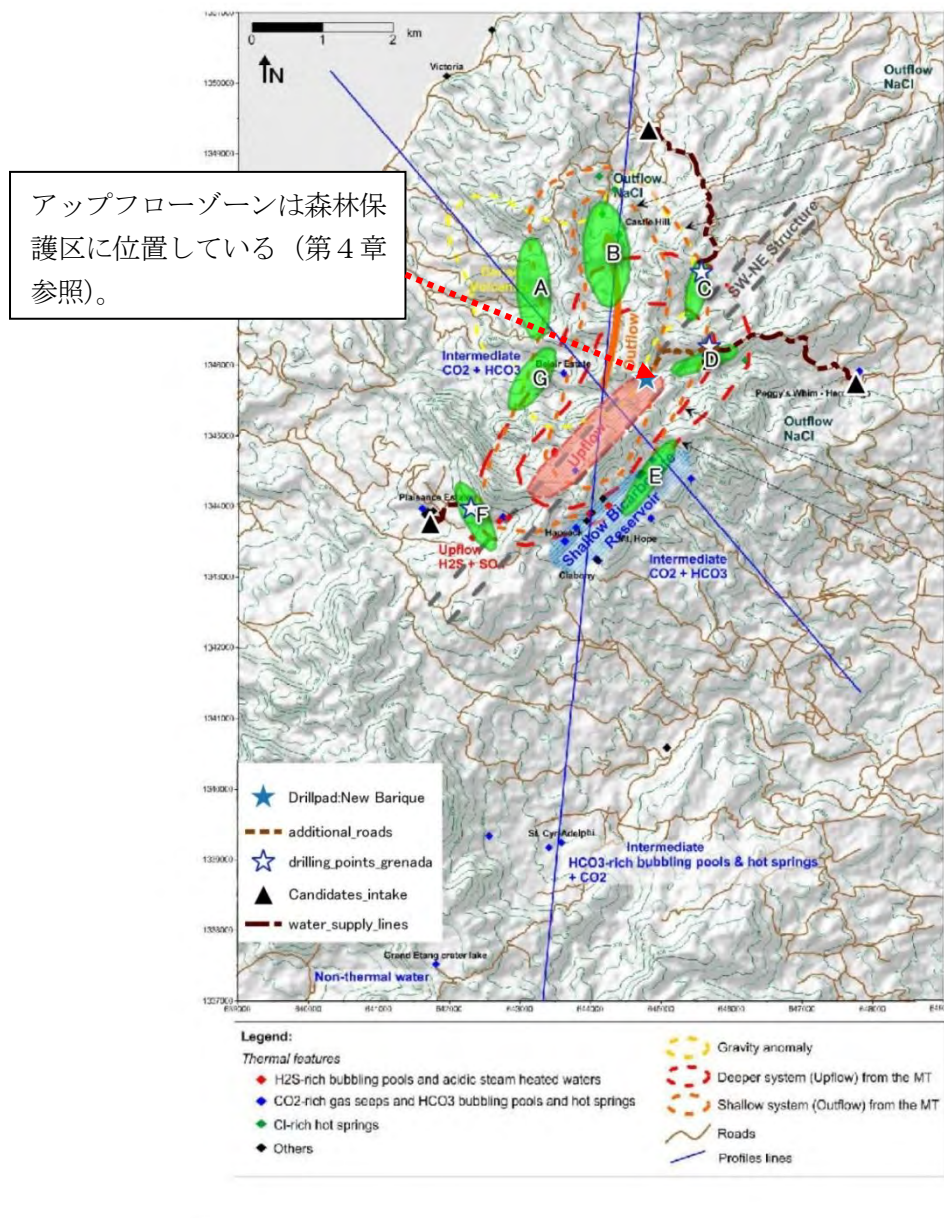
この案を実現するためには、技術的には、D ゾーン（Barique）から南西に約 1.5km 先まで仮設道路を設置できる可能性がある。しかし、以下の 2 点から構造試錐井掘削の実現性は低いと判断される（図 3-41）。

- 最有望ゾーン（upflow zone）は森林保護区（protection area）にある（図 3-60）。
- 現状では徒歩用の登山道しかなくかつ起伏が大きい地形である。このため、この地点で試掘工事を行うためには、大規模な土木工事が必要である。
- グレナダ側の環境保護に対する関心が極めて高い（2016 年 6 月のフォーラムでの質疑応答からも明らか）ことから、保護区内での試掘及び仮設道路建設には調整が難航することが予想されること。
- 貯留層の有無が確認されていない段階での調査としては、実施に至るまでのハードルが高い。

【掘削計画案 -2: C、D 及び F から垂直掘削する案】

現地踏査により C、D 及び F の 3 ゾーンでは、リグの運搬や掘削作業が比較的容易に実施できると考えられる（3-3-6 章詳述）。掘削地点位置図を図 3-42、貯留層モデル 1 および貯留層モデル 2 における、試掘ターゲットを図 3-43 に示した。構造試錐井掘削深度は、小規模なリグを使用することを前提とし、かつ可能な限り深く掘削する計画として、深度 2,000m の構造試錐井（垂直）と計画した。掘削深度を 2,000m とすることで、貯留層モデル-2 のようにキャップロックが厚い場合でも貯留層に達することを想定する。これにより、地下における温度圧力分布、地質及びフラクチャ分布に関する情報が得られ、地熱流体流動の推定、資源量評価の精緻化が可能になると考える。

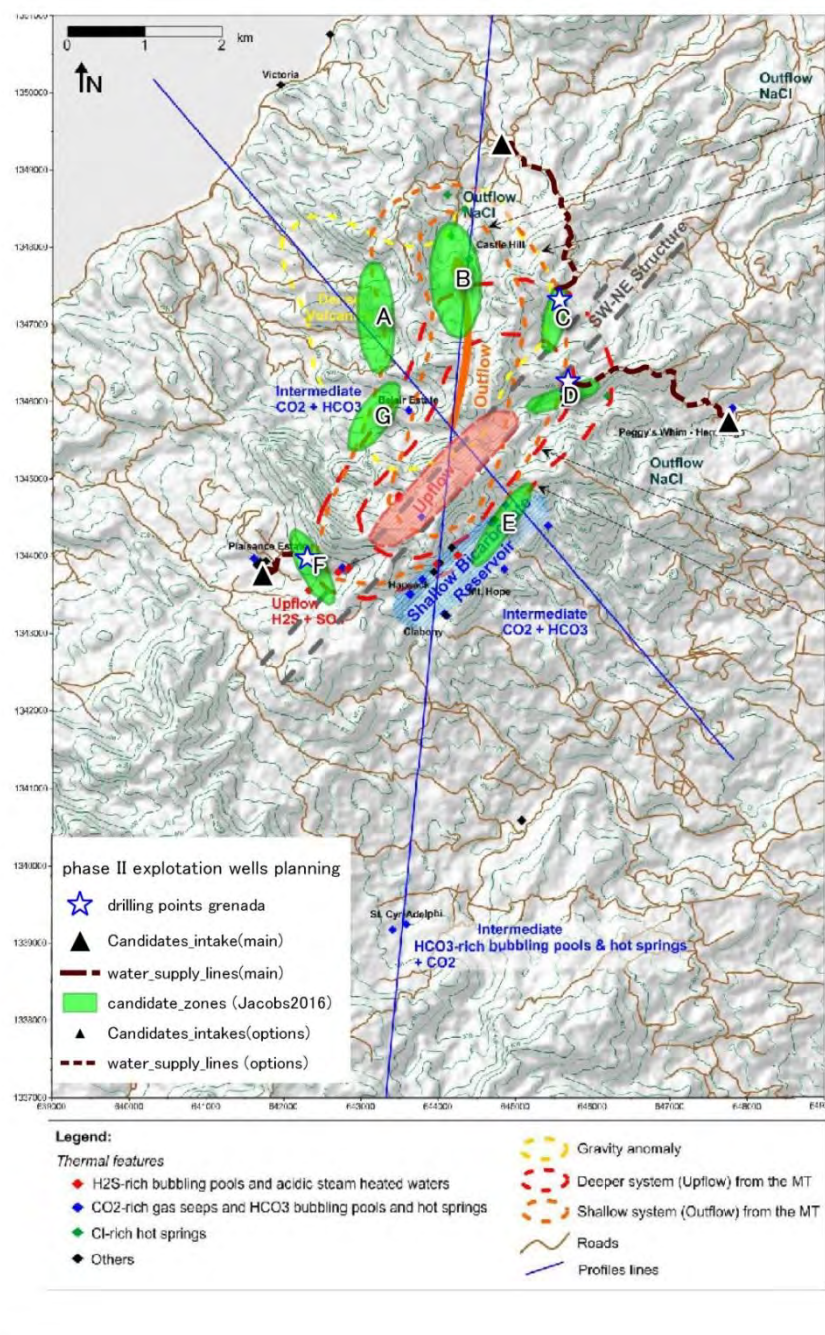
表 3-13 にはターゲット一覧を示す。



出典：Jacobs(2016)にJICA調査団が加筆

図 3-41 掘削計画案-1：アップフローゾーン上で試掘を行う場合

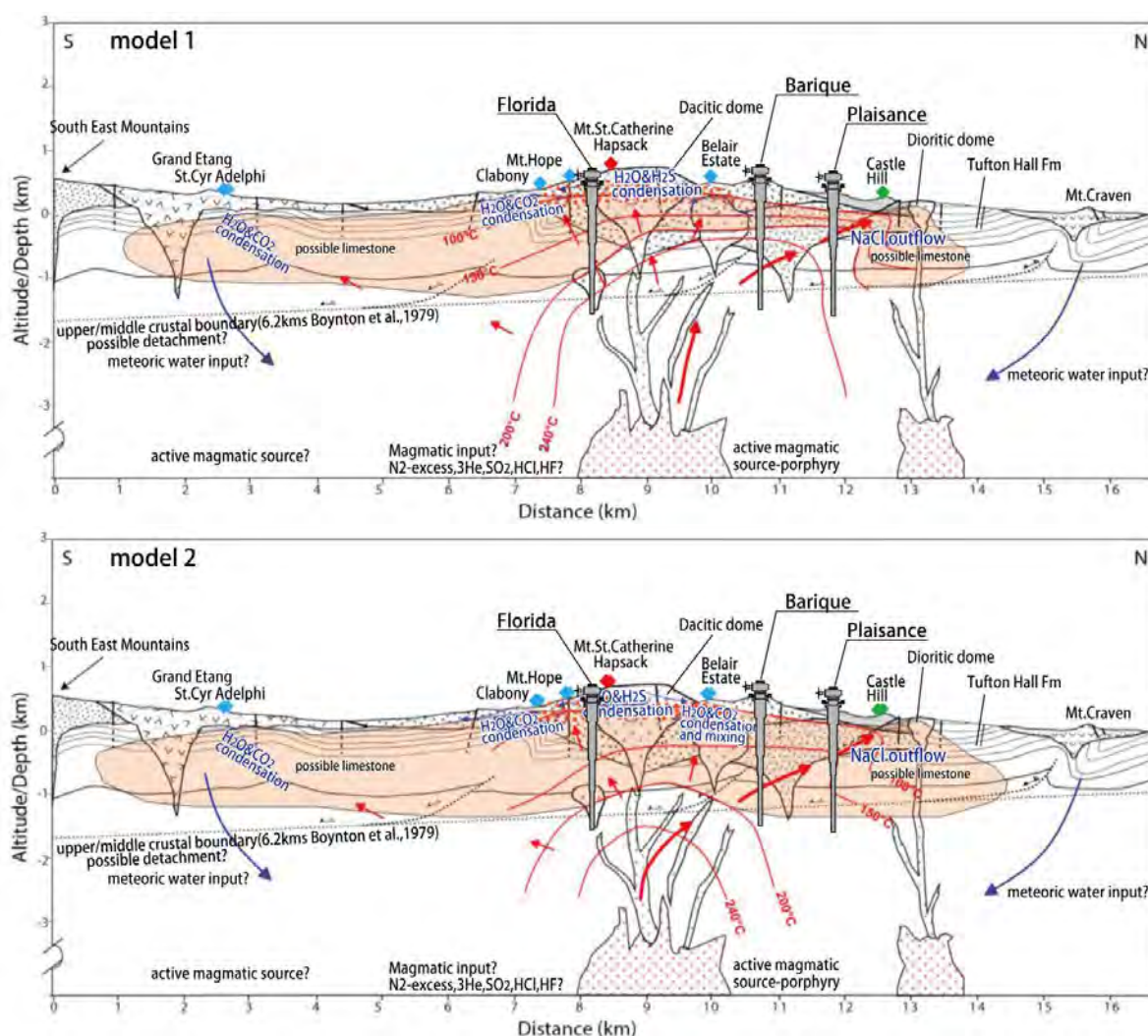
当該地点は森林保護区に指定されているため、実現へのハードルは高い。



出典：Jacobs(2016)にJICA調査団が加筆

*C:Plaisance、D:Barique、F:Florida

図 3-42 掘削計画案-2：C、D、Fゾーンで掘削案



出典：Jacobs(2016)にJICA調査団が加筆

*C:Plaisance、D:Barique、F:Florida

*貯留層モデル1とモデル2では推定されるキャップロックの厚さ、地下温度分布が異なる。そこで、推定される貯留層の近くで2,000m級のスリムホールを掘削し、温度・圧力分布や貯留層の有無を調査し、地熱モデルの精緻化を行う。

図 3-43 掘削計画案-2：地熱貯留層と構造試験井掘削位置

表 3-13 構造試錐井ターゲット一覧

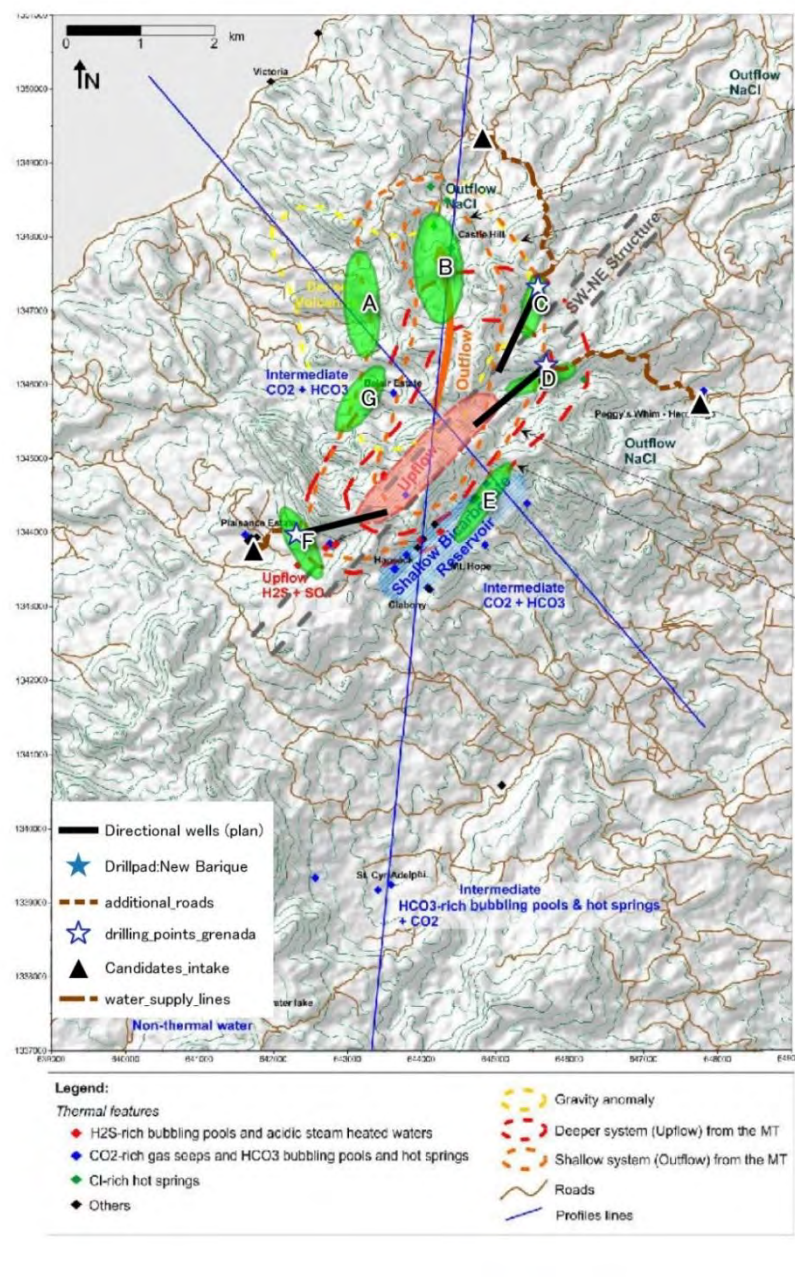
		Plaisance	Barique	Florida
掘削位置 (UTM)	X	645567	645677	642305
	Y	1347313	1346258	1343971
掘削地盤高	m	366	469	408
	(feet)	(1,200)	(1,540)	(1,340)
掘削深度	m	2,000	2,000	2,000
	(feet)	(6,561)	(6,561)	(6,561)
傾斜角		垂直	垂直	垂直
ターゲット 深度	m (feet)	1,900 (4,634)	1,900 (4,634)	1,900 (4,634)
掘削目的		1) 地下情報の収集: 地温、地質、断裂構造 (SW-NE の地質構造の有無) 2) 地熱モデルの精緻化 3) 評価井の掘削計画の立案	1) 地下情報の収集: 地温、地質、断裂構造 (SW-NE の地質構造の有無) 2) 地熱モデルの精緻化 3) 評価井の掘削計画の立案	1) 地下情報の収集: 地温、地質、断裂構造 (SW-NE の地質構造の有無) 2) 地熱モデルの精緻化 3) 評価井の掘削計画の立案

出典: JICA調査団

【掘削計画案 -3: C、D 及び F から傾斜掘削する案】

構造試錐井の掘削が可能なゾーン (C、D 及び F) から傾斜掘削で推定される最有望ゾーン (upflow zone) を狙う坑跡案も検討した (図 3-44、3-45)。Plaisance、Barique、Florida から推定される地熱貯留層深部 (図 3-44 のオレンジ色で示した upflow ゾーン) を狙う傾斜井を掘削する案である。

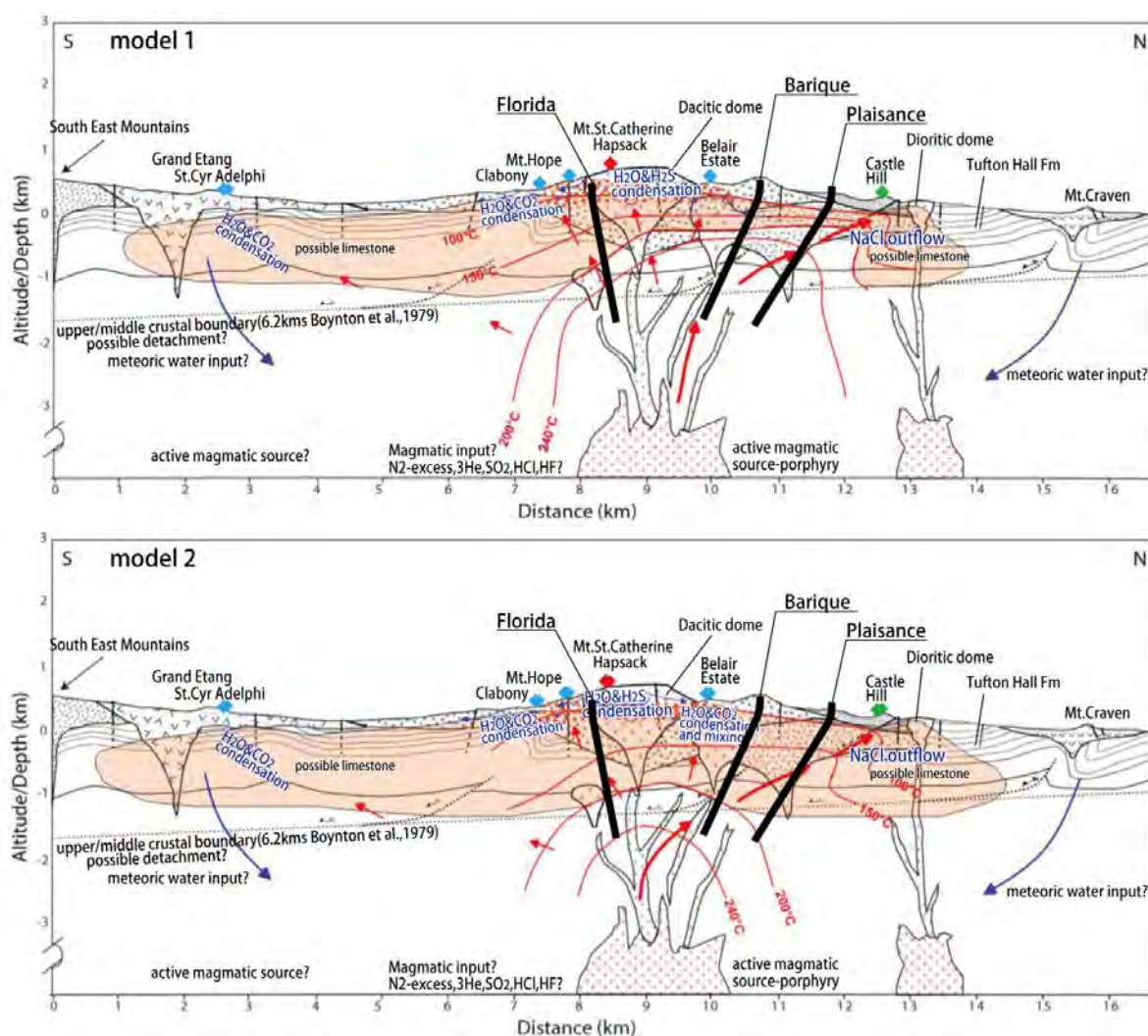
どの候補地も地熱貯留層深部までの偏距が長く、Barique 及び Florida については偏距 (掘削坑口からターゲットまでの水平距離) が約 1km 程度、Plaisance では約 1.7km である。このため、方位が安定し、かつ掘削ザクが坑内に滞留しない傾斜角 (40° 未満) で掘削するには、Barique 及び Florida からは掘進長 2,200~2,300m 程度が必要である。Plaisance からはさらに掘進長が長くなる。この掘進長規模の傾斜井を掘削するためには、スピンドル掘削機や小型のロータリーテーブル型リグではなく、掘進長 3,000~4,000m を対象とするような巻き上げ能力が高い大型のリグが必要である。大型リグでの掘削は工事費が割高となるうえ、土木工事規模も大きくなり、資源の有無を比較的安価に確認することを目的とする構造試錐井の趣旨に沿わない可能性がある。



出典：Jacobs(2016)にJICA調査団が加筆

*C:Plaisance、D:Barique、F:Florida

図 3-44 掘削計画案-3: アップフローゾーンへの傾斜掘削案の平面図



出典：Jacobs(2016)にJICA調査団が加筆

*C:Plaisance、D:Barique、F:Florida

*掘削候補地から最有望ゾーン（アップフロー）を傾斜掘削で狙う場合、方位が安定し、かつ掘削ザクが坑内に滞留しない傾斜角（40°未満）で掘削するには、Barique 及び Florida からは掘進長 2,200～2,300m が必要である。Plaisance からはさらに掘進長が長くなる。

図 3-45 掘削計画案-3: アップフローゾーンへの傾斜掘削案

(3) 掘削計画

1) 構造試錐井のケーシングレイアウト

構造試錐井のケーシング検討では以下の条件を満たすように設計した。

- 温度・圧力検層が可能な範囲でできるだけ小口径で掘削すること。
- 深部の情報を得るために垂直で掘削すること。
- ケーシング及び坑口装置には高温高压、腐食に対する抵抗性がある材質のものを使用

う。

構造試錐井の掘削方法としてロータリーテーブルタイプのリグで掘削する場合とスピンドルタイプの掘削器で掘削する場合の2通りがある。ケーシングはコンダクターパイプ、サーフェスケーシング、プロダクションケーシング、およびスロットッドライナーからなる。それぞれのケーシング長は掘削リグのタイプと推定される地質状況により異なる。構造試錐井のケーシングプログラム案を表 3-14、図 3-46 及び図 3-47 に示す。

表 3-14 提案するケーシングプログラム

ケーシングプログラム									
ロータリータイプ (6-1/2 トリコンビット)					スピンドルタイプ (ワイヤライン, HQ ダイヤモンドビット)				
タイプ	呼び径	深度 (m)			タイプ	呼び径	深度 (m)		
		Florida	Barique	Plaisance			Florida	Barique	Plaisance
C/P	13-3/8"	50	50	50	C/P	350A	30	30	30
S/C	9-5/8"	600	600	600	S/C	9-5/8"	300	300	300
					I/C	7.0"	900	800	700
P/C	N-80	1400	1200	1100	P/C	4-1/2"	1400	1200	1100
S/L	4-1/2"	1990	1990	1990	S/L	80A	2000	2000	2000
C/P: コンダクターパイプ, S/C: サーフェスケーシング, I/C: インターメディアイトケーシング, P/C: プロダクションケーシング, S/L: スロットッドライナー *ケーシングは API に準拠									

出典：JICA調査団

ケーシングプログラムの基本的考え方は次の通りである。

- ・ プロダクションケーシングはキャップロックの底部まで設置する。その後スロット管を挿入する。
- ・ ロータリーテーブルタイプのリグでの掘削では、コンダクターパイプを 50m、サーフェスケーシングを 600m まで設置する。
- ・ スピンドルタイプのリグでの掘削では、コンダクターパイプを 30m、サーフェスケーシングを 300m まで設置する。インターメディアイトケーシングはサーフェスケーシングからプロダクションケーシングまでの間に設置する。

両方のタイプの掘削リグは構造試錐井の掘削に適用可能である。掘削リグの選定に当たっては、近隣国に使用可能な掘削リグがあることと、選定されたサイトへのリグの運搬のしやすさ、および作業のしやすさが重要な要素となる。

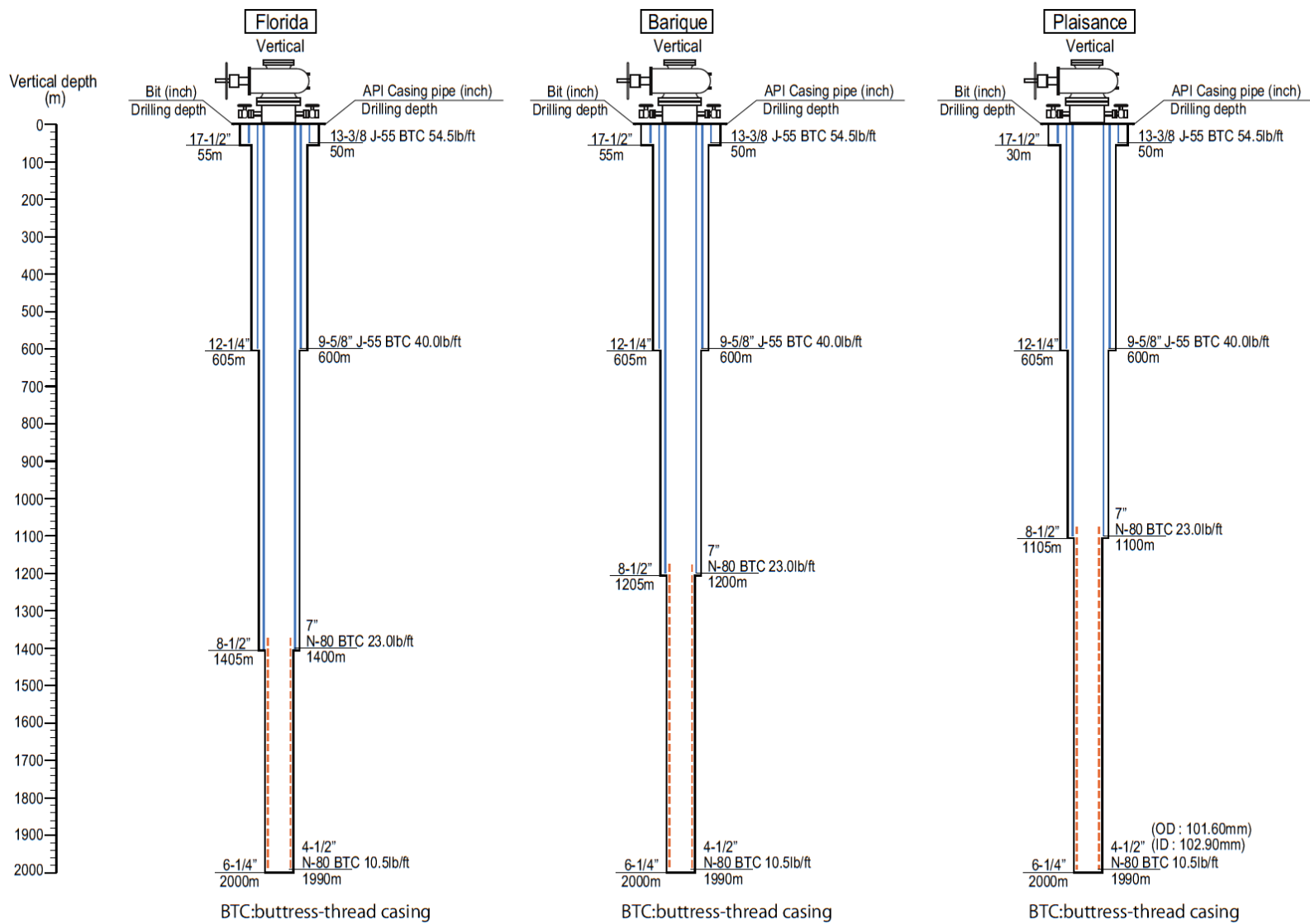


図 3-46 構造試験井のケーシングプログラム案（ロータリー掘削機の場合）

出典：JICA調査団

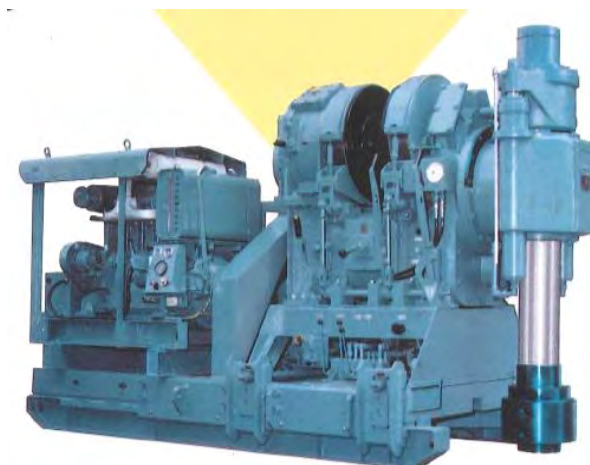


図 3-47 構造試錐井のケーシングプログラム案（スピンドルタイプ掘削器で掘削する場合）



出典：JICA調査団

図 3-48 ロータリーテーブルタイプ (S-32) のリグ写真 (岩手県葛根田)



出典：JICA調査団

図 3-49 スピンドルタイプ掘削器

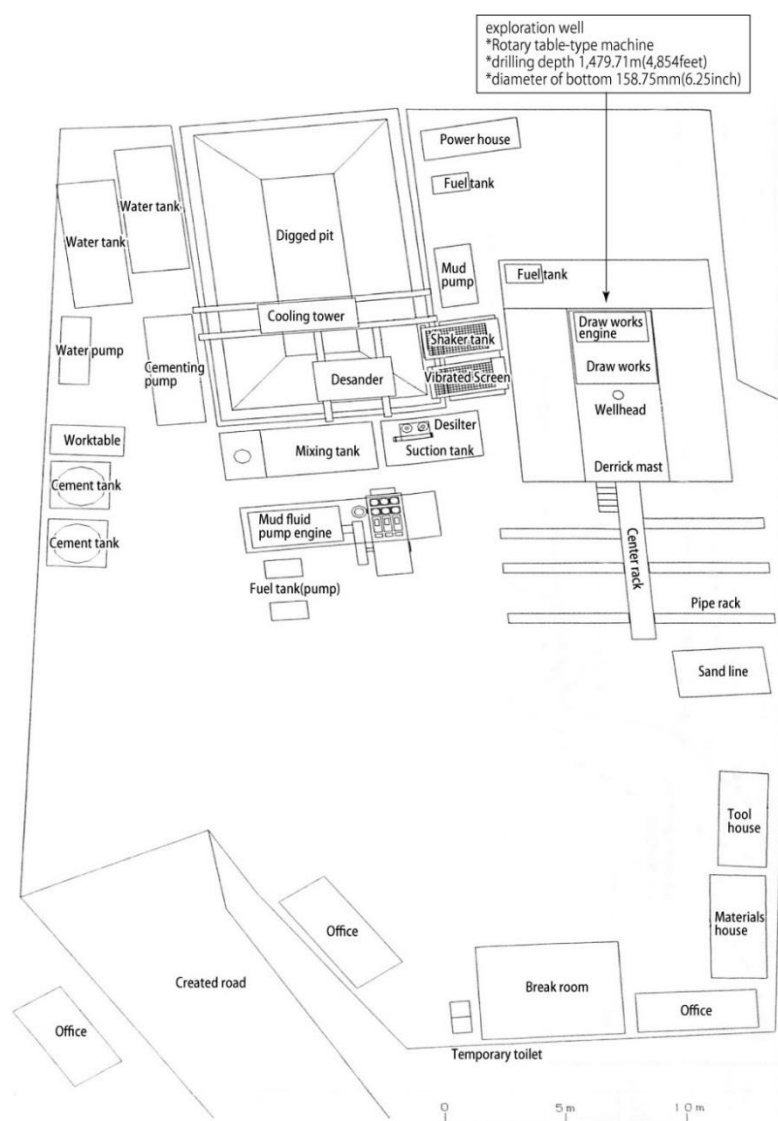
2) 構造試錐井の掘削敷地

スリムホールでの構造試錐井掘削において掘削工事で要する敷地の面積は、作業効率を考慮すると、スピンドルタイプの掘削機を使用する場合は掘削機材用として約 2,000m² (約

40×50m) 程度、ロータリーテーブルタイプの掘削機の場合は約 3,000m² (約 60×50m) 程度の掘削敷地が必要と考える。また、上述の敷地の他に掘削資機材を仮置きするスペースが設置できれば作業の効率化の上で望ましい。

なお、ロータリーテーブルタイプのリグで掘削するには別途、給水用のピット（最大坑内容量の約 5 倍である約 400m³、すなわち、約 20m×20m×深さ 1m 程度）を設置するスペースが別途必要と考える。

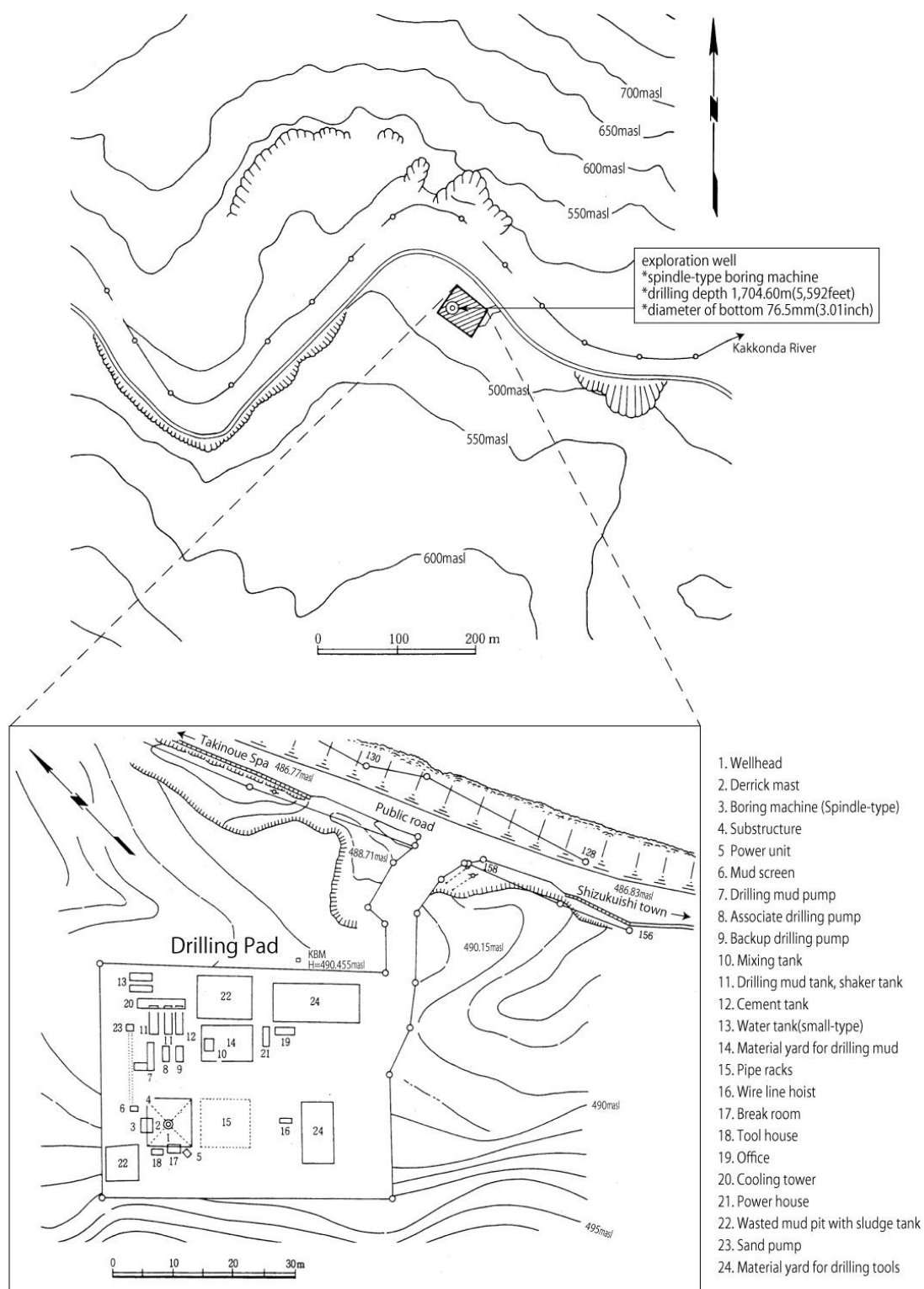
なお、実際の施工の際には掘削業者の保有する掘削装置、土地利用状況を考慮して敷地を確保することが必要である。以下に、実際にスリムホールの構造試錐井を掘削した場合の掘削敷地配置例を示す（図 3-50 及び図 3-51）。



出典：JICA調査団

図 3-50 ロータリーテーブルタイプのリグで掘削した場合の敷地配置の例

* リグの脇に廃ザクを一時的に保管するための掘削ピットが置かれている。



出典：JICA調査団

図 3-51 スピンドルタイプのリグで掘削した場合の敷地配置の例

*敷地の直ぐ脇を流れる河川から清水を補給できるので、敷地はやや狭い。

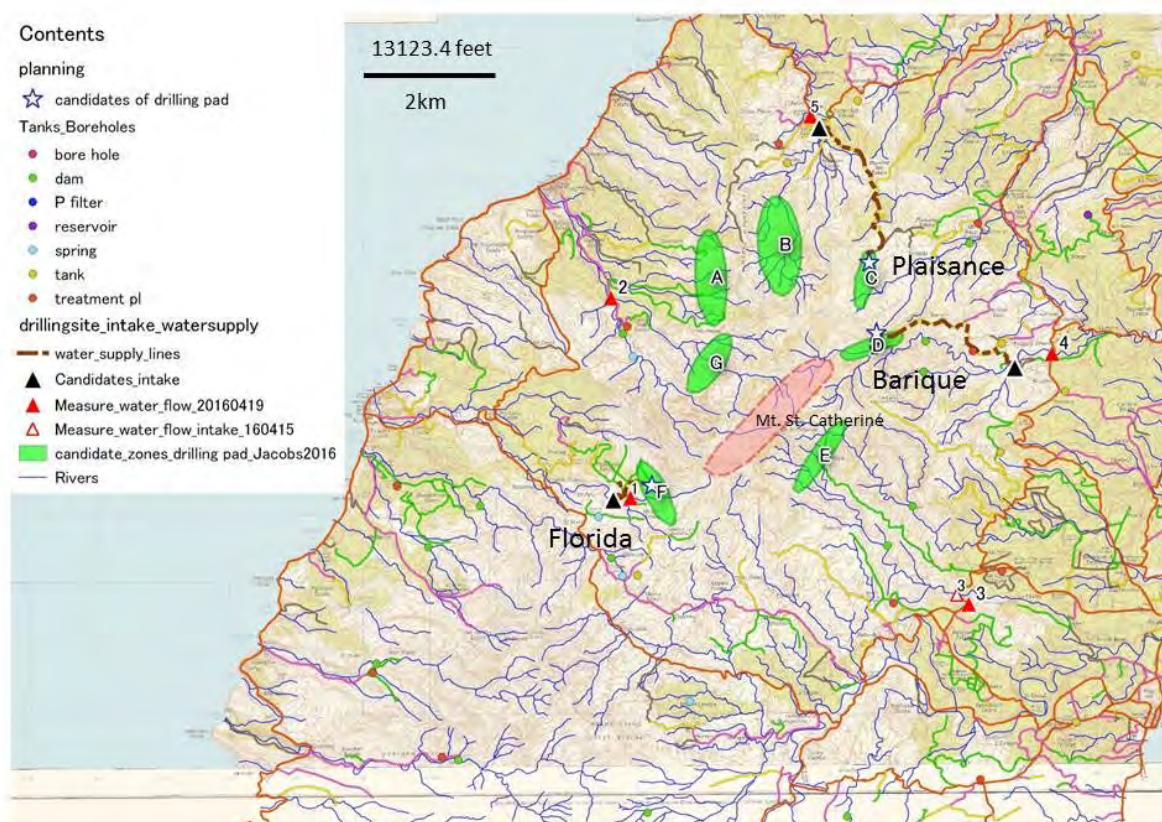
3-3-6 土木工事関連調査

Jacobs (2016) により推定された地熱貯留層、および本調査における現地踏査結果を基に、現状のグレナダ国内のインフラ状況を加味し、次の 3 箇所を構造試錐井の試掘候補地点として提案する。

- ✓ Plaisance (C エリア)
- ✓ Barique (D エリア)
- ✓ Florida (F エリア)

各地点の位置を図 3-41 及び図 3-52 に示す。

Jacobs (2016) は地表調査結果から地熱貯留層が存在する可能性があるエリアを抽出 (図 3-41) し、そのエリアの周囲において試掘できそうな範囲 (掘削敷地候補) を地形解析より抽出した (図 3-41、52 における黄緑色 A~G エリア)。これらの地点を選定するにあたり、(a) 掘削基地、(b) 掘削用水の確保、(c) 自然保護区との位置関係、(d) アクセス道路の状況を検討項目とした。項目毎の検討結果は下表のようにまとめられる (表 3-15、表 3-16)。併せて、乾期における河川の流量 (図 3-52 における赤色三角 1~5) も表 3-17 に示す。



出典：JICA調査団

図 3-52 掘削敷地候補と河川流量測定箇所、NAWASA 施設との位置関係

表 3-15 各掘削候補地点の検討項目

試掘候補	名称	掘削基地	掘削用水	自然保護区	住民移転※	アクセス	総合
A	Mt.Stanhope	×	△	○	○	×	×
B	Castle hills	×	○	△	○	×	×
C	Plaisance	○	△	○	○	△	○
D	Barique	○	△	○	○	△	○
E	Mt.Hope	?	△	×	○	×	×
F	Florida	○	△	△	○	○	○
G	Belair	△	△	○	○	×	×

○：条件が良い △：改良すれば利用可 ×：悪条件 ?：不明

※：試掘工事に関して住民移転は発生しない見込みであるが農地の土地収用はいずれも必要となる可能性がある。

出典：JICA調査団

表 3-16 各掘削候補地点の位置情報

zone	name	Coordinate (WGS 84)		Coordinate (WGS84 UTM 20N)		Elevation	
		Longitude	Latitude	x	y	(meter)	(feet)
A	Mt.Stanhope	-61.68895	12.18689	642632	1347564	216	709
B	Castle hills	-61.67472	12.19260	644177	1348203	232	761
C	Plaisance	-61.66236	12.18448	645567	1347313	366	1200
D	Barique	-61.65986	12.17486	645677	1346258	469	1540
E	Mt.Hope	-61.66834	12.15569	644892	1344124	409	1342
F	Florida	-61.6921	12.1544	642305	1343971	408	1340
G	Belair	-61.68726	12.17500	642822	1346250	256	840

出典：JICA調査団

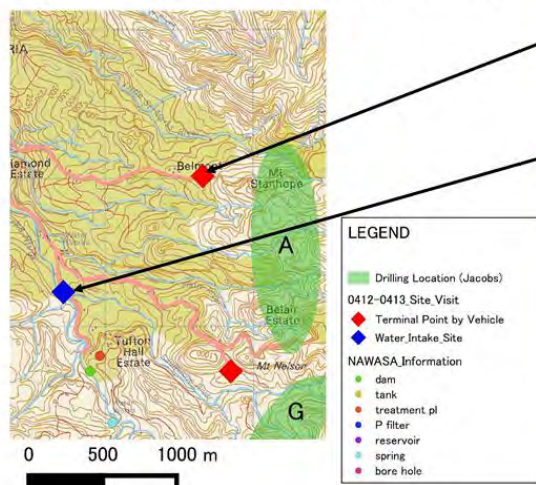
表 3-17 乾期における取水候補地の河川流量測定結果

No.	地点名	Coordinate (WGS 84)		Coordinate (WGS84UTM 20N)		Elev. (m)	water flow	
		Longitude	Latitude	x	y	Elev. (feet)	ton/min	method
1	Florida	-61.69507	12.15278	641983.92965	1343788.04394	326	1	floating
						1070		
2	Tufton	-61.69764	12.17987	641690.55011	1346783.12274	88	6	floating
						289		
3	Grand Bras	-61.64848	12.13814	647061.97909	1342193.60908	180	3	visual judgment
						591		
4	Peggy's Whim	-61.63682	12.17204	648312.70767	1345949.87691	127	4	floating
						417		
5	Union	-61.66996	12.20437	644688.65174	1349508.14247	86	3	floating
						282		

出典：JICA調査団

Area A(Mt.Stanhope)

No suitable flat terrain for exploration drilling site.
Poor accessibility to zone A by vehicle
Poor accessibility to zone A by foot.
River water at Tufton is available for intake?
Long water supply line and pumps are necessary.



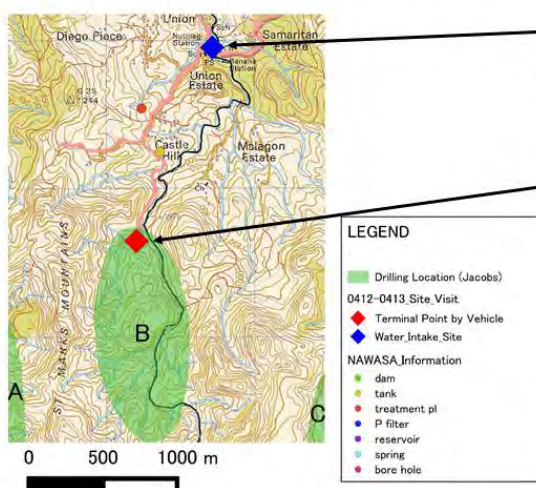
River flow at Tufton in dry season
(6 t/min)

出典：JICA調査団

図 3-53 A エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査

Area B (Castle Hill)

No suitable flat terrain for exploration drilling site.
Poor accessibility to zone B by vehicle
Poor accessibility to zone B by foot.
River water at Union is available for intake.
Long water supply line and pumps are necessary.



River flow at Union in dry season
(3 t/min)

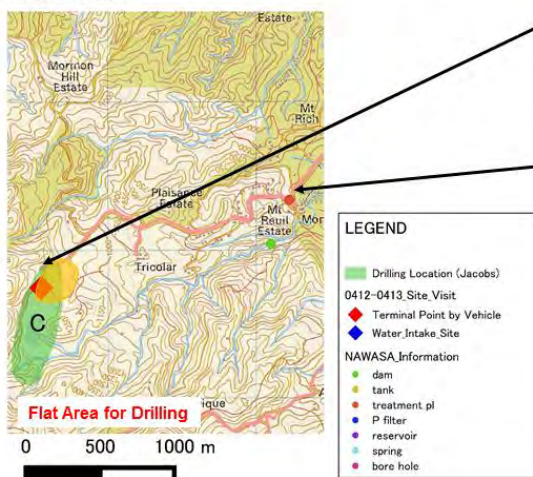


出典：JICA調査団

図 3-54 B エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査

Area C (Plaisance)

Suitable flat terrain for exploration drilling site.
Good accessibility to zone C by vehicle
River water at Union is available for intake.
Long water supply line and pumps are necessary.
Caution: Area C is closely-situated to west side of watershed .



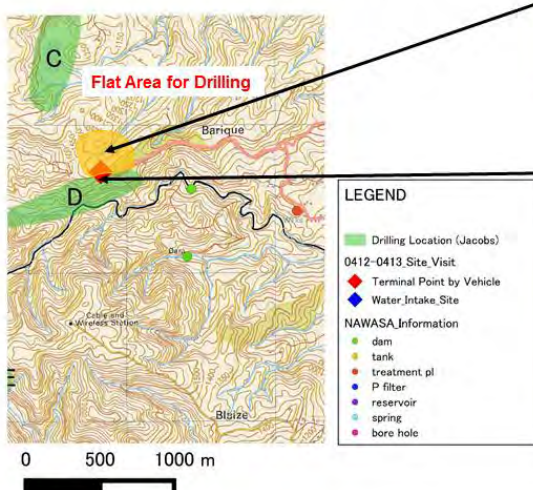
Treatment Pool by NAWASA

出典：JICA調査団

図 3-55 C エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査

Area D (Barique)

Suitable flat terrain for exploration drilling site.
Good accessibility to zone D by vehicle
River water at Peggy's Whim is available for intake.
Long water supply line and pumps are necessary.



The view of D zone from terminal point (Red symbol)



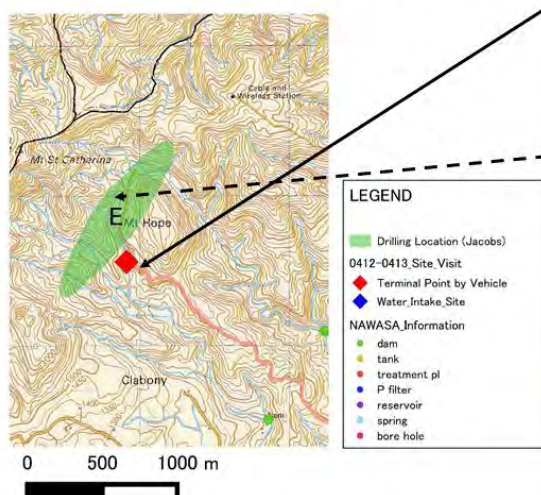
Access Road

出典：JICA調査団

図 3-56 D エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査

Area E (Mt. Hope)

No suitable flat terrain for exploration drilling site.
Poor accessibility to zone E by vehicle.
Poor accessibility to zone E by foot.
River water at Grand Bras is available for intake.
Long water supply line and pumps are necessary.



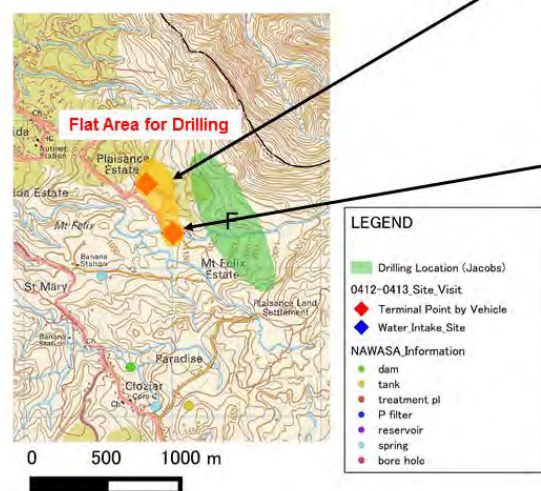
Three towers are located in west-side of Mt. Hope (See in white circle). Access road was used in passageway for trucks. But, this road was destroyed by hurricane in 2004.

出典：JICA調査団

図 3-57 E エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査

Area F (Florida)

Suitable flat terrain for exploration drilling site.
Good accessibility to zone F by vehicle.
River water at Florida is available for intake.
Water storage tank are necessary.



The view of F zone from terminal point (Red symbol)



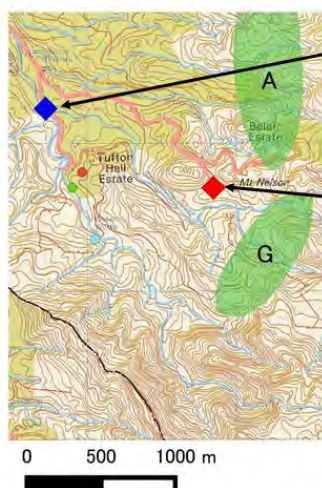
River flow at Florida in dry season (1 t/min)

出典：JICA調査団

図 3-58 F エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査

Area G (Belair)

No suitable flat terrain for exploration drilling site.
Poor accessibility to zone G by vehicle.
Poor accessibility to zone G by foot.
River water at Tufton is available for intake.
Long water supply line and pumps are necessary.



River flow at Tufton in dry season
(6 t/min)



The view of G zone from terminal point (Red symbol)

出典：JICA調査団

図 3-59 G エリア付近の試掘用敷地及び河川流量調査

以下に、それぞれの検討項目についての詳細を記述する。

(1) 掘削基地の造成

掘削用地や貯水タンク等を造成するためには、少なくとも $2,000\text{m}^2 \sim 3,000\text{m}^2$ 程度の平坦な敷地が必要となる。各地点における概要は図 3-53～59 に示す。道路の補修・拡張が比較的安く、車でのアクセスビリティがよい場所ということを条件とすると、以下の 3 箇所が試掘箇所として抽出される。

- C エリア (Plaisance) : $80\text{m} \times 100\text{m}$ 以上の平坦な農地が確認できる。ただし、この農地の東側では一部湿地帯となっており、掘削基地を造成する際に障害となる可能性があるため、リグ設置に必要な地盤強度を確保する手段を講じる必要がある。また、東側は NAWASA 所有のダムの上流域にあたる。
- D エリア (Barique) : $200\text{m} \times 200\text{m}$ 程度でやや起伏がある農業用地（放牧用）が確認できる。
- F エリア (Florida) : $200\text{m} \times 200\text{m}$ 以上の平坦な農業用地が確認できる。

その他のエリア、A、B エリアは現地調査の結果、急峻な地形が多く、掘削敷地の確保は難しい。E エリアは道路状況が極めて悪く、掘削に適した平坦地を確認することはできなかった。G エリア (Belair) については $80\text{m} \times 100\text{m}$ 程度の平坦な農地が確認されるものの、C、

D 及び F エリアに比べて地熱貯留層の存在が期待されるエリアより離れており、移動手段が徒歩しかないことから、構造試錐井の掘削候補地としての重要度は低いと考える。

(2) 掘削用水

掘削作業中に使用する水量は作業により異なる。給水は掘削作業（全量逸泥掘進を含む）、坑内抑圧、坑内冷却作業及びセメンチング作業を遂行するに十分な量を確保する。

- 掘削（逸泥がない状況で掘削、長時間）：少量（毎分数～数 1000 程度）
- 掘削（逸泥掘進、短～長時間）：多量（毎分数キロリットル程度）
- 坑内冷却、坑内抑圧、セメンチング作業（短時間）：多量（毎分数キロリットル程度）

提案するスリムホールの構造試錐井の場合、給水能力として毎分 1～1.5 キロリットルを確保すること、緊急時に坑井内に注水できるように貯水用のピットを設ける必要があるとされている。

本調査では、上述の掘削用水を河川からの取水で賄うことを想定し、乾期における河川流量を調査（図 3-60 中の赤色三角印、表 3-16）し、確保が可能と思われる地点を抽出した（図 3-60 中の黒色三角印）。ただし、グレナダ国の生活用水は、河川水の利用が大半を占める。そのため、掘削用水を確保する際には、生活用水の取水・浄化施設に影響を与えないよう注意する必要がある。

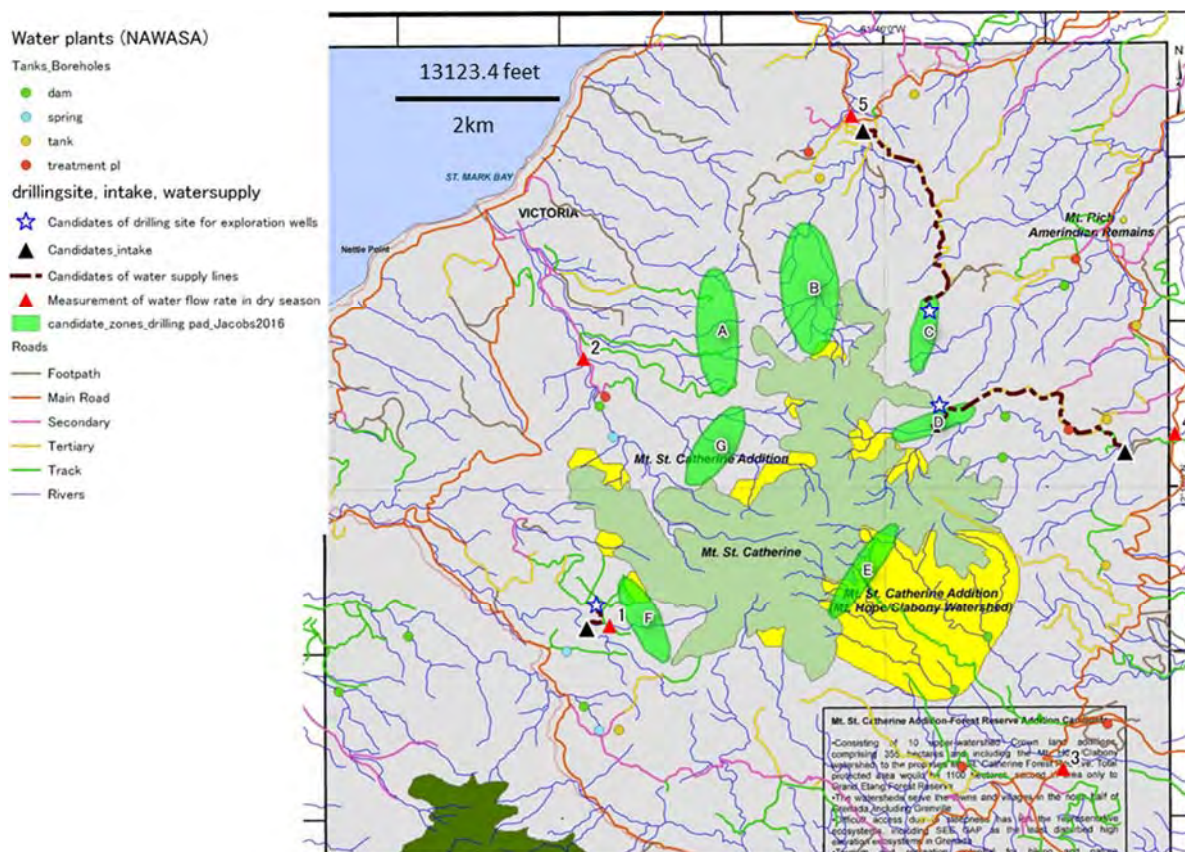
上記の観点を考慮して、乾期に対応する 4 月に河川の流量を調査し、各掘削候補地に対する取水地点を検討した。各地点の留意点を以下に示す。

- C エリア（Plaisance）：エリア周辺には取水に適した河川がないので、北に約 3km 離れた Union（図 3-52 中の 5 番近く）から取水する。標高が 100m 以上低い地点からの取水となるので、中継のタンクが数カ所が必要である。河川流量は十分であるが、掘削基地にも貯水用のピットを設けることが望ましい。
- D エリア（Barique）：エリア東の約 3km 下流から取水する。標高が 100m 以上低い地点からの取水となるので、中継のタンクが数カ所が必要である。河川流量は十分であるが、掘削基地にも貯水用のピットを設けることが望ましい。
- F エリア（Florida）：エリアの脇に河川があるが流量が少ないので、貯水用ピットは必須である。

なお、いずれの取水箇所とも NAWASA の施設とは別の河川あるいは施設の下流から採取するように計画しているが、実施に際しては NAWASA 及び地元地権者と十分に協議する必要がある。

(3) 自然保護区

グレナダ国では、St. Catherine 火山の中心部や、一部の海岸を自然保護区としている。図 3-60 に自然保護区と掘削候補地点の位置関係を示す。試掘候補地点は自然保護区の範囲外に位置している。ただし、Barique と Florida 地点は自然保護区の近傍に位置している。



出典：JICA調査団

図 3-60 掘削計画（敷地および給水ライン）と保護地域との関係図

(4) アクセス道路

グレナダ国で掘削を行う際には、すべての掘削資機材を国外から海路で搬入することになる。グレナダ国で大型輸送船が入港可能な港はセントジョージズのみであるため、同港からの資機材搬入を想定し、アクセス道路の検討を行った。なお、陸上の輸送には20tクラスのトレーラーを想定した（長さ15m×幅2.4m×荷台高さ1.1m程度）。以下に、各候補地点へのアクセス上の留意点を示す。また、図3-61に想定されるアクセス道路を示す。

- **Barique**：比較的道幅が広く、アクセスの容易な東岸道路からのアクセスが想定される。ただし、Grenville市街は道幅が狭く、日中は路上駐車が多いためトレーラーの通行の障害となる。また、幅4m程度のParadise橋を通過することになり、注意が必要である。
- **Plaisance**：比較的道幅が広く、アクセスの容易な東岸道路からのアクセスが想定される。ただし、Grenville市街は道幅が狭く、日中は路上駐車が多いためトレーラーの通行の障害となる。また、幅4m程度のParadise橋およびBelmont橋を通過することになり、注意が必要である。

- Florida : 西岸道路からのアクセスが想定される。西岸道路は東岸と比較してカーブや急こう配が多い。また、途中通過する Gouyave 市街は道幅が狭いうえ、日中は路上駐車などが多くため、トレーラーの通行は困難である。

何れの候補地点についても近傍 500m 程度まで舗装道路が整備されている。また、もっとも狭い道路で 3.5 m 程度であり、大規模なアクセス道路の建設は不要と考えられる。



出典：JICA調査団

図 3-61 試掘候補地点までのアクセス道路