

セントビンセント及びグレナディーン諸島国

セントビンセント及びグレナディーン諸島国
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
CR(10)
16-022

セントビンセント及びグレナディーン諸島国

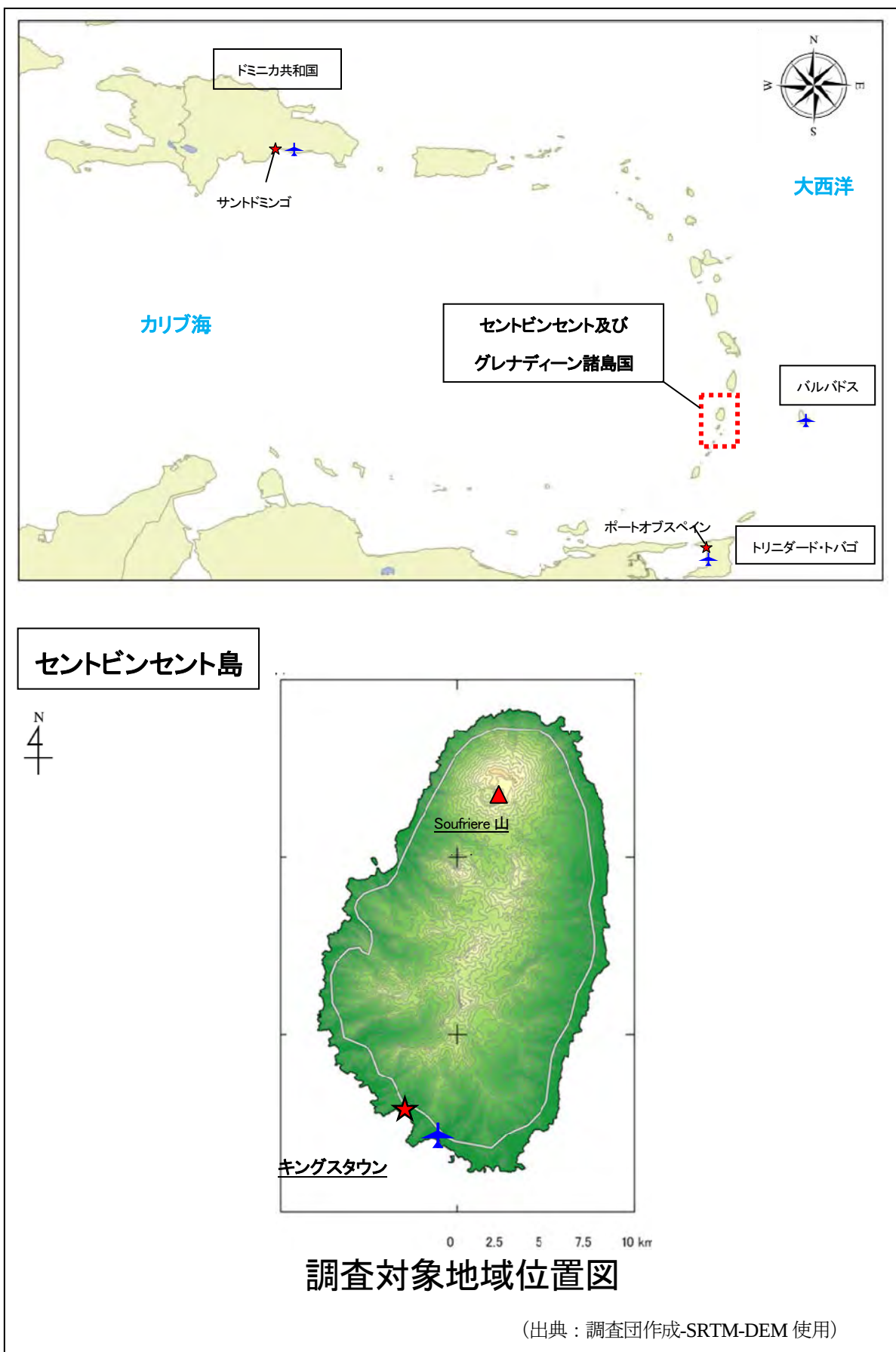
セントビンセント及びグレナディーン諸島国
地熱開発に係る
情報収集・確認調査

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



略語表

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
CIF	Caribbean Investment Facility/カリブ投資基金
CORE	Co-Financing for Renewable Energy and Energy Efficiency/再生可能エネルギーとエネルギー効率に係る協調融資
CREDP	Caribbean Renewable Energy Development Program/カリブ諸国再生可能エネルギー開発プログラム
CSAMT	Controlled Source Audio-frequency Magneto Telluric Method/地磁気地電流法
CSEP	Caribbean Sustainable Energy Program/カリブ再生可能エネルギープログラム
DEM	Digital Elevation Model/数値標高モデル
DFID	Department of International Development/英国国際開発庁
EC\$	East Caribbean Dollar/東カリブドル
ESIA	Environmental and Social Impact Assessment/環境社会配慮
EU	European Union/ヨーロッパ共同体
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
HR	Human Resources/人事
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
IRENA	International Renewable Energy Agency/国際再生可能エネルギー機関
IT	Information Technology/情報技術
JICA	Japan International Cooperation Agency/国際協力機構
MT	Magnetotelluric Method/MT 電磁探査法
NZ	New Zealand/ニュージーランド
OAS	Organization of American States/米州機構
PPP	Public Private Partnership/官民連携
PPU	Physical Planning Unit/セ国住宅省非公式居住局計画・調査ユニット
RG	Reykjavik Geothermal/レイキャビク地熱株式会社
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/ステークホルダー関与計画
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission/シャトルレーダー地形ミッション

SVGCL	St. Vincent Geothermal Company Limited/セントビンセント地熱株式会社
TEM	Transient Electro Magnetic Method/TEM 電磁探査法
VINLEC	St. Vincent Electricity Services Limited /セントビンセント国国有電力会社

セントビンセント及びグレナディーン諸島国 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、及び組織制度等に関する調査の実施。

1-2 調査対象地域

セントビンセント及びグレナディーン諸国（以下、セ国）セントビンセント島

1-3 セ国関係機関

本件調査に関連するセ国の機関は以下の通りである。

表 1-1 セ国関連機関

機関名	業務分掌
総理府エネルギー局	政策策定、実施、監理
セントビンセント電力会社（VINLEC）	国有電力会社

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 電力セクターの現況

セ国は、総エネルギー消費量のうち約95%を輸入石油燃料に依存している。セントビンセント本島単独では、水力発電が総一次エネルギー消費の約5%程度に貢献しているものの、それ以外の島々では電力供給のすべてをディーゼル発電に依存している。なお、化石燃料の全ては輸入に依存している。

2-2 法制度（法律及び規制）

(1) 概要

セ国の主要電力供給機関は、VINLEC と呼ばれる国有電力会社である。

セ国の電力供給の開始は1931年にさかのぼるとされる。1961年、政府資本49%、Commonwealth Development Company 資本51%の St. Vincent Electricity Service Limited (VINLEC) が設立された。1973年、電力供給法（Electric Supply Act）が制定され、セ国政府は1979年の独立後の1985年7月にVINLECの全ての株式を取得して国有企業とした。

(2) 電力供給法 1973

電力供給法（Electricity Supply Act 1973）は、電力セクター運営の基礎となっている。この法律の規定によれば、VINLEC はIPP 及び自家発電事業者に対してライセンスを発行することができる。系統に接続しない発電においてもVINLECの認可が必要である。ただし、このライセンスは関係する大臣の許可を必要としている。

(3) 地熱資源開発法 2015

2015年8月に地熱開発にかかる新しい法案が国会に提出され、国会承認を受けている。この法案は地熱資源開発にかかる条件を規定するものであり、特に地熱エネルギー開発の投資促進を企図したものである。基本的に地熱資源開発のための認可や認可譲渡などの条件について規定している。開発権利の認可は25年間与えられることになっており、投資家の権利についても保護がなされている。

2-3 組織の現況と課題

(1) 政府組織

首相府がエネルギーセクターの監督官庁となっている。首相府にはエネルギー・ユニットが設立され、2008年エネルギー政策の策定・実施を分掌している。一方、2006年に、国家エネルギー政策のドラフトを含むエネルギー関連事項や政策にかかり政府に助言を行う機関として国家エネルギー委員会が設立されている。

(2) 電力会社

VINLEC は 1973 年より電力の発電、送電、配電にかかる独占企業として機能している。この体制は 2033 年まで継続されることになっている。セ国には独立規制機関は存在しない。VINLEC は概ね独立性の高い事業運営を行っている。

2-4 発電・送電設備の現況と課題

(1) 発電

セ国の主要な発電はディーゼル発電である。セントビンセント本島に限れば、2 箇所のディーゼル発電所（ケーンホールとローマンズベイ）と 3 箇所の水力発電所（サウスリバー、リッチモンド、クンバーランド）が稼働している。

その他のグレナディーン諸島の電力はディーゼル発電所を基本とした民間所有の電力設備によって供給されている。ベキア島、ユニオン島、カノアン島、メイルー島についてもディーゼル発電に依存している。

2007 年時点で、セ国には 5.6 MW の水力発電設備があり、ディーゼル発電は 35 MW である。

(2) 送配電設備

VINLEC の送電、配電システムは、(i) 約 250 マイルの 33kV 送電線と 11kV 配電線（27,000 個の電柱を含む）、(ii) 約 11,000 個の配電用変圧器、(iii) 8,050 個の街灯から構成される。

(3) 課題

セ国では、電力の一次エネルギーの殆どを輸入石油燃料に依存している。このため、水力、風力、太陽光、地熱などの地産地消型のエネルギーの開発利用が喫緊の課題である。同時に、老朽化したディーゼル発電設備や水力発電設備、さらには送配電施設の更新も重要な課題となっている。

2-5 電力需給現況と予測

(1) 供給

発電容量及び発電電力量は、2009 年現在それぞれ約 49 MW、135 GWh である。

(2) 需要

セントビンセント本島のピーク需要は 1988 年の 14 MW から 2008 年には 20 MW まで増加し、2011 年には 21.1MW に達している。この需要は稼働可能な設備容量（本島のみ）32MW によって供給されている。

電力需要については、1998 年から 2008 年までの 10 年間に総需要が 74.6GWh から 122.9GWh まで約 70%の増加を記録している。このうち、商業用及び家庭用については、2008 年においてそれぞれ 48%、45%の消費を示している。

国内の電力需要は年間平均 6.9%で増加すると考えられている。これにより 2017 年までに新しい電源が必要になると評価されている。

(3) 電力料金の現況と課題

石油価格の高騰の結果、近年電気料金が高騰している。2007 年には一般家庭料金は燃料サーチャージを含めて EC\$ 0.89/kWh (US\$ 0.33/kWh) であったが、2008 年にはほぼ EC\$ 1.05/kWh (US\$ 0.39 /kWh))まで増加した。このため、国際情勢の変化によって変動する燃料価格に影響されない地産地消の再生可能エネルギーを開発し、燃料価格増加の影響を最小限にすることが極めて重要である。

2-6 地熱開発の現況

セ国の地熱開発については、Reykjavik Geothermal 社（以下、RG）と Emera Caribbean 社との共同企業体とセ国政府との間で、2014 年 5 月 13 日に Letter of Intent (LoI) が締結された。この LoI によって、RG/Emera と政府が PPP を組成して地熱発電事業を立ち上げることが合意されている。この合意に基づき、RG/Emera は独自資金で地表調査（地質調査、地化学調査、物理探査）を実施している。2015 年 6 月 30 日には、RG/Emera 社によって事業計画が提示された。現在、JICA、IDB の支援で掘削に関する ESIA が終了し、2017 年 1 月からの掘削開始に向けて準備がすすめられている。掘削に関する資金は、UK-DFID からセ国政府に対して無償資金が CDB 経由で提供されている他、CDB-Contingency Loan が PPP に対して提供されている。また、井戸掘削の成功を条件に Abu Dhabi Fund からの融資が決定されている。

2-7 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再生可能エネルギーの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、地熱開発や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。SEF は CDB が進める GeoSMART Facility の資金源となる。なお、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。

CDB は現在セ国において、PPP のコンソーシアムに対して融資案件を実施中である。

(2) CDB/DFID、EU-CIF

DFID は、CDB が進める Sustainable Energy for the Eastern Caribbean (SEEC) Programme 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。

2016 年 7 月時点の情報では、DFID は、「セ」国の地熱井掘削計画に対して CDB を通じ 4 百万英国ポンド(5.7 百万米国ドル)の無償資金を拠出している。

(3) ニュージーランド

ニュージーランド政府はセントルシア国に地熱専門家を派遣してカリブ諸国への技術協力を開始した。2015 年に拠点をグレナダ国に移してグレナダ国の地熱開発の技術調査を実施している。セ国にも政府支援のため訪問している。

第3章 自然条件調査概要

3-1 調査の目的、アプローチ

本調査団の現地作業開始時には、すでに RG 社によって地表地質調査・地化学・物理探査 (MT 探査) が実施済みであった。本調査における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った。

3-2 既存調査

3-2-1 地表調査結果概要

(1) 沈み込み帯、火山活動

地熱資源の評価を目的とするセ国における地熱徴候に対する地質学的な検討は、RG (RG, 2013) によってなされている。

(2) 地質

セントビンセント島の地質は主に 4 帯の火山噴出物から構成される。これらの火山噴出物は主に更新世 (Pleistocene) 以降に噴出し、基盤の石灰岩を覆っているとされる (Caribbean Power, 1988)。最も若い火山は Soufriere 火山であり、歴史時代に少なくとも 5 回の噴火を起こしている。最近の噴火は 1979 年に発生している。

(3) 断裂系

Soufriere 火山の火口には古い外輪山に貫入岩 (玄武岩、玄武岩質安山岩) が分布しており、貫入の方向は北北東～東～北北西走向である (RG, 2013)。一方、Soufriere 火山の東山麓では地形解析により北西-南東系及び北東-南西系のリニアメントが複数抽出されている。

(4) 地熱徴候

Soufriere 火山の火口付近に 1979 年に噴出した溶岩ドームには噴気に伴って白色の粘土化変質帯がある。一方、Wallibou 流域ではデブリと溶岩流の間、溶岩流のき裂から 50℃未満の温泉が湧出している。ただし、岩石の変質については報告されていない。その他の地域では変質帯に関する記述はない。

(5) Soufriere 火山のハザードマップ

Soufriere 火山は過去の噴火で大規模な火砕流、火山泥流、噴石及び降灰により甚大な被害を生じている。RG (2013)は過去の噴出物と噴出年代を検討した結果、Soufriere 火山では過去 1000 年において 11 回の大規模噴火が発生しており、平均すると約 93 ± 13 年周期と計算されるとした。ただし、1979 年の噴火のように前回の噴火から数年経過後に噴火する事例もある。

3-2-2 既存調査への調査団見解と本件調査方針

RG (2013)はセントビンセント島、特に北部の Soufriere 火山について既存調査結果を取りまとめ、Soufriere 火山に関する詳細な地質層序、地質構造、火山活動の特徴を明らかにした。一方で、地表の変質や断裂分布についてはほとんどデータがない。そのため、地表調査では変質帯や断裂の特徴を検討するためのデータを得ることを調査方針とした。

3-2-3 地化学

(1) 調査内容の概要

地熱資源の評価を目的とするセ国における地熱徴候に対する地化学的な検討は、RG (RG, 2013)によってなされている。この報告書はそれ以前のデータを収集して検討結果を統合しているものである。

【セ国の地熱徴候】

- セ国の地熱徴候は Wallibou 川北岸の中温 50℃未満の温泉と、Soufriere 火山カルデラ内に位置する溶岩ドーム南縁の噴気(温度は水の沸点と同等)に限定される。
- 噴気がカルデラ内に限定され、高標高地に他の噴気がなく、山体裾野に高温（沸騰）温泉が湧出していない。
- 従って、噴気蒸気は溶岩ドーム直下にある火道を通じてマグマ溜まりから直接地表に上昇している可能性がある。噴気及びカルデラ湖 (Sigurdsson, 1977) は、大規模な熱水対流系というよりはむしろ局所的な火山活動による産物と考えることができる。
- 大規模な熱水対流系の証拠は地表では見えないものの、このマグマ溜まりが大規模な熱水対流系を生じさせている可能性は否定できない。

【温泉水の起源】

水のタイプ区分は主要な陰イオンである Cl、SO₄、及び HCO₃ の濃度比によっている。

- セ国の温泉のほとんどは地熱系縁辺部に生じるとされる重炭酸型温泉に分類される。一方、高温地熱系の最も優れた指標である塩化物型温泉 (熟成水、mature water)、及び硫酸型温泉は見られない。
- GeothermEx (2011) は流体混合のモデルから塩化物型熱水の存在を推定してはいるが、その様な水の直接の証拠は地表には認められていない。
- ただし、カルデラ湖 (Crater Lake) の塩化物イオン濃度が高い。しかし、これはおそらく火山性の塩素ガスに起因し、高温化での水-岩石反応による産物ではないと考えられる。

【温泉水の平衡状態、水岩石反応熟成度】

温泉水の化学平衡状態、もしくは水-岩石反応の熟成度を検討するために、Na、K 及び Mg の濃度比による解析が広く用いられている。

- セ国の温泉は **Mg** の頂点近くにプロットされ、熟成度の低い水-岩石反応を示すものばかりである。

RG (2013) はシリカ温度計の石英温度計とカルセドニー温度計を計算し、150°C程度までの温度が示されている。この結果は、想定される地熱貯留層の最低温度を示している可能性がある。これら水の溶存成分を対象とする温度計の他に、RG (2013) は噴気ガスを対象にガス地化学温度計を用い、150°C-243°Cの値を得ている。

(2) 既存調査への調査団見解と本件調査方針

- 結論として、地表の地化学調査結果には、高温かつ大規模な地熱系を想定できるような明白な地熱徴候分布は認められない。
- 存在する限られた地熱徴候は Soufriere 火山の西側に限られ、東側の地熱資源量は地化学的手法から評価できない。
- 特に開発の対象となっている東側については、地熱資源量を評価するには、テスト井を掘削し、検層及び噴気試験を行うことが必要と考えられる。

本調査では、代表的な温泉水や噴気を採取して分析することによって、既存調査結果の妥当性を検証する方針とした。

3-2-4 物理探査

セントビンセント島の地下の比抵抗構造を解明するために、RG (2015) において MT 探査及び TEM 探査が実施されている。

(1) 調査結果要約

【取得データの精度】

MT/TEM 法探査から、地表から深部に向かって高-低-高の比抵抗変化を示す 3 層構造を示されている。中間の低比抵抗層は地熱貯留層のキャップロックと解釈され、上面の 10Ωm コンターラインを 100°C、下面の 10Ωm のコンターラインを 240°C の等温度線としている。

さらに下部の高比抵抗層を地熱貯留層と推定している。比抵抗構造解析結果として以下のことが指摘されている(RG, 2015)。

- 調査地域は高温の地熱貯留層構造を示唆する典型的な比抵抗構造を示す。
- 山頂部で 300~600m 深に上面が相当する地熱貯留層は、海岸部に向かって山頂部と東側海岸部の中間辺りまで広がっている。
- 高比抵抗を示す地熱貯留層の上面は、山麓下部当たりで急激に落ち込み、約 2000m の深度に達する。
- 本調査地域の比抵抗構造は地熱地帯の熱水変質の様子を反映するものである。

(2) 既存調査への調査団見解と本件調査方針

- 深部の比抵抗情報を含む低周波数の探査データが充分取得されていない。これはアクセスが困難な地形であることと島嶼での調査に特有な波浪などによるノイズが多いことによる。このため、深部の解析精度は高くないものと判断される。
- 中間部の低比抵抗層については海岸部では海水の影響が強いと推定され、キャップロックとするその根拠については明確ではない。
- したがい、当初計画されていた調査団による MT/TEM 調査を取りやめ、物理探査として重力探査のみを実施する方針とした。
- また、この新たに実施する重力探査の解析結果をセ国政府及び RG/Emera に提供して、総合的に解釈の一助として頂く方針とした。

3-2-5 地熱貯留層モデル

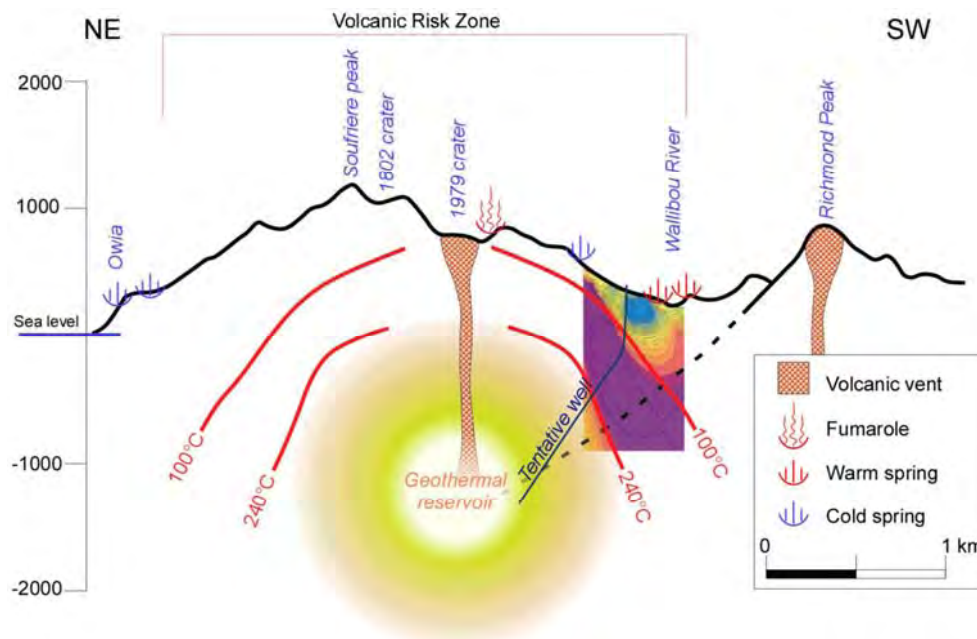
(1) Dames and Moore (1998)

Soufriere 火山の地下に熱水卓越型の地熱貯留層が分布し、上部には局所的に蒸気卓越ゾーンを伴うと推定した。地熱貯留層には中性で 150～240℃（地化学温度から推定）のブラインが存在し、ブラインの一部は希釈を受けつつ、Wallibou 川に湧出していると推定した。

(2) GeothermEx (2011)

GeothermEx (2011) は Soufriere 火山及びその周辺の地熱系について、下記のようなモデルを検討した。

- Soufriere 火山の地下には Na-Cl 型の地熱貯留層の存在が推定される。
- 貯留層の温度は地化学データから 150～260℃程度と推定される。
- 地熱水の流動経路は 1) Soufriere 火山の火道に沿ってほぼ垂直に上昇して沸騰する、2) Soufriere 火山の火口付近から Wallibou 川流域に流動、3) Soufriere 火山噴出物に覆われている Mome Garu 火山群（Richmond 火山）の表層を上昇して Wallibou 川流域に流出、の 3 パターンが推定される（図 3-1）。



出典：GeothermEx (2011)

図 3-1 Wallibou 川流域周辺における比抵抗構造を踏まえた地熱貯留層モデル

(3) RG (2013)

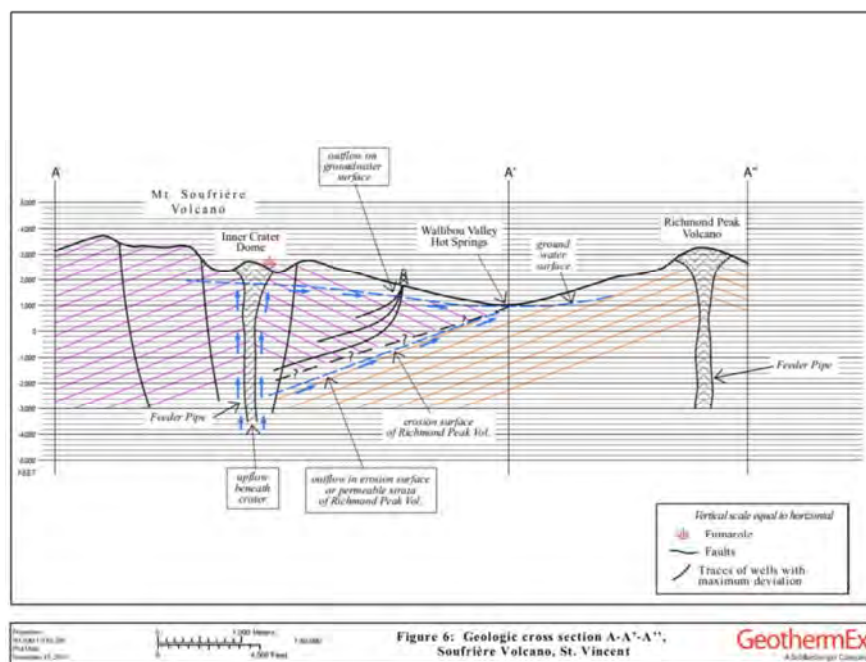
RG (2013) は次のモデルを示している。

- Wallibou 川の地下浅部には低比抵抗ゾーンが広がっている。
- Soufriere 火山の火口を含む地下浅部には粘土化変質による不透水性ゾーンが分布し、その深部に地熱貯留層の存在が期待され、貯留層では 240°C 以上の貯留層温度の分布が期待できる。

(4) RG (2015)

RG (2015) は Wallibou 川流域周辺からの掘削が地形、アクセスの点で難しいと判断されることから、Soufriere 火山の東側についても比抵抗構造を検討した (図 3-2)。その結果、

- Soufriere 火山の東麓でも地下浅部に低比抵抗構造が存在する、
- この低比抵抗ゾーンが粘土化変質により生じたと解釈し、リニアメントが断層であると解釈した、
- それら断層を貯留層と解釈して東麓から地熱坑井を掘削する案を提示している。



出典：GeothermEx（2011）

図 3-2 Soufriere 火山の噴気、Wallibou 川の温泉を踏まえた地熱貯留層モデル

(5) 既存調査への調査団見解

- Soufriere 火山の南西麓から Wallibou 川流域周辺の温泉湧出までの区間の地熱モデルについては、地質、地化学及び物理探査結果がよく関連付けられて説明されている。
- しかし、低比抵抗ゾーンが粘土化変質によるものであるかどうかは掘削で試料を採取して分析する必要がある。
- RG（2015）が示した東麓の低比抵抗ゾーンが粘土鉱物以外に起因する可能性もある。加えて、ターゲットとしているリニアメントが断層であるのか現地確認する必要がある。

坑井掘削が計画されている東麓について、地表において断層や熱水変質が存在するかどうかを調査する方針とした。

3-3 本調査で実施した現地調査

本調査では、既存調査結果の現地確認と補足情報取得を行う目的で実施した。ただし、物理探査はこれまで実施されていない重力探査を実施して、地質構造の把握の一助とした。

3-3-1 地表地質調査

(1) 方法

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、断裂の分布及び特徴を観察し、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

本現地調査では Soufriere 火山山頂の溶岩ドーム、西麓の Wallibou に湧出する温泉地、Soufriere 火山西麓のリニアメント通過点の3箇所を現地調査した。その結果の概要は以下の通りである。

(3) Wallibou 川流域 (Soufriere 火山西麓)

- ✓ Soufriere 火山西麓の Wallibou については安山岩溶岩の節理から温泉が湧出しているが、岩石に変質帯が認められない。
- ✓ Wallibou 流域に湧出する温泉は地熱系縁辺部に生じるとされる重碳酸型温泉に分類される。一方、高温地熱系の最も優れた指標である塩化物型温泉（熟成水、mature water）、及び硫酸型温泉は見られない。
- ✓ 高温かつ大規模な地熱系を想定できるような明白な地熱徴候分布は認められない

(4) Soufriere 火山 火口溶岩ドーム

- ✓ セントビンセント島における地熱変質は酸性変質鉱物（カオリン鉱物、明ばん石）を伴い、Soufriere 火山山頂の溶岩ドームにおいて火山性流体により生じた酸性変質であると結論できる。
- ✓ Soufriere 火山カルデラ内の溶岩ドーム付近では火山活動により高温蒸気が生じていることは明らかである。しかし、これらの蒸気は火口直下の火道付近に局所的に分布しているものと考えられる。

(5) Soufriere 火山 東山麓

- ✓ リニアメント通過点付近で断層や地熱徴候の存在を示す証拠は確認できない。同地域においては地質及び地化学では地熱貯留層の有無について評価ができない。
- ✓ したがって、試掘調査等を実施する必要がある。

3-3-2 地化学調査

(1) 方法

セ国の地熱徴候を調査し、その結果を既存調査結果と比較するために、調査団は地化学調査のための踏査を実施した。温泉試料および噴気試料を現地で採取し、本邦で分析した。その結果は以下の通りである。

(2) 結果

測定した温度は既存データとほぼ同じであり、温泉はおよそ 42℃、噴気はおよそ 97℃である。調査団が得た温泉の化学組成（以下、調査団データ）と既存データを同時に $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$ 三成分系との $\text{Na}-\text{K}-\text{Mg}$ 三成分系にそれぞれプロットして両者の整合性を分析した。

これらの分析結果から、調査団データと既存データは互いに整合的であり、Wallibou 川北岸の温泉水は炭酸型でかつ水-岩石反応に未成熟であることが示される。参考として計算した地化学温度計は、石英温度が約 150℃、 $\text{Na}-\text{K}$ 温度が約 250℃である。同様に噴気ガスの組成を用いて計算したガス地化学温度計は 290℃以上である。

調査団による調査では噴気ガスのうち He 、 Ar 、 N_2 を分析した。その結果、噴気ガスにマグマ性ガスの寄与があることが判明した。すなわちこの結果は、噴気蒸気はマグマ性の蒸気であり、上昇中に地下水と混合していることを意味する。少なくとも Soufriere 火山カルデラ内の溶岩ドーム付近では火山活動により高温蒸気が生じていることは明らかである。

3-3-3 重力探査

(1) 調査方法

【現地調査】

北部の Soufriere 火山を中心に地熱徴候地を含む島半分程度を対象とした。原則的に測点間隔は、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。

【測定基点と標準重力値、測点と相対重力値】

本調査における相対測定の基準とする基点は首都キングスタウンとした。

【ブーゲ補正】

相対重力値に基づき、ブーゲ補正と密度補正を行った。本地域における最適補正密度は $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ と評価した。

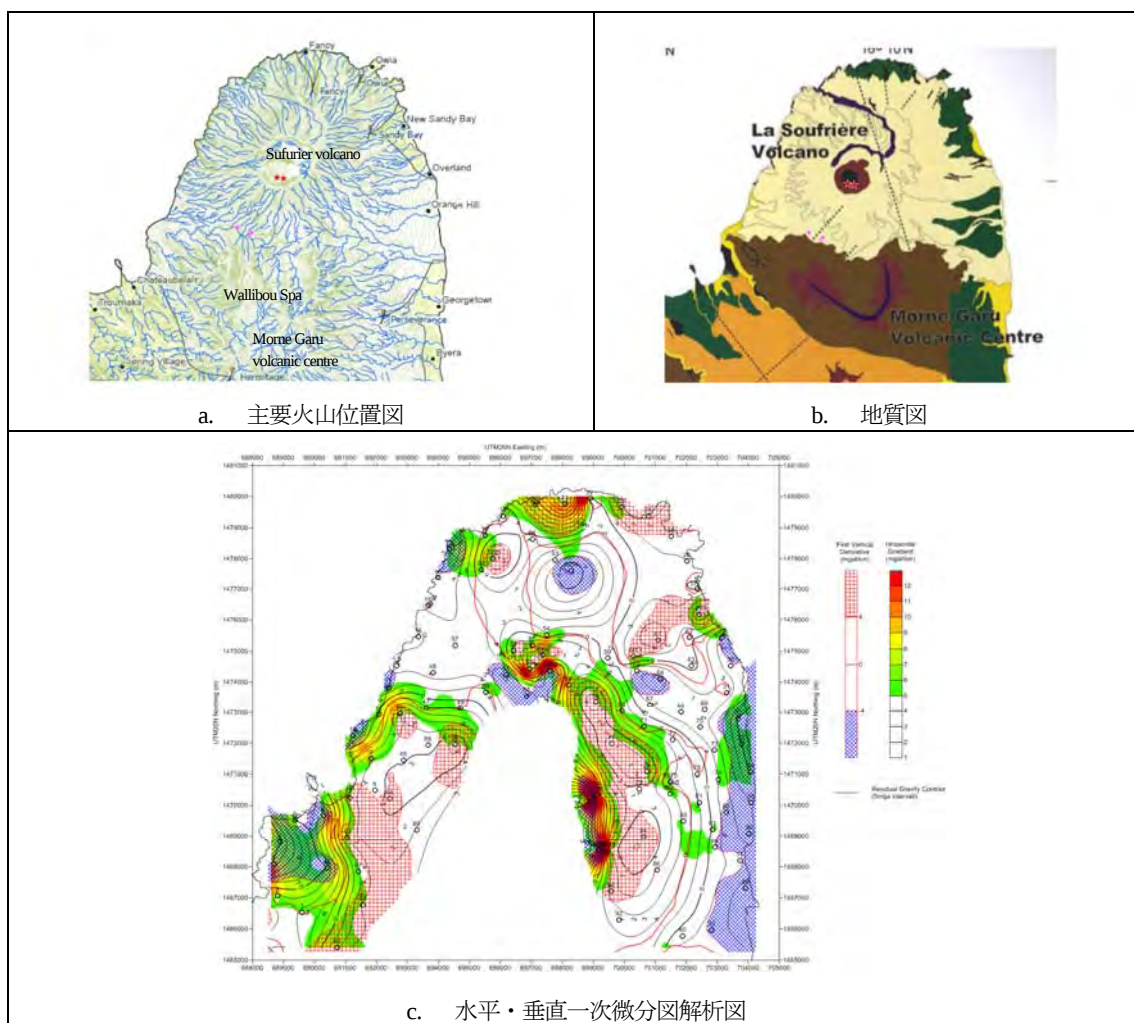
【重力探査解析図】

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、以下の解析図を作成した。

表 3-1 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）情報をしめす。	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	微分値の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



出典：JICA 調査団

図 3-3 セントビンセント島北部の地形図、地質図ならびに重力解析図

(2) 調査結果

【水平・垂直一次微分図総合解析図】

- Soufriere 火山の東側には、垂直一次微分ゼロ値コンターや水平微分コンターが北西—南東に伸びて分布しているように見える。
- Soufriere 火山の北側では馬蹄形カルデラの外側に垂直一次微分のゼロ値コンターが分布し、水平一次微分値の高異常も局所的に点在している。馬蹄形カルデラの内側には崩壊性堆積物が分布し、低重力異常及び低密度領域に対応していると考ええる。

3-3-4 土木計画に関する確認調査

掘削地点の状況、アクセス道路の状況を確認した。その結果概要は以下の通りである。

- Drilling site (RG1) は、東海岸から約 4 km 内陸へ入った、Soufriere 火山の南東斜面、標高約 1,100m に位置する。
- キングスタウンからは、Windward highway を利用してアクセスができ、近傍の町である Georgetown までは、道路状況は良好である。
- Georgetown の約 2.3km 南方の Byera hill には、延長約 60m のトンネルがある。道路幅 4.1m、ショルダー両側 0.94 m、高さ 5.8 m 。通常の掘削リグの運搬には支障にならない。
- Georgetown の Caratal River では土石流により橋梁がダメージを受け（2013 年）、調査時点（2015 年 5 月）では市街の迂回路があり、リグ運搬時には支障となる。新規橋梁が建設中である。
- 海岸から掘削地点までのアクセス道路は、Rabacca Dry River の北岸に沿って伸び、掘削地点付近の約 300m 上部にある登山の Visitor Center まで舗装されている。ただし、標高 900m 付近から上部はやや傾斜が急で、また、道路幅員は狭くなり、カーブが多い。アクセス道路の補修や拡張部分が必要と想定される。
- 掘削予定地点は緩斜面の畑地となっており、掘削 Pad 建設に必要な 100 m x 100 m 程度の敷地造成は難しくはない。地質は比較的良く締まった風化した火山灰土である。
- 当該地域は夏季にはハリケーン等により雨量が多いため、排水施設を確実に実施する必要がある。

3-3-5 環境社会配慮調査

(1) セ国における地熱開発プロジェクトの ESIA の状況

セ国政府及び Emera/RG グループの企業体は、掘削調査のための「スコーピング」及び「ベースライン調査」を独自に実施済みであるが、これに加え、2015 年 9 月より調査団は精度向上を目的としたスコーピング調査を行った。この本調査団によるスコーピングをもとに企業体は

ベースライン調査ならびに ESIA 調査を実施し 2016 年 6 月に最終報告書がセ国政府に提出され一般に公開されている。

(2) EIA 制度

セ国における ESIA のプロセスは“Town and Country Planning Act (1992)”に規定されている。事業者は ESIA 報告書を PPU (Physical Planning Unit) に提出し、審査を受ける。

またセ国では、“Environmental Impact Assessment Regulations (2009)”が整備中であり、この中で EIA の要求事項が規定されている。ただし、国際基準の ESIA プロセスとして必須であるステークホルダー協議について明確な規定がない。

セ国における ESIA レポートは、PPU により地元新聞ならびに官報等にて一般に公開されることが同規則の Article 17 に規定されている。その期間については明示されていないが、本プロジェクトに関しては 14 日間のコメント期間が設けられている。

(3) 環境関連組織の能力評価

本案件の環境社会配慮に関わる主な組織とその能力についての評価は以下のとおりである。なお、その他の環境関連機関とその機能の詳細については、添付のスコoping報告書 19 ページの Table 1 を参照のこと。

1) PPU (Physical Planning Unit) :

ESIA の規定整備、審査を管理する組織である。環境に関する専門的判断は他の関係部局と連携して行っている。

2) 環境関連の政府組織 :

環境の各分野に関する専門機関として、Ministry of Health、Wellness and the Environment 内の Environmental Management Department、Ministry of Agriculture、Rural Transformation Forestry and Fisheries 等がある。これらの機関は管轄する分野に対して十分な知識と経験がある。また、本プロジェクトへの関与にも積極的な姿勢を示している。

3) エネルギーユニット :

本プロジェクトの遂行能力ならびに実行力は十分にあると考えられるが、環境管理に関しては新たな専門スタッフを配置する必要がある。

4) その他政府・民間ステークホルダー

上述 2) の政府組織ならびに民間のステークホルダーは本プロジェクトの積極的な関与を希望しており、今後はコンソーシアムの策定した SEP (Stakeholder Engagement Plan) に従い、十分な協議の場を設ける必要がある。

第4章 ビジネスプランの要旨と分析

RG/Emera によって示されたビジネスプランの要旨を一覧表にまとめ、各項目に対して調査団のコメントを付した（本文参照）。

資源評価と試掘調査のアプローチが調査団見解と若干異なっているが、計画全体としては妥当なものと考えられる。

第5章 結論と提言

5-1 結 論

(1) 地熱資源開発の必要性

- ・ 自国地産資源である地熱資源の開発が急務であると結論される。

(2) 地熱資源資源調査と評価

- ・ 民間企業体（RG/Emera）は、ベースロード電源として必要な 10MW ～15MW の資源が賦存する可能性があるとして結論付けている。
- ・ 本件調査団は、高温かつ大規模な地熱系を想定できるような明白な地熱徴候分布は認められないとの見解を示した。

(3) 坑井掘削計画

- ・ RG/Emera とセ国政府は、資金分担を 75%（自己資金）、25%（無所資金支援）として掘削工事を行う計画である。坑井は生産井仕様 3 井が計画されている。
- ・ 一方、本件調査団は生産井仕様の掘削の前に構造試錐井を掘削するのが望ましいと提案した。
- ・ しかし、掘削のアプローチは事業者の判断にゆだねられるものであり、本調査団はこれ以上踏み込まないこととする。

(4) 開発計画

- ・ 地熱資源が想定通り確保されるという前提において、計画は妥当と判断される。

(5) 資金計画

- ・ プラント建設の資金計画はまだ定まっていない。
- ・ ただし、既に IRENA がセ国政府の支援を表明している。
- ・ 企業体は CDB からの融資を模索している。

5-2 提 言 — 本邦からの支援

以上の状況を受け、セ国政府は本邦からの支援として下記を要望している。

- 日本での技術研修、とくに発電所建設後の貯留層管理、Steam Field Management、施設の維持管理など
- プラント建設のための ESIA の実施
- 送電線建設の ESIA、F/S および建設支援

特に、送電線建設は本開発計画のボトルネックとなり得るので、ESIA と F/S 実施の支援が早急に必要であると考えられる。

また、セ国政府を含めた地熱開発企業体は、プラント建設のための資金源を模索しているため、迂回融資が可能な仕組みの早期成立が望まれる。

セントビンセント及びグレナディーン諸島国 地熱開発に係る情報収集・確認調査

ファイナルレポート

目 次

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	調査目的.....	1-1
1-3	調査対象地域.....	1-1
1-4	セ国関係機関.....	1-1
1-5	JICA 調査団	1-2
1-6	全体調査工程.....	1-2
第 2 章	エネルギーセクターの現況と課題.....	2-1
2-1	セ国の一般社会状況.....	2-1
2-2	電力セクターの現況.....	2-2
2-2-1	法制度（法律及び規制）	2-2
2-2-2	組織の現況と課題.....	2-3
2-2-3	発電・送電設備の現況と課題.....	2-3
2-2-4	電力需給現況と予測	2-4
2-3	地熱開発の現況	2-7
2-4	ドナー、国際機関、民間の活動.....	2-7
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	3-2
3-2-1	地形地質.....	3-2
3-2-2	地化学.....	3-8
3-2-3	物理探査.....	3-12

3-2-4	地熱貯留層モデル.....	3-17
3-3	本調査で実施した現地調査.....	3-20
3-3-1	地表地質調査.....	3-20
3-3-2	地化学調査.....	3-27
3-3-3	重力探査.....	3-34
3-3-4	地熱資源徴候に関する調査.....	3-47
3-3-5	土木計画に関する確認調査.....	3-48
3-3-6	環境社会配慮調査.....	3-50
第4章	ビジネスプランの要旨と分析.....	4-1
第5章	結論と提言.....	5-1
5-1	結 論.....	5-1
5-2	提 言 — 本邦からの支援.....	5-2

添付資料

添付資料-1	協議議事録(M/M)
添付資料-2	現地状況写真
添付資料-3	スコーピング報告書
添付資料-4	プレゼンテーション資料
添付資料-5	収集資料リスト
添付資料-6	容積法計算式

図表目次

図 2-1	セ国における電力セクター組織体制.....	2-3
図 2-2	セ国におけるピーク需要.....	2-5
図 2-3	電力需要.....	2-5
図 3-1	グレナダ及び小アンティル諸島周辺のプレート分布	3-4
図 3-2	セントビンセント島周辺における火山フロントの変遷.....	3-5
図 3-3	Soufriere 火山の地質図.....	3-5
図 3-4	Soufriere 火山の地質図.....	3-6
図 3-5	Soufriere 火山東麓でのリニアメント解析.....	3-6
図 3-6	Soufriere 火山における噴火時のハザードマップ	3-7
図 3-7	年代測定から推定される Soufriere 火山の火山活動史.....	3-7
図 3-8	セ国の地熱徴候分布	3-9
図 3-9	Cl-SO ₄ 、-HCO ₃ 三成分系	3-10
図 3-10	Na-K-Mg 三成分系.....	3-11
図 3-11	MT/TEM 測点位置図.....	3-15
図 3-12	キャップロック下面標高平面図	3-16
図 3-13	比抵抗構造断面図 (WE07)	3-16
図 3-14	Soufriere 火山の噴気、Wallibou 川の温泉を踏まえた地熱貯留層モデル	3-18
図 3-15	Wallibou 川流域周辺における比抵抗構造を踏まえた地熱貯留層モデル.....	3-18
図 3-16	Soufriere 火山の東麓における比抵抗構造を踏まえた地熱貯留層モデル.....	3-19
図 3-17	現地調査位置図.....	3-22
図 3-18	Soufriere 火山の溶岩ドームで観察される噴気帯.....	3-23
図 3-19	Soufriere 火山西麓、Wallibou 川に湧出する温泉と地質および岩石の薄片観察 ...	3-24
図 3-20	Soufriere 火山東麓、リニアメント通過箇所付近の風景と地質および岩石の薄片観 察.....	3-25
図 3-21	地化学調査を行った調査地点	3-27
図 3-22	温泉水の Cl-SO ₄ -HCO ₃ 三成分系	3-31
図 3-23	温泉水の Na-K-Mg 三成分系	3-31
図 3-24	噴気ガスの He-Ar-N ₂ 三成分系	3-32
図 3-25	断層構造に対する鉛直一次微分と水平一次微分の比較.....	3-36
図 3-26	重力測点位置図.....	3-37
図 3-27	G-H 図.....	3-39
図 3-28	ブーゲ異常図	3-39
図 3-29	セントビンセント島北部の地図	3-40
図 3-30	傾向面 (上) 及び傾向面残差図 (下)	3-41
図 3-31	水平一次微分図.....	3-43
図 3-32	垂直一次微分図.....	3-43
図 3-33	重力測定から推定した地下での解釈密度分布.....	3-44

図 3-34	水平一次微分図と垂直一次微分図の重ね合わせ.....	3-46
図 3-35	セントビンセント島北部の地質図.....	3-46
図 3-36	セントビンセント島における水理分布と掘削候補地位置.....	3-48
図 3-37	掘削地点（RG1）及びアクセス道路の状況.....	3-49
図 3-38	セ国における EIA 手続きの手順.....	3-51
表 1-1	セ国関連機関.....	1-1
表 1-2	JICA 調査団.....	1-2
表 1-3	全体調査工程.....	1-2
表 2-1	セントビンセント及びグレナディーン諸島国の一般社会状況.....	2-1
表 2-2	VINLEC の保有する電力設備.....	2-4
表 2-3	1989 年以降の実効電気料金.....	2-6
表 3-1	RG（2015）における MT 探査概要.....	3-12
表 3-2	現地地質調査結果一覧.....	3-23
表 3-3	X 線回折分析結果.....	3-26
表 3-4	地化学調査を行った調査地点と現地測定結果.....	3-28
表 3-5	分析項目と分析方法.....	3-29
表 3-6	温泉水の分析結果.....	3-29
表 3-7	噴気ガスの分析結果.....	3-30
表 3-8	地化学温度計算結果.....	3-33
表 3-9	重力探査解析図一覧.....	3-35
表 3-10	重力測定結果例.....	3-38
表 4-1	RG/Emera のビジネスプランと調査団コメント.....	4-1

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

セントビンセント及びグレナディーン諸島国（以下セ国）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。この様な中、セ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。現在、セ国政府と外国資本の民間会社との PPP により、開発計画が進行している。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（2013 年 3 月）、続いて JICA、IDB 及び CDB の三者で、同分野における協力覚書が署名され（2014 年 7 月）、協調融資に関する合意書が締結された。

この様な背景から、セ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 調査目的

- ✓ 地熱エネルギー開発に必要な技術的、財政的支援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、及び組織制度等に関する調査の実施。

1-3 調査対象地域

セ国セントビンセント島

1-4 セ国関係機関

本件調査に関連するセ国の機関は以下の通りである。

表 1-1 セ国関連機関

機関名	業務分掌
総理府エネルギー局	政策策定、実施、監理
セントビンセント電力会社（VINLEC）	国有電力会社

出典：JICA調査団

1-5 JICA 調査団

本件調査団は以下の団員から構成される。

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 セ国の一般社会状況

セ国の一般社会状況を表2-1に示した。

セ国は1979年に英国から独立した総国土面積約389 km²、人口約10.9万人の、英語を公用語とする島嶼国である。面積は我が国鹿児島県屋久島(505 km²)の約0.77倍、北海道利尻島(182 km²)の約2倍に相当している。

政治体制は、エリザベス女王を元首とする立憲君主1院制議会民主主義を採用しており、2大政党の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(CARICOM)及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。主要産業は農業及び観光業である。主要輸出品目はバナナ等の農業生産物となっているが、物的取引を表わす総貿易額では収入が輸出の約8倍となっているため、おもな国家経済は観光業によって支えられていることが分かる。輸入品目の上位項目には鉱物・燃料がリストされている。

表2-1 セントビンセント及びグレナディーン諸島国の一般社会状況

1	一般		
a.	面積	390 km ²	(2014年世銀資料)
b.	人口	109000 人	(2014年世銀資料)
c.	首都	キングスタウン	
d.	言語	英語(公用語)、フランス語系バトワ語	
e.	独立	1979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	一院制(選出議員15名、選任議員6名)	
d.	主な政党	統一労働党(ULP)、新民主党(NDP)	
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、観光業	
b.	GNI	720百万USD	(2014年世銀資料)
c.	一人当たりのGNI	6,610 USD	(2014年世銀資料)
d.	GDP成長率		(世銀資料)
	i)	2012年	1.40%
	ii)	2013年	1.70%
	iii)	2014年	0.60%
e.	インフレ率		(消費者物価比 IMF)
	i)	2012年	2.60%
	ii)	2013年	0.80%
	iii)	2014年	0.20%
f.	失業率	未詳	
g.	総貿易額		(2013年 WTO資料)
	i)	輸出	48百万 USD (F.O.B)
	ii)	輸入	378百万 USD (C.I.F)
h.	主要貿易品目		
	i)	輸出	バナナ、タロイモ、くず粉
	ii)	輸入	鉱物・燃料、食料品、一般機械、化学肥料
i.	主要貿易相手国		(2014年 WTO資料)
	i)	輸出	セントルシア、トリニダード・トバゴ、バルバドス、アンティグア・バーブーダ、ドミニカ
	ii)	輸入	米国、トリニダード・トバゴ、EU、ベネズエラ、中国
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) 日本、(2) 豪州、(3) 韓国	
	ii)	(4) 英国、(5) カナダ	

(出典: 日本国外務省ウェブサイトから(2016年4月27日更新版))

2-2 電力セクターの現況

セ国は、総エネルギー消費量のうち約 95%を輸入石油燃料に依存している。セントビンセント本島単独では、水力発電が総一次エネルギー消費の約 5%程度に貢献しているものの、それ以外の島々では電力供給のすべてをディーゼル発電に依存している。化石燃料の全ては輸入に依存している。

2-2-1 法制度（法律及び規制）

(1) 概要

セ国の主要電力供給機関は、VINLEC と呼ばれる国有電力会社である。セ国の電力供給は、英国植民地政府（Crown Colony Government）が 1931 年に 32 の顧客に電力供給を開始した年にさかのぼるとされる。その後、1953 年にコモンウェルス開発公社（CDC）が電力事業を継承したが、1961 年になって、政府資本 49%、CDC 資本 51%の St. Vincent Electricity Services Limited が設立された。1973 年電力供給法（Electric Supply Act）が制定されて電力供給事業の法制度化が確立された。セ国政府は 1979 年の独立後、1985 年 7 月に全ての株式を取得して、VINLEC は国有会社となっている。

(2) 電力供給法 (1973)

セ国の電力セクターの運営は 1973 年の電力供給法（Electricity Supply Act 1973）を基礎としている。この法律の規定により、VINLEC は IPP 及び自家発電事業者に対してライセンスを発行することができることになっている。系統に接続しない個人利用のための発電においても VINLEC の認可が必要である。ただし、このライセンスは関係する大臣の許可を必要としているため、実質的に政府の管理下にあると言えることができる。

(3) 地熱資源開発法 (2015)

2015 年 8 月に地熱開発にかかり、新しい法案が国会に提出され国会承認を受けている。この法案は地熱資源開発にかかる条件を規定するものであり、特に地熱エネルギー開発の投資促進を企図したものである。電気供給法（Electricity Supply Act）は依然として有効であり、地熱開発に関する細則はこの地熱資源開発法によって補完されている。基本的に地熱資源開発のための許可、ライセンス、認可譲渡などの条件について規定している。地熱開発については、開発権利の認可は 25 年間与えられることになっており、許可、ライセンス、認可譲渡などの条件についても適切に規定されている。投資家の権利についても保護がなされている。

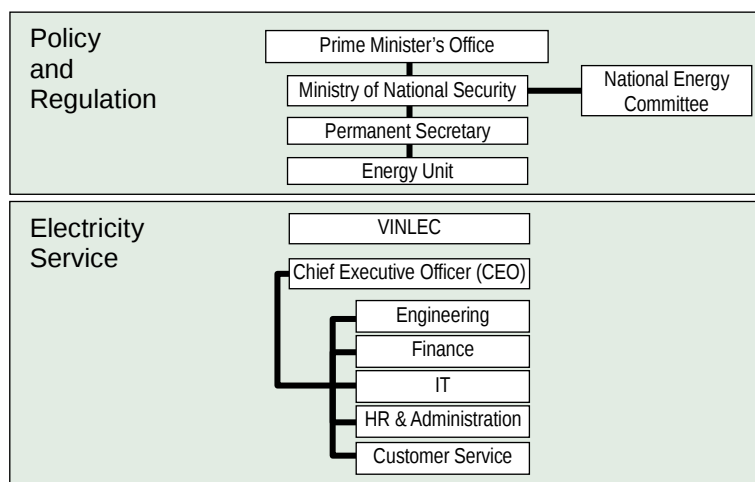
一方、政府側にて委員会を発足させ、この法律によって必要とされるシステムを機能させることが重要と考えられている。これは委員会の役割と責任が重要な位置付けにあるためである。検査員についても地熱資源の管理、モニタリングを実施するために重要な役割を果たすことになっている。この人材確保は今後重要になってくると考えられる。また実際の法律適用には、規制や細則の制定が必要と考えられるが、これは今後整備されるべきものである。

2-2-2 組織の現況と課題

(1) 政府組織

首相府がエネルギーセクターの監督官庁となっている。首相府にはエネルギー・ユニットが設立され、2008 年エネルギー政策の策定・実施を分掌している。

国家エネルギー委員会は、その他省庁や国家関連機関の利害関係者からなり、2006 年に国家エネルギー政策のドラフトを含むエネルギー関連事項や政策にかかり政府に助言を行う機関として設立された。セ国の電力セクターにおける組織体制は次に示すようである。



出典： JICA 調査団

図 2-1 セ国における電力セクター組織体制

(2) 電力会社

VINLEC は垂直統合された電力会社であり、1973 年より電力の発電、送電、配電にかかる独占企業として機能している。この体制は 2033 年まで継続されることになっている。また 2つの IPP 会社¹が VINLEC によってランセンスを付与されており、私有地であるパーム島とムスティク島の電力供給を行っている。

セ国には独立規制機関は存在しない。理論的には、首相府のエネルギー・ユニットが実質の規制機関と見なされるものの、VINLEC は概ね独立性の高い事業を行っている。

2-2-3 発電・送電設備の現況と課題

(1) 発電

VINLEC はセントビンセント本島、ベキア島、ユニオン島、カノアン島及びメイルー島において電力設備を保有、運営している。セ国の主要な発電はディーゼル発電である。セント

¹ IPP 会社：民有地である Palm 島、Mustique 島のリゾートで消費する電力のみを発電するオフグリッドの電力供給会社

ビンセント本島に限れば、2 箇所のディーゼル発電所（ケーンホールとローマンズベイ）と 3 箇所の水力発電所（サウスリバー、リッチモンド、クンバーランド）が稼働している（表 2-2）。

表 2-2 VINLEC の保有する電力設備

Main Island	Type	Unit	Capacity (MW)	Year constructed
Cane Hall	Diesel	8 units	19.66	1971-2004
Lowmans Bay*	Diesel		17.4	2005
South River	Hydro	No.1	0.275	1952
		No.2	0.275	1952
		No.3	0.320	1958
Richmond	Hydro	No.1	0.550	1962
		No.2	0.550	1962
Cumberland	Hydro	5 units	3.7 MW	1987

*本島の電力需要の約 60%を供給

出典：VINLEC ウェブサイト他による

[その他諸島の発電設備]

その他のグレナディーン諸島の電力はディーゼル発電所を基本とした民間所有の電力設備によって供給されている。ベキア島、ユニオン島、カノアン島、メイルー島についてもディーゼル発電に依存している。VINLEC の 2007 年レポートによると、セ国は過去 10 年にわたりおよそ 5.6 MW の設備を整備し、ディーゼル発電は 1998 年の 20.8 MW から 2007 年には 35 MW まで増加している。

(2) 送配電設備

VINLEC の送電、配電システムは、(i) 約 250 マイルの 33kV 送電線と 11kV 配電線 (27,000 個の電柱を含む)、(ii) 約 11,000 個の配電用変圧器、(iii) 8,050 個の街灯から構成される。

(3) 課題

セ国では、電力の一次エネルギーの殆どを輸入石油製品に依存しているため、電力供給の安定性は、石油製品の国際価格に大きく影響されているのみならず、電気料金が高止まりとなっており、国家経済に大きく影響している。このため、水力、風力、太陽光、地熱などの地産地消のエネルギーの開発利用が喫緊の課題となっている。同時に、老朽化したディーゼル発電設備や水力発電設備、さらには送配電施設の更新も重要な課題となっている。

これらの課題に対応することによって最適なエネルギーミックスを達成することが重要であると考えられている。

2-2-4 電力需給現況と予測

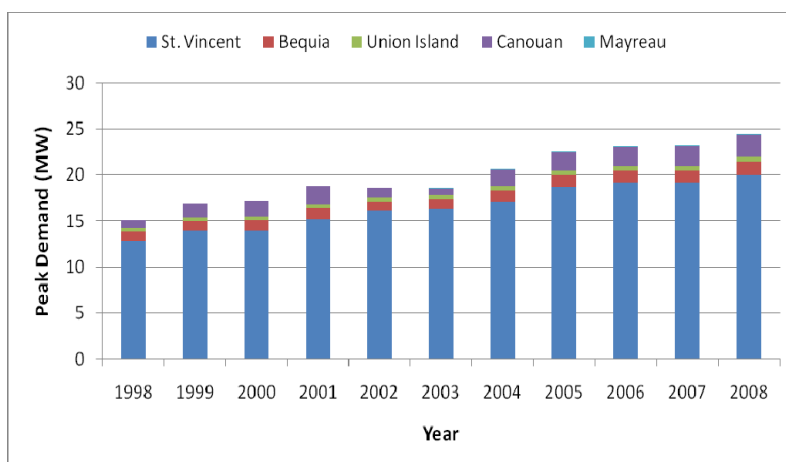
(1) 供給

発電容量及び発電電力量は、2009 年現在それぞれ約 49 MW、135 GWh である。現有のディーゼル発電所は老朽化し低効率になっているため、発電設備の更新が必要となっているとされる。

現在計画されている設備容量 10～15MW の地熱開発は、セ国の電力事情を大きく改善するものと期待されている。また、地熱資源に余裕があれば、将来的な選択肢として、近隣の島々への電力供給や近隣島嶼諸国への電力輸出も想定されている。

(2) 需要

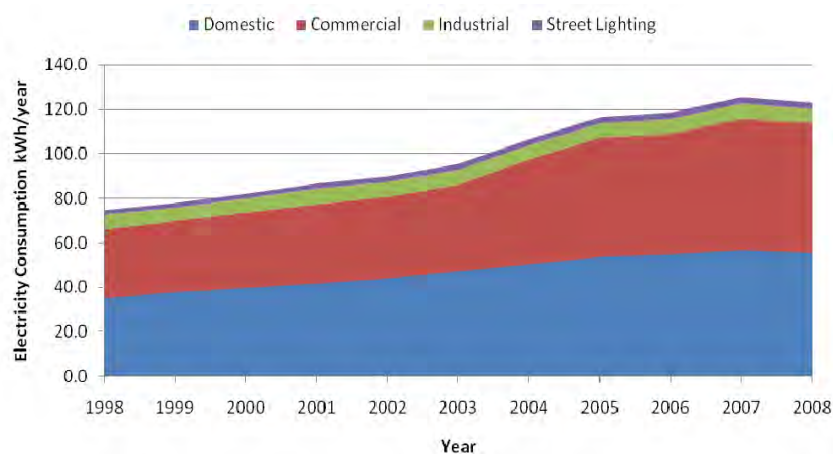
セントビンセント本島のピーク需要は1988年の14 MW から2008年には20 MW まで増加し、2011年には21.1MW に達している。この需要は稼働可能設備容量（本島のみ）32MW によって供給されている。また、グレナディーン諸島のピーク需要も同様の増加を示している。カノアン島のピーク需要は同時期に60%増加している。これらの増加傾向は以下の図に示される。なお、2006年以降ピーク需要は目立った増加をしていない。



出典： Energy Action Plan, Government of SVG (2010)

図 2-2 セ国におけるピーク需要

国内の電力需要を次の図に示す。商業用及び家庭用については、2008年においてそれぞれ48%、45%の消費を示している。



出典： Energy Action Plan, Government of SVG (2010)

図 2-3 電力需要

セ国の家庭用、商業用（政府を含む）需要は最も大きい需要者である。一方、島内にはいくつかの産業用需要者があり、街灯需要は極めて少ない。1998年から2008年までの10年間に総需要は74.6GWhから122.9GWhまでの増加を記録している。

セ国経済において、2003年以降需要増において最も伸びがあったのは商業セクターであった。国内の電力需要は年間平均6.9%で増加すると考えられている。これにより2017年までに新しい電源が必要になるとされる。

VINLECの2009年の需要予測によると、政府がエネルギー源の多様化を促進しない場合には、電力の不足分は次のような化石燃料による発電施設の増強が必要になり、その結果二酸化炭素排出量も著しく増加するものとされている。

- 2015年及び2030年までにセントビンセント島のピーク需要は、それぞれ27MW、31MWになると予測される。これらに対応する予備電源を含めた発電容量は、それぞれ48MW、55MWである。
- 総発電電力量は、2015年及び2030年までにそれぞれ、158GWh、184GWhに増加する。
- 追加発電容量は石油系化石燃料（ディーゼルないしは重油をベース燃料）発電によって賄われるものと想定すると、これにより2015年までに100万ガロンの石油系燃料の追加輸入につながり、2020年までには300万ガロンの追加になると考えられる。
- このため、二酸化炭素排出量も増加することとなる。
- セ国内の他島嶼においても、電力需要は今後10年間で年間あたり3～4%程度増加すると考えられている。これらも、二酸化炭素排出量の増加を助長することとなる。

(3) 電力料金の現況と課題

電気料金は次のコンポーネントからなっている。すなわち、(i) kWhあたりの単価、家庭用、商業用需要者への最低料金、(ii) 商業用及び産業用需要者へのkWあたり契約電力料金、(iii) kWhあたりの燃料サーチャージ料金（燃料価格に応じて月ごとに変化）、(iv) 15%の付加価値税（商業用、産業需要者の総需要と家庭用需要者の200kWhを超える消費量に対して課税）。実効電気料金を次の表に示す。

表 2-3 1989年以降の実効電気料金

Type of Customer	Less than 50 kWh/month	More than 50 kWh/month	All Units	Minimum Charge	Demand Charge
Domestic (EC\$)	0.425	0.500	-	5	-
Commercial (EC\$)	-	-	0.480	15	12
Industrial (EC\$)	-	-	0.440	-	12
Street Lighting (EC\$)	-	-	0.565	-	-

出典：Energy Action Plan, Government of SVG (2010)

一般家庭の電気料金は2007年には燃料サーチャージを含めてEC\$ 0.89/kWh (US\$ 0.33/kWh)だったが、2008年にはほぼEC\$ 1.05/kWh (US\$ 0.39/kWh)まで増加した。その後、2011年にはEC\$ 0.59 - 0.78/kWh (US\$ 0.22 - 0.29/kWh), 2015年にはEC\$ 0.27 - 0.32/kWh

(US\$ 0.27 - 0.32/kWh)を推移している。2008 年の発電料金の高騰は主に燃料価格の高騰によるものである。このため、国際情勢の変化によって変動する燃料価格に計供されない地産地消の再生可能エネルギーを開発し、燃料価格増加の影響を最小限にすることが極めて重要である。

参考資料：

- Energy Action Plan for St. Vincent and the Grenadines First edition, January 2010
(<http://faolex.fao.org/docs/pdf/stv143765.pdf>)
- Energy Snapshot , St Vincent and the Grenadines, NRELM August 2015
(<http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64127.pdf>)
- VINLEC Web site, Electricity Rate Structure and Fuel Surcharge
(<http://www.vinlec.com/contents/electricity-rate-structure> visited in July 2016)

2-3 地熱開発の現況

セ国の地熱開発については、Reykjavik Geothermal 社²（以下、RG）と Emera (Caribbean)社³との共同企業体とセ国政府との間で、2014 年 5 月 13 日に Letter of Intent (LoI) が締結された。この LoI によって、RG/Emera と政府が PPP を組成して地熱発電事業を立ち上げることが合意されている。この合意に基づき、RG/Emera は独自資金で地表調査（地質調査、地化学調査、物理探査）を実施している。2015 年 6 月 30 日には、RG/Emera 社によって事業計画が提示された。現在、JICA、IDB の支援で掘削に関する ESIA が終了し、2017 年 1 月からの掘削開始に向けて準備がすすめられている。掘削に関する資金は、UK-DFID からセ国政府に対して無償資金が CDB 経由で提供されている他、CDB-Contingency Loan が PPP に対して提供されている。また、井戸掘削の成功を条件に Abu Dhabi Fund からの融資が決定されている。

2-4 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 USD 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。

² Reykjavik Geothermal Ltd: アイスランドのレイキャビック市に本社を置いている。経営者と米国の投資家が投資して設立した会社とされる。

³ Emera (Caribbean)社: Barbados の株式市場に上場。ただし、株式の 80%はカナダ国の Emera 社が保有。

CDB は現在セ国において、PPP のコンソーシアムに対して融資案件を実施中である。

(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) から無償資金で運用されるプログラムである。

SEEC Programme とは別枠資金で DFID は「セ」国の地熱開発に CDB を通じ 4 百万英国ポンド(5.7 米国ドル)の無所資金を拠出している (2016)。この資金は、SVGCL を構成する「セ」国政府の equity として計上され、地熱開発のフェーズ 1 (地熱井戸掘削工事及び関連工事) に使用される予定である。

(3) ニュージーランド

ニュージーランド政府はセントルシア国に地熱専門家を派遣してカリブ諸国への技術協力を開始した。2015 年に拠点をグレナダ国に移してグレナダ国の地熱開発の技術調査を実施している。セ国にも政府支援のため訪問している。

(4) CDB/IDB/JICA

JICA は、IDB と CORE スキーム (Co-financing for Renewable Energy and Energy Efficiency) の実施に合意し、2014 年の合意内容を更新している。CORE スキームは基本的に気候変動緩和策の貢献する目的で合意されたもので、気候変動の影響とされる自然災害の顕在化や発電のための化石燃料による温暖化などに対応するものである。資金協力は CDB を通じて行われる計画となっており、現在 CDB と合意に交渉が進行中である。

(5) GIZ

GIZ は Caribbean Renewable Energy Development Program (CREDP) を通じてセ国での再生可能エネルギー開発を支援している。これは CARICOM と GIZ (旧 GTZ) の共同プロジェクトである。プロジェクトはドイツ経済協力開発省による資金で実施されている。このプロジェクトは再生可能エネルギー利用とカリブ地域における省エネ適用のための障害を取り除くために実施されているものである。支援には、(i) エネルギー政策、(ii) 再生可能エネルギー開発、(iii) 省エネ活動、(iv) 能力開発、啓蒙、情報提供などが含まれる。

(6) OAS

OAS は Caribbean Sustainable Energy Program (CSEP) を通じてセ国を含む地域メンバーに技術協力を実施している。プロジェクトはカリブ海諸国の 7 つの国によりクリーンで持続可能性の高いエネルギー利用を加速させるために実施されている。再生可能エネルギーと省エネの実施と利用にかかる障害を緩和することにより、開発・利用を進めるための市場条件を整備することに取り組んでいる。特に、プロジェクト活動はエネルギーセクターのガバナンスや管理能力を改善することに注力している。主な活動には次のようなものが含まれる。す

なわち、(i) 持続可能なエネルギー計画の採用を通じて、持続可能な目標・ターゲットを確立させること、(ii) 特定の課題や障害に対応する活動を実施するための支援を行う。

第3章 自然条件調査

3-1 調査概要

3-1-1 調査の目的

セ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、アクセス、取水を含む掘削計画のレビュー調査、及び環境社会配慮にかかる調査を実施した。

3-1-2 調査内容

本調査でこれまでに実施した調査は以下の通りである。

- ✓ 既存調査結果のレビュー
 - 地質、地熱徴候
 - 地化学
 - 物理探査（MT/TEM 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・噴気化学分析）
 - 重力探査
- ✓ 掘削計画にかかる現地レビュー調査
- ✓ 環境社会配慮にかかる調査

3-2 既存調査結果のレビュー

3-2-1 地形地質

(1) 調査内容の概略

地熱資源の評価を目的とするセ国における地熱徴候に対する地質学的な検討は、Reykjavik Geothermal (RG, 2013) によってなされている。この検討は「A Geothermal Desk Study for Mt. Soufriere, St. Vincent (RG, 2013)」という報告書にまとめられている。本報告書はそれ以前のデータを、Geothermica Italiana (1991)、Dames and Moore (1998)、Caribbean Power (1988)、Sigurdsson and Carey (1991)、Lindsay et al. (2005) から収集し、Geothermex (2011) による検討結果を統合している。このため、RG (2013) は、セ国の地熱開発に着目してまとめられた総合的な地質研究結果と言える。本節では、この RG (2013) を中心として、既存の地熱資源に関する地質調査・研究のレビューを行う。

(2) 地形及びテクトニクス

セントビンセント島は中米の小アンティル諸島の南側に位置する火山島である。小アンティル諸島のテクトニクスについては Jacobs (2015) によりまとめられている。小アンティル諸島はカリブ海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 (図 3-1)。カリブ海プレートは北アメリカプレート及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)。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～セントビンセント島～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)。

(3) 地質

セントビンセント島では北から、Morne Garu volcanic centre、Grand Bonhomme volcanic centre 及び South-East volcanics の主に 4 帯の火山噴出物から構成される (図 3-3)。これらの火山噴出物は主に更新世 (Pleistocene) 以降に噴出し、基盤の石灰岩を覆っているとされる (Caribbean Power, 1988)。

セントビンセント島の南には初期の火成活動で生成した玄武岩～玄武岩質安山岩の溶岩が点在しており、これらは 0.6Ma 以降に島の複数箇所から噴出している。

3600～4500 年前には黄色の凝灰岩や黒色のスコリアで特徴づけられる Yellow Tuff formation が島の大部分に分布している。その後、北から Soufriere 火山、Morne Garu Volcanic centre、Grand Bonhomme volcanic centre 及び South-East volcanics からの火山噴出物が島に分布している。

最も若い火山は Soufriere 火山であり、歴史時代に少なくとも 5 回の噴火を起こしている (1719、1812、1902、1971-72、及び 1979 年の噴火は史料による記録が残されている)。

最近の噴火は 1979 年に発生し、Soufriere 火山の山頂には玄武岩～安山岩のドームが形成されている（図 3-4）。

(4) 断裂系

Soufriere 火山の火口には古い外輪山に貫入岩（玄武岩、玄武岩質安山岩）が分布しており、貫入の方向は北北東～東～北北西走向である（RG, 2013）。

一方、Soufriere 火山の東山麓では地形解析により北西-南東系及び北東-南東系のリニアメントが複数抽出されている（図 3-5）。これらのリニアメントが断層で生じたものであり、現在の応力場（ほぼ東西圧縮：図 3-5）で生成したものであるとすると、主に横ずれが主体の断層であろうと考える。

それ以外の地域では断層及び断裂に関する記述がない。

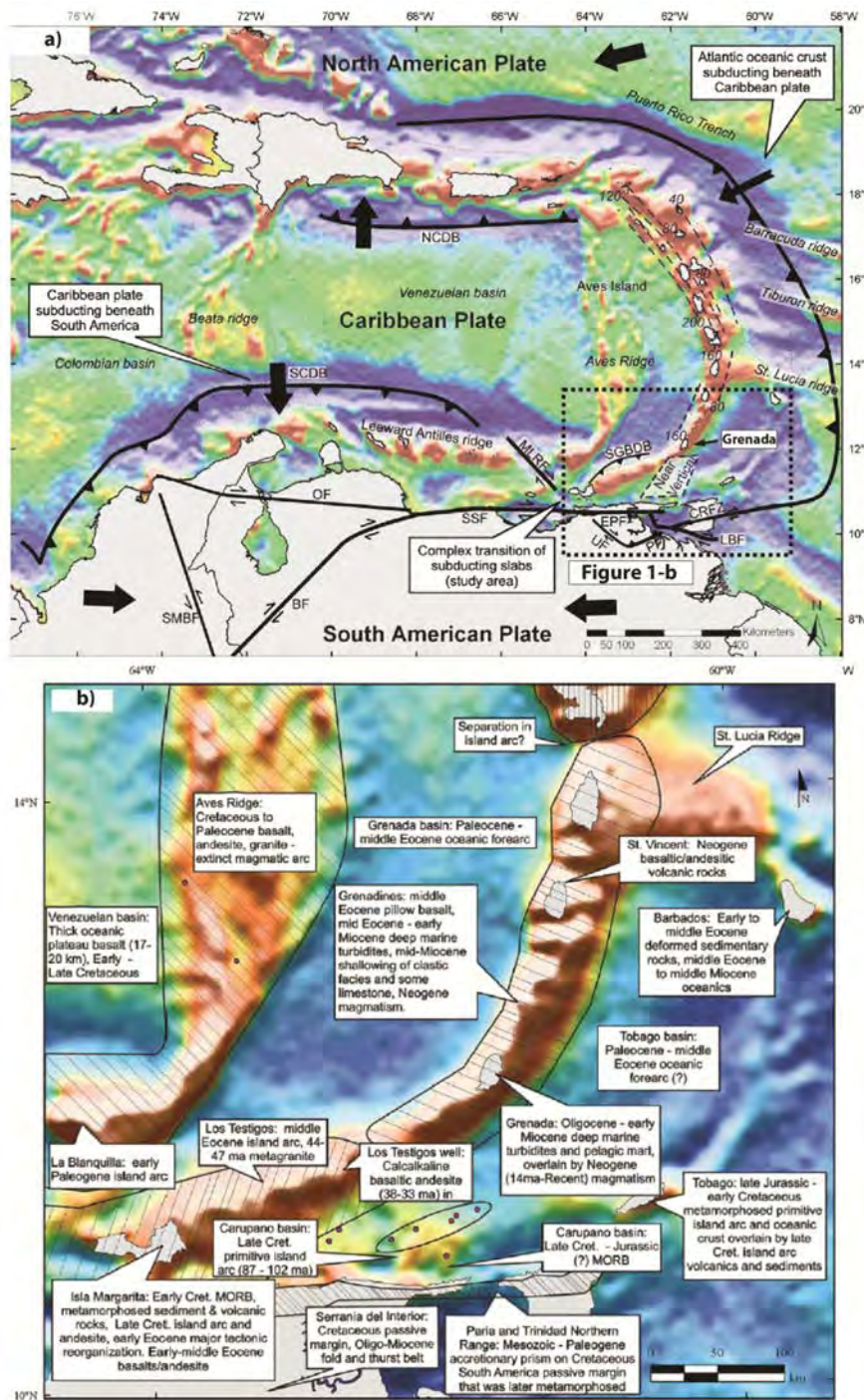
(5) 変質作用

Soufriere 火山の火口に 1979 年に噴出した溶岩ドームには噴気に伴って白色の粘土化変質帯がある。一方、Waillibow 流域ではデブリと溶岩流の間、溶岩流のき裂から 40℃程度の温泉水が湧出しているが、岩石の変質については報告されていない。その他の地域では変質帯に関する記述はない。

(6) Soufriere 火山のハザードマップ

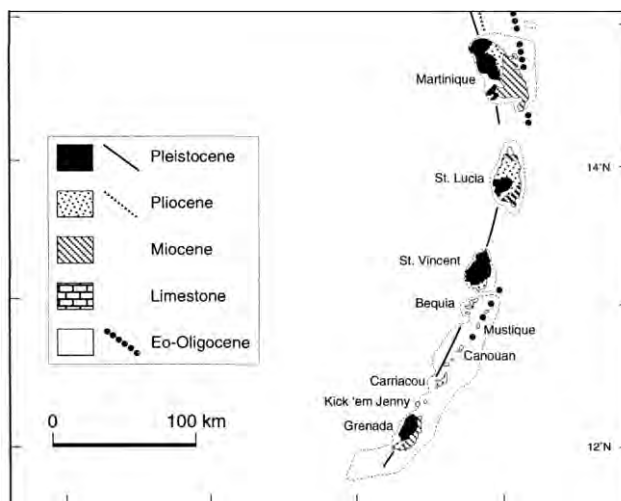
Soufriere 火山は小アンティル諸島において活発な活火山の一つであり、過去の噴火では大規模な火砕流、火山泥流、噴石及び降灰により甚大な被害を被っている。ハザードマップによれば火山の南側を除いて噴火時に火砕流が到達する可能性が示されている（図 3-6）。西の Wallibou 川、東の Rabbaca 川流域も火砕流が到達する可能性が高い範囲にある。RG (2013) は過去の噴出物と噴出年代を検討した結果から Soufriere 火山では過去 1000 年において 11 回の大規模噴火が発生しており、平均すると約 93 ± 13 年周期と計算されたとした（図 3-7）。ただし、1979 年の噴火のように前回の噴火から数年経過後に噴火する事例もあり、例外的な噴火もありうる。

このような背景から RG (2013) は、このような場所での開発では 1) 火砕流に耐えられるように坑口装置や配管を埋設すること、2) なるべく短期間で地熱開発に費やした投資資金を回収できるよう計画する必要があるとしている。



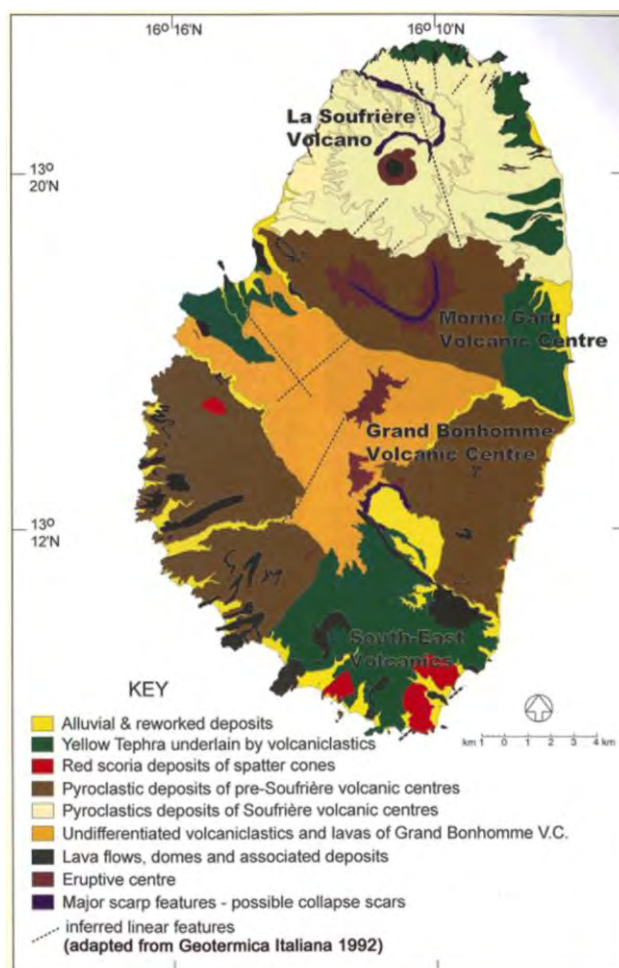
出典：Jacob (2015)

図 3-1 グレナダ及び小アンティル諸島周辺のプレート分布



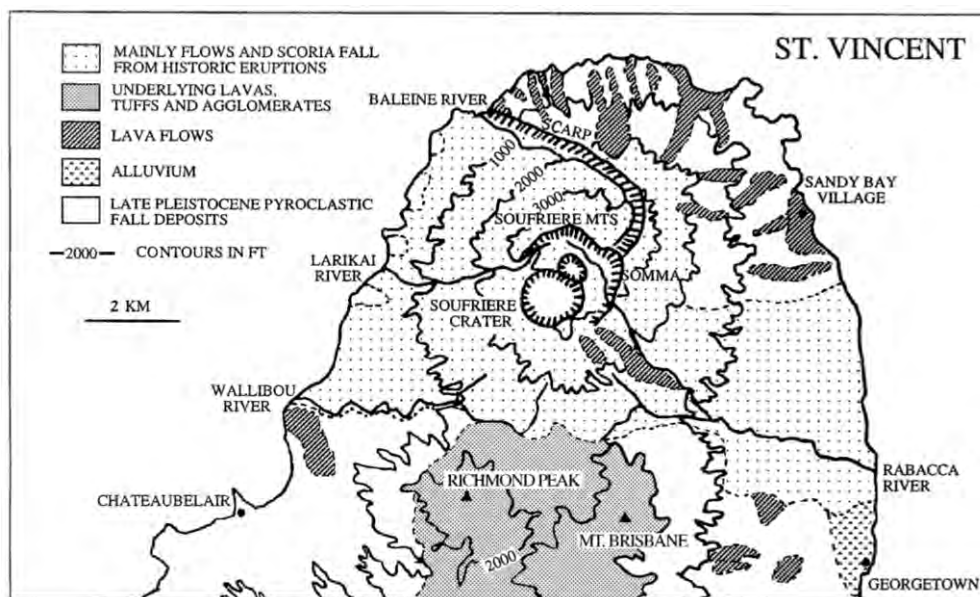
出典：Jacob (2015)

図 3-2 セントビンセント島周辺における火山フロントの変遷



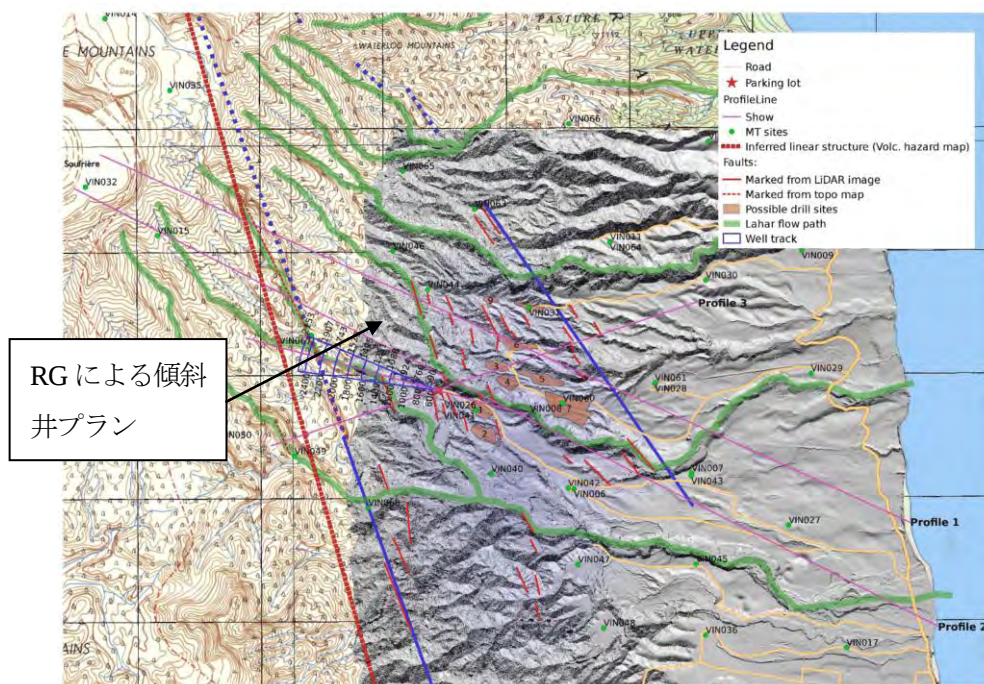
出典：Lindsay et al. (2005)

図 3-3 Soufriere 火山の地質図



出典：Brophy and Haizlip (2003)

図 3-4 Soufriere 火山の地質



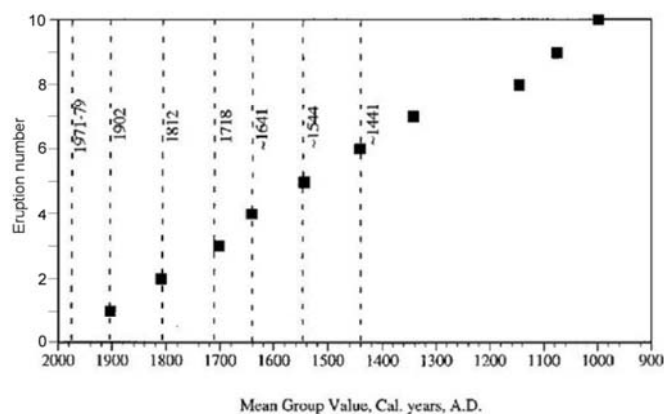
出典：RG (2015)

図 3-5 Soufriere 火山東麓でのリニアメント解析



出典：Linsay et al. (2005)

図 3-6 Soufriere 火山における噴火時のハザードマップ



出典：RG (2013)

図 3-7 年代測定から推定される Soufriere 火山の火山活動史

(7) 調査団見解と調査方針

RG (2013) はセントビンセント島、特に北部の Soufriere 火山について既存調査結果を取りまとめ、Soufriere 火山に関する詳細な地質層序、地質構造、火山活動の特徴を明らかにした。一方で、地表の変質や断裂分布についてはほとんどデータがない。また、Soufriere 火山の東山麓のリニアメント地形については断層によるものかどうか不明である。そのため、地表調査では温泉湧出が確認されている Wallibou 川流域、東麓のリニアメント箇所において地熱活動により生じた変質帯や地熱流体を規制する断裂の特徴を検討するためのデータを得ることを調査方針とした。

3-2-2 地化学

(1) 調査内容の概略

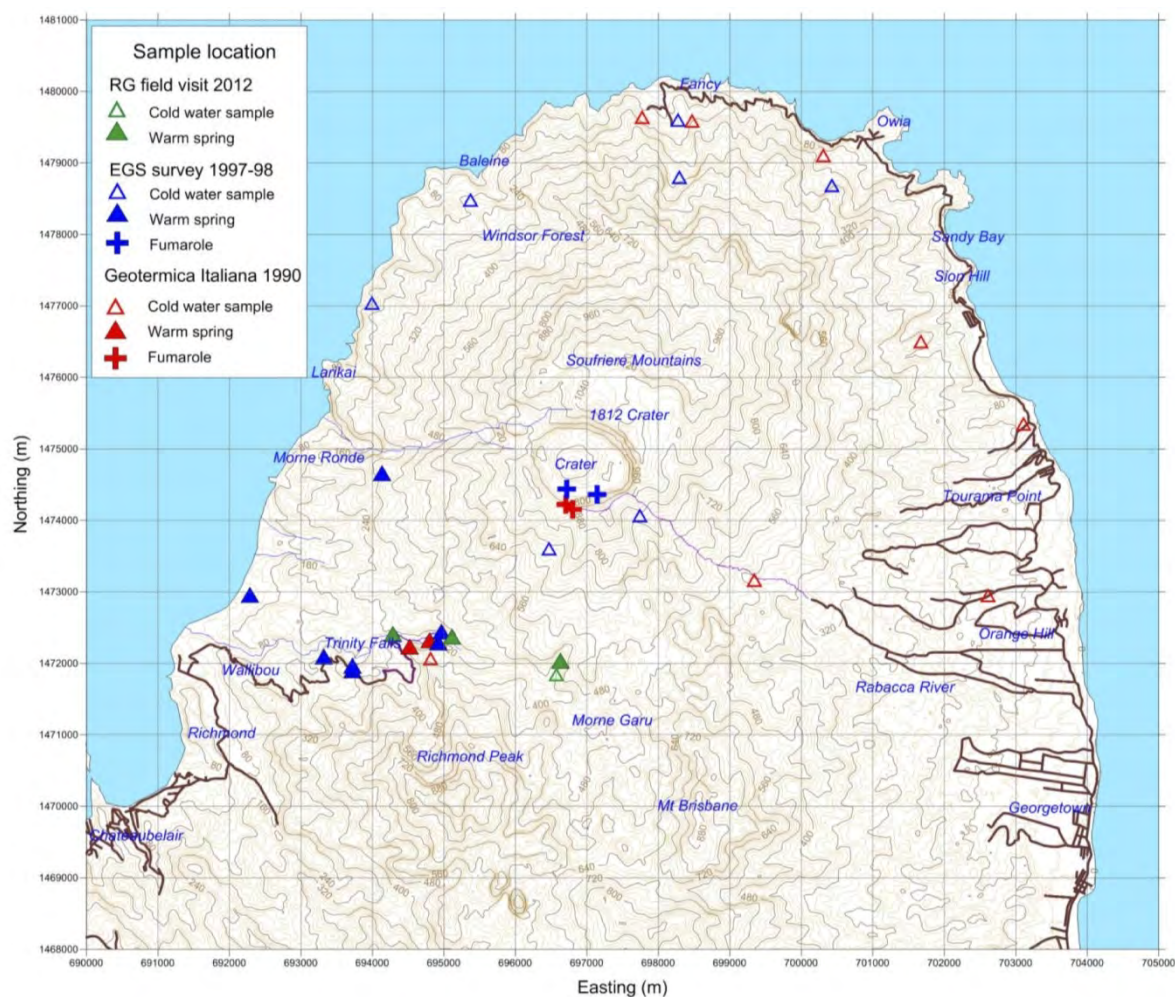
地熱資源の評価を目的とするセ国における地熱徴候に対する地化学的な検討は、Reykjavik Geothermal (RG, 2013) によってなされている。この検討は「A Geothermal Desk Study for Mt. Soufriere, St. Vincent (RG, 2013)」という報告書にまとめられている。本報告書はそれ以前のデータを Sigurdsson (1977)、Geothermica Italiana (1991)、Dames and Moore (1998) 及び Caribbean Power (1988) から収集し、Geothermex (2011) による検討結果を統合している。従い、RG (2013) はセ国の地熱徴候と地熱資源に関する総合的な地化学研究結果と言える。本節では、この RG (2013) を中心として、既存の地熱資源に関する地化学調査・研究のレビューを行う。

(2) 沈み込み帯の地熱系の一般的特徴

地熱資源量进行评估するために、地化学調査は、高温の熱水卓越型地熱貯留層に由来するとされる指標を抽出する。沈み込み帯に位置する安山岩質火山地域に賦存する地熱系の数多くの研究から、高温の地熱系の共通する特徴として以下のことが挙げられる。

- ・ 火山及び複合火山山体周辺の噴気、沸騰泉、高温温泉等の高温地熱徴候の存在
- ・ 地熱流体の上昇と沸騰を示唆する高標高に位置する蒸気加熱型酸性温泉の存在
- ・ 高温の熱水対流系を示唆するマグネシウム (Mg) に乏しい中性の塩化物温泉の存在
- ・ 噴気ガスに含まれるマグマ性ガス成分

図 3-8 に示すように、セ国の地熱徴候は Wallibou 川北岸の中温の温泉と、Soufriere 火山カルデラ内に位置する溶岩ドーム南縁の噴気に限定される。温泉の温度は 50℃未満である (Geothermex, 2011)。一方、噴気の温度は水の沸点と同等である。



出典：RG (2013)

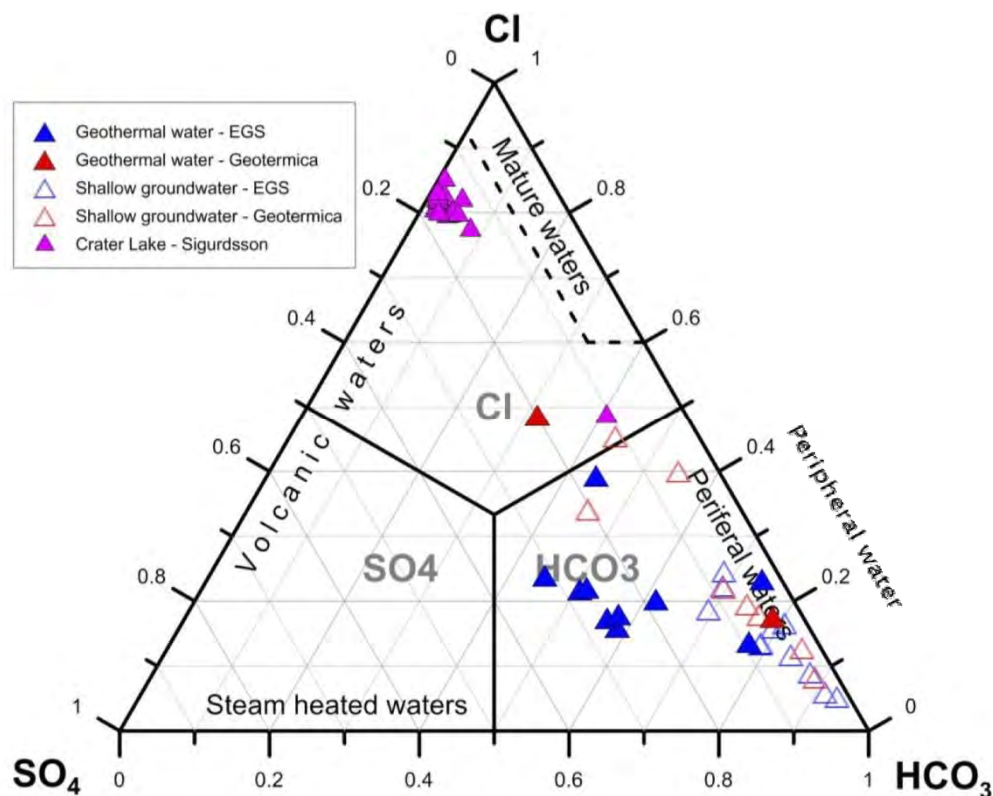
図 3-8 セ国の地熱徴候分布

噴気がカルデラ内に限定されることから、噴気蒸気は溶岩ドーム直下にある火道を通じてマグマ溜まりから直接地表に上昇している可能性がある。このため、噴気及びカルデラ湖 (Sigurdsson, 1977) は、大規模な熱水対流系というよりはむしろ局所的な火山活動による産物と考えることができる。高標高地に他の噴気がないことと、山体裾野に高温 (沸騰) 温泉が湧出しないことはこの解釈を支持する。しかしながら、大規模な熱水対流系の証拠は地表では見えないものの、このマグマ溜まりが大規模な熱水対流系を生じさせている可能性は否定できない。

(3) 温泉水の起源

水のタイプに関しては、酸性硫酸型温泉と中性塩化物型温泉が安山岩質火山地帯の高温の熱水卓越型地熱貯留層に一般に認められる。水のタイプ区分は主要な陰イオンである Cl 、 SO_4 、及び HCO_3 の濃度比によっている。図 3-9 に示すように、セ国の温泉のほとんどは地熱系縁辺部に生じるとされる重炭酸型温泉に分類される。一方、高温地熱系の最も優れた指

標である塩化物型温泉（熟成水、mature water）、及び硫酸型温泉は見られない。Geothermex（2011）は流体混合のモデルから塩化物型熱水の存在を推定してはいるが、その様な水の直接の証拠は地表には認められていない。図 3-9 からカルデラ湖（Crater Lake）の塩化物イオン濃度が高いことがわかるが、これはおそらく火山性の塩素ガスに起因し、高温化での水－岩石反応による産物ではないと考えられる。

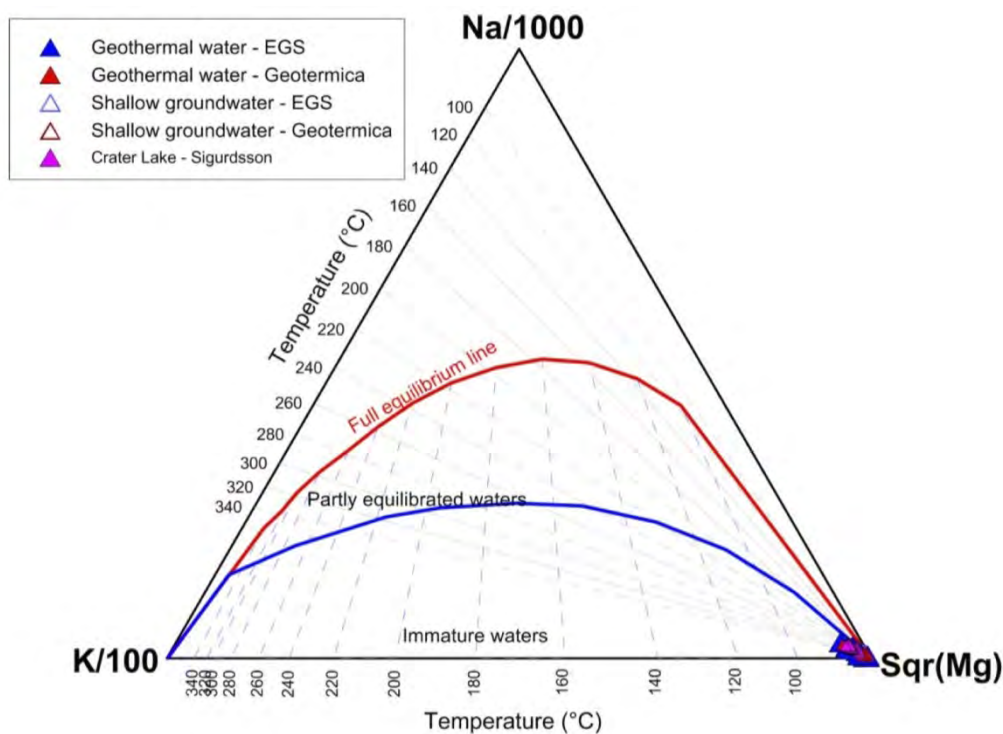


出典：RG（2013）

図 3-9 Cl－SO₄、－HCO₃ 三成分系

(4) 温泉水の平衡状態、水岩石反応熟成度

温泉水の化学平衡状態、もしくは水－岩石反応の熟成度を検討するために、Na、K 及び Mg の濃度比による解析が広く用いられている。図 3-10 はセ国の温泉についてこれら濃度比をプロットした三成分系図である。この図では、平衡または部分的な平衡にある水は Mg を示す頂点から離れてプロットされる。これは高温であるほど Mg を含む鉱物の溶解度が小さいことが理由である。これとは対照的に、セ国の温泉は Mg の頂点近くにプロットされ、熟成度の低い水－岩石反応を示すものばかりである。



出典：RG (2013)

図 3-10 Na-K-Mg 三成分系

貯留層温度の推定には、水-岩石反応に理論的基礎を置く地化学温度計が用いられる。従って、熟成した塩化物型熱水（図 3-9）が地化学温度計にもっとも適している。その様な温泉水はセ国には認められないが、既存文献では地化学温度計が重炭酸型温泉に適用されている。例えば RG (2013) はシリカ温度計の石英温度計とカルセドニー温度計を計算し、150°C 程度までの温度が示されている。この結果は、想定される地熱貯留層の最低温度を示している可能性がある。これら水の溶存成分を対象とする温度計の他に、RG (2013) は噴気ガスを対象にガス地化学温度計を用い、150°C-243°Cの値を得ている。

(5) 調査団見解

結論として、地表の地化学調査結果には、高温かつ大規模な地熱系を想定できるような明白な地熱徴候分布は認められないといえる。しかも、存在する限られた地熱徴候は Soufriere 火山の西側に限られ、東側の地熱資源量は地化学的手法から評価できない。特にこの東側について言えることとして、地熱資源量を評価するには、テスト井を掘削し、検層及び噴気試験を行うことが必要と考えられる。こうすることによって、地下の物理的、化学的条件を直接得ることが可能である。

3-2-3 物理探査

(1) 既往調査内容の概要

セントビンセント島では地下の比抵抗構造を解明するために、RG（2015）において MT 探査及び TEM 探査が実施された。調査内容は以下の通りである。

表 3-1 RG（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で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 セントラルループ方式 TEM 法探査（目的：MT データのスタティック補正）
調査地域	Soufriere 火山及び周辺地域
調査期間	2013 年 11 月～12 月（第 1 次調査） 2014 年 9 月～10 月（第 2 次調査）
測定点数	45 点（TEM 法探査は 44 点、第 1 次：33 点、第 2 次：12 点、第 1 次調査の再測定点：8 点）、リモートリファレンス点は調査地域から 14km 程離れたセントビンセント島南部の山間部（Montreal Gardens）に設置
使用機器	MT 法探査：Phoenix Geophysics MTU System TEM 法探査：BTSK/WTS GEO WTEM-2 System
取得データ	MT 法探査：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 320Hz～0.001Hz、測定時間：各観測点で夜間を含む 14 時間以上、最大 3 日間 TEM 法探査：磁場 1 成分（Hz）の過渡応答データ、リピートレート 4Hz、1Hz の主に 2 周波数、ループ送信源 100x100m または 50x50m
データ処理・解析内容	MT 法探査：TEM データを用いてスタティックシフト補正を行った MT データを用いて、インバリエントモードデータの 1D インバージョン解析を実施。1D インバージョン解析結果より得られた比抵抗構造から調査地域全体の比抵抗分布を求めて、地熱貯留層構造を構成する地質・地質構造を推定。 TEM 法探査：取得データについて 1D インバージョン解析を実施し、その結果を用いて MT データのスタティックシフト補正量を算出。

出典：JICA 調査団

(2) 既往調査結果要約

地熱開発調査地域における地下の比抵抗構造を把握するために実施された MT/TEM 法調査の結果について、図 3-11 に測点位置図、図 3-12 にキャップロック下面標高平面図、図 3-13 に代表的な比抵抗構造断面図を示す。

取得データ品質について TEM 法データについてはいくつかの測点であまり良好なデータが得られていないものの、MT データのスタティック補正で使用するデータとしては妥当なデータが取得されている。

MT 法データについては多くの測点において何らかのノイズの影響で低周波数域のデータの品質が悪く、解析比抵抗分布の深部の信頼性は低いと考えられる。ノイズ源としていくつかの原因が考えられた。その最も大きい原因のひとつとして波浪の影響が挙げられている。最初の調査でアクセス困難な測点や、良好な品質のデータ取得ができなかった測点が存在したため、第 2 次調査が実施された。第 1 次調査でデータ品質の悪かった測点については第 2

次調査で再測定が行なわれた。また、第1次調査でアクセスが困難な測定予定点があったため事前に予察が行なわれ、第2次調査の前にアクセスの確認が行なわれた。

MT/TEM 法探査から調査地域の比抵抗構造は大局的には地表から深部に向かって高-低-高の比抵抗変化を示す3層構造を示し、各層の境界は概ね地形と平行である。中間の低比抵抗層の層厚は Soufriere 火山山頂部では薄い海岸部へ向かって層厚を増している。アイスランドの Nesjavellir にある地熱フィールドを参考にしてこの中間の低比抵抗層を地熱貯留層のキャップロックと解釈し、上面の $10\Omega\text{m}$ コンターラインを 100°C 、下面の $10\Omega\text{m}$ のコンターラインを 240°C の等温度線としている。さらに下部の高比抵抗層を地熱貯留層と推定された。比抵抗構造解析結果として以下のことが指摘された。

- ・ 調査地域は高温の地熱貯留層構造を示唆する典型的な比抵抗構造を示す。
- ・ 山頂部で 300～600m 深に上面が相当する地熱貯留層は、海岸部に向かって山頂部と東側海岸部の中間辺りまで広がっている。
- ・ 高比抵抗を示す地熱貯留層の上面は、山麓下部当たりで急激に落ち込み、約 2000m の深度に達する。
- ・ 本調査地域の比抵抗構造は地熱地帯の熱水変質の様子を反映するものである。

(3) 調査団見解と調査方針

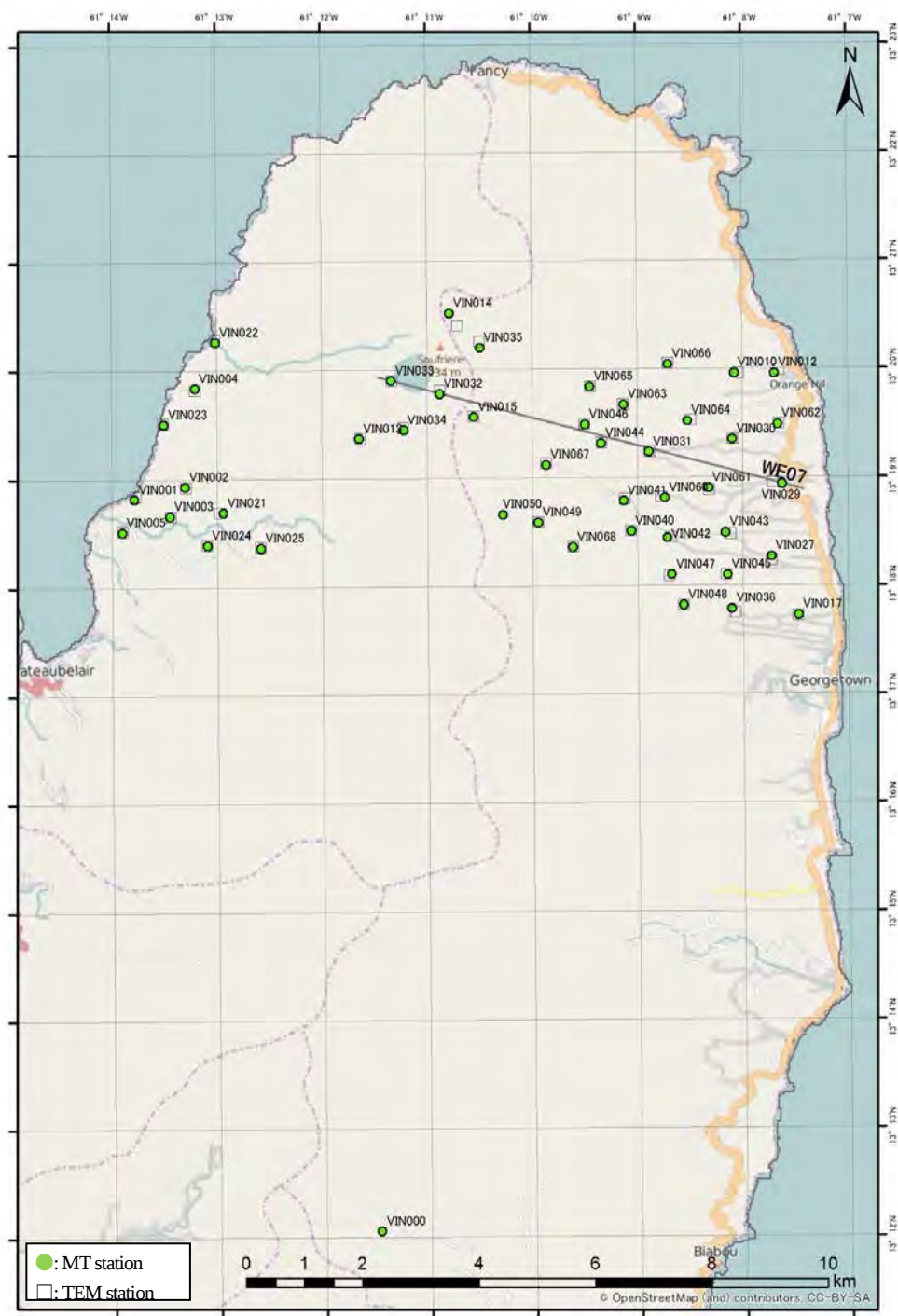
実施された MT/TEM 探査では、深部の比抵抗情報を含む低周波数の探査データが充分取得できなかった。また、島の北西側及び Soufriere 火山の山麓部については、アクセス道路がなく、ブッシュが濃いうえに地形の起伏が激しい。これにより、測定機器を設置する平地の確保が難しかったため測点を配置できなかった。そのためデータ解析結果については深部の解析精度は高くない。測点が配置できなかった Soufriere 火山山頂部から西側海岸部にかけての比抵抗構造の連続性が不明である。また、Soufriere 火山の南東側も測点間隔が広い部分があり、その部分での解析精度は高くないと思われる。

MT/TEM 法探査による比抵抗構造の解明についてはより高精度の解析結果を得るためには、測点が設定されていない地域への測点の追加、これまでの調査では得られなかった低周波数域の良好なデータ取得が必要である。ただし、本調査地域へのアクセス条件、地形条件等を考慮すると容易ではない。

また、本調査では1次元解析が行なわれており、2次元、3次元解析の有効性を検討した。その結果、取得済の MT データについては測定された周波数範囲では1次元構造の特徴を示すことや深部の構造を反映する低周波数域の MT データが取得できていないことなどから、2次元、3次元解析の適用の効果は期待できないと判断した。したがって新たに実施した重力探査の解析結果を加えるなどして総合的に解釈を進めていくことで、孔井掘削計画に資する地下の情報を得ることが望ましいと考えられる。

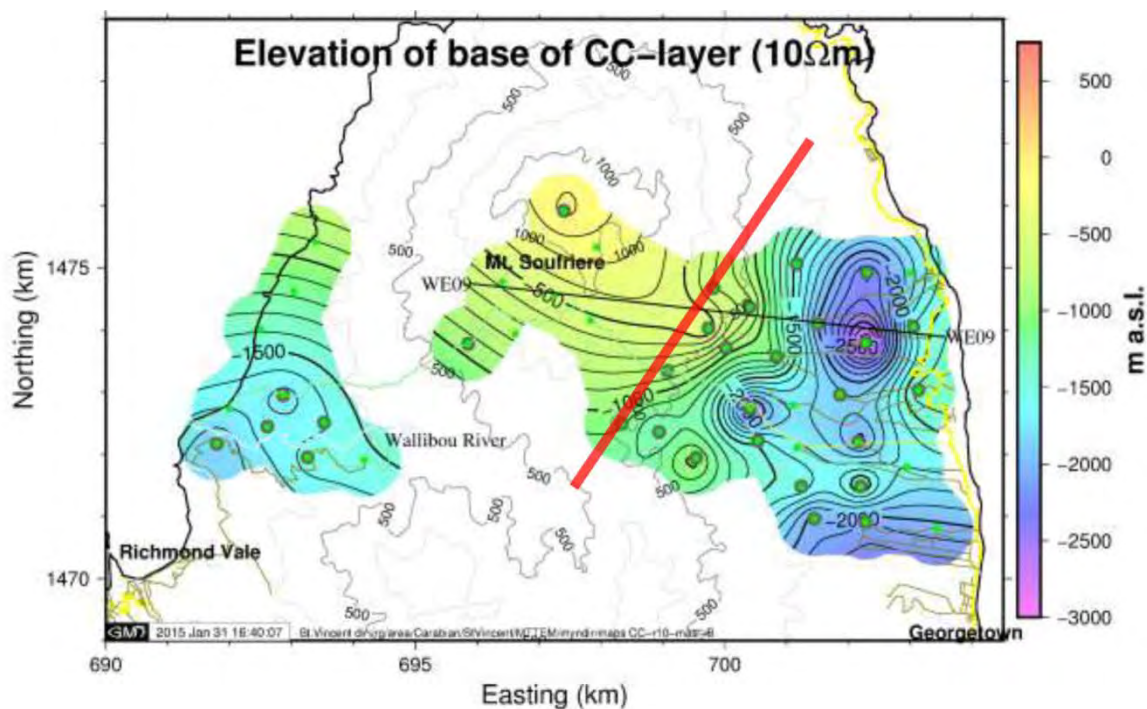
さらに、図 3-13 に示される中間部の低比抵抗層については Soufriere 火山山頂部ではキャップロックの可能性が考えられる。しかし、調査団は海岸部では海水の影響が強いと推定す

る。また、キャップロックとしての低比抵抗層は山頂部と海岸部の間辺りまでとの解釈がなされているものの、その根拠については明確ではない。孔井掘削地点については掘削基地の確保やアクセスが容易な傾斜のなだらかな Soufriere 火山東麓が検討されていることを考え合わせるとキャップロックなのか海水の影響による低比抵抗なのかについて検討する必要がある。



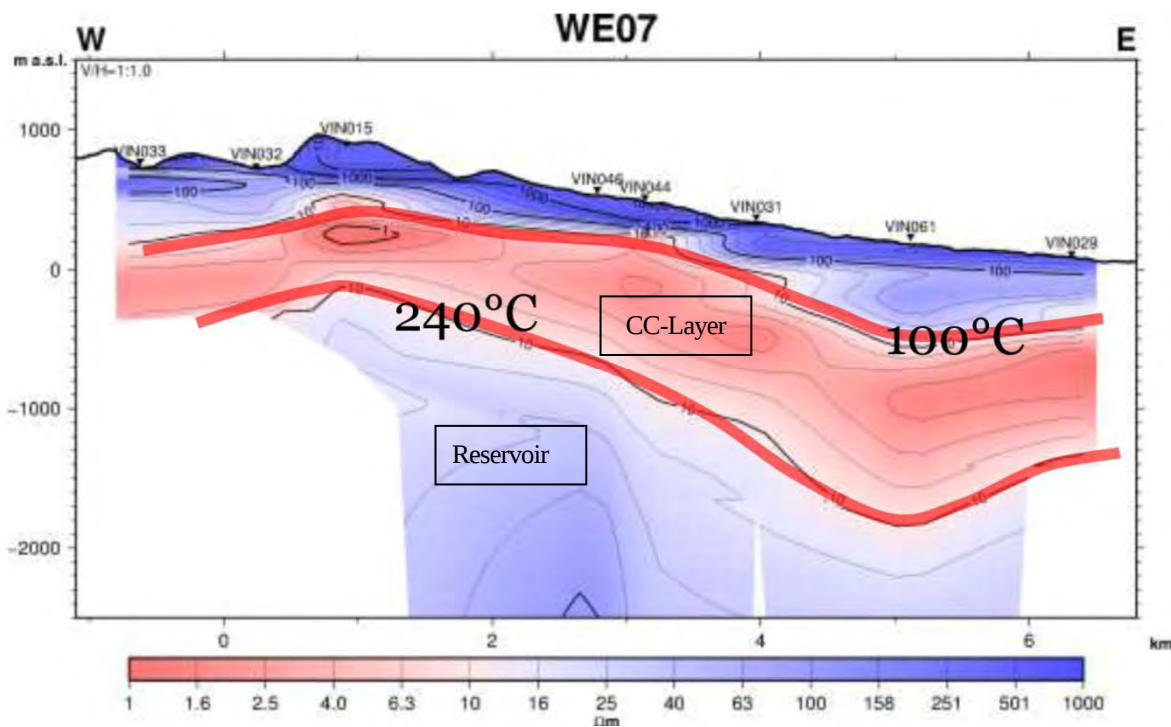
出典：JICA調査団

図 3-11 MT/TEM 測点位置図



出典：Resistivity study of Mt. Soufriere (2015)

図 3-12 キャップロック下面標高平面図



出典：Resistivity study of Mt. Soufriere (2015)

図 3-13 比抵抗構造断面図 (WE07)

3-2-4 地熱貯留層モデル

(1) Dames and Moore (1998)

Soufriere 火山の地下に熱水卓越型の地熱貯留層が分布し、上部には局所的に蒸気卓越ゾーンを伴うと推定した。地熱貯留層には中性で 150~240℃（地化学温度から推定）のブラインが存在し、ブラインの一部は希釈を受けつつ、Wallibou 川に湧出していると推定した。

(2) GeothermEx (2011)

GeothermEx (2011) は Soufriere 火山及びその周辺の地熱系について、i)~iii)の状況から、iv)に述べるようなモデルを検討した。

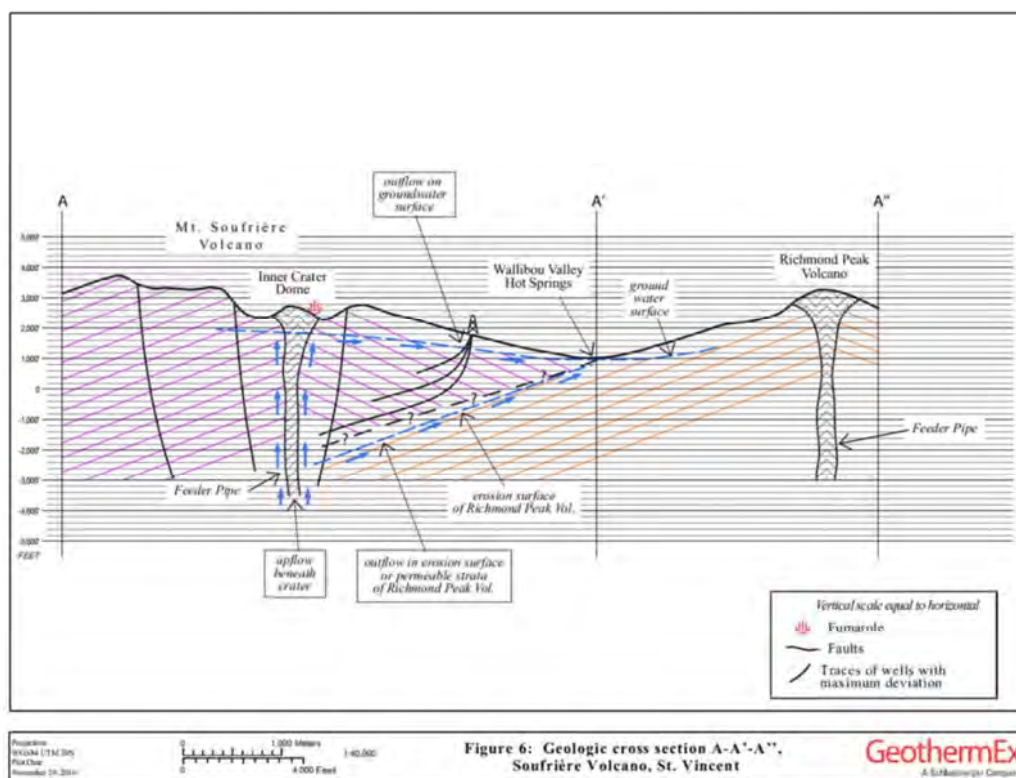
- i) 温泉が湧出する Wallibou 川は Soufriere 火山の噴出物が分布する末端に位置し、その南には別の火山（Morne Garu 火山群）の噴出物が分布している。
- ii) Wallibou 川流域の温泉水及び河川水は化学組成（陽イオン+陰イオン合計 VS 陰イオンインデックス相関）から見て他の流域の河川水・泉とは別のトレンドを形成する。
- iii) Wallibou 川流域の温泉水は標高が低いものほど泉温及び塩濃度が高く、標高が上がるにつれて希釈されている。
- iv) i)~iii)から考察すると、Soufriere 火山の地下には Na-Cl 型の地熱貯留層の存在が推定される。貯留層の温度は地化学データから 150~260℃程度と推定される。地熱水の流動経路は 1) Soufriere 火山の火道に沿ってほぼ垂直に上昇して沸騰する、2) Soufriere 火山の火口付近から Wallibou 川流域に流動、3) Soufriere 火山噴出物に覆われている Morne Garu 火山群（Richmond 火山）の表層を上昇して Wallibou 川流域に流出、の 3 パターンが推定される（図 3-14）。

(3) RG (2013)

RG (2013) は Wallibou 川流域で実施した CSAMT から得られた比抵抗分布を加えて貯留層モデルを検討し、1) Wallibou 川の地下浅部には低比抵抗ゾーンが広がっている、2) 1979 年の噴火以前では Soufriere 火山の火口に湖が形成されていたことから、Soufriere 火山の火口を含む地下浅部には粘土化変質による不透水性ゾーンが分布し、その深部に地熱貯留層の存在が期待されること、低比抵抗ゾーンが粘土鉱物の生成によるものと仮定して貯留層では 240℃以上の貯留層温度の分布が期待できるとした（図 3-15）。

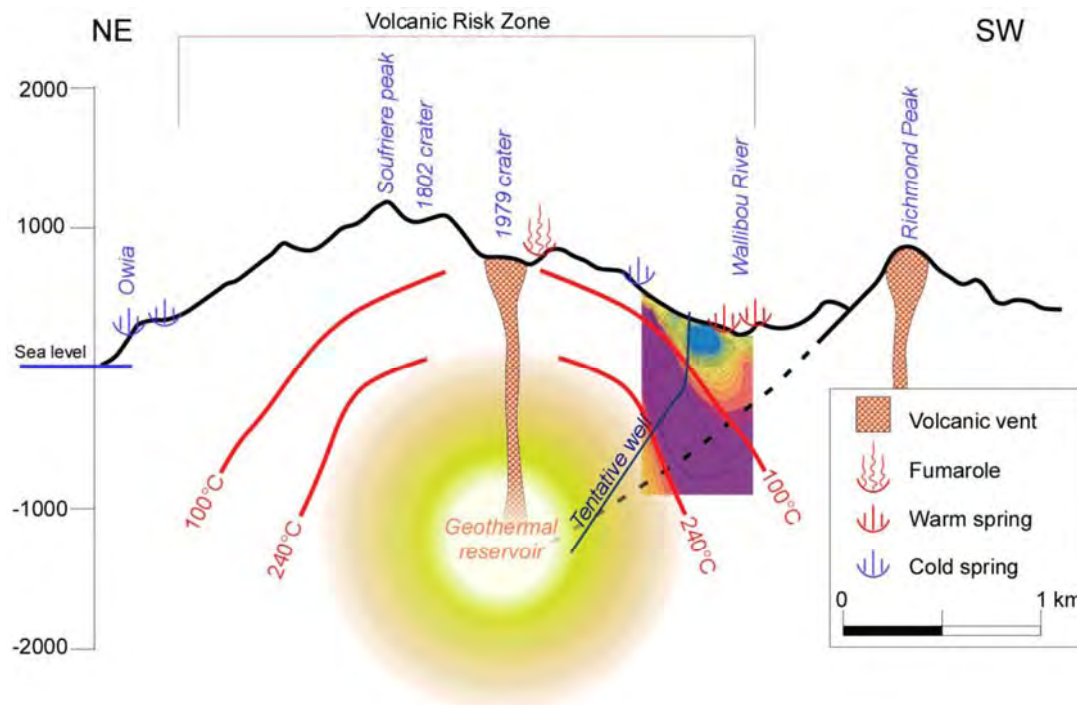
(4) RG (2015)

RG (2015) は Wallibou 川流域周辺からの掘削が地形、アクセスの点で難しいと判断されることから、Soufriere 火山の東側についても比抵抗構造を検討した。その結果、Soufriere 火山の東麓でも地下浅部に低比抵抗構造が存在することを確認し、この低比抵抗ゾーンが粘土化変質（CC-layer）により生じたと解釈し、地形解析で抽出したリニアメントが断層（図中の緑色の線）であると解釈して、それらを東麓から掘削して貫く案を提示した（図 3-16）。



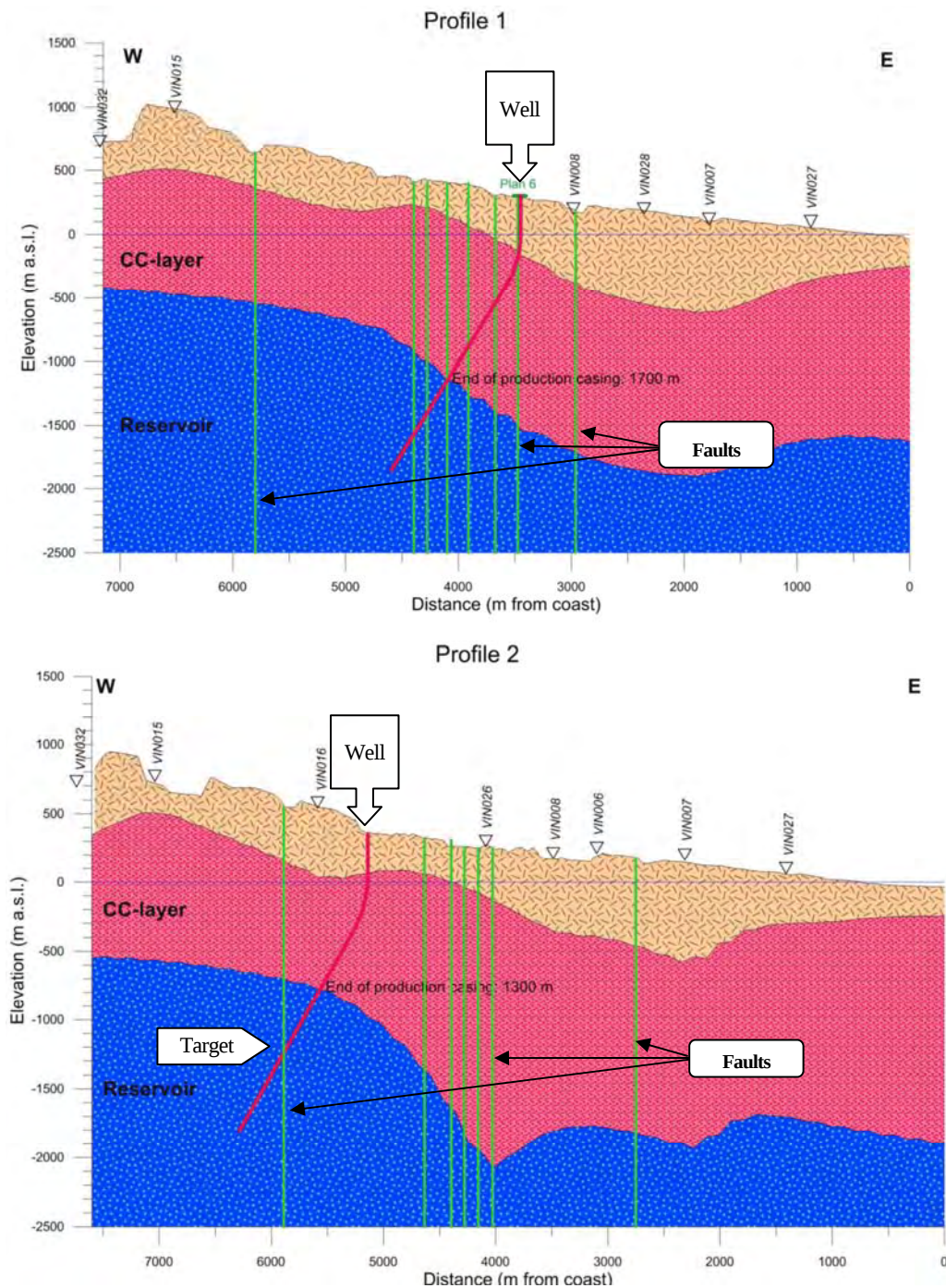
出典：GeothermEx（2011）

図 3-14 Soufriere 火山の噴気、Wallibou 川の温泉を踏まえた地熱貯留層モデル



出典：Geotherm EX（2011）

図 3-15 Wallibou 川流域周辺における比抵抗構造を踏まえた地熱貯留層モデル



出典：RG (2015)

図 3-16 Soufriere 火山の東麓における比抵抗構造を踏まえた地熱貯留層モデル

「CC-layer」は低比抵抗分布からスメクタイトを伴う粘土化変質を受けていると解釈されているゾーン、「Reservoir」は低比抵抗ゾーンの下位に分布する比較的比抵抗が高いゾーンで高温の地熱貯留層が存在すると解釈されているゾーンである（図 3-13 を参照）。緑色の縦線は地形解析で抽出したリニアメントをもとに推定された断層である（RG, 2015）。ただし、断層のセンスについての記述はない。

上の図 (図 3-16) は平面図 (図 3-5) 中の profile-1 断面線上にある平坦地 6 (図中、ピンク色) から傾斜井 (赤色線) を掘削した場合の坑井断面、下の図は平面図 (図 3-5) 中の profile-2 断面線上にある平坦地 1 西の駐車場 (図中、赤色星印) から傾斜井 (赤色線) を掘削した場合の坑井断面である。RG (2015) には傾斜井のターゲットに関する記述が述べられていないが、図 3-5 に記されている坑井案と併せると図 3-16 下で傾斜井が遭遇している断層がターゲットと解釈される。

(5) 調査団見解と調査方針

Soufriere 火山の南西麓から Wallibou 川流域周辺の温泉湧出までの区間の地熱モデルについては地質、地化学及び物理探査による比抵抗分布データを繋げて説明できるようにしたものであると評価される。ただし、表層近くにみられる低比抵抗ゾーンがモデルで説明している粘土化変質によるものであるかどうかは掘削で試料を採取して分析するのが望ましいと考える。

一方、RG (2015) が示した東麓については低比抵抗ゾーンを全て粘土化変質 (スメクタイトの生成) によるものと推定して比抵抗分布が解釈されている。しかし、低比抵抗ゾーンが粘土鉱物 (スメクタイト、混合層粘土鉱物) 以外の要因も重なっている可能性がある。加えて、ターゲットとしているリニアメントについては実際にそこに断層があるのか、熱水流動に絡むものかは不明である。

そこで、東麓については、リニアメントを形成した要因について、地表において断層や熱水変質が存在するかどうかを明らかにすることが重要と考える。

3-3 本調査で実施した現地調査

3-3-1 地表地質調査

(1) 目的

セントビンセント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、変質及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

セントビンセント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、断裂の分布及び特徴を観察し、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。

【岩石薄片作製及び鑑定】

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、単ニコル及び直交ニコルにて岩石全体の鉱物名、組織及び変質を記載する。特に、変質鉱物及び鉱物

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、無定方位試料及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の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

本現地調査では Soufriere 火山山頂の溶岩ドーム、西麓の Wallibou に湧出する温泉地、Soufriere 火山西麓のリニアメント通過点の 3 箇所を現地調査し、岩石試料を採取した。採取した試料から岩石薄片観察 2 枚、X 線回折分析 5 試料を分析した（図 3-17、表 3-2）。

【Soufriere 火山の溶岩ドーム（図 3-17 中の S1、S2、S3）】

Soufriere 火山の山頂には火口が形成されている。火口壁には外輪山を構成する溶岩の上位に降下火山噴出物が堆積している。また、北北東-南南西走向で高傾斜の安山岩岩脈が火口壁に貫入している。火口壁を構成する岩石には熱水変質は認められない。

Soufriere 火山火口に形成されている溶岩ドームは 1979 年に噴出したものである（図 3-18）。溶岩ドームは斜方輝石-普通輝石玄武岩質安山岩からなり、大部分が新鮮である。ただし、溶岩ドームの南側には局所的に噴気帯が分布し、岩石が白色粘土に変質している（図 3-18）。噴気孔近傍には硫黄の析出が確認できる。白色粘土化した安山岩からは酸性変質を特徴つけるソーダ明ばん石、カオリナイトが生成している（表 3-3）。これらの変質は溶岩ドーム下の火道を経由して上昇してきた火山性流体（火山性蒸気）により生じたと推定される。

【Wallibou（図 3-17 中の S4、S5）】

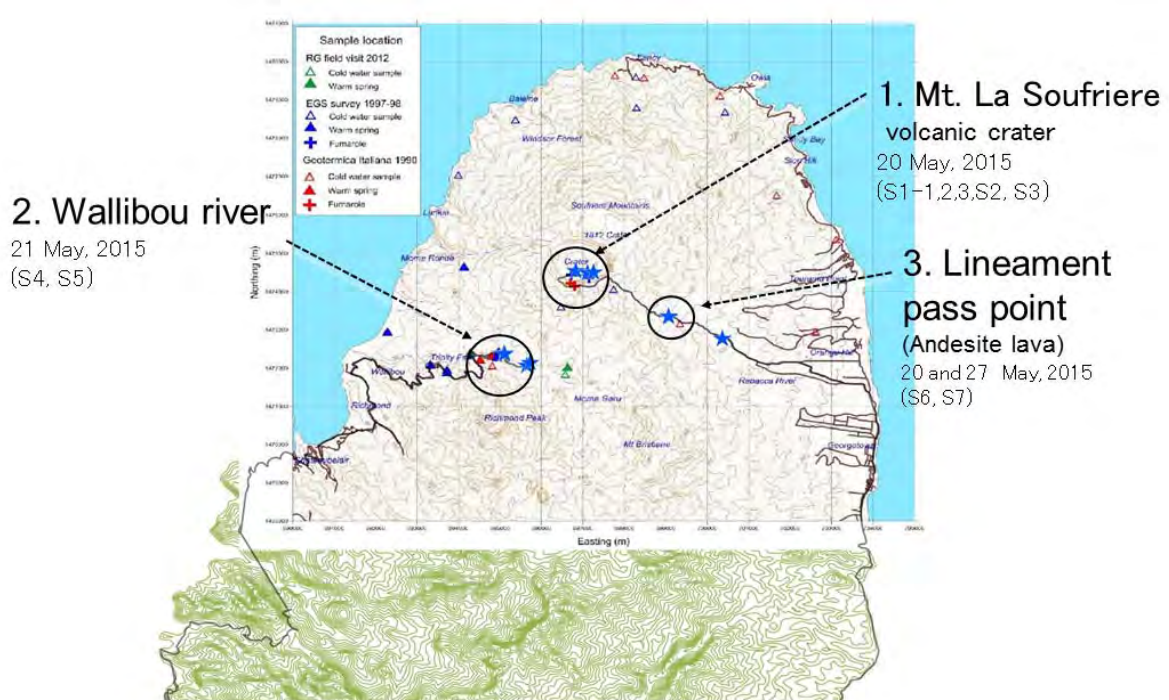
Wallibou 川沿いには数箇所 40℃前後の温泉が Soufriere 火山を構成する安山岩溶岩中の節理から湧出している。Wallibou 川は Soufriere 火山とその南に分布する Mome Garu 火山の

境となっているが、温泉水は Soufriere 火山側からのみ湧出している（図 3-19）。温泉湧出箇所及びその周辺において岩石の変質は認められず、X 線回折分析においても熱水変質鉱物は認められない。

【Soufriere 火山東麓のリニアメント通過点（図 3-17 中の S6、S7）】

Soufriere 火山の東麓では西麓に比べて地形がなだらかなことから地熱開発のため構造試験井の掘削が計画されている。ターゲットは地形解析から抽出された断層と推定されるリニアメントである。Soufriere 火山の東麓では地熱徴候の存在を報告した既存文献は皆無であるため、ターゲットとなるリニアメントに伴い地熱徴候あるいは変質帯が存在するかどうかを確認することを目的として現地調査を実施した。

リニアメント通過点の地層は Soufriere 火山を構成するカンラン石-単斜輝石安山岩からなる溶岩流である（図 3-20）。溶岩流には節理が多数生成しているが、岩石は概ね新鮮であり、鉱物脈も認められない（偏光顕微鏡では安山岩の石基中の空隙や斑晶の一部に褐色粘土鉱物が生成しているが、それら褐色粘土鉱物が岩石中を占める割合は微量である）。また、溶岩流には断層及びそれに伴う破碎帯も確認できない。



出典：JICA調査団

図 3-17 現地調査位置図

表 3-2 現地地質調査結果一覧

sample	location(UTM Zone 20N)			field name	geology	memo					labo	
loc	X	Y	elevation		formation	name	rock	alteration	remarks	Manifestation	XRD	TS
S1-1	696837	1474537	772	Soufriere	Soufriere volcanics	Lava dome in 1979	basaltic andesite	white clay	Argillic alteration (white).	volcanic fumaroles	Yes	N/A
S1-2	696837	1474537	772	Soufriere	Soufriere volcanics	Lava dome in 1979	basaltic andesite	white clay	Argillic alteration (dark gray).	volcanic fumaroles	Yes	N/A
S1-3	696837	1474537	772	Soufriere	Soufriere volcanics	Lava dome in 1979	basaltic andesite	none	alteration	volcanic fumaroles	Yes	N/A
S2	697120	1474489	738	Soufriere	Soufriere volcanics	Lava dome in 1979	basaltic andesite	none	Fresh.	none	N/A	N/A
S3	697266	1474502	739	Soufriere	Soufriere volcanics	dyke	andesite	none	Dyke intruds to the lava in somma.	none	N/A	N/A
S4	695103	1472385	249	Wallibou	Soufriere volcanics	Lava flow	Andesite	none	The surface of the cracks, where hot spring water flow in has changed color to white.	Hot spring	Yes	Yes
S5	695103	1472385	249	Wallibou	Soufriere volcanics	Lava flow	Andesite	none	none.	Hot spring	Yes	N/A
S6	699085	1473329	488	east frank	Soufriere volcanics	Gravel	Tuff	none	The surface of gravel has changed color to white.	none	N/A	N/A
S7	699085	1473329	488	east frank	Soufriere volcanics	Lava flow	Andesite	none	No alteration and fractured zone.	none	N/A	Yes

出典：JICA調査団

1. Mt. La Soufriere volcanic crater

Fumaroles

Temperature: 97.3 degrees C Date: 20 May, 2015
(Boiling temperature of water at Patm=97.65° C)

Remarks:

Lava dome was formed in 1979 (last eruption).

Lava dome consists of basaltic andesite.

Andesite has been altered to altered rock with kaolinite, alunite, pyrite and amorphous material in fumaroles zone.



出典：JICA調査団

図 3-18 Soufriere 火山の溶岩ドームで観察される噴気帯



2. Wallibou river

Hot spring

Temperature : 38.3 – 41.9° C

pH: 6.5 – 7.0

EC: 0.66 – 0.88 mS/cm

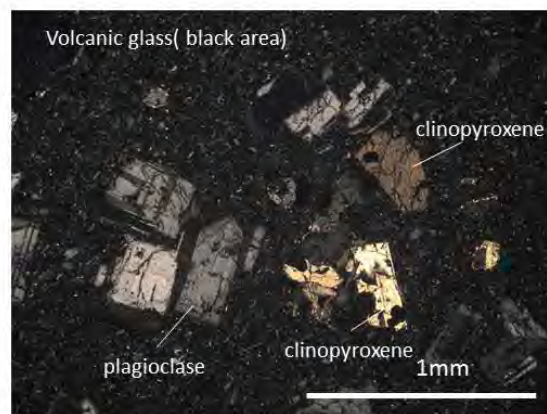
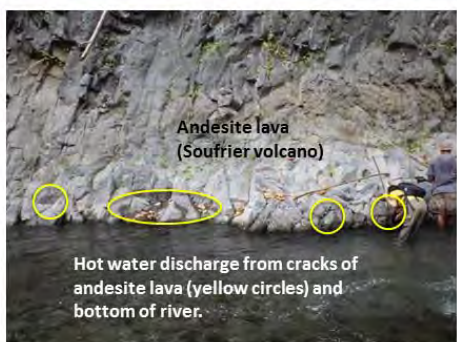
Remarks:

Hot water discharge from andesite lava and debris.

Date: 21 May, 2015

Network of cracks with white filling are partially distributed in andesite lava.

No hydrothermal alteration in this andesite lava



Locality: Wallibou (S4)

Rock name: orthopyroxene-clinopyroxene andesite (lava flow of La Soufriere)

Remarks

Plagioclase (10 wt.%), orthopyroxene, clinopyroxene and opaque mineral (magnetite) are contained as phenocryst. Volcanic glass occupy among crystals. No altered minerals are in phenocrysts and groundmass. Most of plagioclase and mafic mineral are fresh.

出典：JICA調査団

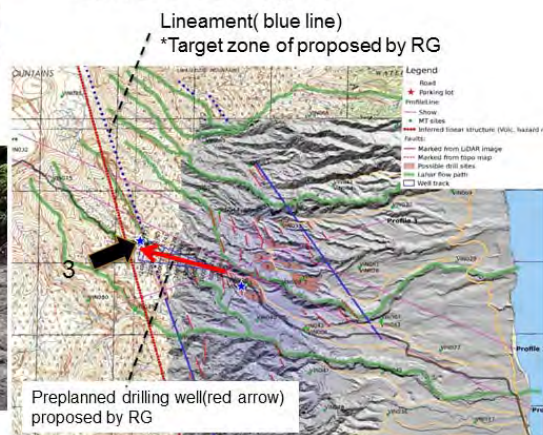
図 3-19 Soufriere 火山西麓、Wallibou 川に湧出する温泉と地質および岩石の薄片観察



3. Lineament pass point

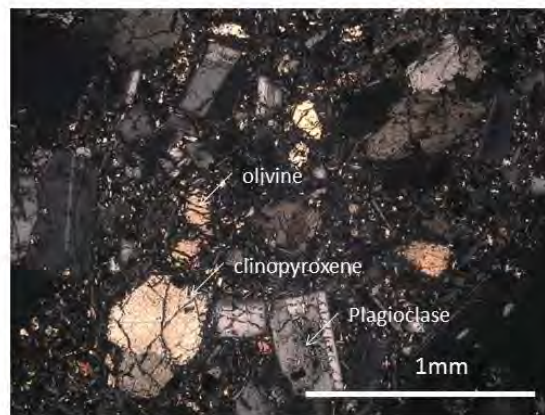
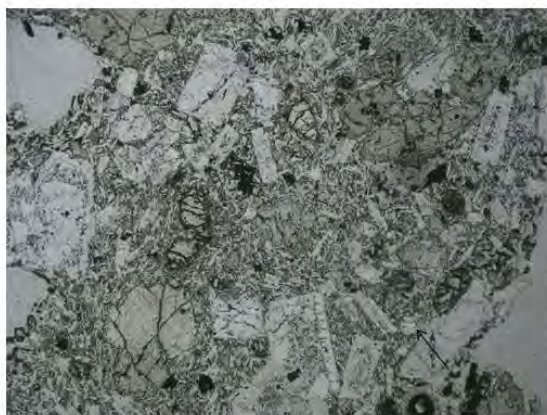
Lineaments are targets of test wells.
*RG (2015) remote sensing report

Andesite lava (Soufriere volcano)
No alteration, no geothermal manifestation
Date: 20 and 27 May, 2015



Source: RG (2015) Remote Sensing Report

出典：JICA調査団



Locality: lineament pass point, east-frank of Mt. La Soufriere (S7)

Rock name: olivine-orthopyroxene-clinopyroxene basalt

Remarks

Plagioclase (20 wt.%) , clinopyroxene (10 wt.%) , olivine, orthopyroxene are contained as phenocryst. Most of plagioclase and mafic mineral are fresh. Some parts of mafic phenocrysts are altered to brownish clay mineral. Small amounts of brown-pale brown clay mineral are distributed in the groundmass. No deformation structures indicating fault are in this rock.

出典：JICA調査団

図 3-20 Soufriere 火山東麓、リニアメント通過箇所付近の風景と地質および岩石の薄片観察

表 3-3 X線回折分析結果

Mineral (2 theta to intensity)				Clay mineral				Silica				Silicate			Carbonate	Sulfate		Sulfide	oxide	unidentified diffraction line (2 Theta)	
				Sericite	S/S	clay mineral	Kaolinite	Quartz	Cristobalite	Tridymite	Opal	Volcanic glass	Plagioclase	Alkali Feldspar	Clinopyroxene	Dolomite	Gypsum	Natroalunite	Pyrite		Magnetite
No.	Locality	Rock	state	12.5°	7.0°~ 8.8°	6.2°~ 7.0°	12.4°	26.6°	22.0° ±	22.0°			27.8°~ 28.0°	27.4°~ 27.5°	30.0°	31.5°	11.7°	30.0°	33.1°	35.1°	
1	S1-1 Andesite (white alteration)	Soufriere (Lava dome AD1979)	Bulk	1.0			3.2											3.0	0.9		
			UT	Yes			Yes														
			EG	Yes			Yes														
			HCl																		
2	S1-2 Andesite (grey alteration)	Soufriere (Lava dome AD1979)	Bulk		0.5		1.8												3.9	1.4	
			UT		Yes		Yes														
			EG		Yes		Yes														
			HCl																		
3	S1-3 Andesite (alteration)	Soufriere (Lava dome AD1979)	Bulk																		
			UT								0.9		1.9			1.0	0.3	3.4	0.5		0.7
			EG																		
			HCl																		
4	S4 Andesite (fresh)	Wailibou	Bulk										8.7		2.1						2.1
			UT																		
			EG																		
			HCl																		
5	S7 Andesite (fresh)	East flank of Mt. Soufriere (Pass point of lineament)	Bulk									0.3	8.7		1.6						
			UT																		
			EG																		
			HCl																		
			UT :Air dried sample by preferred orientation method																		
			EG :Ethylene glycol solvated																		
			HCl :acidum hydrochloricum solvated																		

出典: JICA調査団

現地調査の結果、セントビンセント島における地熱変質は Soufriere 火山山頂の溶岩ドームにおいて火山性流体により生じた酸性変質のみに分布することが確認された。Soufriere 火山西麓の Wallibou には温泉が湧出しているが、岩石に変質帯が認められないことから、地熱貯留層は Wallibou からある程度離れたところに存在している可能性があるとして推定する。Soufriere 火山の東山麓では地熱貯留層の存在を示唆するものは地表地質探査では得ることができず、掘削により地熱貯留層の有無を確認することが必要である。

(4) 解釈

現地調査の結果、セントビンセント島における地熱変質は酸性変質鉱物（カオリン鉱物、明ばん石）を伴い、次章の地化学の結果と併せると Soufriere 火山山頂の溶岩ドームにおいて火山性流体により生じた酸性変質であると結論できる。

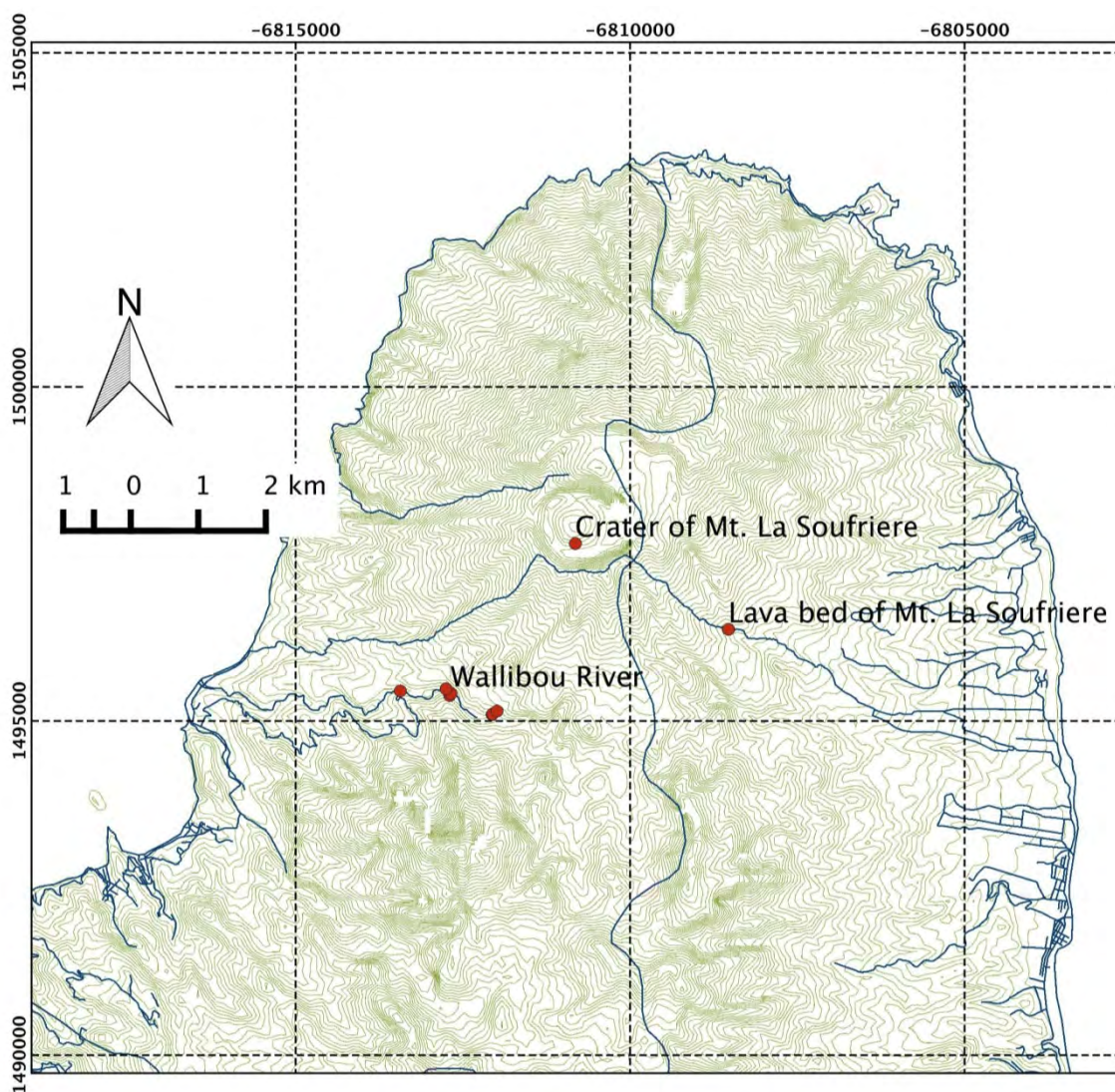
Soufriere 火山西麓の Wallibou については安山岩溶岩の節理から温泉が湧出しているが、岩石に変質帯が認められない。次章の地化学の結果（炭酸型・未成熟）と併せると、Wallibou に湧出する温泉水は天水が溶岩中の節理を伝って側方流動している間に伝導熱で加温されたものである可能性があるとして推定する。

Soufriere 火山の東山麓では地熱貯留層の存在を示唆するものは地表地質探査では得ることができず、掘削により地熱貯留層の有無を確認することが必要である。

3-3-2 地化学調査

セ国の地熱徴候を調査し、その結果を既存調査結果と比較するために、調査団は地化学調査のための踏査を実施した。この踏査では、2015年5月に、Wallibou 川沿いの温泉と Soufriere 火山の噴気から試料を採取し、また現地測定（温度、pH、電気伝導率）を行った。

調査を実施した地熱徴候地の位置（携帯型 GPS レシーバーによる）と現地測定の結果を表 3-4 に示す。その位置は図 3-21 の地図上にも示した。測定した温度は既存データとほぼ同じであり、温泉はおよそ 42℃、噴気はおよそ 97℃である。



出典：JICA調査団

図 3-21 地化学調査を行った調査地点

温泉水試料と噴気ガス試料は地熱エンジニアリング（株）の化学実験室で分析した。分析項目と分析方法を表 3-5 に、温泉水の分析結果を表 3-6 に、ガスの分析結果を表 3-7 にそれぞれ示す。

表 3-4 地化学調査を行った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 (mScm)	Note
Crater of Mt. La Soufriere	MLS 001	Fumarole steam	Yes	2015/05/20	13.331745	61.18265533	738	25.0	932	97.3	--	—	Sampled from a steam vent measuring temperature of 97.3°C.
Lava bed of Mt. La Soufriere	MLS 002	Cold spring	Yes	2015/05/27	13.320508	61.16208649	477	28.7	962	23.9	7.6	0.13	Cold spring flows out of andesite lava bed.
Wallibou River	WLB 001	River water	No	2015/05/21	13.31245136	61.206169	219	29.3	995	28.7	8.2	0.3	Measured on the left bank of the Wallibou river.
Wallibou River	WLB 002_1	Thermal water	Yes	2015/05/21	13.3118539	61.19954681	299	29.7	990	41.9	6.9	0.84	A water sample was taken from a crack in the andesite lava wall above a water level of the river.
Wallibou River	WLB 002_2	Thermal water	No	2015/05/21	13.31212044	61.19936752	352	29.7	990	41.1	6.5	0.81	—
Wallibou River	WLB 003_1	Thermal water	No	2015/05/21	13.30936813	61.1938324	268	25.1	985	38.3	6.9	0.66	Spring water flows out of a bottom of debris above a water level of the river.
Wallibou River	WLB 003_2	Thermal water	No	2015/05/21	13.30941677	61.19378281	275	25.1	985	38.5	7.0	0.67	—
Wallibou River	WLB 003_3	Thermal water	Yes	2015/05/21	13.30982304	61.19318008	319	25.1	985	39.9	7.0	0.69	Sample water was taken at a point several meters higher than the main stream of the Wallibou river. The point is in a steep and short stream surrounded by andesite lava.
Wallibou River	WLB 004	Thermal water	No	2015/05/21	13.31272697	61.20003128	280	25.1	985	39.7	6.7	0.88	Spring water emerges from bottom in a central bank of the Wallibou river.

出典：JICA 調査団

表 3-5 分析項目と分析方法

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
Gaseous species	Analytical Method
H ₂ S	Iodometric titration
CO ₂	Infrared spectroscopy
H ₂ , N ₂ , CH ₄ , O ₂ , He, Ar	Gas chromatography

出典：JICA調査団

表 3-6 温泉水の分析結果

Sample	Location	Type	Date	pH	EC	SiO ₂	Cl	SO ₄	HCO ₃
				—	μS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
WLB 002_1	Wallibou river	Thermal water	2015/5/21	6.8	922	136	27	31	584
WLB 003_3	Wallibou river	Thermal water	2015/5/21	7.1	779	115	14	36	480
MLS 002	Lava bed of Mt. La Soufriere	Spring water	2015/5/27	7.5	138	28	15	4.3	48

Na	K	Ca	Mg	Al	Fe	B
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
86	15	36	52	<0.01	<0.01	0.96
70	12	29	46	<0.01	<0.01	0.93
9.4	1.3	11	3.3	<0.01	<0.01	0.02

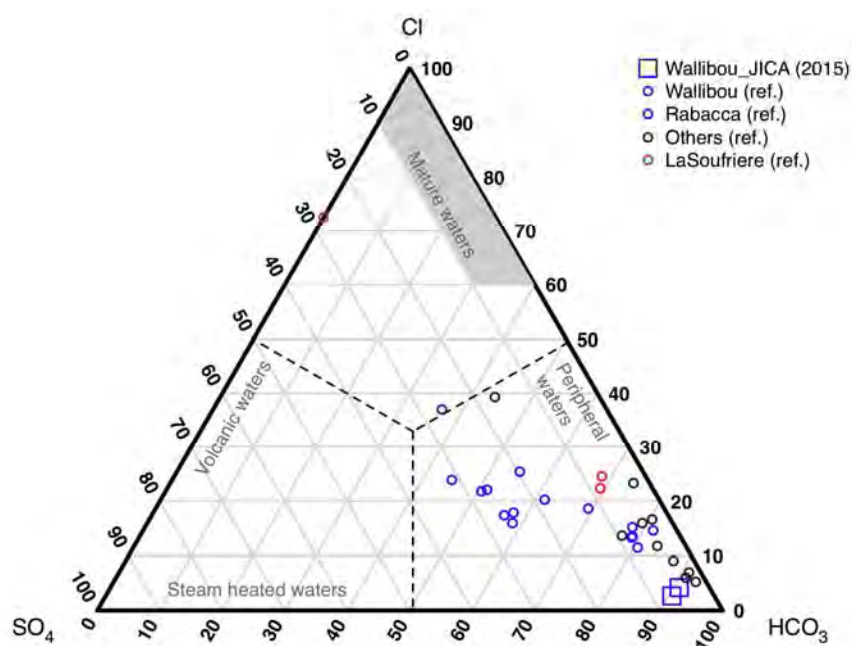
出典：JICA調査団

表 3-7 噴気ガスの分析結果

Location			Mt. La Sufurier
Code			MLS 001
Date			2015/5/20
Temperature (°C)			97.3
H ₂ O and NCG (total 100%)	H ₂ O	(vol%)	99.60
	NCG	(vol%)	0.40
NCG composition (total 100%)	H ₂ S	(vol%)	2.4
	CO ₂	(vol%)	92.2
	R gas	(vol%)	5.4
R gas composition (total ~100%)	H ₂	(vol%)	80.0
	N ₂	(vol%)	15.2
	CH ₄	(vol%)	3.8
	O ₂	(vol%)	0.83
	He	(vol%)	0.008
	Ar	(vol%)	0.13
NCG composition (total 100%)	H ₂ S	(vol%)	2.4
	CO ₂	(vol%)	92.2
	H ₂	(vol%)	4.32
	N ₂	(vol%)	0.820
	CH ₄	(vol%)	0.206
	O ₂	(vol%)	0.045
	He	(vol%)	0.0004
	Ar	(vol%)	0.0069
NCG composition (total ~100%, corrected for air contamination)	H ₂ S	(vol%)	2.4
	CO ₂	(vol%)	92.2
	H ₂	(vol%)	4.50
	N ₂	(vol%)	0.679
	CH ₄	(vol%)	0.21
	He	(vol%)	0.0004
	Ar	(vol%)	0.0048

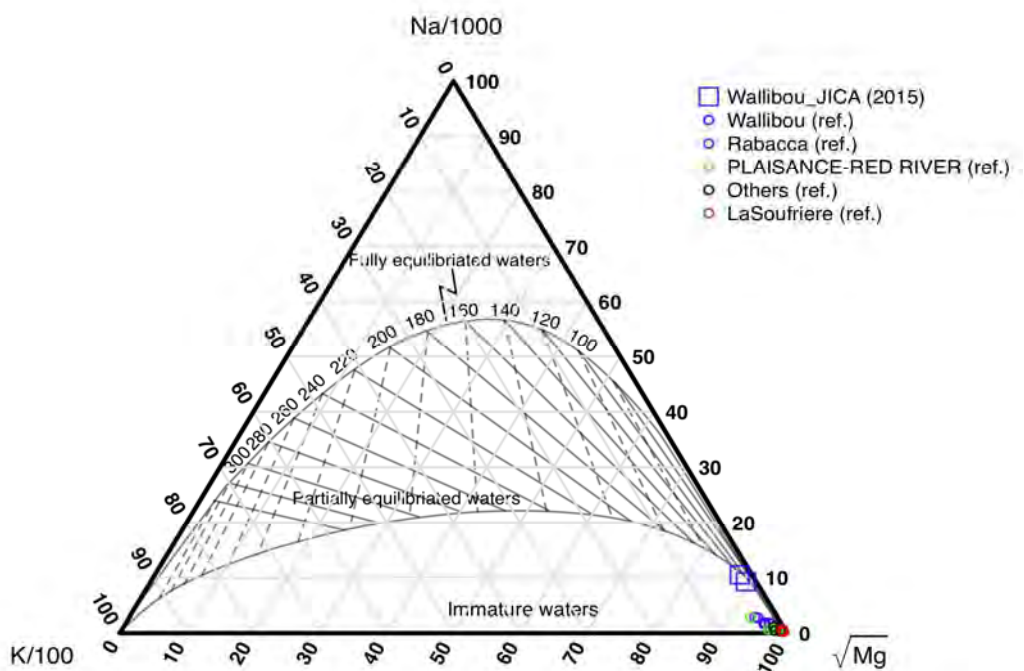
出典：JICA調査団

調査団が得た温泉の化学組成（以下、調査団データ）と既存データのそれとを比較するために両者を同時に図 3-22 の Cl-SO₄-HCO₃ 三成分系と図 3-23 の Na-K-Mg 三成分系にそれぞれプロットした。



出典：JICA調査団

図 3-22 温泉水の Cl-SO₄-HCO₃ 三成分系



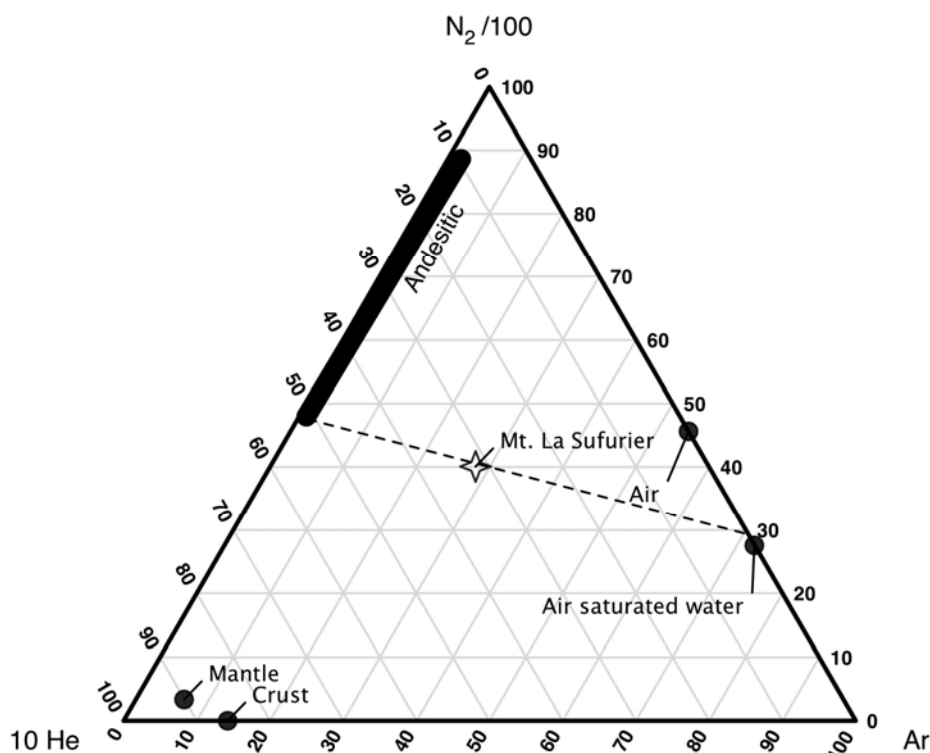
出典：JICA調査団

図 3-23 温泉水の Na-K-Mg 三成分系

これら両図から、調査団データと既存データは互いに整合的であり、Wallibou 川北岸の温泉水は炭酸型でかつ水-岩石反応に未成熟であることが示される。結論として、この調査団データは3-2-2節で述べた既存報告についてのレビュー結果を支持する。

このように温泉水は水-岩石反応に未成熟であるが、参考として、地化学温度計を計算し表3-8に示す。計算された石英温度は約150℃、Na-K温度は約250℃である。同様に噴気ガスの組成を用いてガス地化学温度計を計算し、290℃以上の温度が計算された。

調査団による調査では噴気ガスのHe、Ar、N₂を分析したことから、噴気ガスへのマグマ性ガスの寄与を、ガス濃度比を用いて検討することができる。図3-24に示すように、噴気ガスは安山岩火山ガスと地下水の二成分による混合直線上にプロットされ、噴気ガスにマグマ性ガスの寄与があることを示す。すなわちこの結果は、噴気蒸気はマグマ性の蒸気であり、上昇中に地下水と混合していることを意味する。少なくともSoufriere火山カルデラ内の溶岩ドーム付近では火山活動により高温蒸気が生じていることは明らかである。



出典：JICA調査団

図 3-24 噴気ガスのHe-Ar-N₂ 三成分系

表 3-8 地化学温度計算結果

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
WLB 002_1	Wallibou river	Hot spring	2015/5/21	155	145	131	127	105	252	266	278	254	97	56
WLB 003_3	Wallibou river	Hot spring	2015/5/21	145	134	119	117	95	252	266	278	254	92	53

Sample	Location	Water Type	Date	H ₂ /Ar	CO ₂ /Ar	CH ₄ /CO ₂	CO ₂ -H ₂ -H ₂ S-CH ₄
				Giggenbach (1991)	Giggenbach (1991)	Giggenbach (1991)	D'Amore and Panichi (1980)
				°C	°C	°C	°C
MLS 001	Mt. La Soufrier	Fumarole	2015/5/20	383	297	323	298

出典：JICA 調査団

3-3-3 重力探査

(1) 目的

調査地域の地熱探査において、重力探査を広域的な火山地質構造を捉え、地熱貯留層となる断層等の断裂帯を把握する概査として適用する。

(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、北部の Soufriere 火山を中心に地熱微候地を含む島半分程度を対象とした。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 9 月 14 日から 2015 年 10 月 5 日まで行なわれた。測定点数は 106 点で測定を実施した。

図 3-26 に測点位置図を示した。表 3-9 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。

本調査における相対測定の基準とする基点は首都キングスタウンに（図 3-26 中の 3333 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。セントビンセント島内には、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（図 3-27）。併せて、岩石密度をいくつか設定してブーゲ異常図を作成し、地形との相関を検討した。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 2.4g/cm^3 と評価した。その時のブーゲ異常図を図 3-28 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】

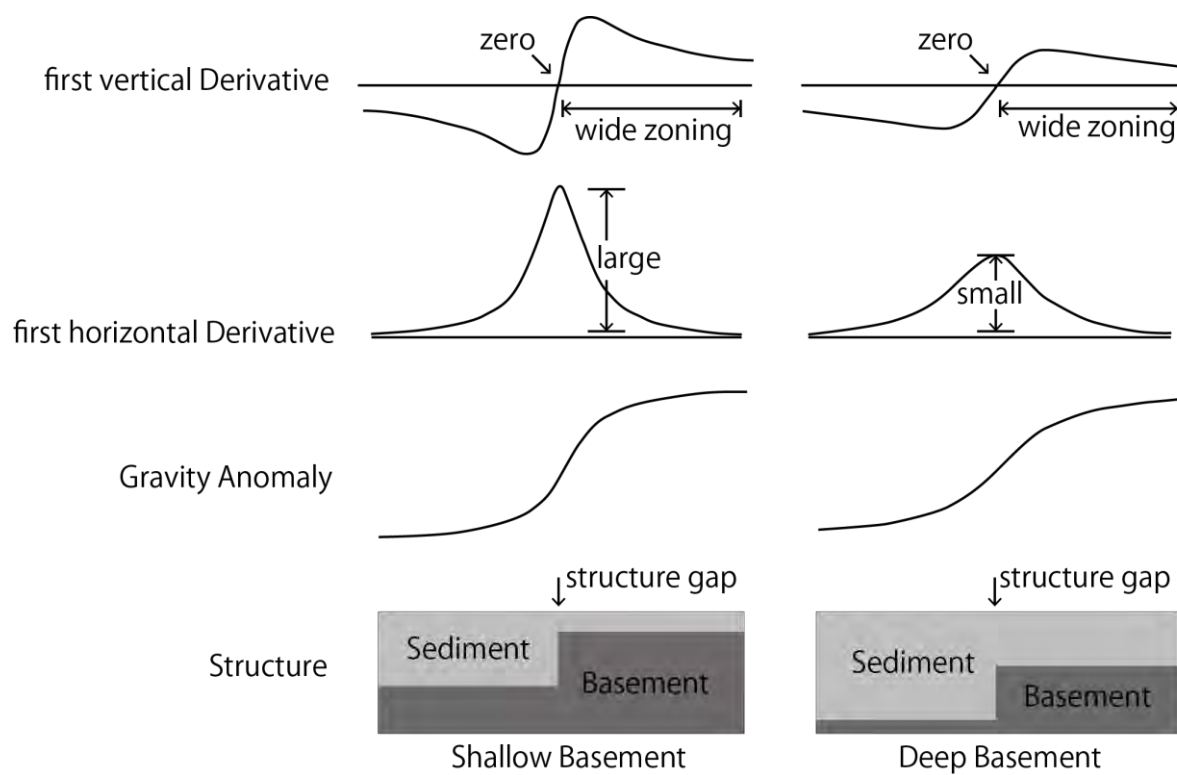
ブーゲ異常図を作成した数値データを用いて、本件調査の目的に合致するように、下表に示す解析図を作成した。

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。

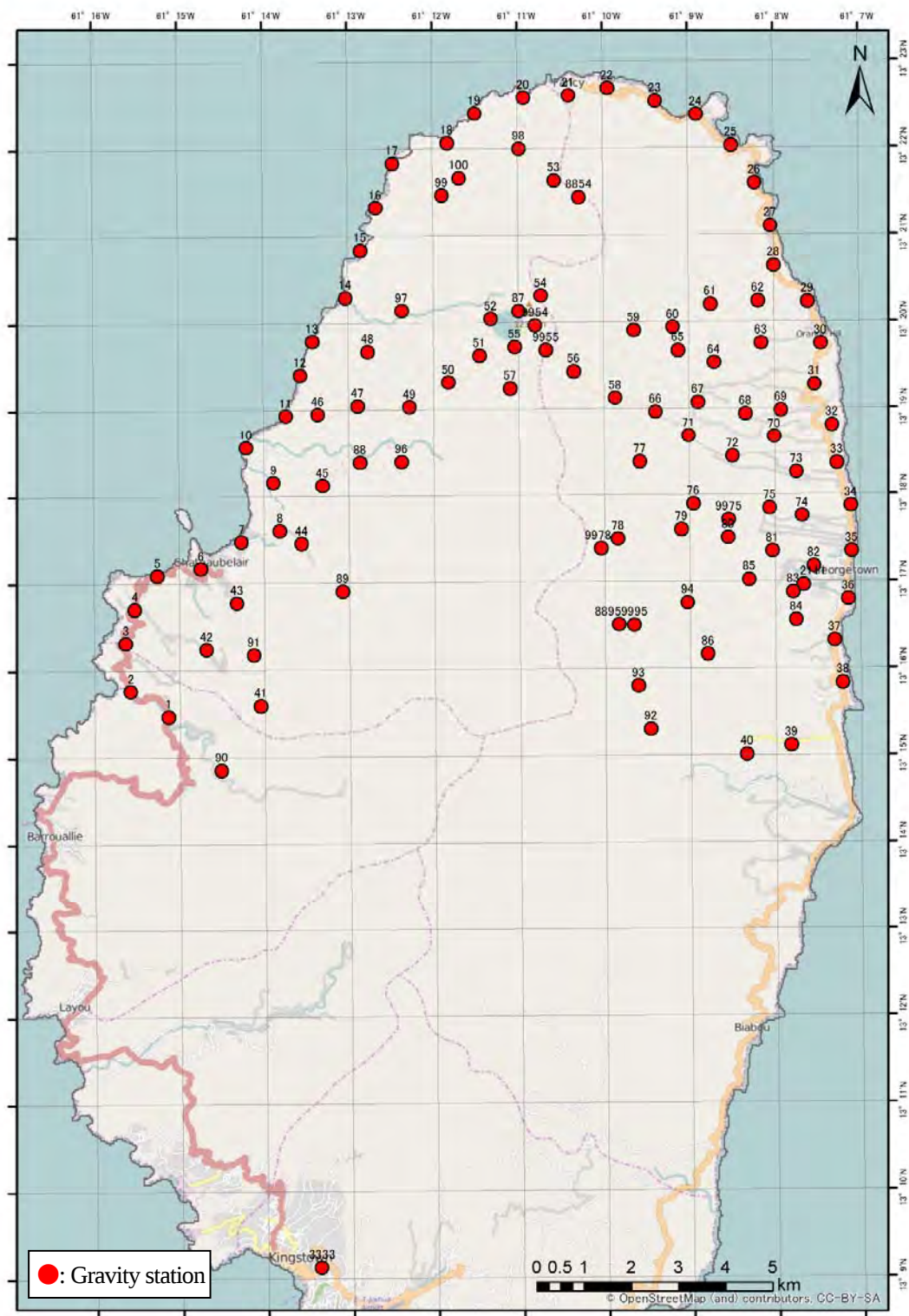
出典：JICA調査団

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次図に示す。



出典：物理探査学会（1998）

図 3-25 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 3-26 重力測点位置図

表 3-10 重力測定結果例

GRAVITY LOOP PROCESSING REPORT

Project:	St-Vincent Gravity	Loop:	62_Sept24.TXT	Processing status:	Solved (s.d. = 0.000 mGal)
Date:	2015/09/24	Instrument type:	Scintrex CG-5	Serial No.	41062
No. of stations:	4	No. of readings:	5	Reduct. density:	2.67g/cm3
Gravity formula:	IGS 1980	Coordinate system:	WGS 84 / UTM zone 20N	Elevation datum:	Ellipsoidal

Loop closure processing:

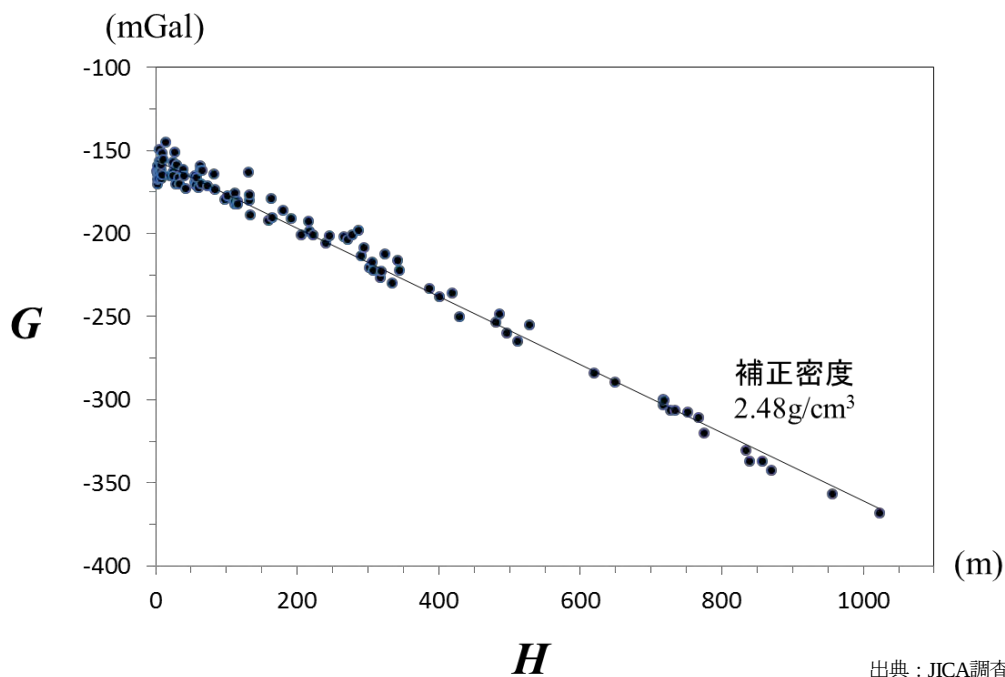
Line No.	Station No.	Local time	Instr. reading	Instr. height [m]	Tidal corr. [mGal]	Drift corr. [mGal]	Abs. gravity [mGal]	Resid. [mGal]	Remarks
0	2111	10:11:51	3388.149	0.160	0.043	0.000	979000.000	0.000	BASE
0	12	15:21:49	3397.950	0.160	0.116	-0.025	979009.849	0.000	
0	48	17:50:32	3329.192	0.160	-0.016	-0.038	978940.946	0.000	
0	13	19:14:33	3396.427	0.130	-0.068	-0.045	979008.113	0.000	
0	2111	23:39:08	3388.190	0.160	0.068	-0.066	979000.000	0.000	BASE

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

Stations results summary:

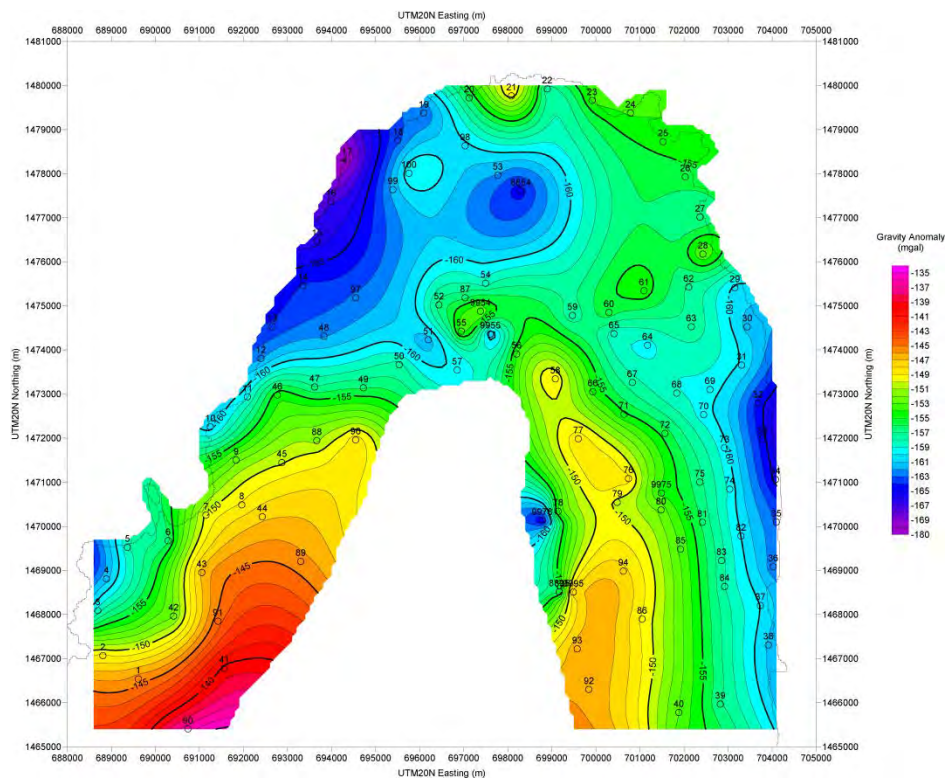
Line No.	Station No.	Geodetic latitude [°]	Geodetic longitude [°]	Altitude [m]	Number of obs.	Abs. gravity [mGal]	RMS [mGal]	Max. error [mGal]	Theor. gravity [mGal]	Free air anom. [mGal]	Bouguer anom. [mGal]	Local [mGal]	Regional [mGal]	Total corr. [mGal]	Complete Bouguer [mGal]	Remarks
0	12	13.32541553	-61.22373926	2.413	1	979009.849			978307.013	703.581	703.311	N/A	N/A	N/A	N/A	
0	13	13.33188909	-61.22132526	3.323	1	979008.113			978307.274	701.864	701.492	N/A	N/A	N/A	N/A	
0	2111	13.28473000	-61.12549000	55.000	30	979000.000	0.000	0.000	978305.370	711.603	705.449	N/A	N/A	N/A	N/A	BASE
0	48	13.32987212	-61.21049366	317.709	1	978940.946			978307.193	731.798	696.247	N/A	N/A	N/A	N/A	

出典：JICA調査団



出典：JICA調査団

図 3-27 G-H 図



出典：JICA調査団

(補正密度2.40g/cm³)

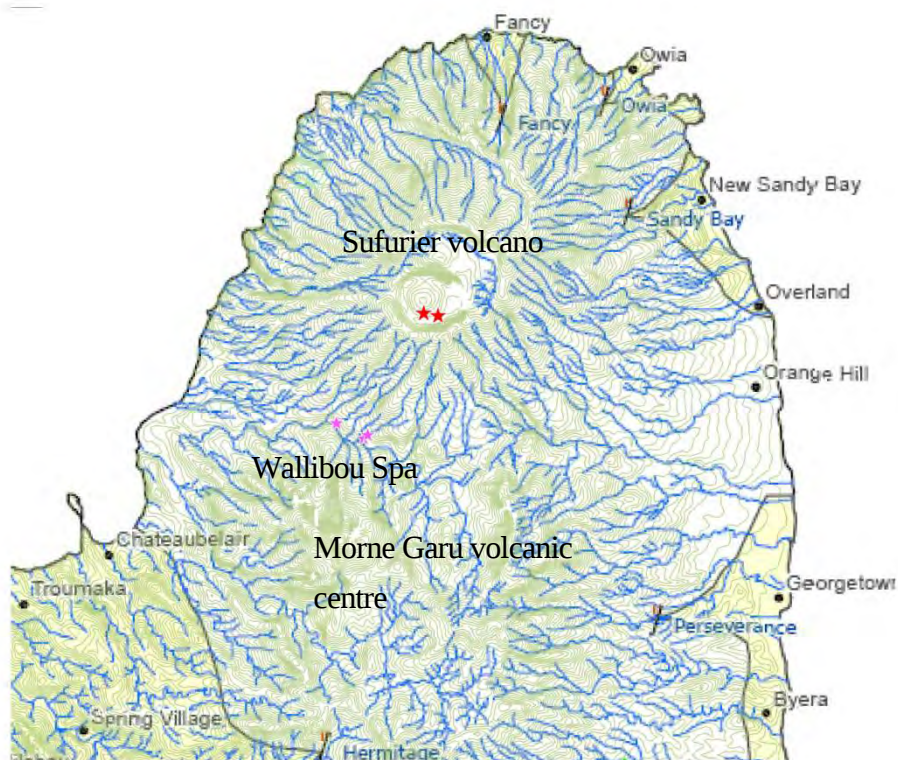
図 3-28 ブーゲ異常図

(3) 調査結果

最適補正密度を 2.4g/cm^3 として作成したブーゲ異常図を図 3-28 に示す（図 3-29 に地形図を示す）。Soufriere 火山の南、Morne Garu 火山体の東山麓と西山麓には高重力異常が認められ、特に東山麓では高重力異常が南北方向に Morne Garu 火山体中心を囲むように弓状に分布している。Soufriere 火山の 1979 年噴火で生じた溶岩ドーム（本調査において火山性ガスを採取した）は Morne Garu 火山体東山麓に分布する高重力異常域の北端に位置する。Morne Garu 火山の中心では一部で重力分布が不明であるエリアが占めているが、低重力異常になっている可能性がある。

Soufriere 火山ではその北麓に低重力異常が分布する。この低重力異常域の周囲は西側を除いて高重力異常域に取り囲まれている。Soufriere 火山の北麓には西側に向かって開口した馬蹄形の崩壊性カルデラが分布しており（図 3-29）、先述した低重力異常域は崩壊性馬蹄形カルデラの分布域と重なる。

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。



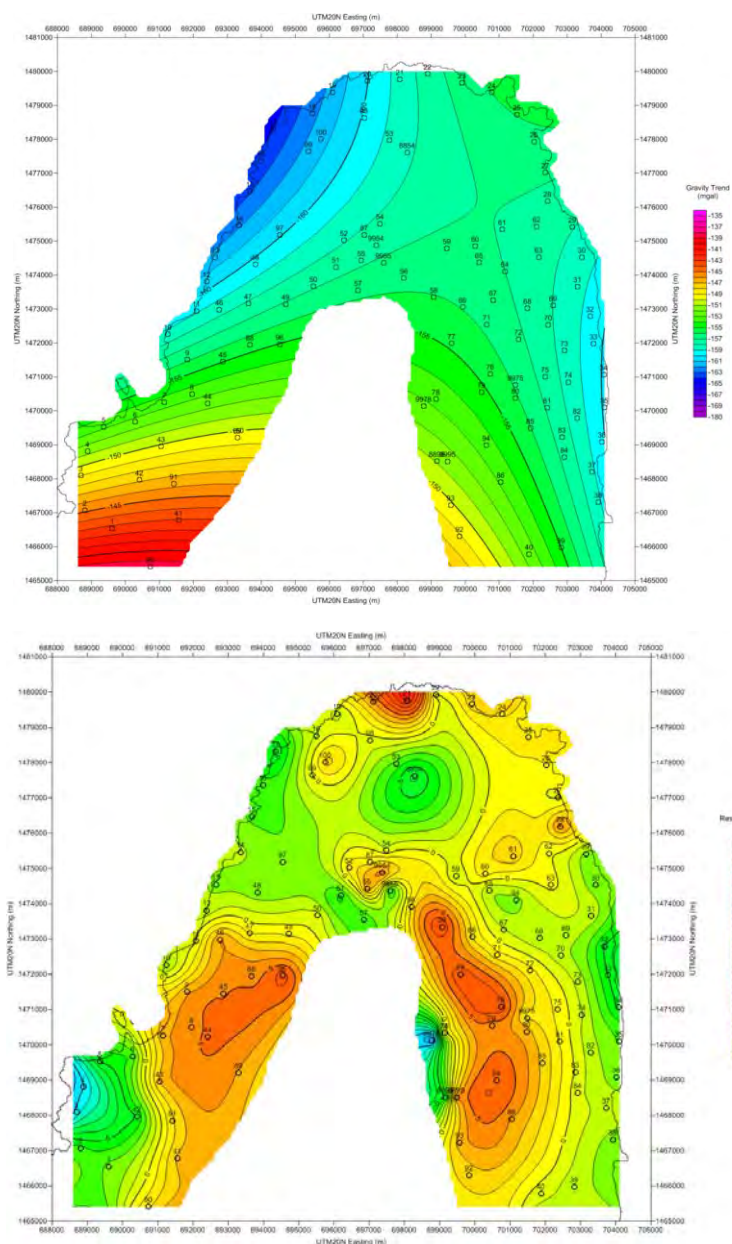
出典：NAWASA

図 3-29 セントビンセント島北部の地図

最適補正密度 2.4g/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 3-30 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る。

傾向面残差図での高重力及び低重力異常の分布は概ねブーゲ異常図と類似している。すなわち、Soufriere 火山の南、Mome Garu 火山体の東山麓と西山麓には高重力異常が認められ、特に東山麓では高重力異常が南北方向に Mome Garu 火山体中心を囲むように弓状に分布している。

なお、Mome Garu 火山体の東山麓では等重力コンターが南北ないし、北西-南東方向に密に分布している。



出典：JICA調査団

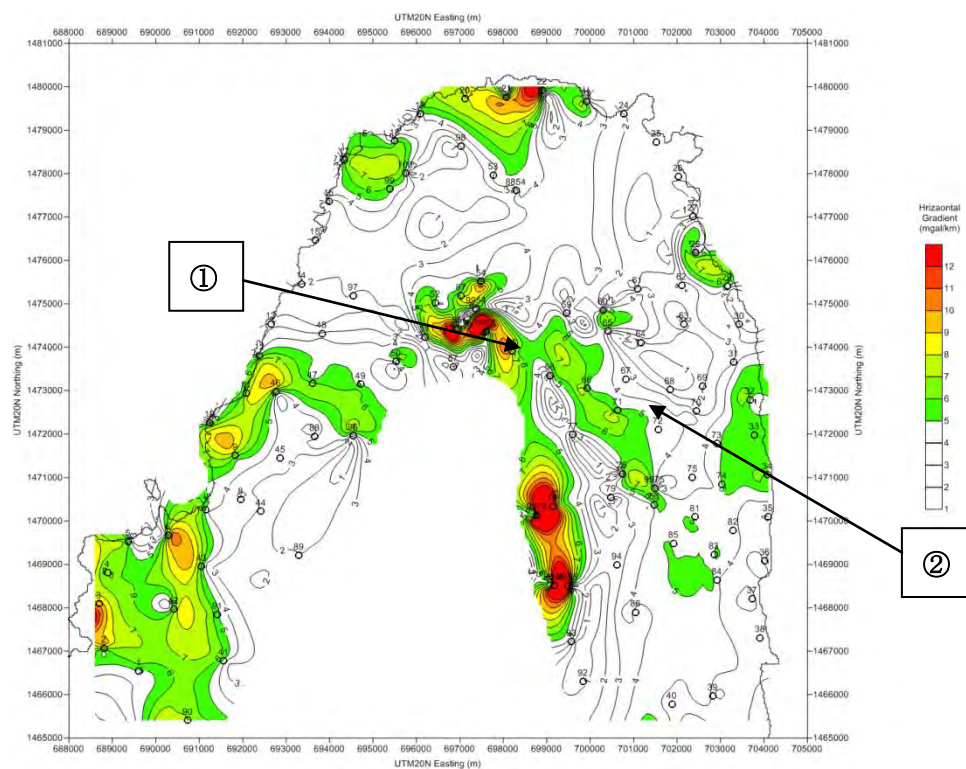
図 3-30 傾向面（上）及び傾向面残差図（下）

最適補正密度 2.4g/cm^3 のブーゲ異常図から作成した水平一次微分図を図 3-31 に示す。水平一次微分図は重力値を水平方向の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）が大きいとされる。Morne Garu 火山体の中心付近のカルデラ壁付近から Soufriere 火山 1979 年溶岩ドームにかけて水平一次微分値の高いゾーンが北北西-南南東方向に延びている（図中①）。この水平一次微分値が高いゾーンの東隣にも別の高いゾーンが北西-南東方向に延びている（図中②）。このほか、Soufriere 火山の東側、西側、北西側及び北側の海岸沿いにもそれぞれ局所的に水平一次微分値の高いゾーンが分布する。このうち、Soufriere 火山の西側にある局所的に水平一次微分値の高いゾーンの上に Wallibou 川があり温泉が湧出している。

最適補正密度 2.4g/cm^3 のブーゲ異常図から作成した垂直一次微分図を図 3-32 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。垂直一次微分値がゼロを示すコンターは Morne Garu 火山体の東山麓から島北側の Soufriere 火山北麓にかけて延びており、Soufriere 火山北麓ではコンターが円形に閉じるように分布している。また、別の垂直一次微分値がゼロを示すコンターが Morne Garu 火山体中心付近から Soufriere 火山の 1979 年溶岩ドーム付近を経由して Soufriere 火山の北西麓に向かって延びている。

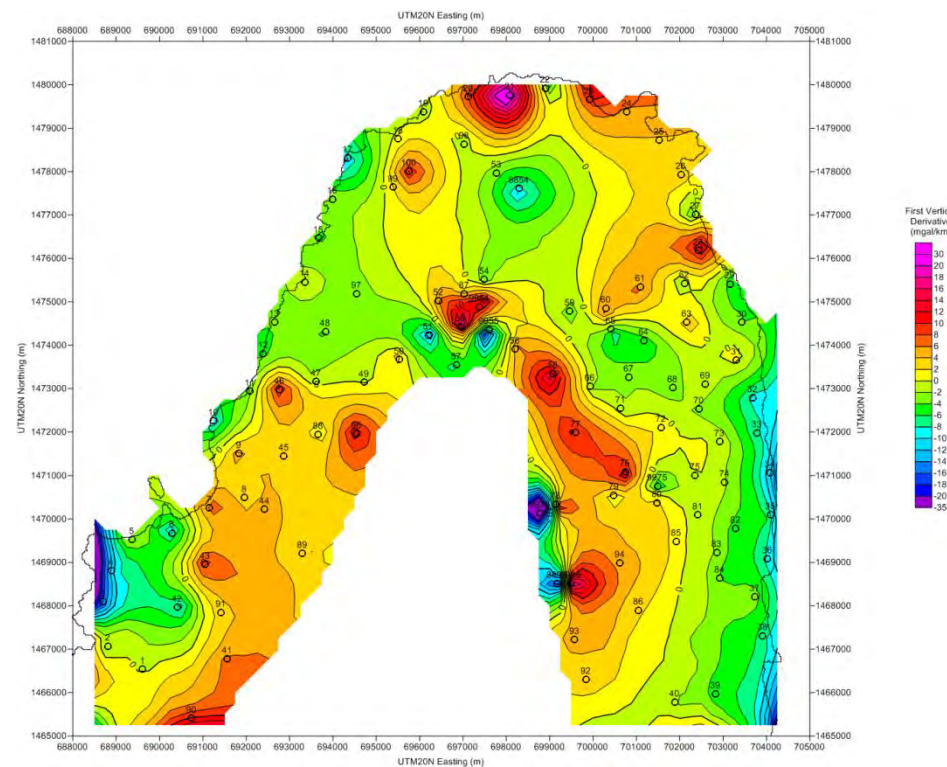
傾向面残差図から推定した解釈密度分布を図 3-33 に示す。解釈密度分布は地下での密度分布を 3 次元的に検討したものである（地下の密度分布を 2 層構造として解析したものが基盤密度分布である）。なお、図示された密度は 2.4g/cm^3 を基準に作成されたものであり、地下での実際の密度を反映しているわけではない。

Morne Garu 火山体の東山麓と西山麓では比較的高密度のエリアが浅部及び深部に認められ、このうち、特に東山麓では高密度エリアが南北方向に Morne Garu 火山体中心を囲むように弓状に分布している。また、Soufriere 火山の北麓では低密度エリアを取り囲むように高密度エリアが点在している。



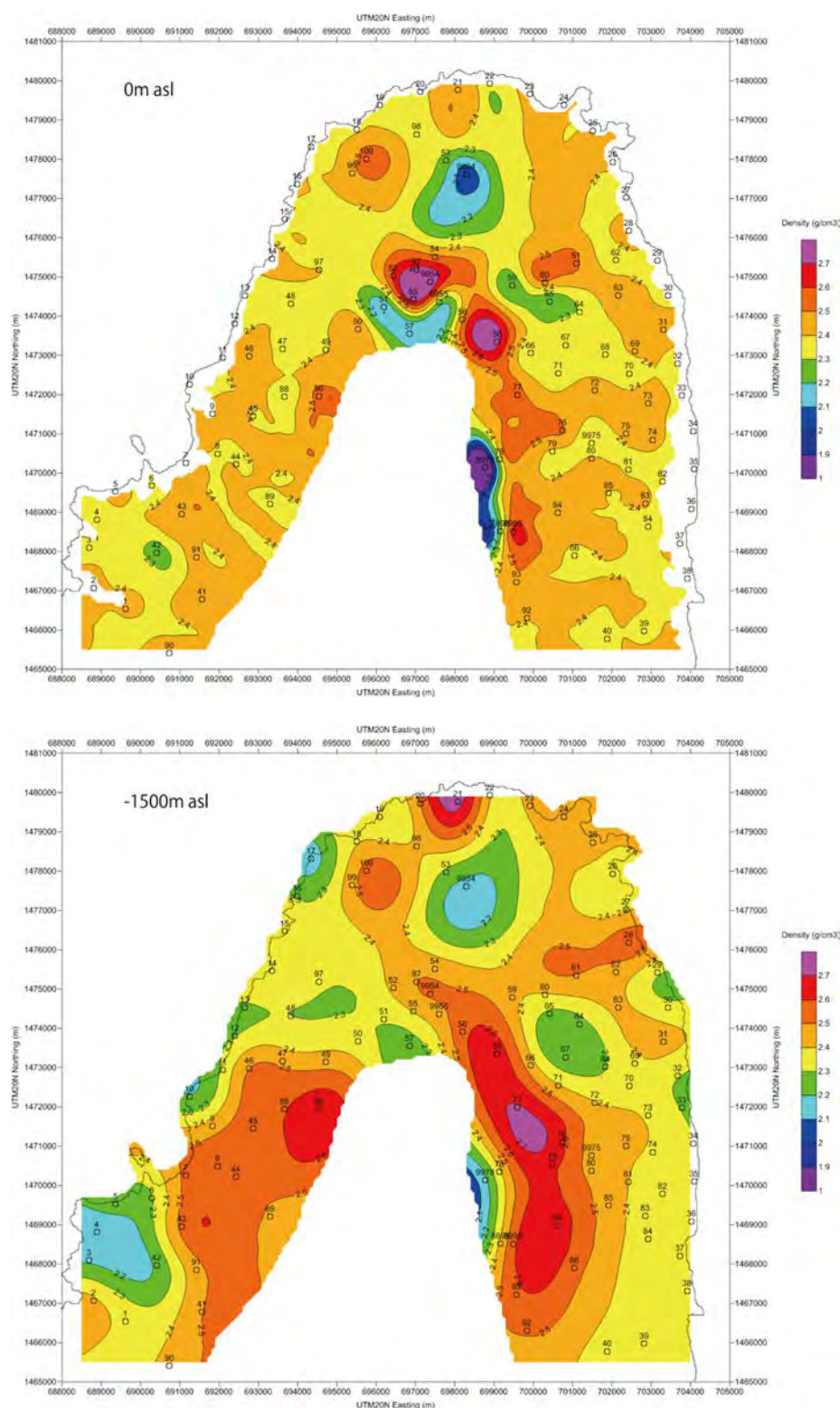
出典：JICA調査団

図 3-31 水平一次微分図



出典：JICA調査団

図 3-32 垂直一次微分図



出典：JICA調査団

図 3-33 重力測定から推定した地下での解釈密度分布

垂直一次微分及び水平一次微分を重ねたものを図 3-34、対比される地質図を図 3-35 に示す。Morne Garu 火山の中心付近及びその東山麓では、

①：Morne Garu 火山中心付近のカルデラ地形東縁付近から Soufriere 火山 1979 年溶岩ドームにかけたエリア

②：①の更に東側

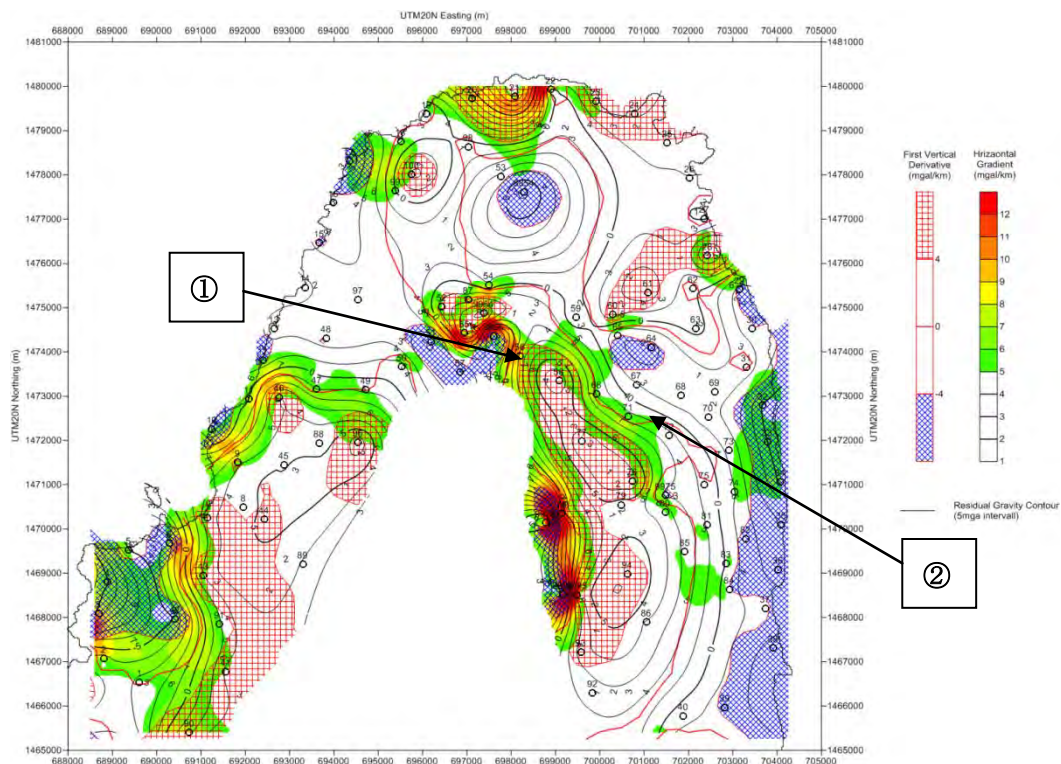
の2つのエリアにおいてそれぞれ水平一次微分値の高異常及び垂直一次微分のゼロ値コンターが重なるように北西-南東方向に延びている。

①及び②の水平一次微分値の高異常及び垂直一次微分のゼロ値コンターが重なるエリアの間には高重力異常（図 3-30）及び高密度ゾーンが分布する。Morne Garu 火山のカルデラ地形内側では部分的に低重力異常を示している（図 3-28）。Morne Garu 火山における上述した重力値の特徴と Morne Garu 火山のカルデラ地形が北西方向に開いたような地形的特徴を示している（図 3-29）ことから、①の水平一次微分値の高異常及び垂直一次微分のゼロ値コンターが重なるエリアは Morne Garu 火山のカルデラ地形に対応しており、カルデラ壁の内側では崩壊性堆積物からなると推定される比較的低密度の物質が埋めていると考える。また、Morne Garu 火山東山麓の北西－南東方向に延びる高重力異常ゾーン、Morne Garu 火山の西山麓の高重力異常ゾーンは Morne Garu 火山体の分布を反映していると考ええる。Morne Garu 火山東山麓の高重力異常エリアは Soufriere 火山の 1979 年溶岩ドームまで続いていること、Soufriere 火山噴出物が Morne Garu 火山を覆っていることから、Soufriere 火山の南側には Morne Garu 火山体が伏在していると考ええる。Soufriere 火山 1979 年溶岩ドームは Morne Garu 火山体と Soufriere 火山の馬蹄形カルデラの境に位置しているように見える。

Soufriere 火山の北側では馬蹄形カルデラの外側に垂直一次微分のゼロ値コンターが分布し、水平一次微分値の高異常も局所的に点在している。馬蹄形カルデラの内側には崩壊性堆積物が分布し、低重力異常及び低密度領域に対応していると考ええる。

引用文献

- 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.



出典：JICA 調査団

図 3-34 水平一次微分図と垂直一次微分図の重ね合わせ



出典：JLinsay et al. (2005)

図 3-35 セントビンセント島北部の地質図

3-3-4 地熱資源徴候に関する調査

本調査の結果、以下のことが判明した。

(1) Wallibou 川流域 (Soufriere 火山西麓)

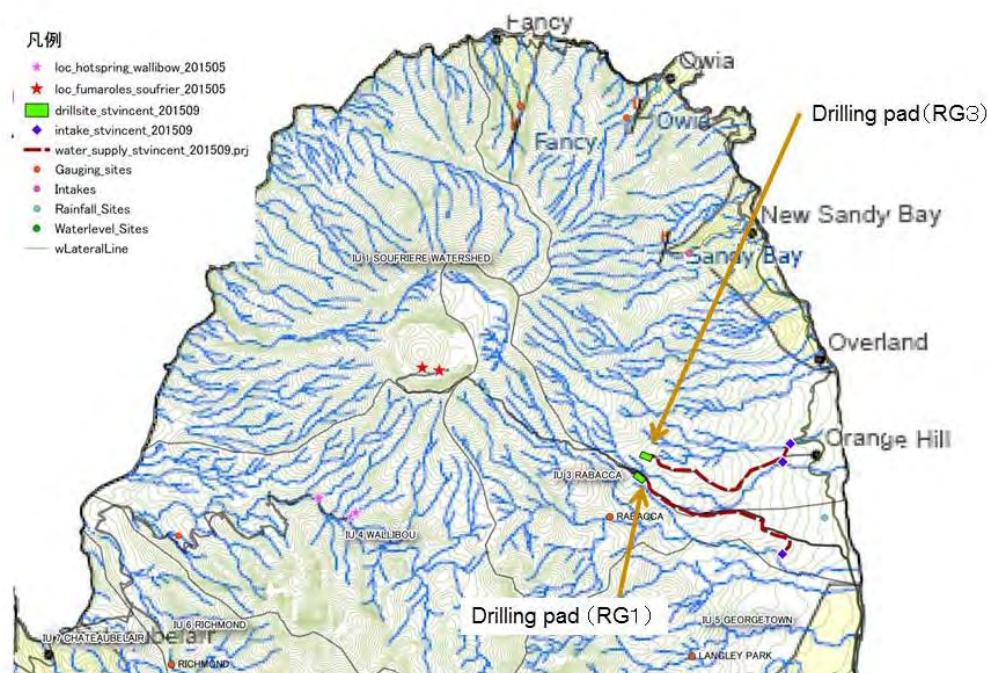
- ✓ Soufriere 火山西麓の Wallibou については安山岩溶岩の節理から温泉が湧出しているが、岩石に変質帯が認められない。
- ✓ Wallibou 流域に湧出する温泉は地熱系縁辺部に生じるとされる重炭酸型温泉に分類される。一方、高温地熱系の最も優れた指標である塩化物型温泉（熟成水、mature water）、及び硫酸型温泉は見られない。
- ✓ 高温かつ大規模な地熱系を想定できるような明白な地熱徴候分布は認められない
- ✓ Wallibou 川流域は地形が急であり、敷地造成、作業道路建設等に費用を要する。

(2) Soufriere 火山 火口溶岩ドーム

- ✓ セントビンセント島における地熱変質は酸性変質鉱物（カオリン鉱物、明ばん石）を伴い、Soufriere 火山山頂の溶岩ドームにおいて火山性流体により生じた酸性変質であると結論できる。
- ✓ Soufriere 火山カルデラ内の溶岩ドーム付近では火山活動により高温蒸気が生じていることは明らかである。しかし、これらの蒸気は火口直下の火道付近に局所的に分布しているものであり、地熱開発のターゲットにはならない。

(3) Soufriere 火山 東山麓

- ✓ リニアメント通過点付近で断層や地熱徴候の存在を示す証拠は確認できない。従って、同地域においては地質及び地化学では地熱貯留層の有無について評価ができない。
- ✓ 地下の情報が現時点では比抵抗及び重力しかないため、構造試錐井を掘削して、地熱貯留層（温度、流体、破碎帯）の有無を確認することが望ましい。
- ✓ 構造試錐井を掘削するための敷地としては現地調査との結果、RG-1 及び RG-3 が最も良いと判断される（図 3-36）。ただし、周辺の川には時期により十分な水量はない可能性があるため、タンクも併用することが望ましい。場合によっては水井戸も必要になる。



出典：JICA調査団

図 3-36 セントビンセント島における水理分布と掘削候補地位置

3-3-5 土木計画に関する確認調査

現地調査を 2015 年 5 月 20 日に実施し、掘削地点の状況、アクセス道路の状況を確認した。Drilling site (RG1) は、海岸から約 4 km 内陸へ入った、Soufriere 火山の南東斜面、標高約 1100m に位置する。Kingstone からは、Windward highway を利用してアクセスができ、近傍の町である Georgetown までは、道路状況は良好である。Georgetown の約 2.3km 南方の Byera hill には、約 60m のトンネルがあるが、道路幅 4.1m、ショルダー両側 0.935m、高さ 5.8 m (F/S 2015 から) あり、通常の掘削リグの運搬には支障にならないと考えられる。Georgetown の Caratal River では土石流により橋梁がダメージを受け (2013 年)、調査時点 (2015 年 5 月 20 日) では、道路は迂回させられている。現状ではリグ運搬時には支障となるが、新規橋梁が建設中である。海岸から掘削地点までのアクセス道路は、Rabacca Dry River の北岸に沿って伸び、掘削地点付近の約 300m 上部にある登山の Visitor Center まで舗装されている。ただし、標高 900m 付近から上部はやや傾斜が急で、また、道路幅員は狭くなり、カーブが多く 3.5m 程度であり、アクセス道路の補修や拡張部分が必要と想定される。

掘削予定地点は標高約 1100m 付近に位置し、緩斜面の畑地となっており、掘削 Pad 建設に必要な 100 m x 100 m 程度の敷地造成は難しくはない。地質は比較的良く締まった風化した火山灰土である。当該地域は夏季にはハリケーン等により雨量が多いため、排水施設を確実に実施する必要がある、また、切土斜面の安定勾配 $H:L=1:1$ 程度と想定される。掘削地点周辺のアクセス状況を図 3-37 に示す。



出典：JICA調査団

図 3-37 掘削地点（RG1）及びアクセス道路の状況

3-3-6 環境社会配慮調査

(1) セ国における地熱開発プロジェクトの ESIA の状況

セ国政府及び Emera/RG グループと共同企業体は、掘削調査のための「スコーピング」及び「ベースライン調査」を独自に実施済みである。ただし調査団によるこれらの報告書のレビューの結果、これらが掘削計画策定前に実施されているために一般論にとどまっているなど、JICA や IDB、ならびに IFC 等の要件を満たす上で内容に補足が必要であることが判明した。そのため、2015 年 9 月より調査団は精度向上のためのスコーピング調査を実施した。現在調査団により実施したスコーピング調査報告書の内容は以下のとおりである（スコーピング報告書は巻末に添付）。

スコーピングの目次

1. はじめに
2. 方法
3. 法規制と組織
4. プロジェクトの概要
5. 環境社会環境の現状
6. 環境社会配慮の項目
7. ステークホルダー協議
8. 結論と提案

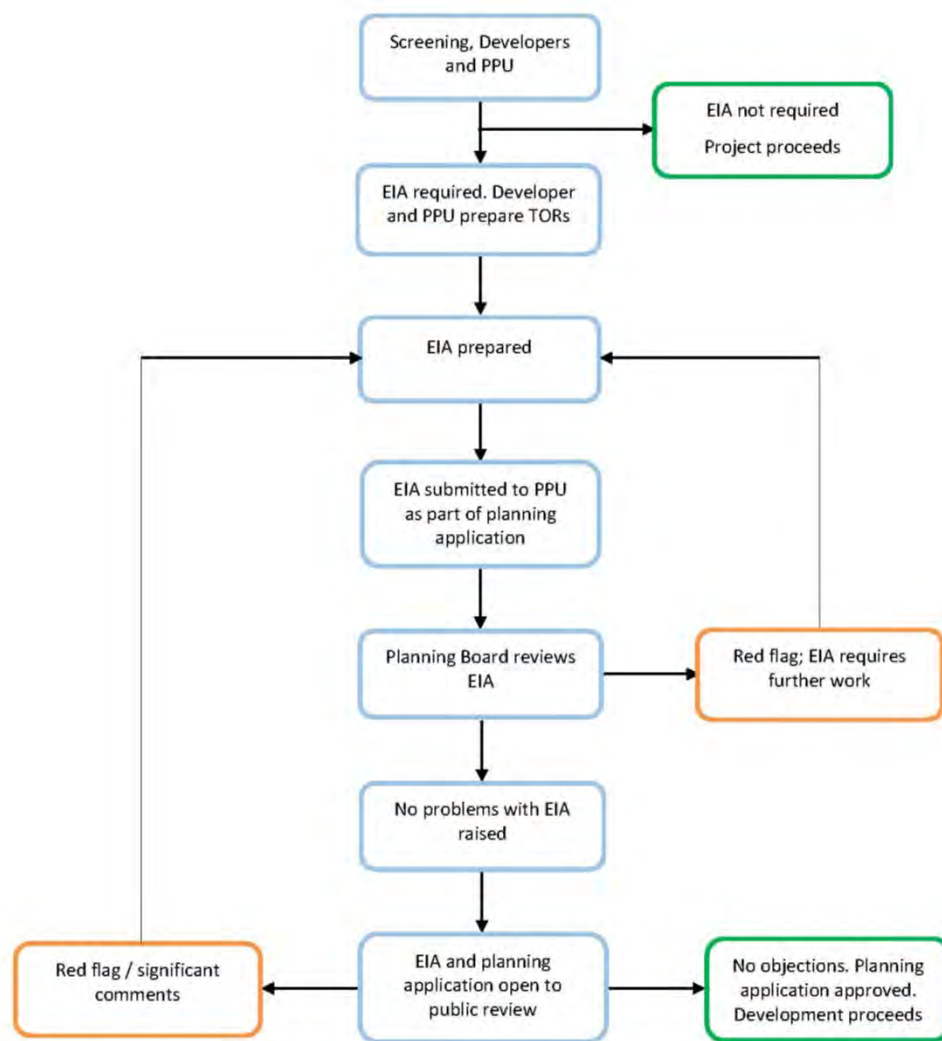
このスコーピングをもとに企業体はベースライン調査ならびに ESIA 調査を実施し 2016 年 6 月に最終報告書がセ国政府に提出され一般に公開されている⁴。

(2) EIA 制度

セ国における EIA のプロセスは“Town and Country Planning Act (1992)”に規定されている。次図に示すとおり、事業者は ESIA 報告書を PPU（Physical Planning Unit⁵）に提出し、審査を受ける。

⁴http://www.security.gov.vc/security/images/stories/Energy_Unit/St_Vincent_Geothermal_Project_Phase_I_Environmental_and_Social_Impact_Assesment_04082016.pdf

⁵ Physical Planning Unit: Ministry of Housing, Informal Human Settlement, Physical Planning Lands and Survey 内の政府組織



出典：JICA調査団スコーピング報告書（2015）

図 3-38 セ国における EIA 手続きの手順

またセ国では、ドラフト段階ではあるが、“Environmental Impact Assessment Regulations (2009)”が整備中であり、この中で EIA の要求事項が規定されている。ただし、国際基準の EIA プロセスとして必須であるステークホルダー協議について明確な規定がない。

セ国における EIA レポートは、PPU により地元新聞ならびに官報等にて一般に公開されることが同規則の Article 17 に規定されている。その期間については明示されていないが、本プロジェクトに関しては 14 日間のコメント期間が設けられている。

(3) 環境関連組織の能力評価

本案件の環境社会配慮に関わる主な組織とその能力についての評価は以下のとおりである。なお、その他の環境関連機関とその機能の詳細については、添付のスコーピング報告書 19 ページの Table 1 を参照のこと。

1) PPU (Physical Planning Unit) :

EIA の規定整備、審査を管理する組織である。環境に関する専門的判断は他の関係部局と連携して行っている。

2) 環境関連の政府組織

環境の各分野に関する専門機関として、Ministry of Health, Wellness and the Environment 内の Environmental Management Department、Ministry of Agriculture, Rural Transformation Forestry and Fisheries 等がある。これらの機関は管轄する分野に対して十分な知識と経験がある。また、本プロジェクトへの関与にも積極的な姿勢を示している。

3) エネルギーユニット :

本プロジェクトの遂行能力ならびに実行力は十分にあると考えられるが、環境管理に関しては新たな専門スタッフを配置する必要がある。

4) その他政府・民間ステークホルダー

上述 2) の政府組織ならびに民間のステークホルダーは本プロジェクトの積極的な関与を希望しており、今後はコンソーシアムの策定した SEP (Stakeholder Engagement Plan) に従い、十分な協議の場を設ける必要がある。

第4章 ビジネスプランの要旨と分析

RG/Emera によって示されたビジネスプランの要旨と調査団のコメントは以下の通りである。

表 4-1 RG/Emera のビジネスプランと調査団コメント

要 旨	分析・備考
1. Executive summary	
2. Project Overview	
2.1 Project Description	
プロジェクトは以下の活動を含む。 - 地熱資源評価、 - 地熱井戸掘削及び試験 - 地熱発電プラント（10 - 15 MW）建設 - 送電線建設 - 発電プラント運営 - 施設拡張（必要に応じて）	送電線建設は VINLEC が資金調達、保有、運営維持管理を担当すると提案されている。
2.2 Goal and Objectives	
- 投資家に利益を提供しつつ電力料金の低下と安定を図る。 - 発電原価のシーリングを 0.18 US\$/kWh とする。	シーリング価格は概ね妥当。
2.3 Decision Management	
開発段階を 6 段階に分類。 1. 開始、2. 資源評価、3. 定量評価、4. 資源確認、5. 実施、6. 運営 現段階は第 3 段階	-
2.4. Project Ownership, Structure and Governance	
事業主体と資本比率は以下の通り。 - GoSVG : (25.00%) - Emera Caribbean (56.25%) - Reykjavik Geothermal (18.75%)	Emera の株式が圧倒的に多い。実質的な経営権は Emera が保有するものと想定される。
- GoSVG は Abu Dhabi Fund (IRENA) から 15 百万 US\$ のソフトローン合意済み - 事業資金は、IDB と JICA の資金支援を受けた CDB の地熱支援資金を期待 - コンソーシアムの運営は最低 25 年	CORE スキームを期待する資金調達想定。
資金調達アップデート： フェーズ 1（坑井掘削および関連工事）用資金。 - DFID 4 百万英国ポンド（政府の equity の一部を構成） - CDB 9.5 百万米国ドル Contingent loan (SVGCL へ融資、試掘失敗の場合は無償)	試掘については grant, private partners' equity, CDB's contingent grant の 3 つが資金ソースとなっている。 (DFID 資金は 4 百万英国ポンドを拠出)
2.5 Policy and Legislative Framework	
背景： - 2008 年：地熱資源開発担当の Energy Unit が設立。 - 2012 年：Geothermal Resources Exploration and Development 成立 プロジェクト実施に向けた準備； - 2015 年：新地熱資源調査開発法成立	-

要 旨		分析・備考
その他合意事項： - Letter of Intent：排他的地熱資源開発権（完了） - Non-disclosure Agreement：事業に係る守秘義務合意（完了） - Shareholder Agreement：株式配分合意書 - Geothermal Exploration Agreement and Resource Concession：開発権に係る合意書 - Power Purchase Agreement：買電合意にかかる基本合意書 - Electricity Generation & Transmission License：発電、送電認可 - Tax Agreement：建設資機材等輸入にかかる関税優遇合意書		これら交渉は、クリントン財団の支援によって実施されている。
3. The Geothermal Opportunity		
3.1 Geothermal Opportunity		
- Soufriere 地域には 240℃以上の地熱貯留層が存在する。 - セ国の需要を満たす資源量が存在する。		火口の深部に高温の熱源が存在する可能性については妥当。
3.2 The Geothermal Resource		
- 比抵抗調査によって深度約 1000 m 程度まで分布する低比抵抗帯が確認された。 - 低比抵抗帯の下面は、温度 240℃以上の貯留層上面を示す。 - 最初の井戸掘削は、Soufriere 火山山頂から東方に 3-4 km 地点で実施するのがよい。	- モデルは低比抵抗帯=粘土鉱物という前提だが、溶岩ドーム以外では粘土鉱物は確認されない。 - したがって、推定されている低比抵抗帯より下部の全域に高温の貯留層が存在するという積極的な根拠は確認できない。 - このため、提案されている地点が最善地点であるか否かの判断はできない。 - 掘削による確認が必要。	
3.3 Infrastructure Assessment		
- Leeward road（西海岸）からのアクセスは非常に困難であり、アクセス道路の整備に 25 百万 US\$を要す。 - 一方 Windward Highway からのアクセスは容易である。 - Rebacca River 北方の 2つのサイトは、既存の簡易舗装された農道が利用できる。アクセス道路の整備費用は Site No.1 は 3.5 百万 US\$、Site No.3 は 3.8 百万 US\$程度である。		- アクセス条件については同意見。 - コストについてはコメントしない。
3.4 Final Site Selection		
- Site No.1（RG1）と Site No.3（RG3）を選定する。 - Site No.1 は政府所有、Site No.3 は最近政府から農民に売却された土地である。 - 政府は、直ちに用地取得を開始するものとする。		- 現有資料では資源量確認調査坑井掘削地点として妥当。
3.5 Geothermal Drill Plan		
- 傾斜井 2 坑井、2500 m（調査井、生産井仕様） - 垂直ないし傾斜井 1 坑井、2500 m（生産井） - 垂直還元井、1000 m	- 計画は、生産井仕様の調査井を掘削。成功時には生産井、還元井として使用。 - 生産井仕様の坑井を掘削する前に、断層をターゲットとする構造試験井を掘削して貯留層の有無を確認することが望ましい。	
3.6 Geothermal Power Plant Concept & Turbine Selection		
- 10-15 MW の開発にはシングルフラッシュ式タービンが適当である。 - 資源量評価の結果によっては異なる発電形式も検討する必要がある。 - 単機容量は 5 MW 以下とすべきである。 - 坑井掘削後に再検討する。		- 計画は妥当。
4. Integrating Geothermal Energy Into the Grid		
4.1 Overview of VINLEC		
VINLEC の概要		-

要 旨		分析・備考																								
- 1931 年に公営企業として設立 - 2033 年まで排他的事業権及び事業認可権を保有 - 33 kV の送電線、11 kV の配電線で運用 - 2014 のピーク需要 20 MW、 総需要 127 GW - 総電力の 80%をディーゼル発電で供給 - 2014 年の発電単価は 0.33 US\$/kWh、原油価格に影響される。																										
4.2 Dispatch of Geothermal Generation																										
- 2019 年の予測電力供給量の分析によれば、地熱発電所の設備容量は 11 MW 程度が適切である。 - これにより、本島の電力需要の約 67%を地熱発電で賄うことができる。 - 現有の水力発電所がそのまま稼働すると仮定すると、ディーゼル発電への依存度は現在の 80%から 15%に減少させることが可能である。		- 設定されている仮定を前提にすれば妥当。																								
4.3 Transmission Interconnection																										
- 33 kV の送電線を 2 系統建設する。 - 地熱発電所には変電所を新設する。 - 送電線は VINLEC が資金調達、保有、運用管理を行う。		- 計画は妥当。 - VINLEC の資金調達が課題。																								
4.4 Geothermal Energy – Benefits to VINLEC																										
- 地熱による発電原価を 0.18 US\$/kWh とし年間発電量を 80 GWh とする場合と、2012 年と 2014 年の原油価格でディーゼル発電を継続する場合を 25 年間の運転期間で比較した。 - その結果、地熱発電所を建設する場合が PNV の評価で 163 US\$のコスト減となった。ただし割引率は 8%。 - これに、老朽化が進んでいる Cane Hall 発電所の運転維持費を考慮するとその便益はさらに大きくなる。		設定されている仮定を前提にすれば妥当。																								
5. Risk Management																										
5.1 Project Risk																										
- 掘削までの初期投資についても Equity IRR に考慮している。 - 他の下記リスクについても計画に配慮している。 - Political/regulatory risk - Resource Risk - Financing risk - Partnership risk - Plant sizing risk		- 妥当。																								
6. Financial Projections																										
6.1 General Conditions																										
- 工事に必要な主要な調達は、競争原理が働く Open Book 方式で実施する方針とする。		-																								
6.2 Cost Estimates																										
- コスト積算は F/S レベルの積算 (Class 4) とする。要約は以下の通り <table><tr><td>Summary</td><td>US mil\$</td><td>%</td></tr><tr><td>Drilling</td><td>21.71</td><td>26</td></tr><tr><td>Power Plant</td><td>31.43</td><td>38</td></tr><tr><td>Civil Works</td><td>3.79</td><td>5</td></tr><tr><td>Steam field</td><td>2.4</td><td>3</td></tr><tr><td>Soft Costs</td><td>15.48</td><td>19</td></tr><tr><td>Financing Costs</td><td>7.32</td><td>9</td></tr><tr><td>Total</td><td>82.12</td><td>100</td></tr></table> (金融費用、建中金利、先払い手数料等を含む)		Summary	US mil\$	%	Drilling	21.71	26	Power Plant	31.43	38	Civil Works	3.79	5	Steam field	2.4	3	Soft Costs	15.48	19	Financing Costs	7.32	9	Total	82.12	100	
Summary	US mil\$	%																								
Drilling	21.71	26																								
Power Plant	31.43	38																								
Civil Works	3.79	5																								
Steam field	2.4	3																								
Soft Costs	15.48	19																								
Financing Costs	7.32	9																								
Total	82.12	100																								
6.3 Project Assumptions																										
ベースケースは次の通り。 - 設備容量：5.5 MW x 2 Unit、 total 11 MW																										

要 旨				分析・備考
- 所内電力：10% - 稼働率：96% - 有効電力：10 MW - 運転コスト：総投資額の 2.5% - 年間発電量：総発生電力量 88.9 GWh、 有効発生電力量 80.0 GWh - 建設期間：24 か月 - 免税、使用権免除：25 年間 - グリッド接続：VINLEC が実施。PPA は使用料支払い				
6.4 Financing & Capital Structure				
資金構造は以下の通り（ベースケース）				借入金：出資金= 60%：40% 政府資金はIRENA（15MUS\$）。 出資金は掘削フェーズにおける費用をカバーする。 発電所建設については借入金によってカバーする。 DFID の支援は 4 mil. British pound (掘削、無償、政府の equity に充当)
Capital type	US\$	%	%	
Debt – Lender -1 (from IRENA funds)	6,700,000	14	-	
Debt – Lender -2	42,572,000	86	-	
Total Committed Debt	49,272,000	100	60	
Sponsor Shareholder Loan	-	-	-	
Government Shareholder Loan	-	-	-	
Sponsor Equity	24,636,000	75	30	
Government Equity（ from IRENA funds、DFID）	8,212,000	25	10	
Total Equity	32,848,000	100	-	
Total Committed Sources	82,120,000	-	100	
6.4.1 Debt Financing				
借入金				セ国政府の IRENA からの借入金条件
Lender - 1：利子率 2.00%、期間 20 years				
Lender - 2：利子率 7.50%、期間 15 Years				商業銀行からの借入条件
6.4.2 Equity				
政府出資金のリターンと発電原価の関係は以下の通り				Letter of Intent による目標IRRは 20%。但し政府資金はソフトローンで当てるため低くすることが可能なので、Base case を 12% としている。
Scenario	Average Power Price (US\$/MWh)	Target IRR (%)		
High	175.83	20		
Base	166.07	12		
Low	157.04	2		
6.5 Financial Sensitivity Analysis – Project Uncertainty				
井戸本数と発電原価の関係（IRR：RG/Emera=20%、 政府=12%）				最大 4 本の井戸の場合まで、シーリング価格 0.18 US\$/kWh を維持できる。 有利な借入金調達が課題。
Scenario	No. wells	Average Power Price (US\$/MWh)		
Aggressive	2 wells	151.67		
Base	3 wells	166.07		
Conservative	4 wells	180.48		
- 他ファクターの感度分析では、借入金金利の影響が大きい				
7. Project Execution Plan				
- プロジェクトはセ国政府と企業体（RG/Emera）で実施する。 - PID までの事業の Project Charter は承認されている。 - FID までの事業の新 Project Charter はドラフトされている。				
7.1 Project Management Structure				
- GoSVG、RG、Emera からなる執行委員会を頂点とした組織が合意されている。 - GoSVG の Ellsworth Dacon 氏は、Owners Committee の一員。				
7.2 Project Schedule & Major Project Milestones				
示されているマイルストンのうち主要なものは下記である。				進捗に遅れがみられる。

要 旨	分析・備考												
- Business Plan Agreed : 6/30 – 8/15/2015 - Decision Gate 2 – Preliminary Investment Decision : 8/30/2015 - Infrastructural upgrade and well pad construction : 7/30/2015 – 2/28/2016 - Drilling contractor selection and Mobilization : 9/22/2015 – 3/30/2016 - First power on grid : 6/30/2018	(2016 年 7 月情報更新) 掘削準備工は 2016 年 11 月、掘削は 2017 年 1 月開始予定												
7.3 Environmental Management													
以下の事項が述べられている。 - 全ての地熱開発行為は EU で採用されている要求事項と基準を採用する - 地熱資源開発は、地熱法に定められている環境保護にかかる基準を順守する。 - 全ての行為は、汚染軽減、自然資源保護、土地現況復元を実現する方法で実施する。騒音、大気汚染及び水質汚染などの近隣への影響を最小限とする。 - Emera と RG は EIA を実施し、いかなる重要な環境への影響も評価し軽減方法を提案する。 - 環境配慮を、Decision making のプロセスに入れる。 Emera と RG は、経験豊富な現地専門家を含むコンサルタントを既に雇用している。	- スコーピング報告書とベースライン調査報告書が作成されている。 - これらをベースにした ESIA が JICA に要請された。 - レビューの結果、国際標準である IFC の基準を満たさないことが判明し、スコーピングから実施し直すことになった。												
7.4 Health & Safety													
RG/Emera が、作業中の安全と健康管理について責任を持つことが既述されている。	- 妥当。												
7.5 Quality Assurance													
品質管理システム (QMS) として 4 つのレベルの活動がして計画されている。 - Quality Policy : QMS の基本方針 - Quality Plan : 品質管理の内容と手順 - 実施マニュアル : 詳細かつ具体的な手順書、指示書 - 報告様式 : 活動記録様式集	- 妥当。												
7.6 Stakeholder Management Plan													
Stakeholder Management Plan の原則が既述されている。 - 地熱開発への理解促進と支持の拡大 - 地熱資源への市民意識の向上と受容促進 - 地熱への市民の期待への対応 - 経験豊富な企業 (RG/Emera) が実施していることへの信頼醸成 - セ国政府が事業実施主体の役目を可能ならしめること	セ国政府を主体 (Champion) として、RG/Emera が実施していることで信頼醸成を図ることを目的としている。												
8. Recommendation													
提案されている事業は、電気料金の低減と安定化に寄与し、投資家への利益も確保できる。このため、参加企業と政府は必要な投資に合意して掘削段階にすすむことを提案する。掘削段階のコストは以下の通りである。 <table> <tr> <td>100. Project Management;</td><td>4,925,000 US\$</td></tr> <tr> <td>200. Steam Supply (wells) :</td><td>24,991,000 US\$</td></tr> <tr> <td>900. Offsite Infrastructure :</td><td>508,000 US\$</td></tr> <tr> <td>Subtotal :</td><td>30,424,000 US\$</td></tr> <tr> <td>Owner's Contingency (5%) :</td><td>1,521,000 US\$</td></tr> <tr> <td>Total</td><td>31,945,000 US\$</td></tr> </table>	100. Project Management;	4,925,000 US\$	200. Steam Supply (wells) :	24,991,000 US\$	900. Offsite Infrastructure :	508,000 US\$	Subtotal :	30,424,000 US\$	Owner's Contingency (5%) :	1,521,000 US\$	Total	31,945,000 US\$	
100. Project Management;	4,925,000 US\$												
200. Steam Supply (wells) :	24,991,000 US\$												
900. Offsite Infrastructure :	508,000 US\$												
Subtotal :	30,424,000 US\$												
Owner's Contingency (5%) :	1,521,000 US\$												
Total	31,945,000 US\$												

出典：JICA調査団

付表：単機容量検討表

SVG		11 MW x 1 unit	5.5 MW x 2 units
1.	System reliability when fails Reserve margin (RM) > Largest unit capacity - Rated installed capacity: 43 MW in 2011 - Capacity to be installed: 11 MW - Rated installed capacity considered: 54 MW - Generation capacity*: 25 – 29 MW (tentative) - Peak demand: 21 MW in 2011 - RM: 4-8 MW	Marginal (RM ≤ 11 MW)	☒ Preferable (RM ≥ 5 MW)
2	Not greater than a 20% of the peak demand (4 MW) (DOMLEC 2015)	Not suitable (<<11 MW)	☒ Marginal (< 5.5 MW)
3	Continuous operational ability of the power plant while maintenance, or when sudden shut down of one unit.	Not possible	☒ Possible (Continuously deliverable output: 5 MW in normal case)
6	Flexibility to fluctuation in power demand due to likely unstable base load conditions	Low	☒ High
7	Initial Cost, (Indicative)	☒ Low	High
8	Maintenance cost	☒ Low	High
9	Hand-ability - Transportation (port and inland) - Installation - Maintenance	Low	☒ High
10	Spare Parts compatibility between units	-	☒ Compatible

*Generation capacity= Rated (54 MW) x Average output capacity (0.65 – 0.70) x Availability (0.80) x failure rate (0.90 – 0.95) --- tentative

出典：JICA調査団

第5章 結論と提言

5-1 結 論

(1) 地熱資源開発の必要性

セントビンセント島の電力の殆どは、ディーゼルエンジン発電施設から賄われており、電力価格は原油価格の変動を強く受けている。2007 年には、一般家庭用電気料金が EC\$ 1.05/kWh (約 US\$ 0.39/kWh) と高騰している。

この様背景から、自国地産資源である地熱資源の開発が急務であると結論される。

(2) 地熱資源資源調査と評価

- ・ 2014 年になって民間企業体 (RG/Emera) がセ国からライセンスを受けて物理探査までの地表調査を実施している。
- ・ その結果、当面ベースロード電源として必要な 10MW ～15MW の資源が賦存する可能性があるとは結論付けている。
- ・ 一方、本件調査団の既存資料検討や補足調査では、高温かつ大規模な地熱系を想定できるような明白な地熱徴候分布は認められないとの見解を示した。

(3) 坑井掘削計画

- ・ RG/Emera とセ国政府は、資金分担を 75% (自己資金)、25% (無償資金支援) として掘削工事を行う計画である。坑井は生産井仕様 3 井が計画されている。資金は既に確保されている。
- ・ 一方、本件調査団は生産井仕様の掘削の前に構造試錐井を掘削するのが望ましいと提案した。
- ・ しかし、3 井戸の生産井仕様坑井の掘削は、事業者 (特に必要資金の 75% を自己資金で賄う民間企業体) の判断なので、本調査団はこれ以上踏み込まない。

(4) 開発計画

- ・ 開発は、「セ」国政府と RG/Emera からなる企業体によってなされる。
- ・ 設備容量 5.5 MW x 2 unit が計画されている。
- ・ 発電元価格は 0.15 2US\$/kWh ～0.180 US\$/kWh と想定されている。
- ・ 地熱資源が想定通り確保されるという前提においては、計画は妥当と判断される。

(5) 資金計画

- ・ プラント建設の資金計画はまだ定まっていない。
- ・ 企業体は CDB からの融資を模索している。

5-2 提 言 — 本邦からの支援

本事業は、官民共同企業体のイニシアチブで進められている。このうち民間企業体の R G 社は地熱開発を専門とする企業であり、一方の民間企業の Emera (Caribbean) 社は電気事業会社である。いずれの会社も専門性の高い企業体である。一方、セ国政府は米国のクリントン財団の支援を受けて事業の組成を進めている。

また、生産井仕様の試掘実施の資金の目途も立っている。

以上の様な状況から、本邦からの支援として「セ」国政府は下記を要望している。

- ・ 日本国での技術研修、とくに発電所建設後の貯留層管理、Steam Field Management、施設の維持管理など
- ・ プラント建設のために ESIA の実施
- ・ 送電線建設の ESIA、F/S および建設支援

特に、送電線建設は本開発計画のボトルネックとなりうるので、ESIA と F/S 実施の支援が早急に必要であると考えられる。

また、「セ」国政府を含めた地熱開発企業体は、プラント建設のための資金源を模索しているため、迂回融資が可能な仕組みの早期成立が望まれる。

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	スコーピング報告書
添付資料-4	プレゼンテーション資料
添付資料-5	収集資料リスト
添付資料-6	容積法計算式

添付資料-1 協議議事録

DATA COLLECTION SURVEY FOR GEOTHERMAL DEVELOPMENT IN ST VINCENT AND GRENADINES

Minute of Meeting (Internal Memo within JICA Team)

Meeting	Energy Unit, Ministry of National Security, Air, Sea Port Development, Government of St Vincent and Grenadines	Venue	Energy Unit
Date	2015/5/18 9:00-11:30 & 14:00-16:00		
Participants	[From St Vincent side] 1. Mr. Godfred T. Pompey, Permanent Secretary, Ministry of National Security, Air, Sea Port Development, Government of St Vincent and Grenadines (9:10-9:45) 2. Mr. Ellsworth Dacon (ED), Director, Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines 3. Ms. Melissa De Freitas (MF), Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines 4. Mr. Chaz Williams, Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines [From Japan side] 1. YAMAGUCHI Kazutoshi (YK), Latin America and the Caribbean Department, JICA [JICA Survey Team] 1. TAKAHASHI Shinya (ST), Team Leader/ Geothermal Energy Development/ Reservoir Assessment 2. AKATSUKA Takashi (TA), Vice Team Leader/ Geology/ Drilling Planning 3. FUKUDA Daisuke (DF), Geochemistry 4. KAWASAKI Kiyoshi (KK), Geophysical Survey 5. KIKUKAWA Takeshi (TK), Electricity Policy/ Investment Policy 6. TERAMOTO Masako (MT), Environmental Social Consideration 7. Saul PADILLA (SP), Project coordination		
Material	ICR, Presentation on Geothermal Development		
Agenda	1. Introduction of JICA survey team, purpose of survey 2. Interview and discussions on geothermal development status in St Vincent		
Discussions and Conclusions	1. From Japan side - YK introduced about JICA survey. - ST explained the purpose of JICA survey as to examine the present situation of geothermal development in St Vincent in order to propose the possible cooperation from Japan. - ST: explained that this visit is only for 10 days and the second visit to S. Vincent can be to complete the information collection and make any survey, if needed in order to end the surface studies. 2. From St Vincent: Mr. Dacon, the Director of Energy Unit, explained current situation as follows. [Policy for geothermal power generation] - Geothermal development has been one of the prioritized projects for more than twenty years. The government is keen on development. - Whereas some companies showed interests in development in the past, only RG/Emera group is serious about investment. - The government secured financing of US\$15 mill from IRENA for geothermal development. The eligible components would include; civil works, test/production drilling, engineering services, project management, equity for investment, and so on. The government policy for debt guarantee has not been firm at this point. - VINLEC has the licenses for generation, transmission and distribution. VINLEC can provide a sub-license. - Mentioned that if with JICA's Loan the price of electricity is reduced to less than 18 cents per Kw, then this option will become more attractive for the government. [JICA's Team Queries] - It is our understanding that geothermal development is a high priority for the government of Saint Vincent. ED: Yes, it is very high. At moment the cost of diesel generation is 43 cents USD, approximately. Therefore, we see that geothermal energy is our best option to reduce that price. - What type of business model will be selected by the government to develop the geothermal project?, there are several models, but the more common are: 1) RG/Emera take part in steam production and generation; then the transmission and distribution by VINLEC, 2) RG/Emera produce the steam and sell it to VINLEC to produce electricity and 3) RG/Emera will undertake the engineering, procurement and construction only then transfer the whole facility to VINLEC for production, transmission and distribution. ED: The model they want to follow is the construction by the government (consortium?) and produce the energy then to sell the electricity to VINLEC for transmission and distribution. The idea is that this consortium will be a government company mainly. - Is the legal frame ready for the implementation of geothermal development? ED: In the electricity supply Act there is only one electrical company with the right to distribute		

	and transmit electricity, and this is not considered to be changed. [Organization and business] - At the moment, the government is interested in a business setup where RG/Emera group and the government would establish the Special Purpose Company (Developer as a form of PPP) in order to develop the steam. Even though the current thought is to have VINLEC to construct the power plant, the investment on the power plant will be considered at a later time (At other meeting of the following day together with VINLEC, VINLEC stated that the consortium would undertake the steam production and power generation as well; while the VINLEC would purchase the power and sell it to public). - However the other option would be that to discontinue the business negotiation with RG/Emera group and to seek other partners through tender, if the government is not satisfied with the indicative condition of the steam purchase (or power purchase). [Legislation and Finance] - The government wishes to enact the draft geothermal bill as soon as possible. The government does not believe that the current electricity supply act needs to be amended for the geothermal development. (The sub-license can be issues by VINLEC under the current legislation.) - The government does not have PPP act and Procurement Act. - The equity investment by the government could be made by the IRENA fund. However the fund arrangement for debt is still open. The government will explore the possibilities such as GEF, EU and others. EU might be able to provide the grant for test drilling (Caribbean Investment Facility (CIF)) and the debt for field development. - The equity participation rates of the government and RG/Emera group have not been agreed on. The business arrangement will be discussed and decided after the submission of the business plan by RG/Emera group. [JICA Support] - The government expects JICA to support both of technical and financial aspects. - The financial assistance would include the grant for test drilling and the debt financing for the field development/ plant construction. - The technical assistance would cover the verification of the study and business development plan by RG/Emera group, and the technical support/advisory on the geothermal development for the government such as an owner's engineer. (The government needs a second opinion on the project when working with RG/Emera group.) - With respect to the legal advisory, the government secured the legal services by the Clinton Foundation in NYC in order to negotiate with RG/Emera group. The government wishes to have a negotiation on the business plan from July to August 2015. 3. Others - The meetings with other relevant organizations and field survey have been scheduled during the stay of the JICA survey team.
Photo	 Godfred T. Pompey, PS  Ellsworth Dacon, Director  Chaz Williams  Melissa de Freitas

Memo by JICA Survey Team; Clarification Points

- (1) Would it be possible for CDB or IDB to provide grant fund for test drilling?
- (2) Would it be possible for CDB to provide debt finance for the field development that is conducted by a private-led consortium?
- (3) If the government mobilizes the EU fund, what kinds of coordination could be made by CDB?

DATA COLLECTION SURVEY FOR GEOTHERMAL DEVELOPMENT IN ST VINCENT AND GRENADINES

Minutes of Meeting (Internal Memo within JICA Team)

Meeting	Stakeholder Meeting	Venue	Prime minister's office
Date	2015/5/19 9:00-10:30		
Participants	[From St Vincent side] 1. Mr. Ellsworth Dacon (ED), Director, Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines 2. Ms. Melissa De Freitas (MF), Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines 3. Mr. Chaz Williams (CW), Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines 4. Mr. Casmus Mcleod (CM), Forestry Supervisor, Forestry Department, Ministry of Agriculture, Forestry, Rural Transformation and Industry 5. Ms. Nyasha Hamilton (NH), Environmental Educator, Environmental management department 6. Mr. Nikolai Lewis (NL), Civil Engineer, Ministry of Transport, Works 7. Mr. Desmond Shallow (DS), Planning Technician, Physical Planning 8. Ms. Karen Duncan (KD), Senior Crown Counsel, Attorney General's Chambers 9. Mr. Fidel Neverson (FN), Planning Engineer (Generation), St.Vincent Electricity Services Limited (VINLEC) 10. Dr. Reynold Murray (RM), Independent Consultant 11. Dr. Jerrol Thompson (JT), Director of Special Project Advisement Energy 12. Mr. Erasto Robertson (ER), Park Ranger, National Parks [From Japan side] 1. YAMAGUCHI Kazutoshi (YK), Latin America and the Caribbean Department, JICA [JICA Survey Team] 1. TAKAHASHI Shinya (ST), Team Leader/ Geothermal Energy Development/ Reservoir Assessment 2. AKATSUKA Takashi (TA), Vice Team Leader/ Geology/ Drilling Planning 3. FUKUDA Daisuke (DF), Geochemistry 4. KAWASAKI Kiyoshi (KK), Geophysical Survey 5. KIKUKAWA Takeshi (TK), Electricity Policy/ Investment Policy 6. TERAMOTO Masako (MT), Environmental Social Consideration 7. Saul PADILLA (SP), Project coordination		
Material	N/A		
Agenda	1. Introduction of JICA survey team, purpose of survey 2. Interview on geothermal business model by VINLEC and EIA study		
Discussions and Conclusions	After the general introduction of JICA Survey Team and its objectives, following topics were discussed. 1. Discussion with VINLEC <General> - VINLEC purchases power from small renewable electricity producers at the price of approximately EC 45cents kWh at the moment on a negotiated basis. (not a feed-in-tariff) The power purchase price is approved by the Cabinet. (The highest tariff would be US 0.18cents/kWh according to the energy unit.) - To the price for the final consumer has to be added the cost of the fuel, which is around 40 cents per kWh, for Law this cost is directly transferred to the consumers. - The electrification rate in the country is almost 99%. There is no need for distribution system expansion for rural areas. - The major target for the company is to reduce the electricity price. <Geothermal Development> - In the geothermal power development, VINLEC will not be a part of the power generation consortium but a power purchaser from an IPP. The company has no plan for investing in the international transmission line either. - The detailed discussion on the PPA has not been made yet. The conditions for the contract will be a future issue. - Transmission line (33Kw) would be 8 km from the preliminarily located geothermal power station to the nearest sub-station, which should be newly constructed and owned-maintained by VINLEC. In response to a question about financial availability to the construction of the power line, ST commented that detail financial matters have to be examined when the project becomes more realistic. 2. Interview on Social-Environmental Assessment for Test Drilling - Dr. Murray, who is in charge of preparation of EIA document, explained about status of social environmental study on geothermal project. - Scoping report has been submitted to physical planning authorities and next step is EIA study. But		

	waiting for some guidelines to be done to figure out what kind of elements to be consulted. In this moment there is no regulation on Environmental social impact assessment. - Main issues to be considered are; 1. Housing, social aspects 2. Water for drilling and discharge to environment 3. Impact on wildlife - Geothermal development candidate sites are not inside the national reserve area. 3. Field Survey - If any - 4. Others - If any -
Photo	 The 'Photo' section contains two side-by-side photographs. The left photograph shows five individuals seated in a room with light blue curtains. From left to right, they are labeled: Ms. Karen (a woman in a dark blue dress), Mr. Neverson (VINLEC) (a man in a white shirt), Dr. Murray (a man in a white shirt), Mr. Shallow (a man in a grey patterned shirt, partially visible in the foreground), and Mr. Lewis (a man in a light blue shirt, partially visible in the foreground). The right photograph shows three individuals seated at a long wooden table in a similar room. From left to right, they are labeled: Ms. Hamilton (a woman in a black top), Mr. Jerror (a man in a light purple shirt), and Mr. Casms (a man in a light-colored shirt).

Memo by JICA Survey Team; Clarification Points
(1)

DATA COLLECTION SURVEY FOR GEOTHERMAL DEVELOPMENT IN ST VINCENT AND GRENADINES

Minutes of Meeting (Internal Memo within JICA Team)

Meeting	Stakeholder Meeting	Venue	Prime minister's office
Date	2015/5/22 9:00-11:30		
Participants	[From St Vincent side] 1. Dr. Jerrol THOMPSON, Personal Advisor of Prime Minister 2. Mr. Ellsworth Dacon (ED), Director, Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines 3. Ms. Melissa De Freitas (MF), Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines 4. Mr. Chaz Williams (CW), Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines [From Japan side] 1. YAMAGUCHI Kazutoshi (YK), Latin America and the Caribbean Department, JICA [JICA Survey Team] 1. TAKAHASHI Shinya (ST), Team Leader/ Geothermal Energy Development/ Reservoir Assessment 2. AKATSUKA Takashi (TA), Vice Team Leader/ Geology/ Drilling Planning 3. FUKUDA Daisuke (DF), Geochemistry 4. KAWASAKI Kiyoshi (KK), Geophysical Survey 5. KIKUKAWA Takeshi (TK), Electricity Policy/ Investment Policy 6. TERAMOTO Masako (MT), Environmental Social Consideration 7. Saul PADILLA (SP), Project coordination		
Material	N/A		
Agenda	1. Introduction of JICA survey team, purpose of survey		
Discussions and Conclusions	After the general introduction of JICA Survey Team and its objectives, following topics were discussed. 1. Site Visits <General> - The technical team was requested to give an opinion about the impressions of the site visits. DF explained that in the eastern side of the island there are not visible manifestations on surface, except in the crater. Therefore, more analysis has to be done. <Geothermal Development> - Dr. T said that the GoSVG would like to avoid delays of the geothermal project, but in a safety way. - ED: - Affirm that they need technical assistance to review what RG and Emera have done so far in order to have a second opinion. - To share the RG/EMERA's data I needed to have a signed agreement with JICA of confidentiality. ST said that the NK group has a confidentiality agreement with JICA, therefore SVG can be sure that this is an important issue for us. - Dr. T.: - The Parliament will see the draft geothermal Bill by next week, on 28 of May. - Also, he said that GoSVG is still looking for others lenders to finance the project. He said that the 15 mill USD from IRENA are the first step. - ED: - Asked if JICA can provide funds for supervision of drilling, drilling and ESIA. - They need to know what JICA can or cannot support to the government with this project. - Said that there are several "eyes" over what SVG is doing to develop the geothermal energy in the country. - They need, immediately, an advisor expert to review the designed geothermal plan. - YK: explained that JICA would formulate projects together with IDB and CDB, with this figure it is possible to finance project with a private company involved in a JV with governments. But, JICA alone cannot assist projects in that condition. JICA assist only governments alone. - Dr. T.: Asked if JICA can assist to SVG with this project knowing that the government owns the 25% of the consortium. YK said that he is not sure about this issue in this moment, because it depends on a business plan of geothermal development in St. Vincent.. - ST: Said that one crucial point is how RG was selected to come here. If they came by themselves without a proper tender, then for JICA is very difficult to assist SVG. - ED: said that the most important issue is to know if JICA can assist for advices on business plan of geothermal development and negotiations in the following 3 to 4 months. YK said that it is possible to assist them as required. - 2. Interview on Social-Environmental Assessment for Test Drilling		

	- ST: Asked if there is room to help with ESIA. ED explained that there is room to help with the ESIA and clarify that they have only 60 Mill USD for this study, and if JICA can help it is very welcome. ST: explained that he is not so sure if JICA can assist to a consortium with a private company involved. - ED: explained that the ESIA is a benefit for the people of SVG and responsibility of the government to run with the study. ST asked if there an agreement between SVG and RG where is specified the responsibilities of each parties and if JICA can obtain a copy of the MoU. -
3.	Field Survey - If any -
4.	Others - If any -

Photo



Memo by JICA Survey Team; Clarification Points
(1)

DATA COLLECTION SURVEY FOR GEOTHERMAL DEVELOPMENT IN ST VINCENT AND GRENADINES

Minutes of Meeting (Internal Memo within JICA Team)

Meeting	Stakeholder Meeting	Venue	Energy Unit's office
Date	2015/5/23 9:00-11:30		
Participants	[From St Vincent side] 1. Mr. Ellsworth Dacon (ED), Director, Energy Unit, Government of St Vincent and Grenadines [From EMERA side] 1. Mr. Peter Williams (PW), Managing Director [From Japan side] 1. TAKAHASHI Shinya (ST), Team Leader/ Geothermal Energy Development/ Reservoir Assessment 2. AKATSUKA Takashi (TA), Vice Team Leader/ Geology/ Drilling Planning 3. KIKUKAWA Takeshi (TK), Electricity Policy/ Investment Policy 4. TERAMOTO Masako (MT), Environmental Social Consideration 5. Saul PADILLA (SP), Project coordination		
Material	N/A		
Agenda	1. Introduction of JICA survey team, purpose of survey 2. To clarify finance model with EMERA		
Discussions and Conclusions	After the general introduction of JICA Survey Team and its objectives, following topics were discussed. <General> - ED: Explained the context of the JICA's mission in this country. - TK: asked how is distributed the participation of the GoSVG and EMERA in the Consortium. PW mentioned that the participation of SVG is 25% and EMERA is 75%. - TK: Asked for more explanation of the project schedule. PW said that the target is to have the power plant commissioning in 2018. At moment, they decided the drilling phase, because the idea is to run with the testing wells at the end of 2016. - TK: asked about the reason to drill standard wells rather slim holes (gradient wells). PW explained that the reason is to avoid extra cost to bring a rig for slim holes and after bring another rig for standard wells. Also, he comments that they are totally confident that slim holes are not required. - PW: explained that the plan is like that the equity will finance the first well and if the test is successful, it will be easier to find lenders for loans. - SP: asked why for the first well testing a reinjection well is not considered in order to have a proper testing program. PW said that they consider that a reinjection well is not necessary for the first testing. - PW: said - At moment they are in the process to get the improvement of the business plan. - They have a letter of intent (LoI) with GoSVG defining the generalities of the development project. - Depending of the capacity of the first well, they will decide how many wells more are needed for a 12 MW power plant. It is planned to install 2 or 3 small units (5 MW each). - ED: said - In the finance model 100% success is considered with the production and reinjection wells. There is no room for failures and this is very important issue for the model, because this affect directly the final price of the KW. PW commented that this is still in revision. - Explained that they are planning to get a technical advisor engineer working for SVG in order to have a counterpart reviewing all the data from RG. - Mentioned that JICA recommended making a 2-D analysis of the MT data. This analysis can take 2-3 weeks and is going to be done in Japan. - The 2-D analysis will give more precise and confidence information to JICA to take decision for further supports. - Explained that the loan from IRENA (15 mill USD) will (may) be used for drilling. And the parliament would not allow to spend money in the risky stage of the project, because this money has to be paid back. - TK: asked if we can share information with IDB/CDB. ED said this is not a problem and we can share it with them. - ST: asked what the SVG is expecting to be assisted from Japan. ED said that wherever assistance can be offered from Japan is well accepted. And PW commented that the finance for big costs (drilling and power plant) can be better.		



Memo by JICA Survey Team; Clarification Points
(1)

Minutes of Meeting

Name of Project	Data Collection Survey on Geothermal Development in Grenada and Saint Vincent and Grenadines
Date	27 th June 2016
Venue	Energy Unit, Kingstown, Saint Vincent and Grenadines
Participants	<Energy Unit> Mr. Ellsworth Dacon Ms. Melissa Defreitas Mr. Chaz Williams <JICA Survey Team> TAKAHASHI, Shinya, KIKUKAWA, Takeshi TERAMOTO, Masako

Meeting: Discussion on the up-coming JICA “Geothermal Development Support Project” in Ethiopia

調査の最終段階として、情報アップデートのヒアリングを行った。併せて、JICA への要望を聴取した。

1. ESIA 関連：キー課題は以下の通り

- ✓ Soil Erosion due to excavation (-)
- ✓ Noise (-)
- ✓ Water exploitation from Rabacca River (-)
- ✓ Waste (-)
- ✓ Aquitic Bio, Terrestrial Bio (St. Vincent Parrot) (-)
- ✓ Employment (+)
- ✓ Community disturbance (Traffic etc) (-)
- ✓ Tourism (-)
- ✓ Cultural Heritage (-)
- ✓ Natural Hazard (-)

- 農家 4 軒が移転の対象となっている。保障費 400,000 EC。閣議承認待ちとなっている。

2. 掘削業者

- 3 社が応札した、中国 Great Wall, アイスランド Iceland Drilling, 英国 Marriot。Iceland drilling が最低価格で落札した（近隣国で作業中）
- 2016 年 11 月に Mobilization, 2017 年 1 月に掘削開始の予定
- 2016 年 8 月に Civil work が開始される。現地業者が担当

3. 財源は

- ✓ UK-DFID: 5.8 M USD (Grant to Gov.)
- ✓ CDB-contingency loan: 9.5 M USD (loan to JV)
- ✓ IRENA, ADFD: 15 M on condition that the wells are successful.

4. 送電線：

- グリッドアナリシスはクリントン財団で実施済み。報告書は VINLEC に提出済みだが、Confidential な情報なので公開できない。
- 送電線建設費は 10M USD を見込んでいる。
- F/S 支援と建設費支援を求めている。
- CDB を期待しているが、VINLEC はローンを望んでいない。

5. JICA への要望

- プラント建設の ESIA
- 送電線の F/S と建設費
- 地熱開発に係るトレーニング、特に発電所建設後の貯留層管理、Steam Field Management、施設 O&M など。日本へ派遣したい。
- 政府も RG/Emera も、日本製のタービン発電機を希望している（リップサービス）

6. その他

- JICA が実施した重力探査と ESIA ベースライン調査の費用を。政府の投資金（Equity）として計上したいので、お知らせ願う。

以上

== End of discussion ==

添付資料-2 現地写真

Appendix-2 Photographs



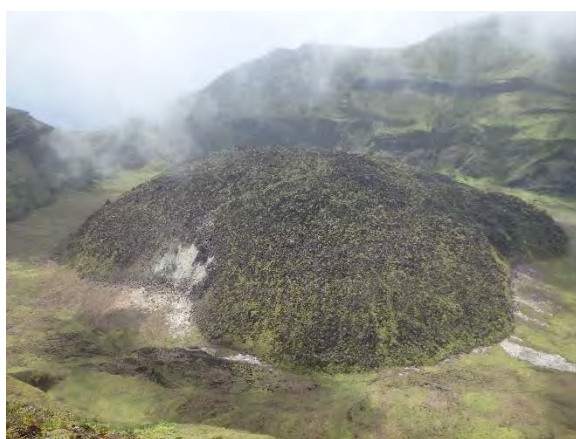
Fumaroles in the crater of Mt. Soufriere



Gas sampling from the fumarole in the crater



Footpath on the outer rim of the crater



Overview of lava dome in the crater of Mt. Soufriere



Hot spring at Walliabou river (approx. 40°C)



Hot spring at Walliabou river (approx. 40°C)



Outcrop along the eastern coastal road



Site survey along eastern lineament pass point



Debris flow on the eastern lineament point



Andesite lava flow on the eastern lineament point



Meeting at Prime minister's office



Meeting with Ministerial Stakeholders



Substation



Main road of Georgetown



New international airport (under construction)



Byera tunnel located at the eastern coastal road



Candidate drilling site (P5) proposed by RG



Candidate drilling site (P2) proposed by RG