

エチオピア国

エチオピア地質調査所

エチオピア国
全国地熱発電開発
マスタープラン策定プロジェクト

ファイナルレポート

平成 27 年 4 月
(2015 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

産公
JR
15-054

エチオピア国

エチオピア地質調査所

エチオピア国
全国地熱発電開発
マスタープラン策定プロジェクト

ファイナルレポート

平成 27 年 4 月
(2015 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



エチオピア国

Great Rift Valley



Source: Google Earth Pro

対象地域位置図

エチオピア国全国地熱発電開発マスタープラン策定プロジェクト ファイナルレポート 要 旨

1. 調査の背景と目的

1.1 調査の背景

エチオピア連邦共和国（以下エチオピア国）の2010年1月時点の総発電設備容量は約2,100 MWである。その9割以上は水力発電によって賄われている。このような現況に対しエチオピア国では、電源の多様性や適切なエネルギーミックスの重要性を認識し、地熱や風力など自国資源を活用した電力開発に取り組んでいる。このうち地熱発電は、ベース電源を安定的に供給する再生可能エネルギーとしてその重要度を増してきている。同国では、1969年に地熱資源開発調査が開始されている。その後、段階的な調査の結果、電力開発に有望な16ヶ所以上の地熱開発可能地域の存在が確認されているものの、調査進捗状況や情報種類と情報量は種々となっており、事業化の目途が立ちつつある地点はAluto-Langanoサイトのみとなっている。このような背景から、同国ではこれら既存の情報を整理するとともに必要な追加調査を実施して系統的かつ具体的に地熱開発を進めるために、我が国に対して地熱開発マスタープランの策定及び地熱開発に係る能力開発への協力の要請を行った。本地熱発電開発マスタープラン策定プロジェクトはこのエチオピア国の要請に基づいて行われたものである。

1.2 業務の目的および範囲

1.2.1 目的

本業務の目的は以下の通りである。

- 地熱有望地点を対象に地表調査を実施する。
- データベース構築、統一的な基準による開発優先順位付けを行う。
- 地熱発電開発マスタープランを策定する。
- マスタープラン策定までの各プロセスにおいて GSE 職員との共同作業や本邦研修を通じて、GSE 職員の能力向上に寄与する。

1.2.2 相手国関係機関

本業務のカウンターパート機関、調整機関は下記のとおりである。

カウンターパート機関

- エチオピア国地質調査所（Geological Survey of Ethiopia: GSE）

合同コーディネーション・コミッティー(Joint Coordination Committee: JCC)

- エチオピア側

✓ GSE 総局長／地質官

✓ 水エネルギー省（MoWIE）代表

- ✓ GSE 地熱資源局長
 - ✓ エチオピア電力 (EEP) 代表
 - ✓ 鉱山省 (MoM) 代表
 - ✓ 財務経済省 (MoFED) 代表
- 日本側
 - ✓ JICA エチオピア事務所
 - ✓ 他関係者
 - ✓ JICA 調査団
- オブザーバー
 - ✓ 日本大使館

なお、上記のうち EEP は、2013 年 12 月に前身のエチオピア電力公社 (EEPCo) から以下の 2 組織に分割されたものである。

- Ethiopia Electric Power (EEP): 発電事業
- Ethiopia Electric Utility (EEU) : 送電配電売電事業

EEP はエチオピア国企業として運営され、EEU はインドの民間会社 Power Grid Corporation が運営を行っている。

1.3 対象地域

調査対象サイトは次の通りである。

表 1.1 調査対象サイト

Geothermal Sites		Prioritization / Data base	Remote Sensing	Site Survey
1	Dallol	☑	☑	GSE
2	Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda)	☑	☑	☑
3	Boina	☑	☑	GSE
4	Damali	☑	☑	GSE
5	Teo	☑	☑	GSE
6	Danab	☑	☑	GSE
7	Meteka	☑	☑	☑
8	Arabi	☑	☑	GSE
9	Dofan	☑	☑	☑
10	Kone	☑	☑	☑
11	Nazareth	☑	☑	☑
12	Gedemsa	☑	☑	☑
13	Tulu Moye	☑	☑	-
14	Aluto-2 (Aluto-Finkilo)	☑	☑	☑
15	Aluto-3(Aluto-Bobesa)	☑	☑	☑
16	Abaya	☑	☑	-
(17)	Fantale	☑	☑	-
(18)	Boseti	☑	☑	☑
(19)	Corbetti	☑	☑	-
(20)	Aluto-1 (Aluto-Langano)	☑	☑	-
(21)	Tendaho-1 (Tendaho-Dubti)	☑	☑	-
(22)	Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera)	☑	☑	☑

☑:本件マスタープラン策定プロジェクトの調査対象

出典：調査団

GSE: アクセス状況不良ないし安全上の理由で GSE 職員によってのみ調査

2. エチオピア国の電力開発計画

2.1 成長と構造転換のためのプラン

エチオピアにおける最新の国家開発計画は「成長と構造改革のためのプラン(GTP: 2010/11～2014/15)」である。エネルギーセクターの主要開発目標は表 2.1 に示されている。

表 2.1 GTP におけるエネルギーセクターの開発目標

Description of Target	2009/10	2014/15
1. Hydroelectric power generating capacity (MW)	2,000	10,000
2. Total length of distribution lines (Km)	126,038	258,000
3. Total length of rehabilitated distribution lines (Km)	450	8,130
4. Reduce power wastage (%)	11.5	5.6
5. Number of consumers with access to electricity	2,000,000	4,000,000
6. Coverage of electricity services (%)	41	75
7. Total underground power distribution system (Km)	97	150

出典: GTP (2010/11-2014/15)

2.2 電力セクター概要

2.2.1 電力セクター政策・法制度・戦略

エチオピア国政府は 2006 年に 5 カ年(2005/06-2009/10)の開発戦略として「貧困削減のための加速的かつ持続可能な開発計画 (PASDEP)」を策定し、続いて前述の GTP で 2010/11 から 2014/15 にわたるエネルギーセクターの目標として掲げている。表 2.2 に PASDEP と GTP の目標値を示す。

表 2.2 PASDEP/GTP (2005-2015)におけるエネルギーセクター目標値

Item	As of 2005/06	PASDEP 2005/06-2009/10	As of 2012	GTP 2010/11-2014/15
Installed Capacity	791MW	2,218 MW (+1,427MW)	2,168 MW	10,000 MW
Electrification Rate	16%	50% (+34%)		75%
Length of Transmission Line	-	13,054km	12,461 km	258,000 km
Electricity Loss	19.5%	13.5%		5.6%

出典: PASDEP/GTP (調査団要約)

分割前の国営の電力公社 EEPCo は「エチオピア電力系統拡大マスタープラン(Ethiopian Power System Expansion Master Plan)」を策定している(2014 年に最終版完成したが未公開)。

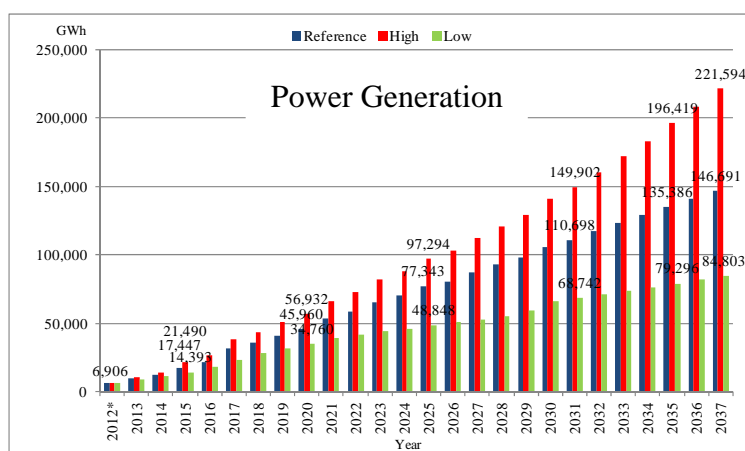
2.2.2 電力セクター関連組織

エチオピア国の電力セクターは、主に(i) MoM とその管轄下の GSE、(ii) MoWIE とその管轄下の EEP および EEU、および(iii) 独立系発電事業者 (IPP)で構成されている。MoM と MoWIE が政策決定と規制を実施し、GSE の地熱探査部門は地熱探査、EEP、EEU と IPP が電力供給システム (発電・送配電)の建設・運営を実施している。

2.2.3 電気需要予測

地熱発電開発マスタープラン策定のために、EEPCo による電気需要予測のレビューを実施した。

エチオピア国における総電気需要は、2012年の6,906 GWhから2037年には146,691 GWhになると高い成長率が予測されている。また、エチオピア国政府は、周辺国と電気販売を取り決めている。電気輸出量は、2013年の1,445 GWhから2037年には35,303 GWhに伸びると予測されている。



* 2012年は実測値

出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014

図 2.1 輸出分を含む電力必要発電量予測 (2012-2037年)

2.2.4 発電計画

表 2.3 に EEPCo マスタープランで計画されている地熱発電所以外の発電計画を示す。

エチオピア国は、発電に有効な非常に高い水力発電ポテンシャルを有している。過去 5 年間 (2009-2013 年) では、4 箇所において合計約 1,200 MW の水力発電所が運転開始し、エチオピア国全体の設備容量が 3 倍になっている。今後も豊富な水力発電ポテンシャルの開発が計画されている。

表 2.3 発電計画 (地熱発電所以外)

Power Plant	Status	Installed Capacity (MW)	Power Generation (GWh)
Hydropower	Under Construction	8,124	21,826
	Candidate	12,407	59,279
Wind Farm	Committed	153	424
	Candidate	1500	4,765
Solar	Candidate	300	526
Biomass	Candidate	120	578
Energy from Waste	Committed	25	186
Sugar Factory	Candidate	474	2,283
Gas Turbine	Candidate	280	2208
CCGT	Candidate	420	3219
Diesel	Candidate	70	515

出典: EEP (調査団要約)

2.2.5 送電計画

送電線延伸計画は、上述した需要予測や発電計画を基に EEPCo により策定されている。

送電線延伸計画は、計画されている発電所を連結すべく、2013年から2020年の短期と2021年か

ら 2037 年の長期の 2 つの段階に分けて検討されている。本調査における他の地熱サイトについても、大半が大地溝帯に沿って敷設されている既存あるいは計画されている送電線の近傍に位置する。

2.2.6 資金調達及び料金

表 2.4 に 1959 年から 2010 年の 50 年間ににおける消費者別の電気料金を示す。家庭用向けの電気料金は、貧困層も電力にアクセスできるよう多額の補助金が投入され、約 0.47 ブル/kWh とされている。

表 2.4 消費者別電気料金

Description	Historical Flat Tariff Rate (Birr/kWh) EFY																
	1952-1964		1965-1971			1972-1978			1979-1987			1988-1989		1990	1991-1998		1999-2003
	EEPCo	ICS	SCS	EEPCo	ICS	SCS	EEPCo	ICS	SCS	EEPCo	EEPCo	EEPCo	EEPCo	EEPCo	EEPCo		
1 House Hold	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1425	0.1513	0.1468	0.1425	0.1513	0.1468	0.1772	0.2809	0.3897	0.4735			
2 Commercial	0.0750	0.1250	0.1650	0.1436	0.1525	0.1975	0.1735	0.3436	0.4146	0.3774	0.3653	0.4301	0.5511	0.6723			
3 Street Light		0.1100	0.1500	0.1285	0.1100	0.1500	0.1285	0.3322	0.4146	0.3711	0.3333	0.3087	0.3970	0.4843			
4 Small Industry		0.1333	0.1733	0.1520	0.1333	0.1733	0.1520	0.2232	0.4597	0.3203							
5 LV		0.0475	0.0875	0.0645	0.0625	0.1175	0.0857	0.2232	0.4397	0.3133	0.2563	0.3690	0.4736	0.5778			
6 HV 15kV		0.0288	0.0780	0.0474	0.0588		0.0588	0.2029		0.2029	0.2341	0.2597	0.3349	0.4086			
7 HV 132kV												0.2416	0.3119	0.3805			
Total Flat Rate	0.0968	0.0824	0.1241	0.1011	0.1027	0.1556	0.1165	0.2341	0.3500	0.2735	0.2645	0.3086	0.4020	0.4900			

LV: 低圧、HV: 高圧

出典: 調査団

2.3 地熱発電開発

2.3.1 コミットまたは計画されている地熱有望サイト

本マスタープランにおいては、ドナーの動向等の情報や GSE の計画を考慮に入れ、既設及びコミットされている地熱サイトの開発優先順位付けを行った。表 2.5 にコミットまたは計画されている地熱有望サイトを示す。

表 2.5 コミットまたは計画されている地熱有望サイト

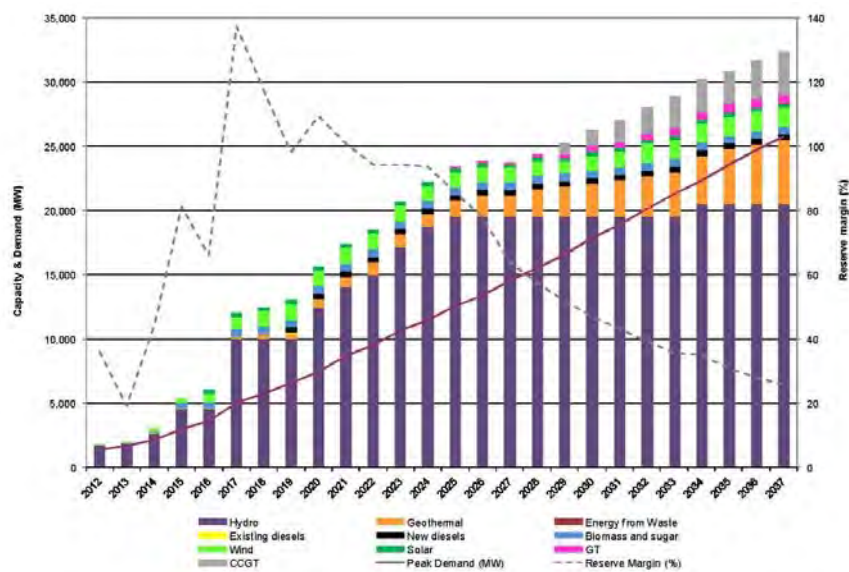
MP S No.	Site	Planned Capacity and COD		Status of Commitment
2	Tendaho-3 (Allalo Beda)	25 MW	2017	ICEIDA/NDF assists surface survey including MT survey.
19	Corbetti	20 MW 80 MW 200 MW 200 MW	2015 2016 2017 2018	Reykjavik Geothermal has agreed with Ethiopian Ministries and agreed PPA with EEP that Reykjavik Geothermal develops Max. 1,000 MW in the next 8 – 10 years. Using GRMF fund, GSE is conducting a study.
20	Aluto-1	70 MW	2018	The Government of Japan and World Bank has assisted the drilling wells.
21	Tendaho-1 (Dubti)	100 MW	2018?	AFD assists well drilling for 100 MW.
Total		695 MW		

MP S.No.: マスタープラン通し番号 AFD: フランス開発局

出典: 調査団

2.3.2 既存の地熱開発計画

図 2.3 に示す EEPCo の計画では、発電所種類を分け全体の発電計画を策定している。この計画では、地熱各サイトの固有のポテンシャルが考慮されておらず、全ての地熱発電所を一律 100 MW 倍数の容量とし、電力需要を基に投入計画を立てている。



出典: EEP

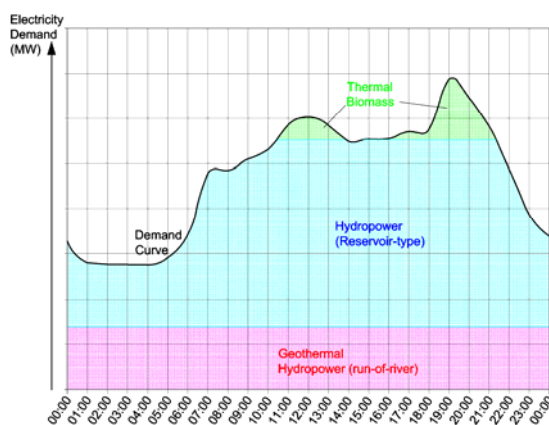
図 2.3 電力開発計画における地熱開発計画

出典: EEP, GSE (調査団編集)

2.3.3 地熱発電の優位性

エチオピア国において地熱発電は、以下の観点から水力発電とともに重要なエネルギー資源であると考えられる。

- ✓ エネルギーの安全保障、エネルギーミックス
- ✓ 安定したベース電源
- ✓ 二酸化炭素排出量削減



Source: JICA Project Team, based on demand curve provided by EEP

図 2.4 エチオピア国における一日時間帯別電力需要と電源構成の概念

3. 地熱資源量調査

3.1 既存資料収集整理結果

3.1.1 目的

本プロジェクトの実施の基礎資料として、各サイトにおける既存の地質文献および報告書の収集を行った。収集した資料は、地熱開発の段階に応じてレビューを行った。

3.1.2 広域調査報告

エチオピアリフトでは、1970年代初頭より1980年代にかけて資源探査および地熱開発を目的とした基礎地質調査が行われ、現在のエチオピア国内における地熱有望サイトが特定されている。これらの調査では、Aluto および Tendaho が地熱開発の可能性が最も高いサイトとして結論づけられている。

3.1.3 詳細調査

1980年代から現在まで、主に詳細地質調査（地質図作成）、地化学調査・分析および物理探査（MT/TEM 探査）からなる各種調査が行われてきている。

表 3.1 各サイトにおける詳細調査状況

No.	Geothermal Sites	Geology	Geochemistry	Geophysics	Other surveys
1	Dallol	○	○	-	
2	Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda)	○	○	○	
3	Boina	○	○	-	
4	Damali	○	○	-	
5	Teo	○	○	-	
6	Danab	○	○	-	
7	Meteka	○	○	-	
8	Arabi	-	○	-	
9	Dofan	○	○	-*	
10	Kone	○	-	-	
11	Nazareth	○	○	○	
12	Gedemsa	○	○	-*	Thermal Gradient Well
13	Tulu Moye	○	-	-	
14	Aluto-2 (Aluto-Finkilo)	○	○	-*	Thermal Gradient Well
15	Aluto-3 (Aluto-Bobesa)	○	○	-*	
16	Abaya	○	○	-	
17	Fantale	○	○	-	Magnetic Survey
18)	Boseti	○	○	-	
19	Corbetti	○	○	○	
20	Aluto-1 (Aluto-Langano)	○	○	○	
21	Tendaho-1 (Tendaho-Dubti)	○	○	○	
22	Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera)	○	○	○	Radioactive(Radon)

凡例： ○：実施 -：未実施 -*：GSE、他ドナー等により調査中

注：一つでも調査データがあるところは、実施としている

出典：調査団

表 3.1 の通り、各地熱開発サイトでは地質調査および地化学調査は少なからず実施されている。しかし、サイト全域が必ずしも系統的に調査されていないことや、地熱徴候の位置や調査試料の採取箇所が明示されていない資料もあるなど、資料の質に大きなばらつきがある。

3.1.4 フィージビリティ調査

1986年に Electroconsul/Geothermica は、Aluto-Langano サイトで9本の井戸掘削、貯留層評価、施設設計、経済性評価を行っている。また、2012年も我が国支援で資源量の再評価が行われ、2014年現在、資源量確認試掘調査が実施されている。

1996年に EIGS/Aquater は Tendaho-Dubti, Tendaho-Ayrobada で3本の井戸掘削と資源量評価（経済性評価は未実施）を行っており、同サイトではその後 GSE が 1995-1998 に3本の井戸を掘削している。これら2サイトでは、2014年に既存の試掘情報を利用したフィージビリティ調査が実施されている。

3.1.5 施設建設・維持管理

上記のフィージビリティ調査に基づき、エチオピア国で初となる地熱発電所(4MW)が Aluto-1 (Aluto-Langano)サイトに1997年に建設され、地熱生産井の維持管理報告書が作成・提出されている。1998年7月に発電を開始したが2002年6月に運転を停止している。2006年に修理が行われて2007年7月に運転を再開したが、間もなく休止状態となって現在に至っている。

3.2 衛星画像解析

3.2.1 目的

現地調査に先立ち、対象地域の地熱ポテンシャルの概況を把握する目的で、各サイトの衛星画像解析を実施し、各種変質帯の分布状況、岩相および変質鉱物マッピング、地質構造ならびに地形・地表面状態を確認した。

3.2.2 解析方法

ASTER データ解析および PALSAR データ解析を行った。

ASTER データ解析では、短波長赤外域のバンド間合成画像および比演算処理画像を作成して、各種変質帯の分布域の抽出、岩相および変質鉱物マッピング、地質構造判読などを行った。PALSAR データ解析では、地熱開発調査地域全域のモザイク画像を作成した上で、リニアメントを主体に、断層崖、クレーター、カルデラ、溶岩ドーム、溶岩流などの判読を行った。

ASTER および PALSAR の解析結果に ASTER DEM データの解析結果を加え、GIS を利用した総合解析により熱水変質帯の変質岩露頭分布域の抽出や地質構造判読を実施して判読図を作成した。

3.2.3 解析結果

判読結果の概要は以下の通りである。

- ✓ 調査対象の地熱徴候地点はすべて東アフリカ大地溝帯に位置している。
- ✓ 全ての地熱徴候地点では、この東アフリカ大地溝帯の伸長方向とほぼ平行なりニアメントが多数発達している。
- ✓ 地熱徴候地点は大別して、火山地形、カルデラ地形および地溝（陥没地形）からなる。これらの大まかな配列はアフリカ大地溝帯の伸長方向とほぼ平行である。
- ✓ 火山地形やカルデラ地形には、熱水変質帯の分布が認められる。熱水変質の強度は地点によって異なる。一方、地溝（陥没地形）の地点では、未固結堆積物が広く分布しているためか、顕著な熱水変質の分布は認められない。

本調査では、これらの情報を描画した解析図に、既存資料から抽出した噴気地点・温泉地点をプロットし、現地に携行することによって現地調査のターゲットを定めた。また、衛星写真解析結果は、貯留層の分布範囲を推定するための基礎資料とした。

詳細を巻末の解析図に示した。

3.3 地質地化学調査

3.3.1 地質

(1) 目的

本調査は以下の項目を目的として実施した。

- i) 地質状況の確認（地形、岩相、地質構造、変質帯など：既往調査の補足調査）
- ii) リモートセンシングで抽出された変質帯の確認
- iii) 岩石および変質鉱物の試料採取

(2) 調査方法

1) 現地踏査

各調査対象サイトにおいては、既存資料調査やリモートセンシング解析結果、および現地での聞き取りの結果を参考にして、踏査地点を選定した。ただし、安全上の理由から遠隔地の Dallol 地域と Arabi 地域は GSE のみで現地踏査を行った。

2) 試料分析

現地調査で採取した試料は、それぞれ蛍光 X 線分析(XRF)および X 線回折分析(XRD)により、岩石組成および鉱物種を同定した。分析の諸元は次のとおりである。

表 3.2 地質試料分析諸元

試料のタイプ		分析方法	分析項目
岩石試料		蛍光 X 線分析(XRF)	岩石の組成(%) (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, Na ₂ O, K ₂ O, Cr ₂ O ₃ , TiO ₂ , MnO, P ₂ O ₅ , SrO, BaO)
変質鉱物試料	沸石等	不定方位法による X 線回折(XRD)	鉱物種の同定
	粘土鉱物	- 定方位法による X 線回折(XRD)	粘土鉱物種の同定
		- エチレングリコール (EG)処理 - 塩酸処理	(緑泥石-カオリナイト、緑泥石-スメクタイトの識別)

出典：調査団

3) 調査結果

地質調査結果は次のとおりである。

a. 現地踏査

現地踏査結果は主に以下の観点から取りまとめた。

- | | |
|--------------|--------------------|
| i) ルートマップ | iv) 地熱徴候 |
| ii) 地質状況概要 | v) 変質作用 |
| iii) 地質構造・断層 | vi) 現場状況写真、その他特記事項 |

また、衛星画像解析結果と合わせて、地形地質の類型化をおこない、地熱貯留層評価の基礎情報とした。類型化の結果は次の通りとなった。

表 3.3 対象地熱徴候サイト地形の類型化

地形	火山地形	カルデラ地形	地溝（陥没地形）
サイト	Dallol, Boina, Damali, Meteka (Ayelu and Amoissa), Dofan, Tulu Moyo, Aluto, Abaya, Fantale, Boseti	Gedemsa, Kone, Nazareth, Corbetti	Tendaho-Allalobeda, Tendaho-Ayrobeda, Tendaho-Dubti, Teo, Danab, Meteka, Arabi, Butajira

出典：調査団

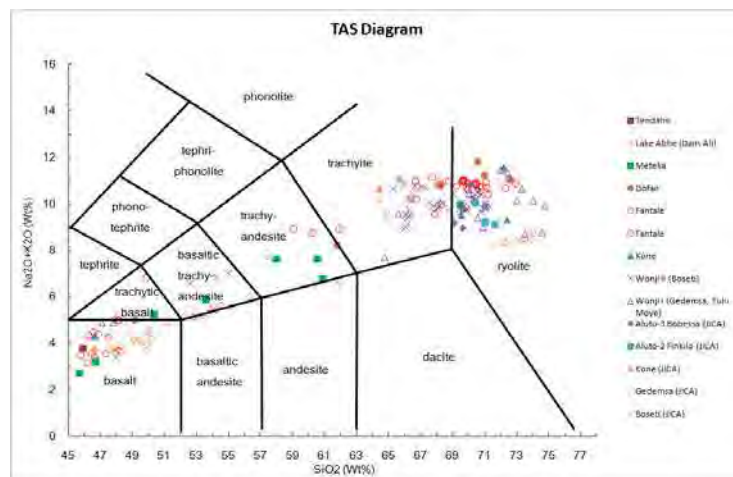
b. 試料分析

岩石組成分析（全岩分析）と変質鉱物分析結果は以下の通りである。

i) 岩石組成分析（全岩分析）結果

<SiO₂-K₂O+Na₂O ダイアグラム(TAS Diagram)>

本調査による分析結果と既存調査結果による分析結果を図 3.1 に合わせて示した。



出典：調査団

図 3.1 SiO₂-K₂O+Na₂O 図(TAS Diagram)

これらの分析結果から以下が結論される。

- 分析結果は既存調査結果と調和し、採取した岩石はエチオピアリフトで一般的なアルカリ岩系列に属する。
- 対象サイトの粗面岩(Trachyte)および流紋岩(Rhyolite)の組成は、ケニア国オルカリア地熱地域の組成と類似しており、アフリカリフトの中で地熱開発に有望な地質条件を備えたサイトであることが推定される。

<FeO-MgO-K₂O+Na₂O ダイアグラム>

FeO-MgO-K₂O+Na₂O ダイアグラムは火成岩の分化傾向を示すダイアグラムとして広く用いられている。図 3.2 に本調査による分析結果と既存調査結果による分析結果を重ねて示した。

これらの分析結果はいずれも、既存調査結果との調和を示すとともに、分化傾向は全てソレアイト系列に類似した傾向を示すことが明らかになった。このことは、地下でのマグマだまりの深度、冷却の速度などに一定の共通性がある可能性を示唆している。

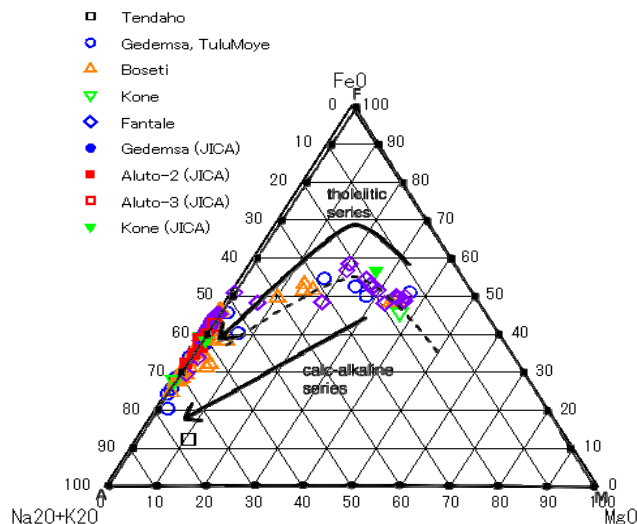


図 3.2 FeO-MgO-K₂O+Na₂O ダイアグラム

出典：調査団

ii) 変質鉱物分析結果

現地で採取した変質鉱物の XRD による鉱物種の同定結果は次の表のとおりである。

表 3.4 XRD による変質鉱物分析結果

No.	Site	Location	Sample	Quartz	Opal - CT	Opal - A	Clinoptilolite	Kaolinite	Halloysite	Smectite
140119-02	Bobesa (Aluto-2)	Bobessa	Altered Clay					△		+
140120-03A	Bobesa	Bobessa	Altered Obsidian						+	-
140120-03B	Bobesa	Bobessa	Zeolite						+	-
140120-04	Bobesa	Bobessa	Altered Rock						-	+
140120-05	Bobesa	Bobessa	Secondary Mineral			+				
140120-06	Bobesa	Gebiba	Clay Mineral							+
140121-03	Finkilo (Aluto-3)	Finkilo	Yellow Tuff						-	-
140122-02	Finkilo	Adoshe	Yellow Clay						+	+
140122-03	Finkilo	Adoshe	Red Clay						-	-
140122-04	Finkilo	Adoshe	White Mineral	○		-				
140122-05	Finkilo	Humo	Clay	-					+	+
140122-06	Finkilo	Humo	White Mineral			+				
140122-07	Finkilo	Shutie	Clay	△					+	
140122-08	Finkilo	Shutie	White Mineral	△		-				
140125-01	Gedemsa	Sambo	Zeolite Vein	-		+		+		
140125-03	Gedemsa	Sambo	Altered Welded Tuff	○						
140125-04	Gedemsa	Sambo	White Mineral	○	+		+			
140126-01	Nazereth	Boko	Yellow Tuff		△		○			
140131-03	Boseti	Kintano	Altered Andesite						-	-
140131-04	Boseti	Kintano	White Mineral	+		+				

出典：調査団

現地調査では、変質作用は地熱徴候の周辺でのみ認められ、Dofan, Meteka を除く全ての対象サイトでは、変質帯と認識できるほどの広がりを持ったゾーンは確認されなかった。

分析結果では、多くのサイトで Quartz, Opal-A, Opal-CT, Clinoptilolite, Halloysite, Smectite が同定された。これらの鉱物種の存在は、低度の変質作用を特徴付け、現地調査結果と調和するものである。Gedemsa および Finkilo サイトでは Kaolinite が確認され、熱水変質により形成されたものと考えられる。

3.3.2 地化学調査

(1) 目的

地熱徴候(温泉、噴気)から得られる流体およびガスの地球化学的特徴から地熱貯留層の特性を考察することを目的に、現地踏査、採取試料分析およびそれら結果の解析を行った。解析結果は以下のとおりである。

(2) 方法

現地踏査を第二次および第三次現地調査の二回に分けて実施し、地熱徴候・河川・湖の合計 71 地点を調査した。調査では座標・標高、温度、pH、電気伝導度を記録し、41 地点から分析試料(流体 32 試料、ガス 11 試料)を採取した。調査地域は以下のとおりである。

第二次現地調査: Aluto, Bobesa, Finkilo, Gedemsa, Nazareth, Boseti, Kone

第三次現地調査: Dofan, Meteka, Dubti (Tendaho 1), Ayrobeda (Tendaho 2), Allalobeda (Tendaho 3), Seha, Lake Loma, Boseti (補足調査), Dallol, Arabi, Erer

(3) 調査結果

踏査の結果、次のことが明らかとなった。

1) 現地調査結果

エチオピア地溝帯南西部では、地熱徴候は丘陵地における噴気が主である。90°Cを超える噴気は Aluto、Bobesa、Gebiba に分布し、Gebiba の噴気温度は南西部で唯一沸騰温度を示す。この他の噴気の温度は 70°C から 90°C と沸騰温度未満である。温泉は主に Langano 湖畔、Nazareth 周辺の低地に分布し、泉温は 65°C から 35°C と中温から低温である。比較的高い泉温は Oiutu (Langano 湖) の 65°C および Sodere (Nazareth) の 50°C である。地溝帯北東部では、丘陵地、低地ともに噴気と温泉が分布し、南西部と比べて高温の徴候が多い。90°Cを超える噴気は Dofan、Dubti、Ayrobeda に分布し、このうち Dubti、Ayrobeda の噴気温度は沸騰温度をわずかに超える。温泉は Dofan、Meteka、Allalobeda、Seha に分布し、Dofan を除くと、いずれの地域にも 80°C を超える高温の温泉があり、Allalobeda では沸騰泉が確認できる。エチオピア地溝帯全体を見渡すと、Aluto-Langano 地域と Tendaho 地域の地熱徴候が目立って優勢といえる。

2) 地化学分析結果の考察

a. 地熱流体の起源の推定

地熱流体及び河川・湖水の同位体比(δD および $\delta^{18}O$)から、地熱流体の起源は天水と解釈できる。

地熱流体の主要陰イオン(Cl , SO_4 , HCO_3)の濃度比、pH、同位体比から次のことが解釈できる。Lake District から Southern Afar の地熱流体は HCO_3 に富み、Northern Afar の地熱流体は Cl に富むという地域差が明瞭である。Lake District では、地表水(HCO_3 型)が地熱貯留層に浸透した後もその陰イオン濃度比は変化せず、 HCO_3 型の流体が貯留層熱水になり得ることが解釈できる。また、Aluto

と Langano は一つの地熱系に含まれることが想定できる。Northern Afar の地熱流体は Cl に富み、沈み込み帯に見られる Cl 型の地熱流体に近い。さらに Tendaho の地熱流体は酸素同位体シフトを示すことから、当地域では水-岩石反応の程度がより進んでいると解釈できる。また、Danakil Depression の Dallol の温泉水には火山性の塩酸ガス(HCl ガス)の寄与が大きいことが推定できる。

b. 地熱流体の地化学温度解析考察

Na-K-Mg ダイアグラムから、Tendaho 地域の坑井熱水と Allalobeda 温泉は、周囲の岩石とほぼ平衡状態にある一方で、Aluto の坑井熱水と Langano の Oiutu 温泉は岩石と部分平衡の状態にあること、その他の温泉は岩石と平衡状態にないことが解釈できる。

複数種の地化学温度計による推定地下温度および検層温度の比較から次のことが言える。[1] 地熱坑井については、石英温度と検層温度がほぼ一致する。[2] 各調査地域で、温泉の石英温度はばらつきが少なく、同一地域内の温泉帯水層を代表する温度と見なすことができる。[3] Alalobeda の石英温度を除いて、温泉の地化学温度は坑井の地化学温度よりも概して低い。[4] 温泉の石英温度と Na-K 温度・Na-K-Ca 温度の高低の順序に、全調査地域を通じての単一の傾向は認められない。以上の点から、地化学温度の計算結果をそのまま地熱貯留層温度とみなすことはできないため、Aluto の坑井熱水と Langano の温泉の石英温度を地熱貯留層と温泉帯水層の温度差とみなし、この差を各地域の温泉の石英温度に加算してそれぞれの地域の貯留層温度とした。この結果に、地熱徴候の分布と活動の程度を加味して、容積法の計算に用いる貯留層温度の範囲を決定した。温度範囲は4つのクラスに分け、A: 240°C-290°C、B: 210-260°C、C: 170-220°C、D: 130-170°Cとした。

c. 噴気ガスおよび坑井蒸気の分析結果考察

噴気ガスおよび坑井蒸気の He-Ar-N₂ 濃度比および希ガス同位体比から、エチオピア地溝帯の地熱ガスの起源はマントルからの発散ガスと想定できる。地熱ガス中のマントル成分は、地熱系の熱源としてのマントル、またはマントルから発生したマグマの存在を示唆する。また、熱源から地表へのガスの移動は、地下深部と地表とをつなぐガスの上昇経路、すなわち断裂帯の証拠と捉えることができる。したがって、マントル成分ガスの寄与が顕著な地域には、良好な地熱貯留層が胚胎する可能性が大きいと考えられる。

d. GSE の分析能力

GSE の流体化学分析の分析精度を確認するため、JICA チームと GSE の間で同一試料を分け、それぞれの分析機関で分析を行い、その結果を比較した。この結果、pH、電気伝導度(EC)、Cl、SO₄、HCO₃、F、Na、K については GSE の分析精度は十分な水準にあることが確認できる。一方、高濃度の SiO₂ は正しく分析されておらず、これはポリマー状シリカの解重合が正しく実施されていないことが理由と考えられる。また、地化学温度計の適用のため、高濃度の K の分析精度を現状より高めることが望ましい。Ca と Mg の分析精度が低く、ICP 分析法の導入が解決策の一つと考えられる。以上のことから、GSE の分析技術の優先課題は高濃度の SiO₂ および K の分析精度の向上と判断でき、本邦研修において、吸光光度法によるシリカ分析と、炎光光度法による Na、K の同時分析の実習を行った。これらの分析方法は簡素であり、かつ必要な分析装置は比較的安価であ

る。したがって、これらの分析方法の導入は、GSE の分析能力の向上に有効と考えられる。

3.4 貯留層評価

3.4.1 目的

地熱発電開発マスタープラン策定のためには、地熱開発候補地の開発優先順位を提案する必要がある。貯留層評価は、開発優先順位を定めるための重要な判断基準の一つとするために実施した。

3.4.2 評価する「資源量」の定義

資源量の評価は、調査精度と経済的意義とによって資源量 (Resource) と埋蔵量 (Reserve) に区分される。USGS(1987)年など種々提案されているが、本マスタープランでは豪州地熱エネルギー班地熱評価基準委員会(AGRCC, 2010)のガイドラインを使用する。この分類を実用的に表示するためにエチオピア国で利用されている対比表を下記に示す。

表 3.5 エチオピア国における調査段階と AGRCC のカテゴリーの対比

エチオピア政府による 8 段階の開発ステージ	AGRCC, 2010	
	Resource (資源量)	Reserve (埋蔵量)
(i) 既存資料の検討	Inferred (推定)	-
(ii) 詳細地表調査 (地質、地化学、地球物理)		
(iii) 調査ボーリングと坑井試験 (最低 3 本)	Indicated (提示)	Probable (可能性のある)
(iv) 評価ボーリング (4-6 坑) と坑井試験		
(v) フィージビリティ調査		
(vi) 生産井、発電所設計、環境影響調査および貯留層評価	Measured (測定)	Proven (確認済み)
(vii) 発電所建設、発電開始		
(viii) 貯留層管理、将来開発		

出典：調査団

本マスタープランで対象とする地熱徴候サイトのうち Aluto-Langano と Tendaho-Dubti を除く全てのサイトでは、地表調査のみの段階となっているため、本調査でおこなう資源量評価は、「推定される資源量 (Inferred Resource)」レベルの評価であることに留意する必要がある。

3.4.3 評価方法—容積法

貯留層の評価は、米国地質調査所(USGS)によって提案された「容積法」を用いて行った。容積法は、経済的に活用可能な地熱エネルギーが地下に有限の容積をもつ「貯留層」に蓄積されており、その地熱エネルギーを地熱流体の形で地表に回収して得られるエネルギーを発電設備容量に換算して評価する手法である。

オリジナルの計算式は USGS(1978)で提案されている。これは、理論的に構築されてはいるが、確率的手法と併用しての利用に難点があることから、実用的な適用例は少ない。これに代わり「簡便式」が多くの報告書で利用されている。しかしこの簡便式で用いられる定数の定義は必ずしも明確ではない。従って、エチオピア国の地熱貯留層評価においてこれら定数を合理的に定めることは困難である。このため、本調査では汽水分離器と復水器の圧力/温度を典型的なものとして仮定することにより、合理的に定数を定めることができ、かつ確率的手法と併用して利用できる計算式を導入した。これによる計算結果は USGS の式の計算結果とほぼ同一になることを確認した

め、式の妥当性は検証されている。

3.4.4 確率的計算手法 — モンテカルロ法

容積法で使用される貯留層にかかる各種パラメーターは一義的に決めることは困難である。このため、通常、ある範囲をもった数値を定めて確率的手法を活用した計算方法であるモンテカルロ法が用いられる。本調査ではオラクル社の Cristal Ball を使用した。

3.4.5 パラメーターの選定

地質地化学調査を主体とした本調査結果から精度の高いパラメーターを決めることは困難である。下記に、容積法で使用する貯留層の各パラメーターの設定の考え方について原則を示した。なお、貯留層とは以下の状態を持つ、地中のある3次元空間と定義する：所定の温度以上であること、地熱流体を有すること、その地熱流体は現在ないし近未来の水準の科学技術で採取可能なこと。

(1) 貯留層体積の提案

貯留層体積の提案は以下の原則で行った。

- 調査対象サイトは衛星画像解析結果などから次に3タイプに分類した：火山体タイプ、カルデラタイプ、地溝タイプ。
- 地形地質地化学情報および地熱兆候分布状況から貯留層の最大地表面積を推定した。
- 最も有りうると考えられる (most likely) 貯留層面積を推定した。この場合、物理探査が実施されている Aluto-Langano や Tendabo-Dubti および Corbetti の結果を参考とした。
- さらに、現地地熱兆候などを参考に most likely 貯留層面積を調整した。
- 貯留層地表面積の最小値をゼロ (「貯留層がない」) とした。

(2) 貯留層厚の提案

貯留層の範囲は、現在ないし近未来の科学技術で地熱流体が採取できる範囲とし、以下の通りとした。

表 3.6 貯留層厚の提案

Items	Minimum	Maximum	Most Probably	Notes
Depth to Reservoir top (GL-)	0.5 km	1.0 km	0.8 km	- 最可能値は Aluto-Langano.などの温度勾配から推定した
Depth to Reservoir bottom (GL-)	3.0 km	3.0 km	3.0 km	- 現在あるいは近未来の技術で経済的に掘削できる深度
Reservoir Thickness	2.5 km	2.0km	2.2 km	-

出典：調査団

(3) 平均貯留層温度の提案

地質地化学調査及び既存資料分析から、貯留層温度を下記の通りと提案した。

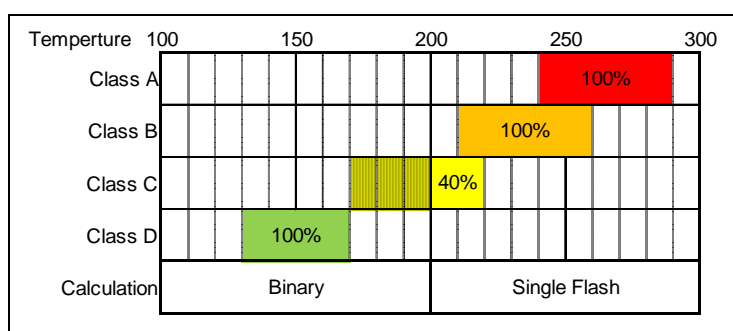
表 3.7 平均貯留層温度

Class	Min	Max	Most Probably	Remarks
Class A	240	290	265	6 sites (Tendaho and Aluto)
Class B	210	260	235	7 sites (Boseti, Meteka, etc.)
Class C	170	220	195	7 sites (Nazareth, Arabi, etc)
Class D	130	170	150	2 sites (Gedemsa and Kone)

出典: 調査団

3.4.6 施設タイプ

提案した算定式では、各パラメーターの曖昧性を排除するために発電施設タイプを仮設定する必要がある。そこで採用する施設タイプは、貯留層平均温度 200°C以上 (Class A、Class B) ではシングルフラッシュタイプ、200°C以下(Class D) ではバイナリータイプとした。貯留層温度が両者に渡る Class C のタイプのサイトでは、全貯留層体積のうち 40%の貯留層温度が 200°Cを超えると推定し、経済性の優れるフラッシュタイプの施設を仮定した。



出典: 調査団

図 3.3 平均貯留層温度の提案

サイトによってはダブルフラッシュタイプやコンバインタイプの採用も可能と考えられるが、現地調査情報が極めて限定される現在の段階でこれらを論じることは時期尚早なので、本件では検討から外すこととした。

3.4.7 資源量算定結果

算定した資源量を表 3.8 に示した。

すなわち、最頻値は 4,200 MW、生起確率 80% では 2,100 MW、生起確率 20% では 11,000 MW である。このうち、開発計画策定に当たっては、最頻値を採用する方針とした。

なお、これらの値の殆どは「推定された資源量 (Inferred Resource)」に相当するが、試掘が行われかつパイロットプラントが運転されたことがある Aluto-1 (Langano)では、表の 91MW のうち、「提示された資源量 (Indicated Resource)」が 70MW、測定された資源量(Measured Resource)」が 5 MW 含まれている。また同様に、Tendaho-1 (Dubti)では、表の 290MW のうち 10MW は提示された資源量 (Indicated Resource)」に分類される。

表 3.8 資源量評価 容積法計算結果

Unit: MW

Target Site

Site No.		Cumulative probability 80%	Most Probable (mode)	Cumulative probability 20%
19	Corbetti	480	960	2400
16	Abaya	390	790	1900
13	Tulu Moye	202	390	1100
18	Boseti	160	320	800
21	Tendaho-1	140	290	660
4	Damali	120	230	760
7	Meteka	61	130	290
2	Tendaho-3	64	120	320
17	Fantale	64	120	320
14	Aluto-2	58	110	290
22	Tendaho-2	47	100	230
3	Boina	56	100	350
20	Aluto-1	49	91	180
9	Dofan	41	86	200
15	Aluto-3	23	50	110
1	Dallol	23	44	120
12	Gedemsa	20	37	100
11	Nazreth	17	33	100
10	Kone	7	14	42
6	Danab	6	11	30
5	Teo	4	9	23
8	Arabi	4	7	36

New/ Divided Site

7-2	Meteka-Ayelu	47	53	250
7-1	Meteka-Amoissa	28	89	150
23	Butajira	6	16	30

Total		2114	4200	10791
--------------	--	-------------	-------------	--------------

Updated After MT/TEM Survey (See Chapter 7)

18	Boseti	175	265	490
22	Tendaho-2	120	180	320

調査団提案式による

出典：調査団

4. 環境社会配慮

4.1 環境社会影響評価(ESIA)調査の概要

地熱開発に伴い発生する環境影響を、初期環境調査（IEE）レベルで評価し、また幾つかの代替案比較のため、環境社会評価（ESIA）調査を実施した。

4.1.1 ESIA 調査の目的

調査の主要目的は以下の通りである。

- 事業実施により発生の可能性のある影響を特定し評価するための自然及び社会環境ベースライン情報の収集。
- 事業実施により引き起こされる可能性のある自然及び社会影響及び汚染の特定。
- 負の影響及び汚染低減策を含め、事業実施により引き起こされる可能性のある自然及び社会影響に対する環境管理及び監視計画の作成。

4.1.2 ESIA 調査の内容

ESIA 調査は以下の6つの業務から構成される。

- ベースライン調査（既存情報、データの収集、編集及び文献調査）
- 戦略的環境評価調査(SEA)概念を適用した候補地における代替案検討
- 事業活動により引き起こされる可能性のある環境影響のスコーピング
- 事業実施により引き起こされる可能性のある自然及び社会環境影響の、初期環境影響評価(IEE)レベルでの予測及び評価（プレ・IEE）
- 環境影響低減及び監視計画に係る調査
- ステークホルダー協議

4.2 環境関連法・規制

4.2.1 環境社会配慮法規制の枠組

地熱開発事業実施に適用される主要な規制、ガイドライン、及び規則を下の表4.1に示す。

Table 4.1 地熱開発事業に適用される主要規制、ガイドライン、規則

No.	Title	No.	Date of Issue
1	Environmental Impact Assessment Proclamation	299	31 Dec, 2002
2	Environmental Pollution Control Proclamation	300	03 Dec, 2002
3	Environmental Protection Organs Establishment Proclamation	295	31 Oct, 2002
4	Expropriation of Landholdings for Public Purposes and Payment of Compensation Proclamation	455	15 Jul, 2005
5	Rural Land Administration and land Use Proclamation, Proclamation	456	15 Jul, 2005
6	Ethiopian Water Resource Management Proclamation	197	Mar, 2000
7	Solid Waste Management Proclamation	513	12 Feb, 2007
8	Environmental Impact Assessment Procedural Guideline Series 1		Nov, 2003
9	Draft EMP for the Identified Sectoral Developments in the Ethiopian Sustainable Development & Poverty Reduction (ESDPRP)		01 May, 2004
10	Investment Proclamation	280	02 Jul, 2002
11	Council of Ministers Regulations on Investment Incentives and Investment Areas Reserved for Domestic Investors	84	07 Feb, 2003
12	The FDRE Proclamation, "Payment of Compensation for Property Situated on Landholdings Expropriated for Public Purposes"	455	2005
13	Council of Ministers Regulation, "Payment of Compensation for Property Situated on Landholdings Expropriated for Public Purposes"	135	2007
14	Oromya Regional Administration Council Directives, "Payment of Compensation for Property Situated on Landholdings Expropriated for Public Purposes"	5	2003
15	Investment (Amendment) Proclamation	373	Oct, 2003

出典: 調査団

4.2.2 環境影響評価

(1) エチオピアの EIA に関する法・規制

EIAの環境影響評価手順書によると、事業は次の3つの条項(Schedule)に分類されている。

- **Schedule-1:** 負及び深刻な環境影響が予測される事業。詳細なEIAの実施が求められる
- **Schedule-2:** 事業タイプ、規模及びその他の特徴において多少の環境影響が予測される事業。必ずしも詳細EIAは求められない。
- **Schedule-3:** 環境影響は無視できる事業。EIA実施の必要はない。

地熱発電事業はSchedule-1事業に分類されている。

(2) EIA 手順

一般的なEIA手順及び許可申請に関しては、連邦EIA手順指針シリーズ1に詳述されている。EIA報告書には最低限以下に関する記述が必要である。

- 使用される技術、プロセス及びそれらが環境へ与える影響を含む事業の特徴
- 操業期間を含む事業実施期間における発生汚染物質の種類及び量
- 操業時の必要エネルギーの種類及び量
- 生物及び物理的環境への予想される直接的、間接的、正及び負の影響の特徴及び期間
- 負の影響の除去、最少化、低減化方法の提言
- 事故発生時の緊急事態計画
- 建設時及び操業時の監視、監査手順
- 環境関連基準及び規制値

地熱エネルギー開発事業に適用される基準及びガイドライン値は以下の通りである。

- 産業排ガス及び産業排水排出暫定基準
- 大気環境暫定基準
- 騒音センシティブ地域における国家騒音基準
- 排気ガスEHSガイドライン（世銀）
- 排水EHS ガイドライン(世銀)
- 排水EHS ガイドライン(世銀)

(3) 移転及び土地取得に関わる法律

エチオピア連邦共和国憲法（1995）では市民の個人資産の権利は保障しているものの、土地の所有権に関しては保障していない。土地は公衆の共通資産と理解されており、市民による土地使用、売買等の用益権の使用が可能とされている。「エチオピア連邦農地管理及び土地使用規則、規則No.456/2005」では農地使用権について規定していると共に、地方政府は中央政府の政策の基、適切な法的管理組織を設立しなければならないという、政府の責任についても規定している。

公的目的のための土地収用の基本原則は憲法で規定されており、収用手順、補償基準等の詳細に関しては「公共目的のための土地収用及び支払い、補償に係る規則、規則No. 455/2005」で規定されている。「公共目的で収用される土地内の財産保障の」支払い、大臣法規No. 135/2007」では、個々の資産への補償基準等、更に詳しい基準を規定している。

2007年の法規によると、公共目的のための土地収用は地方政府及び、Woreda或いは地域行政組織により専門に行われることになっており、これらを対象となるPAPsに対し適切に行わなければならないこととなっている。

(4) 環境評価に係るエチオピア法規と JICA ガイドライン（2010）との乖離

JICA環境ガイドラインとエチオピア法規間の乖離は、住民協議、住民への情報公開等の事業実施前の手順・過程の調整可能な多少の差異を除けば、大きな対立箇所は無いと考えられる。

4.2.3 エチオピアにおける環境管理体制の枠組

エチオピアの環境関連の法的枠組み設定の中で最も重要な最初の一步は環境保護局（EPA）の設立であった。現在省レベルとなっている EPA は環境規制及び監視のための中心機関であり、声明書 No.295/2002 に基き設立されている。EPA の目的は、人々の生活を豊かにする共に環境持続性を高め、またこれらの実施過程の有効性を確保するために、政策、戦略及び法・規制を定めることにある。従って EPA は、環境影響評価（EIA）実施のための次のような責任を有している。

- 事業者の EIA 実施の要求事項遵守の確認
- EIA 実施過程における異なる部門機関間の協力と協議の調整
- EIA 過程における事業主との親密な関係維持及び指導
- EIA 報告書の評価及びこれらに係る方針決定

今回計画の地熱電力開発事業も、開発と環境保全の両立のため、幾つかの政策及び計画に従う必要がある。EPAは関連機関と共に、国内のすべての事業に係る環境管理を規制する。以下に地熱開発に関連する主要組織、機関を示す。

- 地方政府
- エチオピア地質調査 (GSE)
- 水・エネルギー省(MoWE)
- エチオピア電力会社 (EEPCo)
- 地方政府放牧、農業及び地域開発事務所
- EEPCo 計画部

4.3 ベースライン調査

4.3.1 調査実施方法

調査方法としては、地熱エネルギー開発候補地における標準的なデータ、情報収集方法を採用した。

4.3.2 ベースラインデータ

ベースラインデータとして以下を収集した。

- 調査地域の概要
- 自然、歴史及び文化遺産
- 生態学的保護地域
- 送電線による影響の可能性

4.4 戦略的環境評価 (SEA)

現在エチオピアにおいては、開発計画に対する SEA は義務付けられていないものの、上述の SEA の定義と概念を考慮すると、地熱エネルギー開発事業に関する SEA は次の観点から論じられるべきである。

- 地熱エネルギー開発政策
 - ▶ エチオピア保全戦略 (CSE)
 - ▶ エチオピア環境政策 (EPE)
 - ▶ 国家エネルギー開発政策
- 「何もしない」選択を含む事業代替案
 - ▶ エネルギー資源の選択
 - ▶ 事業の選択
- 財務機関のガイドラインからの事業予測
- JICA ガイドラインと国家政策との整合性

4.5 IEE の実施

既存データ及び簡便な現地調査データを含むベースラインデータ／情報に基づき、初期環境調査(IEE)を実施した。

4.5.1 事業のカテゴリー分類

(1) 一般

JICA 環境社会配慮ガイドライン(2010年4月)によると、事業のカテゴリーは4つに分類される。下表4.2にエチオピアEPAガイドライン及びJICAガイドラインで定められている事業カテゴリーの比較を示す。

Table 4.2 事業の環境カテゴリー分類

事業タイプ	JICAガイドライン	エチオピアEPAガイドライン	EIA 要求
環境や社会への重大で望ましくない影響のある可能性を持つようなプロジェクト。また、影響が複雑であったり、先例がなく影響の予測が困難であるような場合、影響範囲が大きかったり影響が不可逆的である場合。	Category A	Schedule-1	詳細 EIA
環境や社会への望ましくない影響が、カテゴリAに比して小さいと考えられる協力事業。一般的に、影響はサイトそのものにしか及ばず、不可逆的影響は少なく、通常の方策で対応できると考えられる。	Category B	Schedule-2	詳細 EIA を免除される場合がある。
環境や社会への望ましくない影響が最小限かあるいはほとんどないと考えられる協力事業	Category C	Schedule-3	カテゴリー化後の環境レビューは免除される。
JICAの融資等が、金融仲介者等に対して行われ、JICAの融資承諾後に、金融仲介者等が具体的なサブプロジェクトの選定や審査を実質的に行い、JICAの融資承諾(或いはプロジェクト審査)前にサブプロジェクトが特定できない場合であり、かつ、そのようなサブプロジェクトが環境への影響を持つことが想定される場合。	Category FI	-	カテゴリー化後環境レビューを実施。

出典: 調査団

(2) 地熱エネルギー開発事業の分類

環境影響評価手順書(2000年5月)のAppendix I(活動一覧表)では、事業をその活動内容により分類している。事業分類によると、25MW以上の発電能力を有する地熱エネルギー開発事業は詳細なEIA実施が求められる事業となる。

4.5.2 初期環境調査のスコーピング

地熱エネルギーは、化石燃料燃焼等の他のエネルギー資源に比べると、一般的により環境調和型であるといえるが、地熱エネルギー開発に際しては留意しかつ管理すべき負の環境影響も存在する。可能性御ある最も重要な影響は、地下水の利用と汚染であり、これらに伴う水の地中への再注入及び新たな地下水生成による貯留槽崩壊による地盤沈下及び地震の誘発である。また、大気汚染、騒音、安全、土地利用に関しても相応の配慮が必要である。

4.5.3 社会環境への影響

今回の地熱開発候補地周辺における住民の生活状況把握の為、Woreda レベルのエネルギー、水分野関連事務所におけるインタビュー調査を実施した。

今回の調査により、料理や照明は薪、石炭、家畜糞が主流であることが明らかとなった。更にコミュニティひとり当たりのエネルギー使用量は非常に低いレベルに止まっていることも明らかとなった。

水資源及びその供給に関しては、Alallobeda、Arabi、Dofan、Meteka及びKoneを除く多くの調査場所では水不足と供給の中断の問題があり、その他の場所においても、水道水（処理された水）へのアクセスは依然最優先問題である。いくつかの場所では水争奪問題、急激な土地利用形態の変化等の問題が発生しているケースもある。各コミュニティは、事業の実施は地域に多少の負の影響ももたらすであろうと考えており、水不足問題に対してはすべてのコミュニティが最低限Kebeleレベルで水の供給を望んでいることが明らかとなった。従って、主となる地熱開発事業実施と共に、コミュニティの水資源へのアクセスが可能となるような何らかの事業（他の開発機関と共同したコミュニティ参加による）実施の強い要求があることを留意する必要がある。

4.5.4 転地及び移転

現在今回の地熱開発の規模は確定していないものの、事業実施のためには、候補地内の一部は事業主により取得されることになる。このため、Kebeleレベルでのインタビューで土地手当てに関わるデータと情報収集を行った。事業実施場所及びその規模の確定後、エチオピアの土地取得手順に従い、正確な土地境界を定める必要がある。

4.6 環境管理計画

4.6.1 環境管理計画(EMP)

発生が予想される環境影響の種類及びその重要度に基づき環境管理計画(EMP)を作成した。重要な環境影響は、適切な方法を用いて緩和されることになるが、その方法は、環境モニタリング、監査を手法として含む環境管理計画の手法・手順に従い実施される。

4.6.2 モニタリング計画

環境モニタリング計画はEMPに含まれる。環境モニタリング及び監査は、提案された環境管理計画の対策が十分に実施され、その結果その成果が適切なレベルであることを確認するために、事業の全ての段階に亘り実施されるものである。候補地に適用される一般的なモニタリング計画は報告書本文に示した。

4.7 ステークホルダー協議

ESIA 調査、即ちスコーピング段階において、コミュニティにおけるインタビューによりステークホルダー協議（2014年3月～7月）を行った。

インタビュー及び質問書を用い、候補地においてステークホルダー協議を行った。ヒアリングと

質問書調査は Woreda レベルにおける 7 つの地方事務所において行い、異なるセクターから 100 人以上の参加者があった。コミュニティの関心事、心配事を取り除くためには、エチオピア規則 No. 1/1995 に記されている法的、社会環境、土地に関する規制事項に則りコミュニティに対する配慮と丁寧な説明がなされる必要がある。

4.8 提言

25 メガワット以上の発電能力を有する地熱エネルギー開発事業は、事業実施以前に詳細 EIA の実施が求められる。EIA 実施過程は、EPC との協議及びスクリーニング報告書の提出から始まり、環境承認の取得で終わる、一連の段階的な手順により構成されている。事業の実施者は、水・灌漑・エネルギー省 (MoWIE) や地方政府等の関連機関との協力のもと、EIA 手順に沿った活動を開始すべきである。EIA 実施にあたっては、以下に関する留意が必要である。

- EIA はエチオピアの EIA 手順に沿って実施する。
- EIA はエチオピアのガイドライン或いは国際的な要求事項に従い、選定された場所において事業主により実施される。
- EIA は事業実施場所の決定後、試掘前に開始し、その後試掘と継続並行して実施する。
- 上記に基き作成された EIA 報告書は試掘結果を考慮して修正する。本調査で実施した ESIA 調査の結果は EIA の実施に活用可能である。
- 修正 EIA 報告書に従い、必要に応じ追加 EIA を実施する。
- EIA は地熱エネルギー開発に特有な環境影響を考慮して実施する必要がある。
- 事業開発権の適用前に EIA 承認の取得を行う必要がある。

5. マスタープランの策定

5.1 マスタープラン目標及び策定手順

目標年次は、EEP マスタープランのものを採用して、短期（4年）、中期（7年）、長期（12年）とし、開発目標はコミットされているまたは進行中のプロジェクトのEEP マスタープランにおける目標設備容量に基づき設定した。

表 5.1 マスタープラン開発目標

Item	Target		Remarks
Period	2015 – 2037 (23 years)		EEP MP: 2013 – 2037 (25 years) Wind& Solar MP: 2011 – 2020 (10 years)
	Short term: 2015-2018 (4 years)		
	Medium term: 2019-2025 (7 years)		
Installed Capacity	Long term: 2026-2037 (12 years)		Committed and on-going Sites
	Short term	700 MW	
	Medium term	1,200 MW	
	Long term	5,000 MW	Same target as EEP MP

MP: マスタープラン 出典: 調査団

本マスタープランは、実施中の各種地質調査結果や過去に実施された調査結果の収集データを基に、22箇所地熱有望地を確認し、多基準解析を用いて有望地を優先順位付けして策定した。多基準解析で用いる基準は、(i) 開発状況、(ii) 環境リスク、(iii) 地熱ポテンシャル、(iv) 経済性、そして (v) 地域特殊要素の5基準とした。

5.2 地熱有望地優先順位付けのための多基準解析

5.2.1 検討項目

a) 開発段階と資源量評価

一般的に地熱開発では開発段階が進むにつれて、推定資源量の信頼性は向上する。本マスタープランでは、22箇所地熱有望地の地熱資源量評価を行うに当たって、資源量を 1) Measured)、2) Indicated、および 3) Inferred に分類して評価した。

b) 環境社会影響

Fantale 地熱サイトは Awash 国立公園の周辺に位置するため、開発へのハードルが高いと判断される。このため開発優先度を低くした。

c) 地熱資源量評価

それぞれのサイトの地熱資源量を、本調査で実施した各種地質調査を基に評価した。貯留層評価結果は、表 5.2 に要約して示した。

表 5.2 地熱資源量評価

Site		Temperature Class	Geothermal Resource		
			Inferred	Indicated	Measured
1	Dallol	B	44	N/A	N/A
2	Tendaho-3 (Allalo Bda)	A	95	N/A	N/A
3	Boina	C	100	N/A	N/A
4	Damali	C	230	N/A	N/A
5	Teo	B	9	N/A	N/A
6	Danab	B	11	N/A	N/A
7	Meteka	B	130	N/A	N/A
8	Arabi	C	7	N/A	N/A
9	Dofan	B	86	N/A	N/A
10	Kone	D	14	N/A	N/A
11	Nazareth	C	33	N/A	N/A
12	Gedemsa	D	37	N/A	N/A
13	Tulu Moya	C	390	N/A	N/A
14	Aluto-2 (Finkilo)	A	110	N/A	N/A
15	Aluto-3 (Bobesa)	A	50	N/A	N/A
16	Abaya	B	790	N/A	N/A
17	Fantale	C	120	N/A	N/A
18	Boseti	B	320	N/A	N/A
19	Corbetti	B	1000 ^{*1}	N/A	N/A
20	Aluto-1 (Langano)	A	16	70 ^{*2}	5
21	Tendaho-1 (Dubti)	A	270	10 ^{*3}	N/A
22	Tendaho-2 (Ayro Beda)	A	100	N/A	N/A

N/A: 該当なし

^{*1} Reykjavík Geothermal

^{*2} エチオピア・アルトランガノ地域地熱電源開発調査, 経済産業省, 2010,

^{*3} Consultancy Services for Tendaho Geothermal Resources Development feasibility Study, ELC, 2013

出典: 調査団

d) 経済性

プロジェクトの経済性は、(i) 発電原価と(ii) 経済的妥当性の2つの指標により判断した。

(i) 発電原価

競合する発電所 (地熱発電所と水力発電所および他の発電所タイプ)を比較するため、建中利子や維持管理費を含む発電原価を算出した。算出した発電原価を基にした地熱サイトの順位表を下記に示した。

地熱発電以外の各種発電タイプの経済性を比較する目的で発電原価を算出した。発電原価には建設費、建中金利および維持管理費が含まれる。

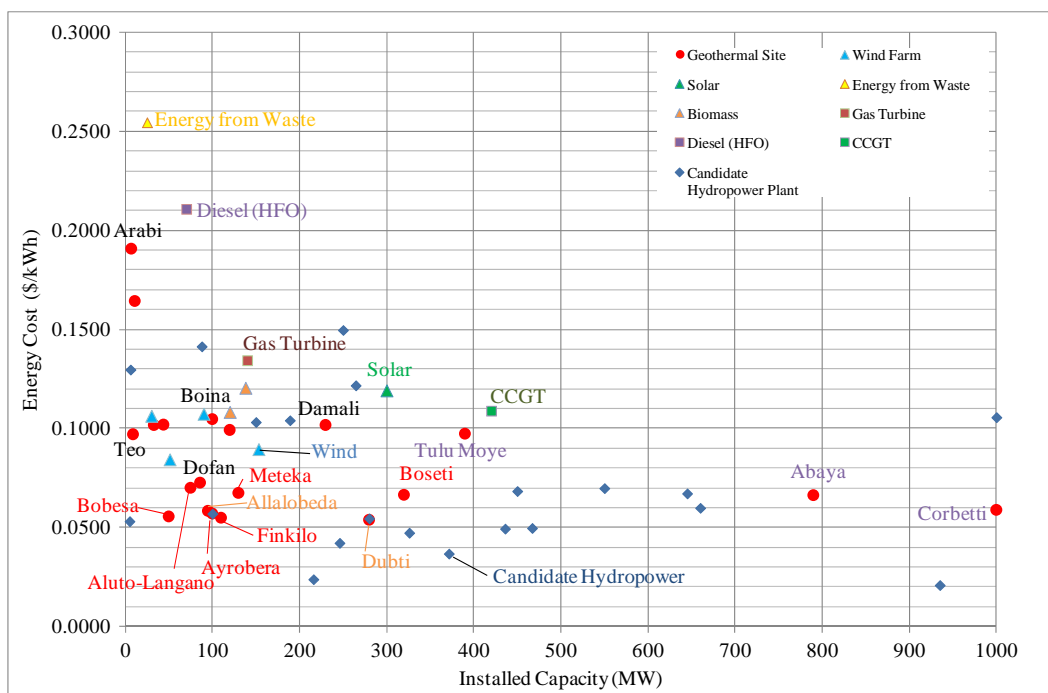
図 5.1 に地熱発電所と水力発電所および他の発電タイプの発電所の発電原価を示した。一般に水力発電所の発電原価の方が地熱発電所より低いとされているが、発電原価が廉価の地熱発電所はの同等の設備容量の候補水力発電所より経済的であることが判明した。

また、最少コストの観点からの他の再生可能エネルギーとの比較でも、開発優先度が高い地熱発電は風力や太陽光より発電原価が廉価である。さらに、発電原価が約 10 ¢/kWh の地熱発電所は、風力や太陽光発電とほぼ同等であり、ガス・タービンやディーゼルより廉価である。このため、EEPCo の計画に示されている他再生可能エネルギー等に優先して一部の地熱発電所の建設を優先すべきと判断した。

表 5.3 発電原価による地熱発電所の順位

Ranking Order	Geothermal Site	Installed Capacity (MW)	Energy Cost (\$/kWh)	Temperature Class	Remarks
1	Tendaho-1(Dubti)	280	0.0538	A	Shallow reservoir is committed.
2	Aluto-2 (Finkilo)	110	0.0549	A	
3	Aluto-3 (Bobesa)	50	0.0556	A	
4	Tendaho-2 (Ayrobera)	100	0.0570	A	
5	Tendaho-3 (AllaloBeda)	120	0.0584	A	Committed site
6	Corbetti	1,000	0.0589	B	Committed site
7	Abaya	790	0.0663	B	
8	Boseti	320	0.0665	B	
9	Meteka	130	0.0674	B	
10	Aluto-1 (Langano)	75	0.0700	A	Committed site
11	Dofan	86	0.0726	B	
12	Teo	9	0.0971	B	
13	Tulu Moye	390	0.0974	C	
14	Fantale	120	0.0992	C	
15	Nazareth	33	0.1017	C	
16	Damali	230	0.1017	C	
17	Dallol	44	0.1019	B	
18	Boina	100	0.1047	C	
19	Danab	11	0.1643	B	
20	Arabi	7	0.1907	C	
-	Gedemsa	37	-	D	Low temperature
-	Kone	14	-	D	Low temperature

出典: 調査団



出典: 調査団

図 5.1 地熱、水力および他の発電形式による発電原価

(ii) 経済的妥当性

経済的妥当性は経済的内部収益率(EIRR: Economic Internal Rate of Return)で検証した。

18 サイトのうち 16 サイトで EIRR はハードルレート 10%を超えており、これらの地熱発電所に投資することは経済的に妥当である。一方、Danab と Arabi の 2つのサイトは 10%を下回っており、

経済的にみて投資は妥当ではない。

表 5.4 地熱発電所優先順位および EIRR

Ranking Order	Geothermal Site	Installed Capacity (MW)	Energy Cost (\$/kWh)	EIRR (%)
1	Tendaho-1(Dubti)	280	0.0538	33.9
2	Aluto-2 (Finkilo)	110	0.0549	33.6
3	Aluto-3 (Bobesa)	50	0.0556	32.3
4	Tendaho-2 (Ayrobera)	100	0.0570	32.3
5	Tendaho-3 (AllaloBeda)	120	0.0584	30.9
6	Corbetti	1,000	0.0589	-
7	Abaya	790	0.0663	26.7
8	Boseti	320	0.0665	26.7
9	Meteka	130	0.0674	26.4
10	Aluto-1 (Langano)	75	0.0700	-
11	Dofan	86	0.0726	24.3
12	Teo	9	0.0971	18.2
13	Tulu Moye	390	0.0974	16.2
14	Fantale	120	0.0992	16.0
15	Nazareth	33	0.1017	15.6
16	Damali	230	0.1017	15.5
17	Dalol	44	0.1019	25.5
18	Boina	100	0.1047	15.2
19	Danab	11	0.1643	9.5
20	Arabi	7	0.1907	7.9
-	Gedemsa	37	-	-
-	Kone	14	-	-

出典: 調査団

e) 地域特殊要素

環境社会影響

本調査で行った環境社会配慮に関する現地調査では、対象サイト Dofan 地熱サイトにおいて地域住民間の問題の可能性が指摘された。従い、同じ経済性のグループの中では下位に順位付けた。

サイトまでのアクセス

サイトまでの必要なアクセス道路の土木工事費用を算出し、上述した建設費の準備工として見積もった。結果、遠隔地に位置する Damali や Danab 等の地熱サイトは発電原価による順位が低下した。

5.2.2 地熱有望サイトの優先順位

前項で述べた多基準分析の結果、優先順位は表 5.5 の様になった。

表 5.5 地熱有望サイトの優先順位

Ranking Order	Geothermal Site	Installed Capacity (MW)	Remarks	
Priority-S: Committed Project			COD	Donor
S	Tendaho-3 (Allalo Beda)	25	2017	WB
S	Corbetti	500	2018	RG
S	Aluto-1 (Langano)	70	2018	Japan/WB
S	Tendaho-1 (Dubti)-Shallow reservoir	10	2018	AFD
Priority-A: Very High Economy			Energy Cost (US\$/kWh)	
1	Tendaho-1 (Dubti)-Deep reservoir	270	0.0538	Deep reservoir
2	Aluto-2 (Finkilo)	110	0.0549	
3	Aluto-3 (Bobesa)	50	0.0556	
4	Tendaho-2 (Ayrobera)	100	0.0570	
5	Tendaho-3 (Allalo Beda)	95	0.0584	Expantion
Priority-B: High Economy			Energy Cost (US\$/kWh)	
6	Abaya	790	0.0663	RG has license
7	Boseti	320	0.0665	
8	Meteka	130	0.0674	
Priority-C: Low Economy			Energy Cost (US\$/kWh)	
9	Teo	9	0.0971	
10	Tulu Moye	390	0.0974	RG has license
11	Nazareth	33	0.1017	
12	Damali	230	0.1017	
13	Boina	100	0.1047	
14	Dofan	86	0.0726	Conflict with residents
15	Dallol	44	0.1019	Difficult due to low pH
Priority-D: Less Feasible			Energy Cost (US\$/kWh)	
16	Danab	11	0.1643	Poor access
17	Arabi	7	0.1907	Poor access
D	Gedemsa	37	-	Low temperature
D	Kone	14	-	Low temperature
D	Fantale	120	-	Overlapped with national park

出典: 調査団

5.2.3 実施計画

a) 地熱発電建設サイクル

発電を開始するまでの地熱発電所の開発は、予備調査、探査、試掘、F/S、環境影響評価、坑井およびプラント設計、削井、プラント建設、運転開始/試運転の 9 つの段階からなる。本計画では、これを最短の 6 年で達成することを仮定した。

b) 実施計画

本マスタープラン調査により、全てのサイトで予備調査が終了しているとみなせる。またいくつかの地区では、MT/TEM 探査や調査井掘削が既に実施・計画されている。鉱区によって予備調査や探査が省略可能なケースを考慮し、上記のモデルケースを基に開発計画を下記のように検討した。

長期計画 (2026 – 2037 年)

長期計画期間では、ほとんどの水力発電資源が開発されていることが予想される。また 2030 年代には電力需要が 20,000 MW を超えるため、より多くの地熱資源の開発が期待される。本マスタープランでは、2037 年までにすべての地熱資源を開発する計画とした。従い、期内で 1,100 MW の開発、合計約 4,100 M の開発を計画する。

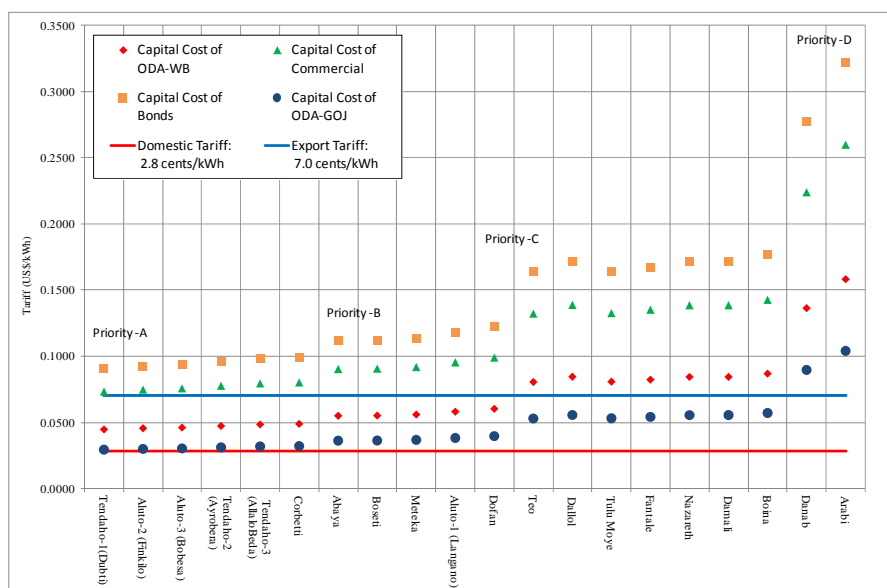
5.2.4 地熱発電開発における財務的考察

エチオピア国における電気料金は平均で約 3 ¢/kWh、また周辺国への電力輸出は約 7 ¢/kWh である。資金調達条件、条件ごとの発電単価および現行の平均電気料金との比較を検討した結果、地熱発電所の事業費は、世銀や日本政府の円借款あるいは同等程度の条件での資金調達を実施する必要があると結論できる。

表 5.7 資金調達条件

Item	Capital Cost of ODA-WB	Capital Cost of ODA-GOJ	Capital Cost of Commercial	Capital Cost of Bonds
Interest (%)	5	3	6	5
Economic life (year)	20	30	10	7

出典: IDA



出典: 調査団

図 5.2 電気料金と資金調達条件による発電原価

5.2.5 実施体制

(1) 電気料金水準と地熱開発実施体制

前節では、エチオピア国で地熱発電開発を実施する場合は我が国円借款や世界銀行からの融資で資金調達をする必要があると結論した。従い、地熱発電開発事業はこれらの融資が受けられる機関、すなわち公的機関が担当する必要があると結論される。

同様の結論は IFC が行った分析結果からも導くことができる。IFC の分析は、完全公営モデルを除いて、民間企業が蒸気生産事業と発電事業を一体となって行う事業形態が結論の前提となっている。国内向けの電力供給には完全公営モデル、電力輸出が可能なサイトではモデル C または D が可能である。エチオピア国が、国内のベース電源は季節変動が少ない地熱発電で確保し、季節変動などがある水力発電からの余剰電力は輸出するという政策を選択すれば、現行の電力料金施策では完全公営モデルが選択肢となると判断される。いずれにせよ、電力料金施策のもとでは、少なくとも試掘までは公的資金によって実施しなければならない。

	Preliminary Survey	Exploration	Test drilling	F/S & planning	Field development	Plant construction	Operation		Tariff (\$/kWh)	Remarks			
							Field	Plant					
A	Public	Private									0.15	Corebetti	
B	Public		Private									0.13	
C	Public			Private								0.10	
D	Public					Private					0.05	Tendaho	
Full Public	Public										0.03	Aluto Langanjo	

(Source: IFC 2014)

出典：調査団

図 5.3 料金水準ごとの PPP(官民連携)モデル

(2) 想定される地熱開発担当組織の参入段階のオプション分析

現行料金水準のもとで地熱発電開発が可能となるビジネスモデルは、モデル C とモデル D 及び完全公的資金モデルである。地熱開発先進各国でも、初期調査の段階では公的機関が担当している例が多い。図 5.4 にこれらのモデルで可能なバリューチェーンのオプションを示し、現状のエチオピア国に適用可能なオプションを分析した。なお、このオプションでは、蒸気生産と発電を別事業体とする場合も含めた。分析の結果、現存の GSE と EEP を統合して、下記のような新組織を創設することを提案した。

- 既存地熱開発関連組織である鉱山省 GSE の地熱開発関係部と水資源エネルギー省管轄下の EEP の地熱開発関係部を統合する。
- 新組織が分掌する業務は、初期地熱開発調査から試掘、生産井建設運営、及び蒸気生産販売とする。ただし、各段階での民間の参入を妨げないものとする。
- 統合した新組織が分掌する地熱開発は、発電事業を主目的とするので水資源エネルギー省管轄とする。
- 新組織は収益で持続性を維持する公社 (Enterprise) とし、収益の柱を蒸気生産販売とする。

Development Stage	Early				Middle	Late		Off-taker	Notes
	Preliminary Survey	Exploration	Test Drilling	F/S, Planning	Field Development	Power Plant Construction	Operation	EEP	
Business Model-C	C1	GSE (or New Enterprise)		Private	Power Plant: Private Steam: Private	EEP	-		
	C2	GSE (or New Enterprise)		Private	Power Plant: EEP Steam: Private	EEP	-		
Business Model-D	D1	GSE	GSE(*)	Power Plant: Private Steam: GSE(*)	EEP	(*)GSE is not in charge of Field development and/or Steam sales			
	D2	GSE	EEP	Power Plant: Private Steam: EEP	EEP	-			
	D3	EEP(*)	EEP	Power Plant: Private Steam: EEP	EEP	(*) EEP is not in charge of exploration			
	D4	New Enterprise			Power Plant: Private or EEP Steam: New E.	EEP	-		
Fully Public Model	FPc-1	GSE	GSE(*)	Power Plant: EEP Steam: GSE(*)	EEP	(*)GSE is not in charge of Field development and/or Steam sales			
	FPc-2	GSE	EEP	Power Plant: EEP Steam: EEP	EEP	<i>Present Aluto Langano Project</i>			
	FPc-3	EEP(*)	EEP	Power Plant: EEP Steam: EEP	EEP	(*) EEP is not in charge of exploration.			
					or EEP Steam: New E.				
	FPc-5	New Enterprise			Power Plant: New Steam: New E.	EEP	-		

D1, D3, FPc1, FRC Amendment of regulations for GSE and EEP is required (D1, D3, FPc-1, FPc-3)

D2, FPc3 EEP Capacity for geothermal development shall be enhanced, GSE and EEP shall be well coordinated (D2, FPc-2)

D4, FPc-4, FPc-5 In Model-D, FPc-4 and FPc-5, the New Enterprize will undertake steam production and sales.

C1, C2 In Model C1 and C2, the New Enterprize may handle the work upto Test Drilling

出典：調査団

図 5.4 地熱電力開発バリューチェーンの官民連携モデル

5.3 地熱直接利用

5.3.1 エチオピア国の地熱直接利用の現況

エチオピア国では、温泉や蒸気を利用した宿泊施設、温浴施設が運営されている。以下に各調査地点の特徴を記述する（表 5.8）。

表 5.8 エチオピア国 地熱直接利用

	サイト名	直接利用
1	Gedemsa (Hippo Pool)	湧出温泉を引き込んだ温浴施設が設置され、地域住民が湯治に使用している。
2	Nazareth (Boku)	蒸気の噴出口に蒸気浴用の小部屋が建設されている。近傍には宿泊施設が建設・運営されておりエリア全体が湯治施設（#トリム）として整備されている。
3	Nazareth (Sodole)	温泉湧出地を含む地域全体が観光施設となっており、プール、温浴施設が設置され、レストラン、宿泊施設が整備されている。
4	Boseti (Kintano)	蒸気の噴出口が石垣で囲われ、蒸気浴のための施設となっている
5	Meteka	湧出温泉を引き込んだ温浴施設が設置され、地域住民が湯治に使用している。
6	Aluto-2 (Bobessa), (Gebiba)	噴気孔に枯木を置いて水蒸気を冷やし、水を採取している。

出典：調査団

5.3.2 エチオピア国における地熱の直接利用の提案

本調査で観察した地熱サイト周辺の状況、および同国における地熱利用の状況から、地熱の直接利用を表 5.9 の通り提案する。

表 5.9 エチオピア国における地熱直接利用の提案

直接利用の項目	内容	適用条件	対象地域
施設・園芸	<ul style="list-style-type: none"> 切花の栽培（温室栽培：輸出用） 	<ul style="list-style-type: none"> 適切な栽培水の採取・使用が容易な地域（効果：恒温保持、栽培水滅菌、CO2による光合成促進） 	<ul style="list-style-type: none"> Ziway 湖周辺（Aluto-Langano, Tulu Moye）
養殖・漁業	<ul style="list-style-type: none"> エビ・淡水魚の養殖（輸出用） 	<ul style="list-style-type: none"> 適切な養殖水の採取・使用が容易な地域 	<ul style="list-style-type: none"> Ziway 湖周辺（Aluto-Langano, Tulu Moye）
農業	<ul style="list-style-type: none"> 温室でのフルーツ栽培（輸出用） 野菜栽培（国内消費） 	<ul style="list-style-type: none"> 適切な栽培水の採取 使用が容易な地域 首都圏や消費地に近い地域 	<ul style="list-style-type: none"> Ziway 湖周辺（Aluto-Langano, Tulu Moye） Nazareth 周辺
観光施設・福利厚生	<ul style="list-style-type: none"> 温泉・プール・スチームバス 	<ul style="list-style-type: none"> 地域住民の居住地に近接している地域 	<ul style="list-style-type: none"> 各地熱サイト
食品加工	<ul style="list-style-type: none"> ドライフルーツ 	<ul style="list-style-type: none"> フルーツの生産地に近い地域 	<ul style="list-style-type: none"> オロミア州・南部州の地熱サイト
	<ul style="list-style-type: none"> ヨーグルト 	<ul style="list-style-type: none"> 牛乳の生産地に近い地域 首都圏や消費地に近い地域 	<ul style="list-style-type: none"> Nazareth 周辺 Boseti 周辺
	<ul style="list-style-type: none"> コーヒー乾燥 	<ul style="list-style-type: none"> コーヒーの生産地に近い地域 	<ul style="list-style-type: none"> 各地熱地域
	<ul style="list-style-type: none"> 砂糖の乾燥 	<ul style="list-style-type: none"> 砂糖のプランテーション地域に近い地域 	<ul style="list-style-type: none"> Gedemsa 周辺 Tendaho 周辺

出典：調査団

なお、高温状態から低温状態に変化する過程で、多目的に利用すること（カスケード利用）も可能である。

6. 物理探査

6.1 目的

開発優先順位が高いと判断された2地点の地熱貯留層モデルを構築して、調査ボーリング計画に資するために物理探査を実施した。

6.2 調査対象地域の選定

選定条件は以下の通りとした。

- ✓ 有望な地熱資源の存在が推定されるサイト
- ✓ 車両でのアクセスが容易であるサイト
- ✓ 社会的・環境的課題がないか、あるいは少ないと考えられるサイト
- ✓ 他ドナーの支援と重複しないサイト

以上の条件から、Boseti と Tendaho-2(Ayrobera)を選定した。

6.3 調査方法

6.3.1 調査手法

- ✓ リモートリファレンス方式 MT 法探査
- ✓ セントラルループ方式 TEM 法探査 (MT データのスタティック補正)

6.3.2 測定点数

測定点およびリモートリファレンス地点は表 6.1 の通りである。

表 6.1 物理探査測定点およびリモートリファレンス地点

測定サイト	測定点	リモート リファレンス地点	備考
Tendaho-2 (Ayrobera)	24 点	Mille	データ解析は既存の測定点 81 点を加えて実施
Boseti	30 点	Koka	-

出典: 調査団

6.3.3 取得データ

取得データの種類は以下の通りである。

表 6.2 物理探査 取得データ

探査法	取得データ	備考
MT 法探査	時系列データ ・ 磁場 3 成分(Hx、Hy、Hz) ・ 電場 2 成分(Ex、Ey)	測定時間: 1 測定点当たり 14 時間以上
TEM 法探査	磁場 1 成分(Hz)の過渡応答データ	

出典: 調査団

6.4 調査結果

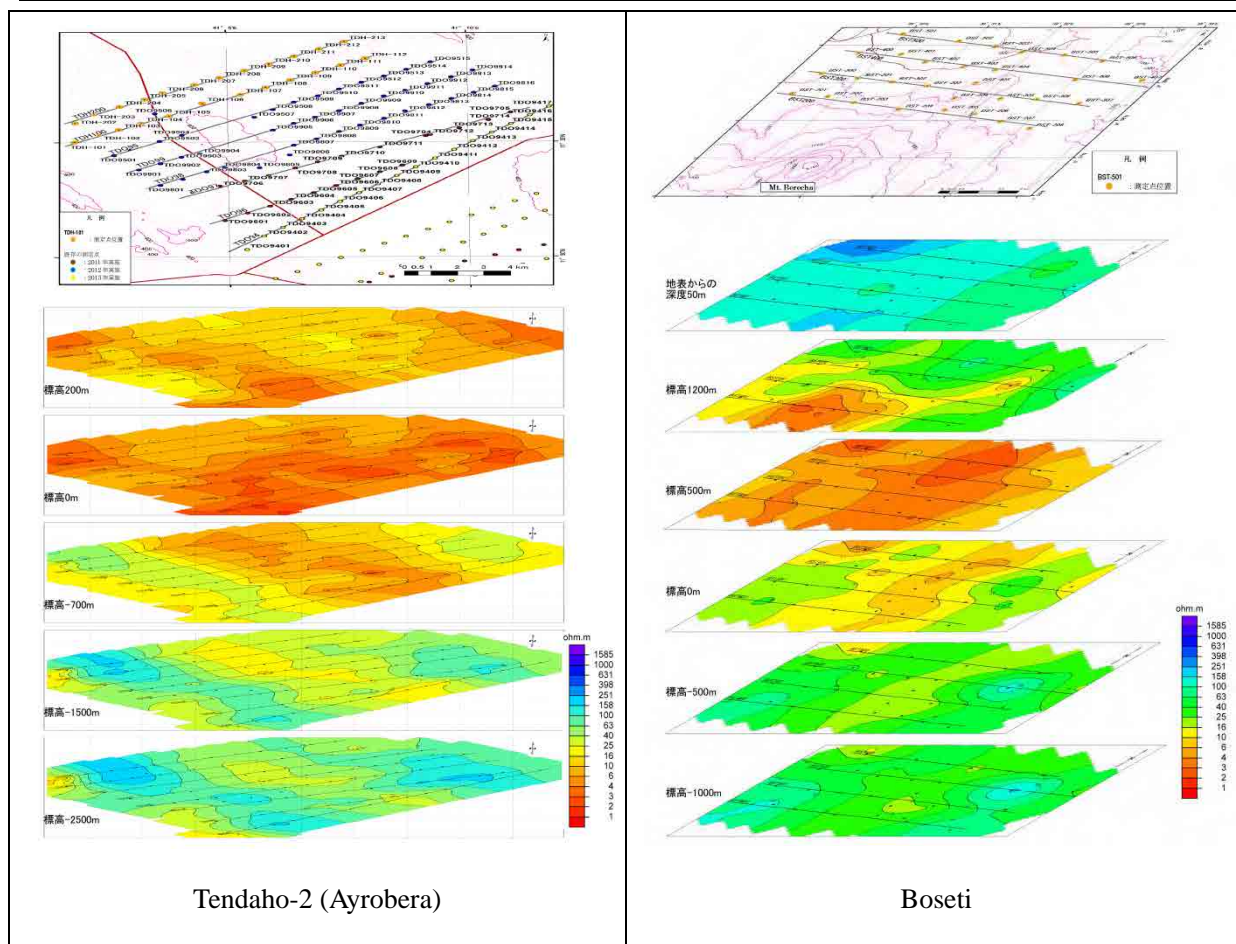
MT法/TEM法探査の結果より作成した比抵抗分布平面パネルダイヤグラムを Tendaho-2 (Ayrobera) 地区、Boseti 地区についてそれぞれ図 6.1 に示す。対象地域の比抵抗構造の特徴は以下の通りである。

6.4.1 Tendaho-2 (Ayrobera)

- ・ 比抵抗構造は地表から深部に向かって標高-5000m 程度までは、低-高-低の比抵抗変化を示し、 $1\Omega\text{m}$ から $250\Omega\text{m}$ 程度までの比抵抗が分布する。
- ・ 調査地域中央部には NW-SE 方向に低比抵抗が標高-700m から深部にかけて帯状に分布し、低比抵抗のチャンネル構造を形成し、比抵抗構造の走向として明瞭に認められる。
- ・ 低比抵抗分布で構成されるチャンネル構造とその両端の高比抵抗分布との間の比抵抗変化は急激で、比抵抗不連続構造を示唆する。
- ・ TDO97 測線付近ではチャンネル構造の幅が多少狭くなっている（比抵抗値が同一平面内のチャンネル構造部と比べ高くなっている）。この構造は標高-700m から深部にかけて顕著である。

6.4.2 Boseti

- ・ 比抵抗構造は地表から深部に向かって標高-3000m 程度までは、低-高-低の比抵抗変化を示し、 $1\Omega\text{m}$ から $600\Omega\text{m}$ 程度までの比抵抗が分布する。
- ・ 調査地域中央部には NNE-SSW 方向に低比抵抗が標高 500m から深部にかけて帯状に分布し、低比抵抗のチャンネル構造を形成し、比抵抗構造の走向として明瞭に認められる。
- ・ 低比抵抗分布で形成されるチャンネル構造とその両端の高比抵抗分布との間の比抵抗変化は比抵抗不連続構造を示唆する。
- ・ Berecha 山の北側裾野である地表の標高の高い部分の地表下には浅部から低比抵抗部が現れ、深部に続いている。この低比抵抗部と北側の高比抵抗分布との境界は、標高 1200m において比抵抗変化の大きいコントラストを示し、コンターは WNW-ESE 方向で直線的であり、比抵抗の不連続構造を示す。



出典：調査団

図 6.1 MT/TEM 探査抵抗分布平面パネルダイヤグラム

6.5 調査結果の地熱構造的解釈

6.5.1 Tendaho-2 (Ayrobera) 地熱微候サイト

2次元比抵抗構造インバージョンで得られた結果を元に、海拔 200m, 0m, -700m, -1,500m, -2,500m 毎の解析比抵抗分布平面図を作成した（図 6.2）。さらに、代表断面での解析比抵抗分布断面図も合わせて作成した（図 6.3）。図 6.2 によると、海拔 200 m と 0 m において、10 ohm-m 以下の低比抵抗帯が広く分布する。また、海拔-700m ではNW-SE 方向に低比抵抗帯が発達するがそれ以深では次第に不明瞭となる。NW-SE 方向の低比抵抗構造は、Tendaho Graben の発達方向とも整合しており、顕著に破碎を受けた地層が、その東西に分布する高比抵抗岩体と直線的に接していると考えられる

同サイトの南東約 13km に位置する Tendaho-1 (Dubti)サイトでは、1994 年から 1998 年にかけて 6 本の試掘井戸が掘削されており、地質データおよび坑井の温度データが存在する。このうち、本地域の地熱構造を把握するにあたり参考となる TD-1 と TD-2 のデータを表 6.3 に示す。

Dubti での MT 探査結果では、5 ohm-m 以下の低比抵抗帯が深度 530 m から 580 m に分布する。また、深度 450 m から 600 m で坑内温度 245 – 250 °C を記録している。この深度と温度の関係よ

り、Tendaho 地域においては 5 ohm-m を境として、上位の低比抵抗帯はキャップロック、下位の
高比抵抗帯は地熱貯留層であると推定することができる。

表 6.3 Tendaho-1 (Dubti)サイトの試掘井戸データ

変質帯区分	TD-1			TD-2		
	比抵抗値, (測定深度)	温度 (測定深度)	変質帯 該当温度., (測定深度)	比抵抗値, (測定深度)	温度 (測定深度)	変質帯 該当温度., (測定深度)
1) 上部層	高比抵抗	<150 °C	非変質帯 50-100 °C , (95 m)	高比抵抗	<150 °C	非変質帯 50-100 °C, (50 m)
2) 低比抵抗帯	<5 ohm-m, (580 m)	150 °C- 250 °C, (600 m)	粘土化帯 100-250 °C, (350 m)	<5 ohm-m (530 m)	150 °C- 245 °C (450 m)	粘土化帯 100-250 °C, (280 m)
3) 高比抵抗帯	>5 ohm-m	250 °C	緑泥石-緑れん石帯 (250-300 °C)	>5 ohm-m	245 °C	緑泥石-緑れん石 帯 (250-300 °C)

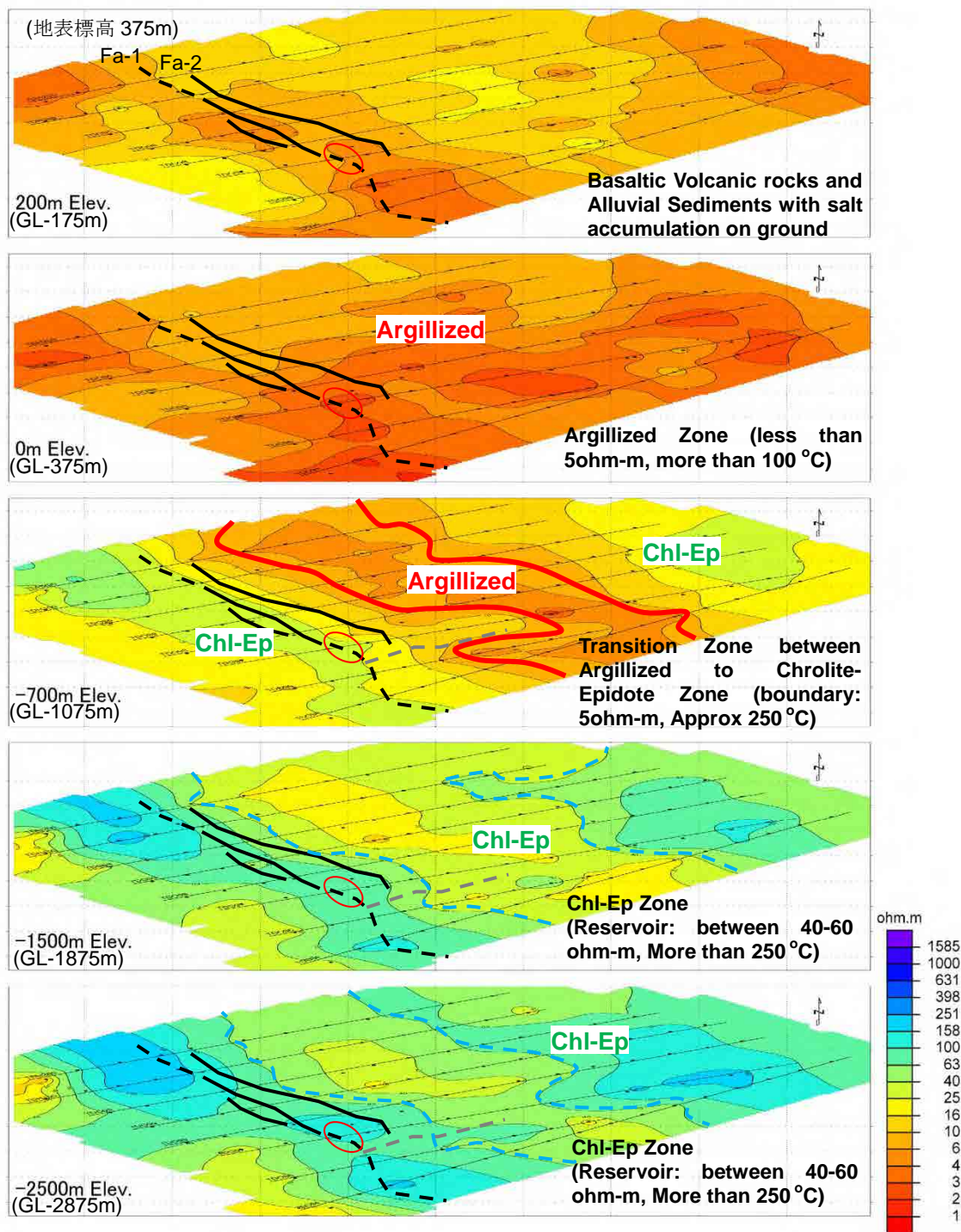
出典: Aquator (1994), Aquator (1995)をもとに調査団作成

解析比抵抗分布断面図(図 6.3)から、低比抵抗帯は断面中央部で発達しており、NW-SE 方向の断層
破砕帯の存在が示唆される。またこの破砕帯は、両側を高比抵抗岩体に囲まれ、上部を低比抵抗
帯にキャップされた地熱貯留層であると考えられる。5 ohm-m 以下の低比抵抗帯はいわゆるキャ
ップロックであり、深度 300m から 1,200m に分布する。表 6.4 に比抵抗分布に基づく各深度の推
定温度を示す。

表 6.4 比抵抗分布に基づく Tendaho-2 (Ayrobera) サイトの推定温度

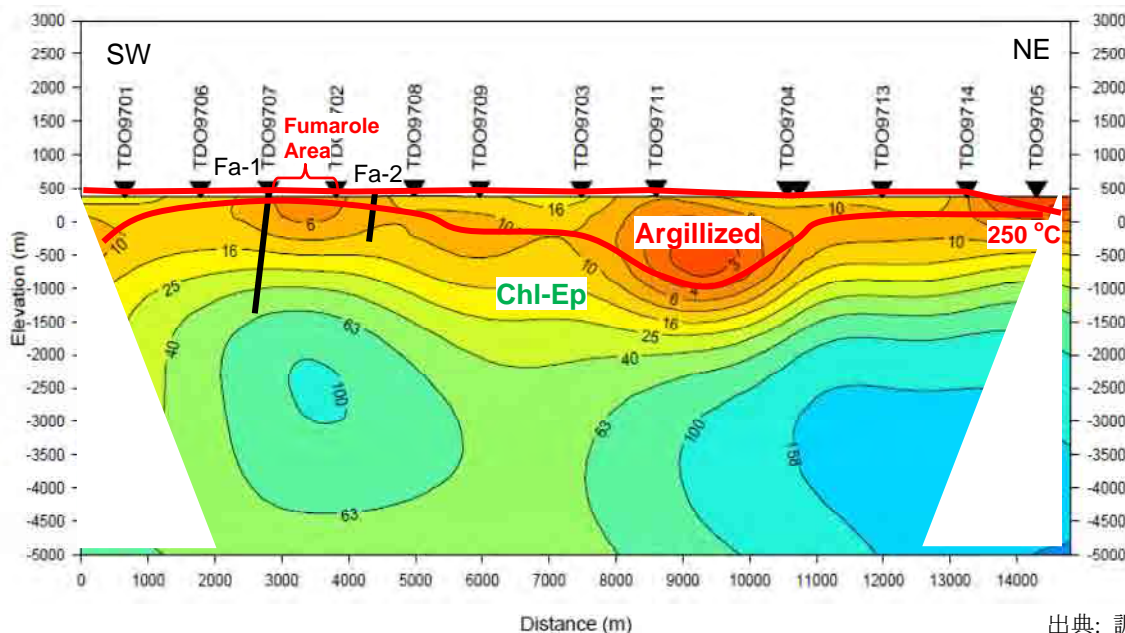
比抵抗帯	推定される深度および温度		
	比抵抗値	深度 (GL-m)	推定温度
1) 上部高比抵抗帯	10 ohm-m 以上	100 m 以浅	50-100 °C
2) 低比抵抗帯	5 ohm-m 以下	約 100-500 m	100-250 °C
3) 高比抵抗帯	5 ohm-m 以上 (約 40-60 ohm-m)	300- 1,200 m 以深	250-300 °C

出典: 調査団



出典: 調査団

図 6.2 Tendaho-2 (Ayrobera)サイト解析比抵抗分布パネルダイヤグラム



出典: 調査団

図 6.3 Tendaho-2 (Ayrobera)サイト解析比抵抗分布断面図

6.5.2. Boseti 地熱微候サイト

2次元比抵抗構造インバージョンで得られた結果を元に、海拔標高 1,200m, 500m, 0m, -500m, -1,000m 毎の解析比抵抗分布平面図(図 6.4) および WNW-SES 方向の断面図を作成した(図 6.5)。

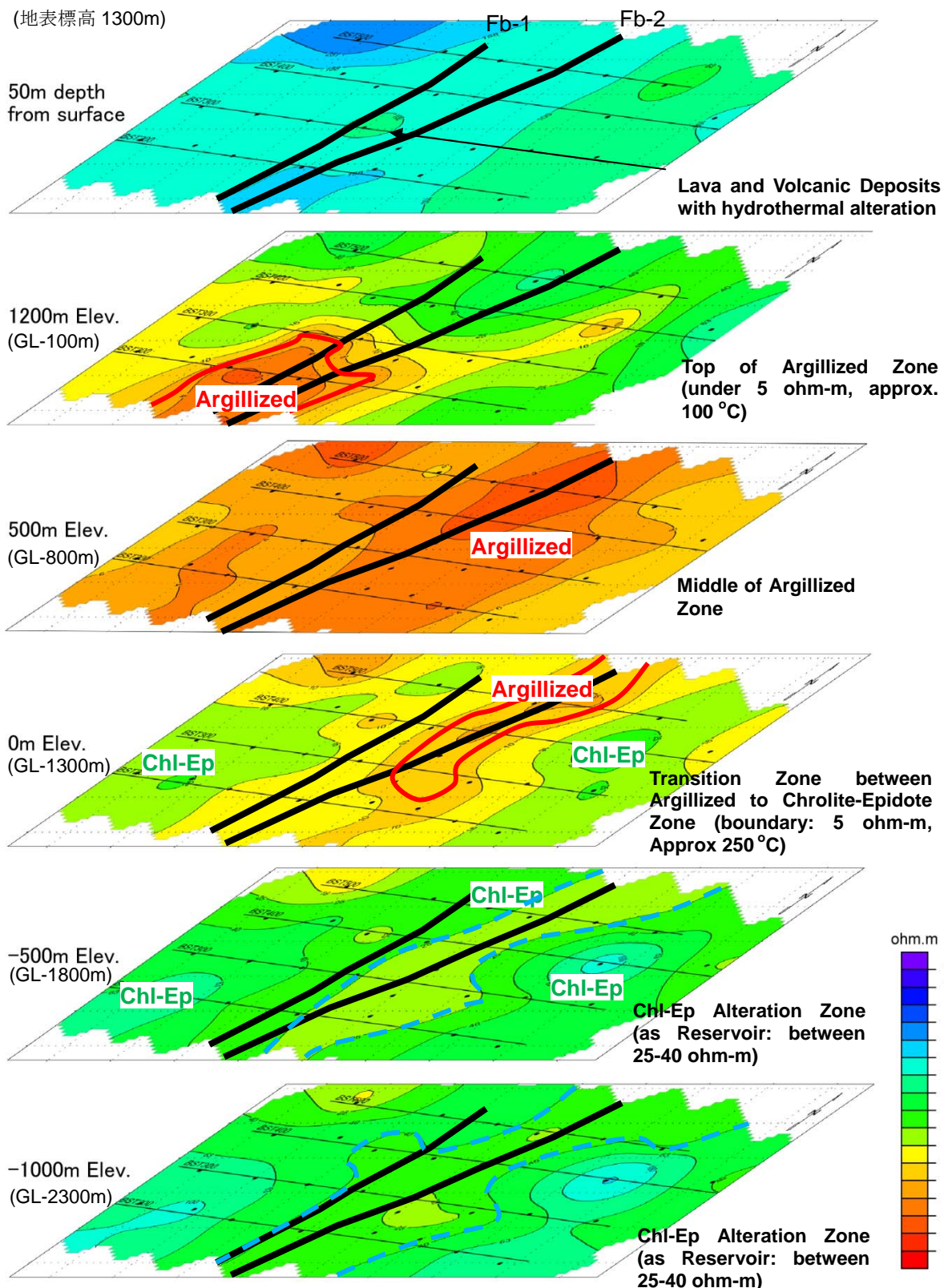
本地域の比抵抗構造は、表層付近の新しい溶岩層に対比される 100 ohm-m 以上の高比抵抗帯、海拔標高 500m に見られる 5 ohm-m 以下の低比抵抗帯、海拔標高 0m で顕著に確認される N-S 方向の低比抵抗帯とそれ以深の高比抵抗帯となっている。比抵抗構造は本地域に特徴的な NNE-SSW 方向の断層構造と調和的であり、低比抵抗帯は断層帯を示すと考えられる。

図 6.5 の断面図からは、NNE-SSW 方向の断層を示すと考えられる低比抵抗領域が深部まで広がる。標高 500m-1,000m にキャップロックを示唆する低比抵抗帯が分布し、その上位は表層の高比抵抗帯が存在する。キャップロックの深度は GL-900m (標高 400m-500m) であり、その下位には地熱貯留層が形成されていると考えられる。表 6.5 に比抵抗深度分布から推定される推定温度を示す。

表 6.5 比抵抗分布に基づく Boseti サイトの変質帯と推定温度

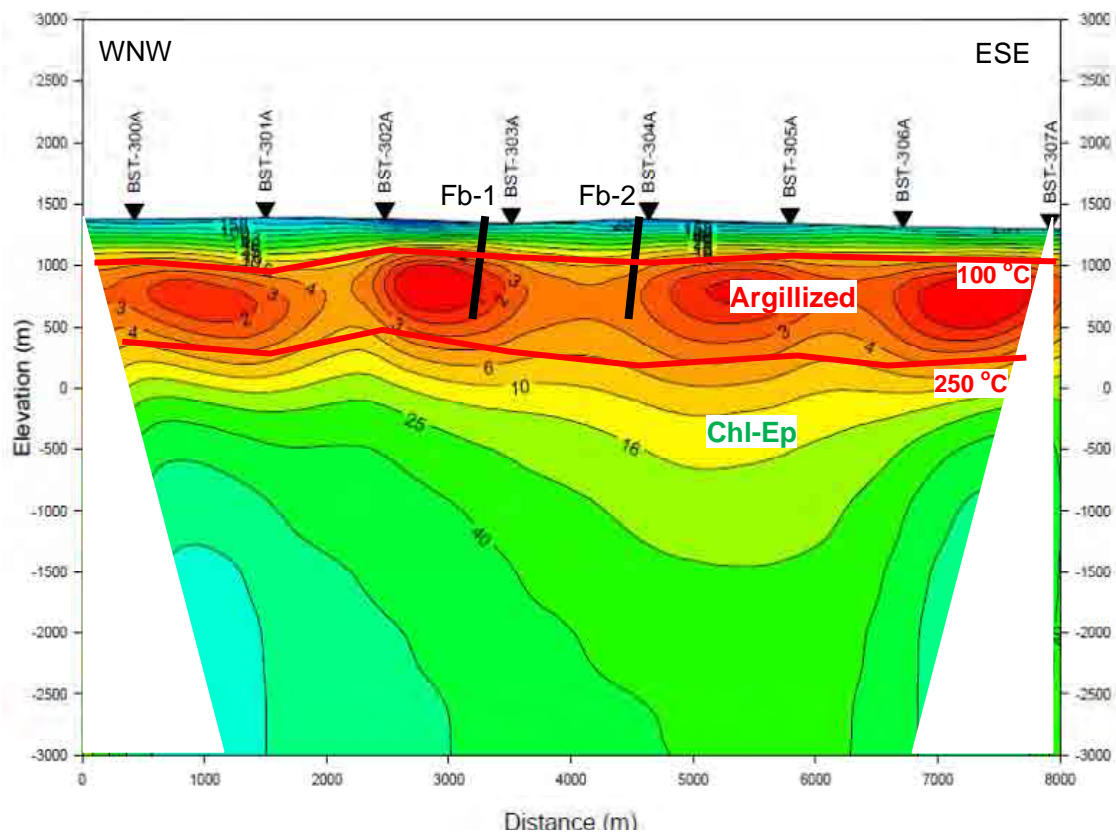
比抵抗帯	貯留層構造推定		
	比抵抗値	深度 (GL-m)	推定温度
1) 上部高比抵抗帯	5 - 150 ohm-m	300-500m 以浅	50-100 °C
2) 低比抵抗帯	5 ohm-m 以下	500 - 900m	100-250 °C
3) 高比抵抗帯	5 ohm-m 以上 (平均 25- 40 ohm-m)	800 - 900m 以深	250-300 °C

出典: 調査団



出典: 調査団

図 6.4 Boseti サイト解析比抵抗分布パネルダイアグラム



出典: 調査団

図 6.5 Boseti サイト解析比抵抗分布断面図

7. 概略貯留層モデルの構築と試掘井ターゲットの提案

7.1 Tendaho-2 (Ayrobera)地熱徴候サイト

7.1.1 調査結果の地熱構造的解釈

Tendaho-2 (Ayrobera)サイトの地熱貯留層モデルを想定するために必要な地形データや地質調査結果、地化学分析結果およびMT/TEM 探査結果は表 7.1 のとおりとなる。

表 7.1 地表調査結果（地質・地化学・物理探査）から得られる地熱構造

項目	記事																
地質	文献 衛星写真 地質概査	<ul style="list-style-type: none"> Manda-Harraro 地溝帯に位置する。 基盤は Pliocene-Pleistocene の Afar Stratoid からなり、玄武岩溶岩・火砕岩と堆積岩（細粒砂岩—シルト岩）が分布する。調査地の南西では、Pleistocene の Recent basalt の割れ目噴火による溶岩流が見られる。 Ayrobera 周辺では、これらを沖積層が覆い、平原を形成する。 															
	坑井	<ul style="list-style-type: none"> 約 12km 南方の Dubti (Tendaho-3) に 6 本の既存坑井が存在する。 これら坑井では、深度約 50m ~ 350m で熱水変質粘土、以深では緑泥石-緑れん石が確認されている。前者はキャップロック、後者は高温貯留層を形成している。 <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <thead> <tr> <th>坑井</th> <th>流量</th> <th>流体温度</th> <th>深度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TD-2</td> <td>13kg/s, 46.8t/h</td> <td>220°C</td> <td>890m</td> </tr> <tr> <td>TD-4</td> <td>70kg/s, 252t/h</td> <td>216°C</td> <td>250m</td> </tr> <tr> <td>TD-1</td> <td>Very low</td> <td>270°C</td> <td>880-900m 1190-1265m</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> 調査地南西約 7km の TD-4 坑井では、深度 2,000m 付近までは玄武岩を挟む堆積岩層が、これ以深では玄武岩の溶岩・火山砕屑岩が確認されている。 	坑井	流量	流体温度	深度	TD-2	13kg/s, 46.8t/h	220°C	890m	TD-4	70kg/s, 252t/h	216°C	250m	TD-1	Very low	270°C
坑井	流量	流体温度	深度														
TD-2	13kg/s, 46.8t/h	220°C	890m														
TD-4	70kg/s, 252t/h	216°C	250m														
TD-1	Very low	270°C	880-900m 1190-1265m														
断裂系	文献 衛星写真 地質概査	<ul style="list-style-type: none"> 引張応力場にあり、地溝帯の方向に沿った NW-SE 方向の正断層帯および断裂帯が多数存在している。 サイトの南西部に拡大軸があり、SW 方向に傾斜する高角度の断層が発達する。 															
	物理探査	<ul style="list-style-type: none"> MT/TEM 探査結果では、対象サイトの中央部に NW-SE 方向の低比抵抗帯が、深度 700m から 2,500m に確認される。 重力探査結果では、上記低比抵抗帯を境界として高重力帯（北東）と低重力帯（南西）が分布する。 磁気探査結果では、上記低比抵抗帯を境界として高磁力帯（北東）と低磁力帯（南西）が分布する。（Yohannes L., 2007） 既存坑井 TD-4 から、南西の低重力-低磁力帯は堆積岩が厚く分布している地域と解釈される。 MT/TEM 探査で得られた比抵抗帯の分布域は、重力探査および磁気探査で現れた高→低の遷移帯の分布域とほぼ一致していることから、断層帯と推定される。 															
熱源	物理探査	<ul style="list-style-type: none"> 深度 4,000m 程度から比抵抗値の低下傾向がみられ、玄武岩マグマの貫入による温度上昇域の可能性はある。 															
流体	衛星写真 /地形	<ul style="list-style-type: none"> アワシユ川からの涵養および北方の湿地帯からの涵養が想定される。 															
	地化学	<ul style="list-style-type: none"> 99.3°Cの噴気が確認される（南西地域）。 想定される地化学温度（シリカ温度）は 240-290°C である。 															
	坑井	<ul style="list-style-type: none"> Tendaho-3 (Dubti)での既存坑井(TD-2)では 1.8t/h (13kg/s)、220 °C の流体自噴が確認されている(DAmore et al., 1997)。 															
キャップ ロック	物理探査	<ul style="list-style-type: none"> 5ohm-m 以下の低比抵抗帯が深度 100m ~ 500 m に分布する。これらがキャップロックに相当すると考えられる。 															
	坑井	<ul style="list-style-type: none"> Tendaho-3(Dubti)の既存坑井では、深度約 50m~約 350m で、2次鉱物として粘土鉱物および沸石類が確認されている。 この2次鉱物の出現深度は約 5 ohm-m 以下の低比抵抗帯と対応する。 															

出典：調査団

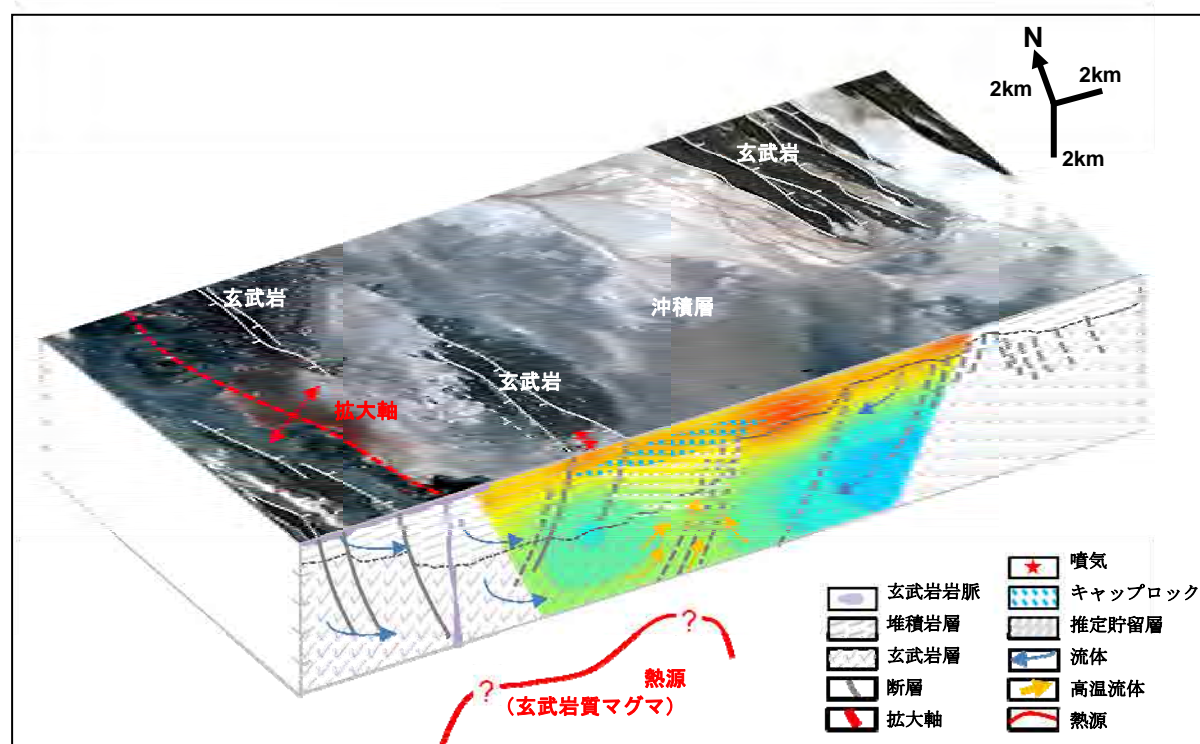
7.1.2 地熱貯留層概念モデル

上記の情報から示される Tendaho-2 (Ayrobera)サイトの地熱貯留層概念モデルの特徴を表 7.2 に、概念図を図 7.1 および図 7.2 に示した。

表 7.2 貯留層概念モデル

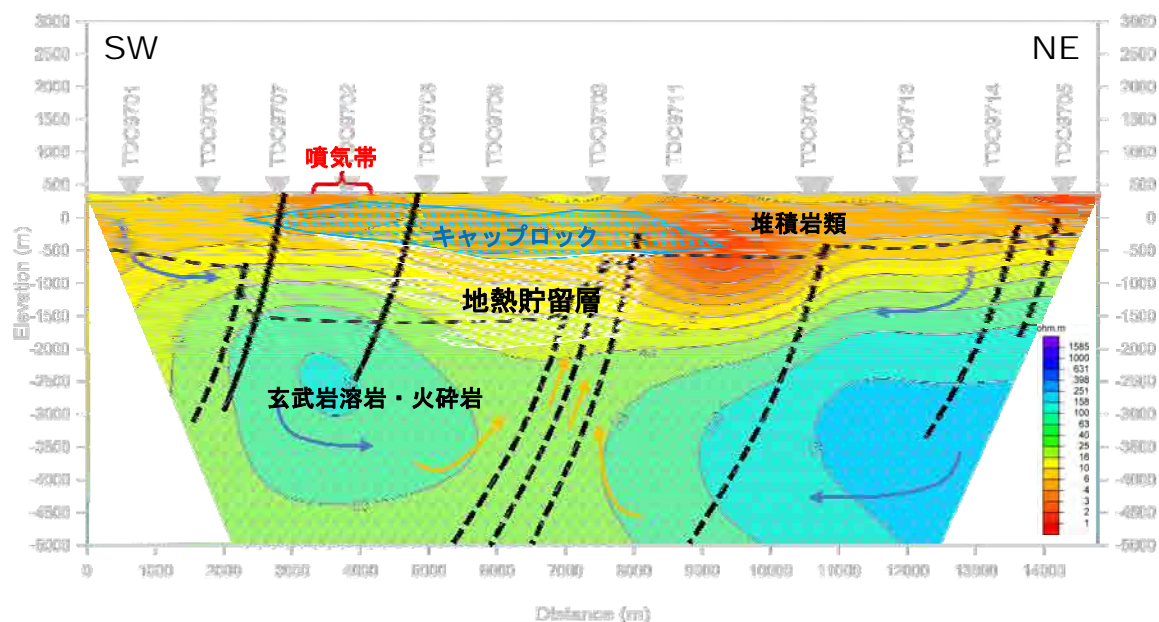
項目	内容
貯留層	貯留層は空隙に富む玄武岩および砂岩と考えられる。貯留層の北東縁は玄武岩中の断層帯により明瞭に介され、南西縁は堆積岩中の砂岩層に沿って、細長く何層も分布すると考えられる。キャップロックとして粘土化した変質玄武岩と、細粒砂岩・シルト岩の存在が推定される。
流体	流体はアワシユ川からおよび地表から涵養され、断層帯に規制されて対流している。調査地域中央部で断層帯に沿った上昇域を形成する。
熱源	深度 5-6km 以深に分布する玄武岩質マグマと推定される。

出典: 調査団



出典: 調査団

図 7.1 Tendaho-2 (Ayrobera)サイト貯留層概念モデル



出典: 調査団

図 7.2 Tendaho-2 (Ayrobera)サイト貯留層概念モデル断面

7.1.2 試掘ターゲットの選定

前述の貯留層概念モデルから、調査地域のほぼ中央部に北西-南東方向の高温対流域（低比抵抗帯）と、噴気帯周辺の断層帯の貯留層への連続が推定される。これら想定される高温対流域や断層帯に達するためには、深度 2,000m の試掘井が必要と考えられる。現時点で想定される試掘ターゲット、試掘井の諸元を表 7.3、表 7.4 および図 7.3、図 7.4 に示す。

表 7.3 試掘ターゲット (案)

ターゲット・エリア	断層帯との関係/ターゲット掘削の目的	掘削方法
AY-1 エリア	貯留層 (断層帯) 中心	傾斜掘削
AY-2 エリア	貯留層 (断層帯) 中心	垂直掘削
AY-3 エリア	噴気帯	垂直掘削

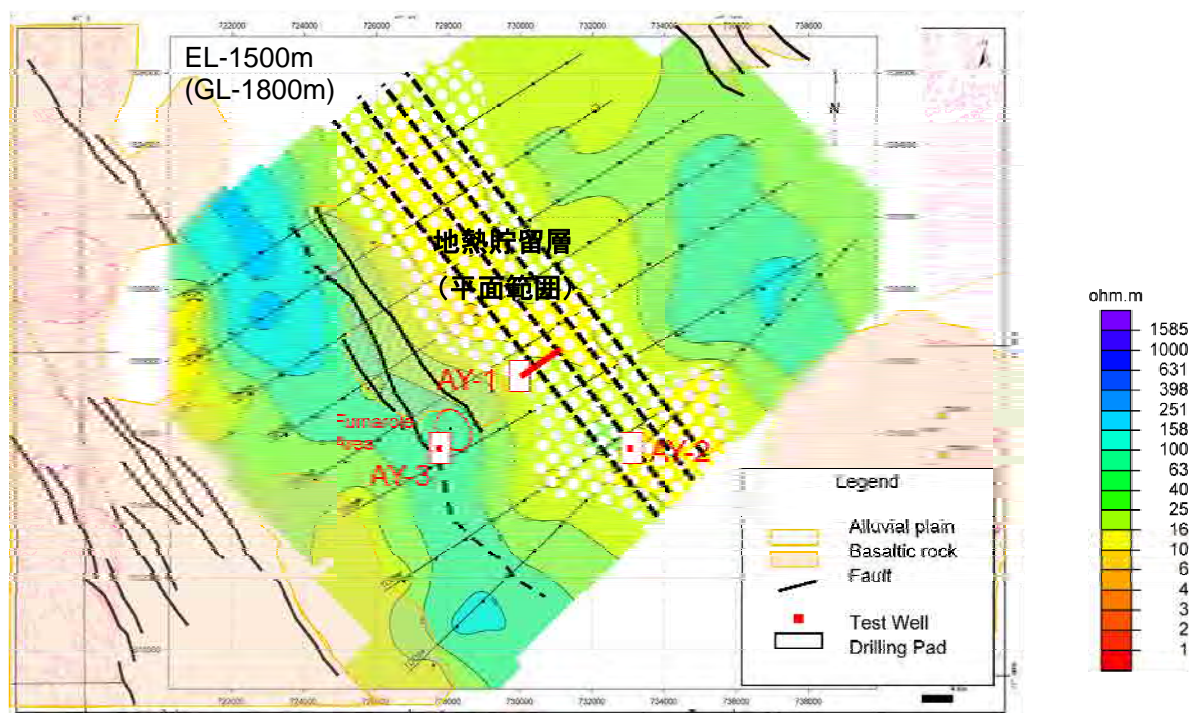
出典: 調査団

表 7.4 試掘井掘削計画 (案)

坑井番号 項目	AY 1	AY 2	AY 3
ターゲット概要	NW-SE 方向の断層破碎帯	NW-SE 方向の断層破碎帯	NW-SE 方向の断層破碎帯
坑口からのターゲット位置	掘削方向: N 57° E, 垂直深度: 1,840 m 坑井偏距: 600 m	垂直深度: 2,000 m	垂直深度: 2,000 m
掘削方法	傾斜掘削	垂直掘削	垂直掘削
ターゲット深度(m)	1,000 m-1,840 m	1,500 m-2,000 m	1,500 m-2,000 m
ターゲットにおける推定温度	約 250-300 °C	約 250-300 °C	約 250-300 °C
KOP	800 m	-	-
坑井深度	2,000 m	2,000 m	2,000 m

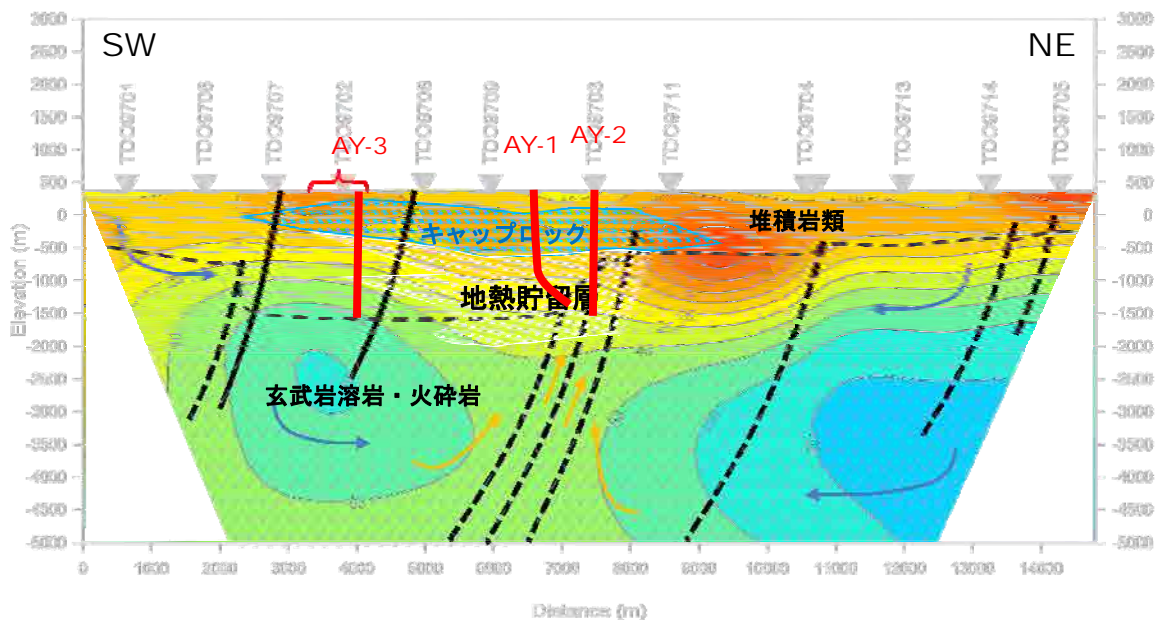
KOP: 傾斜掘開始地点(Kick-Off Point)

出典: 調査団



出典: 調査団

図 7.3 Tendaho-2 (Ayrobera)サイトの試掘井掘削計画平面図



出典: 調査団

図 7.4 Tendaho-2 (Ayrobera)サイトの試掘井掘削計画断面図

7.2 Boseti 地熱徴候サイト

7.2.1 調査結果の地熱構造的解釈

Boseti サイトの地熱貯留層モデルを想定するために必要な地形データや地質調査結果、地化学分析結果および MT/TEM 探査結果は表 7.5 のとおりとなる。

表 7.5 地表調査結果（地質・地化学・物理探査）から得られる地熱構造

項目		記事
地質	地質	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鮮新-更新世の Nazreth 層群に属する玄武岩-流紋岩溶岩・火砕岩と堆積岩（礫岩-砂岩）からなる。 ・ Boseti 火山、Boseti 北方の表層に見られる玄武岩溶岩、および Boseti 火山の噴出物である黒曜岩は、Nazreth 層群の上位に不整合で重なる Wonji 層群（更新世）に区分される。
断裂系	衛星写真地質	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大地溝帯の方向に沿った NNE-SSW 方向の正断層帯が多数発達している。
	物理探査	<ul style="list-style-type: none"> ・ 対象サイトの中央部に NNE-SSW 方向の低比抵抗帯が、深度 800m から 2,300m に確認される。 ・ この低比抵抗帯の方向は地表での断層帯の方向と一致する。
熱源	地質	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中央部に確認される NNE-SSW 方向の断層(Fb-2)に沿って溶岩が上昇・噴出したことが地形解析結果から判読される(Korme et al., 1997)。
	重力探査	<ul style="list-style-type: none"> ・ Boseti 火山の下部深度約 2,000m に高密度帯の存在が推定され、貫入岩体と考えられる。(D.G. Cornwell et al., 2006)
流体	地化学	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地熱徴候として噴気が NNE-SSW 方向の断層にそって確認される。 ・ 想定される地下温度は約 170-220°C（クラス C）。
キャップロック	物理探査	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5ohm-m 以下の低比抵抗帯が深度 800m～900m に分布する。これらがキャップロックに相当すると考えられる。

出典: 調査団

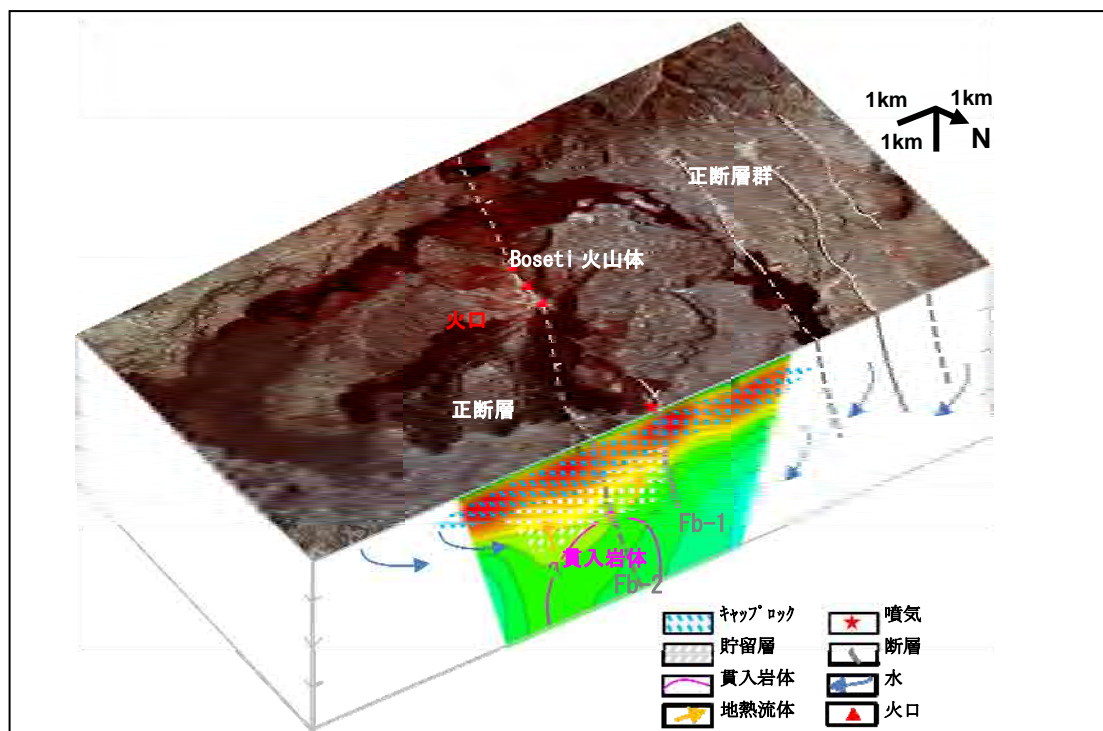
7.2.2 地熱貯留層概念モデル

上記の情報から示される Boseti サイトの地熱貯留層概念モデルの特徴を表 7.6 に、概念図を図 7.5 および図 7.6 に示した。

表 7.6 貯留層概念モデル

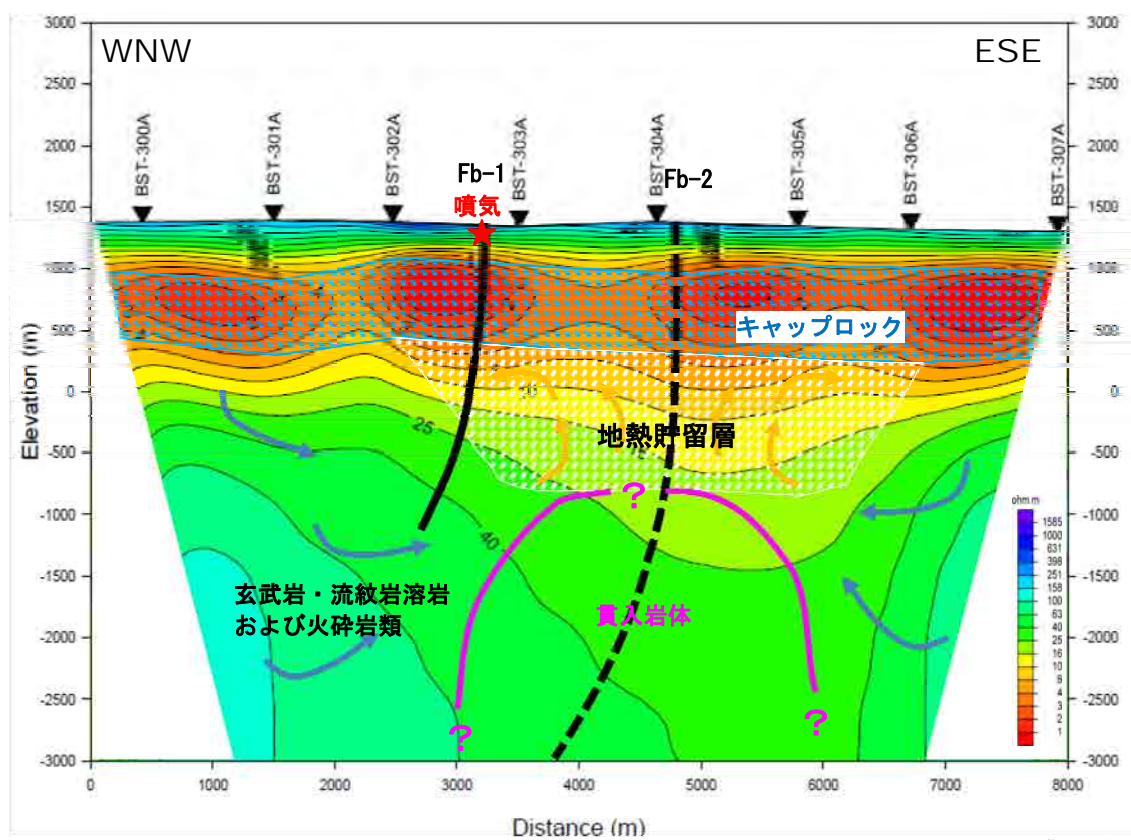
項目	内容
貯留層	貯留層は調査地域中央部に位置する NNE-SSW 方向の深部断層に沿った玄武岩および流紋岩質火山岩類、および堆積岩が推定される。貯留層の両側は亀裂が少なく、高角度の断層、断層等で規制されていると考えられる。キャップロックとして、玄武岩および流紋岩質火山岩類が変質した変質粘土化帯の存在が推定される。
流体	地表、および Nazreth 層群中に存在する帯水層からの供給が考えられる。断層帯に規制されて対流しており、調査地域中央部で上昇域を形成する。
熱源	深度約 2,000m に存在する、NNE-SSW に伸びた貫入岩体が想定される。

出典: 調査団



出典: 調査団

図 7.5 Boseti サイト地熱構造貯留層概念モデル



出典: 調査団

図 7.6 Boseti サイト貯留層概念モデル断面

7.2.3 試掘ターゲットの選定

前述の地熱構造モデルから、地表に連続する NNW-SSE 方向の明瞭な断層 (Fb-1, Fb-2) と、その下部に高温対流帯 (低比抵抗帯) が想定される。この高温対流帯は断層に沿って、Boseti 火山の山体に向かって南方に伸びていることが想定される。熱源として Boseti 火山活動に関連する貫入岩体の存在が示唆されることから、火山体に近づくにつれて貯留層の温度も高くなることが予想される。これら想定される高温対流帯や断層に達するためには、深度 2,000m の試掘井が必要と考えられる。現時点で想定される試掘ターゲット、試掘井の諸元を表 7.7、表 7.8 および図 7.7、図 7.8 に示す。

表 7.7 試掘ターゲット (案)

ターゲット・エリア	断層帯との関係/ターゲット掘削の目的	掘削方法
BS-1 エリア	貯留層外縁の地熱兆候 (噴気) を生ずる断層	傾斜掘削
BS-2 エリア	貯留層 (破碎帯) の中心、溶岩に被覆されるも火山体に近い地点	傾斜掘削
BS-3 エリア	貯留層 (破碎帯) の中心、地表で明確に確認できる地点	傾斜掘削

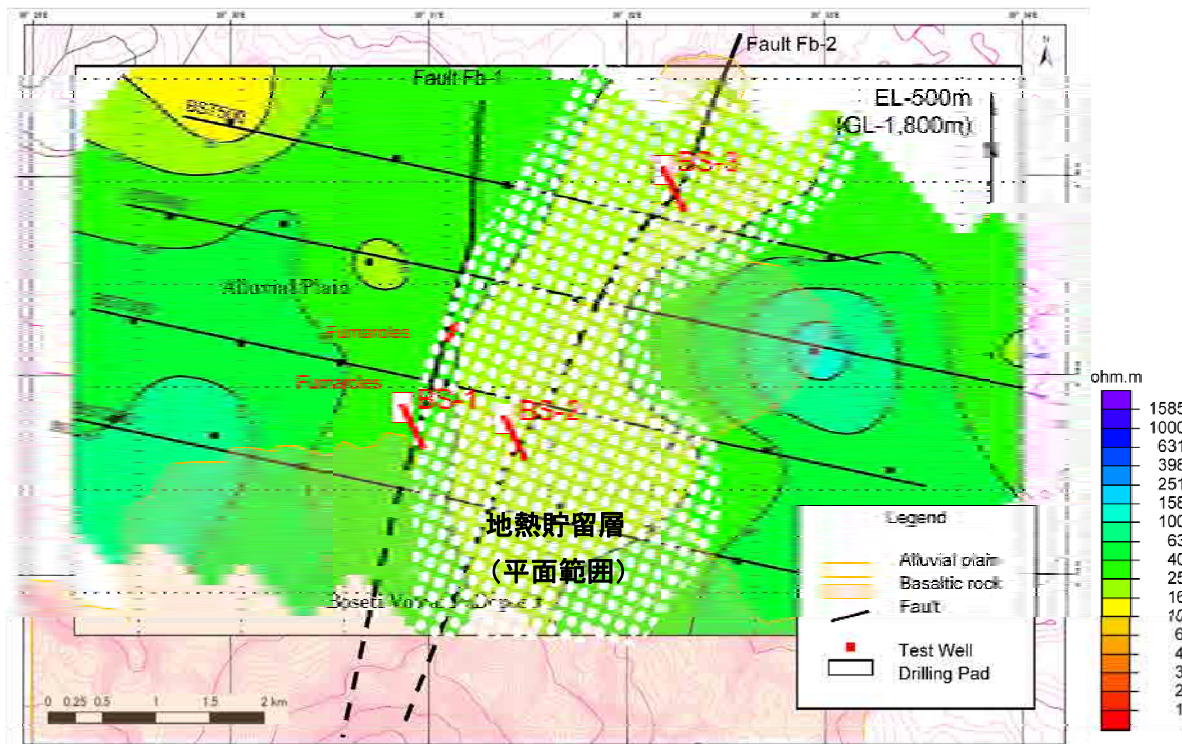
出典: 調査団

表 7.8 試掘井掘削計画 (案)

坑井番号 項目	BS 1	BS 2	BS 3
ターゲット概要	噴気帯が存在する NNE-SSW 方向の断層破碎 帯(Fb-1)	調査地域中央部 NNE-SSW 方向の断層破碎帯(Fb-2)	調査地域北部 NNE-SSW 方 向の断層破碎帯(Fb-2)
坑口からのターゲット位置	掘削方向 S 30°E, 垂直深度: 1,840 m 坑井偏距: 600 m	掘削方向 S 30°E, 垂直深度: 1,840 m 坑井偏距: 600 m	掘削方向 S 30°E, 垂直深度: 1,840 m 坑井偏距: 600 m
掘削方法	傾斜掘削	傾斜掘削	傾斜掘削
ターゲット深度(m)	1,000 m-1,840 m	1,000 m-1,840 m	1,000 m-1,840 m
ターゲットにおける 推定温度	約 250-300 °C	約 250-300 °C	約 250-300 °C
KOP	800 m	800 m	800 m
坑井深度	2,000 m	2,000 m	2,000 m

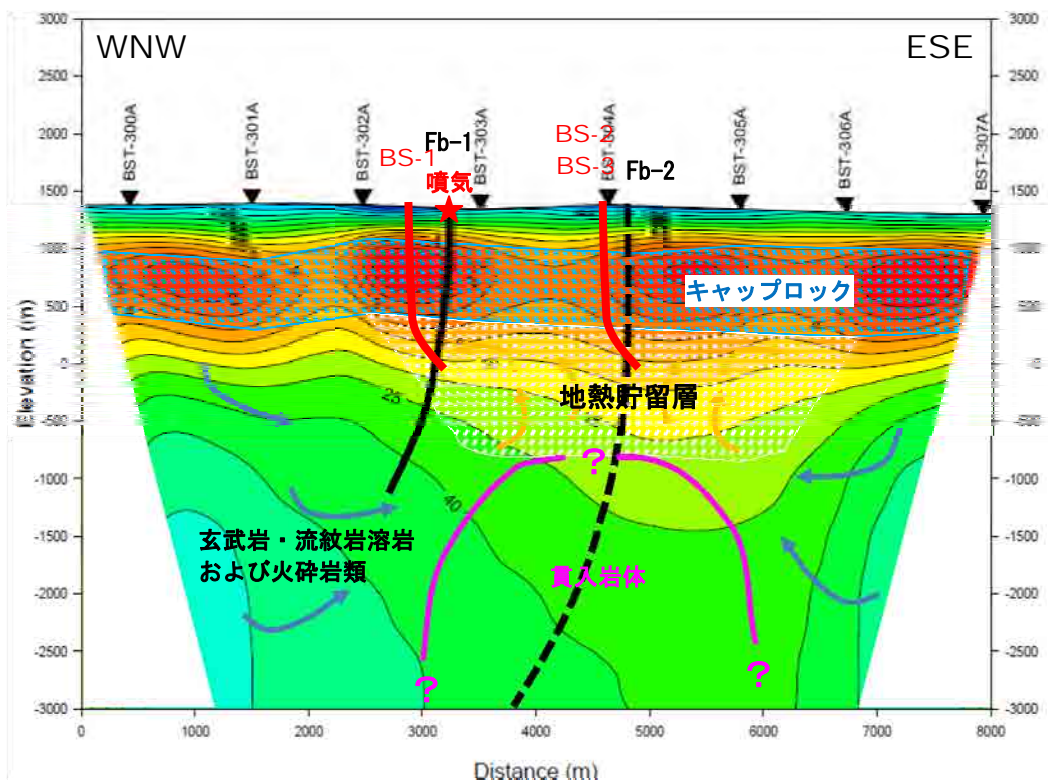
KOP: 傾斜掘開始地点(Kick-Off Point)

出典: 調査団



出典: 調査団

図 7.7 Boseti サイトの試掘井掘削計画平面図



出典: 調査団

図 7.8 Boseti サイトの試掘井掘削計画断面図

8. データベースの構築

8.1 構築の目的と活用方法

地熱データベースの構築は、各種地質、地化学、物理探査等の地熱データを、地形データや既存インフラとともに体系的に格納することを目的とした。

8.2 G*BASE 内のデータおよび情報

調査団は、GSE により提供された地熱データや本調査の調査結果を数値入力し、データベースの構築を行った。表 8.1 に入力したデータ・情報種類の一覧を示す。

表 8.1 G*BASE に登録した地熱データおよび周辺情報

分類	入力データ
基本情報	地形コンター
	河川
	湖沼
	主要道路
	鉄道
地質データ	地質図
	断層
	火山
	カルデラ
地形解析データ (リモートセンシングデータ)	熱水変質帯
	環状地形
	リニアメント
地表調査結果	地熱徴候 サンプル採取地点
地化学調査結果	地化学解析結果
物理探査結果	MT/TEM 探査結果
	VES 探査結果
	電気探査結果
	ブーゲー異常探査結果
	微小地震探査結果
坑井データ	井戸位置
	井戸軌跡
	ケーシングプログラム
	地質柱状図
	透水イベント (逸泥箇所)
井戸検層データ	温度検層
	圧力検層
	坑口圧力測定
	インジェクション試験
	フォール・オフ試験
	噴出試験
	流量計測
	干渉試験
	ビルドアップ試験

出典: 調査団

8.3 データベースの管理・更新

GSE は、新規に地熱データを取得した際には、適切にデータベースを更新し、管理していく必要がある。また同時にデータベースを活用し、次期地熱調査や井戸掘削を計画し、地熱貯留層や流体に関する各種シミュレーションを実施していくことが望まれる。

9. 試掘実現までの地表調査提案

9.1 追加地表調査項目の提案

9.1.1 追加地表調査対象地点

追加地表調査対象地点としてマスタープランで選定した2サイト Ayrobera (Tendaho-2)と Boseti の他に、Butajira (アジスアベバの南西約 150 km) を加えることを提案する。Butajira では、水井戸が掘削されており、本件の現地調査が終了していた 2014 年 5 月に掘削深度 200m 程度から熱水が噴出したと報告されている。

9.1.2 追加地表調査のアプローチ

次の2段階の調査アプローチを提案する；すなわち、第一段階では物理探査などの地表調査を実施して試掘調査範囲を絞り込み、続く第二段階で深度の浅い構造試錐調査（深度 300m 程度）を行って、試掘調査地点とターゲットの確定をおこなう。各段階における各サイトの調査内容を表 9.1 に示す。

表 9.1 追加調査の提案

Step	Survey Items	Ayrobera	Boseti	Butajira (if additionally requested)	GSE Input		JICA Assistance
					Capacity Building	Equipment	
1st	Micro-seismicity	☑	-	-	- Geologists, - Geophysicists, - Reservoir engineers	-	T/C, Survey equipment
	Gravity Survey	(Existing data)	☑	☑		-	T/C, Survey equipment
	Magnetic Survey	(Existing data)	☑	☑		Survey equipment	T/C
	MT/TEM Survey	☑	-	☑		Survey equipment	T/C
	MT 3D Analysis	☑	-	-		-	T/C
	2m Depth Temperature Survey	☑	☑	☑		-	T/C, Survey materials
	Geological and Geochemical survey	done	done	☑		- Geologist, - Geochemist	Labo. analysis
	Preliminry ESIA	done	done	☑	-	-	T/C, (out-sourcing)
2nd	TG wells	At one or two promising site/s		- Drilling service, - Drilling managers, - Geologists, - Reservoir engineers	Drilling machine, Supporting equipment, Drilling crew	T/C, Drilling consumables	
3rd	Test Wells	At the most promising site					

Note: TG wells: Temperature gradient wells; T/C: Technical cooperation
 ESIA: Environmental, Social Impact Assessment

(Source: JICA Project Team)

なお、かつて Tendaho-1 (Dubti)で掘削された試掘井では、深度 500m 程度において熱水に遭遇していることから、坑口バルブと BOP の設置が不可欠である。

9.2 EEGeD 設立マスタープラン調査の提案

9.2.1 地熱開発特別目的公社の設立

新たに設立を提案する地熱開発特別目的会社の名称を仮に「エチオピア地熱エネルギー開発公社 Ethiopian Enterprise for Geothermal Energy Development (EEGeD)」とする。EEGeD の所管業務は下記の通り提案する。

- 地熱地表調査及び試掘を行う。
- 蒸気開発を行うことができる。
- 蒸気販売ないし発電事業を行うことができる。
- 蒸気販売ないしは発電事業まで行うは場合事業可能性調査を行うことができる。

EEGeD を設立する利点は下記の通りである。

- EEGeD は、主に発電を目的とした地熱エネルギー開発業務に専念することができる。
- EEGeD は、地熱エネルギー開発に関する物的・知的資源を組織内に蓄積することができ、地熱開発促進に寄与することができる。
- EEGeD は、エチオピア国における地熱開発を担当する単一の公的機関として、各ドナーのフォーカルポイントとしての役割を果たし、開発資金の調達が容易となる。

9.2.2 EEGeD の特徴

新たに設立する EEGeD は、最終的には財務的に持続可能な組織となる必要がある。財務的に持続可能な組織とすることで、組織の運営や経営並びに技術革新への意欲が維持されるものとする。調査団が EEGeD の業務として含めることを提案する蒸気販売は、この目的のために必要不可欠である。ただし、設立当初は、事業収入が見込めないため補助金等の措置が必要となり、段階的に独立採算公社に変容できるようなプログラムの提案が必要である。

9.2.3 EEGeD 設立マスタープランプロジェクトの提案

地熱開発特別目的公社の設立に当たっては、組織設計や法制度の整備が必要である。また、記述の通り、独立採算となる公社を最終形態の組織運営形態とはするものの、上記販売が開始されるまでは、収入が見込めないため経過措置が必要である。このため、EEGeD 設立マスタープランプロジェクトの実施を提案する。その業務内容(ToR)を下記の通り提案する。

表 9.1 EEGeD 設立マスタープランプロジェクト TOR の提案

1. EEGeD 設立趣旨	6. 法制度枠組整備
2. ビジョンおよびミッション	7. 地熱資源開発計画
3. 現況分析（人的、物的、財務的資源の分析）	8. 財務計画
4. 事業形態（価値連鎖確認、オーナーシップ構造）	9. 蒸気販売契約（SSA）
5. 人的資源開発（組織、要員）	10. EEGeD 設立のためのアクションプラン

10. 結論と提言

エチオピア国の 22 箇所の調査対象地域における既存資料調査、リモートセンシング調査、現地地質・地化学調査、地質地化学室内試験および環境社会配慮概略調査に基づき、地熱資源量評価を行った。加えて、第 5 章で定めた開発優先順位に従いエチオピア国における地熱開発マスタープランを策定した。

結論と提言を記述する前に、エチオピア国において地熱開発を促進する意義についてまず確認したい。

1. 地熱エネルギーは、年間を通じて安定した電力を提供することができる。
2. 地熱エネルギーは、電力供給源として風力や太陽光などの他の再生可能エネルギーに優れている。
3. 地熱エネルギーは、水力発電に依存するエチオピア国の旱魃時における電力不足リスクを軽減することができる。
4. このため、地熱エネルギーの早期かつ最大限の開発を優先する必要がある。

本マスタープランプロジェクトの結論と提言は以下の通りである。

【結 論】

1. 地熱資源量評価の結果、対象地域の地熱資源量は最頻値で約 4,200 MW と見積もられる。生起確率 80%および 20%の資源推定量はそれぞれ 2,100 MW、10,800 MW と見積もられる。ただし、殆どの対象地域では地質地化学等の地表調査のみ実施されているため、この評価は「推定された (Inferred)」レベルの地熱資源量 (Geothermal resource) であることに留意しなければならない。より具体的な開発計画の策定には、物理探査ならびに試掘調査を実施して、この推定量を「提示された (Indicated)」ないしは「測定された (Measured)」レベルの資源量評価に引き上げる必要がある。
2. 環境社会配慮にかかる予備的現地調査の結果、国立公園に立地する地点や、住民摩擦が想定される地点を除く大部分の地熱徴候地点で、環境社会に対する重大な影響はないと判断される。
3. 種々の要素に基づいて地熱徴候地域の開発優先順位付けを行い、開発優先順位のランクを優先度の高い順に Priority-S, A, B, C および D とした。その結果、開発計画として、短期計画 (2014-2018) では、既に開発がコミット・実施されている Priority-S の約 600 MW を開発対象とし、中期計画 (2019-2025) では Priority-A と B の約 2,400 MW (累計約 3,000 MW)、および長期計画 (2026-2037) では Priority-C と D の約 1,100 MW (累計約 4,100 MW) を提案した。
4. 中期計画の Priority-A と B のうち、まだ開発がコミット・実施されていない地点は、Priority-A

の Tendaho-2 (Ayrobera) と Priority-B の Boseti および Meteka の 3 地点である。このため、新期開発地点の選定はこれら 3 サイトが優先される。

5. EEPCo のマスタープランでは 2018 年までに合計 1,200 MW の風力発電所や太陽光発電所の建設が計画されているが、経済分析の結果では Priority-A と B の地熱発電所が風力・太陽光発電所に対して経済的に優れる結果となった。このため、風力・太陽光発電所の建設に先行して地熱発電所の建設を優先できる。
6. 現行の電気料金施策を前提として財務的考察をおこなった結果次の通りとなった。(i) 国内向け電力供給を前提とすると、融資条件が有利な円借款を活用して Priority-A を開発する場合にのみ、発電原価が現行の国内向け平均電気料金以内に収まる。(ii) 電力輸出を前提とした場合、世銀の融資や円借款を用いて Priority-A と B を開発する場合はコストは現行の電気輸出価格を下回る。(iii) しかし、民間企業が投資する場合は発電原価は現行輸出価格を上回る。これらの結果、地熱発電所の建設には融資条件が有利な公的資金を投入する必要があることが判明した。民間資金を導入するためには、各種既存の支援制度の活用ないしは新たな支援制度の設立が必要である。
7. 上記財務的分析の結果、地熱開発実施体制は原則として公的機関が主導する必要があると結論される。ただし、現存組織制度の枠組みでは円滑な地熱資源開発は困難であると考えられる。このため、既存の GSE と EEP の地熱関連部門を単一機関として独立させ、初期調査から蒸気生産販売までを担当する公社 (Enterprise) の設立が必要である。これを、EEGeD (Ethiopia Enterprise for Geothermal Energy Development) と仮称する。地熱資源開発の主目的が電力開発であることに鑑み、EEGeD は水資源・エネルギー省の傘下とし、また、EEGeD は蒸気生産販売を電力生産部門へ販売することで、その財務的持続可能性を確保する必要がある。ただし、この組織の設立は、電力生産部門での民間資金による地熱開発を妨げるものではないと結論した。
8. 開発が優先される地熱徴候地点 Priority-A と B の内、民間ないしドナー支援がなされていない地点は、Priority-A の Tendaho-2 (Ayrobera) と Priority-B の Boseti および Meteka の 3 地点である。このうち、優先順位に従って Tendaho-2 (Ayrobera) と Boseti において物理探査を実施した。調査の結果、両地点において断裂系に起因すると考えられる地熱貯留層の存在を推定した。この調査結果に基づき、試掘ターゲットを選定した。また、試掘の仕様の概要を定めた。

【提 言】

エチオピア国における地熱発電は、気候変動などによって電力供給が不安定となる水力発電を補い、かつ他の再生可能エネルギーに安定性で勝るベース電源となる。このため、積極的に開発を進めていく必要があり、その実現のため以下を提言する。

1. 本マスタープランで Priority-S に分類した、民間ないしドナー支援で現在開発が進められている地熱電力開発を滞りなく推進すること。

2. 本調査で物理探査を実施し、かつ試掘ターゲットを提案した Tendaho-2 (Ayrobera) および Boseti 地点において、速やかに追加地表調査を実施して貯留層モデルの精度を高めること。また、2014 年に新たに地熱徴候地点として確認された Butajira 地点において、地質地化学調査に加え、物理探査を実施すること
3. 上記 3 サイトにおいての追加調査終了後、最も有望なサイトにおいて速やかに試掘を実施すること。
4. Priority-B としたものの、本マスタープラン調査では物理探査の対象地域に含めなかった Meteka 地点において、速やかに物理探査を実施して、地下貯留層構造を推定し、試掘計画を立案すること。
5. 今後の調査の進展に従い、本調査で評価した地熱資源量を逐次改定していくこと。
6. エチオピア国の地熱開発を促進するために、新公社 EEGeD を早期に創設し、かつ速やかな実施能力向上プログラムの立案と実施を行うこと。
7. エチオピア国は近年、経済成長が著しく、また世界経済情勢も急速に変化している。したがって、本マスタープランを適宜見直していくこと。

以上

エチオピア国 全国地熱発電開発マスタープラン策定プロジェクト

ファイナルレポート

2015年4月

対象地域位置図 要 旨

目 次

略 語 集.....	x
第 1 章 調査の概要.....	1-1
1.1 調査の背景.....	1-1
1.2 業務の目的および範囲.....	1-1
1.2.1 業務の目的.....	1-1
1.2.2 相手国関係機関.....	1-2
1.2.3 対象地域.....	1-2
1.2.4 調査団の構成.....	1-3
第 2 章 電力開発計画.....	2-1
2.1 成長と構造転換のためのプラン.....	2-1
2.1.1 概要.....	2-1
2.1.2 電力セクタープラン.....	2-2
2.2 電力セクター概要.....	2-3
2.2.1 電力セクター政策・法制度・戦略.....	2-3
2.2.2 電力セクター関連組織.....	2-4
2.2.3 電気需要予測.....	2-8
2.2.4 発電計画.....	2-14
2.2.5 送電計画.....	2-20
2.2.6 資金調達及び料金.....	2-24
2.3 地熱発電開発.....	2-24
2.3.1 既往地熱開発計画.....	2-24
2.3.2 コミットされている地熱発電開発.....	2-27
2.3.3 地熱発電開発目標.....	2-27
2.3.4 地熱発電開発の優先性.....	2-28
2.4 地熱開発プロジェクトの動向.....	2-30
2.4.1 地熱開発プロジェクトの状況.....	2-31
2.4.2 各ドナーによる組織・制度、人材育成プロジェクト.....	2-33
2.4.3 日本政府が関与するプロジェクトの動向.....	2-34

第3章 地熱ポテンシャル調査の概要	3-1
3.1 地質概要.....	3-1
3.1.1 テクトニクス.....	3-1
3.1.2 地域地質状況.....	3-1
3.1.3 地域地質構造.....	3-2
3.2 既存資料の収集と整理.....	3-3
3.2.1 目的.....	3-3
3.2.2 広域調査報告.....	3-3
3.2.3 詳細調査.....	3-3
3.2.4 フィージビリティ調査.....	3-4
3.2.5 施設建設・維持管理.....	3-4
3.3 衛星画像解析.....	3-5
3.3.1 衛星画像解析の目的.....	3-5
3.3.2 解析方法.....	3-5
3.3.3 解析結果.....	3-6
3.4 現地調査および室内分析.....	3-7
3.4.1 地質調査.....	3-7
3.4.2 地化学調査.....	3-13
3.5 貯留層評価.....	3-31
3.5.1 目的.....	3-31
3.5.2 資源量 (Resource) と埋蔵量(Reserve)の定義.....	3-31
3.5.3 評価手法ー容積法.....	3-32
3.5.4 使用する確率手法ーモンテカルロ法.....	3-34
3.5.5 容積法評価における留意項目.....	3-35
3.5.6 貯留層面積の推定.....	3-35
3.5.7 貯留層厚さの設定.....	3-36
3.5.8 貯留層平均温度の設定.....	3-36
3.5.9 地熱発電施設タイプの仮定.....	3-37
3.5.10 貯留層評価結果.....	3-37
引用文献.....	3-41
第4章 環境社会配慮	4-1
4.1 環境社会影響評価 (ESIA) 調査の概要.....	4-1
4.1.1 ESIA 調査の内容.....	4-1
4.1.2 ESIA 調査の目的.....	4-1
4.1.3 ESIA 調査対象地域.....	4-1
4.2 環境関連法・規制.....	4-2
4.2.1 環境社会配慮法規制の枠組.....	4-2
4.2.2 エチオピアにおける環境管理体制の枠組.....	4-8

4.3	ベースライン調査.....	4-10
4.3.1	調査実施方法.....	4-10
4.3.2	ベースラインデータの概要.....	4-11
4.4	戦略的環境評価 (SEA).....	4-13
4.4.1	地熱開発に関するエチオピアのエネルギー政策.....	4-14
4.4.2	エネルギー資源の選択.....	4-15
4.4.3	事業の選択.....	4-16
4.5	IEE の実施.....	4-17
4.5.1	事業のカテゴリー分類.....	4-17
4.5.2	初期環境調査のスコーピング.....	4-18
4.5.3	社会環境への影響.....	4-22
4.5.4	水の利用.....	4-23
4.5.5	転地及び移転.....	4-24
4.6	環境管理計画.....	4-26
4.6.1	環境管理計画(EMP).....	4-26
4.6.2	モニタリング計画.....	4-27
4.7	ステークホルダー協議.....	4-28
4.8	結論と勧告.....	4-29
4.8.1	結論.....	4-29
4.8.2	勧告.....	4-30
第5章	マスタープラン策定.....	5-1
5.1	マスタープラン目標及び策定手順.....	5-1
5.1.1	マスタープラン目標.....	5-1
5.1.2	マスタープラン策定手順.....	5-1
5.2	地熱有望地優先順位付けのための多基準解析.....	5-2
5.2.1	優先度評価の検討.....	5-2
5.2.2	地熱有望サイトの優先順位.....	5-12
5.3	実施計画.....	5-14
5.3.1	概略開発スケジュール.....	5-14
5.3.2	開発計画.....	5-15
5.4	地熱発電開発における財務的考察.....	5-19
5.5	実施体制.....	5-20
5.5.1	地熱開発実施体制の検討.....	5-20
5.6	地熱の直接利用について.....	5-26
5.6.1	地熱の直接利用の現況.....	5-26
5.6.2	エチオピアにおける地熱の直接利用の提案.....	5-27
5.7	【参考】地熱発電開発における実施形態の各国の例.....	5-29
5.7.1	公的機関と民間事業者の参入タイミングの例.....	5-29

5.7.2	他国の例 - ケニア国	5-29
5.7.3	他国の例 - フィリピン国	5-30
5.7.4	他国の例 - インドネシア国	5-32
第 6 章	物理探査.....	6-1
6.1	物理探査の概要	6-1
6.2	物理探査サイトの選定条件	6-1
6.3	調査概要	6-1
6.4	調査結果	6-2
6.4.1	Tendaho-2 (Ayrobera) 地区.....	6-2
6.4.2	Boseti 地区.....	6-3
6.4.3	電磁探査結果からみた貯留槽モデル構築上の留意点	6-5
6.5	調査結果の地熱構造的解釈	6-11
6.5.1	Tendaho-2 (Ayrobera) 地熱徴候サイト	6-11
6.5.2.	Boseti 地熱徴候サイト	6-14
第 7 章	貯留層モデル・試掘ターゲットの提案.....	7-1
7.1	はじめに.....	7-1
7.2	Tendaho-2 (Ayrobera) 地熱徴候サイト	7-1
7.2.1	調査結果の地熱構造的解釈	7-1
7.2.2	地熱貯留層概念モデル	7-2
7.2.3	試掘ターゲットの選定	7-3
7.3	Boseti 地熱徴候サイト.....	7-5
7.3.1	調査結果の地熱構造的解釈	7-5
7.3.2	地熱貯留層概念モデル	7-5
7.3.3	試掘ターゲットの選定	7-7
7.4	地熱資源量・開発優先順位の再検討	7-9
7.4.1	地熱資源量の再評価	7-9
7.4.2	開発優先順位への影響	7-9
7.5	試掘計画の概要.....	7-9
7.5.1	試掘の概要	7-9
7.4.2	試掘時の留意事項	7-11
第 8 章	データベース構築.....	8-1
8.1	構築の目的と活用方法.....	8-1
8.2	データベースの構造.....	8-1
8.3	G*BASE 内のデータおよび情報.....	8-3
8.4	データベースの管理・更新.....	8-4

第 9 章 試掘までの地表調査提案	9-1
9.1 追加地表調査項目の提案.....	9-1
9.1.1 追加地表調査対象地点.....	9-1
9.1.2 Butajira サイトの開発現況.....	9-1
9.1.3 追加地表調査のアプローチ.....	9-2
9.2 EEGeD 設立マスタープラン調査の提案.....	9-3
9.2.1 地熱開発特別目的公社の設立.....	9-3
9.2.2 EEGeD の特徴.....	9-4
9.2.3 EEGeD 設立マスタープランプロジェクトの提案.....	9-4
第 10 章 結論と提言	10-1

添付資料

Appendix-1	リモートセンシング画像解析
Appendix-2	現地調査票
Appendix-3	容積法計算方法「合理的実用的な容積法計算の提案」
Appendix-4	環境社会影響評価
Appendix-5	EIRR 計算
Appendix-6	物理探査
Appendix-7	データベース格納データ
Appendix-8	議事録
Appendix-9	写真集

別添

地熱データベース (G*Base) 取り扱い説明書

為替レート (2015 年 4 月時点)

1 ドル(USD) = 116.94 円

1 エチオピアブル(ETB) = 5.929 円

図表目次

図 2.2.1	エチオピア電力セクター組織図	2-5
図 2.2.2	GSE 組織図	2-6
図 2.2.3	地熱資源探査・評価部組織図	2-6
図 2.2.4	EEP および EEU の組織図	2-7
図 2.2.5	電気消費量及び顧客数	2-9
図 2.2.6	カテゴリー別電気消費量の推移と 2011 年における内訳	2-9
図 2.2.7	輸出分を含む電力必要発電量予測 (2012-2037 年)	2-13
図 2.2.8	輸出分を含む最大負荷予測 (2012-2037 年)	2-13
図 2.2.9	既存・コミット・計画水力発電所位置図	2-16
図 2.2.10	エチオピアにおける既設およびコミットされている電気系統	2-21
図 2.2.11	電力網拡大計画 (左: 短期計画, 右: 長期計画)	2-22
図 2.3.1	設備容量と供給予備力	2-26
図 2.3.2	発電所種類別の発電量	2-26
図 2.3.3	地熱発電所の目標設備容量	2-28
図 2.3.4	EEPCo マスタープランにおける電源構成の変化	2-29
図 2.3.5	エチオピアにおける一日時間帯別電力需要と電源構成の概念図	2-29
図 2.3.6	一日時間帯別電力需要と電源構成の概念図	2-30
図 3.1.1	アフリカ大地溝帯の分布と連続	3-1
図 3.1.2	紅海リフト、アデン海リフトおよびエチオピアリフト	3-2
図 3.4.1	SiO ₂ -K ₂ O+Na ₂ O 図(TAS Diagram)	3-10
図 3.4.2	ケニア・オルカリア地熱地域の SiO ₂ -K ₂ O+Na ₂ O 図(TAS Diagram)	3-10
図 3.4.3	FeO-MgO-K ₂ O+Na ₂ O ダイアグラム	3-11
図 3.4.4	エチオピア地溝帯の地熱徴候分布	3-19
図 3.4.5	地熱流体および地表水の δD と δ ¹⁸ O の関係	3-23
図 3.4.6	地熱流体および地表水の Cl-SO ₄ -HCO ₃ ダイアグラム	3-23
図 3.4.7	地熱流体の Na-K-Mg ダイアグラム	3-24
図 3.4.8	地熱流体の地化学温度計算結果の比較 (エチオピア地溝帯南西部)	3-26
図 3.4.9	地熱流体の地化学温度計算結果の比較 (エチオピア地溝帯北東部)	3-26
図 3.4.10	地熱ガスの He-Ar-N ₂ ダイアグラム	3-28
図 3.4.11	地熱ガスの ³ He/ ⁴ He 比と ⁴ He/ ²⁰ Ne 比の関係	3-29
図 3.4.12	GSE と JICA 調査団の分析結果の比較	3-30
図 3.5.1	探査結果と “Geothermal Sources”、および “Geothermal Reserves” との関係図	3-31
図 3.5.2	推定貯留層平均温度と発電施設タイプ	3-37
図 4.2.1	エチオピアにおける EIA 過程及び手順概要	4-5
図 5.1.1	多基準解析のフロー	5-2
図 5.2.1	坑井シミュレーション結果	5-6
図 5.2.2	水力発電及び地熱発電の発電原価	5-9
図 5.2.3	地熱発電及び他の発電タイプの発電原価	5-9

図 5.4.1	電気料金と資金調達条件による発電原価	5-20
図 5.5.1	料金水準ごとの PPP (官民連携) モデル	5-21
図 5.5.2	地熱電力開発バリューチェーンの官民連携モデル	5-24
図 5.6.1	エチオピア国地熱直接利用状況写真	5-27
図 5.6.2	地熱直接利用の活用指針	5-28
図 5.7.1 (R.1)	地熱発電開発における実施形態の各国の例	5-30
図 5.7.2 (R.2)	ケニア国の GDC の事業内容	5-31
図 5.7.3 (R.3)	フィリピン国 PNOC EDC の例	5-32
図 5.7.4 (R.4)	インドネシア国 民営化前の地熱開発実施体制	5-33
図 6.4.1	調査位置図	6-6
図 6.4.2	測定点位置図 (Ayrobera 地区)	6-7
図 6.4.3	測定点位置図 (Boseti 地区)	6-8
図 6.4.4	比抵抗分布平面パネルダイアグラム (Ayrobera 地区)	6-9
図 6.4.5	比抵抗分布平面パネルダイアグラム (Boseti 地区)	6-10
図 6.5.1	地熱地域における比抵抗値と変質鉱物および温度の関係	6-11
図 6.5.2	Tendaho-2 (Ayrobera) サイト解析比抵抗分布パネルダイアグラム	6-13
図 6.5.3	Tendaho-2 (Ayrobera) サイト解析比抵抗分布断面図	6-14
図 6.5.4	Boseti サイト解析比抵抗分布パネルダイアグラム	6-15
図 6.5.5	Boseti サイト解析比抵抗分布断面図	6-16
図 7.2.1	Tendaho-2 (Ayrobera) サイト貯留層概念モデル	7-2
図 7.2.2	Tendaho-2 (Ayrobera) サイト貯留層概念モデル断面	7-3
図 7.2.3	Tendaho-2 (Ayrobera) サイトの試掘井掘削計画平面図	7-4
図 7.2.4	Tendaho-2 (Ayrobera) サイトの試掘井掘削計画断面図	7-4
図 7.3.1	Boseti サイト地熱構造貯留層概念モデル	7-6
図 7.3.2	Boseti サイト貯留層概念モデル断面	7-6
図 7.3.3	Boseti サイトの試掘井掘削計画平面図	7-8
図 7.3.4	Boseti サイトの試掘井掘削計画断面図	7-8
図 7.5.1	試掘井の確認項目と判断基準	7-10
図 8.2.1	G*BASE スタートアップ画面(左: 登録画面, 右: ログイン画面)	8-2
図 8.3.1	Aluto 地区の 2 次元地熱データ表示 (左) と 3 次元地熱データモデル表示 (右)	8-4
表 1.2.1	調査対象サイト	1-3
表 1.2.2	調査団の構成員	1-3
表 2.1.1	成長と構造転換のためのプラン (GTP: 2010/11-2014/15)	2-1
表 2.1.2	GTP における電力セクターの開発目標	2-2
表 2.1.3	GTP における電力セクターの政策マトリックス	2-3
表 2.2.1	PASDEP/GTP (2005-2015) におけるエネルギーセクター目標値	2-4
表 2.2.2	電気消費量 (GWh : 2007-2012)	2-8
表 2.2.3	電力発電量及び最大負荷 (2002-2011 年)	2-9

表 2.2.4	カテゴリー別電力需要予測 (基準ケース).....	2-10
表 2.2.5	最大負荷予測 (基準ケース).....	2-11
表 2.2.6	電力輸出：同時発生最大負荷及び電力量予測 (基準ケース).....	2-12
表 2.2.7	輸出分を含む電力需要及び最大負荷予測 (2012-2037 年).....	2-12
表 2.2.8	2012 年 7 月時点の ICS と SCS の設備容量.....	2-14
表 2.2.9	発電量 (GWh).....	2-15
表 2.2.10	コミット・計画段階の水力発電所.....	2-17
表 2.2.11	既設およびコミット風力発電所.....	2-18
表 2.2.12	太陽光発電候補サイト.....	2-18
表 2.2.13	計画されているバイオマスエネルギー発電所.....	2-19
表 2.2.14	計画廃棄物発電所.....	2-19
表 2.2.15	計画砂糖工場一覧.....	2-19
表 2.2.16	既設送電線延長 (km).....	2-20
表 2.2.17	新規変電所及び送電線計画.....	2-22
表 2.2.18	国際間の相互接続送電線計画.....	2-23
表 2.2.19	エチオピアーケニア電力ハイウェイプロジェクト.....	2-23
表 2.2.20	消費者別電気料金.....	2-24
表 2.3.1	GSE と EPPCo による既存地熱開発計画.....	2-25
表 2.3.2	コミットまたは計画されている地熱有望地.....	2-27
表 2.4.1	実施・計画中の地熱開発プロジェクトの状況 (2014 年 2 月時点).....	2-32
表 2.4.2	エチオピア地熱開発に関わるドナー機関.....	2-33
表 2.4.3	地熱開発に関する実施・計画中の組織・制度面のプロジェクト.....	2-33
表 2.4.4	地熱開発に関する実施・計画中の人材育成プログラム (2014-2015).....	2-34
表 2.4.5	Aluto 地熱地域開発にかかるスコープ、予算および資金源.....	2-34
表 3.1.1	エチオピアリフトの地質層序対比表.....	3-3
表 3.2.1	各サイトにおける詳細調査状況.....	3-4
表 3.3.1	衛星画像解析結果まとめ.....	3-6
表 3.4.1	サイト調査スケジュール.....	3-7
表 3.4.2	地質試料分析諸元.....	3-8
表 3.4.3	現地踏査表の例.....	3-9
表 3.4.4	蛍光 X 線分析結果.....	3-12
表 3.4.5	XRD による変質鉱物分析結果.....	3-13
表 3.4.6	現地踏査結果のまとめ (エチオピア地溝帯南西部).....	3-15
表 3.4.7	現地踏査結果のまとめ (エチオピア地溝帯北東部).....	3-16
表 3.4.8	分析項目.....	3-17
表 3.4.9	分析方法.....	3-18
表 3.4.10	地熱流体の化学・同位体分析結果.....	3-21
表 3.4.11	地熱ガスの化学・同位体分析結果.....	3-22
表 3.4.12	地熱流体の地化学温度計計算結果.....	3-25

表 3.4.13	地熱ガスの地化学温度計計算結果	3-27
表 3.4.14	容積法のための貯留層温度範囲の推定結果	3-27
表 3.5.1	エチオピア国における調査段階と AGRCC のカテゴリーの対比	3-32
表 3.5.2	容積法で使用したパラメータ	3-35
表 3.5.3	地熱貯留層面積の推定	3-36
表 3.5.4	貯留層厚さの仮定	3-36
表 3.5.5	貯留層平均温度 (°C)	3-37
表 3.5.6	貯留層評価結果	3-38
表 3.5.7	従来式による計算結果と調査団提案式との比較	3-39
表 3.5.8	貯留層評価に用いたパラメーター一覧	3-40
表 4.1.1	ESIA 調査対象サイト	4-2
表 4.2.1	地熱開発事業に適用される主要規制、ガイドライン、規則	4-3
表 4.2.2	産業排ガス及び産業排水排出基準 (仮) (ETHIOPIAN EPA)	4-6
表 4.2.3	大気環境基準 (仮) (ETHIOPIAN EPA)	4-6
表 4.2.4	騒音センシティブ地域における国家騒音基準 ^(NOTE)	4-6
表 4.2.5	排気ガス EHS ガイドライン	4-7
表 4.2.6	排水 EHS ガイドライン	4-7
表 4.2.7	騒音管理 EHS ガイドライン	4-7
表 4.3.1	3 州の概要	4-11
表 4.3.2	自然、歴史及び文化遺産	4-12
表 4.3.3	事業実施場所近辺の自然保護区の分布	4-13
表 4.4.1	地熱エネルギーの環境特徴	4-15
表 4.4.2	他の再生可能エネルギー源と比較した地熱エネルギーの利点	4-15
表 4.4.3	代替案の比較	4-16
表 4.5.1	事業の環境カテゴリー分類	4-17
表 4.5.2	環境スコーピングチェックリスト	4-19
表 4.5.3	候補地における住民生活状況	4-22
表 4.5.4	候補地の水へのアクセス状況	4-24
表 4.5.5	土地状況	4-25
表 4.6.1	EMP における環境影響緩和策	4-27
表 4.6.2	地熱開発のためのモニタリング計画	4-27
表 5.1.1	マスタープラン開発目標	5-1
表 5.2.1	資源評価別地熱ポテンシャル	5-3
表 5.2.2	経済的耐用年数	5-4
表 5.2.3	発電所利用率	5-4
表 5.2.4	候補水力発電所の発電原価	5-5
表 5.2.5	水力および地熱以外の発電所タイプの発電原価	5-5
表 5.2.6	地熱発電所の発電原価	5-7
表 5.2.7	発電原価による地熱発電所の順位	5-8

表 5.2.8	Tendaho-2 (Ayrobera)発電所の経済評価で設定した基本条件	5-10
表 5.2.9	地熱発電所の優先順位と EIRR	5-10
表 5.2.10	必要送電線の距離と電圧	5-11
表 5.2.11	アクセス道路の延長と周辺地形	5-12
表 5.2.12	地熱有望サイトの優先順位	5-13
表 5.3.1	概略地熱開発スケジュール	5-15
表 5.3.2	地熱開発全体スケジュール	5-16
表 5.3.3	短期開発計画	5-16
表 5.3.4	中期開発計画	5-18
表 5.3.5	長期開発計画	5-19
表 5.4.1	資金調達条件	5-20
表 5.6.1	世界及び日本における地熱直接利用の現況	5-26
表 5.6.2	エチオピア国 地熱直接利用	5-26
表 5.6.3	エチオピア国における地熱直接利用の提案	5-28
表 5.8.1 (R.1)	インドネシア国の稼働中地熱発電所 (2015 年現在)	5-34
表 6.4.1	Tendaho-2 (Ayrobera)の比抵抗構造の特徴	6-3
表 6.4.2	Boseti の比抵抗構造の特徴	6-5
表 6.5.1	地熱地域における比抵抗値と変質鉱物および温度の関係	6-11
表 6.5.2	Dubti (Tendaho-1)サイトの試掘井戸データ	6-12
表 6.5.3	比抵抗分布に基づく Tendaho-2 (Ayrobera) サイトの推定温度	6-12
表 6.5.4	比抵抗分布に基づく Boseti サイトの変質帯と推定温度	6-14
表 7.2.1	地表調査結果 (地質・地化学・物理探査) から得られる地熱構造	7-1
表 7.2.2	貯留層概念モデル	7-2
表 7.2.3	試掘ターゲット (案)	7-3
表 7.2.4	試掘井掘削計画 (案)	7-3
表 7.3.1	地表調査結果 (地質・地化学・物理探査) から得られる地熱構造	7-5
表 7.3.2	貯留層概念モデル	7-5
表 7.3.3	試掘ターゲット (案)	7-7
表 7.3.4	試掘井掘削計画 (案)	7-7
表 7.4.1	地熱概念モデルから推定した貯留層容積	7-9
表 7.4.2	地熱資源量再計算結果	7-9
表 7.5.1	調査井の分類	7-10
表 8.2.1	G*BASE データベースの構造	8-1
表 8.2.2	G*BASE におけるサイト ID	8-2
表 8.3.1	G*BASE に登録した地熱データおよび周辺情報	8-3
表 9.1.1	追加調査の提案	9-3
表 9.2.1	EEGeD 設立マスタープランプロジェクト TOR の提案	9-4

略語表

AFD	French Development Agency	フランス開発局
AfDB	African Development Bank	アフリカ開発銀行
AGRCC	Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee	オーストラリア地熱エネルギーグループ規則委員会
ARGeo	African Rift Geothermal Development Facility	アフリカ地溝帯地熱開発基金
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	人工衛星搭載型熱放射・熱反射光学センサー
AUC	Africa Union Commission	アフリカ連合委員会
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	ドイツ地質科学・天然資源研究所
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine	ガスタービンコンバインドサイクル発電
CF	Capacity Factor	設備稼働率
COD	Commercial Operation Date	営業運転開始日
EAPP	Eastern African Power Pool	東アフリカ電力プール
EEA	Ethiopian Energy Agency	エチオピアエネルギー局
EELPA	Ethiopian Electric Light and Power Authority	エチオピア電気電力局
EEP	Ethiopian Electric Power	エチオピア電力
EEPCo	Ethiopian Electric Power Corporation	エチオピア電力公社
EEU	Ethiopian Electric Utility	エチオピア電気事業
EG	Ethylene Glycol	エチレングリコール
EIA	Environmental Impact Assessment	環境影響評価
EIRR	Economic Internal Rate of Return	経済的内部収益率
EPA	Environmental Protection Authority	環境保全局
ESIA	Environmental and Social Impact Assessment	環境社会環境影響評価
ESMF	Environment and Social Management Framework	社会環境管理フレームワーク
FS, F/S	Feasibility Study	フィージビリティ調査
GHI	Global Horizontal Irradiance	包括的平面日射量
GIS	Geographical Information System	地理情報システム
GPS	Global Positioning System	全球測位システム
GRMF	Geothermal Risk Mitigation Facility for Eastern Africa	地熱リスク軽減資金
GSE	Geological Survey of Ethiopia	エチオピア地質調査所
GSDP	Geothermal Development Project	地熱開発プロジェクト基金
GTP	Growth and Transformation Plan	成長と構造転換のためのプラン
HVAC	high voltage alternate current	高電圧交流
HVDC	high voltage direct current	高電圧直流
IAEA	International Atomic Energy Agency	国際原子力管理機関
ICEIDA	Iceland International Development Agency	アイスランド国際開発局
ICS	Inter-Connected System	相互連結システム

IDA	International Development Agency	国際開発協会
IEE	Initial Environmental Examination	初期環境影響評価
IFC	International Finance Corporation	国際金融公社
IPP	Independent Power Producer	独立系発電事業者
JCC	Joint Coordination Committee	合同調整委員会
JICA	Japan International Cooperation Agency	国際協力機構
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau	ドイツ復興融資庁
Ma	Million age	百万年前（年代単位）
MCA	Multi-Criteria Analysis	多基準解析
MER	Main Ethiopian Rift	エチオピアリフト
MoM	Ministry of Mines	鉱山省
MoFED	Ministry of Finance and Economic Development	財務・経済開発省
MoWIE	Ministry of Water, Irrigation and Energy	水・灌漑・エネルギー省
MP, M/P	Master Plan	マスタープラン
MT	Magneto-Telluric Method	電場・磁場測定探査法
NDF	Nordic Development Fund	ノルウェー開発基金
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar	
	フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ	
PASDEP	Plan for Accelerated and Sustainable Development to End Poverty	
	貧困削減のための加速的かつ持続可能な開発計画	
PPA	Power Purchase Agreement	電気販売契約
RG	Reykjavik Geothermal	レイキャビック・ジオサーマル社
SCS	Self-Contained System	自己完結システム
SEA	Strategic Environment Assessment	戦略的環境アセスメント
SREP	Scaling up Renewable Energy Program	再生エネルギー拡大プログラム
SWIR	Short Wave Infrared Radiometer	短波長赤外放射計
TBD	To be decided	未定
TEM	Transit Electro-Magnetic Method	過渡現象電磁探査法
TICAD	Tokyo International Conference on African Development	アフリカ開発会議
TIR	Thermal Infrared Radiometer	熱赤外放射計
UEAP	Universal Electricity Access Program	全電化プログラム
UNDP	United Nations Development Programme	国連開発プログラム
UNEP	United Nations Environment Programme	国連環境プログラム
USAID	US Agency for International Development	米国国際開発庁
VNIR	Visible and Near-infrared Radiometer	可視近赤外放射計
WB	The World Bank	世界銀行
WFB	Wonji Fault Belt	ウォンジ断層帯
XRD	X-Ray Diffraction	X線回折
XRF	X-Ray Fluorescence	蛍光X線分析

第1章 調査の背景

1.1 調査の背景

エチオピア連邦共和国（以下エチオピア国）の2010年1月時点の総発電設備容量は約2,100 MWであり、その9割以上は水力発電によるものとなっている。エチオピア国内には最大45,000 MWもの水力ポテンシャルがあるとされ、その開発により余剰電力を近隣諸国に売電することを将来目標としている。しかし、近年の気候変動の影響から、降雨量の変化が年々大きくなり、水力発電への過度の依存はエネルギー供給を不安定化かつ脆弱化させ、経済や産業活動に多大な影響を及ぼしつつある。

このような状況に対してエチオピア電力公社（EEP）は、電源の多様性や適切なエネルギーミックスの重要性を認識し、地熱や風力など自国資源を活用した電力開発に取り組んでいる。このうち地熱発電は、ベース電源を安定的に供給しつつ、i) 化石燃料の代替、ii) 不安定な水力発電との互換、iii) 有力電源がない周辺諸国への電力供給、iv) 地球温暖化軽減へ貢献する再生可能エネルギーとしてその重要度を増してきている。

エチオピア国では、1969年に地熱資源開発調査が開始された。その後段階的な調査の結果、電力開発に有望な16ヶ所以上の地熱開発可能地域の存在が確認されており、エチオピア国全体の地熱発電ポテンシャルは約5,000 MWと見込まれている。しかし、事業化の目途が立ちつつある地点は、Aluto-Langano と Corbetti サイトの2サイトのみであり、他サイトは、試掘はされたものの資金難等のために中断されているもの（Tendaho-3: Tendaho Allalobeda）や、構造試錐調査まで実施され、その後中断されているもの（Gedemsa サイト）、その他地質調査や地化学調査段階で中断されているものと、それぞれの進捗状況や情報種類と情報量は種々となっている。そのため具体的な地熱開発計画を策定するためには情報の整理が必要になっている。

このような背景から、エチオピア国の地熱開発実施機関であるエチオピア地質調査所（以下「GSE」）は、我が国政府に対して地熱資源量評価、開発優先度付けを含む地熱開発マスタープランの策定及び地熱開発に係る能力開発への協力の要請を行った。本マスタープラン策定プロジェクトはこの要請に基づいて実施されているものである。

1.2 業務の目的および範囲

1.2.1 業務の目的

本業務の目的は以下の通りある。

- (1) 地熱有望地点16ヶ所を対象に地表調査を実施する。
- (2) データベース構築、統一的な基準による有望性の順位付けを行う。
- (3) 以上の結果を基に地熱発電開発マスタープランを策定する。
- (4) マスタープラン策定までの各プロセスにおける GSE 職員との共同作業や本邦研修を通

じて、GSE 職員の能力向上にも寄与する。

1.2.2 相手国関係機関

本業務のカウンターパート機関、調整機関は下記のとおりである。

(1) カウンターパート機関

エチオピア国地質調査所 (Geological Survey of Ethiopia: GSE)

(2) 合同コーディネーション・コミッティー(Joint Coordination Committee: JCC)

1) エチオピア側

- GSE 総局長／地質官
- GSE 地熱資源局長
- 鉱山省 (MoM) 代表
- 水エネルギー省 (MoWIE) 代表
- エチオピア電力公社 (EEP) 代表
- 財務経済省 (MoFED) 代表

2) 日本側

- JICA エチオピア事務所
- JICA 調査団
- 他関係者

3) オブザーバー

- 日本大使館

なお、上記のうちエチオピア電力公社 (EEP) は、2013 年 12 月に前身の EEPCo から以下の 2 組織に分割されたものである。

- Ethiopia Electric Power (EEP): 発電事業
- Ethiopia Electric Utility (EEU) : 送電配電売電事業

EEP はエチオピア国企業として運営される。一方、EEU はインドの民間会社 Power Grid Corporation が運営を行っている (2.2.2 参照)。

1.2.3 対象地域

調査対象サイトは次の通りである。また、巻頭の位置図に示す。

22 サイトのうち、No.01 から No.16 までのサイトは 2013 年 6 月 11 日締結の議事録に記載されているものがある。また、サイト No. 17 から No. 22 までのサイトは、2013 年 10 月 14 日に開催されたインセプションレポート会議にて合意されたものである。

表 1.2.1 調査対象サイト

Geothermal Sites		Prioritization / Data base	Remote Sensing	Site Survey
1	Dallol	☑	☑	GSE
2	Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda)	☑	☑	☑
3	Boina	☑	☑	GSE
4	Damali	☑	☑	GSE
5	Teo	☑	☑	GSE
6	Danab	☑	☑	GSE
7	Meteka	☑	☑	☑
8	Arabi	☑	☑	GSE
9	Dofan	☑	☑	☑
10	Kone	☑	☑	☑
11	Nazareth	☑	☑	☑
12	Gedemsa	☑	☑	☑
13	Tulu Moye	☑	☑	-
14	Aluto-2 (Aluto-Finkilo)	☑	☑	☑
15	Aluto-3(Aluto-Bobesa)	☑	☑	☑
16	Abaya	☑	☑	-
17	Fantale	☑	☑	-
(18)	Boseti	☑	☑	☑
(19)	Corbetti	☑	☑	-
(20)	Aluto-1 (Aluto-Langano)	☑	☑	-
(21)	Tendaho-1 (Tendaho-Dubti)	☑	☑	-
(22)	Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera)	☑	☑	☑

☑:本件マスタープラン策定プロジェクトの調査対象

出典：調査団

GSE: アクセス状況不良ないし安全上の理由で GSE 職員によってのみ調査

1.2.4 調査団の構成

本調査の構成団員は表 1.2.2 の通りである。

また、本調査の実施期間は 2013 年 9 月から 2015 年 5 月である。

表 1.2.2 調査団の構成員

氏名	担当	所属
高橋 信也	総括/地熱開発計画	日本工営 (株)
細田 年晃	副総括/地質	日本工営 (株)
吉村 司	地熱貯留層評価	日本工営 (株)
福田 大輔	地化学	地熱エンジニアリング (株)
川原 直樹	電源開発計画/データベース構築	日本工営 (株)
盛 信博	経済性分析	日本工営 (株) コーエイ総合研究所
佐藤 信介	環境社会配慮	日本工営 (株)
武田 祐啓	物理探査 1	住鉱資源開発 (株)
菊池 晃	物理探査 2	住鉱資源開発 (株)
百瀬 泰	ドナー調整 1/地熱貯留層評価 2	日本工営 (株)
寺本 雅子	ドナー調整 2/地化学 2	日本工営 (株)

出典：調査団

第2章 電力開発計画

2.1 成長と構造転換のためのプラン

2.1.1 概要

エチオピアにおける最新の国家開発計画は「成長と構造改革のためのプラン(GTP: Growth and Transformation Plan 2010/11～2014/15)」である。GTP はエチオピア国会が承認した国家の最高政策文書として、5 ヶ年の政策、予算、政府組織を規定するとともに、援助国、国際機関、外国投資家の行動に方向性を与えるものである。この文書には国家のビジョンや目的、戦略および目標が明確に示されている。エチオピアのすべての閣僚、省庁および実施機関のパフォーマンスは、このプランに対する貢献によって評価されている。

GTP を準備し、実施し、モニターしているのは、財政経済開発省である。プランのビジョン、目的、および戦略的目標を表 2.1.1 に掲げる。

このプランのもとに実施される開発プログラムでは公共サービスの質の向上に力を入れている。特にインフラ開発、社会開発と教育人材開発が強調されている。ただし、これらの開発には多額の予算および人的資源の導入が必要である。このため、国民貯蓄の増加を含む国内資金と人材資源の確保が重要な課題である。

表 2.1.1 成長と構造転換のためのプラン (GTP: 2010/11-2014/15)

項目	内容
プランを導くエチオピアのビジョン	「諸民族の参加と自由意志に基づく民主制、よいガバナンス、社会正義によって統治される国となり、貧困を脱し、2020～2023 には中所得国に到達すること」
経済部門のビジョン	「近代的、生産的かつ高技術を持つ農業部門、および経済を主導しうる工業部門を備えた経済を構築し、経済発展を持続させて、社会正義を確保し、国民の一人当たり所得を向上させて中所得国の水準に到達する」
目的	(1) 11%の成長を持続させミレニアム開発目標の達成 (2) 社会部門のミレニアム開発目標達成のための教育・医療サービス (3) 安定的で民主的な開発国家を通じた国家建設 (4) 安定的なマクロ経済枠組み
戦略的目標	(1) 高く公平な経済成長 (2) 経済成長の主源泉としての農業の維持 (3) 経済において工業が重要な役割を果たすための条件の創出 (4) インフラ開発 (5) 社会開発 (6) 能力開発とよいガバナンス (7) ジェンダーと若者

出典: GTP (2010/11-2014/15)

2.1.2 電力セクタープラン

電力セクターの戦略的方向性は、再生可能エネルギー開発、電力インフラの整備、エネルギー資源開発能力強化およびインフラの管理運営能力向上のための組織強化である。GTP 期間内において電力の需給ギャップが最小化されることが期待されている。

エネルギーセクターの主要開発目的は、国際標準に適合した安定的で信頼できる電力の供給により、エネルギー需要を満たすことである。この目的は、新規の水力発電所および地熱発電所の建設、地方電化拡充に資する既設送電網の拡張により達成される。余剰電力は周辺国へ輸出する。また、電力ロスの低減のための送配電網の近代化も掲げられている。

エネルギーセクターの主要開発目標を表 2.1.2 に示した。

表 2.1.2 GTP における電力セクターの開発目標

Description of Target	2009/10	2014/15
1. Hydroelectric power generating capacity (MW)	2,000	10,000
2. Total length of distribution lines (Km)	126,038	258,000
3. Total length of rehabilitated distribution lines (Km)	450	8,130
4. Reduce power wastage (%)	11.5	5.6
5. Number of consumers with access to electricity	2,000,000	4,000,000
6. Coverage of electricity services (%)	41	75
7. Total underground power distribution system (Km)	97	150

出典: GTP (2010/11-2014/15)

発電と送電分野の目標と実施戦略は以下の通りである。

発電部門：エチオピアの水力ポテンシャルは 45,000 MW、地熱発電ポテンシャルは 5,000 MW と推定されている。現在の開発量は水力の 2,000 MW に過ぎない。GTP 期間中に発電能力を 4 倍にすることを目標としている。戦略的目標は以下の 4 つである。(1) 水力、地熱、他の再生可能エネルギー（風力と太陽光）のベストミックス電源開発、(2) 電力ロスの削減と省エネの推進、(3) 発電投資コストと設備の運営管理費の削減、(4) 手ごろな価格による電力サービスの提供。

送電部門：本部門の目標は、安価で安定した電力供給に資するため信頼できる送配電網を建設することである。このための戦略的手段は、新規送電線の建設により農村部を系統に接続し、供給コストと電力ロスを軽減することである。

GTP の電力セクターの政策マトリックス（年度ごとの開発目標、実施担当機関、モニタリング評価方法）を表形式でまとめたものを表 2.1.3 に示す。

表 2.1.3 GTP における電力セクターの政策マトリックス

Objective	Output	Indicator	Base year (2009/10)	Annual Targets (20**/**)					Implementing Agency	Means of Verification
				10/11	11/12	12/13	13/14	14/15		
Increase quality electric power supply service coverage	Increased in electric power users	Number of consumers with access to electricity (in million)	2.03	2.13	2.33	3.70	3.30	4.00	MoWIE	MoWIE annual report
		Increased in electric power distribution	Coverage of electricity services (%)	41	50	55	65	70		
	Increased in construction of electric distribution station	Total length of distribution lines (Km)	126,038	1E+05	1E+05	2E+05	2E+05	3E+05		
		Total length of rehabilitated distribution lines (Km)	450	967	3,258	5,694	8,130	8,130		
Modernizing the distribution and transmission system, so as to reduce power losses to international benchmark levels	Increased in constructed electric sub-stations and gridlines their quality	reduce power wastage of power transmission lines (%)	11.0	10.8	8.5	5.6	5.6	5.6	MoWIE	MoWIE annual report
		Total underground power distribution system (Km)	97	53						
		High voltage (500 kV) electric grid line constructed (Km)				434	434	434		
		High voltage (400 kV) electric grid line constructed (Km)	710	710	714	1,082	1,377	1,377		
		Voltage grid lines with 230, 132, 66 kV constructed (Km)	10,730	11,397	12,954	13,604	14,404	15,189		
		Proportion of rehabilitated distribution sub-stations (%)		50	100					
		Reduce power wastage of power transmission and distribution sub-stations	5.34	4.5	4.0	4.0	4.0	3.0		
Increased electric power generation and production	Increased in generation and produced electric power	Power generating capacity (MW)	2,000	2,045	2,582	3,117	5,054	10,000	MoWIE	MoWIE annual report
		Electric power produced (GWh)	7,653	7,923	10,576	12,140	19,234	32,656		

出典: GTP (2010/11-2014/15)

2.2 電力セクター概要

2.2.1 電力セクター政策・法制度・戦略

エチオピア政府(当時)は、1994年3月に最初の「国家エネルギー政策」を発表した。これは現在もエチオピア政府の政策として有効であり、現在水エネルギー省により改定が進められている。現政策は、森林農業の促進やバイオマス燃料活用の有効性向上、薪や木炭等に依らない近代的な燃料への転換促進により、家庭用エネルギーの問題に対処することを目的としている。さらに、電力供給を増加させるため、主として水力発電に依存するとしながら、必要に応じて地熱や太陽光、風力、他の再生可能エネルギー資源を利用するとしている。また、エネルギー開発を経済的かつ環境的に持続可能なものにするため、産業、交通、他の主なエネルギー消費分野における省エネルギーの励行の必要性にも言及している。

2006年に、エチオピア政府により、5ヶ年(2005/06-2009/10)の開発戦略として「貧困削減のための加速的かつ持続可能な開発計画 (PASDEP)」が発表された。PASDEPは、20~30年の間に中所得国になることを目標とし、発電容量を791 MWから2,218 MWに増大、13,054kmに系統延伸させることにより電化率を16% (2005/06)から50% (2009/10)に上昇させるという、エネルギーセクターにおける目標を掲げている。送配電におけるエネルギー損失もPASDEP期間中に当時の19.5%から国際的な平均の13.5%に低下させることが計画された。これらにかかる総コストは、5年間で510億ブル(約53億米ドル)、ほぼエチオピアの年国家予算と同額と見積もられた。

PASDEPに続き、前2.1項で述べたGTPが2010/11から2014/15にわたる現在の国家政策であり、再生可能エネルギー資源による8,000MWの設備容量の増加をエネルギーセクターの目標として掲げている。表2.2.1にPASDEPとGTPの目標値を示す。

表 2.2.1 PASDEP/GTP (2005-2015)における電力セクター目標値

Item	2005/06	PASDEP 2005/06-2009/10	2012	GTP 2010/11-2014/15
Installed Capacity	791MW	2,218 MW (+1,427MW)	2,168 MW	10,000 MW
Electrification Rate	16%	50% (+34%)	17 %	75%
Length of Transmission/Distribution Line	-	13,054km	12,461 km	258,000 km
Electricity Loss	19.5%	13.5%	-	5.6%

出典: PASDEP/GTP (調査団要約)

国営の電力公社であるエチオピア電力公社 (EEPCo : 現在の EEP)は、「エチオピア電力系統拡大マスタープラン(Ethiopian Power System Expansion Master Plan)」を策定している。このマスタープランの目的は、今後 25 年間(2013 – 2037)における、エチオピアの発電・送電システム開発のための最少費用の電力系統拡大プログラムの更新である。

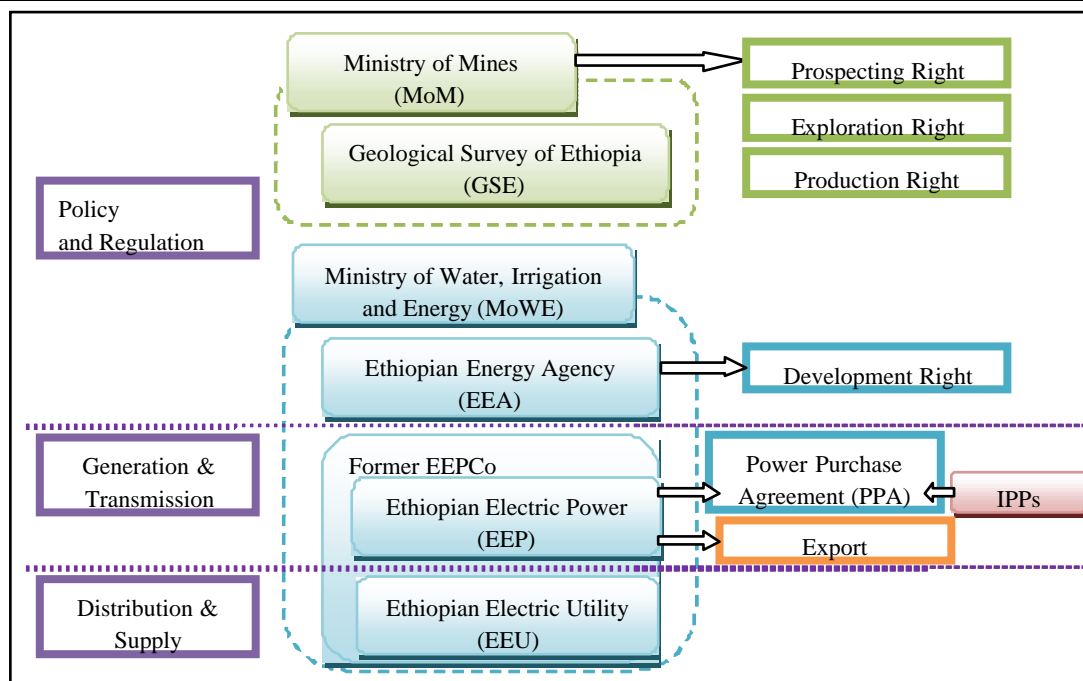
上記の国家政策に基づき、新たな水力発電所が建設・操業されており、向こう 10 年の間にも再生可能エネルギー資源による多くの発電所建設が計画されている。ハイレマリウム・デサレン (Hailemariam Desalegn) 現エチオピア首相も、2013 年 9 月 29 日のニューヨークでのスピーチにおいて、アフリカの転換の必要性について言及し、エネルギー開発の重要性について強調した。また同時にエチオピアにおいて 30 年の間に合計約 80,000MW の水力、地熱、風力、太陽光の開発を、エチオピアのみのためだけでなく、隣国のためにも開発すると明言した。

一方で、日本政府は、TICAD V において 2013 年 6 月 3 日に水力、太陽光、地熱を含む再生可能エネルギーへの投資促進を優先して支援を掲げた「横浜宣言 2013」を発表した。また日本の安倍晋三首相が 2014 年 1 月にエチオピアを訪問した際に、円借款再開の意志を表明し、その最初のプロジェクトとして Aluto-Langano 地熱発電所の拡張を想定していると共同コミュニケで発表した。また同時に安倍首相は、エチオピアにおける地熱エネルギーの開発の将来性への関心を表明した。

2.2.2 電力セクター関連組織

電力セクターは、エチオピア政府により管理されており、主に(i) 鉱山省 (MoM)、(ii)エチオピア地質調査所 (GSE)、(iii) 水・灌漑・エネルギー省 (MoWIE)、(iv) エチオピア電力公社 (EEP-EEU)、(v) 独立系発電事業者 (IPP)の 5 つの組織が本セクターに関与している。

図 2.2.1 に示すように MoM と MoWIE が政策決定と規制を実施し、GSE は地熱探査、EEP と IPP が電力供給システム (発電・送配電)の建設・運営を実施している。



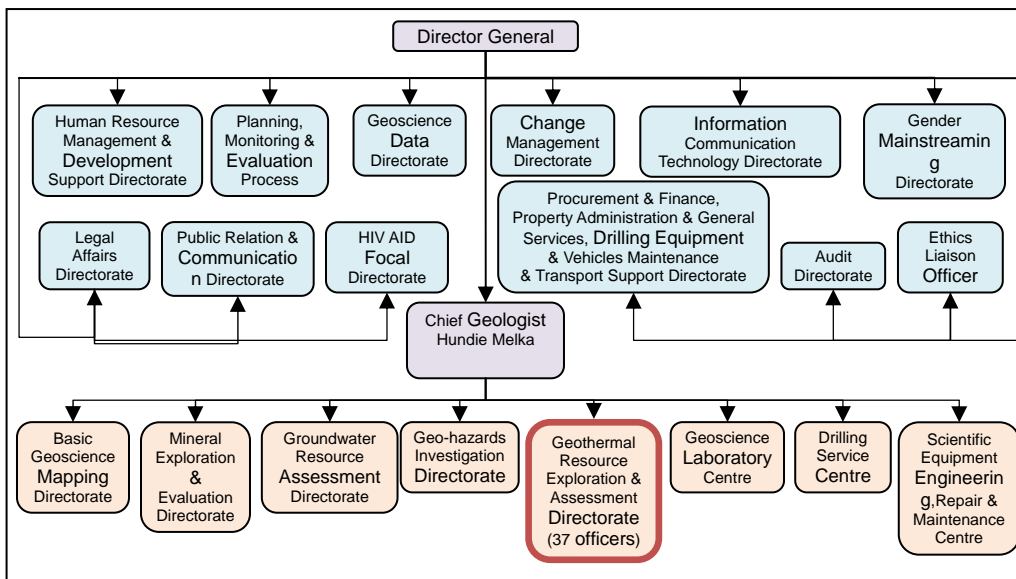
出典: 調査団

図 2.2.1 エチオピア電力セクター組織図

(1) エチオピア地質調査所 (GSE)

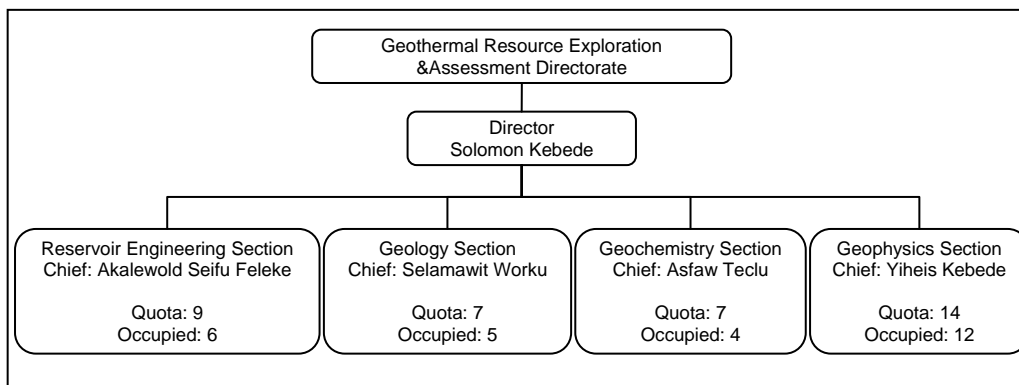
GSE は、エチオピアの鉱業探査の一部として、地熱資源探査を実施している。GSE は鉱山省下に設立され、1969 年から 1973 年に国連開発プログラム(UNDP)の援助でリフトバレーでの地表踏査を実施して以来、地熱探査に取り組んでいる。現在では、全ての掘削、井戸試験を含む科学的探査を担当している。Aluto-Langano サイトでは、開発段階に入ると EEP が GSE から引き継ぎ、発電所建設・運転を実施している。

図 2.2.2 および図 2.2.3 に、GSE および地熱資源探査・評価部の組織図を示す。GSE は、8 つの技術部署が存在し、所長およびその下のチーフ・ジオロジストにより束ねられている。その中で地熱資源探査・評価部が、地熱資源の探査に関する業務を担っている。



出典: GSE

図 2.2.2 GSE 組織図



出典: GSE

図 2.2.3 地熱資源探査・評価部組織図

(2) 鉱山省 (MoM)

MoM は、GSE 所長を通じたエチオピアにおける地熱開発の責任省庁である。省には、地熱を専門とする職員は存在しない。

(3) 水・灌漑・エネルギー省 (MoWIE)

MoWIE は、エチオピアの電力セクターの開発・拡大に関するエチオピア政府内の責任省庁である。MoWIE は、エネルギー分野と水供給分野の 2 つの分野に大きくわかれ、エネルギー分野には 6 つの課が存在する。エチオピアエネルギー局 (EEA) とエチオピア電力公社 (EEP および EEU) は MoWIE の管轄下にある。MoWIE 内のエネルギー関連部署は、エネルギー政策立案、実施、検証、監督を実施している。MoWIE はまた、電源開発と地方の省エネ技術の促進に関する研究・調査を実施している。

(4) エチオピアエネルギー局 (EEA)

1997年6月の関連布告 (Electricity Proclamation No. 86/1997)により、まずエチオピア電力局が自立した政府機関として設立された。その後 2000 年にエチオピア電力局はエチオピアエネルギー局 (EEA) に再編され、EEP を監督し、国内の電力セクターへの投資を管理する義務を負っている。また EEA は、ライセンス交付と安全・品質基準の確保を含む電力供給分野の運営の規制を担い、官民電力事業者による売電価格の設定を担っている。

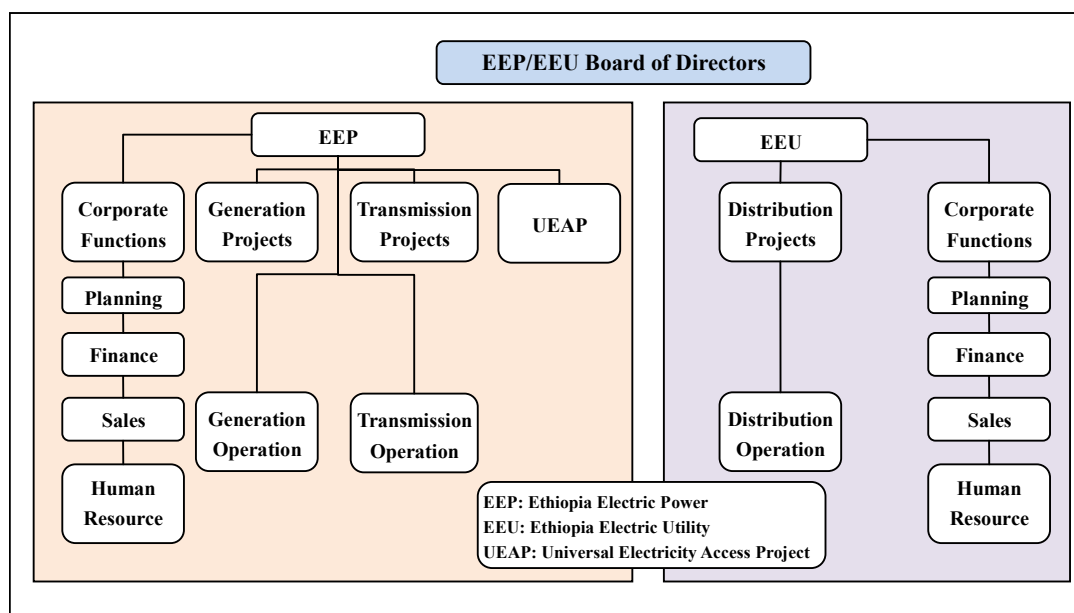
発電、送電、配電と売電を規制するため、EEA は電気料金の設定、電気販売契約 (PPA)の承認を含む民間事業者の電力システムへのアクセスの規制・監督を担っている。

(5) エチオピア電力公社(EEP および EEU)

エチオピア電力 (Ethiopian Electric Power: EEP)とエチオピア電力事業(Ethiopian Electric Utility: EEU)は、エチオピア国内で発電・送電・配電・売電を実施している唯一の政府機関である。2013年12月に前身である EEPCo から二つの組織に分離された。なお EEPCo の前身は、エチオピア電気電力局 (EELPA)であり、1956年に設立され1997年に EEPCo へ再編された経緯がある。

図 2.2.4 の組織図に示す通り、EEP は電力発電と送電を担い、EEU は配電を実施している。配電担当の EEU は、2013年8月にすでにインド企業3社と3,200万米ドルで配電サービスを実施する2年半の管理契約を結んでいる。コンソーシアムは、EEU の運営、電力配電、売電の効率性を向上させ、EEP に対しても発電および送電の効率性向上および能力開発を担っている。

Aluto-Lanagano や Corbetti 等の進行中のプロジェクトを含め、地熱開発プロジェクトは、EEP の発電プロジェクトが管理・運営しており、エチオピア全体の電源開発計画については、Corporate Function の中の発電部門が担当している。



出典: World Bank

図 2.2.4 EEP および EEU の組織図

2.2.3 電力需要予測

地熱発電開発マスタープラン策定のために、本調査において EEPCo による電力需要予測のレビューを実施した。最新の EEPCo による予測は、2011 年までの記録を基に、「エチオピア電力系統拡大マスタープラン」において実施されている。

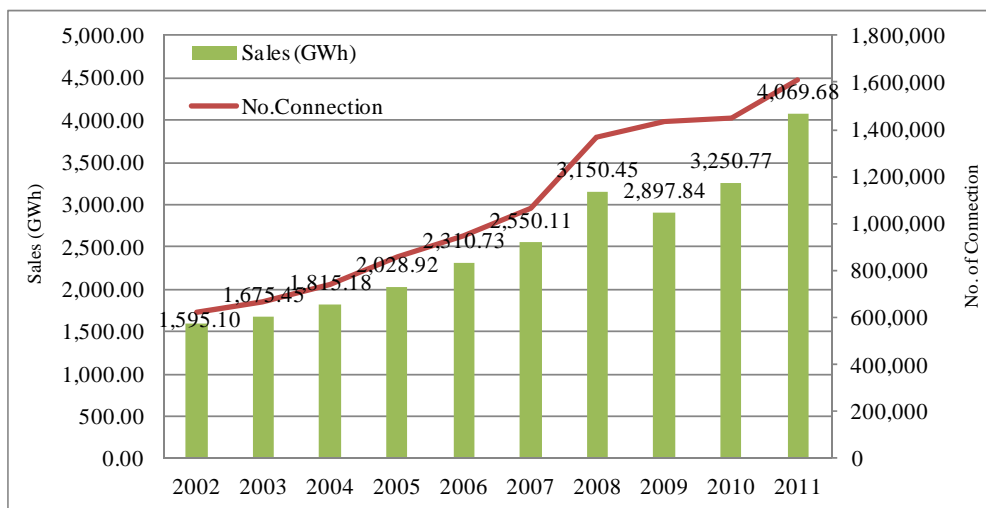
(1) 過去の電力需要変動

図 2.2.5 と図 2.2.6 に 2002 年から 2011 年の電力消費量を示す。総電力消費量は、2009 年に一時的に世界的な経済危機のため減少するものの、5~25%の高い成長率で増加しており、2011 年には 4,069.68GWh に達している。電力消費者は、表 2.2.2 に示すように料金カテゴリーに基づき以下の 5 つに分けられる。家庭用 (1,632.86GWh, 40%)、商業用 (955.56GWh, 23%)、公共用 (街路灯) (25.75GWh, 1%)、産業用-低電圧 (711.47 GWh, 18%)、産業用-高電圧(744.04GWh, 18%)。カテゴリー別では、全電化プログラム (UEAP)における電化率の上昇に伴う接続数の増加により、家庭用の電力需要が大きく増加しており、図 2.2.5 に示すように過去 10 年間に約 3 倍になっている。

表 2.2.2 電力消費量(GWh: 2007-2012)

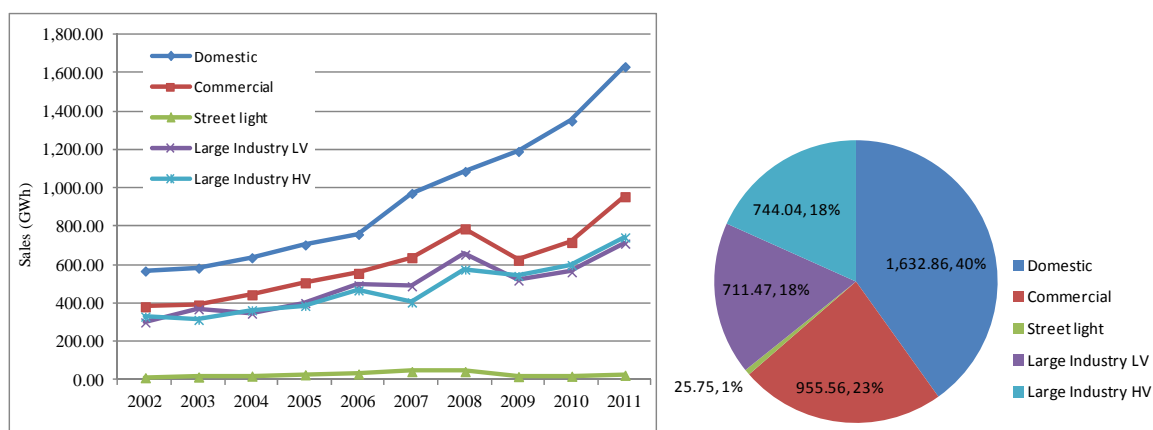
No.	Category	Type	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
1	Domestic	Sales (GWh)	568.66	583.92	637.94	704.58	759.76	973.11	1,087.42	1,191.68	1,350.34	1,632.86
		No.Connection	535,254	571,975	637,016	739,009	820,514	923,390	1,177,627	1,250,802	1,263,655	1,381,963
		kWh/Connection	1,062	1,021	1,001	953	926	1,054	923	953	1,069	1,182
2	Commercial	Sales (GWh)	381.95	391.32	444.81	507.70	556.73	638.24	788.08	625.12	717.42	955.56
		No.Connection	79,731	83,806	91,863	104,331	114,281	125,853	166,233	165,351	166,166	202,475
		kWh/Connection	4,791	4,669	4,842	4,866	4,872	5,071	4,741	3,781	4,317	4,719
3	Street light	Sales (GWh)	12.55	16.60	21.18	28.35	32.13	44.80	44.94	18.79	20.38	25.75
		No.Connection	985	1,139	1,267	1,546	1,782	2,105	2,455	2,635	1,959	3,013
		kWh/Connection	12,743	14,574	16,717	18,338	18,030	21,283	18,305	7,131	10,403	8,546
4	Large Industry LV	Sales (GWh)	301.02	369.65	346.88	401.46	494.06	489.16	654.01	519.24	562.93	711.47
		No.Connection	7,957	8,204	8,871	10,036	11,422	12,083	18,432	18,104	14,682	21,071
		kWh/Connection	37,831	45,057	39,103	40,002	43,255	40,483	35,482	28,681	38,342	33,765
5	Large Industry HV	Sales (GWh)	330.92	313.96	364.37	386.83	468.05	404.80	576.00	543.01	599.70	744.04
		No.Connection	96	93	101	122	131	154	200	169	114	163
		kWh/Connection	3,447,106	3,375,914	3,607,624	3,170,738	3,572,901	2,628,571	2,880,000	3,213,077	5,260,526	4,564,663
Sub Total	Sales (GWh)	1,595.10	1,675.45	1,815.18	2,028.92	2,310.73	2,550.11	3,150.45	2,897.84	3,250.77	4,069.68	
	Growth Rate (%)	-	5.04%	8.34%	11.78%	13.89%	10.36%	23.54%	-8.02%	12.18%	25.19%	
	No.Connection	624,023	665,217	739,118	855,044	948,130	1,063,585	1,364,947	1,437,061	1,446,576	1,608,685	
	kWh/Connection	2,556.16	2,518.65	2,455.87	2,372.88	2,437.14	2,397.66	2,308.11	2,016.50	2,247.22	2,529.82	

出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2013 (調査団加筆修正)



出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPSCO, 2014 (調査団編集)

図 2.2.5 電力消費量及び顧客数



出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPSCO, 2014 (調査団編集)

図 2.2.6 カテゴリー別電力消費量の推移(左) と 2011 年における内訳

表 2.2.3 は、2002～2011 年の間の電力消費量と発電量を系統の最大負荷と稼働率とともに示している。2011 年には、全発電所設備容量(合計 2,168MW)により 4,954GWh が発電された。エネルギー損失は 2002～2011 年の間で 10～20% であり、送配電ロスにより比較的高くなっている。系統最大負荷は、過去 10 年間で 2 倍以上増加しており、2011 年に 914 MW を記録している

表 2.2.3 電力発電量及び最大負荷 (2002-2011 年)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Energy Sales (GWh)	1,595.10	1,675.45	1,815.18	2,028.92	2,310.73	2,550.11	3,150.45	2,897.84	3,250.77	4,069.68
Generation Sent-Out (GWh)	1,784	2,028	2,278	2,540	2,845	3,269	3,502	3,665	3,946	4,954
Energy Loss (%)	10.6%	17.4%	20.3%	20.1%	18.8%	22.0%	10.0%	20.9%	17.6%	17.9%
System Maximum Demand (MW)	391	405	454	521	587	623	675	673	767	914
System Load Factor (%)	52%	57%	57%	56%	55%	60%	59%	62%	59%	62%

出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPSCO, 2014 (調査団編集)

東アフリカ電力プール (EAPP)の枠組みとエチオピアと周辺国の電力販売契約 (PPA)に基づき、エチオピアは、ジブチ、ケニア、スーダン等への周辺国へ電力の輸出を行っている。電力販売（電力量）に関する取り決めの概要は以下の通り。

- ケニア: 400 MW 以上 (約 3000 GWh)
- ジブチ: 100 MW (約 570 GWh)
- スーダン: 100 MW 以上 (約 880 GWh)
- 南スーダン/エジプト: 200 MW 以上 (約 1,300 GW)
- タンザニア: 200 MW 以上 (約 1,300 GWh)

(2) 電力需要予測

上述したように、電力需要は、過去 10 年間に高い成長率で増加している。電力需要は、一般消費者の増加だけでなく、鉄道、大規模灌漑施設、新規産業、電力輸出等の新たな消費分野のため、将来にわたり増加が見込まれている。EEPCo マスタープランは、2013 年から 2037 年の期間の電力需要予測を実施しており、基準、高水準、低水準ケースについて検討している。

EEPCo マスタープランは、家庭用、商業用、産業用、灌漑等のそれぞれの消費カテゴリー別に回帰分析負荷予測とエンドユーザーモデルの組み合わせを利用して、予測を行っている。

エチオピアにおける総電力需要量は、表 2.2.4 に示すように 2012 年の 6,425 GWh から 2037 年には 111,388 GWh になると高い成長率が予測されている。取り分け、産業分野や灌漑分野の大きな成長や新規鉄道等の新たな電力需要により最初の 10 年間の伸び率が大きい。

表 2.2.4 カテゴリー別電力需要予測 (基準ケース)

Year	Sales Forecast (GWh)												Total Sales	Total Losses	Generation Sent-out
	Domestic	UAEP	Commercial	Street Lighting	LV Industrial	HV Industrial	New Industry	Transport (Railway)	Irrigation	Sugar					
2012	1,912	22	1,193	33	711	744	302	-	-	5	4,922	1,503	6,425		
2013	2,192	206	1,350	35	711	744	1,036	-	-	49	6,323	1,910	8,233		
2014	2,358	401	1,529	37	711	744	2,376	-	156	101	8,413	2,513	10,926		
2015	2,512	605	1,736	39	711	744	4,303	404	389	101	11,544	3,143	14,687		
2016	2,648	821	1,928	41	711	744	6,723	633	778	101	15,128	3,595	18,723		
2017	2,761	1,051	2,143	44	711	744	9,729	938	1,167	101	19,389	3,972	23,361		
2018	2,853	1,300	2,383	46	711	744	12,638	1,062	1,561	101	23,399	4,097	27,496		
2019	2,926	1,556	2,646	48	711	744	14,805	1,185	2,214	101	26,936	4,312	31,248		
2020	2,982	1,845	2,937	51	711	744	16,461	1,477	2,866	101	30,175	4,790	34,965		
2021	3,025	2,144	3,255	54	711	744	18,393	1,642	3,519	101	33,588	5,287	38,875		
2022	3,058	2,502	3,602	57	1,072	1,153	20,324	1,818	4,172	101	37,859	5,909	43,768		
2023	3,082	2,936	3,980	60	1,466	1,602	20,324	2,162	4,824	101	40,537	6,273	46,810		
2024	3,100	3,460	4,389	64	1,896	2,095	20,324	2,373	5,477	101	43,279	6,639	49,918		
2025	3,114	4,039	4,833	67	2,362	2,633	20,324	2,583	6,130	101	46,186	7,024	53,210		
2026	3,124	4,708	5,313	71	2,867	3,219	20,324	2,849	6,782	101	49,358	7,441	56,799		
2027	3,131	5,455	5,833	75	3,412	3,855	20,324	3,135	7,435	101	52,756	7,883	60,639		
2028	3,137	6,266	6,393	79	3,998	4,542	20,324	3,456	8,088	101	56,384	8,425	64,809		
2029	3,141	7,128	6,996	83	4,625	5,282	20,324	3,789	8,740	101	60,209	8,997	69,206		
2030	3,144	8,029	7,642	88	5,294	6,076	20,324	4,123	9,393	101	64,214	9,595	73,809		
2031	3,146	8,939	8,331	92	6,006	6,924	20,324	4,542	10,046	101	68,451	10,228	78,679		
2032	3,148	9,871	9,065	98	6,758	7,825	20,324	4,994	10,699	101	72,883	10,890	83,773		
2033	3,149	10,822	9,842	103	7,551	8,779	20,324	5,448	11,351	101	77,470	11,576	89,046		
2034	3,150	11,789	10,668	109	8,384	9,785	20,324	5,923	11,967	101	82,200	12,283	94,483		
2035	3,150	12,772	11,536	115	9,253	10,841	20,324	6,398	12,583	101	87,073	13,011	100,084		
2036	3,151	13,773	12,444	121	10,157	11,943	20,324	6,880	13,199	101	92,093	13,761	105,854		
2037	3,151	14,485	13,391	128	11,093	13,088	20,324	7,331	13,816	101	96,908	14,480	111,388		

出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014

エチオピアにおける最大負荷は、上記の総電力消費量の予測から見積もられている。最大負荷は、表 2.2.5 に示すように基準ケースにおいて 2012 年の 1,186 MW から 2037 年には 21,731 MW になる

と見積もられている。平均伸び率は、12.3%である。

表 2.2.5 最大負荷予測 (基準ケース)

Year	Max Demand			
	Max Demand at Consumer Level (MW)	Power Loss (%)	Max Demand (MW)	Power Load Factor (%)
2012	847	28.6%	1,186	61.8%
2013	1,087	28.3%	1,516	62.0%
2014	1,436	27.9%	1,992	62.6%
2015	1,951	26.1%	2,641	63.5%
2016	2,543	23.8%	3,335	64.1%
2017	3,229	21.4%	4,107	64.9%
2018	3,876	19.2%	4,795	65.5%
2019	4,499	18.1%	5,496	64.9%
2020	5,092	18.1%	6,219	64.2%
2021	5,704	18.1%	6,962	63.7%
2022	6,439	18.0%	7,848	63.7%
2023	6,976	18.0%	8,504	62.8%
2024	7,527	18.0%	9,176	62.1%
2025	8,108	17.9%	9,881	61.5%
2026	8,738	17.9%	10,644	60.9%
2027	9,410	17.9%	11,455	60.4%
2028	10,123	17.9%	12,335	60.0%
2029	10,870	18.0%	13,256	59.6%
2030	11,647	18.1%	14,213	59.3%
2031	12,461	18.1%	15,215	59.0%
2032	13,306	18.1%	16,254	58.8%
2033	14,176	18.2%	17,322	58.7%
2034	15,063	18.2%	18,410	58.6%
2035	15,973	18.2%	19,526	58.5%
2036	16,906	18.2%	20,669	58.5%
2037	17,777	18.2%	21,731	58.5%

出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014

前頁で述べたように、エチオピア政府は、周辺国と電力販売を取り決めている。輸出の最大需要と消費量は、表 2.2.6 に示すように予測されている。電力輸出量は、2013 年の 1,445 GWh から 2037 年には 35,302 GWh に伸びると予測されている。

表 2.2.6 電力輸出：最大負荷及び電力量予測 (基準ケース)

Year	Coincident Export Maximum Demand (MW)							Energy Export (GWh)						
	Djibouti	Sudan	Sudan and Egypt	Kenya	Kenya II	Tanzania	Total	Djibouti	Sudan	Sudan and Egypt	Kenya	Kenya II	Tanzania	Total
(MW)	100	100	200-3100	400	200-1200	200-400		100	100	200-3100	400	200-1200	200-400	
Load factor	65%	100%	75%	85%	75%	75%		65%	100%	75%	85%	75%	75%	
2012	40	100	0	0	0	0	140	395	68	0	0	0	0	463
2013	65	100	0	0	0	0	165	569	876	0	0	0	0	1,445
2014	65	100	0	0	0	0	165	569	876	0	0	0	0	1,445
2015	65	100	150	0	0	0	315	569	876	1,314	0	0	0	2,759
2016	65	100	150	0	0	0	315	569	876	1,314	0	0	0	2,759
2017	65	100	450	340	0	0	955	569	876	3,942	2,978	0	0	8,365
2018	65	100	450	340	0	0	955	569	876	3,942	2,978	0	0	8,365
2019	65	100	600	340	0	0	1105	569	876	5,256	2,978	0	0	9,679
2020	65	100	600	340	0	150	1255	569	876	5,256	2,978	0	1,314	10,993
2021	65	100	900	340	150	150	1705	569	876	7,884	2,978	1,314	1,314	14,935
2022	65	100	900	340	150	150	1705	569	876	7,884	2,978	1,314	1,314	14,935
2023	65	100	1200	340	150	300	2155	569	876	10,512	2,978	1,314	2,628	18,877
2024	65	100	1200	340	300	300	2305	569	876	10,512	2,978	2,628	2,628	20,191
2025	65	100	1500	340	450	300	2755	569	876	13,140	2,978	3,942	2,628	24,133
2026	65	100	1500	340	450	300	2755	569	876	13,140	2,978	3,942	2,628	24,133
2027	65	100	1650	340	600	300	3055	569	876	14,454	2,978	5,256	2,628	26,761
2028	65	100	1650	340	750	300	3205	569	876	14,454	2,978	6,570	2,628	28,075
2029	65	100	1650	340	900	300	3355	569	876	14,454	2,978	7,884	2,628	29,389
2030	65	100	1950	340	900	300	3655	569	876	17,082	2,978	7,884	2,628	32,017
2031	65	100	1950	340	900	300	3655	569	876	17,082	2,978	7,884	2,628	32,017
2032	65	100	2175	340	900	300	3880	569	876	19,053	2,978	7,884	2,628	33,988
2033	65	100	2250	340	900	300	3955	569	876	19,710	2,978	7,884	2,628	34,645
2034	65	100	2250	340	900	300	3955	569	876	19,710	2,978	7,884	2,628	34,645
2035	65	100	2325	340	900	300	4030	569	876	20,367	2,978	7,884	2,628	35,302
2036	65	100	2325	340	900	300	4030	569	876	20,367	2,978	7,884	2,628	35,302
2037	65	100	2325	340	900	300	4030	569	876	20,367	2,978	7,884	2,628	35,302

出典：エチオピア電力系統拡大マスタープラン，EEPCo，2014

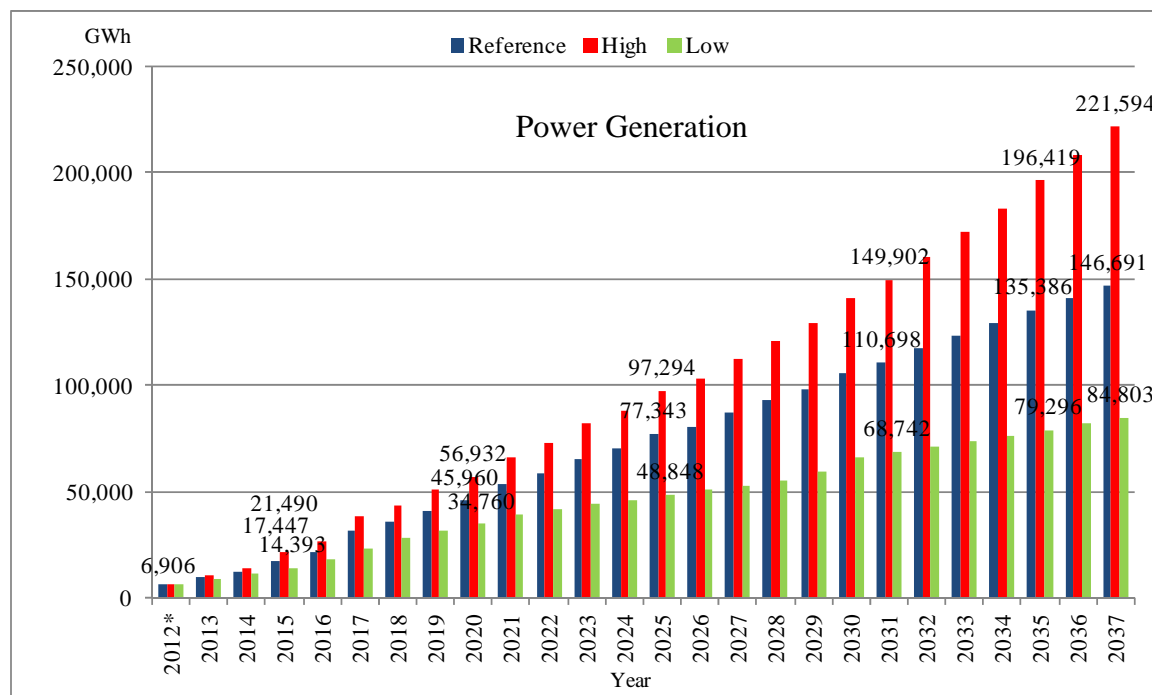
表 2.2.7 に、発電段階における輸出分を含むそれぞれのケースの全体の電力負荷予測を示し、図 2.2.7 と図 2.2.8 に、それぞれ輸出分を含む発電量予測、最大負荷予測のグラフを示す。基準ケースにおける発電量と最大負荷は、それぞれ 2037 年までに 146,691 GWh、25,761 MW に達すると予測されている。

表 2.2.7 輸出分を含む電力需要及び最大負荷予測 (2012-2037 年)

Year	Total Energy Requirement (GWh)			Total Peak Demand (MW)		
	Reference	High	Low	Reference	High	Low
2012*	6,906	6,906	6,906	1,378	1,378	1,378
2013	9,680	10,763	9,034	1,681	1,884	1,575
2014	12,371	14,171	11,272	2,157	2,483	1,975
2015	17,447	21,490	14,393	2,956	3,560	2,499
2016	21,482	26,462	18,376	3,650	4,392	3,139
2017	31,729	38,469	23,700	5,062	6,037	3,938
2018	35,862	43,582	28,411	5,750	6,872	4,651
2019	40,929	50,918	32,045	6,601	8,037	5,270
2020	45,960	56,932	34,760	7,474	9,080	5,798
2021	53,811	66,454	39,073	8,667	10,525	6,506
2022	58,703	73,037	42,220	9,553	11,685	7,094
2023	65,689	82,171	44,006	10,659	13,113	7,510
2024	70,110	88,210	45,748	11,481	14,206	7,927
2025	77,343	97,294	48,848	12,636	15,671	8,504
2026	80,933	103,018	50,790	13,399	16,788	8,964
2027	87,401	112,572	52,838	14,510	18,373	9,448
2028	92,885	120,831	55,044	15,540	19,854	9,970
2029	98,597	129,718	59,968	16,611	21,440	10,812
2030	105,827	141,098	66,263	17,868	23,331	11,817
2031	110,698	149,902	68,742	18,870	24,955	12,392
2032	117,761	160,036	71,300	20,134	26,756	12,983
2033	123,693	172,152	73,929	21,277	28,808	13,587
2034	129,127	182,951	76,591	22,365	30,726	14,193
2035	135,386	196,419	79,296	23,556	32,972	14,809
2036	141,157	208,659	82,045	24,699	35,105	15,433
2037	146,691	221,594	84,803	25,761	37,341	16,061

*Actual record in 2012

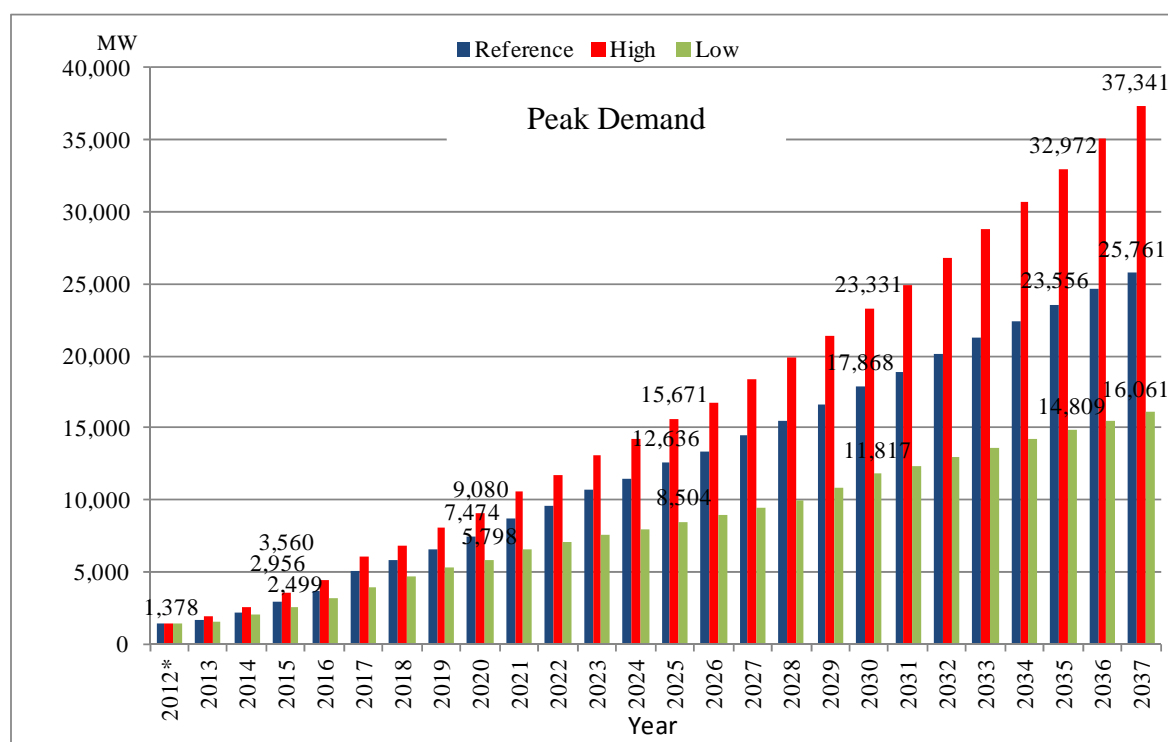
出典：エチオピア電力系統拡大マスタープラン，EEPCo，2014



* 2012 年は実測値

出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014

図 2.2.7 輸出分を含む電力必要発電量予測 (2012-2037 年)



* 2012 年は実測値

出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014

図 2.2.8 輸出分を含む最大負荷予測 (2012-2037 年)

2.2.4 発電計画

(1) 既存発電所

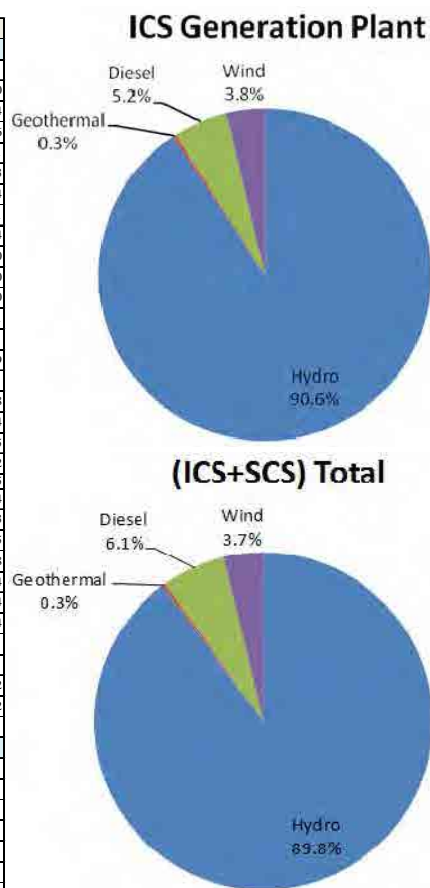
エチオピアには、系統に連結されている相互連結システム (ICS)と連結していない自己完結システム (SCS)の2つの電力供給システムが存在する。

表 2.2.8 に ICS と SCS の既存の設備容量を示す。EEPCo の Facts in Brief 2011/12 や策定されたマスタープランによると、2012 年における ICS と SCS の総発電容量は、それぞれ 2,140.2 MW と 26.8 MW であり、合計 2,167 MW である。ICS 内の発電所は、水力発電所 12 ヶ所 (1,940.6 MW)、ディーゼル発電所 13 ヶ所 (112.3 MW)、地熱発電所 1 ヶ所 (7.3 MW)、風力発電所 2 ヶ所 (81.0 MW) からなり、約 6,000 GWh の発電を行っている。表 2.2.9 に過去 5 年間における発電量を示す。Gigel Gibe II や Tana Beles、Tekeze、Amerti Neshe 等の新たな水力発電所により、発電量は過去 2 年間において大きく増加している。

Aluto-Langano 地熱発電所は、現在エチオピアにおける唯一の地熱発電所であり、7.3 MW のバイナリー発電が 1999 年から開始されている。発電所は、運転開始から 18 ヶ月後には交換器配管からの漏水により運転を停止した。発電所は、修復されたものの、現在の発電能力は 5 MW に減少している。2014 年 4 月時点では、メンテナンス上の問題により、発電を停止していた。

表 2.2.8 2012 年 7 月時点の ICS と SCS の設備容量

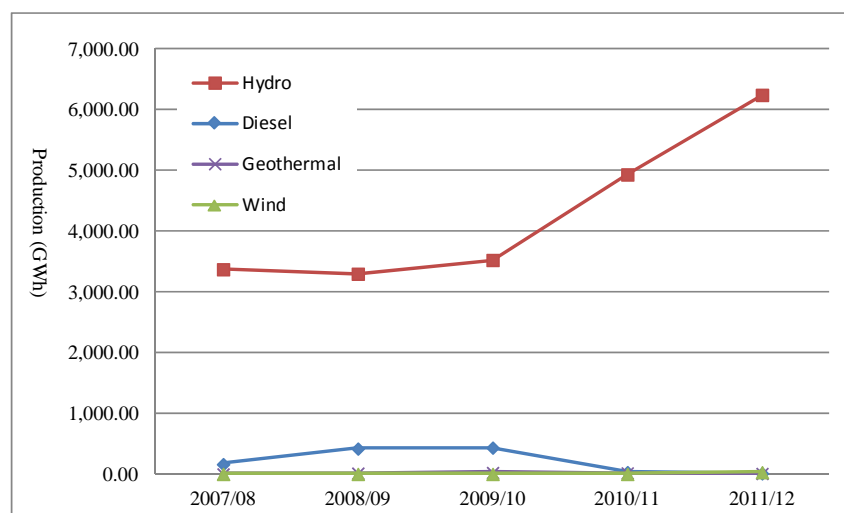
No.	Power Plant	Capacity (MW)	Initial Year
ICS Generation Plant			
Hydro		1940.6	
1	Koka	43.2	1960
2	Tis Abay I	11.4	1964
3	Awash II	32.0	1966
4	Awash III	32.0	1971
5	Finchaa	134.0	1973/2003
6	Meleka Wakana	153.0	1988/refurb in 2014
7	Tis Abay II	73.0	2001
8	Gigel Gibe	184.0	2004
9	Gigel Gibe II	420.0	2010
10	Tana Beles	460.0	2010
11	Tekeze	300.0	2010
12	Amerti Neshe	98.0	2011
Geothermal		7.3	
1	Aluto Langano	7.3	1999
Diesel		112.3	
1	Alemaya	2.3	1958
2	Ghimbi	1.1	1962/1984
3	Dire Dawa (mu)	4.5	1965
4	Axum	3.2	1975/1992
5	Shire	0.8	1975/1991/1995
6	Nekempt	1.1	1984
7	Mekelle	5.7	1984/1991/1993
8	Adigrat	2.5	1992/1993/1995
9	Adwa	3.0	1998
10	Kaliti	14.0	2004
11	Dire Dawa	38.0	2004
12	Awash 7 Kilo	35.0	2004
13	Jimma	1.1	
Wind		81.0	
1	Ashgeda	30.0	Jan/2012
2	Adama I	51.0	Mar/2012
ICS Total		2,141.2	
SCS Generation Plant			
Hydro		6.15	
1	Yadot	0.35	
2	Sor	5.00	
3	Dembli	0.80	
Diesel		20.65	Isolated diesel power plants
SCS Total		26.8	
(ICS+SCS) Total		2,168.0	



出典: Facts in Brief 2011/12, EEPCo

表 2.2.9 発電量(GWh)

System	Generation Type	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12
ICS	Hydro	3,353.60	3,277.14	3,503.79	4,922.00	6,239.29
	Diesel	133.13	381.78	407.41	14.00	0.00
	Geothermal	-	13.87	23.61	18.00	7.98
	Wind	-	-	-	-	29.40
	Sub-total	3,486.73	3,672.79	3,934.81	4,954.00	6,276.67
SCS	Hydro	16.49	19.23	20.11	9.00	1.84
	Diesel	28.48	35.77	26.15	17.00	11.07
	Sub-total	44.97	55.00	46.26	26.00	12.91
Total	Hydro	3,370.09	3,296.37	3,523.90	4,931.00	6,241.13
	Diesel	161.61	417.55	433.56	31.00	11.07
	Geothermal	-	13.87	23.61	18.00	7.98
	Wind	-	-	-	-	29.40
	Total	3,531.70	3,727.79	3,981.07	4,980.00	6,289.58



出典: Facts in Brief 2011/12, EEPCo

(2) 計画及びコミット発電所 (地熱以外)

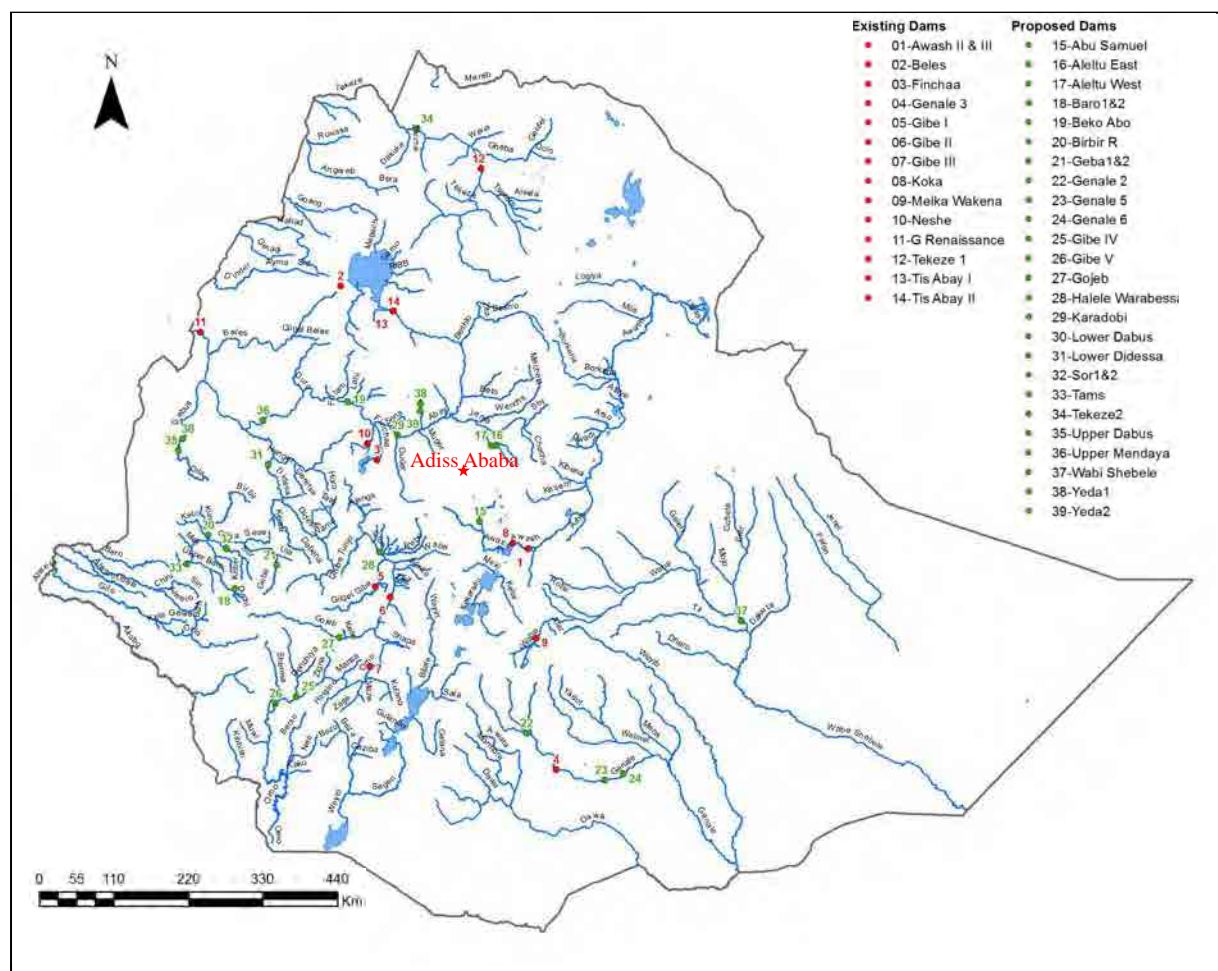
1) 水力発電所

エチオピアは、非常に高い水力発電のポテンシャルを有している。過去5年間(2009-2013年)において、合計約1,200 MWの4ヶ所の水力発電所が運転開始し、エチオピアの全体の設備容量が3倍になった。エチオピアには12ヶ所の既設発電所(合計1,800 MW)が存在し、改修中の発電所が1ヶ所ある。図2.2.9に既存、コミット、計画段階の水力発電所の位置図を示す。Gilgel Gibe IIIとGenale Dawa III、Grand Renaissanceの3ヶ所の水力発電所は建設中である。これらの建設が計画通り5年の間に完了すると、水力発電所の合計設備容量は、2018年には約10,000 MWになる見込みである。3ヶ所の建設中水力発電所の状況は以下の通りである。

Gilgel Gibe III: ダム高243 mのダム工事は2006年に開始され、2014年10月時点で88%の進捗状況であり、本年度末には92%に到達すると予想されている。計画されている10基のタービンのうち、最初の1基は、2014年9月に187 MWの発電が予定され、残りの9基のタービンについては、ダムが運用可能になり、1,870 MWの発電をするまで約1年間かかる見込みである。

Genale Dawa III: ダム建設は、2012年半ばから開始され、2013年末では約25%が、2014年10月時点では60%が完了している。2015年までに完成し、254 MWの発電を開始する予定である。

Grand Renaissance: ダム建設は2011年8月から開始された。6,000 MWの容量を持つこのダムは、完成時にはアフリカで最大、世界で8番目に大きい水力発電所になる。建設工事の進捗は、2013年末で20%、2014年10月時点で40%である。初期段階の操業は、2015年6月に予定され、700 MWの発電が期待されている。残りは2018年に完成し合計6,000 MWの発電が開始される予定である。



出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014

図 2.2.9 既存・コミット・計画水力発電所位置図

今後長期にわたり、計画されている多くの水力発電所プロジェクトが存在する。表 2.2.10 に建設中のプロジェクトに加え、28の開発計画(合計約12,400 MW)を示す。EEPCoの新たなマスタープランでは、それぞれの計画されている水力発電所の平均平準化コストが見積もられ、計画水力発電所の順位付けに使用されている。

表 2.2.10 コミット・計画段階の水力発電所

Hydro Power Plant		Inst. (MW)	Site (MW)	Avil. Cap. (MW)	Ave. Gen. (GWh)	COD
Hydro - Under Construction		8124	8124	6274	21826	
1	Gilgel Gibe III (enters 2014)	748	748	427	2148	2014
-	Gilgel Gibe III (enters 2015)	1122	1122	640	3222	2015
2	Genale Dawa III	254	254	250	1695	2015
3	Grand Renaissance (enters 2015)	500	500	413	1230	2014
-	Grand Renaissance (enters 2017)	5500	5500	4544	13531	2018
Hydro - Candidate		12406.9	12406.9	12062.6	59279.3	
1	Sor II	5	5	4.8	38.5	2017
2/3	Geba I + Geba II	371.5	371.5	343.6	1709.4	2020
4	Genale VI	246	246	237.2	1532.4	2020
5	Gibe IV	1472	1472	1409.6	6146.4	2020
6	Upper Dabus	326	326	326	1460.3	2020
7	Karadobi	1600	1600	1493.9	7857.2	2021
8	Beko Abo	935	935	935	6632.2	2022
9	Upper Mendaya	1700	1700	1700	8582.3	2023
10	Birbir R	467	467	443.7	2724.1	2020
11/12	Halele + Werabesa	436	436	417.2	1972.8	2020
13	Genale V	100	100	100	574.6	2020
14/15	Yeda I + Yeda II	280	280	275.9	1089.4	2020
16	Gibe V	660	660	603.5	1904.9	2020
17/18	Baro I + Baro II	645	645	645	2614.3	2020
19	Genji	216	216	214	910.2	2020
20	Tekeze II	450	450	450	2720.7	2020
21	Lower Didessa	550	550	550	975.6	2020
22	Gojeb	150	150	134.2	561.7	2020
23	Aleltu East	189	189	173.8	804.1	2020
24	Tams	1000	1000	1000	6057.2	2020
25	Abu Samuel	6	6	6	15.7	2020
26	Aleltu West	264.6	264.6	262.7	1067.3	2020
27	Wabi Shebele	87.8	87.8	86.5	691	2020
28	Lower Dabus	250	250	250	637	2020

出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014 (調査団編集)

2) 風力発電所

エチオピア政府は、GTP 期間末までに 890 MW の風力エネルギー発電を計画している。2009 年にエチオピアで最初の風力発電所 (風力タービン 34 基 x 1.5 MW) が Adama に建設され、2013 年には Mekelle から 10 km 離れた Ashegoda に風力発電所(120 MW)が完成した。Ashegoda 発電所建設にかかる約 2.1 億ユーロは、フランス BNP Paribas 銀行とフランス開発局、EEP (EEPCo 当時) により出資された。また現在、既設 Adama の拡張プロジェクトである Adama II 風力発電所プロジェクトが進行中である。EEP は、本プロジェクトにおいて中国 GCOC 社および HydroChina 社と風力タービン 102 基 x 1.5 MW、合計設備容量 15 MW の風力発電所建設の合意書に署名した。プロジェクトは、3.4 億米ドル費用を要し、中国輸出入銀行がソフトローンを提供する。

エチオピアには、10 GW の風力ポテンシャルが見積もられている。Hydrochina 社は、MoWIE と協力し、2012 年に中国政府の資金援助により、「風力発電及び太陽光発電マスタープラン」を策定した。マスタープランでは、主に高地に位置する 51 ヶ所の風力発電所候補を特定した。

表 2.2.11 既設およびコミット風力発電所

No.	Wind Farm	Capacity. (MW)	Generation. (GWh)	Annual Load Factor	COD
Existing Wind Farm		171	428		
1	Adama I	51	150	33.6%	2012
2	Ashegoda (enters 2012)	30	70	26.5%	2013
-	Ashegoda (enters 2014)	90	208	26.4%	2014
Committed Wind Farm		153	424		
1	Adama II	153	424	31.6%	2016
Total		324	852		

出典: EEPCo (調査団編集)

3) 太陽光発電所

エチオピアは低緯度に位置し、日光がほぼ垂直入射であるため、一般的に太陽光放射資源に恵まれているが、現在太陽光発電は、地方の電気通信施設などの非連結システムでのみ使用されている。地方電化計画では、太陽光発電を使用する計画があるが、ICS に連結する計画はなく、現在のところコミットされている発電所もない。

Hydrochina 社の実施した「風力発電及び太陽光発電マスタープラン」を含む調査で解析が行われ、ポテンシャルサイトが特定され、表 2.2.12 に示す太陽光発電所候補地が EEPCo マスタープランで検討されている。マスタープランでは、太陽光発電所 1 サイト毎に 100 MW の発電を期待している。

表 2.2.12 太陽光発電候補サイト

No.	Wind Farm	GHI (kWh/m ²)	Yield (kWh/kWp/year)	Energy Output MWh/year	CF (%)	Solar Plant Size (MW)
Candidate Site						
1	Mekele	2391.2	20,542	205,420	23.4%	100
2	Jijiga	2379.7	20,184	201,840	23.0%	100
3	Addis Ababa	1934.5	16,639	166,390	19.0%	100
4	Border Ethiopia – Kenya	1903.6	15,561	155,610	17.8%	100
5	Border Ethiopia – Somalia	2086.0	16,697	166,697	19.1%	100

GHI: 包括的平面日射量, CF: 設備稼働率

出典: EEPCo (調査団編集)

4) バイオマスエネルギー

エチオピアでは、薪、農作物かす、動物の肥やしなどのバイオマスを電気のかわりに、日常生活で使用する基本的なエネルギーとして活用している。2ヶ所の Bamza と Meikasedi においてバイオマス火力発電所が候補プラントとして計画されている。燃料としてバガセ(Bagasse: サトウキビの搾りかす)を利用するため、非収穫期の4ヶ月は利用不可能である。表 2.2.13 に計画されているバイオマス発電所を示す。

表 2.2.13 計画されているバイオマスエネルギー発電所

Biomass Power Plant	Bamza	Meikasedi
Rated Power (MW)	120	138
Nominal Output (MW)	60	60
First Year of Operation year	2016	2016
Fuel Type	Wood Fue, Bagasse	Prosopis, Bagasse

出典: EEPCo (調査団編集)

5) 廃棄物発電

EEP (EEPCo 当時) は、2013 年に Cambridge Industries Ltd 社とアディス・アベバの Repi 地域における 50 MW の廃棄物発電所の設計・施工のターンキー契約を締結した。これは、エチオピアにおける最初の廃棄物発電所になる予定である。また Cambridge Industries Ltd 社は、詳細なフィージビリティ調査を実施し、エチオピア中の Dire Dawa、Adama、Mekelle、Gonder、Behar Dar、Hawasa、Jimma を含む様々なサイトの次期プロジェクトを提案している。表 2.2.14 にコミットされている Repi 廃棄物発電所の概要を示す。

表 2.2.14 計画廃棄物発電所

Item	Addis Ababa Waste Energy Plant
Rated Power (MW)	50
Nominal Output (MW)	20
First Year of Operation year	2015
Fuel Type	Municipal solid waste and selected industrial waste

出典: EEPCo (調査団編集)

6) 砂糖工場における余剰電力

エチオピアの砂糖工場は、余剰電力を系統へ売電することを計画している。電気はバガセを焼却する工程で発電され、発電はバガセの収穫により 10 月から 5 月の期間のみ実施される。表 2.2.15 にそれぞれの砂糖工場の設備容量と系統へ売電可能な電力量を示す。

表 2.2.15 計画砂糖工場一覧

Sugar Factories	Installed Capacity (MW)	Export (MW)	Exported Energy (GWh)	COD
Wenji	30	16	77	2013
Finchaa	31	10	48	2013
Tendaue/Ende	120	70	337	2015
Beles 1	30	20	96	2015
Beles 2	30	20	96	2015
Wolkayit	133	82	395	2015
Omo Kuraz 1	60	20	96	2015
Kessem	26	16	77	2015
Beles 3	30	20	96	2016
Omo Kuraz 2	60	40	193	2016
Omo Kuraz 3	60	40	193	2016
Omo Kuraz 4	60	40	193	2017
Omo Kuraz 5	60	40	193	2017
Omo Kuraz 6	60	40	193	2019
Total		474	2,283	

出典: EEPCo (調査団編集)

7) 火力発電所

現在、表 2.2.8 に示すように重油や軽油を使用した 11 ヶ所の火力発電所が存在する。コミットされているガス、石油を利用した発電所はない。EEPCo マスタープランでは、2018 年からガスタービン発電所、コンバインドサイクル発電所、ディーゼル発電所の運転を提案している。

前項で示したように、電力需要は急増し、2037 年には 25,000 MW を上回る。これに対応するため、水力および地熱のポテンシャル（合計約 25,000 MW）を全て開発したとしても需要を満たすことはできないため、火力発電所が必要になる。

2.2.5 送電計画

(1) 既設およびコミットされている送電線

多くの発電所は、相互連結システム ICS に接続され、400 kV、230 kV、132 kV、66 kV および 45 kV の送電線を通じて消費地域に電気を供給している。表 2.2.16 に既設送電線総延長を、図 2.2.10 に既設及び計画されている送電線ネットワーク図を示す。

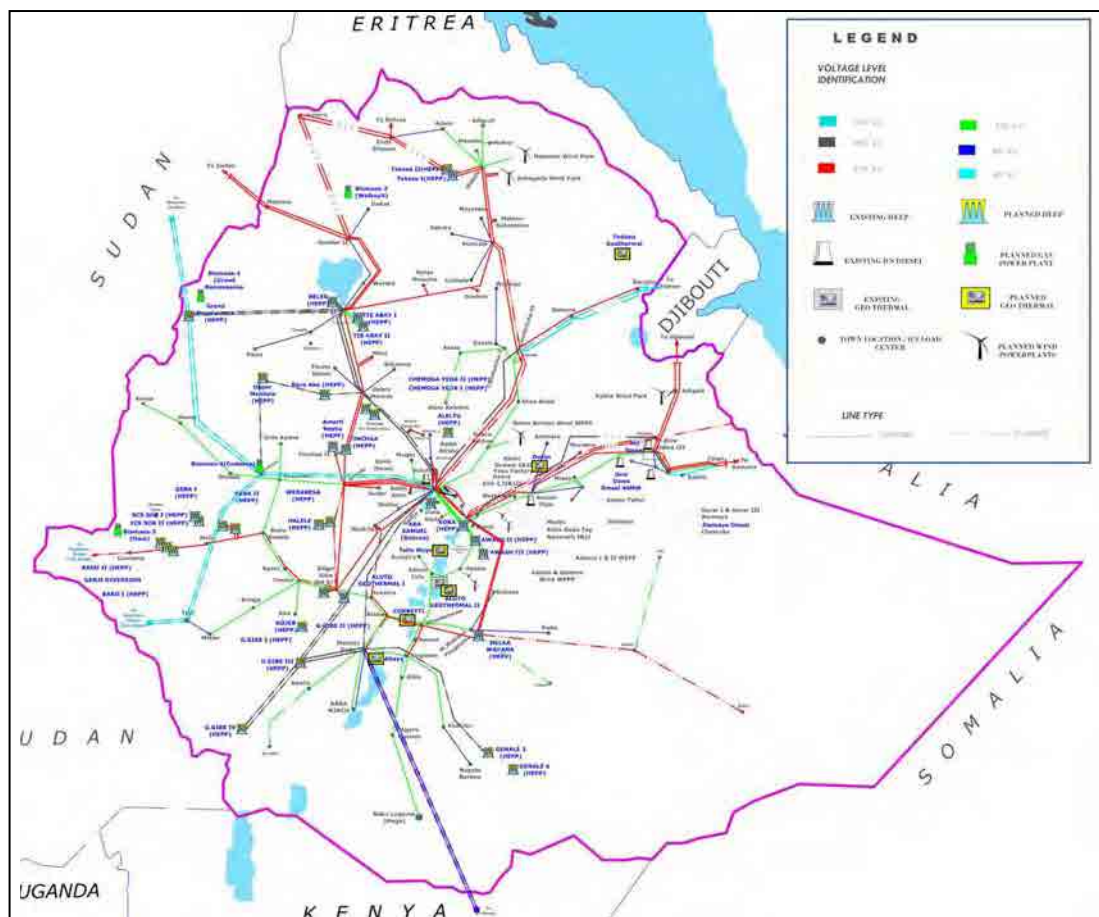
エチオピアには、ICS に接続されていない多くの地域が存在する。SCS は、ICS の接続がないこのような地域へ電気を供給しており、近年 SCS は ICS へ順次接続されている。

EEP は、自身の負担により村落への送電線の延伸を実施している。しかしながら、送電線から家や事務所へ配電線は消費者の負担により各々で接続しなければいけないため、これが貧困層がいまだに電気へアクセスできない理由となっている。

表 2.2.16 既設送電線延長 (km)

No.	Voltage Level	Single Circuit	Double Circuit	Total
1	400 kV	621	63	684
2	230 kV	3,376	1,607	4,983
3	132 kV	4,509	133	4,641
4	66 kV	1,902		1,902
5	45 kV	243	9	252
Total		10,650	1,811	12,461

出典: EEPCo (調査団要約)



出典: EEPCo

図 2.2.10 エチオピアにおける既設およびコミットされている電力系統

(2) 全電化プログラム(UEAP)

全電化プログラム (UEAP)は、合計 6,878 の村落を系統に連結して 2,400 万人へ電力を供給し、2015 年の電化率を 50%にするという PASDEP 目標を達成するため、電力セクター開発プログラムの一部として 2005/06 年度より EEPCo (現在は EEP) により開始された。また UEAP は、発電容量を、2010 年までに 6,386 GWh へ増加させることを目的としている。UEAP の総コストは、88 億ブルと見積もられ、世界銀行がその一部を負担している。

設定した目標を完全に達成していないものの、発電量は 2005 年の 2,587.2 GWh から 2010 年には 3,981.1 GWh へ 53%増加した。しかしながら、発電量の増加は系統延伸に対し遅れており、完全に対応しておらず、送電線は 2006 年の総延長 8,003.93 km から 2010 年には 10,884.24 km へ、配電線は 4 倍の 2005 年の 33,000 km から 2010 年に 126,038 km へ増加している。

(3) 送電線延伸計画

送電線延伸計画は、上述した需要予測や発電計画を基に EEP (EEPCo 当時) により策定されている。送電線計画は、計画されている発電所を連結すべく、2013 年から 2020 年の短期と 2021 年か

ら 2037 年の長期の 2 つの段階に分けて検討されている。

表 2.2.17 新規変電所及び送電線計画

Year	New Substation	New Substation Reinforcemns	Transmission Lines (km)
2013	11	9	2,343
2014	9	3	1,167
2015	45	30	4,071
2017	27	5	2,352
2020	22	16	3,627
Short-Term: Total	114	63	13,560
2025	25	7	2,769
2030	22	14	2,333
2037	31	20	4,155
Long-Term: Total	78	41	9,257

出典: EEPCo (調査団要約)

図 2.2.11 に、2020 年および 2037 年までの 230 kV から 500 kV の主要な送電線の建設計画に地熱サイトの概略位置を記載した図を示す。500 kV の送電線は、費用比較分析に基づき、Grand Renaissance ダムからアディス・アベバ、スーダンへの国際送電に限り計画されている。主要な送電網は、230 kV および 400 kV の送電線で構成されている。

この建設計画は、Aluto-langano と Corbetti のコミットされている地熱開発プロジェクトは加味されている。本調査における他の地熱サイトについても、大半が大地溝帯に沿って走る既存あるいは計画されている送電線の近傍に位置する。

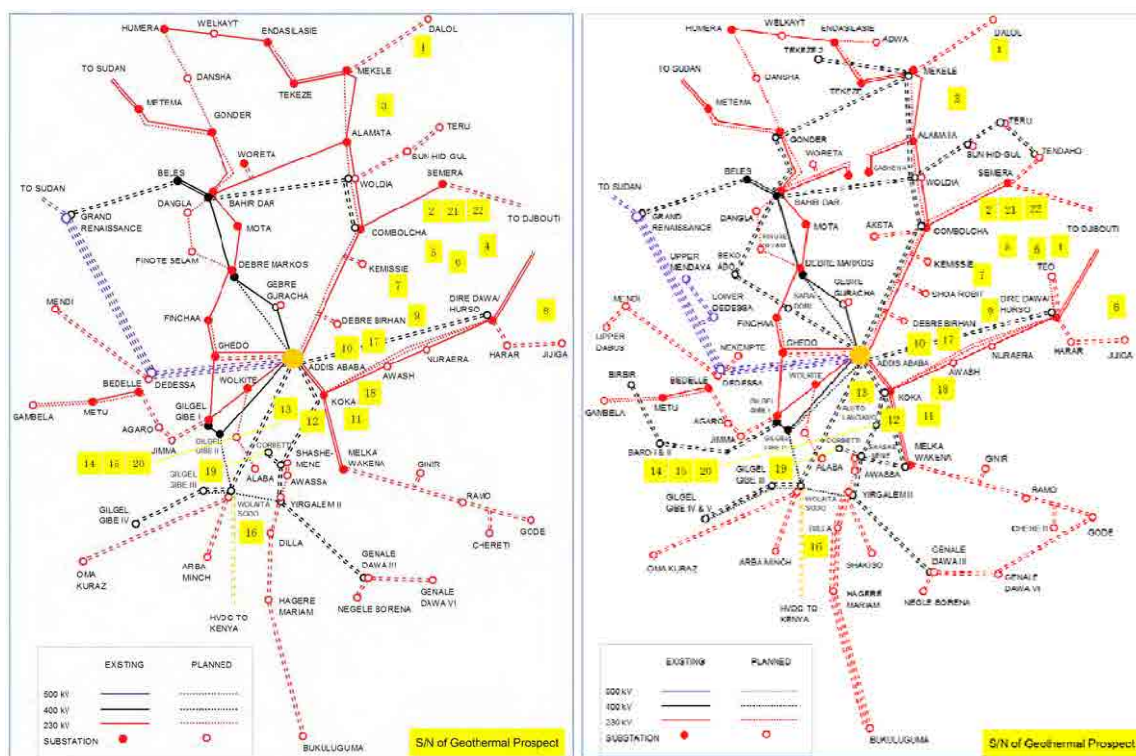


図 2.2.11 電力網拡大計画(左: 短期計画, 右: 長期計画)

出典: EEPCo (調査団加筆)

(4) 国際連系

1) 東アフリカ電力プール (EAPP)

上述した発電計画により、エチオピアは 2020 年までに 13,000 MW 以上、2030 年までに 24,000 MW の設備容量を持つと見込まれている。エチオピアの余剰分の設備容量は、東アフリカ共同体の周辺国へ輸出可能である。このために、EAPP は表 2.2.18 に示すように概略的な相互接続プログラムを着手している。

プログラムは既に部分的にエチオピア側から実施されており、スーダンと 230 kV 送電線を通じて 100 MW の電力を供給しており、将来増加される予定である。またジプチとも 230 kV 送電線で相互接続されている。

表 2.2.18 国際間の相互接続送電線計画

No.	Connecting	Voltage (kV)	Capacity (MW)	Year
1	Tanzania-Kenya	400	1520	2015
2	Tanzania-Uganda	220	700	2023
3	Uganda-Kenya	220	440	2023
4	Ethiopia -Kenya	DC500	2000	2016
5	Ethiopia -Sudan	500	2 x1600	2016
6	Egypt-Sudan	DC600	2000	2016
7	Ethiopia -Kenya	DC500	2000	2020
8	Ethiopia -Sudan	500	1600	2020
9	Egypt-Sudan	DC600	2000	2020
10	Ethiopia -Sudan	500	1600	2025
11	Egypt-Sudan	DC600	2000	2025

出典: EAPP

2) エチオピア-ケニア電力ハイウェイプロジェクト

EAPP の初期のフェーズとして、エチオピア-ケニア電力ハイウェイプロジェクトにおける送電線建設が、2013 年から開始され、2018 年に完成予定である。エチオピア政府とケニア政府は、アフリカ開発銀行 (AfDB) から融資を受け、ケニア政府はさらに AFD に融資を申し込んでいる。総プロジェクトコストは、約 13 億米ドルに上る。プロジェクトは主にエチオピアの Wolayita Sodo からケニアの Logonot に至る延長 1,066 km の 500 kV 高電圧直流の架空送電線である。EEP とケニア送電公社は、共同でプロジェクトを管理する予定である。表 2.2.19 にプロジェクトの内容を示す。

表 2.2.19 エチオピア-ケニア電力ハイウェイプロジェクト

No.	Location		Size	Number
	Form	To		
1	Wolaita Sodo ss	Logonot ss	500 kV HVDC line	1,066 km
2	Converter at each ss		1000 MW	
3	Gilgel Gibe III	Wolaita Sodo ss	400 kV HVAC line	55 km
4	Logonot ss	Ishinya ss	400 kV HVAC line	80 km
5	Synchronous Condenser at Lognot ss		200 MVA	1

ss: 変電所, HVDC: 高電圧直流, HVAC: 高電圧交流

出典: EEP Co (調査団編集)

(5) 電力損失

エチオピアの電力損失は、約 20% であり、国際的な平均である 12~13% より高い。EEP によると、電力損失の大半は、系統から消費者までの配電部門で生じている。それゆえに、世界銀行は、アディス・アベバにおいてスウェーデン企業による効率化の推進やフランス企業による配電システムの自動化のプロジェクトに資金提供を実施している。

2.2.6 資金調達及び料金

(1) 売電

表 2.2.20 に、1959 年から 2010 年の 50 年間ににおけるエチオピアの消費者別の電気料金を示す。家庭用向けの電気料金は、貧困層にも電力にアクセスできるように、多額の補助金により約 0.47 ブル /kWh に低減させられている。

電気利用の非常に少ない貧困層のアクセスを確保するため、より多くの電力を使用している富裕層が累進料金により多く費用を支払うことが提案されている。これは EEP の資金調達で増分となるため、電力サービスを拡大し、GTP の意欲的な目標を達成するためにも必要である。

表 2.2.20 消費者別電気料金

Description	Historical Flat Tariff Rate (Birr/kWh) EFY														
	1952-1964		1965-1971			1972-1978			1979-1987			1988-1989	1990	1991-1998	1999-2003
	EEPCo	ICS	SCS	EEPCo	ICS	SCS	EEPCo	ICS	SCS	EEPCo	EEPCo	EEPCo	EEPCo	EEPCo	
1 House Hold	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1425	0.1513	0.1468	0.1425	0.1513	0.1468	0.1772	0.2809	0.3897	0.4735	
2 Commercial	0.0750	0.1250	0.1650	0.1436	0.1525	0.1975	0.1735	0.3436	0.4146	0.3774	0.3653	0.4301	0.5511	0.6723	
3 Street Light		0.1100	0.1500	0.1285	0.1100	0.1500	0.1285	0.3322	0.4146	0.3711	0.3333	0.3087	0.3970	0.4843	
4 Small Industry		0.1333	0.1733	0.1520	0.1333	0.1733	0.1520	0.2232	0.4597	0.3203					
5 LV		0.0475	0.0875	0.0645	0.0625	0.1175	0.0857	0.2232	0.4397	0.3133	0.2563	0.3690	0.4736	0.5778	
6 HV 15kV		0.0288	0.0780	0.0474	0.0588		0.0588	0.2029		0.2029	0.2341	0.2597	0.3349	0.4086	
7 HV 132kV												0.2416	0.3119	0.3805	
Total Flat Rate	0.0968	0.0824	0.1241	0.1011	0.1027	0.1556	0.1165	0.2341	0.3500	0.2735	0.2645	0.3086	0.4020	0.4900	

LV: 低圧、HV: 高圧

出典: 調査団

2.3 地熱発電開発

2.3.1 既存地熱開発計画

表 2.3.1 に示すように、GSE と EEP による 2 つの既存の地熱開発計画が存在する。これらの計画は、2013 年 9 月に EEP (EEPCo 当時) と Reykjavik Geothermal (民間企業) により結ばれた 500~1,000 MW の Corbetti 地熱開発に関する PPA 等、最近のドナーによる活動が反映されていない。また EEPCo の計画においても、各サイトの個別の地熱ポテンシャルが考慮されておらず、単一にするため全ての地熱発電所を 100 MW 倍数の容量にし、電力需要を基に投入計画を立てている。そのため、各サイトの個別の地熱特性を考慮し、地熱開発計画を精緻化する必要がある。

表 2.3.1 GSE と EEPCo による既存地熱開発計画

Year	GSE ^{*1}			Year	EEPCo ^{*2}		
	Site	Installed Capacity (MW)	Total (MW)		Intalled Units	Site	Total (MW)
2014	Aluto Langano		5	2014	0	Aluto Langano	5
2015			5	2015	0		5
2016	Aluto Langano II	70	75	2016	0		5
2017			75	2017	0		5
2018	Tendaho	100	175	2018	2	Coebetti	200
	Corbetti	75 ~ 300	250 ~ 475	2019	1	Corbetti	300
	Tulu Moye	40	290 ~ 515	2020	2	Corbetti	500
	Dofan Fantale	60	350 ~ 575	2021	2	Aluto Langano	700
2019			350 ~ 575	2022	2	Tendaho	900
2020	Abaya	100	450 ~ 675	2023	0		900
				2024	0		900
				2025	3	Tendaho, Abaya	1200
				2026	4	Tendaho, Abaya, Tulu Moya	1600
				2027	0		1600
				2028	5	Dofan, Fantale, Tulu Moya, Gedemsa	2100
				2029	2	Tendaho	2300
				2030	2	Teo	2500
				2031	3	Corbetti	2800
				2032	3	Teo, Gedemsa	3100
				2033	3	Aluto Langano, Dofan, Fantale	3400
				2034	3	Tulu Moya, Dofan, Fantale	3700
				2035	5	Corbetti, Dofan, Fantale, Dallol	4200
				2036	4	Dallol, Teo	4600
				2037	4	Teo, Abhe	5000

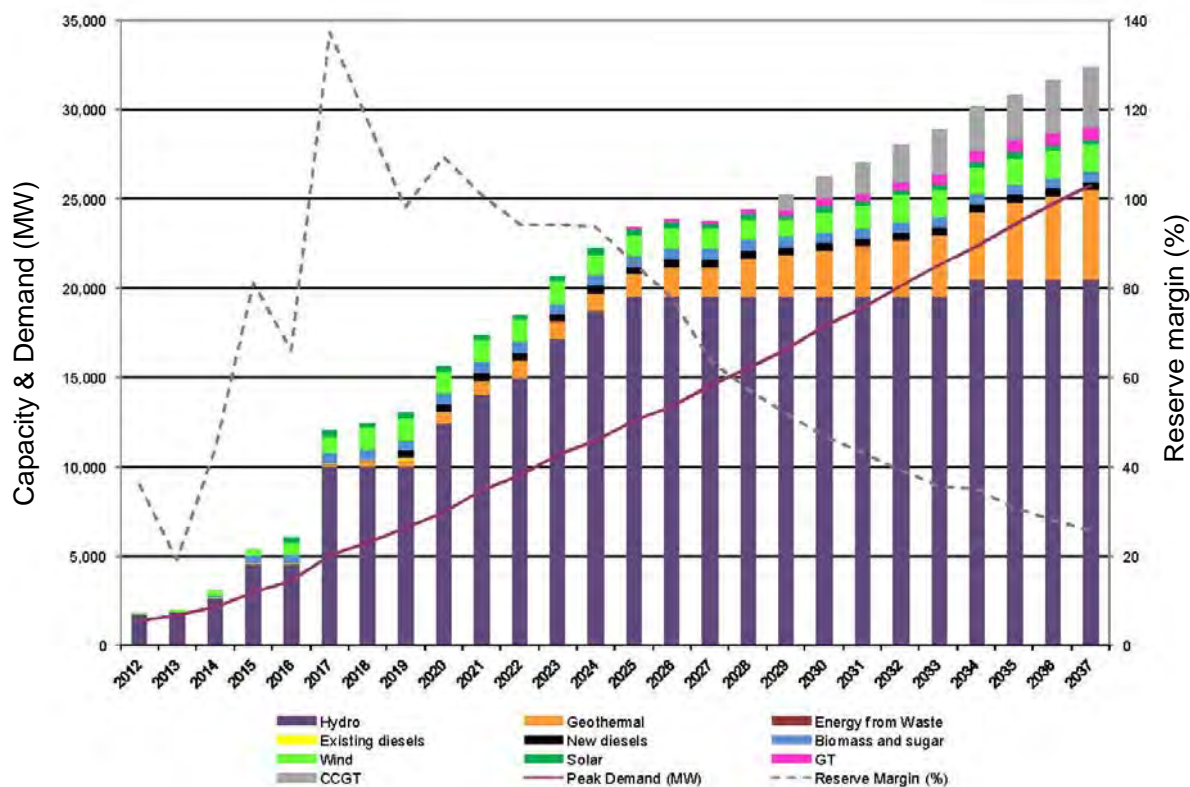
出典: ^{*1}GSE, 2010 (GSE への開き取りによると、Tendaho 地区は Tendaho-1(Dubti)と Tendaho-3 (Allalo Beda)を示す。

^{*2}EEPCo, 2013 (Tendaho 地区は Tendaho-1~3、Aluto-Langano は Aluto-1~3 を含む)

(調査団編集)

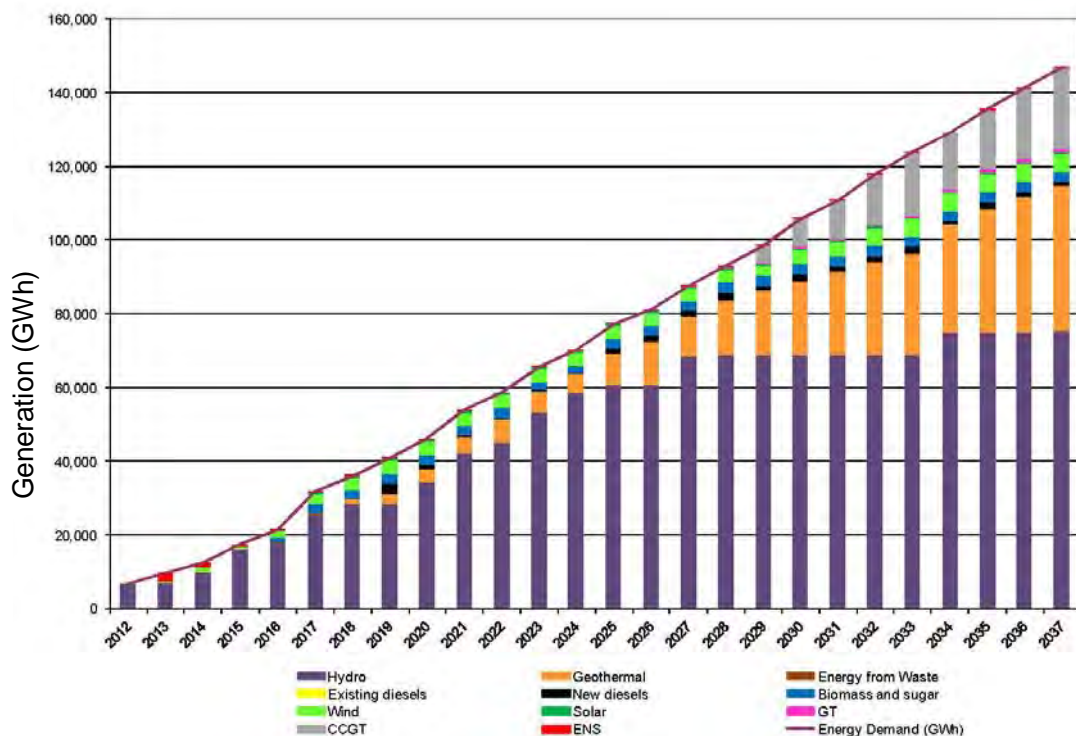
図 2.3.1 に示すように EEPCo マスタープランでは、地熱発電を含む全体の発電計画を策定している。また対応する発電量を図 2.3.2 に示す。電力需要と比較すると、2017 年に完成が予定されている Grand Renaissance ダムの運転開始により、2017 年の供給予備力は 120%を超過する。しかし、2018 年から低下し、2037 年には約 25%になる。

地熱発電を含む全体の発電計画を俯瞰すると、EEPCo マスタープランの期間において、水力発電は最も大きいエネルギー資源・電源となる。水力発電に続いて、地熱発電が 2 番目に大きい電力供給源となり、2037 年にはガスタービンコンバインドサイクル発電 (CCGT)が続く。水力発電と地熱発電は、2037 年には全電力のそれぞれ 60%、25%、電力量ではそれぞれ 55%、30%を占める。EEPCo マスタープランにおいては、地熱発電より早く風力発電と太陽光発電が先に開発される計画となっており、地熱発電の開発はほとんどの水力発電所の開発が完了する 2025 年以降に集中している。



出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014

図 2.3.1 設備容量と供給予備力



出典: エチオピア電力系統拡大マスタープラン, EEPCo, 2014

図 2.3.2 発電所種類別の発電量

2.3.2 コミットされている地熱発電開発

本マスタープランにおいては、ドナーの動向等の最新の情報や GSE の計画を考慮に入れ、既設及びコミットされている地熱サイトの開発の優先順位付けを行った。表 2.3.2 にコミットまたは計画されている地熱有望地を示す。Aluto-Langano 地熱発電所の拡大は設備容量を既存の 7 MW から 70 MW に高めることを目標に実施されている。最大深さ 2,500 m の 4 本の井戸掘削が開始され、2018 年までに合計 77 MW の発電を目指している。プロジェクトコストは、エチオピア政府だけでなく日本政府及び世界銀行からの資金援助により賄われている。

2013 年 10 月に、Reykjavík Geothermal は設備容量最大 1,000 MW の Corbetti 地熱開発の PPA を EEP(EEPCo 当時)と締結した。Reykjavík Geothermal は、初期の 20 MW 出力の最大 5 本の井戸掘削を開始する予定である。

地熱リスク軽減資金 (GRMF)は、Dofan と Corbetti において調査を実施するため、2014 年 3 月 3 日にエチオピア鉱山省に約 100 万米ドル (\$976,872)の供与に合意した。GRMF はアフリカ連合 (AU)内のアフリカ連合委員会(AUC)がドイツ経済協力開発省やドイツ復興金融公庫開発銀行 (KfD)を経由した EU-アフリカ・インフラ信託基金と共同で設立された地熱開発を支援するための基金である。

詳細なドナーの動向については、2.4 項で後述する。

表 2.3.2 コミットまたは計画されている地熱有望地

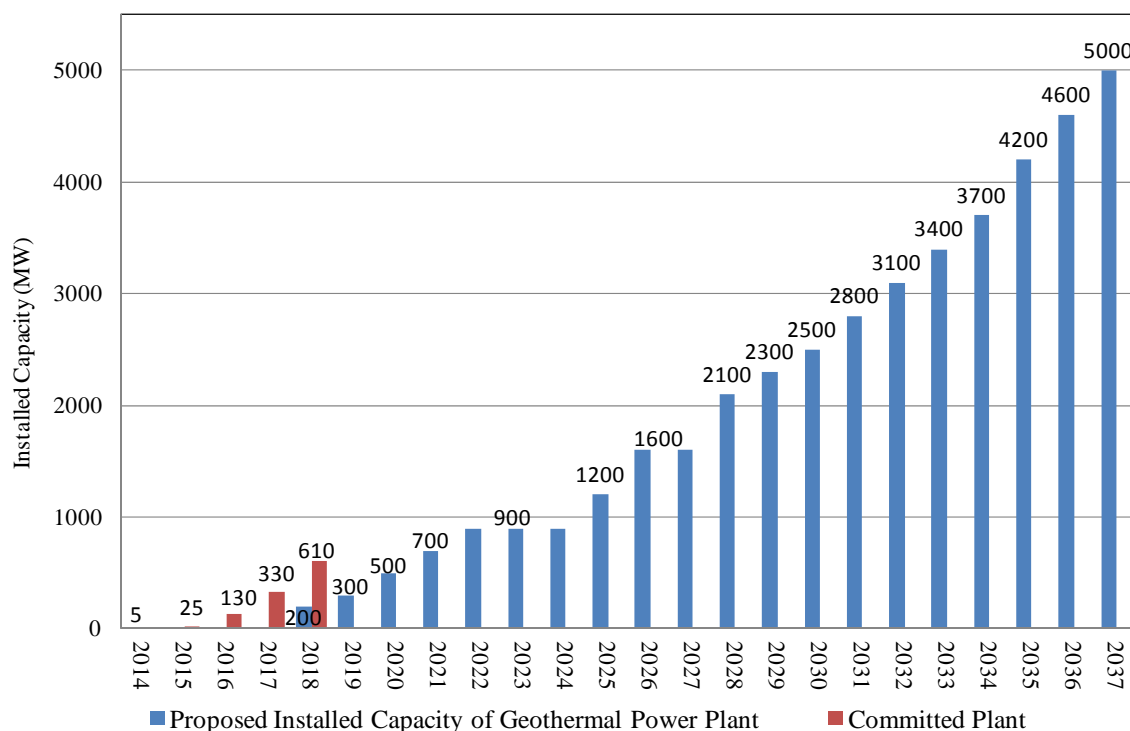
MP S No.	Site	Planned Capacity and COD		Status of Commitment
2	Tendaho-3 (Allalo Beda)	25 MW	2017	ICEIDA/NDF assists surface survey including MT survey.
19	Corbetti	20 MW 80 MW 200 MW 200 MW	2015 2016 2017 2018	Reykjavík Geothermal has agreed with Ethiopian Ministries and agreed PPA with EEP that Reykjavík Geothermal develops Max. 1,000 MW in the next 8 – 10 years. Using GRMF fund, GSE is conducting a study.
20	Aluto-1	70 MW	2018	The Government of Japan and World Bank has assisted the drilling wells.
21	Tendaho-1 (Dubti)	100 MW	2018?	AFD assists well drilling for 100 MW.
Total		695 MW		

*設備容量は累計、MP S.No.: マスタープラン通し番号 AFD: フランス開発局

出典: 調査団

2.3.3 地熱発電開発目標

EEPCo マスタープランが発電所毎の経済性を考慮し、総合的に発電計画を策定しているため、地熱発電開発の目標は、EEPCo の計画に基づいて設定する。しかしながら、EEPCo の計画は、建設中及びコミットされている地熱発電所を含んでいないため、本調査において収集したドナー動向の最新の情報を組み合わせ、各期間の目標を図 2.3.3 に示すように設定した。図から、目標値は 2018 年まで 700 MW、2025 年まで 1,200 MW、2037 年まで 5,000 MW と設定される。本調査では、実施する様々な地質調査から得られる地熱ポテンシャルを基に、地熱発電と他の発電所の経済性を比較し、他の発電所タイプを含んだ開発順序を提案する。



Year	Short term up to 2018	Medium term up to 2025	Long term up to 2037
Installed Capacity (MW)	700	1,200	5,000

出典: EEPCo, GSE (調査団編集)

図 2.3.3 地熱発電所の目標設備容量

2.3.4 地熱発電開発の優先性

2.2.4 節で述べたように、EEPCo マスタープランでは、電力消費量と最大負荷が大きく増加し、基準ケースでは 2037 年までにそれぞれ 221,594GWh、25,761MW に増加すると見積もられている。合計約 8,000MW の水力発電所が現在コミットされ、または建設中であり、将来にわたり電力開発の最も大きな電源となる。一方で地熱は、合計ポテンシャル 5,000MW の全ての地熱資源を開発したとしても、すべての電源の約 25%を占めるのみである。しかしながら、以下の理由からベースロード電源として地熱開発を優先させるべきである。

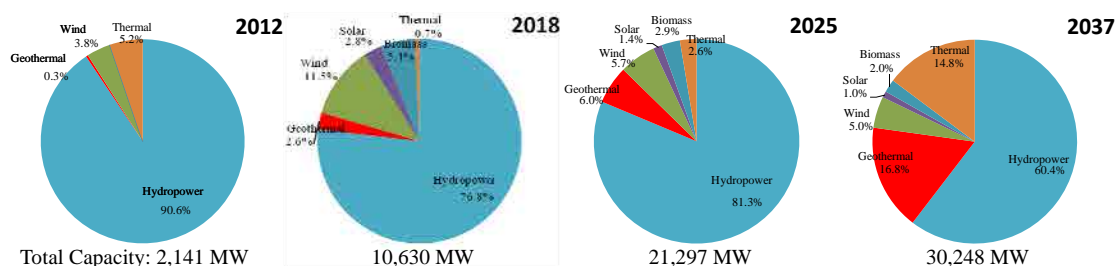
(1) エネルギーセキュリティ

地熱は、水力同様に貴重な純国産のエネルギーであり、エネルギーセキュリティ向上において非常に有効である。地熱エネルギーを開発することにより、将来導入を検討している火力発電に使用する化石燃料の低減を図ることができる。

(2) エネルギーミックス

現時点でエチオピア政府および EEP には明確なエネルギーミックス目標はなく、現在から将来にわたり、電源の大部分を水力発電に依存する状態となる (図 2.3.4 参照)。地熱発電は水力発電に次ぐ電源であり、後述する渇水期のリスクを低減するためにもより多くの地熱資源を開発すること

が望まれる。

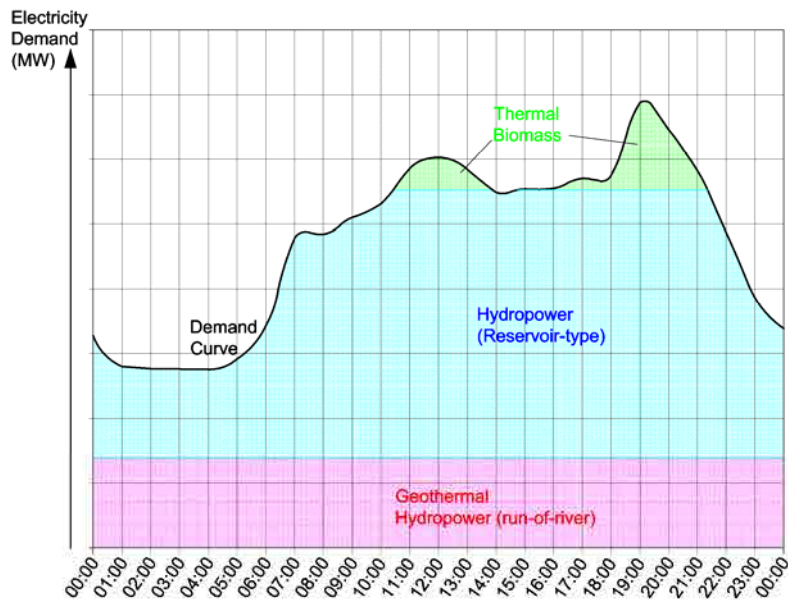


出典: EEP Co マスタープラン, 2014 (調査団編集)

図 2.3.4 EEP Co マスタープランにおける電源構成の変化

(3) 安定した電力の供給

地熱は、世界的にも 80~90%と稼働率が極めて高く、気候変動や日照等の影響を受けない極めて安定したエネルギーである。一方で水力は後述するように渇水期には大幅な発電容量の低下が懸念される。また風力や太陽光発電については、気候・気象条件により発電量が一定しないため、ベース電源として使用することができない。また、一般的に風力発電は、同容量の蓄電池やバックアップとしての発電所の建設が必要になり、初期費用が倍以上かかることが想定される。そのため、電力の不足するエチオピアにおいては、外部要因に左右されない安定した地熱発電をベース電源として開発するべきである。



出典: 調査団 (EEP 資料を基に作成)

図 2.3.5 エチオピアにおける一日時間帯別電力需要と電源構成の概念図

(4) 渇水期における水力発電のリスク低減

渇水期には、水力発電の発電量が低下することが懸念されている。干ばつ時には、エチオピア国内の水力発電所は、設備容量の約 80%にまで発電容量低下することが懸念されている。EEPCo マ

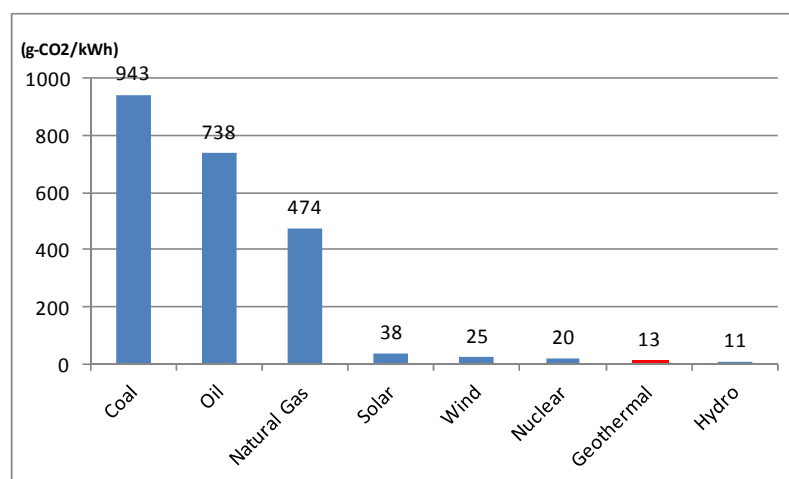
スタープランでは、過去 45 年の水文分析データを分析し、渇水期の能力低下を考慮に入れた電源開発計画が立案されているが、気候変動に伴い過去経験以上の大規模な干ばつが発生する可能性もある。水力発電は重要なベース電源であることから、地熱発電の開発を推進し、水力発電に大きく依存するリスクを低減するべきである。

(5) ディーゼル発電所コストの低減/余剰化石燃料の輸出

上述したように、主に CSC に属するディーゼル発電所がエチオピア内で運転しており、2018 年からガスタービン発電所、コンバインドサイクル発電所、ディーゼル発電所の火力発電所の運転開始を提案している。地熱発電は、燃料が不要な純国産の再生可能エネルギーであり、これを推進することにより、発電原価の非常に高いディーゼル発電を抑制するとともに、化石燃料の使用を低減し、国内の余剰燃料を他国へ輸出することが可能である。

(7) 二酸化炭素排出量低減

地熱発電は、図 2.3.6 に示すように再生可能エネルギーによる発電の中でも二酸化炭素排出量が少なく、環境に調和した発電方式である。そのため、地球温暖化を防止する上でも、地熱を促進していくべきである。とりわけ余剰電力を周辺国に売電することにより、東アフリカ地域の二酸化炭素排出量を抑制することに役立つ。



出典: 今村栄一・長野浩司、電力中央研究所報告、2010年7月

図 2.3.6 一日時間帯別電力需要と電源構成の概念図

2.4 地熱開発プロジェクトの動向

エチオピア全国で実施中または計画中の地熱開発プロジェクトにかかる情報収集調査を、GSE やドナー等関係機関からの聞き取りをもとに実施した。ここでは 2015 年 1 月末現在でのエチオピア国の地熱開発における動向を整理する。

2.4.1 地熱開発プロジェクトの状況

本マスタープラン調査で対象としている 22 地熱徴候サイトのうち、調査・開発が進んでいるサイトの状況および計画について表 2.4.1 にまとめた。現在同国では、エチオピア政府主体によるプロジェクトと、民間企業主体の IPP プロジェクトの二種類の開発が進められている。

2015 年 2 月現在、エチオピア政府は、各ドナーからの援助を受けて、Tendaho-1 (Tendaho-Dubti)、Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera)、Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda)(それぞれ No.21, 22, 2)、Dofan (No.9)、Gedemsa (No.12) および Aluto-1 (Aluto-Langano)、Aluto-2 (Aluto-Finkilo)、Aluto-3 (Aluto-Bobesa) (それぞれ No.20, 14, 15) 地域の調査開発を進めている。このうち、Tendaho-3、Gedemsa、Aluto-2,3 については ICEIDA (Iceland International Development Agency) の資金をもとに地化学、MT 探査、重力探査、微地震動調査等を実施中である。これらの調査結果をもとに調査井の掘削計画が作成され、その後、Tendaho-1(Tendaho-Dubti)は AFD 資金、Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda)および Aluto (現在のところ Aluto 全域対象) では WB の資金によりそれぞれ掘削が予定されている。Dofan については GRMF (Geothermal Risk Mitigation Facility) の資金により MT 調査が実施される予定である。なお、Dofan、Gedemsa および Tendaho-2 は、MT 探査後の開発にかかる資金調達およびドナーはまだ決定していない。

一方、IPP 開発では Reykjavik Geothermal (RG) が Tulu Moye (No.13) , Abaya (No.16) , Corbetti (No.19) の 3 地域について調査にかかるライセンスを取得しており、特に Corbetti に関しては、2013 年末に RG と EEPCo 間で HoTPPA (Head of Term PPA : 基本的な合意事項) が締結済みである。

表 2.4.1 実施・計画中の地熱開発プロジェクトの状況 (2015年2月時点)

No.		Site Name		Geothermal Project Development Status							2014年7月29日現在
No.	Site Name		Exploration		Test Drilling	Appraisal	Construction			Remarks	
			Detailed Geology, Geochemistry, and others	MT Survey, Soundings, Pre F/S	Slim hole, Full-size Well, Well Testing, Reservoir Simulation	Drill, Test, Simulation, FS, Review and Planning	Production Well, Reinjection Well	Power Plant, Pipelines	Substation and Transmission		
2	Tendaho-3 (Tendaho-Allakobeda)	Status	On going	100 stations	4 wells (2500m)			6 wells	25MW	<ul style="list-style-type: none"> • Survey by ICEIDA including 100 MT, Gravity, Micro-seismic, Geochemistry. • 2 Drill Rigs will be given to EEP by WB for Aluto. Old rigs will be transferred to this site. • 5MW well head units after 4 test wells 	
		Period	2014/5-	2014/5-							
		Finance	ICEIDA/NDF	ICEIDA/NDF	WB (25.8 mil USD)			22.5 mil USD TBD (4 test+6 prod.)	27.5 mil USD TBD		
		IPP	IPP canditated site (2008)								
9	Dofan	Status		Completed?						<ul style="list-style-type: none"> • Donor not identified after MT survey. 	
		Period		2014/6,7							
		Finance		GRMF (0.7-0.8 mil USD)							
		IPP	IPP canditated site (2008)								
12	Gedemsa	Status	On going	On going				40MW		<ul style="list-style-type: none"> • Donor not identified after MT survey. 	
		Period	2014/5-	2014/5-							
		Finance	ICEIDA/NDF	ICEIDA/NDF							
		IPP	IPP canditated site (2008)								
13	Tulu Moya	Status		100-120 stations						<ul style="list-style-type: none"> • RG updated license (2013/12, Every year). • Financed by US Private. 	
		Period		2014							
		Finance		US Private							
		IPP	RG (2008)								
14	Aluto-2 (Aluto-Finkilo)	Status	On going	75TEM/MT+ 40TEM stations	4 test wells will be identified by ICEIDA			22 wells (All Aluto?)		<ul style="list-style-type: none"> • TEM/MT up to 75 st. and 40 additional TEM survey stations from all Aluto-langano area. • Survey including TEM/ MT, Gravity, Micro-seismic, Soil gas and Geological mapping. • Afterwards, 4 drilling points will be 	
		Period	2014/9-2015/4	2014/9-2015/4				2015.6-			
		Finance	ICEIDA/NDF	ICEIDA/NDF				WB (150 mil USD)			
		IPP	IPP canditated site (2008)								
15	Aluto-3 (Aluto-Bobesa)	Status	On going	75TEM/MT+ 40TEM stations				22 wells (All Aluto?)		<p>Same as above</p>	
		Period	2014/9-2015/4	2014/9-2015/4				2015.6-			
		Finance	ICEIDA/NDF	ICEIDA/NDF				WB (150 mil USD)			
		IPP	IPP canditated site (2008)								
16	Abaya	Status		100-120 stations				100MW		<ul style="list-style-type: none"> • RG updated license (2013/12, Every year) 	
		Period		2014							
		Finance		US Private							
		IPP	RG (2008)								
17	Fantale	Status		Applying						<ul style="list-style-type: none"> • Inside Awash National Park. • UK private company is applying to GRMF. 	
		Period									
		Finance		GRMF							
		IPP	UK Private								
19	Corbetti	Plan			3 wells (L=2500m)			2 wells (Well head production)	500-1000MW	<ul style="list-style-type: none"> • HoT PPA (Head of Term PPA): Primary agreement. Bottom price from 0.68cent/kwh) sighed between RG and EEP at the end of 2013. 	
		Period			2014.7-12 (Delayed)						
		Finance			GRMF(40%), US Private(60%)			GRMF (8mil USD), US Private (40mil USD)			
		IPP	RG (2008)								
20	Aluto-1 (Aluto-Langano) (Unit 1)	Status		75TEM/MT+ 40TEM stations	8 wells	4 wells (L=2500 m)		22 wells (All Aluto)	35MW	<ul style="list-style-type: none"> • EIA done by WB for all projects for Aluto-1 • 2 Drill Rig will given to GSE by WB for Aluto. (55mil USD) • TEM/MT up to 75 st. and 40 additional TEM survey stations from all Aluto-langano area. • Survey including TEM/ MT, Gravity, Micro-seismic, Soil gas and Geological mapping. • Afterwards, 4 drilling points will be identified from Aluto-2. 	
		Period		2014/9-2015/4	1987	On going		2015.6-			
		Finance		ICEIDA/NDF	ELC	GoJ		WB (150 mil USD)	JICA (55 mil USD)		
		IPP	IPP canditated site (2008)								
20	Aluto-1 (Aluto-Langano) (Unit 2)	Status		75TEM/MT+ 40TEM stations				22 wells (All Aluto)	35MW	<ul style="list-style-type: none"> • Survey including TEM/ MT, Gravity, Micro-seismic, Soil gas and Geological mapping. • Afterwards, 4 drilling points will be identified from Aluto-2. 	
		Period		2014/9-2015/4				2015.6-			
		Finance		ICEIDA/NDF				WB (150 mil USD)	WB or JICA (55 mil USD)		
		IPP	IPP canditated site (2008)								
21	Tendaho-1 (Tendaho-Dubti)	Status	Done by GSE, Reviewed by	Implemented by GSE	Drilled (3 deep, 3 shallow)			6 wells (L=600m), 10-12MW Plant	2 wells (L=2500m) 100 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Survey done by GSE, reviewed by ELC (Italian consultant). • F/S implemented by ELC (2013) • Reservoirs expected in both shallow and deep. • Using shallow reservoir, 10-12MW is planned. 	
		Period		by 2014.7	1993-1998			2014.6 Apply, 2015 Start	3 years		
		Finance	BGR, Radon survey by	ARGeo	ELC			AFD (10-20 mil EURO?)			
		IPP	IPP canditated site (2008)								
22	Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera)	Status	Done by GSE, Reviewed by	Implemented by GSE						<ul style="list-style-type: none"> • Survey done by GSE, reviewed by ELC. • F/S implemented by ELC (2013) • Reservoirs expected in deep area. • Donor not identified after MT survey. 	
		Period		by 2014.7							
		Finance	BGR, Radon survey by	ARGeo							
		IPP	IPP canditated site (2008)								

Completed On going Future planned

出典：調査団

表 2.4.2 エチオピア地熱開発に関わるドナー機関

Donor		Sites concerned
AFD	Agence Francaise de Developpment	Tendaho-1(Tendaho-Dubti)
ARGeo/ UNEP	African Rift Geothermal Development Facility/ United Nations Environment Progremme	Tendaho-1(Tendaho-Dubti)
GRMF-AUC	Geothermal Risk Mitigation Fund - African Union Commission	Tendaho-1 (Tendaho-Dubti), Dofan , Corbetti (RG), Abaya (RG)
GSDP	Geothermal Development Project	Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda)
ICEIDA/ NDF	Iceland International Development Agency/ Nordic Development Fund	Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda), Aluto-1 (Aluto-Langano), Aluto-2 (Aluto-Finkilo), Aluto-3 (Aluto-Bobesa), Gedemsa
IFC	International Finance Corporation	Aluto-1 (Aluto-Langano), Aluto-2 (Aluto-Finkilo), Aluto-3 (Aluto-Bobesa)
JICA	Japan International Cooperation Agency	Aluto-1 (Aluto-Langano)
KfW	Kreditanstalt fur Wiederaufbau	Tendaho-1 (Tendaho-Dubti), Dofan
SREP	Scaling up Renewable Energy Program	Aluto-1 (Aluto-Langano), Aluto-2 (Aluto-Finkilo), Aluto-3 (Aluto-Bobesa)
USAID	US Agency for International Development	Corbetti
WB	World Bank	Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda), Aluto-1 (Aluto-Langano), Aluto-2 (Aluto-Finkilo), Aluto-3 (Aluto-Bobesa)

出典：Exploration and Capacity Building for Geothermal Development in Ethiopia (ICE23066-1301)をもとに調査団作成

2.4.2 各ドナーによる組織・制度、人材育成プロジェクト

各地熱サイトにおける開発プロジェクトに加え、エチオピアの地熱開発の組織、制度面に関する調査や人材育成プログラムが計画されている（表 2.4.3 および表 2.4.4）。

エチオピア全体を包括する調査として、本マスタープラン調査と IFC (International Finance Corporation)が実施中の Geothermal Sector Strategy Project が同時進行している。本マスタープラン調査が、全国の地熱地域のポテンシャル調査を実施し、統一的な基準の下に今後の開発にかかる優先順位付けを実施するのに対し、IFC の調査は包括的な経済・財務的観点から民間参入に力点を置いた開発モデルの作成と制度設計を目指しているため、調査内容は相互補完的である。

表 2.4.3 地熱開発に関する実施・計画中の組織・制度面のプロジェクト

ドナー	実施期間	対象	記事
IFC	2014年3月 -2016年12月	MoWIE, EEPCo, EEA, GSE	Ethiopia Geothermal Sector Strategy Project 実施コンサルタントは Fichtner (ドイツ)。SREP の資金を使って実施。民間参入制度整備や長期的な視点での財務経済分析を行う。政府の Vision を調査し、開発シナリオや開発ファイナンシャルモデルを作成する。第1フェーズ（提言）が終了し、Implementation ステージに入る段階にある。

出典：調査団

表 2.4.4 地熱開発に関する実施・計画中の人材育成プログラム (2014-2015)

ドナー	実施期間	対象等	実施場所	内容
BGR	2014年5月 13-16日	エチオピアを 含む東アフリ カ諸国対象	ケニア	Drilling Regulation
	2014年9月			Environmental Issue
ICEIDA/ NDF	2014年5月 26-28日		アイスランド	Geothermal Development for Decision Makers
	2014年10月			Drilling Monitoring
	Q1 (2015)			Binary Plant Study
USAID	Q3-Q4 (2014)		-	3 workshops

出典：調査団

2.4.3 日本政府が関与するプロジェクトの動向

Aluto-1(Aluto-Langano)では、日本政府の環境プロジェクト無償(約12億円)を利用して、4本の試掘井(計画深度2,500m)掘削が実施されている(2015年4月現在、1本目を掘削中)。今後、Aluto地域(Aluto-1,2,3の全域を対象)では、WB資金を用いて、本試掘結果およびICEIDAが実施中の調査結果を踏まえて、生産井・還元井の計22本の掘削が計画されている。また、本地域の開発にあたりWBは掘削リグ2機をGSEに供与することになっている。Aluto地域を対象とした地熱開発プロジェクトスコープおよび予算・資金の現在の状況について表2.4.5にまとめる。

表 2.4.5 Aluto 地熱地域開発にかかるスコープ、予算および資金源

Project Scope	Amount (million USD)	Financed by
Drilling Consumable	24.5	SREP/IFC
Drilling Consumable	35.5	WB/IDA
Exploration, Well siting	-	Iceland
Steam Gathering System, Substation, Transmission	46.5	WB/IDA
Consultancy for Power Plant and Drilling	13	WB/IDA
Power Plant Unit I, 35MW	55	Japan
Power Plant Unit II, 35MW	55	TBD (To be Decided)

出典：GSDP, 2013

Aluto地域を対象として、環境社会配慮を目的としたESMF(Environment and Social Management Framework)がWBにより実施済みである(2013年12月)。今後、プラント建設に向けて、円借款案件実施の準備を行う上では、そのESMFの内容と適応範囲を調べ、JICA環境社会配慮ガイドラインとの整合性を見極め、必要な環境調査を確定する作業が必要となる。

第3章 地熱ポテンシャル調査の概要

3.1 地質概要

3.1.1 テクトニクス

調査地域はアフリカ大地溝帯に位置している。アフリカ大地溝帯はアファール三重会合点（図 3.1.1: Afar Triple Junction）より南西～南南西へ、ジブチ、エリトリア、エチオピア、ケニア、ウガンダ、タンザニアと東アフリカ地域を縦断する。

アフリカ大地溝帯は一般的に活断層、活火山および温泉などの地熱地帯によって特徴づけられる。地球物理学的研究や岩石学的研究から、大地溝帯の地下では高温のマントルの貫入により地殻が薄くなっていることが示されている。

大地溝帯はまたアフリカプレートの東西を分離拡大する境界と考えられている。東側はソマリアプレート、西側はヌビアプレートと呼ばれ、両プレートは大地溝帯を境に東西方向に年間約 5mm の速度で離れている(Stamps et al, 2008)。



Source: <http://people.dbq.edu/faculty/deasle/y/Essays/EastAfricanRift.html>

図 3.1.1 アフリカ大地溝帯の分布と連続

3.1.2 地域地質状況

調査地域はエチオピアリフト(Main Ethiopian Rift: MER)に相当する。エチオピアリフトは古第三紀漸新世～第四紀にかけて形成、発達した地質帯である。この形成、発達においては、漸新世、中期中新世、後期中新世、前期～中期更新世、完新世に主要な火山活動が発生している(WoldeGabriel et al., 1990)。

エチオピアリフトにおける最も古い火山活動は漸新世における玄武岩と流紋岩の噴出であり、これらは地溝帯縁辺部および周辺部に露出している(例: 青ナイル峡谷)。前期中新世には、いくつかの地域で地溝が形成され、玄武岩の火山活動があった。鮮新世には大規模な噴火による火山灰がリフト中央部に広く堆積した。この特徴的な火山灰は、現在地熱調査によりリフト底の地下 2,100m 付近で確認されており、噴出から現在までに約 2km の沈降があったと想定される(WoldeGabriel et al., 1990)。

更新世には、エチオピアリフトの主拡大軸として Wonji 断層群(Mohr, 1967)がリフト内に形成され、これに伴う玄武岩および流紋岩が噴出した。これらの火山活動はアルカリ岩系の玄武岩による割れ目噴火、および流紋岩の噴火による火山体とカルデラの形成により特徴づけられる。

3.1.3 地域地質構造

エチオピアリフトはNE-SW方向の正断層系と、それらを切る Wonji 断層群と呼ばれる NNE-SSW 方向の断層系により形成されている。

エチオピアリフトは北縁でアフール低地帯と接続し、左右対称な地溝帯（グラベン）として連続する。ケニアとの境界付近では小規模な非対称の盆地に変化して不明瞭となり、N-S 方向を持つケニアリフトに接続する。

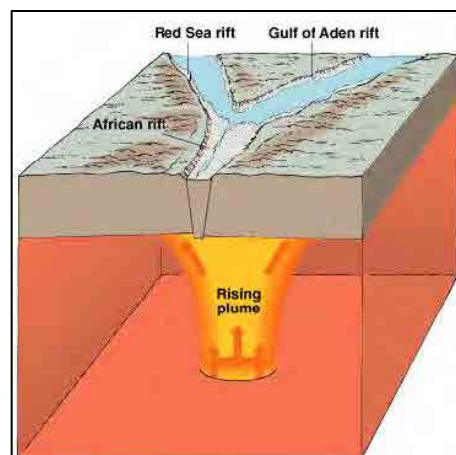
初期のエチオピアリフトの形成は紅海とアデン海が深く関係している。中生代には、エチオピア北部から中央部は周辺に比べて隆起していたと考えられている。これは Kella（ブタジラ北方）と青ナイル峡谷の中生代の堆積岩層の層厚の違いから想定されている。

第三紀漸新世には、大規模な火山岩の噴出により溶岩台地形成された。前期中新世には、溶岩台地を分断する3つの放射状のリフトが形成されたと想定される。その後、2つのリフトは拡大し、海水の侵入によって紅海とアデン海が形成された。一方、残された1つのリフトは拡大せず、現在のエチオピアリフトとなった。

このようなテクトニックな活動は大陸分裂の初期に起こるとされており、マントル深部からの熱上昇流（ホットプルーム）によるものと考えられている（図 3.1.2）。

エチオピアリフトの両側の縁辺部の構造および火山層序からは、2段階のリフトの形成過程が想定される。後期漸新世から前期中新世にかけては、交互に片側のみが断層で落ち込んだ、非対称なリフトが連続していた。この地溝は後期中新世になり両側が断層で介される対称的なリフトとなったと考えられる。エチオピアリフトはまた鮮新-更新世にかけて、約 2,000m 沈降するなどの活発な沈降活動により特徴づけられる(WoldeGabriel et al. 1990, WoldeGabriel et al, 2000)。

更新世以降のエチオピアリフト内部は、湖沼堆積物、割れ目噴火によるアルカリ玄武岩の噴火活動、火山灰、および Wonji 断層による NNE-SSW の正断層系の断層運動により特徴づけられる。これらの地層群は表 3.1.1 の Wonji 層群に区分される。



Source: <http://people.dbq.edu/faculty/deasley/Esays/EastAfricanRift.html>

図 3.1.2 紅海リフト、アデン海リフトおよびエチオピアリフト

表 3.1.1 エチオピアリフトの地質層序対比表

年代区分		絶対年代 (Ma)	WoldeGabriel et al. (1990)	EWTEC (2008)	Halcrow (2008)
第四紀	完新世	0.0117	Wonji Group	Wonji Group	Wonji Group
	更新世	2.58			
第三紀	鮮新世	5.33	Chilalo Trachytes	Nazareth Group	Chilalo Trachytes
			Butajira Ignimbrites		Nazret Group/Afar Group
	中新世	23.03	Guraghe Basalts	"Ancher Basalts", "Arba Guracha Silicics"	"Ancher Basalts", "Arba Guracha Silicics"
			Shebele Trachytes		
	漸新世	33.9	Kella Basalts		A laji Formation

出典: JICA ,2011

3.2 既存資料の収集と整理

3.2.1 目的

本プロジェクトの実施の基礎資料として、各サイトにおける既存の地質文献および報告書の収集を行った。収集した資料は、地熱開発の段階に応じて、以下のとおりにレビューした。

3.2.2 広域調査報告

エチオピアリフトでは、1970 年代初頭より 1980 年代にかけて資源探査および地熱開発を目的とした基礎地質調査が行われた。この時期には地熱資源の広域調査が UNDP, 1973、Ministry of Mines, 1984、Electroconsul/Geothermica, 1987 などにより行われ、現在のエチオピア国内における地熱有望サイトが特定されている。さらに、これらの調査では、Aluto および Tendaho が、地熱開発ポテンシャルの最も高いサイトとして結論づけられている。

3.2.3 詳細調査

1980 年代から現在まで、詳細調査が多くのサイトで実施されている。これらの調査は主に詳細地質調査（地質図作成）、地化学調査・分析および物理探査（MT/TEM 探査）からなる。各サイトの調査状況を次表にまとめた。

表 3.2.1 各サイトにおける詳細調査状況

No.	Geothermal Sites	Geology	Geochemistry	Geophysics	Other surveys
1	Dallol	○	○	-	
2	Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda)	○	○	○	
3	Boina	○	○	-	
4	Damali	○	○	-	
5	Teo	○	○	-	
6	Danab	○	○	-	
7	Meteka	○	○	-	
8	Arabi	-	○	-	
9	Dofan	○	○	-*	
10	Kone	○	-	-	
11	Nazareth	○	○	○	
12	Gedemsa	○	○	-*	Thermal Gradient Well
13	Tulu Moye	○	-	-	
14	Aluto-2 (Aluto-Finkilo)	○	○	-*	Thermal Gradient Well
15	Aluto-3 (Aluto-Bobesa)	○	○	-*	
16	Abaya	○	○	-	
17	Fantale	○	○	-	Magnetic Survey
18)	Boseti	○	○	-	
19	Corbetti	○	○	○	
20	Aluto-1 (Aluto-Langano)	○	○	○	
21	Tendaho-1 (Tendaho-Dubti)	○	○	○	
22	Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera)	○	○	○	Radioactive(Radon)

凡例： ○：実施 -：未実施 -*：GSE、他ドナー等により調査中

注：一つでも調査データがあるところは、実施としている

出典：調査団

上記の通り、各地熱開発サイトでは地質調査および地化学調査は少なからず実施されている。しかしながら、サイト全域が網羅されていない、地熱徴候の位置が表示されていない、調査試料の採取箇所が明示されていない資料も散見され、サイト毎で大きなばらつきが見られる。

3.2.4 フィージビリティ調査

Tendaho-1 (Tendaho-Dubti), Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera)サイトおよび Aluto-1 (Aluto-Langano)サイトの 3 サイトでフィージビリティ調査が実施されている。Electroconsul/Geothermica, 1986 は、Aluto-Langano サイトで 9 本の井戸掘削、貯留層評価、施設設計、経済性評価を行っている。EIGS/Aquater, 1996 は Tendaho-Dubti, Tendaho-Ayrobera で 3 本の井戸掘削と資源量評価（経済性評価は未実施）を行っており、同サイトではその後 GSE が 1995-1998 にかけて 3 本の井戸を掘削した。

3.2.5 施設建設・維持管理

上記のフィージビリティ調査に基づき、最初の地熱発電所が Aluto-1 (Aluto-Langano)サイトに 1992 年に建設されている。施設建設後、地熱生産井の維持管理報告書が作成・提出されている。

3.3 衛星画像解析

3.3.1 衛星画像解析の目的

現地調査に先立ち、対象地域の地熱ポテンシャルの概況を把握する目的で、各サイトの衛星画像解析を実施し、各種変質帯の分布状況、岩相および変質鉱物マッピング、地質構造ならびに地形・地表面状態を確認した。また、現地調査にあたっては、既往の報告書、論文とともに、この解析結果を参考とした。

3.3.2 解析方法

リモートセンシングデータとしては、我が国の衛星データである ASTER の L3A および PALSAR の L1.5 データを利用する。ASTER は可視近赤外域 (VNIR) バンドに加えて短波長赤外域 (SWIR) と熱赤外域 (TIR) バンドを含む多バンド (14 バンド) データと高解像度 (15~30m) という優れた特徴を持つ光学センサである。PALSAR は天候や昼夜に影響されない能動型のマイクロ波センサで、L バンド多偏波データと高解像度 (10~25m) という特徴を持つ。

ASTER データ解析では、短波長赤外域のバンドを使い、バンド間合成画像および比演算処理画像を作成し、各種変質帯の分布域を抽出し、岩相および変質鉱物マッピング、地質構造判読などを行う。PALSAR データ解析では、地熱開発調査地域全域のモザイク画像を作成した上で、リニアメント等の判読を行う。

データ解析には、主に米国 ITT 社製 ENVI (Ver. 5.0) のソフトウェアを用いた。

ASTER 画像解析では、植生域や水域、雲およびそれに伴う影などの解析不能部分のマスキング処理を施した上で、RGB にそれぞれバンド 4、バンド 6、バンド 8 を与えたバンド合成画像およびバンド間で比演算処理を行い、RGB にそれぞれバンド 4/バンド 6、バンド 5/バンド 6、バンド 5/バンド 8 を与えた比演算処理画像を作成する。これらの画像を用いて、各種変質帯の分布域を抽出し、岩相および鉱物マッピング、地質構造判読を実施する。

バンド合成画像 (RGB=B4,B6,B8) では、明ばん石およびカオリナイトなどを主体とする酸性 (advanced argillic) 変質帯は桃色系、セリサイトを主体とするフィリック変質帯は黄色系、緑泥石および緑れん石を主体とするプロピリティック変質帯は緑色系を呈する。比演算処理画像 (RGB=B4/B6,B5/B6,B5/B8) では、酸性変質帯は赤色系、プロピリティック変質帯は赤紫色~濃青色系を呈する。

以上のように、ASTER データを用いれば、各種熱水変質帯の分布域を識別することが可能であるが、これらはいずれも見掛け上の分布範囲を含んでいる。

PALSAR データは合成開口レーダデータであり、地形や地表面状態を把握するのに有効である。PALSAR 画像解析では、オルソ補正済み L1.5 プロダクトの HH 単偏波画像を用いて地熱開発調査地域全体のモザイク図を作成した。その画像からリニアメントを主体に、断層崖、クレーター、カルデラ、溶岩ドーム、溶岩流などの判読を行った。

PALSAR 画像では山地露頭域は地形影響の強いエッジの効いたテクスチャを示す。調査対象地域および周辺では東アフリカリフトの大地質構造と同じ NNE-SSW 方向の地形・地質構造が明瞭に判読される。二次堆積物層域は堆積物の種類（ラフネスの相違）によって色調区分されており、全体的にざらついたテクスチャを示す。暗色部では礫径が小さく、ラフネスが小さい、明色部では礫径が大きく、ラフネスが大きいと推定される。二次堆積物層域におけるラフネスが大きい部分は山地露頭域と類似の色調を呈するが、テクスチャによって判別が可能である。

3.3.3 解析結果

ASTER データを用いて RGB にそれぞれバンド 4、バンド 6、バンド 8 を与えたバンド合成画像および RGB にそれぞれバンド 4/バンド 6、バンド 5/バンド 6、バンド 5/バンド 8 を与えた比演算処理画像を作成したが、本報告書では RGB にそれぞれバンド 4/バンド 6、バンド 5/バンド 6、バンド 5/バンド 8 を与えた比演算処理画像を巻末に示す。

PALSAR データを用いて各地域における PALSAR 単偏波(HH)モザイク画像を作成した。これらを巻末に示す。

ASTER および PALSAR の解析結果に ASTER DEM データの解析結果を加えて GIS を利用した総合解析により熱水変質帯の変質岩露頭分布域の抽出や地質構造判読を実施した。これらの結果は地表踏査の参考資料として活用された。各調査地域の主な解析結果は以下の通りである。

表 3.3.1 衛星画像解析結果まとめ

調査対象地域 (北～南へ)	主な解析結果
Dallol ～Boina	Dallol 北西部 1 ヶ所、南東部 3 ヶ所に熱水変質の分布が認められ、それらは北西-南東方向に直線的に並ぶ。火山地形と環状構造が多数認められ、北西-南東方向に並ぶ。
	Boina 中央部に存在するカルデラの北西側に小規模に熱水変質の徴候が見られる。カルデラの西側を北西-南東方向に火山地形、環状構造が帯状に分布する。
Arabi	東西方向に帯状に小規模な火山地形、環状構造が多数分布する。それらに伴って小規模な熱水変質が所々に分布する
Tendaho-3 Allalobeda ～Tendaho-1 Dubti ～Tendaho-2 Ayrobera) ～Teo ～Damali ～Meteka	Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda) サイト周辺には顕著な熱水変質異常は認められない。リニアメントは南西側に北西-南東方向に複数のリニアメントが認められる。
	Tendaho-1 (Tendaho-Dubti) サイトサイトおよび周辺には顕著な熱水変質異常は認められない。表層を未固結堆積物に広く覆われリニアメントは見られない。
	Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera) サイトサイトおよび周辺では北西-南東方向に平行に並ぶ多数のリニアメントが調査地域西側に明瞭に認められる。調査地域北側に北西-南東方向に火山地形列、環状構造が認められ、中央部に熱水変質の分布が認められる。
	Meteka サイト中央部の山体に小規模な熱水変質の分布が複数認められる。中央部から南側には比較的大きな環状構造、北側には小規模な環状構造や火山地形が複数分布する。西側の山体に熱水変質が認められる。
Dofan ～Fantale ～Kone	Boseti サイト中央の山体の中心部に小規模環状構造、火山地形が認められる。そこから南西方向に環状構造が列状に並ぶ。さらにその先に火山地形が広く分布する。熱水変質は山体西端部や北東端部に小規模に分布する。調査地域東端部に火山地形

調査対象地域 (北～南へ)	主な解析結果
～Boseti ～Nazareth (Boku) ～Gedemsa ～Tulu Moye	が北東-南西方向に帯状に分布する。リニアメントは北東-南西方向および北北東-南南西方向に多数認められる。 Gedemsa サイト中央部から西側に大規模な環状構造が特徴的に分布する。大きな環状構造の内部に小環状構造や火山地形が複数分布し、それらに重なって熱水変質の分布も認められる。リニアメントは大環状構造の外部に北北東-南南西方向に多数認められ、特に環状構造東端部では明瞭である。
Aluto-1(Langano) ～Aluto-2 (Finkilo) ～Aluto-3 (Bobesa)	Aluto-1 (Langano)熱水変質の分布は認められない。北東端および南西端に数ヶ所環状構造が分布する。調査地域内にはリニアメントの分布は認められない。 Aluto-2 (Finkilo)サイト中央に1ヶ所、小規模な熱水変質が分布する。調査地域内にはリニアメントの分布は認められない Aluto-3 (Bobesa)サイト熱水変質の分布は認められない。域外西側に環状構造、火山地形が認められる。調査地域内にはリニアメントの分布は認められない。域外では西部に多数のリニアメントが北東-南西方向に分布する。

出典：調査団

3.4 現地調査および室内分析

3.4.1 地質調査

(1) 調査目的

本調査は以下の項目を目的として実施した。

- i) 地質状況の確認（地形、岩相、地質構造、変質帯など：既往調査の補足調査）
- ii) リモートセンシングで抽出された変質帯の確認
- iii) 岩石および変質鉱物の試料採取

(2) 調査方法

1) 現地踏査

現地踏査は第二次現地調査および第三次現地調査の二回に分けて実施した。各調査対象サイトにおいては、既存資料調査やリモートセンシング解析結果、および現地での聞き取りの結果を参考にして、踏査地点を選定した。

また、安全上の理由から、第三次調査における Dallol 地域と Arabi 地域はカウンターパートである GSE のみで現地踏査を行うこととした。第二次および第三次現地調査のスケジュールと対象サイトは以下のとおりである。

表 3.4.1 サイト調査スケジュール

現地踏査期間	対象サイト	備考
(第二次現地調査)	- Aluto-1 (Aluto-Langano) - Aluto-2 (Finkilo) - Aluto-3 (Bobesa) - Gedemsa - Nazareth (Boko, Sodore) - Boseti - Kone	GSE 職員と調査団による合同調査

現地踏査期間	対象サイト	備考
(第三次現地調査)	- Dofan - Meteka - Tendaho-1 (Dubti) - Tendaho-2 (Ayrobeda) - Tendaho-3 (Allalobeda) - Seha, Lake Loma (Tendaho) - Boseti (補足調査)	GSE 職員と調査団による合同調査
(第三次現地調査)	- Dallol - Arabi	GSE 職員による調査

出典：調査団

2) 試料分析

現地調査で採取した試料は、それぞれ蛍光 X 線分析(XRF)および X 線回折分析(XRD)により、岩石組成および鉱物種を同定した。分析の諸元は次のとおりである。

表 3.4.2 地質試料分析諸元

試料のタイプ		分析方法	分析項目
岩石試料		蛍光 X 線分析(XRF)	岩石の組成(%) (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, Na ₂ O, K ₂ O, Cr ₂ O ₃ , TiO ₂ , MnO, P ₂ O ₅ , SrO, BaO)
変質鉱物試料	沸石等	不定方位法による X 線回折(XRD)	鉱物種の同定
	粘土鉱物	定方位法による X 線回折(XRD)	粘土鉱物種の同定
		エチレングリコール(EG)処理 塩酸処理	(緑泥石-カオリナイト、緑泥石-スメクタイトの識別)

出典：調査団

(3) 調査結果




地質調査結果は次のとおりである。

1) 現地踏査

現地概査の結果は、下の項目を中心に取りまとめ、表 3.4.3 に例示する現地踏査表にまとめて巻末に添付した。

- | | |
|--------------|--------------------|
| i) ルートマップ | iv) 地熱徴候 |
| ii) 地質状況概要 | v) 変質作用 |
| iii) 地質構造・断層 | vi) 現場状況写真、その他特記事項 |

表 3.4.3 現地踏査表の例

Site No. 2	Site Name: Tendaho-3 (Tendaho-Allalobeda)	Regional State: Afar
<p>Satellite Imagery and Route Map</p>  <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> — Surveyed Route ● Fumarole ● Hot Spring ● Other Geological Feature ● Feature <p>Center Coord. (WGS84) Lat: N 11°38'34.29" Lon: E41°00'58.70"</p> <p>Surveyed Date: 12 April, 2014</p> <p>by Google Earth Pro: http://www.google.com/earth</p>		
<p>General Geology</p> <p>The site is located at the western edge of Manda-Hallaro Graven. Layered basalt and andesite lava of Afar Stratoid are observed (1-4Ma, by V. Accolela et.al. (2008))</p>	<p>Photos</p>  <p style="text-align: center;">Overview</p>	
<p>Geological Structure, Fault and Others</p> <p>The site is located along NW-SE marginal fault of Manda- Halaro Graven, associated with minor faults. The height of fault scarp is approx. 200m.</p>	 <p style="text-align: center;">Geyser</p>	
<p>Manifestation</p> <p>More than 20 hot springs and geysers are found along NW-SE marginal fault within 1 km diameter, showing definite relationship between the faults and manifestations. Whitish gray amorphous silica is deposited around the springs.</p>		
<p>Alteration</p> <p>No alteration was observed at the host rock.</p>		
<p>Others</p> <p>Remote sensing result shows no indication of alteration; due to no alteration minerals were found.</p>		

出典：調査団

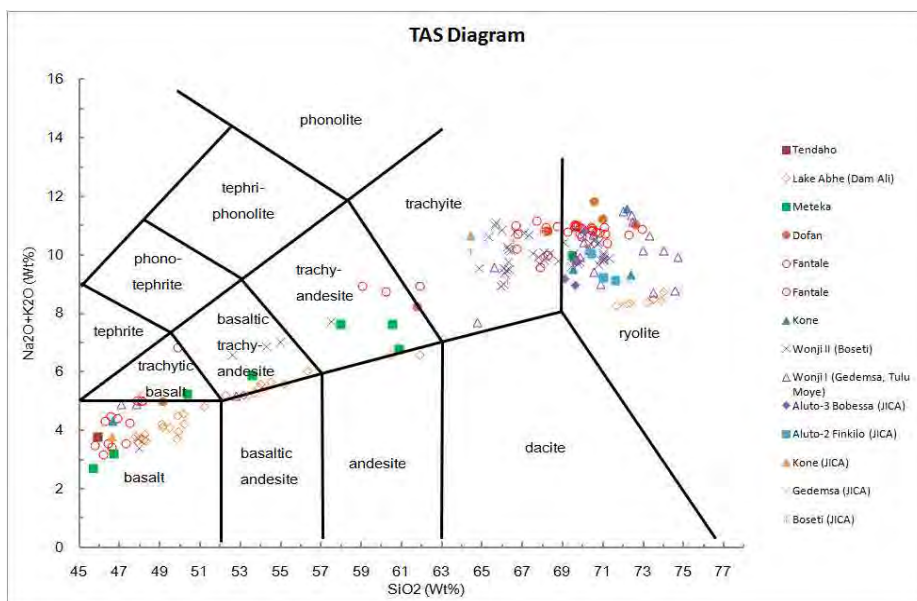
2) 試料分析

現在、第二次現地調査で採取した試料の分析が終了している。それらの結果を表 3.4.5 に示す。分析結果の考察は次のとおりである。

i) 岩石組成分析（全岩分析）結果

<SiO₂-K₂O+Na₂O ダイアグラム(TAS Diagram)>

SiO₂-K₂O+Na₂O ダイアグラムは、広く岩石の系列と種類を判断するために用いられている。図 3.4.1 に本調査による分析結果と、既存調査結果(Electroconsult/Geotermica, 1987; UNDP, 1973)による分析結果を重ねて示した。



出典：調査団

図 3.4.1 SiO₂-K₂O+Na₂O 図(TAS Diagram)

これらの分析結果から得られる考察は次のとおりである。

- ・分析結果は既存調査結果と調和し、採取した岩石はエチオピアリフトで一般的なアルカリ岩系列に属する。

- ・図 3.4.2 に、ケニアのオルカリア地熱地域の岩石のダイアグラムを示した。対象サイトの粗面岩 (Trachyte) および流紋岩 (Rhyolite) の組成は、オルカリア地熱地域の組成と類似しており、アフリカリフトの中で、地熱開発に有望な地質条件を備えたサイトであることが推定される。

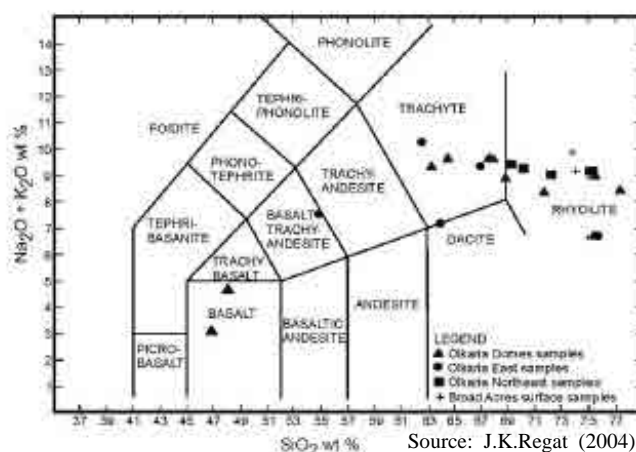
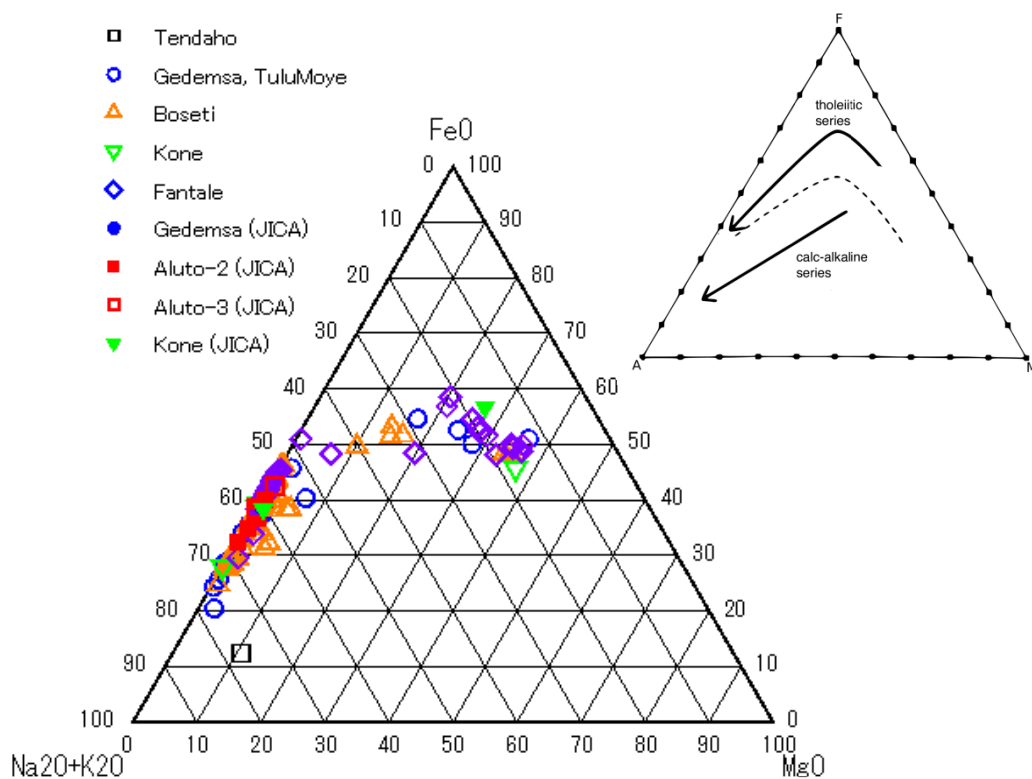


図 3.4.2 ケニア・オルカリア地熱地域の SiO₂-K₂O+Na₂O 図(TAS Diagram)

<FeO-MgO-K₂O+Na₂O ダイアグラム>

FeO-MgO-K₂O+Na₂O ダイアグラムは火成岩の分化傾向を示すダイアグラムとして広く用いられている。図 3.4.3 に本調査による分析結果と、既存調査結果による分析結果を重ねて示した。



出典：調査団

図 3.4.3 FeO-MgO-K₂O+Na₂O ダイアグラム

これらの分析結果はいずれも、既存調査結果との調和を示すとともに、分化傾向は全てソレアイト系列に類似した傾向を示すことが明らかになった。このことは、地下でのマグマだまりの深度、冷却の速度などに一定の共通性がある可能性を示唆している。

表 3.4.4 蛍光 X 線分析結果

No.	Date	Site	Type of Rock	Coordination (WGS84)		Altitude, masl (m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	Cr2O3	TiO2	MnO	P2O5	SrO	BaO	LOI	Total
				Latitude	Longitude		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
140119-01	19-Jan-14	Bobessa	Trachytic Andesite	N 7°47'24.0"	E 38°49'10.1"	2018	69.60	10.96	6.05	0.18	0.06	4.71	4.29	<0.01	0.38	0.14	0.02	<0.01	0.04	2.24	98.67
140119-03	19-Jan-14	Bobessa	Trachytic Andesite	N 7°47'31.7"	E 38°49'08.2"	2028	69.63	11.37	6.53	0.28	0.13	5.15	4.72	<0.01	0.39	0.19	0.02	<0.01	0.05	1.25	99.68
140120-01	20-Jan-14	Bobessa	Obsidian	N 7°46'42.9"	E 38°48'51.2"	2061	70.07	9.74	7.52	0.34	0.03	6.38	4.45	<0.01	0.42	0.30	0.02	<0.01	0.03	-0.18	99.12
140120-02	20-Jan-14	Bobessa	Trachyte	N 7°46'44.1"	E 38°48'50.1"	2061	69.11	10.50	7.72	0.30	0.16	4.74	4.48	<0.01	0.44	0.28	0.01	<0.01	0.03	2.16	99.92
140120-07	20-Jan-14	Bobessa	Trachyte	N 7°44'32.2"	E 38°48'17.3"	1808	69.62	11.54	6.72	0.16	0.06	5.12	4.70	<0.01	0.42	0.35	0.01	<0.01	0.05	1.31	100.05
140121-01	21-Jan-14	Finkilo	Trachyte	N 7°46'50.7"	E 38°47'07.7"	2057	70.38	11.67	5.39	0.21	0.04	5.31	4.74	<0.01	0.35	0.15	0.02	<0.01	0.03	0.87	99.14
140121-02	21-Jan-14	Finkilo	Trachyte	N 7°46'45.6"	E 38°46'39.3"	2066	71.56	9.65	6.84	0.32	0.10	4.68	4.45	<0.01	0.31	0.27	0.01	<0.01	0.02	1.18	99.38
140122-01	22-Jan-14	Finkilo	Trachytic Andesite	N 7°47'27.9"	E 38°45'27.6"	2079	70.97	10.87	5.55	0.28	0.06	4.74	4.50	<0.01	0.34	0.21	0.02	<0.01	0.04	1.75	99.34
140124-03	24-Jan-14	Kone	Porphyry	N 8°51'44.6"	E 39°41'44.7"	1454	64.39	13.53	7.48	1.01	0.22	6.20	4.45	<0.01	0.60	0.30	0.07	<0.01	0.15	0.67	99.09
140125-02	25-Jan-14	Gedemsa	Trachyte	N 8°22'37.3"	E 39°08'20.0"	1720	72.26	9.53	6.60	0.31	0.05	4.59	4.59	<0.01	0.34	0.20	0.01	<0.01	<0.01	0.81	99.29
140127-01	27-Jan-14	Boseti	Trachyte lava	N 8°37'40.8"	E 39°27'44.0"	1585	64.41	9.25	11.54	0.59	0.13	5.80	4.35	<0.01	0.67	0.46	0.02	<0.01	0.05	1.89	99.17
140127-03	27-Jan-14	Boseti	Trachyte lava	N 8°37'50.5"	E 39°27'33.5"	1561	66.54	13.68	5.96	0.64	0.19	6.48	3.98	<0.01	0.47	0.34	0.04	<0.01	0.10	0.58	98.98
140127-04	27-Jan-14	Boseti	Trachyte lava	N 8°37'51.9"	E 39°28'37.6"	1494	66.22	8.41	10.58	0.83	0.09	4.95	4.21	<0.01	0.58	0.43	0.03	<0.01	0.09	2.28	98.70
140130-01	30-Jan-14	Kone	Andesite lava	N 8°50'09.5"	E 39°41'54.6"	1293	46.58	14.05	14.25	11.15	6.05	2.91	0.88	0.03	3.10	0.22	0.82	0.05	0.08	-0.25	99.91
140131-01	31-Jan-14	Boseti	Basic Andesite Lava	N 8°39'16.8"	E 39°31'07.2"	1326	47.97	14.69	15.14	8.35	4.58	3.99	1.26	0.01	3.29	0.24	0.53	0.05	0.08	-0.11	100.05
140131-02	31-Jan-14	Boseti	Pl-Andesite Massive Lava	N 8°38'48.2"	E 39°30'59.6"	1372	67.85	13.25	4.95	0.86	0.08	6.13	4.70	<0.01	0.31	0.17	0.03	<0.01	0.03	0.71	99.05

出典：調査団

ii) 変質鉱物分析結果

現地で採取した変質鉱物の XRD による鉱物種の同定結果は次の表のとおりである。

表 3.4.5 XRD による変質鉱物分析結果

No.	Site	Location	Sample	Quartz	Opal - CT	Opal - A	Clinoptilolite	Kaolinite	Halloysite	Smectite
140119-02	Bobesa (Aluto-2)	Bobessa	Altered Clay					△		+
140120-03A	Bobesa	Bobessa	Altered Obsidian						+	-
140120-03B	Bobesa	Bobessa	Zeolite						+	-
140120-04	Bobesa	Bobessa	Altered Rock						-	+
140120-05	Bobesa	Bobessa	Secondary Mineral			+				
140120-06	Bobesa	Gebiba	Clay Mineral							+
140121-03	Finkilo (Aluto-3)	Finkilo	Yellow Tuff						-	-
140122-02	Finkilo	Adoshe	Yellow Clay						+	+
140122-03	Finkilo	Adoshe	Red Clay						-	-
140122-04	Finkilo	Adoshe	White Mineral	○		-				
140122-05	Finkilo	Humo	Clay	-					+	+
140122-06	Finkilo	Humo	White Mineral			+				
140122-07	Finkilo	Shutie	Clay	△					+	
140122-08	Finkilo	Shutie	White Mineral	△		-				
140125-01	Gedemsa	Sambo	Zeolite Vein	-		+		+		
140125-03	Gedemsa	Sambo	Altered Welded Tuff	○						
140125-04	Gedemsa	Sambo	White Mineral	○	+		+			
140126-01	Nazereth	Boko	Yellow Tuff		△		○			
140131-03	Boseti	Kintano	Altered Andesite						-	-
140131-04	Boseti	Kintano	White Mineral	+		+				

出典：調査団

現地調査では、変質作用は地熱徴候の周辺でのみ認められ、Dofan, Meteka を除く全ての対象サイトでは、変質帯と認識できるほどの広がりを持ったゾーンは確認されなかった。

分析結果では、多くのサイトで Quartz, Opal-A, Opal-CT, Clinoptilolite, Halloysite, Smectite が同定された。これらの鉱物種の存在は、低度の変質作用を特徴付け、現地調査結果と調和するものである。Gedemsa および Finkilo サイトでは Kaolinite が確認され、熱水変質により形成されたものと考えられる。

3.4.2 地化学調査

(1) 調査目的

地化学調査は、地熱徴候(温泉, 噴気)から得られる流体およびガスの地球化学的特徴から地熱貯留層の特性を考察することを目的とする。そのため、地熱徴候地とその周辺を踏査し、地熱坑井、温泉、噴気、河川・湖の分布と温度等を記録し、流体およびガス試料を採取する。試料の分析によって得られる化学・同位体組成を解析し、地熱流体・ガスの地球化学的特徴をまとめ、地熱貯留層の温度および流体の起源を解釈する。

採取試料は日本国内の分析機関で分析するとともに、一部の試料は GSE の実験室でも分析を行う。両方の分析結果を比較することで、GSE の分析精度を確認する。

(2) 調査方法

1) 現地踏査

現地踏査は、第二次および第三次現地調査の二回に分けて実施した。安全上の理由から、Dallol、Arabi および Erer の三地域は GSE のみで現地踏査を行った。現地踏査の対象地域は以下のとおりである。

第二次現地調査: Aluto, Bobesa, Finkilo, Gedemsa, Nazreth, Boseti, Kone

第三次現地調査: Dofan, Meteka, Dubti (Tendaho 1), Ayrobeda (Tendaho 2), Allalobeda (Tendaho 3),
Seha, Lake Loma, Boseti (捕捉調査), Dallol, Arabi, Erer

現地踏査では以下の調査を行った。

1. 地熱徴候の座標および標高の測定 (携帯型 GPS ナビゲーターを使用)
2. 地熱徴候の目視観察
3. 地熱徴候および河川・湖の温度・pH・電気伝導度測定
4. 温泉水、噴気ガス、地熱生産井蒸気および熱水、河川水、湖水の採取

現地踏査結果を表 3.4.7 (地溝帯南西部)および表 3.4.8 (同北東部)にまとめる。調査したのは合計 71 地点であり、このうち 41 地点から分析試料(流体 32 試料, ガス 11 試料)を採取した。

表 3.4.6 現地踏査結果のまとめ (エチオピア地溝帯南西部)

No.	Code#	Date	Area	Location	Manifestation	Latitude	Longitude	Altitude (GPS), m asl	Water/steam temperature, °C	pH	EC, μ S/cm	Sampling: Water	Sampling: Gas	Sampling: Noble gas	Note
1	ALT-001	2014/01/18	Alto	LA-6	Production well at the Alto-Langano GPP	N 7° 47' 36.94"	E 38° 47' 54.83"	1964	68.2	7.67	3345	✓	-	-	LA-6 had been shut-in before this survey. Although blowing was tried using 1/2" gauge valve at a bleed valve of the wellhead, steam was not produced. Instead, slightly high-temperature water was collected as a reference.
2	ALT-002	2014/01/19	Alto	LA-8	Production well at the Alto-Langano GPP	N 7° 48' 06.69"	E 38° 47' 31.17"	1904	94.0 (BP at 816 hPa)	9.58	4800	✓	✓	✓	Water sample is flash brine.
3	ALT-003	2014/01/20	Alto	Bulbula River	River	N 7° 50' 51.80"	E 38° 43' 12.59"	1633	21.1	8.43	490	✓	-	-	
4	ALT-004	2014/01/21	Alto	Artu Hujuba	Fumarole (moderate)	N 7° 46' 51.92"	E 38° 47' 07.39"	2082	92.1	-	-	-	-	-	Temperature is equivalent to the boiling point at the ambient pressure.
5	ALT-005	2014/01/21	Alto	Oiutu	Hot spring at a shore of Lake Langano	N 7° 42' 46.11"	E 38° 45' 54.33"	1592	47.1	-	-	-	-	-	
6	ALT-006	2014/01/21	Alto	Oiutu	Hot spring at a shore of Lake Langano	N 7° 42' 44.73"	E 38° 45' 57.27"	1588	48.1	-	-	-	-	-	
7	ALT-007	2014/01/21	Alto	Oiutu UNDP#4	Hot spring at a shore of Lake Langano	N 7° 42' 42.28"	E 38° 46' 00.51"	1592	56.4	7.42	3797	✓	-	-	
8	ALT-008	2014/01/21	Alto	Lake Langano	Lake	N 7° 42' 41.61"	E 38° 46' 03.31"	1578	30.4	9.11	2135	✓	-	-	
9	ALT-009	2014/01/21	Alto	Oiutu UNDP#2	Hot spring at a shore of Lake Langano	N 7° 42' 48.72"	E 38° 46' 25.60"	1576	65.3	7.33	3683	✓	-	-	
10	BBS-001	2014/01/19	Bobesa	Bobessa (top)	Fumarole (moderate)	N 7° 47' 23.85"	E 38° 49' 10.36"	2022	89.7	-	-	-	✓	✓	
11	BBS-002	2014/01/19	Bobesa	Bobessa (bottom)	Fumarole (moderate)	N 7° 47' 22.43"	E 38° 49' 07.45"	2004	92.3	-	-	-	✓	-	
12	BBS-003	2014/01/20	Bobesa	Artu Boko	Fumarole (weak)	N 7° 46' 43.37"	E 38° 48' 50.37"	2065	55.4	-	-	-	-	-	
13	BBS-004	2014/01/20	Bobesa	Gebiba	Fumarole (strong)	N 7° 44' 33.11"	E 38° 48' 16.50"	1807	94.3	-	-	-	✓	✓	Temperature is equivalent to the boiling point at the ambient pressure.
14	FKL-001	2014/01/21	Finkilo	A weak fumarole	Fumarole (very weak)	N 7° 47' 17.80"	E 38° 46' 17.17"	1998	52.4	-	-	-	-	-	
15	FKL-002	2014/01/22	Finkilo	Adoshe	Fumarole (weak)	N 7° 47' 28.17"	E 38° 45' 27.71"	2083	78.9	-	-	-	-	-	
16	FKL-003	2014/01/22	Finkilo	Humo	Fumarole (weak)	N 7° 47' 24.95"	E 38° 46' 03.47"	2017	78.4	-	-	-	-	-	
17	FKL-004	2014/01/22	Finkilo	Shutie	Fumarole (weak)	N 7° 48' 33.79"	E 38° 46' 00.78"	1987	86.8	-	-	-	-	-	
18	GDM-001	2014/01/25	Gedemsa	Sambo 01	Humid hole (higher temperature than an ambient temperature)	N 8° 22' 37.18"	E 39° 08' 19.10"	1742	34.1	-	-	-	-	-	
19	GDM-002	2014/01/25	Gedemsa	Sambo 02	Dry hole (higher temperature than ambient temperature)	N 8° 22' 24.61"	E 39° 08' 07.26"	1790	32.4	-	-	-	-	-	
20	GDM-003	2014/01/29	Gedemsa	Shenemaya	Warm water well (Hot spring)	N 8° 19' 03.46"	E 39° 11' 11.76"	1703	40.6	7.61	1970	✓	-	-	
21	GDM-004	2014/01/29	Gedemsa	Jano	Fumarole (very weak)	N 8° 15' 10.89"	E 39° 09' 36.82"	1816	44.2	-	-	-	-	-	
22	GDM-005	2014/01/29	Gedemsa	Lake Koka (Haro Ropi)	Lake	N 8° 18' 24.75"	E 39° 05' 13.37"	1605	25.1	8.81	323	✓	-	-	
23	BKO-001	2014/01/26	Nazreth	Boko	Fumarole (weak)	N 8° 29' 15.52"	E 39° 16' 13.73"	1708	72.5	-	-	-	✓	-	
24	SDR-001	2014/01/26	Nazreth	Sodere, Resort Hotel 01	Hot spring	N 8° 23' 46.21"	E 39° 23' 50.83"	1362	50.3	-	-	-	-	-	
25	SDR-002	2014/01/26	Nazreth	Sodere, Awash River	River	N 8° 23' 41.60"	E 39° 23' 54.84"	1358	20.2	8.18	334	✓	-	-	
26	SDR-003	2014/01/26	Nazreth	Sodere, Resort Hotel 02	Hot spring	N 8° 23' 44.63"	E 39° 23' 52.93"	1358	49.8	7.47	2271	✓	-	-	The location of 02 is upstream to 01 and available direct sampling even though 02 shows a slightly low temperature than 01.
27	GGD-001	2014/01/28	Nazreth	Gergedi (Hippo Pool)	Hot spring	N 8° 27' 37.79"	E 39° 11' 32.11"	1549	41.8	8.19	965	✓	-	-	
28	KNE-001	2014/01/30	Kone	Gur	Fumarole (very weak)	N 8° 50' 09.69"	E 39° 41' 54.59"	1293	32.0	-	-	-	-	-	
29	BST-001	2014/01/30	Boseti	Welenchiti	Warm water well (Hot spring)	N 8° 39' 52.28"	E 39° 26' 05.62"	1459	36.8	7.65	747	✓	-	-	
30	BST-002	2014/01/31	Boseti	Quintano	Fumarole (weak)	N 8° 39' 22.34"	E 39° 31' 09.06"	1326	43.4	-	-	-	-	-	
31	BST-003	2014/01/31	Boseti	Quintano	Fumarole (weak)	N 8° 39' 16.62"	E 39° 31' 07.32"	1330	43.8	-	-	-	-	-	
32	BST-004	2014/01/31	Boseti	Quintano	Fumarole (weak)	N 8° 39' 16.46"	E 39° 31' 07.68"	1330	45.9	-	-	-	-	-	出典：調査団
33	BST-005	2014/01/31	Boseti	Quintano	Fumarole (weak)	N 8° 39' 15.16"	E 39° 31' 07.24"	1330	47.7	-	-	-	-	-	Fumaroles distribute along a fault.
34	BST-006	2014/01/31	Boseti	Quintano	Fumarole (weak)	N 8° 38' 46.65"	E 39° 30' 59.13"	1398	75.1	-	-	-	✓	-	
35	BST007	2014/04/09	Boseti	Quintano	Fumarole (very weak)	N 8° 39' 03.60"	E 39° 31' 03.28"	1345	35.6	-	-	-	-	-	
36	BST008	2014/04/09	Boseti	Quintano	Fumarole (very weak)	N 8° 39' 13.13"	E 39° 31' 06.71"	1338	43.4	-	-	-	-	-	

表 3.4.7 現地踏査結果のまとめ (エチオピア地溝帯北東部)

No.	Code#	Date	Area	Location	Manifestation	Latitude	Longitude	Altitude (GPS), m asi	Water/steam temperature, °C	pH	EC, μ S/cm	Sampling: Water	Sampling: Gas	Sampling: Noble gas	Note
37	BSK001	2014/04/09	Awash	Lake Beseka	Lake	N 8° 54' 12.40"	E 39° 54' 21.51"	953	31.3	9.56	7100	✓	-	-	A lake expanding due to rift activity
38	DFN001	2014/04/06	Dofan	Dofan (on the north side of Dofan terara)	Hot spring (small)	N 9° 22' 48.38"	E 40° 07' 43.93"	734	52.3	8.60	1483	-	-	-	Small hot spring
39	DFN002	2014/04/06	Dofan	Dofan (on the north side of Dofan terara)	Hot spring (a seep)	N 9° 22' 48.32"	E 40° 07' 44.60"	734	42.0	-	-	-	-	-	A seep of hot spring
40	DFN003	2014/04/06	Dofan	Dofan (on the north side of Dofan terara)	Hot spring (large)	N 9° 22' 52.57"	E 40° 07' 48.97"	736	52.1	8.13	1472	✓	-	-	A hot spring pool with a high flow rate
41	DFN004	2014/04/06	Dofan	Dofan (on the north side of Dofan terara)	Hot spring	N 9° 22' 53.74"	E 40° 07' 48.80"	742	44.6	8.00	1402	✓	-	-	A hot spring flow from a crack in lava
42	DFN005	2014/04/06	Dofan	Dofan (on the north side of Dofan terara)	Fumarole (very weak)	N 9° 22' 42.68"	E 40° 07' 49.14"	750	40.8	-	-	-	-	-	A humid hole for a remedy
43	DFN006	2014/04/06	Dofan	Dofan (on the north side of Dofan terara)	Fumarole (very weak)	N 9° 22' 35.07"	E 40° 07' 50.60"	741	47.4	-	-	-	-	-	A humid hole for a remedy
44	DFN007	2014/04/07	Dofan	Dofan Demaegona	Fumarole (weak and hot)	N 9° 21' 48.03"	E 40° 07' 13.99"	819	91.8	-	-	-	✓	-	In a reddish alteration zone with white minerals. Temperature is slightly below B.P. (97.4°C at 924 hPa)
45	DFN008	2014/04/07	Dofan	Dofan Demaegona	Fumarole (weak and hot)	N 9° 21' 47.28"	E 40° 07' 13.16"	818	94.4	-	-	-	✓	-	In a white alteration zone. Temperature is slightly below B.P. (97.4°C at 924 hPa)
46	DFN009	2014/04/07	Dofan	Dofan Demaegona	Fumarole (from a cliff with a high flux)	N 9° 21' 36.47"	E 40° 07' 11.19"	825	87.3	-	-	-	-	-	Widely steaming at high places of the cliffs
47	MKT001	2014/04/05	Meteka	Meteka	Hot spring	N 9° 58' 37.62"	E 40° 32' 30.86"	579	47.8	8.19	1155	✓	-	-	Used for bathing
48	MKT002	2014/04/05	Meteka	Meteka	Hot spring	N 9° 59' 42.56"	E 40° 33' 01.63"	581	77.0	6.97	7100	✓	-	-	Discharging from a bottom of a gutter
49	MKT003	2014/04/05	Meteka	Meteka	Hot spring with gas	N 9° 59' 31.60"	E 40° 32' 33.13"	579	86.9	7.10	7500	✓	✓	✓	Discharging with bubbles
50	MKT004	2014/04/05	Meteka	Meteka	Hot spring in the river	N 9° 59' 44.59"	E 40° 33' 04.05"	579	70.5	-	-	-	-	-	Discharging from a river bank under the water
51	MKT005	2014/04/05	Meteka	Meteka	River water (Awash R.)	N 9° 59' 40.36"	E 40° 32' 58.78"	579	30.3	7.67	758	✓	-	-	Awash river in Meteka region
52	DBT001	2014/04/11	Dubti (Tendaho 1)	Dubti	Mud pool (relict mud pot)	N 11° 46' 18.16"	E 41° 08' 22.58"	367	51.3	-	-	-	-	-	A mud pot with warm water caused from irrigation development in the region
53	DBT002	2014/04/11	Dubti (Tendaho 1)	Dubti	Fumarole (above a boiling temperature)	N 11° 46' 18.43"	E 41° 08' 22.25"	367	99.2	-	-	-	✓	-	A somewhat strong steam vent with a sound adjacent to DBT001, having a temperature higher than the boiling temperature (98.8°C at 972 hPa)
54	DBT003	2014/04/11	Dubti (Tendaho 1)	Dubti	Fumarole (relict mud pot)	N 11° 46' 53.08"	E 41° 07' 43.99"	369	99.1	-	-	-	-	-	A steam vent on a relict mud pot, having a temperature higher than the boiling temperature (98.8°C at 972 hPa)
55	DBT004	2014/04/11	Dubti (Tendaho 1)	Dubti	Mud pot	N 11° 46' 58.48"	E 41° 07' 33.24"	364	-	-	-	-	-	-	A large mud pot
56	ALB001	2014/04/12	Allalobeda (Tendaho 3)	Allalo Beda	Hot spring (boiling)	N 11° 38' 18.20"	E 41° 00' 55.29"	405	99.2	8.81	2789	✓	-	-	Boiling hot spring (B.P. 98.8°C at 971 hPa)
57	ALB002	2014/04/12	Allalobeda (Tendaho 3)	Allalo Beda	Hot spring "Devil's pool" (large and deep)	N 11° 38' 29.82"	E 41° 00' 51.65"	408	96.9	8.47	2803	✓	-	-	A large and deep spring
58	ALB003	2014/04/12	Allalobeda (Tendaho 3)	Allalo Beda	Hot spring seeping and causing swamp	N 11° 38' 09.67"	E 41° 01' 09.83"	401	80.7	-	-	-	-	-	Several seeping points of hot water distributes along a boundary between flats and a basalt hill.
59	ALB004	2014/04/12	Allalobeda (Tendaho 3)	Allalo Beda, Awash River at the Tendaho dam	River	N 11° 41' 33.02"	E 40° 57' 26.27"	404	28.5	8.32	700	✓	-	-	Sampled at the Tendaho dam
60	SHA001	2014/04/13	Seha	Seha	Fumarole (very weak)	N 12° 03' 42.36"	E 40° 56' 52.57"	382	57.1	-	-	-	-	-	Basalt lava caves with small flow of moisture
61	SHA002	2014/04/13	Seha	Seha	Hot spring seeping and causing swamp	N 12° 03' 55.56"	E 40° 56' 32.11"	351	83.3	8.16	2340	✓	-	-	Several seeping points of hot water distribute along a boundary between flats and a basalt hill (T=43.3°C to 83.3°C).
62	AYB001	2014/04/14	Ayrobera (Tendaho 2)	Ayro Beda	Fumarole (above boiling temperature)	N 11° 53' 37.09"	E 41° 05' 33.19"	372	99.3	-	-	-	✓	✓	Wide distribution (NE-SW and NW-SE trends) of steam seeping to the surface. At the sampling point, a strong steam flow has a sound and a temperature higher than a boiling temperature (98.9°C at 974 hPa).
63	LMA001	2014/04/15	Loma Lake	Lake Loma (crater lake)	Lake	N 11° 58' 07.51"	E 40° 56' 57.68"	362	31.7	9.29	13300	✓	-	-	A crater lake
64	Dallol-1	2014/05/07	Dallol	Dallol	Hot spring	N 14° 08' 34.51"	E 40° 10' 46.74"	-94	109.7	-	-	✓	-	-	Covered by hard salt and swampy salt deposits
65	Dallol-2	2014/05/07	Dallol	Dallol	Lake	N 14° 07' 41.12"	E 40° 11' 57.12"	-123	42	-	-	✓	-	-	Gas bubbling, brown colored sulfur containing water
66	Dallol-3	2014/05/08	Dallol	Dallol	Pool	N 14° 07' 58.76"	E 40° 10' 18.41"	-125	46.4	-	-	✓	-	-	10 m -diameter Hot spring
67	Dallol-4 As-Ale	2014/05/08	Dallol	Dallol	Lake	N 14° 03' 12.20"	E 40° 12' 51.23"	-112	46.7	5.96	-	✓	-	-	Lake is colorless
68	Erer-1	2014/05/15	Erer	Erer	Hot spring	N 9° 20' 02.00"	E 41° 14' 16.91"	1119	39	7.86	2922	✓	-	-	El-Gel (camel hot spring)
69	Erer-2	2014/05/15	Erer	Erer	Hot spring	N 9° 18' 52.74"	E 41° 14' 04.88"	1186	43.3	7.58	3492	✓	-	-	People use the spring water for bathing.
70	Arabi-1	2014/05/16	Arabi	Arabi	Hot spring	N 9° 34' 27.34"	E 42° 24' 59.80"	1103	72	7.2	3745	✓	-	-	Sierlrae - meaning bed like wooden structure built on the hot spring
71	Arabi-2	2014/05/16	Arabi	Arabi	Hot spring	N 9° 34' 21.43"	E 42° 25' 36.30"	1106	93	7.6	3820	✓	-	-	Silica terraces

出典：調査団

2) 試料採取方法

i 温泉水、地熱坑井熱水、河川水および湖水の採取

温泉水試料は、温度が高く、湧出量が多い湧出孔を優先して採取した。Shenemaya (Gedemsa)と Welenchiti (Boseti) では水井戸が掘削されており、この水温が地温よりも有意に高かったため、これらを温泉とみなし試料採取を行った。また、Aluto の地熱生産井 LA-6 と LA-8 の坑井熱水を貯留層流体の代表として採取した。

試料水はプラスチック製のビーカーに一度採取し、ポリエチレン製試料容器に移し入れ密栓した。この時、ビーカーおよび試料容器を試料水で三回以上共洗いしたのち、分析項目に応じて別々の試料容器に採取した。また、分析の前処理として、金属成分、アンモニア、シリカ分析用の試料には HCl(1:1)溶液を、H₂S 分析用の試料には酢酸カドミウム溶液(5%)を、二酸化炭素分析用の試料には粒状の水酸化カリウムをそれぞれ適量加えた。

ii 噴気および地熱坑井からの蒸気・ガスの採取

噴気ガス試料は、噴気の勢いが強く、温度が高い噴気孔を優先して採取した。また、地熱坑井 LA-8 の坑井蒸気を貯留層流体の代表として採取した。

噴気ガスの採取では、噴気孔に漏斗を被せ、その周囲を土壌または粘土で固め、隙間をふさいだ。これにより、試料への大気への混入を防いだ。漏斗の足の部分にゴム管を接続し、そのゴム管を通じてガスを導いた。一方、坑井蒸気の採取では、二相流配管に小型セパレーターを設置した後、その蒸気採取バルブにゴム管を接続し蒸気を導いた。次に、アルカリ溶液を封入した試料採取装置 (ガスビュレットと呼ぶ) にゴム管を接続し、ガスビュレット内にガスまたは蒸気を導入した。ガスビュレット内では、CO₂ と H₂S はアルカリ溶液に溶解し、残留ガス(R gas)はガスビュレット内上部に捕集される。試料採取後、R gas をガラス製のガスコレクタに移し替え密栓した。また、アルカリ溶液を洗い出し 250 ml の定容とした後、CO₂ と H₂S の分析用に二つのポリエチレン製試料容器に移し入れた。この時、H₂S 分析試料には酢酸カドミウム溶液(5%)を適量加えた。

3) 試料分析

採取試料の分析項目と分析方法は表 3.4.8 と表 3.4.9 にそれぞれ示すとおりである。

表 3.4.8 分析項目

Type of sample	Aqueous chemical component	Gaseous chemical component	Isotopic component
Water: hot spring, geothermal well (water), river, and lake	pH, EC, SiO ₂ , Cl, SO ₄ , T-CO ₂ (HCO ₃ , CO ₃), F, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, NH ₄ , H ₂ S, B, As	-	δD (H ₂ O), δ ¹⁸ O (H ₂ O)
Steam/gas: fumaroles, geothermal well (steam)	-	CO ₂ , H ₂ S, H ₂ , N ₂ , CH ₄ , O ₂ , Ar, He	³ He/ ⁴ He, ⁴ He/ ²⁰ Ne

出典：調査団

表 3.4.9 分析方法

Aqueous species	Analytical Method
pH	pH meter
EC	Conductivity meter
SiO ₂	Spectrophotometric (Molybdenum yellow method) or Gravimetric
Cl, SO ₄ , F	Ion chromatography
CO ₂	Infrared (IR) spectroscopy
HCO ₃ , CO ₃	Calculation based on dissociation of carbonic acid
Na, K	Flame emission spectroscopy
Ca, Mg, Al, Fe, B, As	ICP/AES
NH ₄	Indophenol blue spectroscopy
H ₂ S	Iodometric titration
δD, δ ¹⁸ O	Mass spectrometry

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
³ He/ ⁴ He, ⁴ He/ ²⁰ Ne	Mass spectrometry

出典：調査団

(3) 調査結果

1) 地熱徴候の特徴

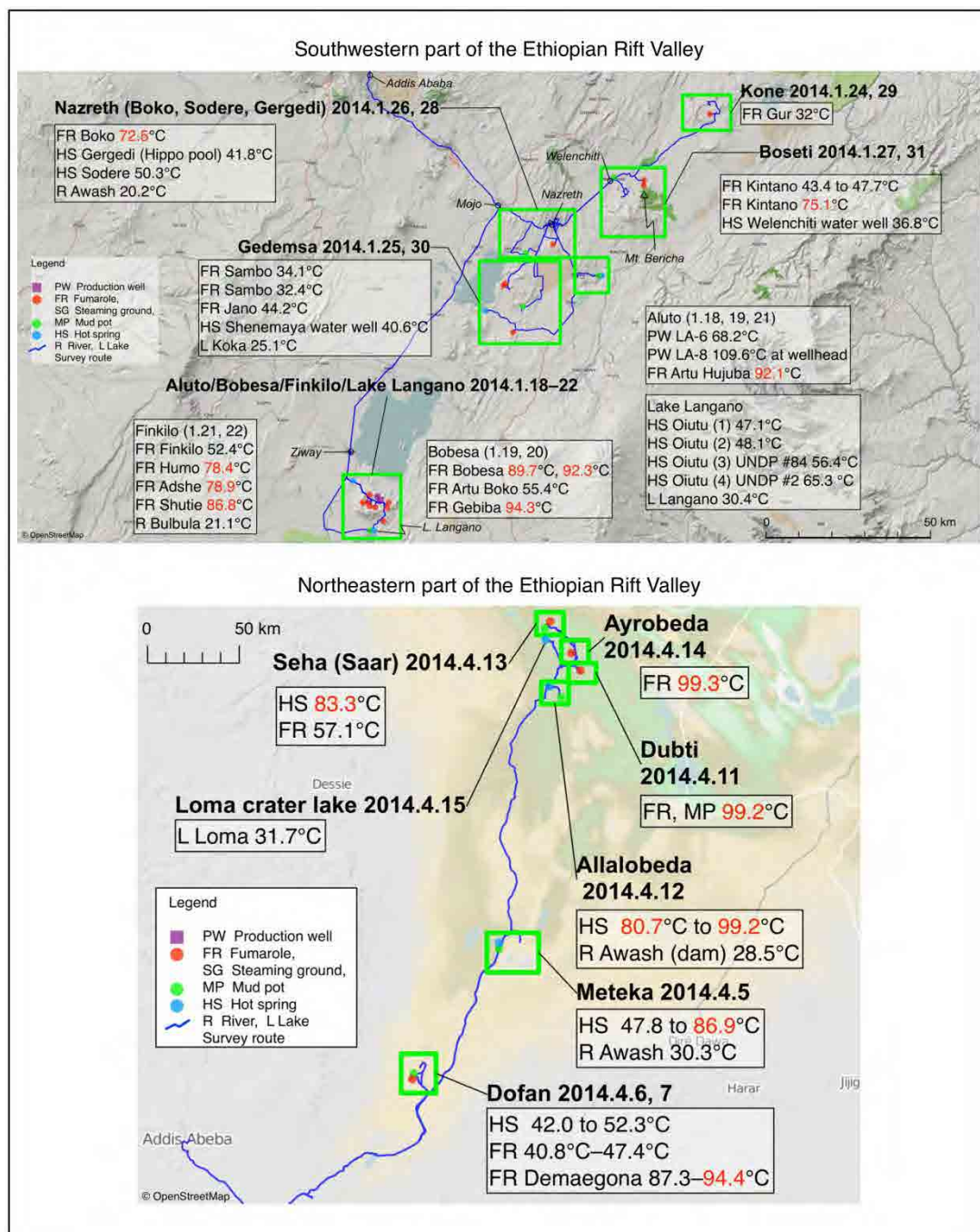
調査地点の座標、標高および温度を表 3.4.6 と表 3.4.7 に示す。また、地熱徴候の温度分布を図 3.4.4 に示す。

エチオピア地溝帯南西部では、地熱徴候は丘陵地における噴気が主である。90°Cを超える噴気は Aluto、Bobesa、Gebiba に分布し、Gebiba の噴気温度は南西部で唯一沸騰温度を示す。この他の噴気の温度は 70°C から 90°C と沸騰温度未満である。このことから、地下沸騰面で生成した蒸気が地表まで上昇する間に、蒸気は周囲の岩盤により冷却されていると考えられる。この上昇中の冷却過程で蒸気の凝縮が発生するため、この場合の噴気ガスの化学組成は、貯留層内の組成とは異なると考えられる。このため、ガス地化学温度計の適用には不適な試料と言える。

温泉は主に Langanho 湖畔、Nazareth 周辺の低地に分布する。泉温は 65°C から 35°C と中温から低温であり、沸騰泉は見つかっていない。比較的高い泉温は Oiutu (Langanho 湖) の 65°C および Sodere (Nazareth) の 50°C である。

エチオピア地溝帯北東部では、丘陵地、低地ともに噴気と温泉が分布し、南西部と比べて高温の徴候が多い。90°Cを超える噴気は Dofan、Dubti、Ayrobeda に分布し、このうち Dubti、Ayrobeda の噴気温度は沸騰温度をわずかに超える。温泉は Dofan、Meteka、Allalobeda、Seha に分布し、Dofan を除くと、いずれの地域にも 80°C を超える高温の温泉がある。Allalobeda には沸騰泉が確認できる。

エチオピア地溝帯全体を見渡すと、Aluto-Langanho 地域と Tendaho 地域 (Allalobeda、Ayrobeda、Dubti、Seha) の地熱徴候が目立って優勢といえる。



出典：調査団（地図は OpenStreetMap を使用）

図 3.4.4 エチオピア地溝帯の地熱徴候分布

2) 試料分析結果

採取試料を分析して得られた流体およびガスの化学・同位体組成を表 3.4.11 および表 3.4.12 にそれぞれ示す。これらのデータと文献から得られる既存分析データを用いて、地熱流体・ガスの地化学的特徴を考察する。既存分析データは、Aquater (1980, 1991)、ELC/Geotermica (1987)、Gonfiantini et al. (1973)、UNDP (1973, 1976, 1977)、Panichi (1995)、D'Amore et al. (1997)によった。また、解析結果の記述のため、調査地域を 4 つの領域に区分する。その区分はエチオピア地溝帯の南西から北東にかけて、[1] Lake District (Abaya から Wonji)、[2] Southern Afar (Fantale から Meteka)、[3]

Northern Afar (Teo、Danab から Tendaho)、[4] Danakil Depression (Dallol)である。

3) 地熱流体の起源

地熱流体(坑井熱水および温泉)の起源を図 3.4.5 の δD と $\delta^{18}O$ の関係をもとに考察する。同図において、地熱流体は河川・湖水とともに天水直線付近にプロットされる。このことから、天水が地熱流体の起源であることが明らかである。なお、湖水試料には δD と $\delta^{18}O$ がともに高いものが認められる。これらの同位体比は地溝帯特有の激しい湖水の蒸発に伴う同位体分別(図中の蒸発直線に沿う変化)の結果と考えられている(Panichi, 1995)。

4) 地熱流体の主要陰イオン組成の特徴

主要陰イオン(Cl 、 SO_4 、 HCO_3)の濃度比ダイアグラム(Giggenbach, 1991)を図 3.4.6 に示す。同図を見ると、地熱坑井・温泉の分布範囲によって、陰イオン組成に明瞭な違いがあることがわかる。すなわち、Lake District から Southern Afar の地熱流体は HCO_3 に富み、Northern Afar の地熱流体は Cl に富む。後者は沈み込み帯に見られる Cl 型の地熱流体 (図中 Mature waters)に近い。Meteka および Arabi は中間的な HCO_3 、 Cl 濃度比を持つ。一方、Danakil Depression の Dallol は Cl 濃度がきわめて高く、 pH が極端に低い (例えば Cl 濃度 197000 mg/l、 pH 1 未満、表 3.4.11)。これから、Dallol の温泉水には火山性の塩酸ガス(HCl ガス)の寄与が大きいことが推定できる。

Lake District では、地表水(河川・湖水)から温泉水、坑井熱水までが共通して HCO_3 に富んでいる。したがって、地表水が地熱貯留層に浸透した後も流体の陰イオン濃度比は変化しないと言える。沈み込み帯の地熱系では、 HCO_3 に富む地熱流体は貯留層縁辺部の流体と解釈される(Giggenbach, 1991)。しかしここで見たように、エチオピア地溝帯南西部の地熱系では、 HCO_3 型の流体が貯留層熱水になり得る。

図 3.4.6(b)を詳しく見ると、Aluto の地熱坑井 (LA-6, LA-8)と近隣の Oiutu 温泉 (Langano)の陰イオン組成の類似性がきわめて高い。このことから、Aluto と Langano を含む一つの地熱系を想定できる。この見方は、後に述べる貯留層温度の解釈に用いる。

Northern Afar の Tendaho 地域では、Lake District と異なり、地熱流体と河川水の陰イオン組成が大きく異なる(Cl 型と HCO_3 型)。このことから、地熱貯留層内の水-岩石反応の程度が Aluto-Langano 地域と異なる可能性がある。図 3.4.5 から分かるように、Tendaho 地域の地熱流体は、酸素同位体比が天水の値よりも大きくなる酸素同位体シフトを示すことから、Tendaho 地域の方が水-岩石反応の程度が進んでいると解釈できる。

表 3.4.10 地熱流体の化学・同位体分析結果

Sample	Type	Date	Temp. °C	pH	EC μS/cm	SiO ₂ mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	CO ₂ mg/L	HCO ₃ mg/L	CO ₃ mg/L	F mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Al mg/L	Fe mg/L	NH ₄ mg/L	H ₂ S mg/L	B mg/L	As mg/L	δD ‰SMOW	δ ¹⁸ O ‰SMOW
Southwest area of Ethiopian rift valley																								
LA-6	Geothermla well	2014/1/18	68.2	7.9	3220	672	375	71	877	1174	7.1	28	648	183	1.2	0.09	1.9	0.32	N/A	N/A	6.8	0.82	N/A	N/A
LA-8	Geothermla well	2014/1/19	94.0	9.2	4630	706	534	42	1310	1616	194	60	1060	138	0.45	0.39	4.6	1.2	1.1	1.4	4.2	0.34	-2	-0.7
Oiutu UNDP#84	Hot spring	2014/1/21	56.4	7.7	3640	218	407	19	1380	1822	6.9	30	850	80	7.6	2.4	<0.01	0.08	0.55	<0.5	1.9	<0.01	-2	-1.3
Oiutu UNDP#2	Hot spring	2014/1/21	65.3	7.6	3500	246	459	26	1240	1620	4.9	27	811	61	9.6	3.0	<0.01	0.19	0.58	<0.5	2.6	0.11	-2	-1.0
Shenemaya	Water well (hot spring)	2014/1/29	40.6	7.9	1840	116	151	102	624	836	5.0	14	400	25	23	3.3	<0.01	<0.01	0.01	<0.5	1.6	0.02	-12	-2.4
Sodere Resort H.	Hot spring	2014/1/26	50.3	7.7	2130	123	112	113	950	1254	4.8	5.0	483	30	19	12	<0.01	<0.01	0.04	<0.5	1.0	0.04	-12	-2.6
Gergedi (Hippo Pool)	Hot spring	2014/1/28	41.8	8.4	891	103	23	26	411	554	11	13	213	13	3.2	0.68	<0.01	<0.01	0.05	<0.5	0.24	0.02	-6	-1.9
Welenchiti	Water well (hot spring)	2014/1/30	36.8	8.6	724	108	8.0	8.0	375	502	15	2.2	128	14	19	12	<0.01	<0.01	0.05	N/A	0.19	0.01	-20	-3.9
Bulbula River	River water	2014/1/20	21.1	7.6	437	35	11	6.4	197	257	0.8	1.5	66	12	18	8.6	1.4	1.1	N/A	N/A	0.06	0.02	+32	+5.0
Awash River (Sodere)	River water	2014/1/26	20.2	8.0	312	17	13	10	110	148	1.1	1.2	29	5.5	26	5.0	0.45	0.37	N/A	N/A	0.04	0.02	+1	-0.4
Lake Langano	Lake water	2014/1/21	30.4	9.1	1970	139	182	17	644	813	77	16	470	29	6.0	3.1	17	13	N/A	N/A	0.72	<0.01	+42	+7.2
Lake Koka (Haro Ropi)	Lake water	2014/1/29	25.1	7.6	313	15	13	9.0	92.6	121	0.4	1.0	26	6.0	29	5.3	0.31	0.25	N/A	N/A	0.04	0.01	+3	0.0
Northeast area of Ethiopian rift valley																								
- Sampling and analysis conducted by JICA study team																								
Beseka Lake 001	Lake water	2014/4/9	31.3	9.5	6540	66	512	509	1850	2061	494	31	1670	62	2.4	0.36	0.33	0.30	0.09	<0.5	3.1	0.081	+47	+8.7
Dofan 003	Hot spring	2014/4/6	52.1	8.5	1500	104	139	174	386	519	12	8.7	311	15	6.1	2.9	0.01	0.02	<0.01	<0.5	0.86	0.005	-7	-1.3
Dofan 004	Hot spring	2014/4/6	44.6	8.4	1430	96	133	133	372	501	10	8.6	289	16	11	3.4	0.02	0.03	<0.01	<0.5	0.93	0.007	-7	-1.0
Meteka 001	Hot spring	2014/4/5	47.8	8.6	1170	56	108	93	338	452	14	1.8	243	11	4.2	2.2	0.01	0.02	<0.01	<0.5	0.56	0.006	-15	-2.7
Meteka 002	Hot spring	2014/4/5	77.0	8.1	6950	194	1350	943	643	867	8.3	4.8	1470	58	61	16	<0.01	0.12	2.3	<0.5	4.0	0.11	-21	-3.0
Meteka 003	Hot spring	2014/4/5	86.9	8.2	7200	212	1480	780	815	1100	13	5.6	1570	66	46	19	6.9	11	3.1	<0.5	4.0	0.053	-19	-3.1
Awash River (Meteka)	River water	2014/4/5	30.3	8.0	770	32	62	41	211	284	2.2	2.2	130	9.0	27	4.7	<0.01	0.03	N/A	N/A	0.29	0.003	+9	+0.5
Allalobeda 001	Hot spring	2014/4/12	99.2	9.2	2860	328	714	203	39	48	5.7	0.56	516	37	25	0.01	0.18	0.01	0.71	<0.5	2.2	0.14	-21	-1.4
Allalobeda 002	Hot spring	2014/4/12	96.9	8.8	2900	316	713	209	36	48	2.3	0.62	523	38	27	0.01	0.19	0.01	1.7	<0.5	2.0	0.066	-20	-1.0
Awash River (Tendaho)	River water	2014/4/12	28.5	8.4	720	22	46	53	219	295	5.6	1.8	118	6.5	25	9.2	<0.01	0.01	N/A	N/A	0.18	0.042	+18	+2.7
Seha 002	Hot spring	2014/4/13	83.3	8.4	2390	142	514	162	211	284	5.4	3.6	477	26	6.1	0.24	0.18	0.18	0.63	<0.5	3.7	0.017	+2	+0.4
Loma Lake 001	Lake water	2014/4/15	31.7	9.4	14100	192	3400	937	1160	1347	256	13	3180	315	1.2	0.32	<0.01	0.01	N/A	N/A	18	0.006	+42	+10.0
- Sampling was conducted by GSE, and analysis by JICA study team																								
Dallol-1	Hot spring	2014/5/7	109.7	-0.48	189000	128	209000	4030	<0.5	-	-	384	89400	11100	4000	4220	534	19700	16	<0.5	438	0.66	-	-
Dallol-2	Hot spring	2014/5/7	42.0	0.82	52700	140	421000	31	82	0	0	77	1510	1700	14500	50700	<0.01	<0.01	N/A	<0.5	191	<0.001	-36	-22
Dallol-3	Hot spring	2014/5/8	46.4	1.2	67000	278	353000	53	46	0	0	16	1670	700	8990	114000	<0.01	2090	1.6	<0.5	111	<0.001	-	-22
Dallol-4 (As Ale)	Hot spring	2014/5/8	46.7	6.4	169000	24	204000	286	5.4	3.9	0	13	88200	5700	25000	4540	<0.01	<0.01	N/A	<0.5	46	0.005	+23	-
Erer-1	Hot spring	2014/5/15	39.0	7.7	3140	28	191	1370	5.5	7.3	0.03	3.8	473	6.0	240	3.2	<0.01	0.21	<0.01	<0.5	0.74	<0.001	-14	-4.0
Erer-2	Hot spring	2014/5/15	43.3	7.5	3630	32	199	1730	5.7	7.4	0.02	4.2	485	10	316	38	<0.01	0.99	<0.01	<0.5	1.3	0.003	-11	-3.0
Arabi-1	Hot spring	2014/5/16	72.0	7.9	3880	80	656	572	356	477	2.9	8.3	773	38	43	3.6	0.13	0.14	<0.01	<0.5	0.20	0.004	-12	-2.9
Arabi-2	Hot spring	2014/5/16	93.0	8.0	3960	76	680	590	329	442	3.4	8.7	796	39	42	3.6	0.04	0.72	0.07	<0.5	0.30	<0.001	-10	-2.2

出典：調査団

表 3.4.11 地熱ガスの化学・同位体分析結果

Location		LA-8	Gebiba	Bobesa	Bobesa	Boko	Boseti	Meteka	Dofan	Dofan	Dubuti	Ayrobera
Code		ALT 002	BBS 004	BBS 001	BBS 002	BKO 001	BST 006	MTK003	DFN007	DFN008	DBT002	AYB001
Date		2014/1/19	2014/1/20	2014/1/19	2014/1/19	2014/1/26	2014/1/31	2014/4/5	2014/4/7	2014/4/7	2014/4/11	2014/4/14
Temperature (°C)		109.6	94.3	89.7	92.3	72.5	75.1	86.9	91.8	94.4	99.2	99.3
Noncondensable gases												
H ₂ O and NCG (total 100%)	H ₂ O (vol%)	97.88	99.18	0	0	0	0	0	0	0	99.83	99.94
	NCG (vol%)	2.12	0.82	100	100	100	100	100	100	100	0.17	0.06
NCG composition (total 100%)	H ₂ S (vol%)	0.1	0.1	2.9	0.6	2.2	2.2	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0
	CO ₂ (vol%)	99.6	99.0	59.2	68.4	65.6	59.5	91.7	73.5	82.0	94.8	84.4
	R gas (vol%)	0.3	0.9	37.9	31.0	32.2	38.3	8.3	26.5	18.0	3.1	15.6
R gas composition (total ~100%)	H ₂ (vol%)	12.1	1.66	0.003	0.004	0.002	0.001	0.059	0.0038	0.986	26.6	0.014
	N ₂ (vol%)	32.2	65.6	78.3	78.0	78.2	78.1	74.9	78.4	79.9	47.4	85.2
	CH ₄ (vol%)	52.6	27.2	0.09	0.56	0.01	0.005	19.9	nd	0.04	21.0	12.3
	O ₂ (vol%)	2.3	4.2	20.7	20.5	20.8	21.0	3.8	20.7	18.2	4.0	0.56
	He (vol%)	0.18	0.079	0.001	0.003	0.001	0.001	0.16	0.0006	0.0013	0.027	0.066
	Ar (vol%)	0.66	1.17	0.93	0.93	0.94	0.94	1.27	0.93	0.89	0.92	1.83
NCG composition (total 100%)	H ₂ S (vol%)	0.1	0.1	2.9	0.6	2.2	2.2	nd	nd	nd	2.1	nd
	CO ₂ (vol%)	99.6	99.0	59.2	68.4	65.6	59.5	91.7	73.5	82.0	94.8	84.4
	H ₂ (vol%)	0.0363	0.0149	0.001	0.001	0.0005	0.0004	0.0049	0.0010	0.177	0.825	0.0022
	N ₂ (vol%)	0.0966	0.591	29.7	24.2	25.2	29.9	6.22	20.8	14.4	1.47	13.3
	CH ₄ (vol%)	0.158	0.245	0.04	0.18	0.003	0.002	1.65	nd	0.007	0.652	1.92
	O ₂ (vol%)	0.0068	0.038	7.8	6.34	6.70	8.04	0.31	5.48	3.27	0.12	0.088
	He (vol%)	0.00055	0.00072	0.0005	0.0009	0.0002	0.0002	0.013	0.0002	0.0002	0.00084	0.010
Ar (vol%)	0.0020	0.011	0.35	0.29	0.30	0.36	0.105	0.25	0.16	0.029	0.286	
NCG composition (total ~100%, corrected for air contamination)	H ₂ S (vol%)	0.1	0.1	4.6	0.9	3.2	3.6	nd	nd	nd	2.1	nd
	CO ₂ (vol%)	99.6	99.2	94.7	98.1	96.4	96.4	93.1	99.5	97.2	95.4	84.8
	H ₂ (vol%)	0.0363	0.0149	0.002	0.002	0.0008	0.0006	0.0049	0.0014	0.210	0.830	0.0022
	N ₂ (vol%)	0.0712	0.450	0.643	0.786	0.332	nd	5.12	0.483	2.59	1.01	13.0
	CH ₄ (vol%)	0.158	0.246	0.06	0.25	0.005	0.003	1.67	nd	0.008	0.66	1.93
	He (vol%)	0.00055	0.00072	0.0008	0.001	0.0003	0.0004	0.013	0.0002	0.0003	0.00085	0.010
Ar (vol%)	0.0017	0.0089	0.0055	0.0068	0.0041	nd	0.0927	0.0021	0.017	0.023	0.283	
Isotopic ratios of noble gases												
³ He/ ⁴ He		17.2±0.2	9.75±0.11	8.29±0.12	-	-	-	14.6±0.1	-	-	-	5.84±0.05
⁴ He/ ²⁰ Ne		524	26.2	0.635	-	-	-	184	-	-	-	0.486

nd: not detected
-: not analyzed

出典：調査団

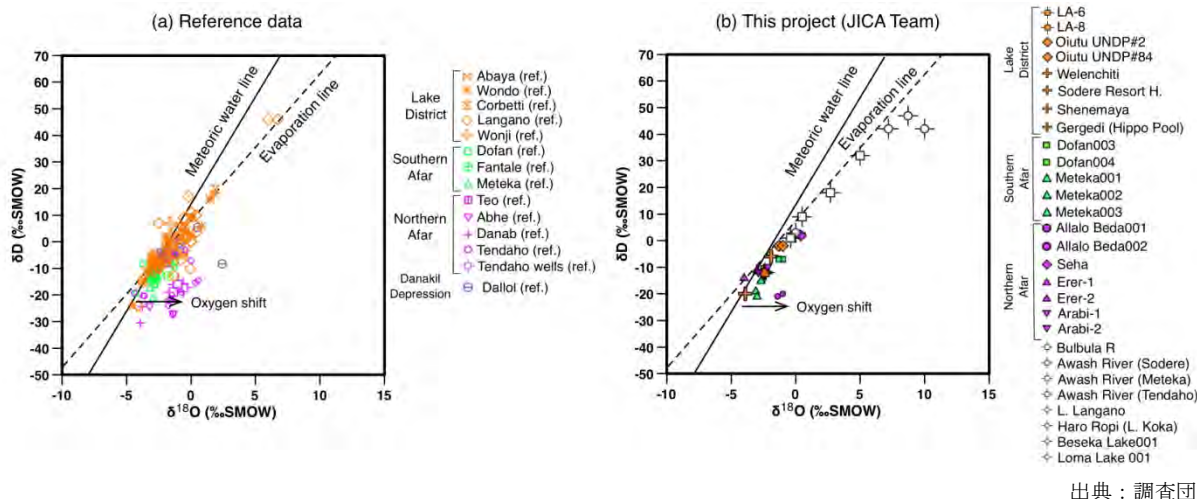


図 3.4.5 地熱流体および地表水の δD と $\delta^{18}O$ の関係

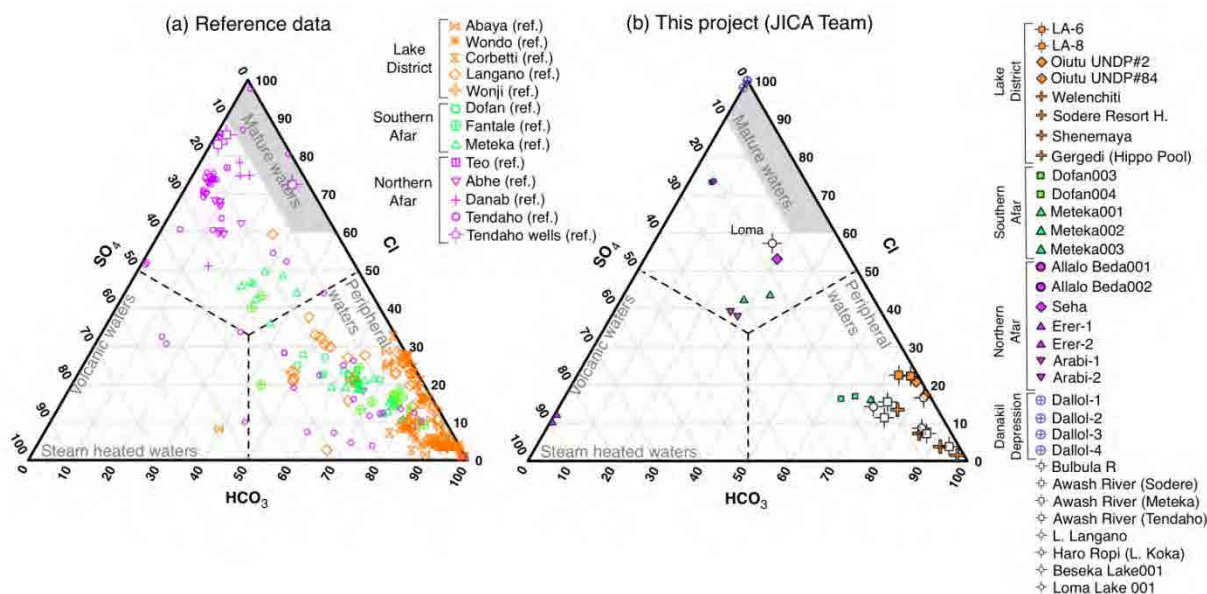
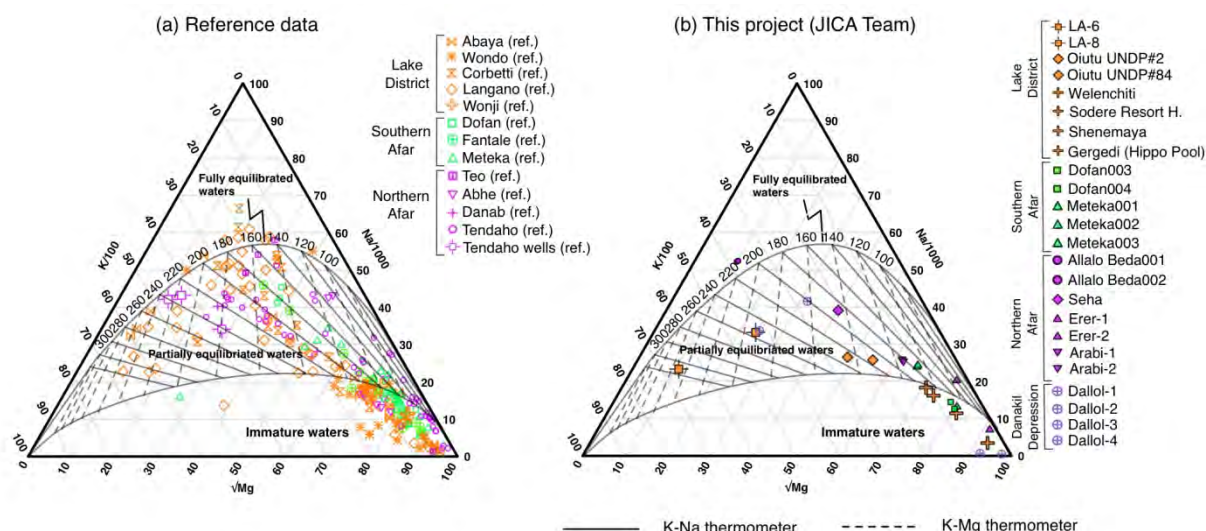


図 3.4.6 地熱流体および地表水の $Cl-SO_4-HCO_3$ ダイアグラム

5) 地化学温度計を用いた貯留層温度の推定

流体の化学組成から水-岩石反応の程度(地熱流体の熟成度)を検討するために作成した、Na-K-Mg ダイアグラム (Giggenbach, 1988)を図 3.4.7 に示す。図を見ると、Tendaho 地域の坑井熱水と Allalobeda 温泉は、周囲の岩石とほぼ平衡状態(fully equilibrated)にあると解釈できる。この特徴は、同流体が Cl 型で、かつ同位体組成に酸素同位体シフトを示すことと整合的である。一方で、Aluto の坑井熱水と Langano の Otiutu 温泉は岩石と部分平衡(partially equilibrated)の状態にあること、その他の温泉は岩石と平衡状態にないこと(immature)が判断できる。岩石との反応が平衡に達していない地熱流体に Na、K を用いる地化学温度計を適用した場合、実際とかけ離れた温度が得られる場合がある(Giggenbach, 1991)。そこで、貯留層温度の推定には石英温度計を含む複数の地化学温

度計を用い、それらと比較して貯留層温度を推定する。



出典：調査団

図 3.4.7 地熱流体の Na-K-Mg ダイアグラム

本調査で得られた化学組成を用いた地化学温度計の計算結果を表 3.4.13 に示す。この結果を、既存分析データの計算結果および坑井の検層温度(Seifu, 2006; D'Amore et al., 1997)と比較する。図 3.4.8 および図 3.4.9 の比較の図から次のことが言える。[1] 地熱坑井(LA-6, LA-8, TD-1, TD-2, TD-4)では、石英温度と検層温度がほぼ一致する。[2] 各調査地域で、温泉の石英温度は比較的狭い範囲の値を示し、同一地域内の温泉帯水層の代表温度と見なすことができる。一方、Na-K 温度と Na-K-Ca 温度はばらつきが大きい。[3] Alallobeda の石英温度を除いて、温泉の地化学温度は坑井の地化学温度よりも概して低い。[4] 温泉の石英温度と Na-K 温度・Na-K-Ca 温度の高低の順序は地域ごとに異なり、全調査地域を通じての単一の傾向は認められない。

以上の点から、いずれの地化学温度計を用いても、温泉の計算結果をそのまま地熱貯留層温度とみなすことはできない。そこで、上記[1]と[2]に着目し、また、Aluto-Langanu を一つの地熱系と見なして、貯留層温度を推定する。すなわち、Aluto の坑井熱水と Langanu の温泉の石英温度を地熱貯留層と温泉帯水層の温度差とみなし、この差を各地域の温泉の石英温度に加えることで、それぞれの地域の貯留層温度とする方法である。貯留層と温泉帯水層の温度差は、Aluto 地熱坑井の中間的な温度を示す LA-8 と OIutu 温泉の石英温度の差から 70°C とする。この方法は、全地域の貯留層温度を同一の方法で推定するという本調査の基本方針に則ったものである。

表 3.4.12 地熱流体の地化学温度計算結果

Sample	Date	Manifestation	Temperature measured (°C)	Geothermometers (°C)						
				Quartz (silica)	Chalcedony (silica)	Na-K (A)	Na-K (F)	Na-K (G)	K-Mg (G)	Na-K-Ca
LA-6 *1	2014/1/18	Geothermal well (not boiling)	68.2	324	261	321	326	331	250	319
LA-8 *2	2014/1/19	Geothermal well	-	260	233	226	241	254	192	274
Oiutu UNDP#84	2014/1/21	Hot spring	56.4	178	159	196	212	228	144	218
Oiutu UNDP#2	2014/1/21	Hot spring	65.3	188	168	178	194	211	131	200
Shenemaya	2014/1/29	Drinking water well	40.6	134	118	164	180	197	103	169
Sodere Resort H.	2014/1/26	Hot spring	50.3	138	121	164	179	197	91	174
Gerged (Hippo Pool)	2014/1/28	Hot spring	41.8	127	111	163	178	196	107	174
Welenchiti	2014/1/30	Drinking water well	36.8	130	113	210	225	240	72	181
Dofan 003	2014/4/6	Hot spring	52.1	128	111	147	162	180	91	163
Dofan 004	2014/4/6	Hot spring	44.6	123	107	156	171	189	91	164
Meteka 001	2014/4/5	Hot spring	47.8	94	79	143	157	176	87	159
Meteka 002	2014/4/5	Hot spring	77.0	170	151	134	148	168	105	160
Meteka 003	2014/4/5	Hot spring	86.9	176	157	138	152	171	106	167
Allalobeda 001	2014/4/12	Hot spring	99.2	213	191	174	190	207	224	181
Allalobeda 002	2014/4/12	Hot spring	96.9	210	188	175	191	208	226	181
Seha 002	2014/4/13	Hot spring	83.3	147	130	155	170	188	145	177
Dallol-1	2014/5/7	Hot spring	109.7	141	124	222	236	250	189	273
Dallol-2 *3	2014/5/7	Hot spring	42.0	146	129	-	-	-	87	328
Dallol-3 *3	2014/5/8	Hot spring	46.4	198	178	-	-	-	57	255
Dallol-4 (As Ale)	2014/5/8	Hot spring	46.7	56	42	167	182	200	162	207
Erer-1	2014/5/15	Hot spring	39.0	62	48	80	87	108	67	48
Erer-2	2014/5/15	Hot spring	43.3	68	53	101	111	131	52	57
Arabi-1	2014/5/16	Hot spring	72.0	112	97	148	163	181	114	163
Arabi-2	2014/5/16	Hot spring	93.0	109	94	148	163	181	115	164

Reference of geothermometers: quartz from Arnósson (2000), chalcedony from Arnósson et al. (1983), Na-K(A) from Arnósson (2000), Na-K (F) from Fournier (1979), Na-K (G) and K-Mg from Giggenbach (1988), Na-K-Ca from Fournier and Truesdell (1973)

*1 Water sample was collected in a probably unstable production state immediately after blowing started.

*2 Geothermometers of LA-8 were calculated from the chemical composition of produced water corrected for boiling at an atmospheric pressure.

*3 Water samples from Dallol are strongly acidic and not appropriate for calculation of geothermometers. Na-K thermometers show anomalous values that are not described in the table.

出典：調査団

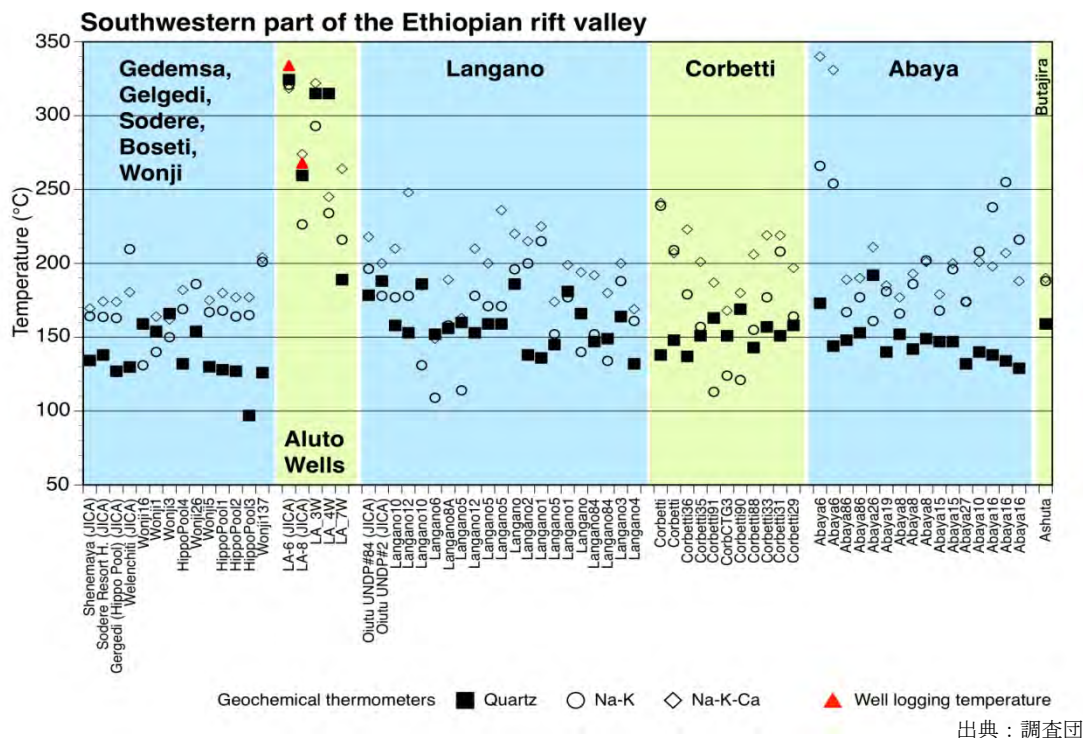


図 3.4.8 地熱流体の地化学温度計算結果の比較 (エチオピア地溝帯南西部)

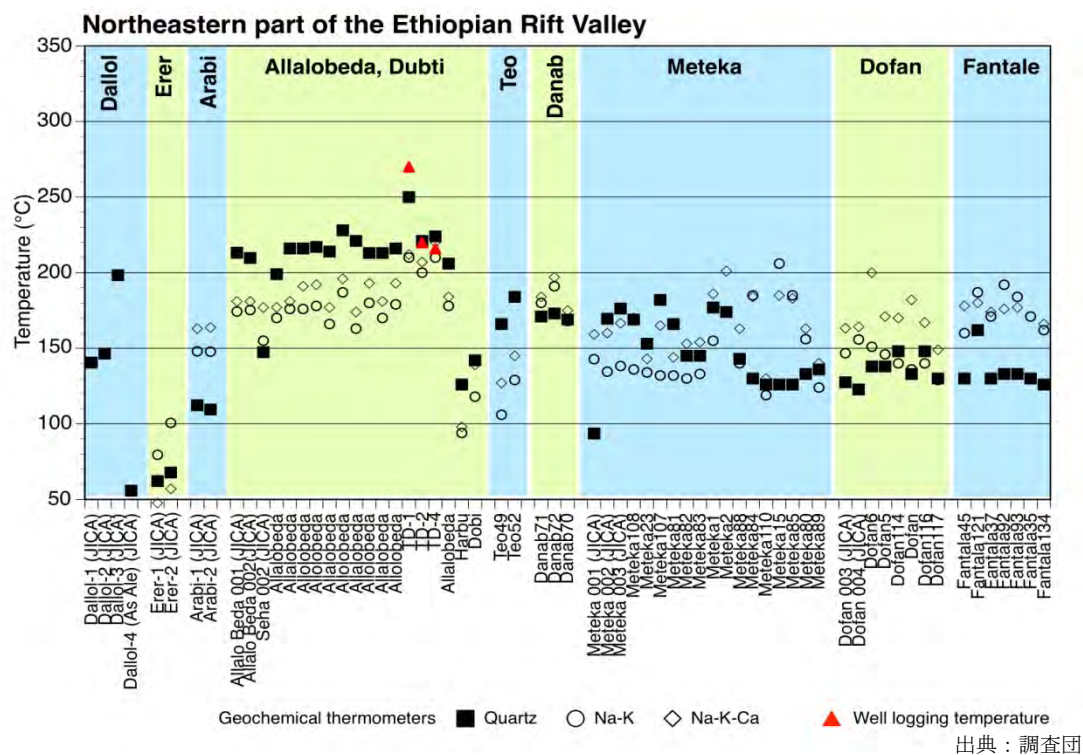


図 3.4.9 地熱流体の地化学温度計算結果の比較 (エチオピア地溝帯北東部)

貯留層温度の推定方法に、ガス化学組成を用いるガス地化学温度計の利用がある。しかし、エチオピア地溝帯には沸騰温度未満の温度を示す噴気が多く、それらは大気成分を多く含んでいる。この場合、ガス地化学温度は信頼性に乏しい。そこで、大気成分の寄与を計算により取り除いた組成を用いてガス地化学温度を計算した。表 3.4.13 の計算結果をみると、値は不規則に大きくば

らつき、貯留層温度の推定には利用できないと判断する。このことから、貯留層温度の推定には、熱水化学組成を用いる地化学温度計の使用がより適切と判断する。

表 3.4.13 地熱ガスの地化学温度計算結果

Location	Code	Date	Temperature at surface (°C)	Geothermometers (°C)			
				CO ₂ -H ₂ S-H ₂ -CH ₄	H ₂ /Ar	CO ₂ /Ar	CH ₄ /CO ₂
LA-8	ALT002	2014/1/19	109.6	(194)	268	319	336
Gebiba	BBS 004	2014/1/20	94.3	(171)	191	286	320
Bobesa	BBS 001	2014/1/19	89.7	(176)	(137)	295	(371)
Bobesa	BBS 002	2014/1/19	92.3	(150)	(134)	291	319
Boko	BKO 001	2014/1/26	72.5	(173)	(124)	301	(482)
Boseti	BST 006	2014/1/31	75.1	(173)	-	-	(507)
Meteka	MTK003	2014/4/5	86.9	-	86	235	261
Dofan	DFN007	2014/4/7	91.8	-	161	315	-
Dofan	DFN008	2014/4/7	94.4	-	251	272	(458)
Dubuti	DBT002	2014/4/11	99.2	232	284	265	288
Ayrobera	AYB001	2014/4/14	99.3	-	28	207	255

Reference of geothermometers: CO₂-H₂S-H₂-CH₄ from D'Amor and Panichi (1980), H₂/Ar, CO₂/Ar, CH₄/CO₂ from Giggenbach (1991)
 Temperatures in brackets indicate uncertainty of calculation results due to inadequate significant numbers of concentrations used in the equations.
 Dash (-) indicates nonapplication of calculation due to lack of significant numbers of concentrations used in the equations.

出典：調査団

温泉の石英温度に、地熱貯留層と温泉帯水層の温度差(70 °C)を加えて求めた貯留層温度の推定値を表 3.4.14 に示す。ここで温泉のデータが存在しない調査地域については、近隣地域の推定値を適用した。次に、これらの推定貯留層温度を基礎として、容積法による地熱資源量の計算に用いる温度条件を決定した。その際、温泉だけでなく噴気を含めた地熱徴候の分布密度と活動度を加味して、容積法計算のための温度条件を 4 つの温度範囲(クラス A-D)として定めた(表 3.4.14)。その温度条件は、A: 240°C-290 °C、B: 210-260 °C、C: 170-220 °C、D: 130-170 °C である。

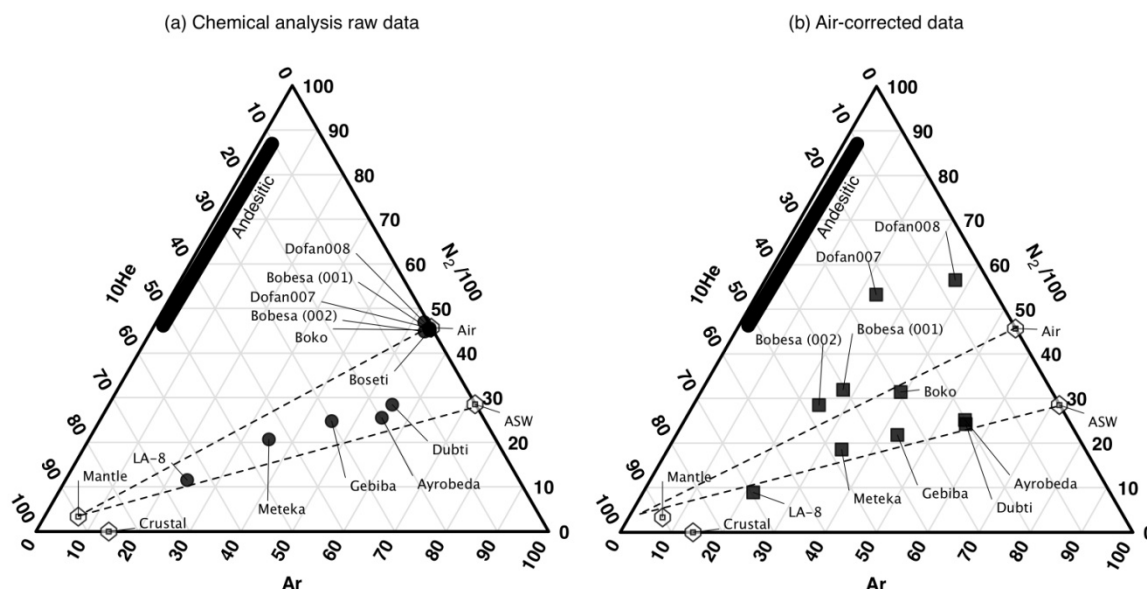
表 3.4.14 容積法のための貯留層温度範囲の推定結果

No.	Site	Estimated reservoir temperature range (°C)	Tq+70°C	Tq: Quartz temperature (°C)	Additional factors or assumption for estimation of reservoir temperature
1	Dallol	B 210-260	210-220	140-150	
2	Tendaho-3 (Allalobeda)	A 240-290	270-290	200-220	
3	Boina	C 170-220	-	NO DATA	T same as neighboring sites
4	Damali	C 170-220	-	NO DATA	T same as neighboring sites
5	Teo	B 210-260	230-250	160-180	
6	Danab	B 210-260	240	170	
7	Meteka	B 210-260	240-250	170-180	
8	Arabi	C 170-220	180	110	
9	Dofan	B 210-260	190-210	120-150	
10	Kone	D 130-170	-	NO DATA	A lack of active manifestation
11	Nazareth	C 170-220	190-210	120-140	
12	Gedensa	D 130-170	200	130	A lack of active manifestation
13	Tulu Moye	C 170-220	-	NO DATA	T same as neighboring sites
14	Aluto-2 (Finkilo)	A 240-290	250-260	NO DATA	T same as Aluto-1
15	Aluto-3 (Bobesa)	A 240-290	250-260	NO DATA	T same as Aluto-1
16	Abaya	B 210-260	210-230	140-160	
17	Fantale	C 170-220	200	130	
18	Boseti	B 210-260	200	130	Active steam vents
19	Corbetti	B 210-260	210-220	140-150	
20	Aluto-1 (Aluto-Langano)	A 240-290	250-260	180-190	
21	Thendaho-1 (Dubti)	A 240-290	270-290	NO DATA	T same as Allalobeda
22	Tendaho-2(Ayrobera)	A 240-290	270-290	NO DATA	T same as Allalobeda

出典：調査団

6) 地熱ガスの起源と熱源の関係

ここでは地熱ガスの化学組成と希ガスの同位体組成(表 3.4.12)を用いて、エチオピア地溝帯の地熱ガスの起源を考察する。図 3.4.10 に地熱ガスの He-Ar-N₂ 濃度比を Giggenbach (1996)による端成分とともに示す。同図(a)は生の分析値をプロットしたものである。坑井蒸気 (LA-8)のほか、沸騰温度以上の温度を示す噴気 (Gebiba, Ayrobeda, Dubti)および温泉付随ガス (Meteka) は大気に飽和した水の成分(地下水)とマントル成分の混合直線付近にプロットされる。マントル成分の混合割合は地熱貯留層を代表する LA-8 が最も大きい。これにより、地熱ガスの起源はマントルからの発散ガスと想定できる。一方で、温度が低い噴気(Boko, Boseti, Bobesa, Dofan)のガス組成は大気成分を示す。この大気成分は、地熱蒸気が地下深部から上昇する際に、不飽和帯に含まれる大気を取り込んだものと推察する。この大気成分を計算によって取り除いた組成によるダイアグラムが図 3.4.10(b)である。この図を見ると、Bobesa、Boko の噴気ガスにもマントル起源ガスが含まれることが明らかである。



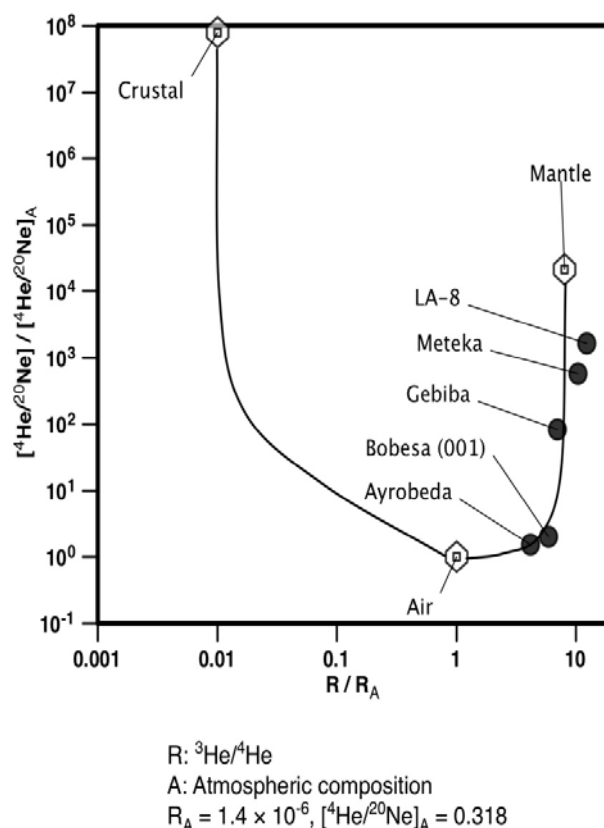
出典：調査団

図 3.4.10 地熱ガスの He-Ar-N₂ ダイアグラム

地熱ガス中のマントル成分は、希ガス同位体組成によっても確認できる。³He/⁴He と ⁴He/²⁰Ne の関係を、大気、地殻、マントルの端成分(Leśniak et al, 1997)とともに図 3.4.11 に示す。同図において、エチオピア地溝帯の地熱ガスはマントル成分と大気成分の混合曲線付近にプロットされ、地熱ガスにマントル成分が含まれることが明らかである。

深部から上昇したマントルが地殻を引き裂いて形成される地溝帯は、マントルからの熱流量が特に大きな領域である。したがって、地熱ガス中のマントル成分は、地熱系の熱源としてのマントル、またはマントルから発生したマグマの存在を示唆する。また、熱源から地表へのガスの移動は、地下深部と地表とをつなぐガスの上昇経路、すなわち断裂帯の証拠と捉えることができる。この断裂帯に十分な量の流体が供給されることで地熱貯留層が形成されると解釈できることから、マントル成分ガスの寄与が顕著な地域には、良好な地熱貯留層が胚胎する可能性が大きいと考え

られる。



出典：調査団

図 3.4.11 地熱ガスの ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比と ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ 比の関係

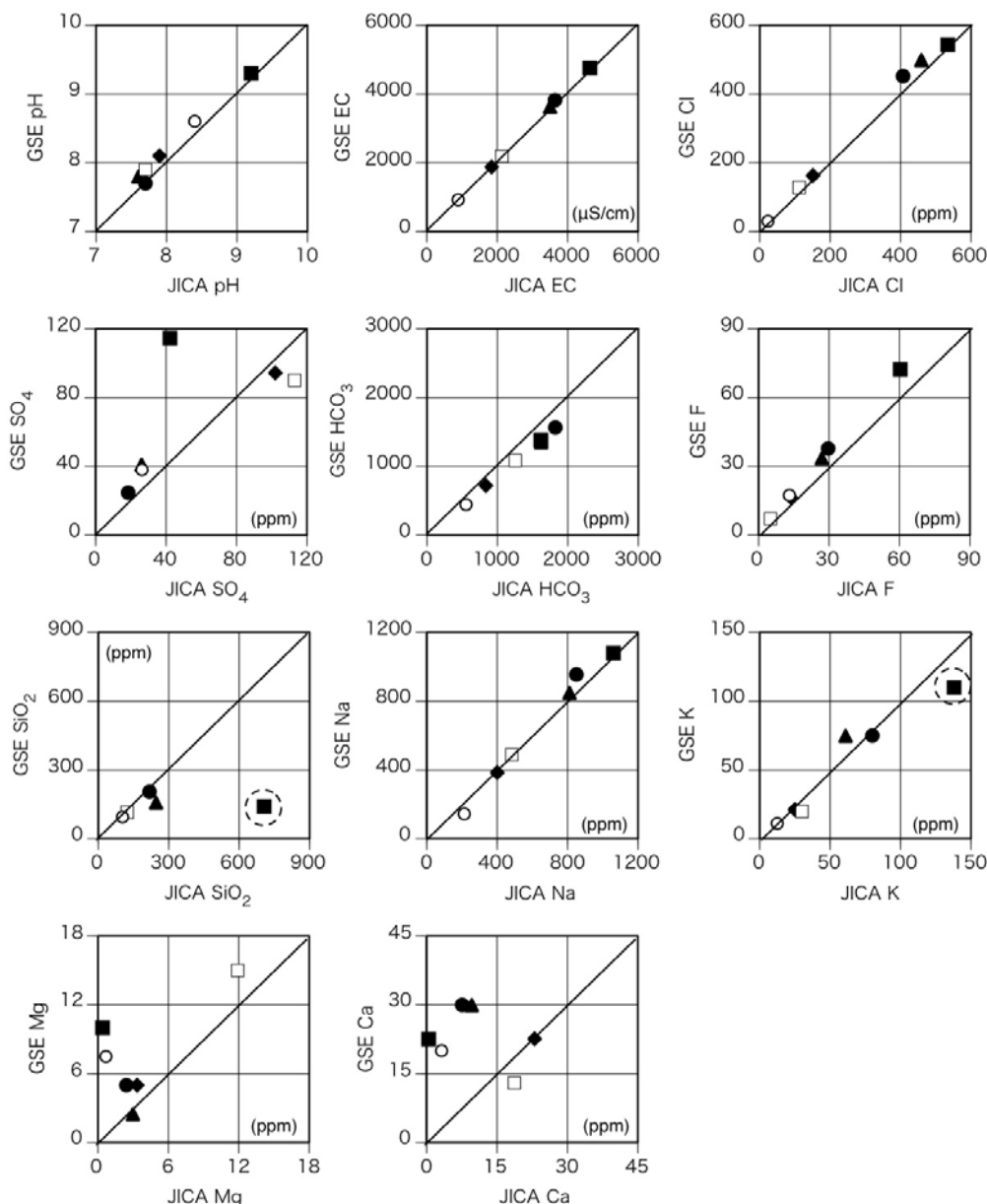
7) GSE の分析精度の確認

GSE の流体化学分析の分析精度を確認するため、JICA チームと GSE の間で同一試料を分け、それぞれの分析機関で分析を行い、その結果を比較した。このとき、成分濃度の異なる試料を用いることで、低濃度から高濃度までの分析精度を確認した。用いた試料は、LA-8、Oiutu #2、Oiutu #84、Shenemaya、Sodere、Gergedi の 6 試料である。分析結果の比較を図 3.4.12 に示す。比較の結果は次のとおりである。

- pH, 電気伝導度(EC), Cl, SO₄, HCO₃, F, Na, K については、LA-8 の SO₄ を除くと、GSE と JICA チームの分析結果はほぼ同じであり、GSE の分析精度に問題はないと判断できる。
- 高濃度の SiO₂ に非常に大きな差が認められる。理由として、GSE が吸光光度法で SiO₂ を分析する際に、ポリマー状シリカの解重合を行っていないことが考えられる。SiO₂ 濃度は地化学温度計に頻繁に使用されるきわめて重要な成分であることから、SiO₂ 分析の精度向上は GSE にとって最優先の課題と言える。
- K については両分析結果に大差はなく、GSE は一定の分析精度を有しているが、高濃度 (LA-8) の K にはわずかながら差が生じている。K は Na と組み合わせて地化学温度計に用いられる重要な成分であるので、高濃度 K の分析精度を高めることが望ましい。

- Ca と Mg については、GSE の分析精度は低いのが現状である。これに対しては、ICP 分析法の導入が改善方法の一つと考えられる。GSE は ICP 分析装置を所有するが使用していない。この ICP 分析装置を整備し使用することで Ca と Mg の分析精度は向上すると考えられる。また、ICP 分析法は Ca と Mg の他にも多くの元素を短時間で分析可能であることから、GSE の分析能力強化に有効である。

以上を踏まえ、GSE の分析技術の優先課題は高濃度の SiO₂ および K の分析精度の向上と考える。そこで、本邦研修において、吸光光度法によるシリカ分析と、炎光光度法による Na、K の同時分析の実習を行った。これらの分析方法は簡素であり、かつ必要な分析装置は比較的安価である。このことから、これらの分析方法の導入は、GSE の分析能力の向上に有効と考えられる。



出典：調査団

図 3.4.12 GSE と JICA 調査団の分析結果の比較

3.5 貯留層評価

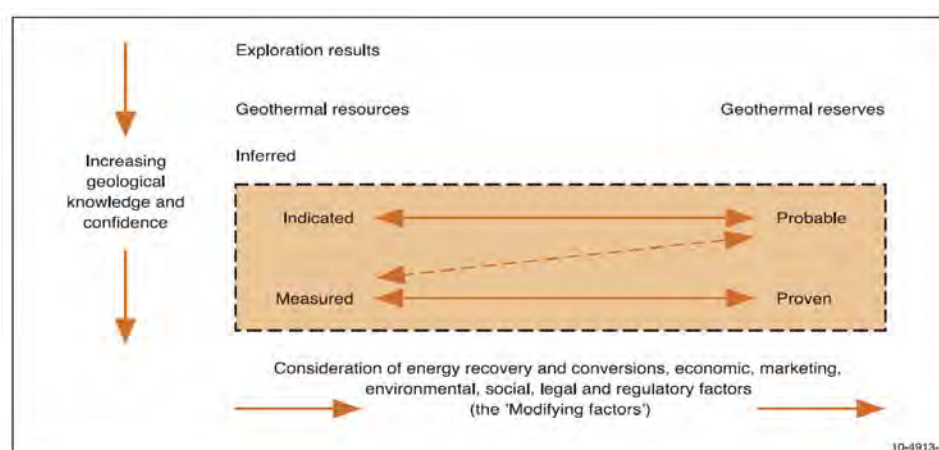
3.5.1 目的

貯留層評価は、エチオピア国全国の地熱発電開発のマスタープラン策定のための基本情報とする目的で行った。

3.5.2 資源量 (Resource) と埋蔵量(Reserve)の定義

石油の資源量評価では、調査段階と経済性により資源量 (Resource) と埋蔵量(Reserve)を区分している。P.Muffler – R. Cataldi (1977)および USGS (1987) などにおいて、石油における資源量評価の地熱資源への応用の研究が実施され、その後の地熱においても、同様の考え方で区分する研究は多いが、標準的なものは策定されていない。今回の調査は、IEA (International Energy Agency)などの比較研究の中で、地熱資源量評価法としては、調査の少ない初期段階での資源量(Resource)についての定義が最も明瞭で、現在豪州などで使用が検討されている Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee(AGRCC)の“Geothermal Lexicon For Resources and Reserves Definition and Reporting Edition 2 (2010)”のガイドラインに従う。ガイドライン中の用語の定義の模式図を図 3.5.1 に示す。このガイドラインは、世界で初めて地熱データを金融市場に報告する方法を規定したものである。

このガイドラインでは、地質情報の確実性に基づいた地熱資源量 (Resources) を“**Inferred (推定された)**”、“**Indicated (提示された)**”、“**Measured (測定された)**”の三つのカテゴリーに分けている。また、それぞれのカテゴリーに対応する地熱資源埋蔵量 (Reserves) を、**Probable (可能性のある)**、**Proven(確認済み)**に二分類している。Resources(資源量) と Reserves (埋蔵量) の定義を定める(変換する)調整項目 (Modifying Factors) は経済要因、市場要因、環境社会要因および法制度的要因等の項目を含んでいる。いわば、“Resources”は自然条件的な要素を重視した資源量評価の分類と言え、“Reserves”は開発を前提とした実務的な採掘(回収)可能な埋蔵量の分類と言える。



出典：Australian Geothermal Energy Group, Geothermal Code Committee(AGRCC), 2010

図 3.5.1 探査結果と”Geothermal Sources” および”Geothermal Reserves”との関係図

「エチオピア政府による再生可能エネルギーの拡大プログラム投資プラン（ドラフトファイナル）」(Scaling-Up Renewable Energy Program Ethiopia Investment Plan (Draft Final))においては、地熱開発は、(i)既存資料の検討、(ii)詳細地表面調査（地質、地化学、地球物理）、(iii)調査ボーリングと坑井試験（最低3坑）、(iv)評価ボーリング（4から6坑）と坑井試験、(v)フィージビリティ調査、(vi)生産井、発電所設計、環境影響調査および貯留層評価、(vii)発電所建設、発電開始、(viii)貯留層管理、将来開発、の8段階で構成されている。この8段階とAGRCCのカテゴリーを対比すると、表3.5.1のとおりとなる。

エチオピアでの地熱調査ではAluto-LanganoとTendaho地域以外では地熱貯留層に到達した坑井は掘削されておらず、AGRCCの定義では推定資源量(Inferred Resource)に対応する。Aluto-1(Aluto-Langano)とTendaho-1(Tendaho-Dubti)についてはすでに試掘が掘削され、地熱貯留層についての情報が得られている。このうちTendaho-1(Tendaho-Dubti)は、試掘調査やフィージビリティ調査が実施されているので提示資源量(Indicated Resource)に分類できる。一方、Aluto-1(Aluto-Langano)では、発電所が建設されて発電が開始された実績があるので、資源の一部は測定資源量(Measured Resource)に分類できると考えられる。

表 3.5.1 エチオピア国における調査段階とAGRCCのカテゴリーの対比

エチオピア政府による8段階の開発ステージ	AGRCC, 2010	
	Resource (資源量)	Reserve (埋蔵量)
(i) 既存資料の検討	Inferred (推定)	-
(ii) 詳細地表面調査（地質、地化学、地球物理）	Indicated (提示)	Probable (可能性のある)
(iii) 調査ボーリングと坑井試験（最低3坑）		
(iv) 評価ボーリング（4-6坑）と坑井試験		
(v) フィージビリティ調査	Measured (測定)	Proven (確認済み)
(vi) 生産井、発電所設計、環境影響調査および貯留層評価		
(vii) 発電所建設、発電開始		
(viii) 貯留層管理、将来開発		

出典：調査団

3.5.3 評価手法 ー容積法

貯留層評価は、地熱調査の各段階で行われ、調査段階が進んで調査精度が高くなるに従い、より精度が高い貯留層評価手法が用いられる。貯留層にかかる情報が少ない調査初期の段階では「容積法」による評価が行われる。容積法による評価は通常確率的手法が併用される。調査が進んだ段階では、二次元ないしは三次元の数値シミュレーションによる評価が行われる。また、施設運用段階ではヒストリーマッチングとよばれるキャリブレーションが行われる。

本調査ではAluto地域とTendaho地域を除いて試掘調査は行われていないので、リモートセンシングや地表面地質調査、地化学調査および物理探査をもとに地熱概念モデルを想定して、確率的手法を併用した「容積法」を用いて貯留層評価を行った。確率的手法は「モンテカルロシミュレーション」を用いた。

容積法は、米国地質調査所(USGS 1978)によって提唱された簡便な方法であり、下記を前提としている。

- 地熱エネルギーは有限の容積をもつ「貯留層」に蓄積されている。
- 貯留層は、調査結果から人為的に推定してその範囲を定める。ただし、貯留層の範囲は、現在の掘削技術で経済的に掘削可能な範囲とする。
- 貯留層に蓄積されている地熱エネルギーは、地熱流体（通常は 2 相流体）の形で地表に回収される。流体は地下水循環の形で補給されると仮定する。
- ただし、貯留層の外部からの貯留層への地熱エネルギーの補給は考えない。すなわち、回収する地熱エネルギーは、現在貯留層に蓄積されている地熱エネルギーを対象とする。
- 貯留層評価は、プラントの運用期間を通じて現在蓄積されている地熱エネルギーを回収し、運用期間最終日に突然地熱エネルギーが枯渇すると仮定した時の回収可能な地熱エネルギー総量 (KJ) を算出し、運用期間と稼働率で除して、設備容量 (MW) を算出して行く。
- ただし、貯留される地熱エネルギーの全ては回収できないので、「回収率」を仮定する。

USGS が提案する計算式は下記の通りである。

$$q_r = \rho CV (T_r - T_{ref}) \quad [\text{kJ}] \quad (1)$$

$$R_g = q_{WH} / q_r \quad [-] \quad (2)$$

$$q_{WH} = m_{WH} (h_{WH} - h_{ref}) \quad [\text{kJ}] \text{ or } [\text{kW}] \quad (3)$$

(for a geothermal reservoir temperature > 150°C)

$$W_A = m_{WH} [h_{WH} - h_0 - T_0 (s_{WH} - s_0)] \quad [\text{kJ/s}] \text{ or } [\text{kW}] \quad (4)$$

$$E = W_A \eta_u / (FL) \quad [\text{kJ/s}] \text{ or } [\text{kW}] \quad (5)$$

q_r	: 貯留層地熱エネルギー	s_{WH}	: 坑口での流体の比エントロピー
q_{WH}	: 坑口での流体の熱エネルギー	s_0	: 拒絶温度での流体の比エントロピー
T_r	: 貯留層温度	ρC	: 貯留層の容積比熱
T_{ref}	: 参照温度	V	: 貯留層体積
T_0	: 拒絶温度 (ケルビン)	R_g	: 回収率
m_{WH}	: 坑口における流体の質量	W_A	: 有効エネルギー
h_{WH}	: 坑口における流体の比エンタルピー	E	: 設備容量
h_{ref}	: 参照温度での流体の比エンタルピー	F	: プラントファクター (90%)
h_0	: 拒絶温度での流体の比エンタルピー	L	: プラント運用期間 (30 年)

ただし、この USGS の式を使用する例は少ない。その理由は、モンテカルロ法を併用する場合には式(4)の h_{WH} と s_{WH} を T_r の関数とする必要があり、これらを全て含めた計算式の計算項目が多く、計算が複雑になることが原因と考えられる。なお、式(1)において、地上で回収可能な最大の貯留層地熱エネルギーは T_{ref} が水の 3 重点(0.01°C)とした時である。従い、式(4)は厳密には下記式(4)'となり、 $T_{ref}=0.01^\circ\text{C}$ の時、 $h_{ref}=0$ 、 $s_{ref}=0$ である。この理論的背景も USGS の式が普及していない一因と考えられる。

$$W_A = m_{WH} [(h_{WH} - h_{ref}) - h_0] - T_0 [(s_{WH} - s_{ref}) - s_0] \quad [\text{kJ}] \text{ or } [\text{kW}] \quad (4)'$$

これに代わり、下記の式が多くの報告書で使用されている。

$$E = R_g \eta_c \rho CV (T_r - T_{ref}) / (FL) \quad [\text{kJ/s}] \text{ or } [\text{kW}] \quad (6)$$

ここに、 η_c は変換係数。

この式では、参照温度 T_{ref} に 150°C や 180°C が採用されている例が多い。しかし、その概念と定義は明確には説明されていない。変換係数 η_c に与えられている数値の根拠も明確には定義されていない。このため、エチオピア国で採用すべきパラメータを考察する論拠に乏しい。そこで、本調査では容積法の各パラメータの算出根拠を明確にするため下記の通りとした。

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

$$E = \eta_{ex} \zeta R_g \rho C V (T_r - T_{ref}) / (FL) \quad [\text{kJ/s}] \text{ or } [\text{kW}] \quad (7)$$

$$\rho C = (1 - \phi) C_r \rho_r + \phi C_f \rho_f \quad [\text{kJ/s}] \text{ or } [\text{kW}] \quad (8)$$

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

汽水分離器の圧力と復水器の温度（系に寄与する熱水の最終温度）を典型的なものを仮定して 5 気圧 (151.8°C)、 40°C とすると、 ζ は下記の通りである。なお、式(7)の $R_g \rho C V (T_r - T_{ref})$ は地表で回収される貯留層地熱エネルギーの最大値を示すため $T_{ref} = 0.01^{\circ}\text{C}$ である。

$$\zeta = 0.000000127 T_r^3 - 0.0000124900 T_r^2 + 0.0046543806 T_r - 0.4591082158 \quad (9)$$

また、エクセルギー効率は、既存の地熱発電所のデータを統計処理して汽水分離器と復水器の温度差から求めることできる。汽水分離器温度を 151.8°C 、復水器温度を 40°C とすると、下記の通りとなる。

$$\eta_{ex} = 0.77 \pm 0.05 \quad (10)$$

回収率は下記の通りとする。

$$R_g = 0.05 \sim 0.20 \quad (11)$$

なお、貯留層温度が $130^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ と想定される場合には、バイナリー発電を想定した。バイナリー発電ではフラッシュする過程を考慮する必要がないので、式 (5) を用いて地熱資源量 (MWe) を算出した。典型的なバイナリープラントを想定して、 $\eta_c = 0.05 - 0.08$ 、 $T_{ref} = 80^{\circ}\text{C}$ を採用した。

3.5.4 使用する確率手法 —モンテカルロ法

モンテカルロシミュレーションには、オラクル社の Crystal Ball を用いた。変動させるパラメータは初期貯留層温度 (T : initial reservoir temperature $^{\circ}\text{C}$)、空隙率 (Φ : void space)、貯留層容積 (V : reservoir volume m^3) の 3 つを三角分布 (Triangular Distribution) で仮定して、賦存熱量を求めた。その後、回収率をパラメータとして変動させて、回収可能熱量を求め、そして電力変換することで地熱資源量 (MWe) を計算した。容積法に使用したパラメータを表 3.5.2 に示す。

表 3.5.2 容積法で使用したパラメータ

Parameter	Symbol	Unit	Range	Probabilistic
-----------	--------	------	-------	---------------

			Min.	M.L.	Max.	distribution
Volume	V	m ³	0	<i>tbp</i>	<i>tbp</i>	Triangle
Reservoir temperature	T _r	°C	<i>tbp</i>	<i>tbp</i>	<i>tbp</i>	Triangle
Rock density	ρ _r	kg/m ³	-	2600	-	fixed
Rock volumetric specific heat	C _r	kJ/kg	-	1.0	-	fixed
Fluid volumetric density	ρ _f	kg/m ³	-	950	-	fixed
Fluid specific heat	C _f	kJ/kg	-	5	-	fixed
Porosity	Φ	%	5	-	10	Uniform
Recovery factor	R _g	%	5	-	20	Uniform
Reference temperature for flash type	T _{ref}	°C	-	0.01	-	fixed
Rejection temperature*	T ₀	°C	-	40	-	fixed
Separator Temperature*	-	°C	-	151.8	-	fixed
Exergy efficiency for flash	η _{ex}	%	72	77	82	Triangle
Reference temperature for binary type	T _{ref}	°C	-	80	-	fixed
Conversion factor for binary	η _c	%	5	6.5	8	Triangle
Plant factor	F	%	-	90	-	fixed
Plant life	L	year	-	30	-	fixed
Min.: Minimum; Max.: Maximum, M.L.: Most likely; <i>tbp</i> : to be proposed; *: given in the heat allocation function						

出典：調査団

3.5.5 容積法評価における留意項目

USGS の式を用いた容積法の資源量評価は、しばしば過大評価になるといわれている。本報告で提案した合理的かつ実用的な式の基本概念は USGS の理論に従っているため、従来と同様のパラメータの設定方法では、過大評価になる可能性がある。このため、本調査では特に下記に留意した。

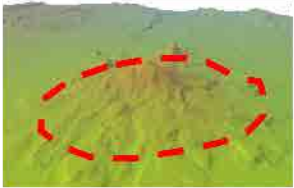

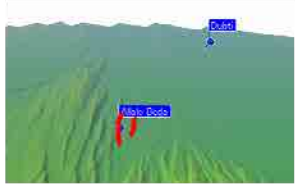
3.5.6 貯留層面積の推定

本調査対象地域の殆どでは、地表調査のみ行われており物理探査や試掘探査が実施されている地域は少ない。この様な少ない情報で貯留層の体積を推定することは容易ではない。本調査では、以下の仮定で貯留層容積を設定した。設定方法は、表 3.5.3 にまとめた。

- 1) 貯留層は衛星写真解析・地表地形地質調査の結果類型化したサイトごとに設定する。
- 2) まず、それぞれ貯留層の最大面積を設定する。
- 3) 次に、MT/TEM 調査が行われている Aluto-Langano、Corbetti および Tendaho-Dubti の情報を参考に、最可能値 (Most likely) を推定する。
- 4) その上、現地調査などで確認された地熱徴候や断裂の有無強弱によって上記の基本面積を調整する。
- 5) 最小値はゼロとする。

(番号は表 3.5.3 の番号と対応する)。

表 3.5.3 地熱貯留層面積の推定

	Volcano Type	Caldera Type	Graben Type
Typical Landform			
1) Site	Dallol, Boina, Damali, Meteka (Ayelu and Amoissa), Dofan, Tulu Moye, Aluto (Langano, Finkilo, Bobesa), Abaya, Fantale, Boseti	Gedemsa, Kone, Nazareth, Corbetti	Tendaho-Allalobeda, Tendaho-Ayrobeda, Tendaho-Dubti, Teo, Danab, Meteka, Arabi, Butajira
2) Maximum area of reservoir	Area of volcanic body	Inner area of caldera	Area of geothermal manifestations in graben structure
3) Most likely area	20% of Maximum Area	15% of Maximum Area	100% of Maximum Area (Manifestation Area)
4) Site specific bonus point	+ 20% Alteration Bonus +20% Manifestation Bonus + 20% Fracture Bonus (where observed)	+ 20% Alteration Bonus + 20% Manifestation Bonus + 20% Fracture Bonus (where observed)	+ 20% Alteration Bonus + 20% Manifestation Bonus + 20% Fracture Bonus (where observed)
5) Minimum area	zero	zero	zero
References	MT/TEM Result at Aluto-Langano	MT/TEM Result at Corbetti	MT/TEM Result at Tendaho

出典：調査団

3.5.7 貯留層厚さの設定

貯留層の厚さは、表 3.5.4 に示す仮定とした。

表 3.5.4 貯留層厚さの仮定

Items	Minimum	Maximum	Most Probably	Notes
Depth to Reservoir top (GL-)	0.5 km	1.0 km	0.8 km	- 最可能値は Aluto-Langano などの温度勾配から推定した
Depth to Reservoir bottom (GL-)	3.0 km	3.0 km	3.0 km	- 現在あるいは近未来の技術で経済的に掘削できる深度
Reservoir Thickness	2.5 km	2.0km	2.2 km	-

出典：調査団

3.5.8 貯留層平均温度の設定

貯留層の平均温度は、地化学調査結果の考察から下記の通りと設定した。

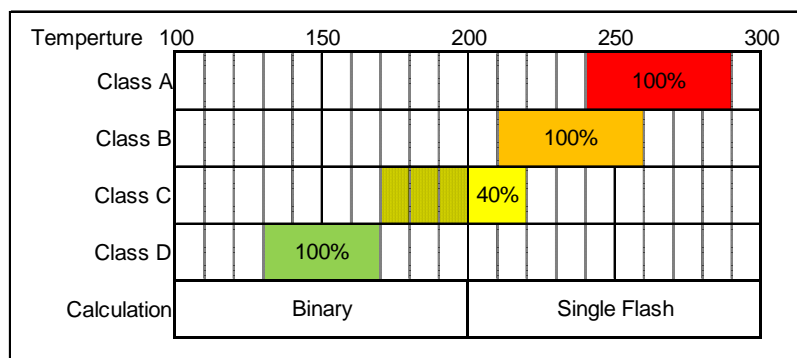
表 3.5.5 貯留層平均温度 (°C)

Class	Min	Max	Most Probably	Remarks
Class A	240	290	265	6 sites (Tendaho and Aluto)
Class B	210	260	235	7 sites (Boseti, Meteka, etc.)
Class C	170	220	195	7 sites (Nazareth, Arabi, etc)
Class D	130	170	150	2 sites (Gedemusa and Kone)

出典：調査団

3.5.9 地熱発電施設タイプの仮定

地熱発電で使用する流体の平均温度に従って、200°C以上の場合はフラッシュタイプ、200°C以下の場合バイナリータイプとした。フラッシュタイプの場合は典型的なシングルフラッシュタイプとした。Class C の貯留層温度はこの両者を含むが、このような地熱貯留層の場合は、経済的な側面から 200°C以上の流体を利用したフラッシュタイプを選択するものと考えられる。従って、本調査の目的である地熱発電開発の観点にたつて、貯留層体積は、Class-C の温度分布で推定した体積の 40%とした。



出典：調査団

図 3.5.2 推定貯留層平均温度と発電施設タイプ

3.5.10 貯留層評価結果

算出結果を表 3.5.6 に示した。

「推定される地熱資源量 (Inferred Geothermal Resource)」は、最頻値で 4,200 MW、生起確率 80% で約 2,000 MW、生起確率 20% で約 11,000 MW となった。

単独サイトで 100 MW 以上の推定される資源量を有すると考えられるサイトは約半数の 12 サイトとなった。なお、これらの値の殆どは「推定された資源量 (Inferred Resource)」に相当するが、試掘が行われかつパイロットプラントが運転されたことがある Aluto-1 (Aluto-Langano)では、表の 91MW のうち、「提示された資源量 (Indicated Resource)」が 70MW、測定された資源量(Measured Resource)」が 5 MW 含まれている。また同様に、Tendaho-1 (Dubti)では、表の 290MW の内 10MW は提示された資源量 (Indicated Resource)」に分類される。

表 3.5.6 貯留層評価結果

Unit: MW

Target Site		Cumulative probability 80%	Most Probable (mode)	Cumulative probability 20%
19	Corbetti	480	960	2400
16	Abaya	390	790	1900
13	Tulu Moye	202	390	1100
18	Boseti	160	320	800
21	Tendaho-1	140	290	660
4	Damali	120	230	760
7	Meteka	61	130	290
2	Tendaho-3	64	120	320
17	Fantale	64	120	320
14	Aluto-2	58	110	290
22	Tendaho-2	47	100	230
3	Boina	56	100	350
20	Aluto-1	49	91	180
9	Dofan	41	86	200
15	Aluto-3	23	50	110
1	Dallol	23	44	120
12	Gedemsa	20	37	100
11	Nazreth	17	33	100
10	Kone	7	14	42
6	Danab	6	11	30
5	Teo	4	9	23
8	Arabi	4	7	36
New/ Divided Site				
7-2	Meteka-Ayelu	47	53	250
7-1	Meteka-Amoissa	28	89	150
23	Butajira	6	16	30
Total		2114	4200	10791

調査団提案式による

出典：調査団

参考として、従来の計算式を用いて算出した結果を表 3.5.7 に示した。従来式の算出にあたっては、変換係数を 0.13~0.16 とし、参照温度は 150℃とした他は、全て同じパラメータとした。この計算条件では殆ど同じ計算結果となった。なお、参照温度を 180℃とすると、20%程度小さい計算結果となる。

表 3.5.7 従来式による計算結果と調査団提案式との比較

Site No.	Privailing method			Proposed/Privailing		
	Occurrence Probability 80%	Most likely (mode)	Occurrence Probability 20%	Occurrence Probability 80%	Most likely (mode)	Occurrence Probability 20%
19 Corbetti	480	960	2400	1.12	1.08	1.41
16 Abaya	390	790	1900	1.11	1.05	1.46
13 Tulu Moye	201.5	390	1100	1.03	0.93	1.55
18 Boseti	160	320	800	1.23	1.14	1.70
21 Tendaho-1	140	290	660	1.52	1.66	1.35
4 Damali	120	230	760	1.50	1.53	1.77
7 Meteka	60.7	130	290	1.12	1.08	1.45
2 Tendaho-3	63.5	120	320	1.09	1.00	1.39
17 Fantale	63.6	120	320	1.20	1.09	1.60
14 Aluto-2	57.8	110	290	1.18	1.10	1.45
22 Tendaho-2	47.3	100.4	230	1.10	1.06	1.44
3 Boina	55.7	100	350	1.33	1.25	1.59
20 Aluto-1	49.4	91.1	180	1.41	1.32	1.15
7-1 Meteka-Amoissa	27.9	88.9	150	0.65	1.33	1.25
9 Dofan	40.8	86.1	200	1.32	1.35	1.60
7-2 Meteka-Ayelu	46.5	53.4	250	2.21	1.16	3.29
15 Aluto-3	23.1	49.5	110	1.10	1.18	1.17
1 Dallol	22.6	44	120	1.13	1.07	1.48
12 Gedemsa	19.5	36.6	100	1.00	1.00	1.00
11 Nazreth	17.3	32.7	100	1.00	1.00	1.00
23 Butajira	5.7	16.35	30	1.00	1.00	1.00
10 Kone	7.3	13.7	42	1.00	1.00	1.00
6 Danab	5.9	11.4	30.2	1.18	1.04	1.44
5 Teo	4.4	8.6	22.6	1.00	1.08	1.41
8 Arabi	3.8	6.9	36.1	1.27	0.86	1.57
total	2114.3	4199.65	10790.9	1.17	1.12	1.48

出典：調査団

表 3.5.8 貯留層評価に用いたパラメーター一覧

Type	No	Site name	Area of Reservoir (km ²)															Thickness of Reservoir (km)			Reservoir Temperature			
			Temperature (ABCD)	Inner Dia. (Long: km)	Inner Dia. (Short: km)	Area (km ²)	Maximum Area (km ²)	Minimum Area (km ²)	20% (Volcano, 15% (Caldera) of Maximum)	Most Likely Area (km ²)	Manifestation	Alteration	Fracture	Upper Depth (- km from surface)			Bottom Depth (- km from surface)	Maximum Thickness (km)	Minimum Thickness (km)	Most Likely Thickness (km)	Maximum (°C)	Minimum (°C)	Most Likely (°C)	
				Length of major axis (Graben Type: km)	Length of minor axis (Graben Type: km)									Maximum (= Shallow Case)	Minimum (= Deep Case)	Most Likely								
Caldera Type	10	Kone	D	6.40	4.80	24.10	24.10	0.00	3.60	9.60	0	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	170	130	150	
	11	Nazareth	C	6.00	4.80	22.60	22.60	0.00	3.40	9.00	0	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	0.88	220	170	195	
	12	Gedemsa	D	8.80	6.60	45.60	45.60	0.00	6.80	36.50	0.2	0.2	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	170	130	150	
	19	Corbetti	B	10.10	15.10	119.80	119.80	0.00	18.00	71.90	0.2	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235	
Volcano type	1	Dalkol	B	3.00	2.60	6.10	6.10	0.00	1.20	3.10	0.2	0	0	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235	
	3	Boina	C	11.60	9.20	83.80	83.80	0.00	16.80	25.10	0	0	0	0.5	1	0.8	3	2.5	2	0.88	220	170	195	
	4	Damali	C	16.00	14.50	182.20	182.20	0.00	36.40	54.70	0	0	0	0.5	1	0.8	3	2.5	2	0.88	220	170	195	
	7-2	Meteka-Ayechu	C	8.80	7.80	53.90	53.90	0.00	10.80	27.00	0	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	0.88	220	170	195	
	7-3	Meteka-Amoissa	C	9.10	8.50	60.70	32.50	0.00	6.50	16.30	0	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	0.88	220	170	195	
	9	Dofan	B	7.50	6.00	35.30	35.30	0.00	7.10	31.80	0.2	0.2	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235	
	13	Tulu Moye	C	20.00	15.00	235.60	235.60	0.00	47.10	117.80	0	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	0.88	220	170	195	
	14	Akito-2 (Akito-Finkilo)	A	4.30	2.72	11.70	11.70	0.00	2.30	5.90	0.2	0	0	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	290	240	265	
	15	Akito-3 (Akito-Bobesa)	A	2.30	1.50	3.45	3.50	0.00	0.70	3.20	0.2	0.2	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	290	240	265	
	16	Abaya	B	12.50	12.50	122.70	90.00	0.00	18.00	63.00	0.2	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235	
	17	Fantale	C	11.00	7.30	63.10	63.10	0.00	12.60	44.20	0.2	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	0.88	220	170	195	
	18	Boseti	B	8.40	6.70	44.20	44.20	0.00	8.80	22.10	0	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235	
	Graben Type	2	Tendaho-3 (Tendaho-Allabobeda)	A	1.72	0.97	1.30	13.00	0.00	1.30	6.50	0.2	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	290	240	265
		5	Teo	B	0.50	0.30	0.12	1.20	0.00	0.12	0.60	0.2	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235
6		Danab	B	0.70	0.30	0.16	1.60	0.00	0.16	0.80	0.2	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235	
7		Meteka	B	2.30	0.80	1.40	14.00	0.00	1.40	9.80	0.2	0.2	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235	
8		Arabi	C	1.90	0.60	0.90	9.00	0.00	0.90	0.90	0	0	0	0.5	1	0.8	3	2.5	2	0.88	220	170	195	
21		Tendaho-1 (Tendaho-Dubji)	A	3.00	1.00	2.40	24.00	0.00	2.40	16.80	0.2	0.2	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	290	240	265	
22		Tendaho-2 (Tendaho-Ayrobera)	A	1.30	0.80	0.82	8.20	0.00	0.82	5.70	0.2	0.2	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	290	240	265	
(23)		Butajira	B	1.20	0.70	0.66	6.60	0.00	0.66	3.30	0.2	0	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	260	210	235	
MT	20	Akito-1 (Akito-Langano)	A	2.55	1.18	3.01	6.00	1.05	—	4.80	0.2	0.2	0.2	0.5	1	0.8	3	2.5	2	2.2	290	240	265	

出典：調査団

引用文献

- Aquater, 1980. Geothermal resources exploration project- Tendaho area. Feasibility study- phase ii. Final report.
- Aquater, 1991. Tendaho geothermal study project: Geothermal study of the Dubti and Allallobeda geothermal areas in the Tendaho graben (Ethiopia).
- Arnórsson, S., 2000. The quartz and Na/K geothermometers. I. New thermodynamic calibration, World Geothermal Congress, 929-934.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H., 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47(3), 567-577.
- D'Amor, F. and Panichi, C., 1980. Evaluation of deep temperature of hydrothermal systems by a new gas geothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 44(3), 549-556.
- EIGS-IAEA Project, ETH/8/003, Reports.
- ELC/Geotermica Italiana, 1987. Geothermal reconnaissance study of selected sites on the Ethiopian rift system: Fluid geochemical report.
- Fournier, R.O., Truesdell, A.H., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37(5), 1255-1275.
- Fournier, R.O., Potter, R.W.II, 1979. Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43(9), 1543-1550.
- Giggenbach, W.F., 1996. Chemical composition of volcanic gases, in: R. Scarpa, R., and Tilling, R.I. (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer, pp. 221 - 256.
- Giggenbach, W. F., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. Application of geochemistry in geothermal reservoir development(coordinator D' Amore, F., Ed.). UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome., 119-144.
- Gizaw, B., 1989. Geochemical investigation of the Aluto-Langano geothermal field, Ethiopian rift valley. M. Phil., University of Leeds, England, 1-237.
- Gonfiantini R., Borsi, S., Ferrara, G., and Panichi, C. , 1973. Isotopic composition of waters from the Danakil depression (Ethiopia). *Earth and Planetary Science Letters* 18(1), 13-21
- UNDP, 1973. Geology, geochemistry and hydrology of hot spring of the east African rift system within Ethiopia. UNDP Technical Report, New York.
- UNDP, 1976. Geochemical investigation in the Lakes District and Afar of Ethiopia. UNDP Report.

- UNDP, 1977. Isotopic geochemistry and hydrology of geothermal areas in Ethiopian rift valley. UNDP Technical Report.
- Caroline Le Tuldu, Jean-Jacques Tiercelin, Elisabeth Gibert, Yves Travi, Kiram-Eddine Lezzar, Jean-Paul Richert, Marc Massault, Françoise Gasse, Raymonde Bonnefille, Michiel Decobert, Bernard Gensous, Vincent Jeudy, Endale Tamrat, Mohammed Umer Mohammed, Koen Martens, Balemwal Atnafu, Tesfaye Chernet, David Williamson, Maurice Taieb, 1999. The Ziway-Shala Lake basin system, Main Ethiopian Rift: Influence of volcanism, tectonics and climatic forcing on basing formation and sedimentation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* Vol. 150, p135-177.
- Giday WoldeGabriel, James L. Aronson, Robert C. Walter, 1990. Geology, geochronology, and rift basin development in the central sector of the Main Ethiopia Rift. *Geological Society of America Bulletin* Vol. 102, p439-458.
- Kokusai Kogyo Co., Ltd., Japan International Cooperation Agency, 2011. The Study on Groundwater Resources Assessment in the Rift Valley Lakes Basin in the Federal Democratic Republic of Ethiopia, Final Report.
- Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee, 2010. Geothermal Lexicon For Resources and Reserves Definition and Reporting
- Gioia Falcone, 2013. Classification and Reporting Requirements for Geothermal Resources
- K.C. Lee, 1996. Classification of Geothermal Resources – An Engineering Approach
- Subir K. Sanyal, 2005. Classification of Geothermal Systems – A Possible Scheme
- Hot Dry Rocks Pty Ltd, 2013. Global Review of Geothermal Reporting Terminology
- P. Muffler – R. Cataldi 1977. Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources
- USGS Circular 790 1978. Assessment of Geothermal Resources of the United States
- Malcolm A. Grant. Paul F. Bixley 2011. Geothermal Reservoir Engineering Second Edition
- Malcolm A Grant 2014. Stored-heat assessments: a review in the light of field experience
- Colin F. Williams 2004. Development of revised techniques for Assessing Geothermal Resources

第4章 環境社会配慮

4.1 環境社会影響評価(ESIA)調査の概要

本章では、地熱開発事業に伴って引き起こされる可能性のある環境影響について、初期環境調査(IEE)レベルの評価を実施した。また、環境社会評価(ESIA)調査を実施し、代替案比較を行った。

4.1.1 ESIA 調査の内容

ESIA 調査は以下の6つの項目から構成される。

- 1) ベースライン調査(既存情報、データの収集、編集及び文献調査)
- 2) 戦略的環境評価調査(SEA)概念を適用した16候補地における代替案の検討
- 3) 事業活動により引き起こされる可能性のある環境影響のスコージング
- 4) 事業実施により引き起こされる可能性のある自然及び社会環境影響の、初期環境影響評価(IEE)レベルでの予測及び評価(pre-IEE)
- 5) 環境影響低減及び監視計画に係る調査
- 6) ステークホルダー協議

4.1.2 ESIA 調査の目的

調査の主な目的は以下に示す通りである。

- 事業実施により発生する可能性のある影響を特定し評価するための自然及び社会環境ベースライン情報の収集。
- 事業実施により引き起こされる可能性のある自然及び社会影響ならびに汚染の特定。負の影響及び汚染低減策を含め、事業実施により引き起こされる可能性のある自然及び社会影響に対する環境管理及び監視計画の作成。

本調査におけるESIA調査の主要点は、事業候補地及びその周辺において環境に係る情報を収集し、初期環境影響調査(IEE)を実施すると共に、地熱候補地の優先付けを行うことにある。

4.1.3 ESIA 調査対象地域

ESIA 調査対象地域は、送電線の地域も含め、地熱事業により影響を受ける自然及び社会環境の異なる地域をカバーするものとする。対象地域は、GSE 及び JICA 調査団により、22 対象サイトより選ばれた16サイトを対象とする(表4.1.1)

表 4.1.1 ESIA 調査対象サイト

No.	Geothermal Sites	Group	Site Survey
1	Dalol	Group-2	GSE
2	Tendaho -3 (Allalobeda)		JICA
3	Boina		GSE
4	Damali (Dam Ali)		GSE
5	Teo		GSE
6	Danab		GSE
7	Meteka		JICA
8	Arabi		GSE
9	Dofan	Group-1	JICA
10	Kone		JICA
11	Nazareth		JICA
12	Gedemsa		JICA
13	Tulu Moya		-
14	Finkilo (Aluto 2)		JICA
15	Bobesa (Aluto 3)		JICA
16	Abaya		-
17	Fantale	Additional	-
18	Boseti		JICA
19	Corbetti		-
20	Aluto-1		-
21	Tendaho-1 (Dubti)		-
22	Tendaho-2 (Ayrobera)		JICA

JICA: The sites where JICA Study Team undertook the site survey.

GSE: The sites where GSE undertook the site survey due to access and/or security issues.

出典：調査団

4.2 環境関連法・規制

4.2.1 環境社会配慮法規制の枠組

エチオピアは1995年に憲法を制定し、その中で環境保全及び管理に関わる基本的かつ包括的原則を定めた。持続的開発及び環境権の概念は本憲法の第43章1、44章2及び92章3に記されている。憲法に則り、地熱開発に関わるいくつかの法律及び規制が定められている。これらの法、規制の中で、地熱開発に関連する最も重要な規則は「Environmental Impact Assessment Proclamation, No.299/2002」及び「Environmental Pollution Control Proclamation, No.300/2002」である。EIA規則では、主要な開発事業、計画等に対し、EIA実施時に行うべき義務的かつ不可避の事項を定めている。本規則は、環境、経済及び社会に対する配慮を、意思決定過程に調和統合して取り入れ、持続的開発を行うための先行的ツールとして用いられる。また、環境汚染管理規則は、社会・経済活動によって引き起こされる可能性のある不本意な環境汚染を除去、あるいは低減させるために定められている。本規則は、効果的なEIA実施のため遵守すべき最も重要な規則である。

移転及び土地取得に係るフレームワークは、憲法が民間の資産及びその補償に係る基本的な政策を規定している。「The FDRE Proclamation, “Payment of Compensation for Property Situated on Landholdins Expropriated for Public Purposes”, No. 455/2005」及び「Council of Ministers Regulation, “Payment of Compensation for Property Situated on Landholdins Expropriated for Public Purposes”, No.

¹ Article 43: the Right to development,

² Article 44: Environmental Rights,

³ Article 92: Environmental Objectives

135/2007」では、土地収用手順、補償基準等の詳しい手順が規定されている。

地熱開発事業実施に適用される主要な規制、ガイドライン、及び規則を下の表 4.2.1 に示す。規制の内容に関しては Appendix 4.1 に示す。

表 4.2.1 地熱開発事業に適用される主要規制、ガイドライン、規則

No.	名前	No.	公布年月日
1	Environmental Impact Assessment Proclamation	299	31 Dec, 2002
2	Environmental Pollution Control Proclamation	300	03 Dec, 2002
3	Environmental Protection Organs Establishment Proclamation	295	31 Oct, 2002
4	Expropriation of Landholdings for Public Purposes and Payment of Compensation Proclamation	455	15 Jul, 2005
5	Rural Land Administration and land Use Proclamation, Proclamation	456	15 Jul, 2005
6	Ethiopian Water Resource Management Proclamation	197	Mar, 2000
7	Solid Waste Management Proclamation	513	12 Feb, 2007
8	Environmental Impact Assessment Procedural Guideline Series 1		Nov, 2003
9	Draft EMP for the Identified Sectoral Developments in the Ethiopian Sustainable Development & Poverty Reduction (ESDPRP)		01 May, 2004
10	Investment Proclamation	280	02 Jul, 2002
11	Council of Ministers Regulations on Investment Incentives and Investment Areas Reserved for Domestic Investors	84	07 Feb, 2003
12	The FDRE Proclamation, "Payment of Compensation for Property Situated on Landholdings Expropriated for Public Purposes"	455	2005
13	Council of Ministers Regulation, "Payment of Compensation for Property Situated on Landholdings Expropriated for Public Purposes"	135	2007
14	Oromya Regional Administration Council Directives, "Payment of Compensation for Property Situated on Landholdings Expropriated for Public Purposes"	5	2003
15	Investment (Amendment) Proclamation	373	28 Oct, 2003

出典：調査団

(1) 環境影響評価

1) エチオピアの EIA に関する法・規制

様々な事業実施に伴い発生する自然及び社会環境へのプラスの影響を促進するとともに、負の影響を管理しかつ回避・最小化するために、EIA が開発されている。EIA の実施は、エチオピアを含め多くの国において、開発計画の調整のため採用され使用されている。エチオピア国 EIA 規則 No. 299/2002 においては、EIA は、設計、土地選定、設置、運転、等の事業活動に伴い発生する環境影響を予測しかつ管理する目的のために実施されることになっている。EIA は法に基づく手順が決められており、EIA 規則 No. 299/2002、及び EPA により発効された「環境影響評価手順書シリーズ I、2003 年 11 月」に基づき、主要な開発事業に関しては、その実施により承認を得ることが義務付けられている。EIA の環境影響評価手順書によると、事業は次の 3 つの条項(Schedule) に分類されている。

Schedule-1：負及び深刻な環境影響が予測される事業。詳細な EIA の実施が求められる。

Schedule-2：事業タイプ、規模及びその他の特徴において多少の環境影響が予測される事業。必ずしも詳細 EIA は求められない。

Schedule-3：環境影響は無視できる事業。EIA 実施の必要はない。

地熱発電事業は *Schedule-1* 事業に分類されている。

法的に指定されている地熱開発事業等の事業は、それらの事業が連邦政府から許可を受けている場合、あるいは複数の州にまたがる環境影響が予測される事業に関しては、事業実施前に、EPA

からの許可を請求する必要がある。州レベルで許可を得ている事業に関しては、州レベルの環境局がこれらの許可の権限を有している。これらの許可は、事業主により実施される環境影響調査 (EIS) を根拠として行われ、EIS は EPA の指示に従うことが求められている。また、事業主は、事業により影響を受ける可能性のある地域社会との協議の実施が求められている。

2) EIA 手順

一般的な EIA 手順及び許可申請に関しては、連邦 EIA 手順指針シリーズ 1 に詳述されており、本手順書には、事業実施が可能か否かの決定を行うための条件に関わる情報が含まれている。即ち、EIA 報告書には最低限以下に関する記述が必要である。

- ・ 使用される技術、プロセス及びそれらが環境へ与える影響を含む事業の特徴
- ・ 操業期間を含む事業実施期間における発生汚染物質の種類及び量
- ・ 操業時の必要エネルギーの種類及び量
- ・ 生物及び物理的環境への予想される直接的、間接的、正及び負の影響の特徴及び期間
- ・ 負の影響の除去、最少化、低減化方法の提言
- ・ 事故発生時の緊急事態計画
- ・ 建設時及び操業時の監視、監査手順

図 4.2.1 にエチオピアにおける EIA 手順の概要を示す。また EIA 手順の具体的な作業内容を Appendix 4.2 に示す。

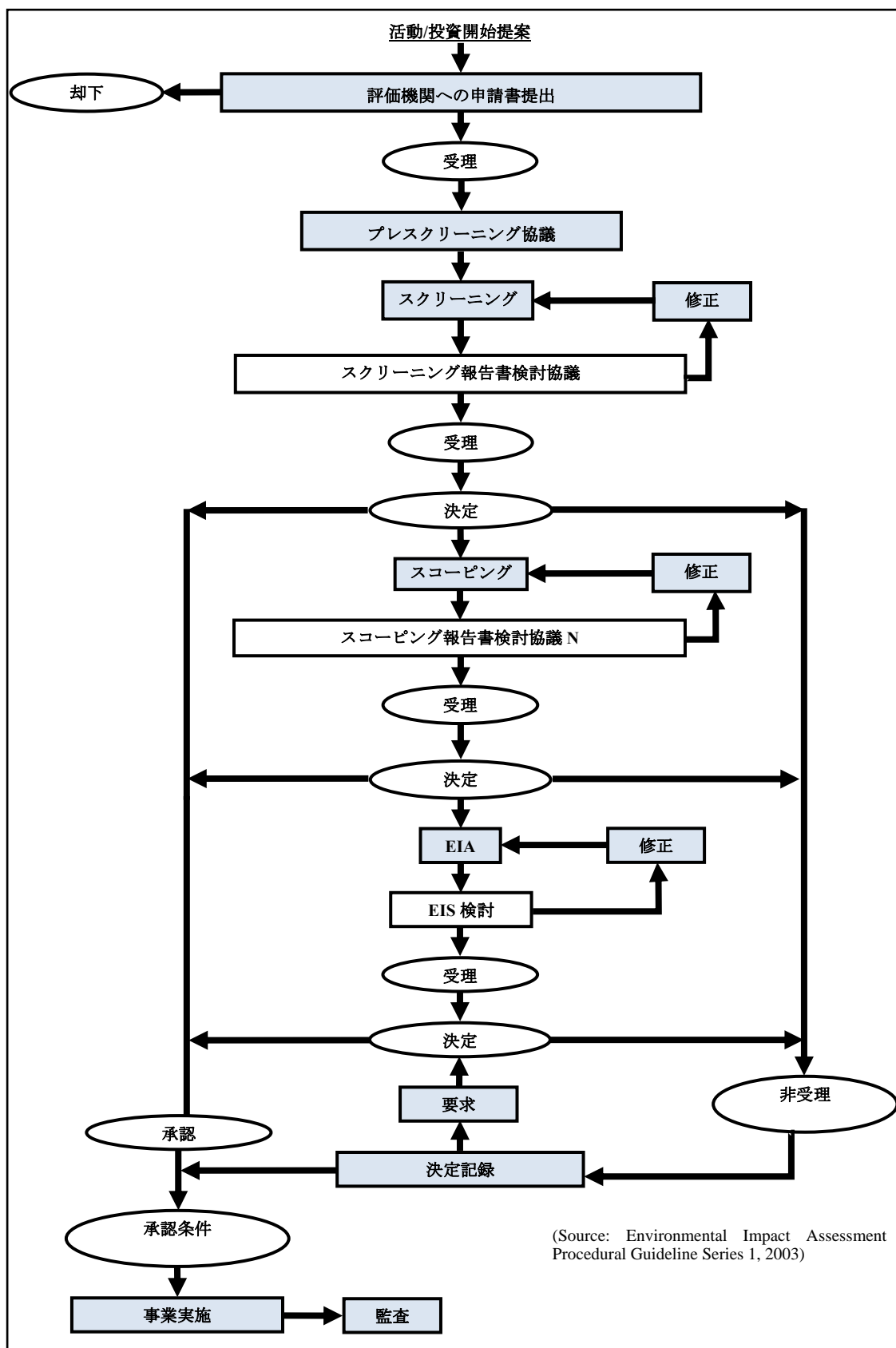


図 4.2.1 エチオピアにおける EIA 過程及び手順概要

(2) 環境関連基準値及び規制値

自然環境保全のため、エチオピア EPA は大気、水、騒音等の国家環境基準を定めている。また、EPA は産業及び経済活動により引き起こされる負の環境影響を管理するために、産業汚染管理基準も定めているが、現時点においてはこれらのいくつかは未だ草案の段階であるため、一般的に国際基準が適用されている。従って、地熱開発事業実施に際しても、これらの基準が適用されることとなる。特定分野におけるエチオピア基準が存在しない場合には、南アフリカあるいは他の国際基準の工業排水基準、大気排出基準等が適用される。下の表 4.2.2 から表 4.2.7 に地熱開発事業に適用されるエチオピア及び世銀の「環境、健康及び安全指針(EHS)をまとめる。

表 4.2.2 産業排ガス及び産業排水排出基準（仮） (Ethiopian EPA)

	パラメータ	単位	基準値 (仮)
排水排出	pH	-	6-9
	BOD5 at 20°C	mg/L	25
	COD	mg/L	150
	Total Phosphorous P	mg/L	5
	Suspended solids	mg/L	50
	Mineral oil at the oil trap/interceptor	mg/L	20
汚染物質排気	Total particulates	mg/Nm3	150
	SO ₂	mg/Nm3	1,000
	NO ₂	mg/Nm3	2,000

Source: Ethiopia EPA

表 4.2.3 大気環境基準（仮） (Ethiopian EPA)

パラメータ	平均時間	基準値 (μg/m3)
SO ₂	10 min	500
	24 hr	125
	1 yr	50
NO ₂	24 hr	200
	1 yr	40
CO	15 min	100,000
	30 min	60,000
	1 yr	30,000
PM10	24 hr	150
	1 yr	50

Source: Ethiopia EPA

表 4.2.4 騒音センシティブ地域における国家騒音基準 (Note)

地域分類	制限値 dB(A) Leq		備考
	日中	夜間	
工業地帯	75	70	日中: 午前 6 時～午後 9 時 夜間: 午後 9 時～午前 6 時
商業地域	65	55	
住宅地帯	55	45	

(Note: Noise sensitive areas include domestic dwellings, hospitals, schools, places of worship, or areas of high amenity)

Source: Ethiopia EPA

表 4.2.5 排気ガス EHS ガイドライン

汚染物質	単位	値
粒子状物質	mg/Nm ³	30 (a)
Dust	mg/N m ³	50
SO ₂	mg/N m ³	400
NO _x	mg/N m ³	600
HCl	mg/N m ³	10 (b)
全有機炭素	mg/N m ³	10
ダイキシン類-フロン類	mg TEQ/Nm ³	0.1 (b)
全金属	mg/Nm ³	0.5
備考		
(*) Emissions from the stack unless otherwise noted. Daily average values corrected to 273K, 101.3 kPa, 10 percent O ₂ and dry gas, unless otherwise noted.		
10 mg/Nm ³ , if more than 40 percent of resulting heat release comes from hazardous waste.		
if more than 40 percent of resulting heat release comes from hazardous waste average values over the sample period of a minimum of 30 minutes and a maximum of 8 hours.		
(c) Total metals: Arsenic (As), Lead (Pb), Cobalt (Co), Chromium (Cr), Copper (Cu), Manganese (Mn), Nickel (Ni), Vanadium (Vn), and Antimony (Sb)		

Source: EHS Guidelines

表 4.2.6 排水 EHS ガイドライン

汚染物質	単位	値
pH	-	6 – 9
BOD	mg/L	30
COD		125
全窒素		10
全リン		2
油分		10
全浮遊状物質		50
全細菌類	MPN/100ml (b)	400 (a)
Notes		
Not applicable to centralized, municipal, waste water treatment systems which are included in guidelines for Water and Sanitation EHS		
MPN: Most Probable Number		

Source: EHS Guidelines

表 4.2.7 騒音管理 EHS ガイドライン

受容場所		
	日中	夜間
	07:00 – 22:00	22:00 – 07:00
住宅、事務所、学校等	55	45
工業地帯、商業地域	70	70
(*) Guidelines values are for noise levels measured out of doors. Source: Guidelines for Community Noise, WHO, 1999		
For Acceptable indoor noise level for residential, institutional, and educational settings, WHO, 1999		

Source: EHS Guidelines

(3) 移転及び土地取得に関わる法律

地熱発電施設では、抗井掘削、還元井掘削（排熱水の地中返送）、パイプライン、スチームセパレーター、蒸気タービン、発電機、冷却塔、送電線から送電網への送電のための変圧施設等の建設が必要である。これらの施設の建設、設置に対応するためには、適切な広さの土地が必要であり、用地取得が問題となる。

憲法では市民の個人資産の権利は保障しているものの、土地の所有権に関しては保障していない。土地は公衆の共通資産と理解されており、市民による土地使用、売買等の用益権の使用が可能とされている。また、農地については、個人が農地使用権を有していれば自由に使用出来ることになっている。「エチオピア連邦農地管理及び土地使用規則、規則 No.456/2005」では農地使用権について規定していると共に、地方政府は中央政府の政策のもと、適切な法的管理組織を設立しなければならないという、政府の責任についても規定している。それ故、農地に関し、地方政府は農地使用権の譲渡と管理に関わる業務を行うこととなる。

公的目的のための土地収用の基本原則は憲法で規定されており、収用手順、補償基準等の詳細に関しては「公共目的のための土地収用及び支払い、補償に係る規則、規則 No. 455/2005」で規定されている。「公共目的で収用される土地内の財産保障の支払い、大臣法規 No. 135/2007」では、個々の資産への補償基準等、更に詳しい基準を規定している。

2007年の法規によると、公共目的のための土地収用は地方政府および、Woreda あるいは地域行政組織により専門に行われることになっており、これらを対象となる PAPs に対し適切に行わなければならないこととなっている。

補償の原則に従い、土地上の財産の移譲費用は、居住地の補償として取り扱われ、農地に関しては直近5年間の平均年収の10倍の補償がなされる。法規では、好ましい方法のひとつとして、その利用価値が以前の土地と等価な代替地の提供を規定している。

(4) 環境評価に係るエチオピア法規と JICA ガイドライン（2010）との乖離

上述の事柄より、JICA 環境ガイドラインとエチオピア法規間の乖離は、住民協議、住民への情報公開等の事業実施前の手順・過程の調整可能な多少の差異を除けば、大きな対立箇所は無いと考えられる。Appendix 4.3 に現在のエチオピアの関連法規と、JICA 環境社会配慮ガイドライン（2010年4月）及び世銀のセーフガードポリシー間の乖離を示す。

4.2.2 エチオピアにおける環境管理体制の枠組

エチオピア連邦共和国（FDRE）は Addis Ababa 市及び Dire Dawa 市の2つの特別市及び9つの州より構成されている。Proclamation No.33/1992、No.41/1993 および No.4/1995 は、自然資源の保護と共に、社会経済開発に係る計画、管理、開発を含む地方州の義務と責任を定めている。エチオピアの環境関連の法的枠組み設定の中で最も重要な最初の一步は環境保護局（EPA）の設立であった。現在省レベルとなっている EPA は環境規制及び監視のための中心機関であり、声明書 No.295/2002 に基き設立されている。EPA の目的は、人々の生活を豊かにする共に環境持続性を高め、またこれらの実施過程の有効性を確保するために、政策、戦略及び法・規制を定めることにある。従って EPA は、環境影響評価（EIA）実施のための次のような責任を有している。

- ・ 事業者の EIA 実施の要求事項遵守の確認
- ・ EIA 実施過程における異なる部門機関間の協力と協議の調整
- ・ EIA 実施過程における事業主との親密な関係維持及び指導
- ・ EIA 報告書の評価及びこれらに係る方針決定

一方、地方環境局は以下の責務を有する。

- ・ 各地方状況に沿って、地方レベルでの EIA に係る政策、システム及び要求を適用する。
- ・ 公的及び指摘事業に係る EIA システムを制定すると共に、地方レベルにおける社会環境開発政策、戦略、法律、計画を制定する。
- ・ EIA 実施により、環境持続性を損なう可能性のある事項を EPA へ報告すると共に、EPA の指示に従いこれらに関する共同調査を行う。
- ・ 環境影響評価に係る次の事業の管理、監視及び主要な決定を行う。
 - 地方機関の許可が必要な事業
 - 地方機関により実施される事業
 - 地方レベルでの環境影響が予想される事業

他の種々の事業と同様、今回計画の地熱電力開発事業も、開発と環境保全の両立のため、いくつかの政策及び計画に従う必要がある。EPA は、鉱業省、エチオピア電力会社 (EEPCo) 等の関連機関と共に、国内のすべての事業に係る環境管理を規制する。以下に地熱開発に関連する主要組織、機関を示す。

- **地方政府**: 今回の全ての候補地は、Afar州、Oromia州、Somali州の3州に位置している。地方の行政単位にはZone及びWoredaがあり、各WoredaにはさらにいくつかのKebeleがある。各行政区には行政組織がありその長は区の住民選挙により選ばれる。これら3つの州と特徴は表 4.3.1にまとめた。
- **エチオピア地質調査 (GSE)**: 鉱業省下のエチオピア地質調査 (GSE) は地熱開発事業の開発段階における事業推進の組織的権限と法的権限を与えられている。これらには以下を含む。
 - 地表面の開発
 - 掘削による開発
 - 掘削井のテスト及び事業化調査
- **水・灌漑・エネルギー省(MoWIE)**: 水・灌漑・エネルギー省はエネルギーセクターにおける管理組織である。EPAの委任により、全てのEIA書類が評価と勧告のために当省へ提出される。当省はまた、事業実施許可を与えると共に、事業の遂行を監視する。
- **エチオピア電力会社 (EEPCo)**: エチオピア電力会社は、首相評議会規則No.18/1997により国家の公益電力事業会社として設立された民間会社である。本規則によると、EEPCoは電力に関わる発電、送電、配電、販売の権限を有するとともに、これらの遂行に関わる活動を行う。
- **地方政府放牧、農業及び地域開発事務所**: 農業省及びEPAは放牧、農業及び地域開発に関わる権限を、地方政府事務所に委譲している。

- **EEPCo計画部:** EEPCo計画部は電力事業実施に伴い発生する社会環境問題に対応するために、環境専門家及び社会学専門家より構成されている。EIA、EMP等、重要な環境社会問題対応の活動のため、規則、責任、権限を定め、その事業事務所を、EEPCo 計画部内に設置している。

4.3 ベースライン調査

4.3.1 調査実施方法

調査方法としては、一次資料、二次資料のレビューを含め、地熱エネルギー開発候補地における標準的なデータ、情報収集方法を採用した。ESIA 調査団は、Oromiya、Afar 及び Somali の各州の地熱開発候補地における、環境、社会、経済、等の責任機関において、質問書調査及び訪問調査を実施した。質問書は以下の 8 分野の質問書を用いた。

- Kebeleレベルの文化、環境関連質問書
- Kebeleレベルの教育関連質問書
- Kebeleレベルの健康関連質問書
- Kebeleレベルの水資源関連質問書
- Kebeleレベルのエネルギー資源関連質問書
- 世帯/家庭関連質問書
- Kebeleレベルの経済水準関連質問書
- 住民、地域協議に関する質問書

ESIA 調査団がベースラインデータ収集のため、訪問した場所は次の 7 分野の Woreda レベルの地域事務所である。

- 農業/放牧事務所
- 経済・財務事務所
- 教育事務所
- 健康事務所
- 文化・観光事務所
- 土地・環境事務所
- 水・エネルギー事務所

表 4.1.1 中の#4 の Damali 及び#05 の Teo に関しては、現地へのアクセスが困難であることより、既存関連情報の収集及び文献調査のみとした。

4.3.2 ベースラインデータの概要

(1) 調査地域の概要

ESIA 調査により得られた情報、データは、地熱開発事業が実施された場合に予想される地域特有の環境影響と共に、i) 自然条件、地質条件、ii) 社会経済条件、iii) 道路アクセス状況、等の項目別に、16ヶ所の候補地毎まとめた。Appendix 4.4 にこれらを纏めたものを示す。収集した情報、データの主要なものを以下に示す。

15ヶ所の地熱開発候補地は、Afar 低地及びアフリカ地溝帯に位置しており、この中の 8 か所の地熱候補地は Afar 低地に、残りの 7ヶ所がエチオピア大地溝帯に位置している。

今回の調査対象州である、Afar 州、Oromia 州、及び Somali 州の 3 州は、それぞれの州境を接しており、互いによく似た特徴を有している。Oromia 州は北部で Amhara 及び Benshangul/Gumuz 地方で Afar 州と接しており、南部でケニアと接する Oromia と接している。また、Oromia は南部及び東部で Somali と接しており、西部は Sudan と接している。一方、Afar 州は北東部で Eritrea と接しており、北西において Tigray と、南部から南西部にかけて Amhara 州及び Oromia 州とそれぞれ接している。Somali 州は Afar 州と接するとともに、北部で Djibouti と、南部で Kenya と接し、また、Oromia 州と西部で、Somalia とは西部及び南部で接している。

Oromia 州及び Somali 州に比べより広い面積を有する Afar 州はエチオピア大地溝帯の中に位置するが、Oromia 州、Somali 州はその一部がエチオピア大地溝帯内に位置している。三州の人口に関しては、Oromia 州が最大で約 35,500,000 人、次いで Somali 州の約 5,850,000 人、Afar 州の約 1,830,000 人となっている。三州の概況を下表（表 4.3.1）に纏める。

表 4.3.1 三州の概要

州	Afar	Oromia	Somali
位置	主としてエチオピア東部	主としてエチオピア西部及び南部	主としてエチオピア東部および南部
地形	大地溝帯内の低地が支配的、砂地、岩質地	低地から高地に至る変化に富む地形：起伏の多い山地、高地、峡谷及び河川浸食による谷、うねりのある平地	主として低地、約 80% は平坦地で砂地
気象条件	雨期(9 月-3 月) 25℃から乾期 48℃	穏やか、乾燥、熱帯気温及び降雨と種々変化	大半の地域 (85%) は乾燥高温、気温： - 40℃
面積	96,707 km ²	284,538 km ²	279,252 km ²
人口	1,828,504 (as of 2014)	35,522,174 (as of 2014)	5,849,605 (as of 2014)
宗教	90%以上がイスラム教	90%以上がイスラム教あるいはキリスト教	90%以上がイスラム教
言語	Afar 語が支配的であるが Amharic が広く使われている	Oromo 語が支配的であるが Amharic が広く使われている	Somali 語が支配的であるが Oromo 語及び Amharic が広く使われている
行政	5 の行政地域及び約 30 の Woreda	12 の行政地域及び約 180 の Woeda	9 の行政地域及び 45 以上の Woreda
州都	Semera	Addis Ababa, defacto Adama (Nazareth)	Jigjiga
生計	主として家畜飼育/放牧	主として農業	主として家畜飼育/放牧
農産物	トウモロコシ、豆、ソルガム、パパイヤ、バナナ、オレンジ	トウモロコシ、テフ、小麦、大麦、サヤエンドウ、豆、オイルシード、コーヒー	主としてソルガム及びトウモロコシ、小麦類も収穫
動物	ラクダ：22%、山羊類：40%、羊：20%、牛：10%	牛：45.4%、山羊類：40%、羊：3.8%、ロバ：1.2%、ラクダ：3.1%	牛：20%、羊 30%、山羊類：6%、ロバ：4%、ラクダ：3.7%
観光資源・名所	Afar 地溝帯 (Ertale, Awash) 及び Yangudi Rassal 国立公園、人類化石地帯 (Hadar 及び Ramis 等)	Bale 山国立公園、湖、Sof-Omar 等洞窟、温泉	大地溝帯内温泉の存在
鉱物資源	塩、カリウム、硫黄、マンガン、ベントナイト、アルミニウム、大理石、石膏	金、ソーダー灰、白金、石灰、石膏、粘土、タンタル、	天然ゴム、塩、ガスオイル

Data source: CSA and other relevant documents

(2) 自然、歴史及び文化遺産

一般的に全ての候補地及びその周辺には自然、歴史に関わる特別な場所は存在しないものの、コミュニティによる温泉利用（Tone/Kone、Meteka、Boku 及び Arabi）、エチオピア正教会による温泉の使用要求（Boku）、候補地近くでのエチオピア正教会建設（Meteka）等に関しては留意する必要がある。詳細を表 4.3.2 に示す。

表 4.3.2 自然、歴史及び文化遺産

場所	文化遺産	社会経済的使用
Allelobeda	文化遺産無し	少数の未確認石墓が存在、追加調査必要
Dallol	文化遺産無し	伝統的塩採取場が近辺に存在、近代的カリ採取場が広く開発されている
Damal	—	—
Danab	—	—
Erebt	文化遺産無し	—
Teo/Kone	文化遺産無し	住民による温泉利用、温泉療法目的の利用も含む
Meteka	近隣にエチオピア正教会の建設	Gewane を含む近隣住民の温泉利用（温泉浴、洗濯、洗車）
Bobesa/Aluto-2/3)	文化遺産無し	—
Gedemsa	文化遺産無し	—
Nazareth/Boku	エチオピア正教会が2つの温泉利用を要求	近隣及び近隣以外の人々による温泉浴による病気治療に利用
Arabi	文化遺産無し	近隣及び近隣以外の人々による温泉浴による病気治療に利用

出典: ESIA Study Report

(3) 生態学的保護地域

国立公園、野生動物保護区、狩猟管理地区等の法的に定められた全ての保護区は、今回のマスタープラン調査の地熱候補地からは除外されている。本調査では、Afar 州、Somali 州及び Oromia 州の3州内の15候補地が選ばれている。エチオピアにおける環境的に重要な場所は、国立公園、野生動物保護区、狩猟管理地区として保護されているが、3州内におけるこれらの保護区を下表（表 4.3.3）にまとめる。事業実施に伴う環境への影響を最少化するため、次のプロジェクト段階においては、保護区の立地場所に関する更に詳細な調査が必要である。

表 4.3.3 事業実施場所近辺の自然保護区の分布

National Parks			
Site	Managed by	Established	Area in ha
AbijataShala Lakes	Oromia	1963	88,700
Awash	Oromia & Afar	1958	75,600
Geralle	Somali	1998	385,800
YangudiRassa	Afar	1969	473,100
Wildlife Reserves			
Alledeghi	Afar		193,389
Awash west	Afar		415,000
Gewane	Afar		-
Mille Serdo	Afar		650,354
Controlled Hunting Areas			
Aluto	Oromia		28,000
Bilen Hertalie	Afar		109,000
MelkeSadi	Afar		-
TelalkDewe	Afar		72,000

(Data source: Different Publications)

(4) 送電線による影響の可能性

今回計画の地熱事業には高圧送電線建設が含まれている。高圧送電線設置場所によっては、鳥の視覚への影響が予想され、場所によっては電線への衝突の可能性もある。現時点においては、送電線設置の詳しいルートは確定していないため、送電線が渡り鳥へ与える影響の程度を予想することは不可能である。今回の地熱開発候補地は、エチオピアの国立公園あるいは保護地内には立地しないものの、候補地の近辺には少数の国立公園あるいは保護区が存在している。ESIA 調査により、候補地近くに隣接する 2 つの国立公園が重要な渡り鳥飛行ルート上に位置していることが明らかになっている。一つはアディス・アベバから約 500 km に位置する Gewanae 及び Mille 間の Afar 州（地溝帯北部）中央部の Yangudi Rassa 国立公園である。Yangudi 山はその境界を南東に持ち、Rassa 平原に取り囲まれている。この地域では、冬季に *Falco naumanni* と *Circus macrourus* を含む、多くの渡り鳥の種の定期的な移動が記録されている。渡り鳥の飛行ルート上に位置するもう一つの国立公園は、Abijata 湖と Shalla 湖を併せ設立された Oromia 州にある Abijata-Shalla 公園である。ここには湖畔にいくつかの温泉があり、9 つの湖中の島の内、少なくとも 4 つは重要な鳥の繁殖地となっている。この公園は Palearctic（旧北亜区）及びアフリカ渡り鳥の両者、特定の猛禽類、フラミンゴ及びその他の水鳥の主たる飛行ルート上に位置している。渡り鳥への影響を回避しあるいは最小化するための送電線ラインを確定するために、EIA 調査において詳細な渡り鳥の飛行ルートを調査する必要がある。

4.4 戦略的環境評価 (SEA)

戦略的環境評価(SEA)は、政策、計画、プログラム決定において、環境面及び様々な持続可能な選択肢を考察するための体系的な意思決定過程のことである。従って SEA は各 EIA の実施前に行われる。このことは、SEA は個別の事業や計画が実施される以前に行われる、主として政策レベルの事項に焦点を当てたものであると言える。

現在エチオピアにおいては、開発計画に対する SEA は義務付けられていないものの、上述の SEA

の定義と概念を考慮すると、地熱エネルギー開発事業に関する SEA は次の観点から論じられるべきである。

- ・ 地熱開発に係るエチオピアのエネルギー政策
- ・ 事業実施無しケースを含む代替案検討
- ・ 財政組織の指針観点からの事業見通し
- ・ エチオピアの国家政策と JICA 環境ガイドラインとの整合性

4.4.1 地熱開発に関するエチオピアのエネルギー政策

(1) エチオピア保全戦略 (CSE)

1990年代初期より、連邦政府は首相評議会により承認されたエチオピア保全戦略(CSE)に基づき、いくつかの地方、国家、セクター別の環境保全、保護政策を推進している。CEA は新規及び既存の政策、計画、事業に、環境計画を統合するための戦略的な枠組みを定めている。また、環境管理策実施のための、体制及び法的基礎を定めると共に、国家及び地方戦略、セクター及びセクター横断的戦略、行動計画及びプログラムを含む、広い意味での包括的かつ合理的な環境管理へのアプローチ方法を定めている。

(2) エチオピア環境政策 (EPE)

エチオピアにおける環境政策(EPE)は CSE に基づき、1997年4月に首相評議会により承認された。EPE は「農業開発から工業化(ADLI)」として知られている長期的経済開発戦略及び他の主要な国家政策と十分に統合され、かつ整合性のとれたものである。EPE の全体的な目標としては、健全な環境管理原則の実行を通じ、エチオピア国民の健康と生活質の向上と強化及び持続的社會、経済の推進であると要約出来る。個別の政策目標及び主要指導原理は EPE に明確に記されており、全体的な目標の様々な面へ発展させられている。また、セクター別及びセクター横断的政策と共に、それら政策を適切に遂行するための要求事項も含んでいる。

(3) 国家エネルギー開発政策

国家エネルギー開発政策(1994)の目的は、エネルギーを適切な形態及び要求される質、量で消費者へ経済的に供給するために、エネルギー資源開発を促進することである。

これらの政策は、個別のエネルギー資源開発の増進及びエネルギー生産、供給への民間投資の推進から構成されている。

国家エネルギー開発政策では、エチオピアにおける現在の主要エネルギー政策は以下のようになっている。

- ・ 社会経済開発とエネルギーセクターの公平な開発
- ・ 環境への最小の影響と共に、全ての地域への平等な電力供給が可能な、エチオピア独自のエネルギー資源の開発

4.4.2 エネルギー資源の選択

エチオピア政府は、主要な政策目標である経済成長促進及び貧困撲滅を達成するために、水力、

地熱、風力、太陽光等、種々のエネルギー資源の調査、開発実施のための計画、プログラムを開始している。

地熱エネルギー開発は自然及び社会環境に正負両面の影響を及ぼす。地熱エネルギー利用施設には燃焼過程が存在しない理由により、一般的に地熱エネルギー資源は、化石燃料を原料とするエネルギー資源に比べ環境に優しいエネルギーと理解されている。地熱エネルギーの特徴を考慮すると、他の再生可能エネルギーに比べても地熱エネルギーはいくつかの利点を有している。表 4.4.1 及び表 4.4.2 に地熱エネルギーと他の再生可能エネルギーを比較しそれぞれの特徴と利点を示す。

表 4.4.1 地熱エネルギーの環境特徴

	地熱エネルギー	他の再生可能エネルギー
有用性/信頼性	最も高い信頼性・有用性 制御不可能な物理的力に依存しない	太陽光、風力等は気象条件が合致した場合のみ有用
自然条件	地形に応じてプロジェクト場所選択の制約がない	徳英の自然条件に合致することが求められる（効果的な風及び太陽光）
必要用地	他のクリーンエネルギーによる同等の発電量の場合に必要な用地に比べると、必要用地は少ない	同等量の太陽光発電の場合には約 10 倍の用地面積が必要
クリーン性/費用効果	化石燃料燃焼の場合に比べるとよりクリーン、より効率的、より費用効果大	化石燃料燃焼は煤塵、NO _x 、SO _x 及びその他有害物質発生
CO ₂ 排出、他	化石燃料燃焼の場合に比べ地熱エネルギー発電による CO ₂ 発生量は少ない	化石燃料燃焼設備はより多くの CO ₂ を発生

出典：調査団

表 4.4.2 他の再生可能エネルギー源と比較した地熱エネルギーの利点

特徴	地熱	風力	太陽光	バイオマス	水力
ベースロード能力	◎	×	×	◎	◎
有限性	◎	◎	◎	×	×
追加燃料コスト	◎	◎	◎	×	◎
CO ₂ 排出程度	◎	◎	◎	×	
風景への影響度	◎	×	×	◎	×
エネルギーコストの価格競争性 ^{sts}	◎	◎	×	◎	◎
キャパシティブクター(%)	89-97	26-40	22.5-32.2	80	-
調査リスク	?	◎	◎	◎	◎

(Source: Ultra-deep-geothermal/energy, A Guide to Geothermal Energy and Environment, Geothermal Energy Association, USA 2007))

上表は、他のエネルギー資源、特に化石燃料資源に比べ、地熱エネルギーは再生可能エネルギーでありかつ環境調和型エネルギー資源であることを示している。

上述の地熱エネルギーの利点に加え、地熱エネルギーは社会環境へのいくつかの正の影響も有している。主たる正の影響を挙げると：国家経済への刺激、国民生活水準の向上、（地域雇用機会の増大等）地域住民への利益、地域経済発展、等である。今回提案の地熱開発は地域への投資意欲を促進すると共に最終的には地域の雇用機会増大に繋がると考えられる。また、地熱事業は、化石燃料燃焼による発電ではないことにより、発電に伴う二酸化炭素排出抑制に繋がるものである。このことは、本事業へのクリーン開発メカニズム（Clean Development Mechanism：CDM）の適用の可能性を示唆している。CDM に関しては「5.5 CDM 事業の可能性」で論じる。

4.4.3 事業の選択

SEAの主たる目的の一つは、「事業を実施しない場合」の選択肢を含め、提案されている事業の代替案の検討にある。エチオピア政府は、経済成長の加速と貧困撲滅という大きい目標達成のために、種々のエネルギー資源（例えば、水力、地熱、風力、太陽光、等）の調査と開発に関わる計画とプログラムを開始している。エネルギー需要の拡大に伴い、エネルギー資源の多様化計画は極めて重要である。従って、本計画における地熱エネルギー開発計画策定は、地熱以外の他のエネルギー資源による代替を可能にする、発電方法の多様化に向けての重要な一歩である。地熱エネルギーは、他のエネルギー源、とくに化石燃料に比べ、再生可能エネルギーであり、また環境調和型である。地熱事業実施に伴う自然及び社会環境への影響は限定的であり、また適切な緩和策及び管理方法によりその影響を最少化出来るものである。

地熱エネルギー開発のこれらの特徴を考慮すれば、SEAレベルにおける代替案としては以下が考えられる。

- 事業を実施しない場合の環境状況の考察。「何もしない」場合（事業実施無し）
- いくつかの坑井掘削、異なる貯留層調査（事業実施）

表 4.4.1 に上記 2 つの代替案の利点及び不利益についてまとめる。

表 4.4.3 代替案の比較

		代替案		利点	不利益
1	事業を実施しない場合	無し		事業実施による環境影響なし	国家への社会、社会経済便益無し。森林伐採問題の悪化。教育、商業、工業発展無し。
2	事業実施の場合	深度の異なる井戸の掘削	深い貯留槽井戸の掘削及び調査 浅い貯留槽井戸の掘削及び調査	地盤沈下リスクの低減あるいは回避	費用大、長期の調査期間
		異なる場所での掘削	本調査にて優先付された場所での掘削(Tendaho, Ayrobera)	環境面では本調査により環境的に適正とされた (Appendix 4.4 参照)	放牧地からの立退き、水争奪競争、等(Appendix 4.4 参照)
	上記以外の場所における掘削		非住居地(Appendix 4.4 参照)	サイトへの近接困難性 (Appendix 4.4 参照)	

出典: Tendaho Geothermal Development F/S Report, 2013, Italy

「事業を実施しない場合」は、事業実施場所に発電所が建設されないことを意味しており、この場合は、事業予定地は従来通りの環境に留まり、周辺コミュニティ、または国家全体に対しても、何ら社会経済的利益はもたらさないことになる。従って、「事業を実施しない場合」を選択の場合は、雇用機会の損失等により、国家にとっての利益損失を意味する。

「抗井掘削」ケース選択の場合は、事業の実現性にとって極めて重要である。従って、環境面以外の評価基準も用いて、適切かつ包括的な掘削井の場所の解析及び事業場所の選定がなされるべきである。

4.5 IEE の実施

既存データ及び簡便な現地調査データを含むベースラインデータ／情報に基づき、初期環境調査

(IEE)を実施した。

4.5.1 事業の 카테고리分類

(1) 一般

JICA環境社会配慮ガイドライン（2010年4月）によると、事業の 카테고리は事業概要、規模、実施場所状況等を考慮し、環境・社会への影響の度合いに応じ4つに分類される。下表にエチオピアEPAガイドライン及びJICAガイドラインで定められている事業カテゴリーの比較を示す。

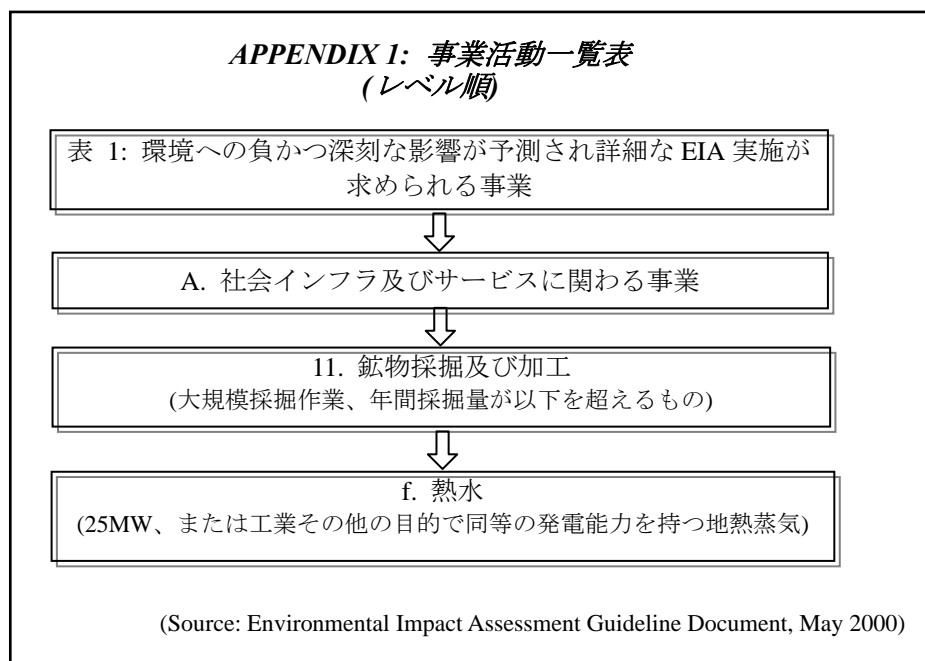
表 4.5.1 事業の環境カテゴリー分類

事業タイプ	JICA ガイドライン	エチオピアEPA ガイドライン	EIA 要求
環境や社会への重大で望ましくない影響のある可能性を持つようなプロジェクト。また、影響が複雑であったり、先例がなく影響の予測が困難であるような場合、影響範囲が大きかったり影響が不可逆的である場合。	カテゴリー A	Schedule-1	詳細 EIA
環境や社会への望ましくない影響が、カテゴリーAに比して小さいと考えられる協力事業。一般的に、影響はサイトそのものにしか及ばず、不可逆的影響は少なく、通常の方策で対応できると考えられる。	カテゴリー B	Schedule-2	詳細 EIA を免除される場合がある。
環境や社会への望ましくない影響が最小限かあるいはほとんどないと考えられる協力事業	カテゴリー C	Schedule-3	カテゴリー化後の環境レビューは免除される。
JICAの融資等が、金融仲介者等に対して行われ、JICAの融資承諾後に、金融仲介者等が具体的なサブプロジェクトの選定や審査を実質的に行い、JICAの融資承諾（あるいはプロジェクト審査）前にサブプロジェクトが特定できない場合であり、かつ、そのようなサブプロジェクトが環境への影響を持つことが想定される場合。	カテゴリー FI	-	カテゴリー化後環境レビューを実施。

出典:調査団

(2) 地熱エネルギー開発事業の分類

環境影響評価手順書（2000年5月）のAppendix I（活動一覧表）では、事業をその活動内容により次のように分類している。



上記の事業分類によると、25 MW以上の発電能力を有する地熱エネルギー開発事業は詳細なEIA実施が求められる事業となる。

4.5.2 初期環境調査のスクーピング

地熱エネルギーは、化石燃料燃焼等の他のエネルギー資源に比べると、一般的により環境調和型であるといえるが、地熱エネルギー開発に際しては留意しかつ管理すべき負の環境影響も存在する。下表に地熱エネルギー開発に際して発生が予想される留意すべき負の環境影響をまとめる。

深刻と考えられる環境社会影響を評価するために、事業実施により発生が予想される環境社会影響を、事業内容及び事業実施場所周辺の全体的環境社会条件に基づき初期確認を行う。表4.5.2に示した通り、汚染、自然環境、社会環境への影響はAからDに分類される。これらの中で、可能性ある最も重要な影響は、地下水の利用と汚染であり、これらに伴う水の地中への再注入及び新たな地下水生成による貯留槽崩壊による地盤沈下及び地震の誘発である。また、大気汚染、騒音、安全、土地利用に関しても相応の配慮が必要である。Appendix 4.5に全体の環境チェックリストを示す。

表 4.5.2 環境スコアリングチェックリスト

No	Likely Impacts	Reason and Description	Rating
Social Environment			
1	Involuntary resettlement	Planning phase: Land for geothermal plant is required. There are residents in the prospect site area and the impact should be minimized to avoid resettlements and land area. The approximate number of land owner for the prospect sites are 50 persons in total. Detail study should be conducted.	C-
2	Living and Livelihood	Construction phase: Surface disturbance of wilderness has high impact as active sites tend to be in rare landscape types of very high scenic and touristic (economic) value including 'colorful striking landscapes, hot springs, lavas and glaciers. Disturbance includes roads, power lines, factories, heavy lorries and drilling equipment.	B-
		Construction phase & Operation phase: Job opportunities for the surrounding area for project sites are increased.	B+
3	Land use and utilization of local resources	Planning phase & Construction phase: The project areas are used mainly as farmland and grazing land, with dispersedly located houses, while few of them (Erabti, Dallol, Deraïl and Teo) are nearly uninhabited. Meteka, Bobessa, Finkilo, and Dofan sites are populated; particularly Meteka is densely settled by town residents. The rest sites Arabi, Tone, Allelobeda, Boset, Gedemsa and Boku are dominantly used either for cultivation or grazing. One special scenario is the case of Bobessa and Finkilo (Alluto 2 and 3). Here, the site is in adjacent to geothermal power facility which has been under construction by Ethiopian Energy and Power Corporation (EEPC) for the last few years.	B-
		Operation phase: The effective land use is expected in the area.	B+
4	The poor, indigenous and ethnic people	No particular indigenous people and ethnic people are identified in the area at the moment.	D
5	Local conflicts of interests	No particular impact is envisaged at the moment.	D
6	Water usage or water rights and rights of common	Planning phase, Construction phase and Operation phase: The project may be associated with the well drillings such as testing, geothermal production and reinjection wells. Also, construction and operation of power generation plant may require freshwater. The impact should be minimized based on the study at the detail design stage.	C-
7	Hazards(Risks) (infectious disease such as HIV/AIDS)	No particular impact is envisaged at the moment.	D
8	Working Conditions	No particular impact is envisaged at the moment.	D
9	Disaster	No particular impact is envisaged at the moment.	D
Natural Environment			
10	Topography and geographic features	Construction phase: Surface disturbance of wilderness has high impact as active sites tend to be in rare landscape types of very high scenic and touristic (economic) value including 'colourful striking landscapes, hot springs, lavas and glaciers. Disturbance includes roads, power lines, factories, heavy lorries and drilling equipment.	B-
11	Land subsidence	Operation phase: Subsidence, or the slow, downward sinking of land, may be linked to geothermal reservoir pressure decline. Injection technology, employed at all geothermal sites in the United States, is an effective mitigating technique.	B-
12	Climate	Operation phase: Local weather changes caused by emission of steam affecting clouds.	B-
13	Soil erosion	Construction phase: Landslides can occur due to temperature and water level in rocks, especially in tectonically active areas.	B-

No	Likely Impacts	Reason and Description	Rating
14	Wetlands, rivers and lakes	Planning phase, Construction phase, Operation phase: Some project sites such as Meteka and Kone are located closely to wetland. Some impact may be associated with the project.	B-
15	Fauna and flora and biodiversity	Planning phase and Construction phase: The protected areas are basically avoided for the site selection. For detail survey should be conducted at the implementation of full EIA study (ESIA). Before geothermal construction can begin, an environmental review may be required to categorize potential effects upon plants and animals. Power plants are designed to minimize the potential effect upon wildlife and vegetation, and they are constructed in accordance with a host of state and federal regulations that protect areas set for development.	B-
16	Landscape	Construction phase: Surface disturbance of wilderness has high impact as active sites tend to be in rare landscape types of very high scenic and touristic (economic) value including ‘colorful striking landscapes, hot springs, lavas and glaciers. Disturbance includes roads, power lines, factories, heavy lorries and drilling equipment.	B-
17	Ground water	Planning phase, Construction phase and Operation phase: The project may be associated with the well drillings such as testing, geothermal production and reinjection wells. Also, construction and operation of power generation plant may require freshwater. The impact should be minimized based on the study at the detail design stage.	C-
Pollution			
18	Air pollution	Construction phase: Due to construction work in the city area, air quality is likely affected due to congestion of traffic and other construction machinery. Geothermal power plants release very few air emissions because they do not burn fuel like fossil fuel plants. Geothermal plants emit only trace amounts of nitrogen oxides, almost no sulfur dioxide or particulate matter, and small amounts of carbon dioxide. The primary pollutant some geothermal plants must sometimes abate is hydrogen sulfide, which is naturally present in many subsurface geothermal reservoirs. With the use of advanced abatement equipment, however, emissions of hydrogen sulfide are regularly maintained below Ethiopian standards. Emissions of H2S –distinguished by its “rotten egg” odor and detectable at 30 parts per billion – are strictly regulated to avoid adverse impacts on plant and human life.	B-
19	Water contamination (Water use & Water contamination)	Planning Phase, Construction Phase and Operation Phase: Liquid streams from well drilling, stimulation, and production may contain a variety of dissolved minerals, especially for high-temperature reservoirs (>230°C) which may not be the case at most of the geothermal prospect areas in Ethiopia. Some of these dissolved minerals (e.g., boron and arsenic) could poison surface or ground waters and also harm local vegetation only in some locations. Liquid streams may enter the environment through surface runoff or through breaks in the well casing. Surface runoff can be controlled by directing fluids to impermeable holding ponds and by injection of all waste streams deep underground. It is important to monitor wells during drilling and subsequent operation, so that any leakage through casing failures can be rapidly detected and managed. Toxic waste water may enter clean aquifers due to lowering of the water table.	B-
20	Wastes	Planning Phase, Construction phase and Operation phase: At the detail survey and construction, sludge from the drilling work may be generated. Also, construction waste and general waste at the operation may be generated even those amount are not large. Adequate treatment should be conducted following the standard.	C-
21	Noise and vibration	Planning Phase (Well drilling and testing phase): Generally noise generation in this phase does not exceed the Ethiopian noise regulations. Much like the construction phase of development mentioned below, well-drilling and testing are temporary, and the noise pollution they produce is not permanent. It is estimated that well drilling operations would not exceed 54 dBA. However, unlike the construction phase of development, well-drilling operations typically take place 24 hours per day, seven days a week. This temporary noise pollution can last anywhere from 45 to 90 days per well. Construction phase (Noisiest phase): Noise may be generated from construction of the well pads, transmission towers, and power plant. The noisiest phase of geothermal development, but the past experiences show generally remains below 65 dBA. Noise pollution associated with the construction phase of geothermal development is a temporary impact that ends when construction ends. Well pad construction can take from a few weeks or months to a few years, depending upon the depth of the well. In addition, construction noise pollution is generally only an issue during	B-

No	Likely Impacts	Reason and Description	Rating
		<p>the daytime hours and is not a concern at night.</p> <p>Operation phase: Noise from normal power plant operation generally comes from the three components of the power plant: the cooling tower, the transformer, and the turbine-generator building. It is estimated, noise from normal power plant operation at the site boundary would occupy a range of 15 to 28 dBA—below the level of a whisper</p> <p>Several noise muffling techniques and equipment are available for geothermal facilities. During drilling, temporary noise shields can be constructed around portions of drilling rigs. Noise controls can also be used on standard construction equipment, impact tools can be shielded, and exhaust muffling equipment can be installed where appropriate.</p>	
22	Odor	<p>Planning phase, Construction phase and Operation phase: Even temporary, emission of hydrogen sulfide (H₂S) may associate with the Geothermal production test at detail survey and construction.</p> <p>At the operation, also hydrogen sulfide (H₂S) may be discharged. The impact should be minimized based on the study at the detail design stage.</p>	C-
23	Accidents	<p>Construction phase and Operation phase: There was an example that violent explosions caused by buildup of a 'steam pillow' in empty hot underground reservoirs, which have previously killed people working in geothermal plants.</p> <p>While earthquake activity, or seismicity, is a natural phenomenon, geothermal production and injection operations have at times resulted in low-magnitude events known as —micro earthquakes. These events typically cannot be detected by humans, and are often monitored voluntarily by geothermal companies.</p>	B-

出典：調査団

<Rating>

- A-: Serious impact is expected, if any measure is not implemented to the impact.
- B-: Some impact is expected, if any measure is not implemented to the impact.
- C-: Extent of impact is unknown (Examination is needed. Impact may become clear as study progresses.)
- D: No impact is expected.
- A+: Remarkable effect is expected due to the project implementation itself and environmental improvement caused by the project.
- B+: Some effect is expected due to the project implementation itself and environmental improvement caused by the project.

4.5.3 社会環境への影響

今回の地熱開発候補地内外における住民の生活状況把握の為、Woreda レベルのエネルギー、水分野関連事務所における質問書調査を実施した。質問書調査では、今回の地熱開発及び関連事項に関し、地熱事業従事者、専門家に対しインタビューを実施した。

エネルギー使用に関しては、石油ランプを使用している住居は殆どなく、また医療所や学校では太陽電池の使用が始まっていることが明らかとなったものの、料理や照明は薪、石炭、家畜糞が主流であることが明らかとなった。現在コミュニティの数は少なくまた相互の距離がかなり離れており、資源量と再生スピードを考慮すれば、薪、石炭使用による環境影響はそれほど深刻なものとは考えられない。そしてコミュニティひとり当たりのエネルギー使用量も非常に低いレベルに止まっている。地熱開発による社会環境影響は、この様な非効率な生活状況改善が期待されることにある。

水資源及びその供給に関しては、Alallobeda、Arabi、Dofan、Meteka及びKoneを除く多くの調査場所では水不足と供給の中断の問題があり、その他の場所においても、水道水（処理された水）へ

のアクセスは依然最優先問題である。水問題に関しては、現在砂糖工場拡張に伴う水争議があり、コミュニティではその解決は楽観視されていないし、場所によっては、それが可能な場合であるが、温泉を灌漑用を使用している例もある。また、いくつかの場所では水争奪問題、急激な土地利用形態の変化等の問題が発生しているケースもある。

質問書調査の回答者に対しては、本地熱事業実施の際の、水に係る問題として、水質汚染、既存水源の水獲得問題及びこれらの問題解決、あるいは問題低減の選択肢についての質問を行った。この結果、各コミュニティは、事業の実施は地域に多少の負の影響ももたらすであろうと考えており、水不足問題に対してはすべてのコミュニティが最低限Kebelレベルで水の供給を望んでいることが明らかとなった。従って、主となる地熱開発事業実施と共に、コミュニティの水資源へのアクセスが可能となるような何らかの事業（他の開発機関と共同したコミュニティ参加による）実施の強い要求があることを留意する必要がある。

下の表 4.5.3 に 15 の候補地の住民の生活状況をまとめる。

表 4.5.3 候補地における住民生活状況

No.	サイト	暮らし
1	Dallol	Amed-ale コミュニティにおける生計は塩採掘及び日用品輸送による給料及び収入が主体となっており、これらでは生計に必要な費用は賄えない状況である。このため多くの住民が食糧救済プログラムの下にある。
2	Tendaho-3 (Allalobeda)	コミュニティは全体的に家畜による生計に依存している。従い、Woreda の食糧確保の保障は極めて脅かされた状況にある。Kebele 内での農耕活動がないため、年間を通じて食糧救済支援の下にある。
3	Boina	Bahri Kebele の生計は完全に家畜飼育に依存しており、農業活動は行われていないため、食糧確保の保障は極めて脅かされた状態にある。コミュニティの食糧確保は政府から支給される食糧に頼っている。
4	Damali	Afar 地溝帯の中央部に位置しており、Asayta Woreda の管轄下にある。300mm 以下の少降雨かつ不規則な降雨パターンの不毛な乾燥地帯に位置する。海拔 250 - 500m の低標高地に位置する。
5	Teo	Afar 地溝帯の中央部に位置しており、Mile Woreda の管轄下にある。少降雨かつ不規則な降雨パターンの不毛な乾燥地帯に位置する。年間降雨量は 300 - 500mm。海拔 250 - 500m に位置する。
6	Danab	Afar 地溝帯の中央部に位置しており、Dubti Woreda の管轄下にある。少降雨かつ不規則な降雨パターンの不毛な乾燥地帯に位置する。年間降雨量は 300 - 500mm。比較的高標高の海拔 500 - 800m の山岳高原に位置する。
7	Meteka	他の Kebele と異なり、Meteka は都市に準じる小さな町であり、他の周辺 Kebel では農業活動が大半であるが、Meteka のコミュニティでは種々のセクター産業分野への従事あるいは小規模商業従事者が多い。Woreda 事務所での情報では、大半の商業従事者は、それにより得られる収入では生活費が賄えないとされており、居住者の何割かは食糧援助を受けている。
8	Arabi	Kebele の主たる農業活動（商業活動及び通常の生活）は家畜飼育及び農産物生産である。今回の事業候補地近くにおける主たる生産農産物は、トウモロコシ、ソルガム、トマト、玉ねぎ、及び果実類である。今回の調査で大規模農業の不在及び畜産業、家畜飼育は大規模には行われていないことが明らかとなった。小規模の Arabi の町では種々の果実栽培に従事している人はいるが、周辺の Kebele レベルでは、気候不適、水不足及び土地が痩せているため食糧不足に晒されている。こうした食糧不足の被害者の人々に対しては年間を通じエチオピア政府から救援食料が支給されている。既に報じられている通り、需要増大により食糧価格は上昇しており、このため、農業生産に従事出来ず、食品購入に頼らざるを得ない放牧従事者に重大な影響を与えている。
9	Dofan	少数の人たちは大規模な政府及び民間企業の給与生活者であるが、Dofan コミュニティの大多数は家畜生産業により生計を立てている。Afar Kebele の多くの放牧生活者は食糧確保の保障がなされておらず、定期的な食糧援助を受けている。
10	Kone	コミュニティの生計は、土地固有の農業及び家畜飼育に立脚している。事業実施候補地近辺

No.	サイト	暮らし
		においては、コミュニティの食糧は自己充足出来ており、いくつかの Kebele の住民は、一定した降雨ではないが、雨を利用して、トウモロコシ、トマト、玉ねぎ及び果実を含む現金農産物の栽培を行っている。
11	Nazareth	食糧確保に関しては、Boku Kebele は比較的保障されていると言える。いくつかのコミュニティにおいては依然最低貧困レベルにあるものの、大多数の Kebele は食糧確保保障の出来るカテゴリーに分類されており、政府からの食糧支援は受けていない。
12	Gedemsa	Kebele の基本的な経済基盤は農業生産物である。降雨の不規則性、水不足及び灌漑の不在にも関わらず、Kebele は食糧充足が出来ている稀有な地域の一つとして知られている。農産物による収入と、これにより水へのアクセスを可能にし、生産性を向上させる、といった戦略が現在の食糧確保保障を可能としている。
14	Aluto-2 (Altu-Finkilo)	これら二カ所の生計手段の主体は農業である。トウモロコシ、小麦及びテフが主要農産物である一方、玉ねぎ、トマト等の果実・野菜も、少数の農家である程度の量栽培されている。
15	Aluto-3 (Aluto-Bobessa)	農産物栽培に不可欠の水であるが、灌漑設備へのアクセス不足、不十分な降雨のため、生産性は極めて限定されている。このため、コミュニティは食糧確保保障が出来ない状況にある。Woreda 管理事務所によると、43Kebele 中、23 の地方 Kebele (Finkilo 及び Bbessa を含む) がエチオピア政府による食糧救済プログラムに依存している。
18	Boseti	Kebele は土地不足の状況ではあるが、大多数の居住者は相応の量の食糧農産物を生産しており、食糧に関する限り Kebele は食糧確保は保障された状況にある。
22	Tendaho-2 (Ayrobera)	本地域には住民は居住していないが、周辺地域のコミュニティは全体的に家畜による生計に依存している。従い、Woreda の食糧確保の保障は極めて脅かされた状況にある。Kebele 内での農耕活動がないため、年間を通じて食糧救済支援の下にある。

出典: 調査団

4.5.4 水の利用

地熱開発実施には、水の利用が不可欠である。今回の多くの地熱開発候補地では、水の確保が不便な場所に立地しており、地熱開発での水利用は、コミュニティの水確保問題と競合することになる。従って、地熱開発の推進に当たっては、水利用の可否の確認が大きな問題である。上述の如く、水問題は殆ど半数の Kebel あるいは候補地にとっての、もっとも深刻な課題の一つである。例えば、2つの Kebel では水汲みの往復に 15 ないし 30 km を要しており、また、ある Kebel では水へのアクセスは比較的良いが、水の安全性に関し問題がある。3つの Kebel のみ安全で清澄な水の消費が可能である。また、Meteka、Boset 及び Arabi では水道管へのアクセスが可能と回答している。Boseti では、1月から5月にかけて水不足の期間となる。表に 4.5.4 に 15 地熱候補地の水状況を纏める。

表 4.5.4 候補地の水へのアクセス状況

サイト	水源		距離 (Km)	水不足期間	水質
	人間用	動物用			
Afar 州					
Allalobeda (Tendaho-3)	河川	河川	0.5 - 2	-	非安全水
Dallol	池	池	25 - 30	通年	非安全水
Danab	河川	河川	-	通年	非安全水
Damali	河川	河川	-	通年	非安全水
Dofan	河川	河川	0.5 - 1	-	非安全水
Boina	雨/池	雨/池	15 - 20	4月 - 6月	非安全水
Kone	湖	湖	0.5 - 1	-	非安全水
Meteka	井戸	河川	0.5	-	安全水
Teo	河川	-	-	-	非安全水
Ayrobera (Tendaho-2)	-	-	-	-	-
Oromia 州					
Boseti	水道	池	2	1月 - 5月	安全水
Bobessa (Aluto-3)	湖/河川	湖/河川	7	-	非安全水

サイト	水源		距離 (Km)	水不足期間	水質
	人間用	動物用			
Finkilo (Aluto-2)	湖/河川	湖/河川	7	-	非安全水
Gedemsa	河川	河川	7	夏期	非安全水
Nazareth	水道	河川	0.5	-	安全水
Somali 州					
Arabi	井戸	河川	0.5	-	安全水

出典：調査団

4.5.5 転地及び移転

現在今回の地熱開発の規模は確定していないものの、事業実施のためには、候補地内の一部は事業主により取得されることになる。このため、Kebeleレベルでのインタビューで土地手当てに関わるデータと情報収集を行った。

表4.3.7に各候補地における土地状況及び事業実施前の土地取得の可能性についてまとめた。

表 4.5.5 土地状況

No.	サイト	現状	サイト近辺の土地所有者数	所有されている土地の広さ (ha)	サイト近辺での放牧者数
1	Dallol	本地域は居住用、農業用及び放牧地としては開発されていないが、伝統的な塩採取地のひとつである。	1	1	-
2	Tendaho-3 (Allalobeda)	Allalobeda 地熱サイトは Gurmudela Kebele の中にある。本サイトは、Addis Ababa から 586 km 離れた Logia 町から 15 km のところにある。Allalobeda は、飲料用及び農地用の降雨/水不足の為、農地には適していない。コミュニティの水は Awsh 川に頼っている。本地熱サイトは居住者及び農家は不在の場所に位置している。コミュニティの家畜及び放牧家畜には泉の水を与えている。Dubti 地熱サイトは、調査用井戸の掘削がかなり進んでいる場所である。本サイトは、具体的には Ayirolef Kebele の境界内に位置しており、また、Semera 町に近接している (9kms NE)。	6	6.5	10
3	Boina	本サイトは山頂の人里離れた場所に位置している。このため、家畜放牧あるいはこれに類する目的には使用されていない。	0	-	-
4	Damali	サイト近辺は居住地域ではない。	-	-	-
5	Teo	サイト近辺は居住地域ではない。	-	-	-
6	Danab	サイト近辺は居住地域ではない。	-	-	-
7	Meteka	本地熱サイトは、多数の居住者及び焦点の存在する Meteka Kebele 村内に存在する。また、サイト内にはエチオピア正教会 (St. Mary Church) も存在する。従い、移転の必要性があると考えられる。	5	12	2
8	Arabi	事業サイトは居住地から約 4 km 離れた場所に位置しているため、コミュニティ内の家屋/小屋を取り壊す必要はないが、放牧地はサイト内に含まれることになる。	3	14.5	1
9	Dofan	Dofan 地熱サイトは、Awash 川及び Meteka Werer 町に近い Afar 州南部に位置する。行政的には Dulecha Woreda の Hugub Kebele に属する。流紋岩により形成されたカルデラ上に立地する二つの潜在的な地熱サイトが存在する。Dulecha Woreda は Dofan サイトから約 27 km の場所に存在する。両 Woreda 及び Kebele 共に公的な輸送手段のない場所に立地している。Dofan 及び周辺を覆っている支配的な土地タイプとしては、Intensively cultivated lands、State Farm land、Open Grassland、Open Shrub Grassland 及び Perennial Marsh である。State Farm land (Amibara Farm) 及び Intensively cultivated lands がこれらの地熱サイトに隣接している。大多数の住民は様々な地域からのマイノリティであるが、Dofan サイトの住民は家畜飼育を主とした生計手段としている。ごく稀ではあるが、大規模砂糖工場で働いている人もいる。	9	12	4
10	Kone	Kone 事業候補地は隣村からかなり離れた場所に位置しており、周辺地域は一般的な放牧に利用されている。	6	8.5	2
11	Nazareth	本サイト周辺には居住用の家屋/小屋は存在しないが、異なる個人所有の農地の中にいくつかの泉(Spring)が存在している。さらに、エチオピア正教会は、温浴室を設置済みのその内の2つについて既に所有の申請を行っている。	2	不明	4
12	Gedemsa	本サイトは居住地からは離れた場所に位置しており、家畜放牧地として使用されている。また、サイトはコミュニティの個人所有の農地に囲まれている。	1	3	3
14	Aluto-2 (Altu-Finkilo)	国家地熱エネルギー資源調査地図によると、Aluto 地域には3つの潜在的なサイト、即ち、Aluto-Langano、Aluto Bobessa 及び Aluto Finkilo、が存在する。この内、Aluto-Langano は現在開発中である。これらの地熱サイトは、Ziway 湖の南 (8 km)、Langano 湖の北 (9 km) に位置している。行政的には、Aluto Finkilo 地熱サイトは Golba Aleto Kebele 内に位置し、Alto Bobessa は Aluto Kebele (Ziway Dugda woreda, Arsi Zone, Oromia Region) 内に位置している。Bobessa と Finkilo はお互いに隣接している。実際の事業規模は決定していないが、カルデラ内には僅かながら小屋が存在する。更に、事業予定地は放牧地として利用されているため、これらの土地の一部がサイトに含まれる可能性がある。一般的に言って、これらの土地のかなりの部分は、町の居住者により所有されている。	8	13	7
15	Aluto-3 (Aluto-Bobessa)	Bobessa と Finkilo はお互いに隣接している。実際の事業規模は決定していないが、カルデラ内には僅かながら小屋が存在する。更に、事業予定地は放牧地として利用されているため、これらの土地の一部がサイトに含まれる可能性がある。一般的に言って、これらの土地のかなりの部分は、町の居住者により所有されている。	7	11.5	2
18	Boseti	Boseti 地熱サイトは Welenchiti 町に隣接して、南西方向(10km)に位置している。行政的には、Boseti 地熱サイトは Gara Dera Kebele に位置	2	4.5	1

No.	サイト	現状	サイト近辺の土地所有者数	所有されている土地の広さ (ha)	サイト近辺での放牧者数
		している(Boset woreda、Shewa 東方ゾーン、Oromia 州)。サイトはまた、Rukecha Boqore 及び Sifa Bote Kebele の境界に近接して位置している。標高に関しては、Boseti は海拔 1,250-2,650m と比較的高所に位置しており、地熱サイトは火山性流紋岩堆積により形成されたカルデラ上の、海拔約 1,800-2,200m の高度に位置している。Boseti 及び周辺を覆っている支配的な土地タイプとしては、Dense Shrubland、Intensive Cultivated land、Moderately Cultivated land、及び Open Shrubland であり、Boseti 地熱サイトは Intensively cultivated lands に近い Dense Shrubland に位置している。			
22	Tendaho-2 (Ayrobera)	サイト近辺は居住地域ではない。	-	-	-
Total			50		

出典：ESIA Report

事業実施場所及びその規模の確定後、エチオピアの土地取得手順に従い、正確な土地境界を定める必要がある。

自然及び社会両面での、各候補地特有の負の環境影響に関してはAppendix 4.4に纏めている。

4.6 環境管理計画

4.6.1 環境管理計画(EMP)

発生が予想される環境影響の種類及びその重要度に基づき環境管理計画(EMP)を作成した。EMPの目的は、計画している地熱発電施設の建設及び操業に伴い、発生が予想される環境影響を管理する為、当該事業で取るべき環境的、社会的活動を特定することにある。前節で詳述した重要な環境影響は、適切な方法を用いて緩和されることになる。地熱事業実施に伴い発生が予想される特有の環境影響に関してはAppendix 4.4に纏めた。

EMPはEIA調査実施過程で作成される。環境影響緩和策の詳細は、事業実施場所決定後、技術、経済性の検討と共にFS時に作成されるものであるが、次の段階における事業計画及び詳細EIA実施のために、現段階において基本的な要求事項を包括的に提示しておくことは意義のあることである。表4.6.1に建設段階初期において取るべき環境影響緩和策をまとめる。

表 4.6.1 EMP における環境影響緩和策

活動	要素	潜在的影響	緩和策
用地取得	土地確保	影響を受ける人々の移転	事業事務所は事業実施場所における、土地利用パターンに関し、放牧地から工業用使用に至る全てについての規約に関する必要な会話を実施する。
		転居対象者の移転	土地の工業用使用に係るエチオピア規制に関する全ての法的要求事項を確認する。
	ベンチマーキング	財産の喪失	サイト境界マーキング。マーキングにより事業の建設中に使用される地域は前もって合意された場所に限定される。
		生活スタイルの変化	事業活動前に全ての必要な許可を取得する。
		既存生態系への妨害	マーキングにおいて事業実施場所近辺の温泉への攪乱は最小化される。表流水の流れは保全され自然の排水パターンは混乱から守られる。
	囲い込み	植生の喪失	移転地及び／あるいは補償活動がエチオピア規制に沿って実施される。
生態系及び土地利用パターンの変化		周辺地域の植林は建設工事と共に始める。	
マンパワー、機材、資材の移動	交通量の増大	コミュニティ及びその安全性への混乱	騒音発生が最大となる可能性のある日中の時間帯に関する周辺住民との協議、及びそれに基づく騒音最小化のための計画策定。
	駐車及び建設による周辺の地域の侵犯	SO ₂ 、NO _x 、CO、VOC等、ダスト、ガス状汚染物質の大気への影響	車両及び機械の定期的な保全メンテの実施。
		騒音レベルへの影響	活動を交通警察へ通報。地元住民による交通事故の発生し易い場所の管理及びそれらの場所における家畜の監視。
土木工事、レベルリング、掘削	土木重機、機材の運転	自生植物相、動物相への混乱	周辺地域の植林は建設工事と共に始める。
	サイトにおける植生の喪失	土地利用パターンの変化	全ての機材は決定された限度内でのみ運転する（サイトの準備期間及び建設期間）
	土壌杭打ち	既存周辺土地利用者への妨害、視覚への影響	建設活動により引き起こされる騒音・振動レベルの定期的なモニタリングによる基準値への適合度のチェック。
	オイル貯蔵	周辺騒音レベルの増大	既存の商業機会及びコミュニティ開発に合致した新たな騒音レベル提言方法の設計。

出典：調査団

4.6.2 モニタリング計画

環境モニタリング計画は EMP に含まれる。環境モニタリング及び監査は、提案された環境管理計画の対策が十分に実施され、その成果が適切なレベルであることを確認するために、事業の全ての段階に亘り実施されるものである。ここで注意が必要なことは、モニタリング計画、緩和策及び監査は、事業許可を得るために作成されるものではなく、全ての事業期間に亘り遵守し、かつ遂行すべき法的義務のある文書であることである。各候補地に適用される、一般的なモニタリング計画を表 4.6.2 に示す。

表 4.6.2 地熱開発のためのモニタリング計画

影響	方法	パラメータ	モニタリング場所/位置	頻度
大気質	計測、試料採取	PM/PM10, NOx, SOx	排気煙突	半年に1回
		濃度及び暴露時間	非凝縮性ガス発生場所	半年に1回
		PM/PM10, CO ₂ , 温度, 酸素濃度, 燃焼効率	燃焼場所	半年に1回
騒音	Leq 計測	dB(A)	掘削場所	半年に1回及び苦情の場合
表流水及び地下水 (必要に応じ)	試料採取	温度, pH, Oil, SS, COD	地下水井戸、オイル/グリーストラップ、気水分離機、沈殿槽	年4回
土壌	試料採取	水分含有量, pH, salinity, N, P, Cl, K, Na	事業場所近辺農場	年1回
		重金属類 (Mn, Fe, etc.)		3年毎
一般廃棄物	監査、写真による文書化、インタビュー	発生量、貯蔵方法、リサイクル、運搬、処分	施設敷地内	年4回
生物多様性	目視検査及び写真による文書化	植生の一般状況	施設及び周辺	年1回
資源使用	計測	水及びエネルギー消費量	施設及び周辺	連続
	監査	原料消費量	施設及び周辺	連続
健康及び安全	健康、安全調査	PPE の適切な使用、安全目印の有無、救助キット、防火装置、負傷・健康記録、非常口及び緊急時計画、事故記録 (以上 ILO 基準に則ること)	施設及び施設内道路	連続
社会経済	現場での質問	地域の人口及び公共機関	施設及び周辺	年1回
	インタビュー	雇用記録及び労働組合	施設	連続
操業監視	視察及び文書	生産率、ガス流量、計測値の読み、圧力弁、異常値の読み、過負荷、停止、温度	施設内すべての設備及び主要機器	毎日

出典：調査団

4.7 ステークホルダー協議

ESIA 調査のスクーピング段階において、コミュニティにおけるインタビューによりステークホルダー協議 (2014年3月～7月) を行った。

4.3.1 節 (ベースライン調査の方法) に示した通り、インタビュー及び質問書を用い、候補地においてステークホルダー協議を行った。第 4.3.1 節に述べたとおり、ヒアリングと質問書調査は Woreda レベルにおける 7つの地方事務所において行い、異なるセクターから 100人以上の参加者があった。調査及びステークホルダー協議用に作成した質問書の内容を下にまとめる。

- ・ 事業実施候補地及び近辺における資源利用及び利用施設設置に関する何らかの指示あるいは指導はあるか
- ・ 事業実施候補地及び近辺において開発計画はあるか
- ・ 当地において地熱エネルギー開発事業を実施する場合の個人的意見

上記の質問事項に加え、グループ協議におけるテーマは以下の通りである。

- ・ 地熱エネルギーに関して知っていますか?
- ・ コミュニティ内における主要な問題は何か?

- ・ 地熱エネルギー事業から何を期待しますか？
- ・ 地熱エネルギー事業から受ける可能性のある負の影響は何だと思えますか？
- ・ 地熱エネルギー事業実施により負の影響が生じる場合、それを避ける、あるいは最小化するためどの様にしますか？
- ・ 当地域にはマイノリティグループは存在しますか。存在する場合彼らが直面する問題はどの様なものと思えますか？
- ・ 資源あるいは他の原因によるコミュニティ間の争いはありますか？
- ・ 事業実施により移転が要求された場合、要求に応じますか？
- ・ 住居移転が必要な場合、どの様な形の補償を受け入れるべきか、あるいは要求するべきと思えますか？
- ・ その他

ステークホルダー協議の結果は、地域住民の意見はいずれの地域も同様に以下に示すものであった。

- ・ 現在のところ候補地において地熱エネルギー事業実施を中止する指示は出ていない
- ・ 事業実施のためには、資源活用に必要な何らかの予防策が採られるべきである。
- ・ インタビューを行った全ての地方局の担当者は、必要な対策がとられる前提で、地熱エネルギー開発事業実施に対して積極的な支持を表明している。

上記の地方局担当者の意見と共に、事業実施により直接影響を受ける可能性のある住民の意見は以下の通りであった。

- ・ 農地喪失及び、手放した土地と同等の土地を確保出来るか否かの不安。
- ・ 現在無償で使用している家畜のための放牧地を失う不安
- ・ 上記の放牧地を失うことによる家畜数減少の不安及びそれに伴う家庭収入の減少の不安。
- ・ 子供の遊び場所を失くす不安
- ・ 大きな市場、医療センター、交通サービス等、近隣の都市サービス機能利用機会損失の不安。
- ・ 所有している資産に対する適切な補償を受けられるか否かの不安

上に記したコミュニティの関心事、心配事を取り除くためには、エチオピア規則 No. 1/1995 に記されている法的、社会環境、土地に関する規制事項に則りコミュニティに対する配慮と丁寧な説明がなされる必要がある。

インタビューの対象者及び回答者の氏名ならびにポジションを一覧表にして Appendix 4.6 に示す。

4.8 結論と勧告

4.8.1 結論

本調査は、候補地において収集可能なデータ収集、地熱エネルギー開発事業実施により引き起こ

される可能性のある影響スコーピングのための IEE、地熱エネルギー開発候補地の環境的適性判断を含んでいる。調査により以下が明らかとなった。

- ・ 地熱エネルギー開発事業の実施により、事業実施場所には正負両面の何らかの環境社会影響が及ぼされるが、今回の地熱開発候補地の中で、地熱エネルギー開発事業実施により深刻な負の環境影響を受ける候補地は無いといえる。
- ・ Woreda レベルで実施したステークホルダー協議では、土地補償等の適切な対策がなされることが前提であるが、インタビューを行った全ての地方局の担当者が地熱エネルギー開発に対する支持を表明した。
- ・ ステークホルダー協議では、事業実施により影響を受ける可能性のある住民(PAPs)の主たる関心事は、農地の喪失の恐れ、家畜放牧地の消失の恐れであることも明らかとなった。候補地において地熱開発事業が実施される場合には、PAPs に対し、これらの事柄に関する十分な配慮と説明が必要である。
- ・ 環境評価政策に関わるエチオピアの法制度と JICA 環境ガイドライン (2010) 及び世銀のセーフガードポリシーとの乖離に関しては、事業実施時に行われる、住民協議、情報公開等に関する調整可能な手続き上の差異を除けば、相互間の大きな矛盾は無い。本調査での政策面の調査で地熱エネルギー開発事業は、エチオピアの事業環境分類でカテゴリー I に分類されることが明らかとなった。このことは、地熱エネルギー開発事業は、エチオピアの法律に従い、詳細 EIA の実施が求められることを意味している。
- ・ エチオピアの国家エネルギー開発政策では以下を挙げている、i) 他の社会経済開発と共に、エネルギーセクターの平等な開発、及び ii) 環境への最小限の影響による独自資源の開発と共に、全ての地域への公平な電力供給。これらの国家エネルギー開発政策に加え、国家環境政策では、持続可能な環境とその保護及び将来への継続性と共に、再生可能エネルギー源の開発及び化石エネルギー源使用の削減の推進、を挙げている。
- ・ 地熱エネルギーは、環境調和型かつエチオピアにおける独自の再生可能エネルギーの一つである。したがって、地熱エネルギー開発の推進は、エチオピアの国家政策に沿ったものであるといえる。

4.8.2 勧告

25 MW 以上の発電能力を有する地熱エネルギー開発事業は、エチオピアの環境関連法・規制に従い、事業実施以前に詳細 EIA の実施が求められる。第 4.2 節の「4.2 環境法及び規制」に示した通り、EIA 実施過程は、EPC との協議及びスクリーニング報告書の提出から始まり、環境承認の取得で終わる、一連の段階的な手順により構成されている。事業の実施者は、MoWIE や地方政府等の関連機関との協力のもと、EIA 手順に沿った活動を開始すべきである。EIA 実施にあたっては、以下に関する留意が必要である。

- ・ EIA はエチオピアの EIA 手順に沿って実施する。
- ・ EIA はエチオピアのガイドラインあるいは国際的な要求事項に従い、選定された場所において事業主により実施される。
- ・ EIA は事業実施場所の決定後、試掘前に開始し、その後試掘と継続並行して実施する。

- ・ 上記に基き作成された EIA 報告書は試掘結果を考慮して修正する。本調査で実施した ESIA 調査の結果は EIA の実施に活用可能である。
- ・ 修正 EIA 報告書に従い、必要に応じ追加 EIA を実施する。
- ・ EIA は地熱エネルギー開発に特有な環境影響を考慮して実施する必要がある。
- ・ 事業開発権の適用前に EIA 承認の取得を行う必要がある。

第5章 マスタープラン策定

5.1 マスタープラン目標及び策定手順

本地熱発電開発マスタープランは、初めに開発目標電力量と目標年次を設定し、本調査によって確認した候補プロジェクトの開発優先順位をつけて、それぞれのプロジェクトの開発目標年次を設定することにより策定する。

5.1.1 マスタープラン目標

表 5.1.1 に、本マスタープランにおける開発目標設備容量と計画期間を示す。計画期間は、EEPCo マスタープランと同様に 2037 年までとし、短期（4 年）、中期（7 年）、長期（12 年）の 3 期間に分けて計画する。開発目標電力は、短期計画では、コミットされているまたは進行中のプロジェクトの 610 MW を開発目標とする。中期計画では、本マスタープランにおいて優先付けしたプロジェクトを優先順位に従って開発することによって、EEPCo の期別の目標設備容量約 590 MW (累計 1,200 MW) を開発目標電力とする。長期計画では EEPCo の長期計画累計 5,000 MW を開発目標とする。

表 5.1.1 マスタープラン開発目標

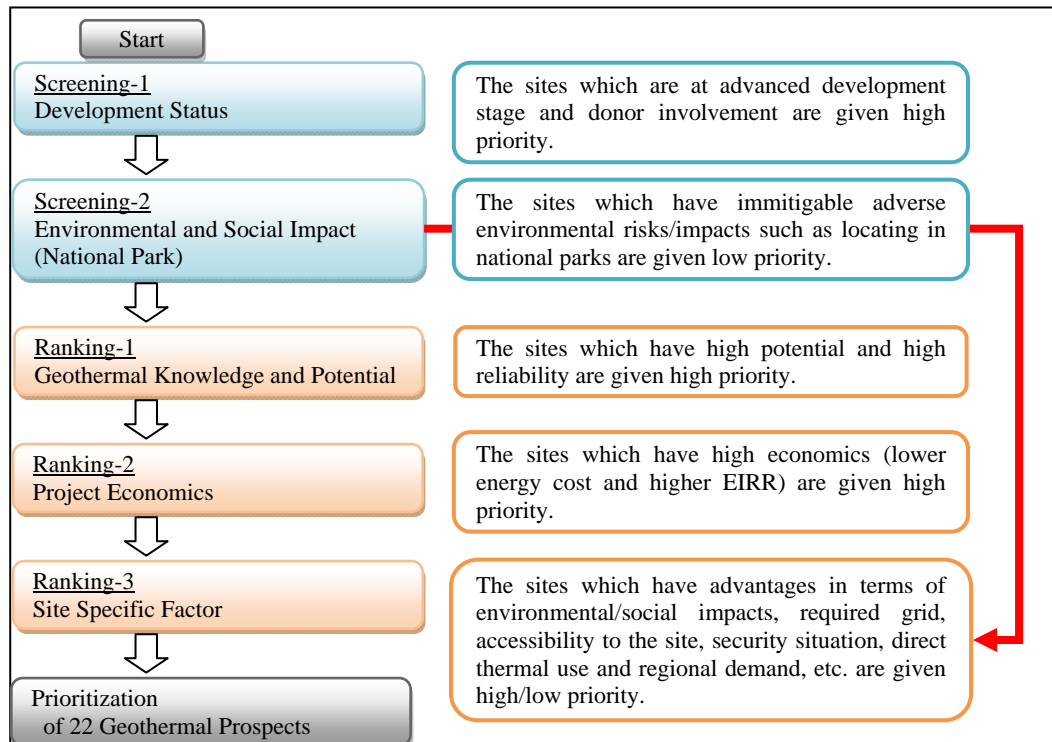
Item	Target		Remarks
Period	Master Plan: 2015 – 2037 (23 years)		EEPCo MP*: 2013 – 2037 (25 years) Wind& Solar MP: 2011 – 2020 (10 years)
	Short term: 2015-2018 (4 years)		
	Medium term: 2019-2025 (7 years)		
	Long term: 2026-2037 (12 years)		
Installed Capacity	Short term	610 MW	Committed and on-going Sites
	Medium term	1,200 MW	Same target as EEPCo MP
	Long term	5,000 MW	Same target as EEPCo MP

*MP: マスタープラン

出典: 調査団

5.1.2 マスタープラン策定手順

本マスタープランは、実施中の各種地質調査結果や過去に実施された調査結果の収集データを基に、22 ヶ所の地熱有望地を確認し、多基準解析を用いて有望地を優先順位付けして策定する。多基準解析は、図 5.1.1 に示す複数の基準を用いてスクリーニングとランキングにより候補プロジェクトを優先順位付けする手法である。用いる基準は、(1) 開発状況、(2) 環境社会影響、(3) 地熱ポテンシャル、(4) 経済性、そして (5) 地域特殊要素の 5 基準とする。始めに開発状況やドナーの関与状況により、コミットされているサイトは計画通りに実施されると位置付ける。続くスクリーニングでは、例えば国立公園に位置する等の、重大な負の環境影響を有するサイトを低い優先度に位置付ける。このほかのサイトについては、地熱ポテンシャル、計画設備容量、坑井掘削、発電所費用や他の必要な施設より見積もられる経済性によりランク付けを行う。そして最後に環境社会影響等の各サイトの特殊要素を考慮に入れて、順位付けの軽微な修正を検討する。



出典: 調査団

図 5.1.1 多基準解析のフロー

5.2 地熱有望地優先順位付けのための多基準解析

5.2.1 優先度評価の検討

(1) 開発状況

一般的に地熱開発では開発段階が進むにつれて、推定資源量の信頼性は向上する。本マスタープランでは、オーストラリア地熱レポートコード委員会による分類¹を用いて、22ヶ所の地熱有望地の開発状況と地熱資源量評価の信頼性を評価し、1) Measured)、2) Indicated、および 3) Inferred の3つの資源評価に分類する。

表 5.2.1 に地熱有望地 22 サイトの資源評価に基づく地熱ポテンシャルを示す。試掘が既に実施されている Aluto-Langano (Aluto-1)や Dubti (Tendaho-1)は、Measured 資源あるいは Indicated 資源と分類されるが、その他の詳細な調査が実施されていないサイトは、Inferred 資源と評価される。

¹ Global Review of Geothermal Reporting terminology, Feb 2013, Hot Dry Rocks Pty Ltd

表 5.2.1 資源評価別地熱ポテンシャル

	Site	Temp. Class	Geothermal Resource		
			Inferred	Indicated	Measured
1	Dallol	B	44	N/A	N/A
2	Tendaho-3 (Allalobeda)	A	120	N/A	N/A
3	Boina	C	100	N/A	N/A
4	Damali	C	230	N/A	N/A
5	Teo	B	9	N/A	N/A
6	Danab	B	11	N/A	N/A
7	Meteka	B	130	N/A	N/A
8	Arabi	C	7	N/A	N/A
9	Dofan	B	86	N/A	N/A
10	Kone	D	14	N/A	N/A
11	Nazareth	C	33	N/A	N/A
12	Gedemsa	D	37	N/A	N/A
13	Tulu Moya	C	390	N/A	N/A
14	Aluto-2 (Finkilo)	A	110	N/A	N/A
15	Aluto-3 (Bobesa)	A	50	N/A	N/A
16	Abaya	B	790	N/A	N/A
17	Fantale	C	120	N/A	N/A
18	Boseti	B	320	N/A	N/A
19	Corbetti	B	1000 ^{*1}	N/A	N/A
20	Aluto-1 (Langano)	A	16	70 ^{*2}	5
21	Tendaho-1 (Dubti)	A	280	10 ^{*3}	N/A
22	Tendaho-2 (Ayrobera)	A	100	N/A	N/A

N/A: 該当なし

^{*1} Reykjavik Geothermal

^{*2} エチオピア・アルトランガノ地域地熱電源開発調査, 経済産業省, 2010,

^{*3} Consultancy Services for Tendaho Geothermal Resources Development feasibility Study, ELC, 2013

出典: 調査団

(2) 環境社会影響

第4章で述べた環境社会配慮調査によると、Fantale 地熱サイトは Awash 国立公園の周辺に位置するため、開発のためのハードルが高いと判断される。そのため、Fantale サイトは、ランキングにおける優先度を低くする。Fantale サイトを除き、その他の 21 ヶ所の地熱サイトは、国立公園の範囲との重複はなく、緩和不可能な環境へのリスクや悪影響はない。

(3) 地熱ポテンシャル

それぞれのサイトの地熱ポテンシャルは、本調査で実施した各種地質調査を基に、第3章で評価した。貯留層評価結果は、表 5.2.1 に要約して示した。第2章で述べた電源開発計画によると、電力需要は 2030 年代始めには水力ポテンシャルと地熱ポテンシャルの合計を大きく上回ることが予想されており、EEP はより多くの地熱資源が開発されることを期待している。そのため、本調査では、各地熱サイトの計画設備容量は、各サイトの地熱資源推定量と同量とし最大限開発するものとした。

Corbetti や Aluto-1 (Aluto-Langano)、Tendaho-1 (Dubti)等の地熱サイトは、開発が開始されており (2.4 節参照)、各ドナーにより試掘調査が実施されている。Corbetti 地熱サイトの推定資源量は、

Reykjavík Geothermal による公表資料を参照して 1,000 MW とした。また、Indicated と Measured に分類した Aluto-1 (Aluto-Langano) と Tendaho-1 (Dubti) の資源量は、既存シミュレーション結果から引用した。

Kone および Gedemsa 地熱サイトの貯留層温度は、地化学分析の結果 100～170℃ と低く推定されているため、フラッシュ発電方式は採用できず、バイナリー発電の採用と想定される。ゆえに後述する経済性の評価においては、両サイトの建設費は、他の貯留層温度が Class-A や B のサイトに比べ極端に高くなることが想定される。

(4) 経済性

プロジェクトの経済性は、1) 発電原価と 2) 経済的妥当性の 2 つの指標により判断する。

1) 発電原価

【発電原価の構成】

競合する発電所（地熱発電所に対する水力発電所および他の発電所タイプ）を比較するため、建中利子や維持管理費を含む発電原価を算出した。発電原価は、年換算した投資額と運転維持費の合計であり、年間発電量 (kWh) で除して求められる。投資額は、経済耐用年数における 10% の割引率（資本の社会的機会費用）を用いて年換算され、全ての費用は 2012 年価格で計算している。投資額は、直接費（準備工、坑井掘削費、蒸気配管設備建設費、発電所建設費）と間接費および建中利子からなる。

【地熱以外の発電所建設費】

地熱以外の発電所のプラント建設費は、EEP より提供された実績、または計画中の発電所のデータより推定した。資本回収率と発電量の計算に必要な経済耐用年数と発電所利用率は下表の通り設定した。経済的耐用年数のうち、地熱発電所は世界的に標準的な 30 年を採用し、地熱以外の発電所は EEP Co マスタープラン調査における採用値を参照した。発電所利用率もまた、地熱発電所は標準的な 90% を採用した。水力等の他の発電所利用率は計画値を、風力発電については Adama、Ashegoda 発電所における実績値または計画値を参照した。

表 5.2.2 経済的耐用年数

Plant Type	Economic Life Time (years)
Geothermal	30
Hydropower	75
Wind	20
Solar	40
Energy from Waste	30
Biomass	25
Diesel	20
Gas Turbine	20
CCGT	25

出典：調査団

表 5.2.3 発電所利用率

Plant Type	Plant Factor (%)
Geothermal	90.0
Hydropower	20.0 ~92.0
Wind	26.4 ~33.6
Solar	20.0
Energy from Waste	84.9
Biomass	23.9~27.5
Diesel	84.0
Gas Turbine	90.0
CCGT	87.5

出典：調査団

【水力発電発電原価】

表 5.2.4 に、EEPCo マスタープランで建設が計画されている水力発電プロジェクトの発電原価を示す。この発電原価は、EEP から提供された資料を基に算出した。ほとんどの候補水力発電所は 100 MW 以上の大容量を持っており、発電原価は 0.02~0.15 US\$/kWh と幅があるが、多くは 0.10 US\$/kWh 以下となっていて経済性が優れているといえることができる。

表 5.2.4 候補水力発電所の発電原価

Ranking Order	Candidate Hydropower Plant	Installed Capacity (MW)	Plant Factor (%)	Energy Production (GWh/year)	Construction Cost (mil \$)	IDC Cost (mil \$)	Total Cost (mil \$)	Annualized Capital Cost (mil \$/year)	O&M Cost (mil \$/year)	Annualized Cost (mil \$/year)	Cost of Generation (\$/kWh)
1	Beko Abo	935	81%	6632	1260.8	441.3	1702.1	126.18	12.6	138.79	0.0209
2	Genji	216	49%	910	197.6	69.1	266.7	19.78	2.0	21.75	0.0239
3	Upper Mendaya	1,700	58%	8582	2436.4	852.7	3289.1	243.83	24.4	268.20	0.0312
4	Karadobi	1,600	60%	7857	2576.0	901.6	3477.6	257.80	25.8	283.56	0.0361
5	Geba I + Geba II	372	57%	1709	572.0	200.2	772.2	57.25	5.7	62.97	0.0368
6	Genale VI	246	74%	1532	587.9	205.8	793.7	58.84	5.9	64.72	0.0422
7	Gibe IV	1,472	50%	6146	2588.3	776.5	3364.8	259.03	25.9	284.92	0.0464
8	Upper Dabus	326	51%	1460	628.2	219.9	848.1	62.87	6.3	69.15	0.0474
11	Sor II	5	92%	39	18.6	3.7	22.3	1.86	0.2	2.05	0.0532
10	Birbir R	467	70%	2724	1231.1	369.3	1600.4	123.21	12.3	135.52	0.0497
9	Halele + Werabesa	436	54%	1973	886.0	310.1	1196.1	88.67	8.9	97.53	0.0494
12	Yeda I + Yeda II	280	45%	1089	540.2	189.1	729.3	54.06	5.4	59.46	0.0546
13	Genale V	100	66%	575	297.7	89.3	387.0	29.79	3.0	32.77	0.0570
14	Gibe V	660	36%	1905	1036.9	311.1	1348.0	103.77	10.4	114.14	0.0599
15	Baro I + Baro II	645	46%	2614	1595.9	558.6	2154.5	159.72	16.0	175.67	0.0672
17	Lower Didessa	550	20%	976	619.2	185.8	805.0	61.97	6.2	68.16	0.0699
16	Tekeze II	450	69%	2721	1690.4	591.6	2282.0	169.17	16.9	186.08	0.0684
18	Gojeb	150	48%	562	526.8	184.4	711.2	52.72	5.3	57.99	0.1032
19	Alettu East	189	53%	804	760.6	266.2	1026.8	76.12	7.6	83.73	0.1041
20	Tams	1,000	69%	6057	5814.9	2035.2	7850.1	581.95	58.1	640.10	0.1057
22	Abu Samuel	6	30%	16	18.5	2.8	21.3	1.85	0.2	2.04	0.1297
21	Alettu West	265	46%	1067	1180.5	413.2	1593.7	118.14	11.8	129.95	0.1218
23	Wabi Shebele	88	91%	691	887.8	221.9	1109.7	88.85	8.9	97.73	0.1414
24	Lower Dabus	250	29%	637	866.3	259.9	1126.2	86.70	8.7	95.36	0.1497

出典：調査団（各発電所のデータは EEP より入手）

【水力、地熱以外の発電原価】

次に表 5.2.5 に水力と地熱以外の発電所の発電原価を示す。再生可能エネルギーを含むこれらの発電タイプの中で、Adama-I と Ashegoda-II の風力発電が 0.084~0.090 US\$/kWh と最も発電原価が低く、次いで CCGT 発電、Bazma バイオマス発電の順になっている。しかし、殆どが 0.10 US\$/kWh を超えており、水力発電に対して経済的に劣っていることが分かる。

表 5.2.5 水力および地熱以外の発電所タイプの発電原価

Plant Type	Candidate Plant	Installed Capacity (MW)	Plant Factor (%)	Energy Production (GWh/year)	Construction Cost (mil \$)	IDC Cost (mil \$)	Total Cost (mil \$)	Annualized Capital Cost (mil \$/year)	O&M Cost (mil \$/year)	Annualized Cost (mil \$/year)	Cost of Generation (\$/kWh)
Wind Farm	Adama-I	51.0	33.6%	150	96.9	9.7	106.6	11.38	1.3	12.66	0.0844
Wind Farm	Adama-II	30.0	26.6%	70	57.0	5.7	62.7	6.70	0.8	7.45	0.1064
Wind Farm	Ashegoda-I	90.0	26.4%	208	171.0	17.1	188.1	20.09	2.3	22.34	0.1074
Wind Farm	Ashegoda-II	153.0	31.6%	424	290.7	29.1	319.8	34.15	3.8	37.97	0.0896
Solar	EEPco MP	300.0	20.0%	526	540.0	54.0	594.0	55.22	7.5	62.72	0.1192
Energy from Waste	EEPco MP	25.0	84.9%	186	144.0	7.2	151.2	15.28	32.1	47.35	0.2545
Biomass	Bazma	120.0	27.5%	289	183.7	9.2	192.8	20.23	11.1	31.30	0.1083
Biomass	Meikasedi	138.0	23.9%	289	203.4	10.2	213.6	22.41	12.4	34.83	0.1205
Diesel (HFO)	EEPco MP	70.0	84.0%	515	144.2	14.4	158.6	15.89	92.7	108.59	0.2108
Gas Turbine	EEPco MP	140.0	90.0%	1104	70.0	10.5	80.5	8.22	140.2	148.43	0.1344
CCGT	EEPco MP	420.0	87.5%	3219	525.0	78.8	603.8	57.84	292.9	350.77	0.1090

出典：調査団（各発電所のデータは EEP より入手）

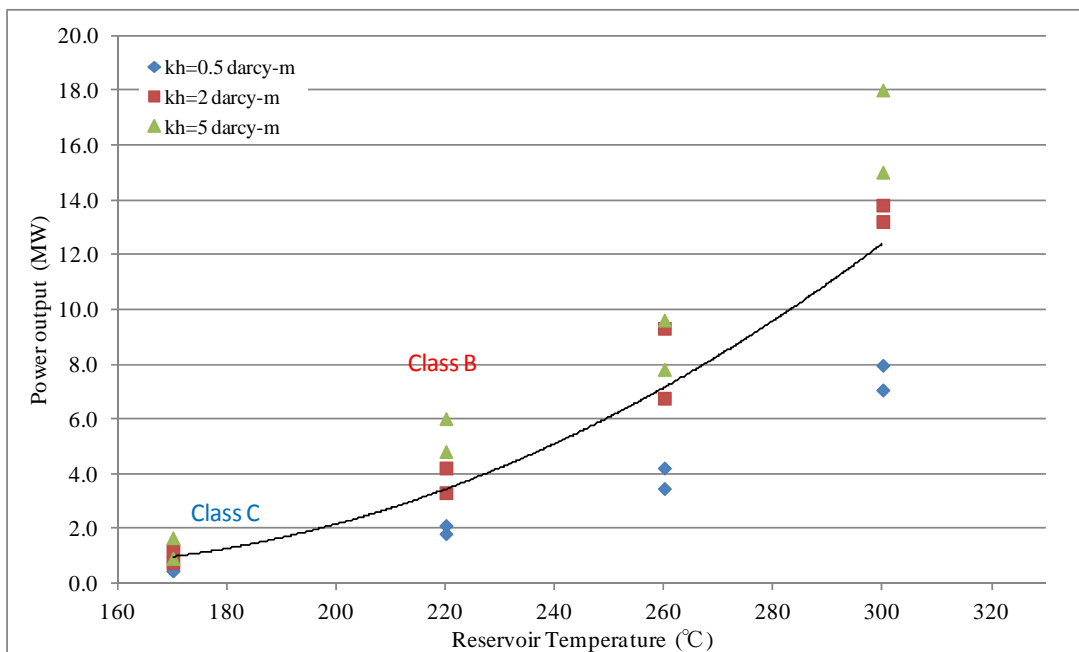
【地熱発電所建設費】

地熱発電所の建設費は、坑井掘削、蒸気配管システム、プラント建設にかかる費用が大半を占める。このうち、プラント建設費と蒸気配管システムは、計画設備容量に応じて算定した。坑

坑掘削費は、地熱構造モデルや各地熱地点の特性を考慮した坑井深度や生産井 1 本当たりの蒸気量・熱水量、流体存在深度や温度などを加味して算定した。なお、Aluto-1 (Aluto-Langano) および Corbetti については、より詳細な調査に基づき公表されているので、このプロジェクト費用を建設費用として参照した。

一坑井掘削費

坑井掘削費は、坑井掘削深度の設定のほか坑井 1 本当たりの予想噴出量を推定して算出した。坑井 1 本当たりの予想噴出量の推定は、まず地熱貯留層の深度、圧力、透水性を任意に仮定し、ついで坑井シミュレーションによって貯留層温度と噴気量の関係を求めることによって行った。噴出量を発電出力に換算したシミュレーション結果を図 5.2.1 に示す。貯留層の透水性によって大きく差がでるものの、貯留層温度が高いほど、坑井 1 本当たりの噴出量が大きくなり、出力が大きくなることが分かる。すなわち、所定の出力を得るために必要な坑井本数が少なくなる。



出典: 調査団

図 5.2.1 坑井シミュレーション結果

坑井掘削の成功率を次の通りとした。既に坑井掘削や MT 探査が実施されて貯留層の規模・温度に対する調査精度が上がっている Aluto 地区と Tendaho 地区 (Dubti および Ayrobera) では 80% と仮定した。一方、残りの殆ど調査がなされていないサイトは 70% と仮定した。坑井 1 本当たりの生産量と成功率を加味し、必要な生産井および還元井の坑井本数を算出した。生産井の坑内径は、一律に標準的な最終段掘削径 8-1/2 インチとし、坑井掘削費は、全世界でのプロジェクトにおける掘削費用を収集し、平均的な掘削単価 (1,500 US\$/m) に坑井深度を乗じて求めた。

一 蒸気輸送設備を含む発電所建設費

蒸気輸送設備（FCRS）費を含む発電所建設費については、開発期間は5.3節に示す実施計画モデルと同様に、一律に運転開始まで全体で6年、そのうちプラント建設に3年要するものと仮定し、EEPCo マスタープランにおける調査（70MW 14,000 万 US\$）を参考に算出した。

表 5.2.6 には、地熱発電所の発電原価を示す。前述したように低い貯留層温度が推定されている Kone および Gedemsa はバイナリー発電のみ適用可能であり、kWh あたりの建設コストが高くなるので、フラッシュ発電の地熱発電所を比較する本評価から除外した。

一 評価結果

評価の結果、貯留層温度の高い Aluto 地区や Tendaho 地区におけるサイトの発電原価が 5~6¢/kWh と最も低く、RG が開発中である Corbetti も 5.9¢/kWh で発電原価が低い。次いで推定資源量が大きい Abaya、Boseti、Meteka が 6~7¢/kWh と経済的に優れている。一方で Teo、Dallol、Danab などは貯留層温度が Class-B であるが、本調査で現地調査が不可能であったようにアクセスにかかるコストが建設コストを引き上げている。また Class-C の Tulu Moye、Fantale、Nazareth、Damali、Boina、Arabi 等は、必要坑井本数が多いため建設コストが高い。これらの電力原価は 9¢/kWh 以上となり、経済的に劣る結果となっている。

表 5.2.6 地熱発電所の発電原価

Ranking Order	Geothermal Site	Installed Capacity (MW)	Plant Factor (%)	Energy Production (GWh/year)	Construction Cost (mil \$)	IDC Cost (mil \$)	Total Cost (mil \$)	Annualized Capital Cost (mil \$/year)	O&M Cost (mil \$/year)	Annualized Cost (mil \$/year)	Cost of Generation (\$/kWh)
17	Dallol	44	90	346.9	304.5	45.7	350.2	32.30	3.0	35.35	0.1019
5	Tendaho-3 (Allalobeda)	95	90	749.0	376.6	56.5	433.1	39.95	3.8	43.71	0.0584
18	Boina	100	90	788.4	711.1	106.7	817.7	75.43	7.1	82.54	0.1047
16	Damali	230	90	1,813.3	1,589.3	238.4	1,827.7	168.59	15.9	184.49	0.1017
12	Teo	9	90	71.0	59.3	8.9	68.2	6.29	0.6	6.89	0.0971
19	Danab	11	90	86.7	122.8	18.4	141.2	13.03	1.2	14.25	0.1643
9	Meteka	130	90	1,024.9	595.3	89.3	684.6	63.15	6.0	69.10	0.0674
20	Arabi	7	90	55.2	90.7	13.6	104.3	9.62	0.9	10.53	0.1907
11	Dofan	86	90	678.0	424.3	63.6	488.0	45.01	4.2	49.25	0.0726
-	Kone	14	90	110.4	-	-	-	-	-	-	-
15	Nazareth	33	90	260.2	228.0	34.2	262.2	24.18	2.3	26.46	0.1017
-	Gedemsa	37	90	291.7	-	-	-	-	-	-	-
13	Tulu Moye	390	90	3,074.8	2,578.9	386.8	2,965.8	273.57	25.8	299.36	0.0974
2	Aluto-2 (Finkilo)	110	90	867.2	410.2	61.5	471.7	43.51	4.1	47.61	0.0549
3	Aluto-3 (Bobesa)	50	90	394.2	188.7	28.3	217.0	20.02	1.9	21.91	0.0556
7	Abaya	790	90	6,228.4	3,556.7	533.5	4,090.2	377.29	35.6	412.86	0.0663
14	Fantale	120	90	946.1	808.8	121.3	930.1	85.80	8.1	93.88	0.0992
8	Boseti	320	90	2,522.9	1,445.3	216.8	1,662.1	153.32	14.5	167.77	0.0665
6	Corbetti	1000	90	7,884.0	4,000.0	600.0	4,600.0	424.32	40.0	464.32	0.0589
10	Aluto-1 (Langano)	75	90	591.3	356.7	53.5	410.2	37.84	3.6	41.41	0.0700
1	Tendaho-1 (Dubti)	280	90	2,207.5	1,024.0	153.6	1,177.6	108.62	10.2	118.86	0.0538
4	Tendaho-2 (Ayrobera)	100	90	788.4	387.4	58.1	445.5	41.09	3.9	44.96	0.0570

出典：調査団

発電原価の算出を基にした地熱サイトの順位表を下表に示す。22 サイトのうち、Aluto と Tendaho の地熱サイトが最も上位に位置し、次いで RG により開発権が取得されている Corbetti と Abaya が続く。Aluto と Tendaho 地区を除いては、大地溝帯の Aluto と Tendaho の間に位置する Boseti と Meteka が上位に順位づけられる。

表 5.2.7 発電原価による地熱発電所の順位

Ranking Order	Geothermal Site	Temp. Class	Installed Capacity (MW)	Cost of Generation (\$/kWh)	Remarks
1	Tendaho-1(Dubti)	A	290	0.0538	Shallow reservoir is committed.
2	Aluto-2 (Finkilo)	A	110	0.0549	
3	Aluto-3 (Bobesa)	A	50	0.0556	
4	Tendaho-2 (Ayrobera)	A	100	0.0570	
5	Tendaho-3 (Allalobeda)	A	120	0.0584	Committed site
6	Corbetti	B	1,000	0.0589	Committed site
7	Abaya	B	790	0.0663	
8	Boseti	B	320	0.0665	
9	Meteka	B	130	0.0674	
10	Aluto-1 (Langano)	A	75	0.0700	Committed site
11	Dofan	B	86	0.0726	
12	Teo	B	9	0.0971	
13	Tulu Moye	C	390	0.0974	
14	Fantale	C	120	0.0992	
15	Nazareth	C	33	0.1017	
16	Damali	C	230	0.1017	
17	Dalol	B	44	0.1019	
18	Boina	C	100	0.1047	
19	Danab	B	11	0.1643	
20	Arabi	C	7	0.1907	
-	Gedemsa	D	37	-	Low temperature
-	Kone	D	14	-	Low temperature

出典: 調査団

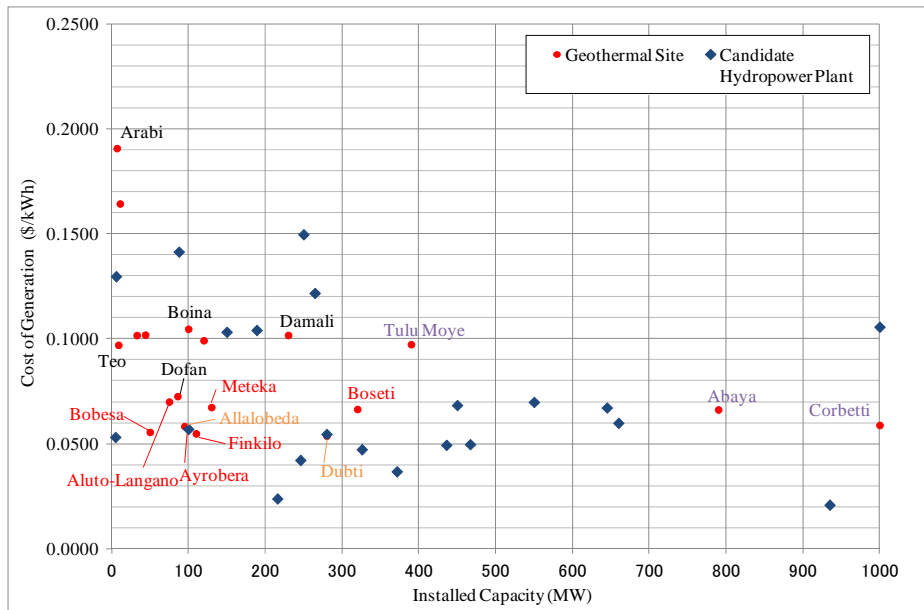
【地熱発電と他発電タイプとの発電原価比較】

本マスタープランでは、EEPCo マスタープランでは取り扱っていない地熱資源量評価を実施した。この地熱資源量評価を基に、地熱発電所の発電原価と他の発電タイプの発電原価を比較し、全ての発電所タイプを勘案した開発優先順位を提案する。

図 5.2.2 に地熱発電所と水力発電所、図 5.2.3 に地熱発電所と他の発電タイプの発電所の発電原価を示した。これらによれば、一般に水力発電所の発電原価の方が地熱発電所より低いとされているが、地熱発電所は十分に競争力があり、いくつかの同等規模の候補水力発電所より経済的であることが分かる。Aluto と Tendaho の地熱サイトと Corbetti 地熱サイトは、発電原価が 5～6 ¢/kWh と、経済的と言われる水力発電所と同様に安価な発電原価である。同様に Aluto-1 (Langano)や Dofan、Boseti、Meteka、Abaya の発電原価は、6～7 ¢/kWh であり、水力発電所の範囲内に位置するため、経済的に水力発電と同等に扱うことが可能である。

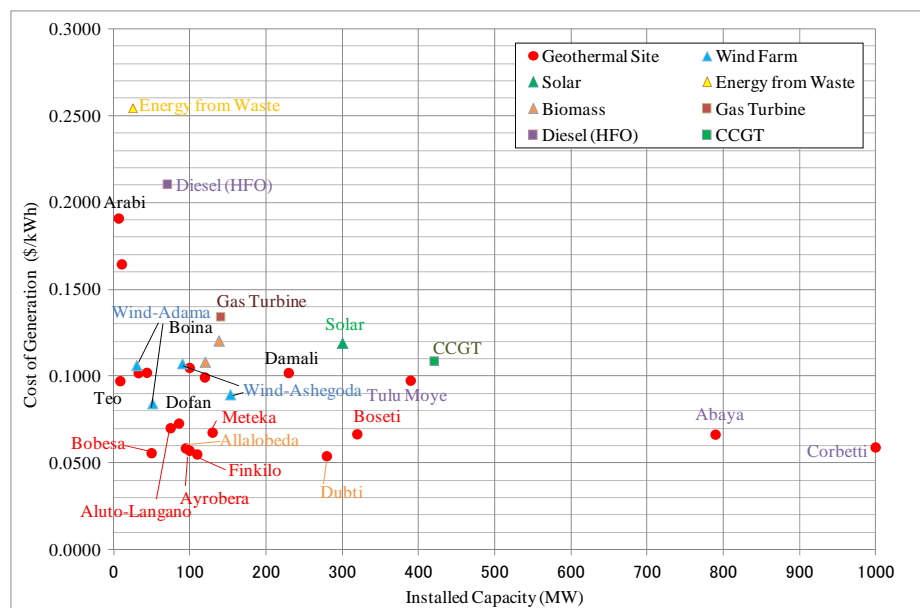
他の再生可能エネルギーと火力発電所と比較すると、最も発電原価の低い Adama と Ashegoda 風力発電所でも 8 ¢/kWh を超えており、表 5.2.7 中の 1 位から 11 位よりも劣っている。したがって、最小コスト発電の観点から、地熱発電は風力や太陽光より優先して開発するべきであると言える。また発電原価が 10 ¢/kWh 程度の地熱発電所は、風力や太陽光発電とほぼ同等であり、ガス・タービンやディーゼルより経済的である。ディーゼルや廃棄物発電は、Arabi 地熱サイトを除いて地熱発電所よりはるかに高い。

エチオピア政府が、地熱開発推進のために優遇金利等の優遇政策を採用すれば、地熱発電は他の発電タイプに対して、さらに経済的競争力が高まると考えられる。本マスタープランでは、発電タイプによる発電原価を比較することにより、既存の EEPCo の計画に対して、地熱の発電計画を勘案した計画を提案することとする。



出典: 調査団

図 5.2.2 水力発電及び地熱発電の発電原価



出典: 調査団

図 5.2.3 地熱発電および他の発電タイプの発電原価

2) 経済的妥当性

経済的妥当性は経済的内部収益率 (EIRR: Economic Internal Rate of Return)で検証する。EIRR は費用・便益分析により算定される。ここで費用は地熱発電所の建設費および運転維持費を充て、便益は代替火力(ディーゼル発電所)の費用を充てる。EIRR は費用のキャッシュフローの現在価値と便益のそれとの現在価値が等しくなる割引率である。このようにして計算された EIRR は資本の社会的機会費用である 10%と比較される。EIRR が 10%を超えていれば経済的に投資することが妥当である。

例として Tendaho-2 (100 MW)を例に取った場合の地熱発電所と代替火力発電所のコスト算定の基本条件を下表に示す。

表 5.2.8 Tendaho-2 (Ayrobera)発電所の経済評価で設定した基本条件

地熱発電所 (費用)	代替火力発電所 (便益)
設備容量: 100 MW	設備容量: 127 MW
設備利用率: 90%	設備利用率: 67%
所内使用率: 9%	所内使用率: 4%
経済的寿命: 30 年	経済的寿命: 15 年
年間発電量: 788.4 GWh	年間発電量: 747.3 GWh
年間販売量: 717.4 GWh	年間販売量: 717.4 GWh
建設費: \$384.0 百万 (2012 年価格)	建設単価: \$800/kW (2012 年価格)
運営維持費: \$3.8 百万 /年 (2012 年価格)	建設費: \$101.9 百万 (2012 年価格)
	燃料費: \$ 0.171/kWh (2012 年価格)
	運営維持費: \$ 0.009/kWh (2012 年価格)

出典: 調査団

上位 5 つにランクされた発電所 (Tendsho-1、Aluto-2、Aluto-3、Tendaho-2、Tendaho-3)のキャッシュフローを巻末に添付する。

各サイトの EIRR は表 5.2.9 に示されている。18 サイトのうち 16 サイトで EIRR はハードルレート 10%を超えており、これらの地熱発電所に投資することは経済的に妥当であると言える。一方、Danab と Arabi の 2 つのサイトは 10%を下回っており、経済的にみて投資は妥当ではない。また、表に示すように、EIRR と発電コストの間には強い相関関係がある。すなわち、発電コストが小さければ EIRR は大きくなる。

表 5.2.9 地熱発電所の優先順位と EIRR

Ranking Order	Geothermal Site	Installed Capacity (MW)	Cost of Generation (\$/kWh)	EIRR (%)
1	Tendaho-1(Dubti)	290	0.0538	33.9
2	Aluto-2 (Finkilo)	110	0.0549	33.6
3	Aluto-3 (Bobesa)	50	0.0556	32.3
4	Tendaho-2 (Ayrobera)	100	0.0570	32.3
5	Tendaho-3 (Allalobeda)	120	0.0584	30.9
6	Corbetti	1,000	0.0589	-
7	Abaya	790	0.0663	26.7
8	Boseti	320	0.0665	26.7
9	Meteka	130	0.0674	26.4
10	Aluto-1 (Langano)	75	0.0700	-
11	Dofan	86	0.0726	24.3
12	Teo	9	0.0971	18.2
13	Tulu Moye	390	0.0974	16.2
14	Fantale	120	0.0992	16.0
15	Nazareth	33	0.1017	15.6
16	Damali	230	0.1017	15.5
17	Dalol	44	0.1019	25.5
18	Boina	100	0.1047	15.2
19	Danab	11	0.1643	9.5
20	Arabi	7	0.1907	7.9
-	Gedemsa	37	-	-
-	Kone	14	-	-

出典: 調査団

(5) 地域特殊要素

1) 環境社会影響

スクリーニングを実施した国立公園との位置関係を除く環境社会影響を考慮にいれ、優先順位付けを行う。

本マスタープラン調査で実施した環境社会配慮調査の結果、Dofan 地熱サイトで地域住民との紛争の可能性を見出しており、また調査団が現地調査を行った際にも類似の経験をしている。このため、Dofan は同じ経済性のグループの中では下位に順位付けするように調整した。

2) 系統へのアクセス

地熱有望地から既設の系統・変電所までの必要送電線延長は、本調査での現地調査における正確な地熱徴候地点の確認後に測定した。表 5.2.10 に地熱資源量と設備容量を基に検討した必要な送電線の距離と送電電圧を示す。

系統の延伸は、EEP により実施されるため、延伸に係る費用は上述の建設費に含めないものとする。系統までのアクセスを考慮に入れ、地熱サイトの優先順位付けの再評価を行った。しかしながら、Boina や Damali、Danab 等の遠隔地に位置する地熱サイトを除き、ほとんどの地熱サイトは、周囲 30 km 以内に既存の送電線や変電所があり、地熱発電所の建設費と比較すると、送電線の想定費用は非常に小さいため、系統へのアクセスにより優先順位を調整する必要はないと判断した。

表 5.2.10 必要送電線の距離と電圧

	Geothermal Sites	Exsting TL (kV)	Connected Sub-station	Voltage (kV)	TL (km)	Cost (mil \$)
1	Dallol	132	Wukro	132	90	23.4
2	Tendaho-3 (Allalobeda)	230	Semera	230	15	5.6
3	Boina	230	Alamata	230	90	33.3
4	Damali	230	Semera	230	84	31.1
5	Teo	230	Semera	230	68	25.2
6	Danab	230	Semera	230	81	30.0
7	Meteka	66	Amibara	66	95	13.8
8	Arabi	230	Jijiga	230	65	24.1
9	Dofan	66	Amibara	66	7	1.0
10	Kone	132	Metehara	132	27	7.0
11	Nazareth	132	Nazareth	132	8	2.1
12	Gedemsa	230	Koka	230	12	4.4
13	Tulu Moye	132	Assela	132	30	7.8
14	Aluto-2 (Finkilo)	132	Adami Tulu	132	10	2.6
15	Aluto-3 (Bobesa)	132	Adami Tulu	132	13	3.4
16	Abaya	132	Sodo	400	35	19.3
17	Fantale	132	Metehara	132	8	2.1
18	Boseti	132	Nazareth	132	33	8.6
19	Corbetti	132	Shashamene	132	22	5.7
20	Aluto-1 (Langano)	132	Adami Tulu	132	14	3.6
21	Tendaho-1 (Dubti)	230	Semera	230	11	4.1
22	Tendaho-2 (Ayrobera)	230	Semera	230	15	5.6

出典: 調査団

3) サイトまでのアクセス

系統までのアクセス同様、サイトまでの必要なアクセス道路の延長は、表 5.2.11 に示すように本調査における現地調査結果を基に測定した。アクセス道路の地形や安全対策を考慮に入れ、アクセス道路や造成を含む土木工事の費用を算出し、上述した建設費の準備工として見積もった。

アクセスの利便性は、発電原価に反映されるため、遠隔地に位置する Damali や Danab 等の地熱サイトは、経済性に劣る。

表 5.2.11 アクセス道路の延長と周辺地形

	Geothermal Sites	Accessibility	Topography	Required Access Road (km)	Cost (mil \$)
1	Dallol	Accessible	Rolling	7	3.5
2	Tendaho-3 (Allalobeda)	Good	Plane	12	6.0
3	Boina	Inaccessible	Mountainous	40	40.0
4	Damali	Difficult	Rolling	81	64.5
5	Teo	Difficult	Mountainous	12	12.0
6	Danab	Difficult	Rolling	80	64.2
7	Meteka	Good	Plane	3	1.3
8	Arabi	Difficult	Rolling	35	28.0
9	Dofan	Difficult	Rolling	35	28.0
10	Kone	Good	Plane	4	2.1
11	Nazareth	Good	Plane	2	0.8
12	Gedemsa	Accessible	Plane	19	9.4
13	Tulu Moye	Accessible	Rolling	12	6.0
14	Aluto-2 (Finkilo)	Good	Plane	1	0.5
15	Aluto-3 (Bobesa)	Good	Rolling	2	1.0
16	Abaya	Good	Plane	30	15.0
17	Fantale	Accessible	Rolling	16	7.8
18	Boseti	Good	Rolling	9	4.6
19	Corbetti	Good	Rolling	10	5.1
20	Aluto-1 (Langano)	Good	Plane	0	0.0
21	Tendaho-1 (Dubti)	Good	Plane	10	4.9
22	Tendaho-2 (Ayrobera)	Good	Plane	7	3.3

出典: 調査団

5.2.2 地熱有望サイトの優先順位

前項で述べた多基準分析を用いた地熱有望サイトの優先順位付けをまとめると、優先順位は表 5.2.12 のように示される。

表 5.2.12 地熱有望サイトの優先順位

Ranking Order	Geothermal Site	Installed Capacity (MW)	Remarks	
Priority-S: Committed Project			COD	Donor
S	Tendaho-3 (Allalobeda)	25	2017	WB
S	Corbetti	500	2018	RG
S	Aluto-1 (Langano)	70	2018	Japan/WB
S	Tendaho-1 (Dubti)-Shallow reservoir	10	2018	AFD
Priority-A: Very High Economy			Energy Cost (US\$/kWh)	
1	Tendaho-1 (Dubti)-Deep reservoir	280	0.0538	Deep reservoir
2	Aluto-2 (Finkilo)	110	0.0549	
3	Aluto-3 (Bobesa)	50	0.0556	
4	Tendaho-2 (Ayrobera)	100	0.0570	
5	Tendaho-3 (Allalobeda)	95	0.0584	Expantion
Priority-B: High Economy			Energy Cost (US\$/kWh)	
6	Abaya	790	0.0663	RG has license
7	Boseti	320	0.0665	
8	Meteka	130	0.0674	
Priority-C: Low Economy			Energy Cost (US\$/kWh)	
9	Teo	9	0.0971	
10	Tulu Moye	390	0.0974	RG has license
11	Nazareth	33	0.1017	
12	Damali	230	0.1017	
13	Boina	100	0.1047	
14	Dofan	86	0.0726	Conflict with residents
15	Dallol	44	0.1019	Difficult due to low pH
Priority-D: Less Feasible			Energy Cost (US\$/kWh)	
16	Danab	11	0.1643	Poor access
17	Arabi	7	0.1907	Poor access
D	Gedemsa	37	-	Low temperature
D	Kone	14	-	Low temperature
D	Fantale	120	-	Overlapped with national park

出典: 調査団

優先度-S: コミットされたプロジェクト

Tendaho-3 (Allalobeda)における 25 MW の開発、 Corbetti、 Aluto-1 (Aluto-Langano)、 Tendaho-1 (Dubti)における浅層貯留層 10 MW の開発、これら 4つのプロジェクトは、すでに様々なドナーによりコミットされて進行中であるため、他のサイトよりも優先し、運転開始スケジュール通りに開発されることが期待される。

優先度-A: 経済性の非常に高いプロジェクト

Tendaho-1 (Dubti)、 Aluto-2 (Finkilo)、 Aluto-3 (Bobesa)、 Tendaho-2 (Ayrobera)、 Tendaho-3 (Allalobeda)の Tendaho と Aluto 地区の 5つのサイトは高い貯留層温度 (240~290°C)が推定され、発電原価も 5~6 円/kWh と見積もられたので、最も高く優先順位付けする。Auto と Tendaho 地区の優先度-A のサイトは、最も経済的に見込みがあり、水力発電所のいくつかの候補プロジェクトより優先する。

Tendaho-1 (Dubti)と Tendaho-3 (Allalobeda)は上記の先行プロジェクトがあるため、拡張プロジェクトが計画され、それらの地域の残存している地熱資源の開発となることが想定される。さまざまなドナーが優先度-A のサイトにおいて、物理探査や削井調査を計画、または既に実施している。本調査においても、調査団により Tendaho-2 (Ayrobera)で MT 探査を実施しており、ほぼすべてのサイトで初期段階の調査が実施・計画されている。

優先度-B: 経済性の高いプロジェクト

貯留層温度が 210～260 °C と推定した Abaya、Boseti、Meteka の 3 サイトは、6～7 円/kWh の発電原価であり、優先度-B と評価した。Priority-B のサイトは優先度-A の地熱サイトと有力な水力発電には及ばないものの、他の再生可能エネルギーや火力発電より経済的で優位である。

なお、Abaya 地熱サイトは、既に RG により開発権が取得されているものの、実質的な調査は現在のところ実施されていない。また、Tendaho-2 (Ayrobera) に加え、調査団は、本調査において Boseti でも MT/TEM 探査を実施した。探査結果を次章で詳述する。Meteka では物理探査や試掘調査は現時点で実施されていない。

優先度-C: 経済性の低いプロジェクト

優先度-B の地熱サイトに続き、Teo、Tulu Moye、Nazareth、Damali、Boina、Dallol 等のサイトは発電原価が主に 9～10 円/kWh であり、優先度-C と評価する。Dofan は発電原価が 7.26 円/kWh であり、環境社会に深刻な悪影響はないものの、前述したように地域住民との紛争の可能性もあるため、優先度-C の下位に順位付けした。また Dallol における地熱流体は強い酸性であり、地熱発電所建設に当たっては、腐食に強い資材や管を適用しなければいけないため、経済性に劣る上、維持管理の面でも困難が生じると想定し、同様に優先度-C の下位に順位付けした。

優先度-D: 実現性の低いプロジェクト

Danab と Arabi はともに発電原価が 16 円/kWh 以上と高く推定され、優先度-D とした。地熱ポテンシャルも小さく、またサイトへのアクセスの悪いため、それらを反映して高い発電原価となっている。

Kone と Gedemsa は前述したように、貯留層温度が 100～170 °C と非常に低く、フラッシュ発電と比べ非常に高価なバイナリー発電しか採用できないため、優先度が劣る。

また Fantale は、Awash 国立公園に重複するため、本グループの最下位に位置する。

これらの優先度-D の地熱サイトは、実現性に乏しいと言わざるを得ない。もし社会・環境要因や技術的な課題が何らかの方法で将来改善されたならば、実現可能なプロジェクトになる。

5.3 実施計画

5.3.1 概略開発スケジュール

発電を開始するまでの地熱発電所の開発は、表 5.3.1 に示すように、予備調査、探査、試掘、F/S、環境影響評価、坑井およびプラント設計、削井、プラント建設、運転開始/試運転の 9 つの段階からなる。

本調査のような予備調査においては、初めに情報収集や地表踏査等を実施して、続いて探査地点を選定した上で、MT/TEM 探査や地化学分析を実施する。これら探査結果に基づき、試掘位

置および坑井試験を実施し、シミュレーション等により開発可能な地熱資源量の推定を行う。以上の調査によって、地熱資源量規模、地熱貯留層の賦存深度が把握され、フィージビリティスタディにより経済性等の観点からプロジェクトの建設規模やその実現性について議論がされる。また同時に環境影響評価が行われ、その承認後、生産井・還元井の掘削、発電所プラント施設等の建設が、詳細設計結果を基に行われる。送電線の建設は、原則として EEP の責任により実施される。

表 5.3.1 概略地熱開発スケジュール

Stage	Tasks	year					
		1	2	3	4	5	6
1	Preliminary Survey Data collection, Site reconnaissance, Inventory survey, Site selection	←→					
2	Exploration Geological/Geophysical/ Geochemical survey, Sounding (MT/TEM, Seismic), Pre-feasibility study	←→	←→				
3	Appraisal Drilling & Well Testing Slim hole, Appraisal well, Well testing, Stimulation, Reservoir simulation		←→	←→			
4	Feasibility Study Feasibility study			←→	←→		
5	EIA		←→	←→	←→		
6	Well/Power Plant Design Well design, Power plant design			←→	←→		
7	Well Drilling Production/Reinjection wells				←→	←→	←→
8	Power Station Construction Power plant, Steam gathering system					←→	←→
9	Start-up & Commissioning						★

出典: 調査団

本調査により全てのサイトで予備調査を実施し、Tendaho-2 (Ayrobera)と Boseti では MT 探査を実施した。また Aluto や Tendaho 地区には、MT/TEM 探査や調査井掘削が既に実施・計画されており、また Aluto-Lanagano では地熱発電所が操業を開始している。このように鉱区によっては予備調査や探査が省略可能なケースを考慮し、上記のモデルケースを基に最短時間の開発計画を下記のように検討した。

5.3.2 開発計画

表 5.3.2 に、前節で検討した最短時間による開発計画を考慮した地熱発電開発の全体計画を示す。短期期間においては、コミットされている合計 610 MW の地熱発電所の開発を推進する。中期期間においては、Priority-A および-B の地熱発電所の開発を目指す。5.2.1 節で述べたように、これらの地熱発電所は、経済的に風力発電、太陽光発電等より優れている。最小コスト発電の観点から、EEPCo マスタープランにおいて計画されていた合計 1,200 MW の風力・太陽光発電を遅らせ、代わりに地熱発電を推進する。そのため、中期期間における地熱発電所の累計設備容量は、中期期間の目標の 1,200 MW に風力・太陽光発電分を加え、合計 2,375 MW となる。長期期間においては、残りの全ての地熱有望地の開発を目指す。

表 5.3.2 地熱開発全体スケジュール

Ranking Order	Prospect	Installed Capacity (MW)	Cost of Generation (US\$/kWh)	COD	Year of 20**																																				
					Short-term					Medium-term										Long-term																					
					14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37													
S	Tendaho-3	25	-	2017																																					
S	Corbetti	500	-	2018																																					
S	Aluto-1	75	-	2018																																					
S	Tendaho-1	10	-	2018																																					
-	Sub-total	610	-	-					25	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	610	
1	Tendaho-1	280	0.0538	2020																																					
2	Aluto-2	110	0.0549	2020																																					
3	Aluto-3	50	0.0556	2021																																					
4	Tendaho-2	100	0.0570	2021																																					
5	Tendaho-3	95	0.0584	2021																																					
-	Corbetti	500	0.0589	2022																																					
6	Abaya	790	0.0663	2024																																					
7	Boseti	320	0.0665	2024																																					
8	Meteka	130	0.0674	2024																																					
-	Sub-total	2375	-	-						390	635	1135	1135	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	2375	
9	Teo	9	0.0971	2027																																					
10	Tulumoya	390	0.0974	2027																																					
11	Nazareth	33	0.1017	2029																																					
12	Damsali	230	0.1017	2029																																					
13	Boina	100	0.1047	2029																																					
14	Dofan	86	0.0726	2030																																					
15	Dallol	44	0.1019	2030																																					
16	Danab	11	0.1643	2036																																					
17	Arabi	7	0.1907	2036																																					
-	Gedemsa	37	-	2036																																					
-	Kone	14	-	2036																																					
-	Fantale	120	-	2036																																					
-	Sub-total	1081	-	-																																					
total		4066	-	-					25	610	610	1000	1245	1745	1745	2985	2985	2985	3384	3384	3747	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	3877	

◎: Commencement of Operation; Meteka-Amoissa, Meteka-Ayelu and Butajira are not included in the total 4,066 MW.

出典: 調査団

(1) 短期計画期間 (2014 – 2018 年)

各ドナーが開発計画を表明している Aluto-1 や Tendaho-1、Tendaho-3、開発権が取得されている Corbetti は、各ドナーの公表されている開発計画を取りまとめると表 5.3.3 に示すように、2015 年から 2018 年の本マスタープランの短期期間中に合計 610 MW の発電所の運転が開始される。これらのコミットされている地熱開発プロジェクトは、EEPCo マスタープランに反映されていないため、これらを考慮し、短期および中期の計画を見直す必要がある。地熱発電および Grand Renaissance Dam をはじめとする大規模水力発電により、電力需要をはるかに超える発電容量が短期計画期間中に得られるため、EEPCo マスタープランで計画している他の電源の開発を遅らせることが可能であると考え。但し、試掘調査の遅れ等から全体的な工程が遅れている地熱開発プロジェクトもあるため、調査進捗等をモニタリングし、スケジュールに沿った計画を推進する必要がある。

表 5.3.3 短期開発計画

Rank	Site	Installed Capacity (MW)	COD	2014	2015	2016	2017	2018
S	Tendaho-3 (Allalobeda)	25	2017	ICEAE/NFD/WB			Start-up & Commissioning	
S	Corbetti	500	2018	RG		Start-up & Commissioning		
S	Aluto-1 (Langano)	75	2018	WB/GoJ			Start-up & Commissioning	
S	Tendaho-1 (Dubti)	10	2018	AFD			Start-up & Commissioning	
Total		610		Development by Donors				

出典: 調査団

(2) 中期計画 (2019 – 2025 年)

Priority-A および B サイトは、経済性分析の結果、風力や太陽光などの他の発電方式より経済的であるため、最小コストによる発電計画では、これらより先行して開発をすることが望ましい。EEPCo マスタープランでは、短期計画期間の 2018 年までに、1,200 MW のまだ特定されていない風力および太陽光発電所に建設を見込んでいるが、これを遅らせ、代わりにマスタープランでは長期計画期間に開発が集中していた地熱発電所の開発を推進することを優先する計画とする。

表 5.3.4 に、中期計画期間における地熱発電計画を示す。Priority-A の地熱サイトは、2021 年および 2021 年までの開発を目指す。Priority-A のサイトでは、Tendaho や Aluto サイトにおいて、短期計画期間において先行した探査・調査井の掘削を含む開発が実施され、かつ AFD による Tendaho-1 (Dubti)での坑井掘削や WB や ICEIDA などの Aluto-2 (Finkilo)と Aluto-3 (Bobesa)や Tendaho-3 (Allalobeda)における MT 探査等、各ドナーによる探査も計画されているため、こうした調査結果を最大限活用することで、工程を短縮し、最速で 2020~2021 年の運転開始が可能であると考えられる。Priority-B の Boseti および Meteka は、中期計画期間の最終年である 2025 年の運転開始を計画する。これらに関しては十分な準備期間があるため、GSE により詳細な探査を実施して、開発可能な資源量を評価し、試掘調査の計画を早期に立てることが望ましい。

表 5.3.4 中期開発計画

Rank	Site	Installed Capacity (MW)	COD	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025			
A	Tendaho-1 (Dubti)	280	2020	GSE (ELC) 2013	Preliminary Survey													
				AFD	Exploration (MT survey)													
				AFD	Appraisal drilling (Two Full size well)													
				Feasibility Study/EIA											Financial decision on the 100MW project at the beginning of 2016			
				Well/Power Plant Design														
				Well Drilling														
				Power Station Construction											Start-up & Commissioning			
A	Aluto-2 (Finkilo)	110	2020	JICA	Preliminary Survey													
				ICEADA/NDF	Exploration (MT Survey)													
				Appraisal Drilling & Well Testing														
				Feasibility Study/EIA														
				Well/Power Plant Design														
				Well Drilling														
A	Aluto-3 (Bobesa)	50	2021	JICA	Preliminary Survey													
				ICEADA/NDF	Exploration (MT Survey)													
				Appraisal Drilling & Well Testing														
				Feasibility Study/EIA														
				Well/Power Plant Design														
				Well Drilling														
A	Tendaho-2 (Ayrobera)	100	2021	JICA	Preliminary Survey													
				JICA	Exploration (MT Survey, etc.)													
				(JICA)	Appraisal Drilling & Well Testing (Slim hole/Full size well)													
				Feasibility Study/EIA														
				Well/Power Plant Design														
				Well Drilling														
A	Tendaho-3 (Allalobeda)	95	2021	ICEADA/NDF	Exploration (MT Survey, etc.)													
				ICEADA/NDF	Exploration (MT survey)													
				ICEAD/NDF/WB	Appraisal Drilling & Well Testing (25MW Development)													
				Feasibility Study/EIA														
				Well/Power Plant Design														
				Well Drilling														
A	Corbetti	500	2022	Development by RG														
				Power Station Construction											Start-up & Commissioning			
				Start-up & Commissioning														
				Start-up & Commissioning														
				Start-up & Commissioning														
				Start-up & Commissioning														
B	Abaya	790	2024	Development by RG														
				Power Station Construction											Start-up & Commissioning			
				Start-up & Commissioning														
				Start-up & Commissioning														
				Start-up & Commissioning														
				Start-up & Commissioning														
B	Boseti	320	2024	JICA	Preliminary Survey													
				JICA	Exploration (MT Survey, etc.)													
				Appraisal Drilling & Well Testing														
				Feasibility Study/EIA														
				Well/Power Plant Design														
				Well Drilling														
B	Meteka	130	2024	JICA	Preliminary Survey													
				Exploration														
				Appraisal Drilling & Well Testing														
				Feasibility Study/EIA														
				Well/Power Plant Design														
				Well Drilling														
Power Station Construction											Start-up & Commissioning							

出典: 調査団

(3) 長期計画 (2026 - 2037 年)

長期計画期間までには、ほとんどの水力発電ポテンシャルの開発が終了していることが予想され、また 2030 年代には電力需要が 20,000 MW を超えるため、より多くの地熱ポテンシャルの開発が期待される。本マスタープランでは、表 5.3.5 に示すように 2037 年までにすべての地熱ポテンシャルを開発する計画とした。

本調査では、概略の踏査および地化学分析、またアクセスや治安の問題により現地調査が不可能なサイトは既存資料の分析により、貯留層温度を推定したが、より詳細な調査により地熱貯留層温度や規模を評価し、開発実現性を検討する必要がある。

表 5.3.5 長期開発計画

Rank	Site	Installed Capacity (MW)	COD	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
C	Teo	9	2027												
C	Tulu Mbye	390	2027												
C	Nazareth	33	2029												
C	Damali	230	2029												
C	Boina	100	2029												
C	Dofan	86	2030												
C	Dalol	44	2030												
D	Danab	11	2036												
D	Arabi	7	2036												
D	Gedemsa	37	2036												
D	Kone	14	2036												
D	Fantale	120	2036												

出典: 調査団

5.4 地熱発電開発における財務的考察

本節では、様々な資金源を基に、財務的考察を実施した。エチオピア政府は、自己資金の不足により、地熱開発を外部資金に頼らざるを得ない。世界銀行の ODA ローン、日本政府の円借款、民間金融機関、債権の発行、以上の可能な 4 ケースの資金源を考慮し、それぞれのケースにおける地熱有望地の財務的発電原価を試算した。表 5.4.1 にそれぞれの資金調達条件(利率、返済期間)を示す。本試算では、投資額は利率と返済期間により年換算した。5.2 節の利率 10%、経済的耐用年数 30 年で計算した経済的発電原価と大きく異なっている。発電にかかる財務コストは（以下、生産原価）は、電気料金と比較し、どの資金源が実現可能かを判断した。なお、電気料金は送配電費用を含むものであるが、発電費用に対し小さく、簡素化のため、送配電費用を含まない生産原価を電気料金と比較する。

現在エチオピア国における有力な地熱発電所における発電原価は概ね 5~6 ¢/kWh と推計される。一方、エチオピア国では多額の補助金が投入されており、電気料金（消費者価格）は 1.5 ~ 4.0 ¢/kWh 、平均約 3 ¢/kWh となっている。また、ジブチ等周辺国への電力輸出は約 7 ¢/kWh で売電する PPA が締結されている。図 5.4.1 に条件ごとの本調査で試算された地熱発電単価と現行の平均電気料金（消費者価格）との比較図を示す。現在国内市場に投入されている補助金は維持されるものと仮定する。

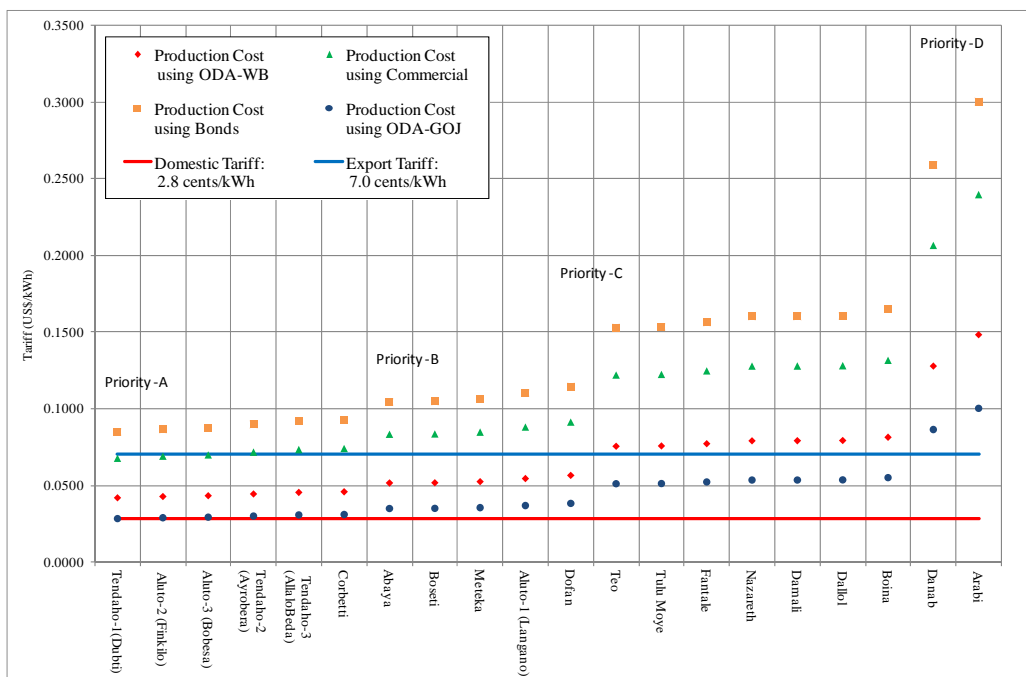
地熱発電においては、Priority-A のサイトであっても、日本政府による円借款で建設する場合の発電原価が平均約 2.83 ¢/kWh で最少となり、現行の電気料金とほぼ同等である。一方で電力輸出価格の 7.0 ¢/kWh に対しては、WB および日本政府の円借款による融資のケースは、Priority-A および Priority-B の発電所で発電原価が輸出価格を下回っている。民間金融機関からの融資が得られるケースでは全てのサイトで 7 ¢/kWh を超過する。さらに、社債で建設費を賄う場合は、

これをさらに上回る。これらのことから、地熱発電所の事業費は、WB や日本政府の円借款、あるいは同等程度の条件での資金調達を実施する必要があると結論できる。

表 5.4.1 資金調達条件

Item	Capital Cost of ODA-WB	Capital Cost of ODA-GOJ	Capital Cost of Commercial	Capital Cost of Bonds
Interest (%)	5.0	3.0	6.0	5.0
Repayment periods (year)	20	30	10	7

出典: IDA



出典: 調査団

図 5.4.1 電気料金と資金調達条件による発電原価

5.5 実施体制

5.5.1 地熱開発実施体制の検討

(1) 電気料金水準と地熱開発実施体制

第 5.4 節で述べたように、エチオピア国では国内電力市場に多額の補助金が投入されて、電気料金は平均約 2.8 ㄥ/kWh と設定されている。一方、ジプチ等周辺国への電力輸出は約 7 ㄥ/kWh で売電する PPA が締結されている。5.4 節ではこれと発電単価を比較するために、投入する資金源によって発電原価が異なることを図 5.4.1 に示し、これにより、エチオピア国で地熱発電開発を実施する場合は我が国円借款や世界銀行からの融資で資金調達をする必要があると結論した。以上の分析から、地熱発電開発事業はこれらの融資が受けられる機関、すなわち公的機関が担当する必要があると結論される。

同様の分析は IFC が行った分析結果からも導くことができる。IFC ではエチオピア国の地熱開発ビジネスモデルを検討し、4つの官民連携(PPP)モデルによる売電価格（発電事業者が EEP に販売する価格）が示している（図 5.5.1）。IFC の分析は完全公営モデルを除いて民間企業が蒸気生産事業と発電事業を一体となって行う事業形態が分析の前提となっている。

15 ¢/kWh 水準では完全民営化(予備調査を除く)が可能である(モデル A)。12-13 ¢/kWh レベルでは民間は試掘段階から（モデル B）、10 ¢/kWh レベルでは第 4 段階(F/S・事業計画)から（モデル C）の参画が可能である。5 ¢/kWh レベルでは民間はプラント建設と運営のみに参加が期待できる（モデル D）。表の最下段は完全公営モデルを示している。

前節で述べたように、現行電気料金水準は国内向けで平均約 2.8 ¢/kWh、輸出向けで 7 ¢/kWh である。したがって現在の料金水準では、国内向けの電力供給には完全公営モデル、Tendaho のように電力輸出が可能でサイトではモデル C または D が可能である。エチオピア国が、国内のベース電源は季節変動が少ない地熱発電で確保し、季節変動などがある水力発電からの余剰電力は輸出するという政策を選択すれば、現行の電力料金施策では完全公営モデルが選択肢となると判断される。

いずれにせよ、電力料金施策のもとでは、少なくとも試掘までの活動は公的資金によって実施しなければならないことになる。

	Preliminary Survey	Exploration	Test drilling	F/S & planning	Field development	Plant construction	Operation		Tariff (\$/kWh)	Remarks			
							Field	Plant					
A	Public	Private								0.15	Corebetti		
B	Public	Private								0.13			
C	Public			Private								0.10	
D	Public					Private				0.05	Tendaho		
Full Public	Public										0.03	Aluto Langano	

(Source: IFC 2014)

図 5.5.1 料金水準ごとの PPP(官民連携)モデル

(2) GSE、EEP の強み弱み分析(Pros/Cons 分析)と新組織の提案

現行料金水準のもとで地熱発電開発が可能となるビジネスモデルは、モデル C（試掘調査までを公的資金で実施するモデル）、モデル D（生産井整備までを公的資金で実施するモデル）及び完全公的資金モデルである。

これらのモデルでは、官側が試掘ないし生産井掘削までを行う必要がある。現在のエチオピア国でこれを担当する組織は GSE および EEP である。IFC はこれら既存の組織の Pros/Cons を作成している。Pros/Cons 分析には新組織も想定されている。その要約を下記に示す。

1) GSE と EEP の Pros/Cons 分析

地表調査および試掘調査における Pros/Cons 分析は以下の通りである。

- GSE (既存) は、地表調査および試掘調査を業務分掌に含んでおり、地熱開発部門が存在する。ただし、調査経験は限定され調査資源も不十分である。
- EEP (既存) は、現在アルトランガノの試掘調査を担当している。ただし、試掘調査は法的分掌には含まれない。また、EEP は採算ベースの事業体なので、高リスクの試掘調査を業務分掌に加えることは望ましくない。
- 新組織 (提案) : 地熱事業を推進するために GSE や EEP で不足している機能を付与することができる。地熱開発に焦点を定めた特別公社は、地熱開発を促進することに寄与することができる。ただし、設立に時間を要する。新規法制度を定める必要がある。

蒸気開発 (Field Development) にかかる Pros/Cons 分析は以下の通りである。

- GSE (既存) : 試掘調査の経験がある。ただし、人的財務的能力に限界がある。
- EEP (既存) : アルトランガノの生産井整備を実施する意欲がある。また、資金を集めやすい。ただし、人的資源および資材資源が不十分である。また、技術的な経験がない。
- 新組織 (提案) : 地熱事業を推進するために GSE や EEP で不足している機能を付与することができる。地熱開発に焦点を定めた特別公社は、地熱開発を促進することに寄与することができる。ただし、設立に時間を要する。新規法制度を定める必要がある。

2) 既存組織の制約条件と新組織の提案

図 5.5.2 に、GSE、EEP ないしは新組織と民間企業が官民連携 PPP として事業を実施する場合のオプションを示した。IFC では蒸気生産販売事業体と発電事業体を分離することを想定していないが、ケニア国の GDC モデルなど分離している例が他国に多く見られることから、本マスタープランでは蒸気生産と発電を分離する事業形態も分析の対象とする。ただし、現在 Corbetti で実施されているような民間企業がライセンスを取得して地表調査の段階から地熱開発を行うケースは全体的な事業構想が不明のために図 5.5.2 には含めていない。

以下に、図 5.5.2 に沿ってそれぞれのオプションの分析を示す。

- GSE は地球科学調査をその分掌とする機関である。従い、現在の分掌の枠内では生産井整備以降の事業参加はできない。このため、図 5.5.2 のオプション D1 とオプション FPc-1 の事業形態は法制度の改正が必要となる。同様に、EEP は発送電を分掌とする機関なので地球科学的な探査段階は分掌できない。このため、オプション D3 およびオプション FPc-3 の事業形態も法制度の改正が必要である。しかし、法制度を改正して、いずれかが初期調

査から生産井掘削ないし蒸気生産までを一貫して分掌に加えたとしても、下記の様な課題が残る。

- **EEP** は、**Aluto-1 (Aluto-Langano)**サイトにおいて現在フィージビリティ調査のための試掘調査を実施している。この形態は図 5.5.2 のオプション **FPC-2** あるいはオプション **D2** に相当する。しかし **EEP** では試掘調査の事業管理は行っているが、地熱開発の経験は少なく、試掘自体は **GSE** が担当しているのが実態である。このオプションを円滑に進めるためには、**EEP** の地熱担当部署の能力強化が必要である。しかし、現在地熱研究開発部門を有する **GSE** には地熱技術者が在籍しているため、これとは別に **EEP** の地熱開発部門を強化することは **GSE** の分掌と競合ないし重複することになる。このため、**EEP** と **GSE** が個別に地熱開発を進めるのではなく連携が必要である。ただし、**EEP** は水資源・エネルギー省に属し、また **GSE** は鉱山省に属しているため、これを統合する必要がある。
- 統合する場合は、地熱開発の主目的が電力開発なので、水資源・エネルギー省傘下の組織とすることが望ましい。統合の方法は、以下の 2 ケースが考えられる。一つは、**GSE** の地熱部門を **EEP** に統合して、**EEP** の内部に地熱開発担当部門を立ち上げるという案である。ただし、現在 **EEP** は大規模水力発電所の建設に注力しており、組織内の地熱発電開発の優先順位は実質的に低くならざるを得ないものと考えられる。さらに、電力の安定供給を本来業務とする **EEP** の分掌に資源開発リスクを内在する業種を分掌に加えることは、**EEP** の運営形態を複雑にし、結果的に地熱開発推進を遅延させる一因になる可能性がある。
- 従い、地熱電力開発を促進するためには、現在の地熱関連の機能を統合した「新組織」の設立が必要である。

Development Stage	Early				Middle	Late		Off-taker	Notes
	Preliminary Survey	Exploration	Test Drilling	F/S, Planning	Field Development	Power Plant Construction	Operation	EEP	
Business Model-C	C1	GSE (or New Enterprise)		Private		Power Plant: Private Steam: Private		EEP	-
	C2	GSE (or New Enterprise)		Private		Power Plant: EEP Steam: Private		EEP	-
Business Model-D	D1	GSE		GSE(*)		Power Plant: Private Steam: GSE(*)		EEP	(*)GSE is not in charge of Field development and/or Steam sales
	D2	GSE		EEP		Power Plant: Private Steam: EEP		EEP	-
	D3	EEP(*)		EEP		Power Plant: Private Steam: EEP		EEP	(*) EEP is not in charge of exploration
	D4	New Enterprise				Power Plant: Private Steam: New E.		EEP	-
Fully Public Model	FPc-1	GSE		GSE(*)		Power Plant: EEP Steam: GSE(*)		EEP	(*)GSE is not in charge of Field development and/or Steam sales
	FPc-2	GSE		EEP		Power Plant: EEP Steam: EEP		EEP	Present Aluto Langano Project
	FPc-3	EEP(*)		EEP		Power Plant: EEP Steam: EEP		EEP	(*) EEP is not in charge of exploration.
	FPc-4	New Enterprise				Power Plant: EEP Steam: New E.		EEP	-
	FPc-5	New Enterprise				Power Plant: New Steam: New E.		EEP	-

[D1, D3, FPc1, FRc] Amendment of regulations for GSE and EEP is required (D1, D3, FPc-1, FPc-3)

[D2, FPc3] EEP Capacity for geothermal development shall be enhanced, GSE and EEP shall be well coordinated (D2, FPc-2)

[D4, FPc-4, FPc-5] In Model-D, FPc-4 and FPc-5, the New Enterprise will undertake steam production and sales.

[C1, C2] In Model C1 and C2, the New Enterprise may handle the work upto Test Drilling

出典：調査団

図 5.5.2 地熱電力開発バリューチェーンの官民連携モデル

5.5.2 特別目的公社の提案

(1) 特別目的公社の設立－A Special Purpose Public Entity (Enterprise)

提案した新組織は、Ethiopian Enterprise for Geothermal Energy Development (EEGeD)と仮称する。EEGeD のビジネスモデルは、D-4、FPc-4 ないし FPc-5 である。同時に EEGeD は、民間企業が蒸気生産から参入する場合のビジネスモデル C-1 や C-2 も対応することができる。EEGeD の分掌業務は次の通りである。

- 地熱開発地表調査ならびに試掘調査
- EEGeD が将来蒸気販売をする場合には事業化調査
- 必要であれば蒸気開発
- 必要であれば蒸気生産販売

しかしながら、現在世界的に進行している民営化の流れを考慮すると、近い将来に民営化を促す様な種々の施策が施行される可能性があるため、EEGeD は地熱開発の各段階において民間企業の参入を妨げるものではない。

ところで、EEGeD が発電事業まで一貫して実施するという選択肢も考えられる。しかし、エチオピア国の地熱資源開発を促進するためには、まずは地熱開発に特有な課題に特化して取り組む組織が必要であると考え。従い、この段階では EEGeD は蒸気販売までを当面のターゲットとすることを提案する。

EEGeD 設立の主な利点は下記の通りである。

- 電源開発を目的とした地熱開発を、集中的にかつ一貫して実施できる。
- 初期調査から蒸気生産までの一貫した地熱開発技術を組織内に保有かつ蓄積することができる。
- ドナーのフォーカルポイントが明確となる。すなわち、資金調達が容易になる

(2) 地熱開発特別公社設立の提案

地熱開発特別公社を持続可能なものとするためエチオピア国の新たな財政的負担となつてはならない。従い、恒常的な事業収入を想定する必要がある。この恒常的な事業収入は蒸気の生産販売で賄うことが可能になると想定される。エチオピア国で公社 (Enterprise) と呼ばれる独立採算の新組織とする。

5.6 地熱の直接利用について

5.6.1 地熱の直接利用の現況

(1) 世界および日本における地熱直接利用の現況

表 5.6.1 に世界および日本における地熱直接利用の現況を示した。これによれば、世界的には浴用・プールや屋内暖房および温室が多く約 90%を占めている。次いで、養殖漁業や工業利用、冷房・融雪などに利用されている。一方、日本では浴用・プールが圧倒的に多く 87%を占めており、ついで屋内暖房や温室、冷房・融雪の順になっている。

表 5.6.1 世界及び日本における地熱直接利用の現況

地熱直接利用	世界(15,346MW)	日本(2,100MW)
浴用・プール	44%	87%
暖房	35%	4%
温室	10%	2%
養殖漁業	4%	0%
工業利用	4%	0%
冷房・融雪	2%	7%
農業乾燥	1%	0%

出典：Lund et al. (2010)

(2) エチオピアの地熱直接利用の現況

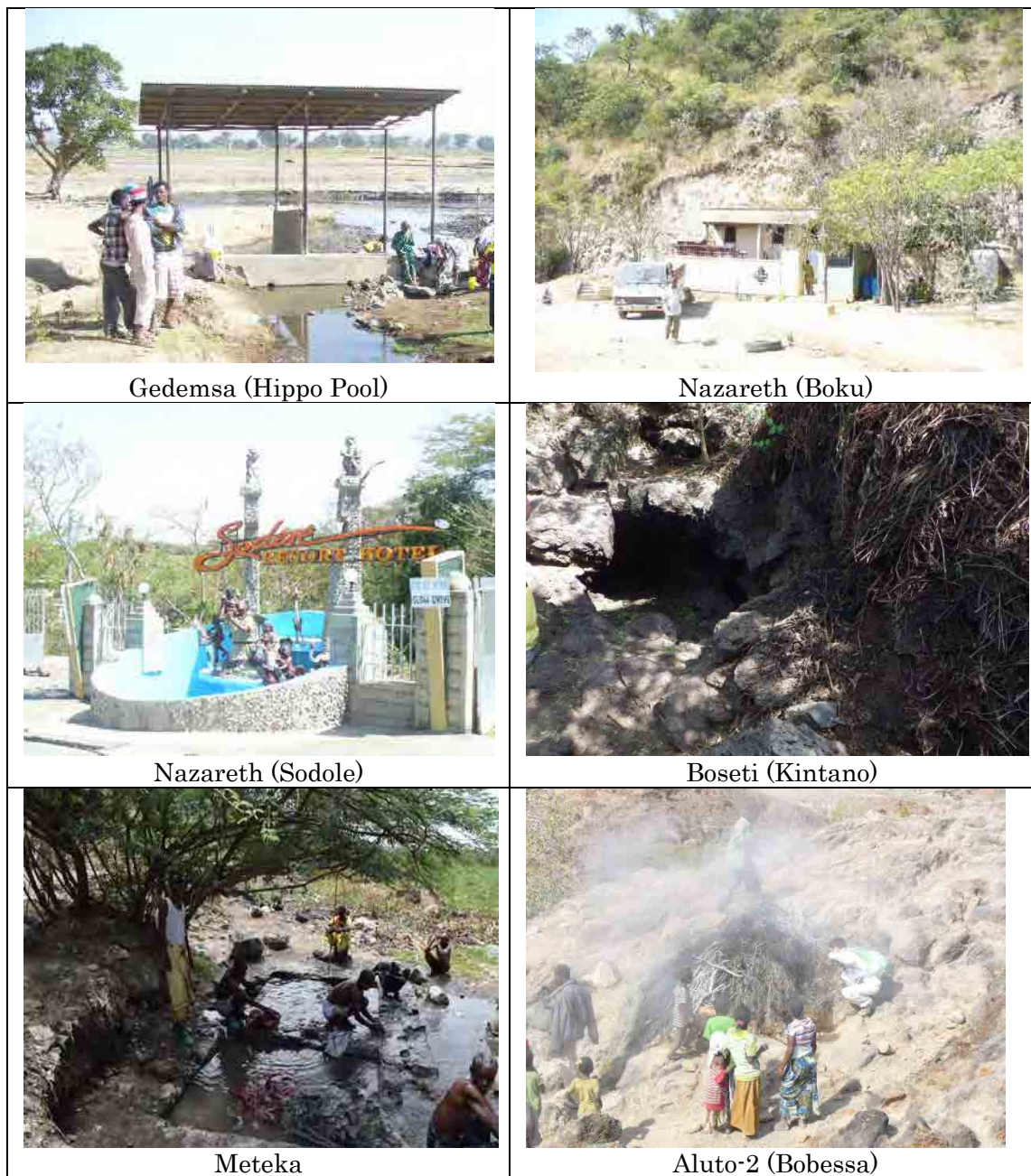
エチオピア国では、温泉や蒸気を利用した宿泊施設、温浴施設が運営されている。調査対象地域内の Nazareth (Sodole)では国営の大規模なレジャー施設が運営されている。また、調査対象地域以外の首都アジスアベバやエチオピア地溝帯中部～南部にかけても入浴施設が運営されている。さらに、Nazareth (Boku)では湯治施設（サナトリウム）が運営されているほか、調査対象地域の地方部では、地元住民に利用されている温浴施設等散見される。

乾燥地帯に位置する蒸気が豊富な地点（Aluto-2:Bobessa –Gebiba）では、噴気孔に枯木・枯草等をかぶせ、水蒸気を冷却し水を採取している。また、Ziway 地方では小規模であるが温室栽培にも利用されている。以下に各調査地点の特徴を記述する（表 5.6.2、図 5.6.1）。

表 5.6.2 エチオピア国 地熱直接利用

	サイト名	直接利用
1	Gedemsa (Hippo Pool)	湧出温泉を引き込んだ温浴施設が設置され、地域住民が湯治に使用している。
2	Nazareth (Boku)	蒸気の噴出口に蒸気浴用の小部屋が建設されている。近傍には宿泊施設が建設・運営されておりエリア全体が湯治施設（サトリウム）として整備されている。
3	Nazareth (Sodole)	温泉湧出地を含む地域全体が観光施設となっており、プール、温浴施設が設置され、レストラン、宿泊施設が整備されている。
4	Boseti (Kintano)	蒸気の噴出口が石垣で囲われ、蒸気浴のための施設となっている
5	Meteka	湧出温泉を引き込んだ温浴施設が設置され、地域住民が湯治に使用している。
6	Aluto-2 Bobessa, Gebiba	噴気孔に枯木を置いて水蒸気を冷やし、水を採取している。

出典：調査団



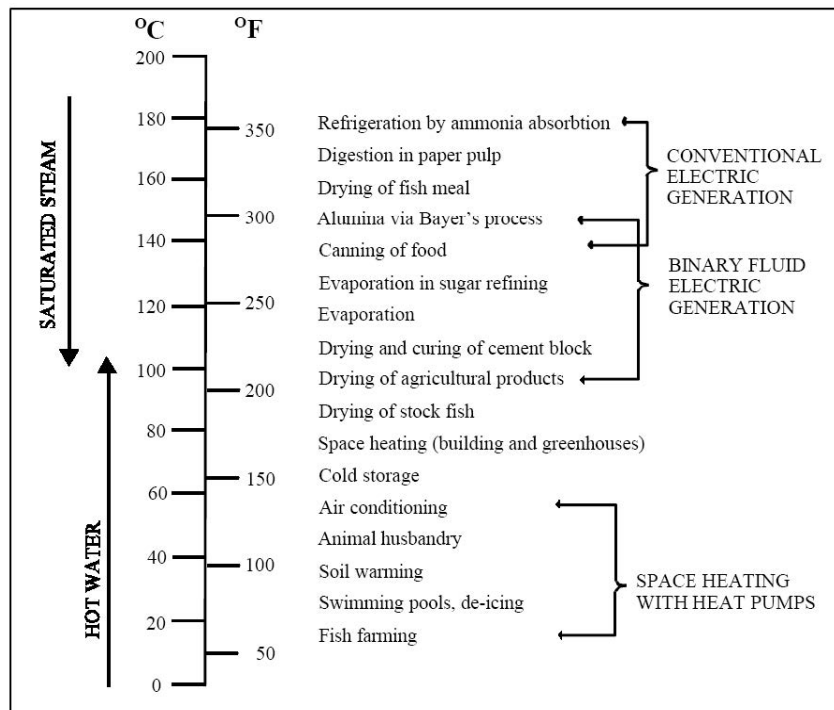
出典：調査団撮影

図 5.6.1 エチオピア国地熱直接利用状況写真

5.6.2 エチオピアにおける地熱の直接利用の提案

(1) Lindal Diagram

地熱の直接利用の一般的な活用指針については、Lindal Diagram (Jon S. Gudmundsson 他 1985)に体系化されている(図 5.6.2)。体温～体温以下の低温領域では養魚用～温浴用に利用可能である。体温以上から 100℃程度では、温室を含む屋内暖房や農産物水産物の乾燥、100℃を超える蒸気では、セメントブロックなどの工業製品や、サトウキビなどの農業製品の乾燥など、多彩な活用が可能である。



出典：Jon S. Gudmundsson 他 (1985)

図 5.6.2 地熱直接利用の活用指針

(2) 地熱直接利用の提案

本調査で観察した地熱サイト周辺の状況、および同国における地熱利用の状況から、地熱の直接利用を表 5.6.3 の通り提案する。

表 5.6.3 エチオピア国における地熱直接利用の提案

直接利用の項目	内容	適用条件	対象地域
施設・園芸	・切花の栽培 (温室栽培：輸出用)	・適切な栽培水の採取・使用が容易な地域 (効果：恒温保持、栽培水滅菌、CO ₂ による光合成促進)	・Ziway 湖周辺 (Aluto-Langano, Tulu Moye)
養殖・漁業	・エビ・淡水魚の養殖 (輸出用)	・適切な養殖水の採取・使用が容易な地域	・Ziway 湖周辺 (Aluto-Langano, Tulu Moye)
農業	・温室でのフルーツ栽培 (輸出用) ・野菜栽培 (国内消費)	・適切な栽培水の採取 ・使用が容易な地域 ・首都圏や消費地に近い地域	・Ziway 湖周辺 (Aluto-Langano, Tulu Moye) ・Nazreth 周辺
観光施設・福利厚生	・温泉・プール・スチームバス	・地域住民の居住地に近接している地域	・各地熱サイト
食品加工	・ドライフルーツ	・フルーツの生産地に近い地域	・オロミア州・南部州の地熱サイト
	・ヨーグルト	・牛乳の生産地に近い地域 ・首都圏や消費地に近い地域	・Nazreth 周辺 ・Boseti 周辺
	・コーヒー乾燥	・コーヒーの生産地に近い地域	・各地熱地域
	・砂糖の乾燥	・砂糖のプランテーション地域に近い地域	・Gedemsa 周辺 ・Tendaho 周辺

出典：調査団

なお、高温状態から低温状態に変化する過程で、多目的に利用すること（カスケード利用）も可能である。

5.7 【参考】地熱発電開発における実施形態の各国の例

5.7.1 公的機関と民間事業者の参入タイミングの例

図 5.7.1 (R.1) に地熱発電開発における実施形態の各国の例を示した。多くの国々で生産井建設の段階まで公的資金を投入している。地熱資源の確認後には、民間企業が参入している例も多い。ただし、民間が参入している国の特徴は次のように解釈されている（ESMAP, 2012）。

- 地熱発電以外の発電事業で既に市場改革が進み、部分的に民営化が進んでいる。
- カントリーリスクが比較的 low、十分な利潤が確保できる。
- 中央政府ないし地方政府の政策が民間投資導入を促進している。

また、総じて民間企業が地熱発電に参入している諸国は、中～高収益国かあるいは国内の地熱資源がよく理解されており開発経緯がよく記録されている諸国であるとも報告されている。

	1	2	3	4	5	6	Note
	Preliminary Survey	Surface Exploration	Test Drilling, F/S	Field Development	Power Plant Construction	O&M	
	Early Stage			Middle Stage	Late Stage		
1	A Fully integrated single national public entity						Kenya(KenGen at Olkaria), Costa Rica (ICE), etc
2	Multi national public entities (Early stage by one entity and subsequent stage by other/s for an example)						Indonesia (before), New Zealand, Ethiopia (Aulto Langano) etc
2'	Public entity (CFE)				Private Contractor	CFE	Mexico (OPF model)
3	National and municipal public entities						Iceland (before the crisis)
4	Fully integrated JV partially owned by the government						El Salvador (LaGeo + Enel Green Power), Japan(recent)
5	Public entities			Private Developers			Japan (before)
5'	Public entity (PNOC EDC)				Private Developer	NPC	Philippines BOT model;
5"	Public entities (GDC in Kenya, Purutamina in Indonesia)				Public entities (Steam production) Private Developers (power generation)		Kenya (KenGen+GDC), Indonesia (before), Philippines (before)
6	Public entities			Private Developers			US; new IPP Project in Turkey, New Zealand, Guatemala and others
7	Public entities		Private Developers				US, Nicaragua and recently Chile; Public entities perform limited exploration. IPPs share the risks of further exploration and construction
8	Private Developers						New Philippines (Chevron project), Australia and Italy (Enel Green Power), New Indonesia with Geothermal Fund Facility, Ethiopia (Corbetti), Japan (recent)

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad, Costa Rica; CFE: Federal Commission for Energy, Mexico; PNOC EDC: Philippines National Oil Co.,-Energy Development Corporation, Philippines; NPC: National Power Corporation, Philippines; GDC: Geothermal Development Company, Kenya;

(Original Source: ESMAP 2012, modified by JICA Team)

図 5.7.1 (R.1) 地熱発電開発における実施形態の各国の例

5.7.2 他国の例 – ケニア国

同様な開発モデルは隣国ケニア国にみられる。

ケニア国では、電力セクターの効率化を図るため 2006 年以来各種機能の専門組織への分離化が進められている。発電は全設備容量の 72%（2012 年現在）をもつ KenGen（Kenya Electricity

Generating Company) のほか複数の IPP 企業が担い、オフテーカーは KPLC(Kenya Power and Lighting Company) である。地熱開発の分野では、探査と蒸気開発を担う地熱開発会社(GDC: Geothermal Development Company)が特別目的公社 (Governmental Special Purpose Vehicle) として 2008 年に設立されている。GDC 設立の狙いは地熱開発の専門組織を立ち上げ、その開発を促進させることにある。GDC を KenGen から分離して地熱開発というリスクの高い専門分野を任せることにより、KenGen を発電事業に専念させ、もってセクター全体の効率かつ効果的な運営を進めようとしている。

GDC は蒸気販売によって収入を得る公営企業として設計されている。図 5.7.2 (R.2)に GDC の業務オプションを示す。GDC モデルの K-1 が、先の図 5.5.2 のオプション D4 およびオプション FPc-4 に相当している。また、GDC モデルの K3 がオプション C1 やオプション C2 である。現在ケニア国メネンガイの地熱開発で、K1 ないし K2 のオプションで蒸気開発が行われている。GDC では既に 3 社の IPP 発電会社(Quantum Power East Africa, Orpower Twenty Two, Socian Energy) と蒸気供給の基本合意を締結しており、2015 年末までに蒸気を供給して操業を開始する計画となっている。

GDC PUBLIC PRIVATE PARTNERSHIP - OPTIONS

IPP INPUT		K-1	K-2	K-3	K-4	K-5
		<i>In operation at Menengai</i>		<i>Optional</i>		
DEVELOPMENT STAGE		POWER GENERATION	JOINT STEAM DEVELOPMENT	PRODUCTION DRILLING AND POWER	STEAM DEVELOPMENT AND	FULL CONCESSION
VIABILITY ANALYSIS	DETAILED SURFACE STUDIES	GDC	GDC		GDC	IPP
	INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT					
	EXPLORATION DRILLING		GDC	IPP		
	APPRAISAL DRILLING					
	FEASIBILITY STUDY					
IMPLEMENTATION	PRODUCTION DRILLING	IPP	IPP	IPP		
	STEAM GATHERING					
	POWER PLANT CONSTRUCTION					
INCOME	OPERATION AND MAINTENANCE	IPP	IPP	GDC	GDC	
	STEAM FIELD MANAGEMENT					

GDC: Geothermal Development Company; IPP: Independent Power Provider (Source: GDC 2014, slightly modified by the JICA Team)

図 5.7.2 (R.2) ケニア国の GDC の事業内容

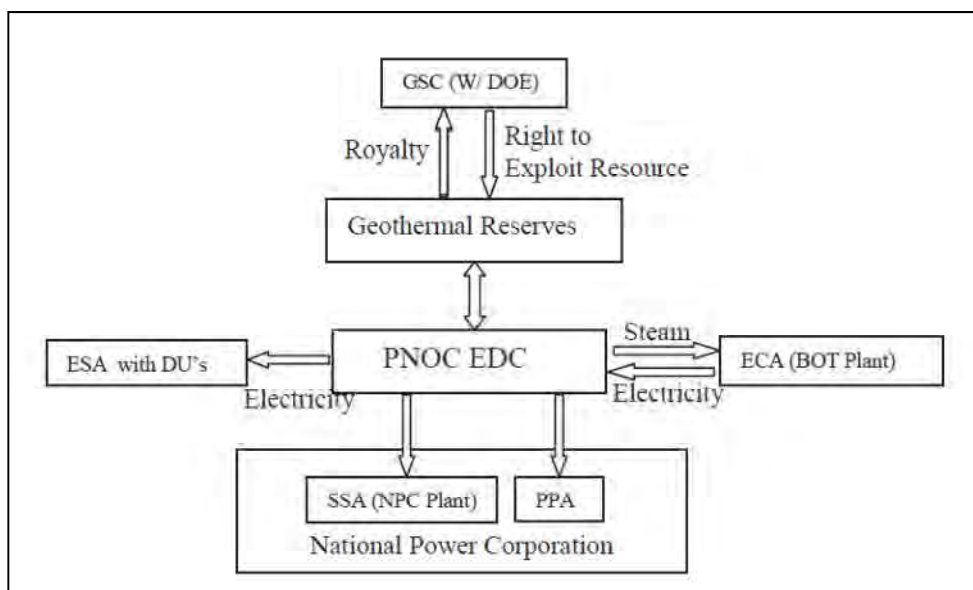
5.7.3 他国の例 - フィリピン国

フィリピンでの地熱開発は 1967 年の Barrio Cale、Tiwi、Albay での小規模発電に遡るといわれる。本格的な開発は国営電力会社 (NPC: National Power Corporation) が Philippine Geothermal Incorporate (当時) を通してルソン島に建設した Tiwi と Makban (660MW、1979-1984)である。

フィリピン国の地熱開発は、1976 年に国有のフィリピン国石油会社が設立したエネルギー開発

会社（PNOC EDC: Philippine National Oil Company – Energy Development Corporation）を中心に進められてきており、Palinpinon-I (112.5 MW, 1983)、Tongonan (112.5 MW, 1983)、Bacon-Manito (150 MW, 1994)、Palinpinon II (80MW, 1992) が相次いで建設された。基本的に PNOC-EDC は初期調査から蒸気生産販売までを業務とし、発電は NPC が行っている。ただし、PNOC-EDC が発電を行っていた例もある。フィリピン国では 2001 年に電気事業改革法が施行されて NPC がまず民営化され、続いて PNDC-EDC も 2006 年から段階的に民営化された。その結果、Tiwi-Makban 地熱発電所を含む全ての地熱発電所は民間に売却されている。ただし、多くの地熱発電所では、蒸気生産事業者と発電事業者は個別の事業体として事業が運営されている。

以下では、エチオピア国の現況と類似していると考えられる PNOC-EDC と NPC が民営化される以前の事業形態について紹介する²。



出典：Danilo C. Catigtig 2008

図 5.7.3 (R.3) フィリピン国 PNOC EDC の例

Danilo C. Catigtig (2008)では、次の様に説明されている。

PNOC-EDC の蒸気生産と発電事業は、その実施的に財務状態の条件となっている 4 種類の契約に基づいて運営されている。

- Department of Energy (DOE) との間で締結される Geothermal Service Contract (GSC) は、EDC にある特定のフィールドでの地熱資源の探査、開発及び利用権をあたえる一方、政府にたいして租税と権利仕様用の支払いを規定する。
- NPC と EDC との Steam Sales Agreements (SSA)は、発電のために NPC の施設へ蒸気を最少コストで提供販売することを規定する。
- NPC と EDC との Power Purchase Agreement (PPA)は、EDC が起電した電力を NPC で

² Danilo C. Catigtig (2008) Geothermal Energy Development in the Philippines with the energy development corporation embarking into power generation, UNU-GTP 30th Anniversary Workshop

最少引きとり価格レベルで販売することを規定する。

- BOT 業者と EDC との Energy Conversion Agreement (ECA)は、EDC が BOT 業者に蒸気を提供して、BOT 業者が起電した電力に対して、規定の支払いを行うことを規定する。
- Distribution Utilities (DU:配電業者)と EDC との Energy Sales Agreement (ESA)は、EDC が保有する商用施設から UD に電力を販売することを規定する。

この様な実施体制で最後に建設された地熱発電所は Mindanao II(54MW, 1999)および Northern Negros (49.4MW, 2007)である。前者は EDC が蒸気生産を行い、BOT 事業者が発電を行っている。後者は蒸気生産、発電とも EDC が行う計画であったが、地熱資源量が不足したため閉鎖されている。

PNOC-EDC の民営化後は、地熱発電所建設が滞ったといわれている。しかし近年、2014 年にルソン島の Maibarara 地熱発電所(20MW)が操業、またミンドロ島地熱発電所 (40MW) が 2015 年に 20MW、2016 年までに追加 20MW の操業をするとされている³。

民営化前の PNOC-EDC は、フィリピンの地熱開発事業に大きく貢献したといえることができる。

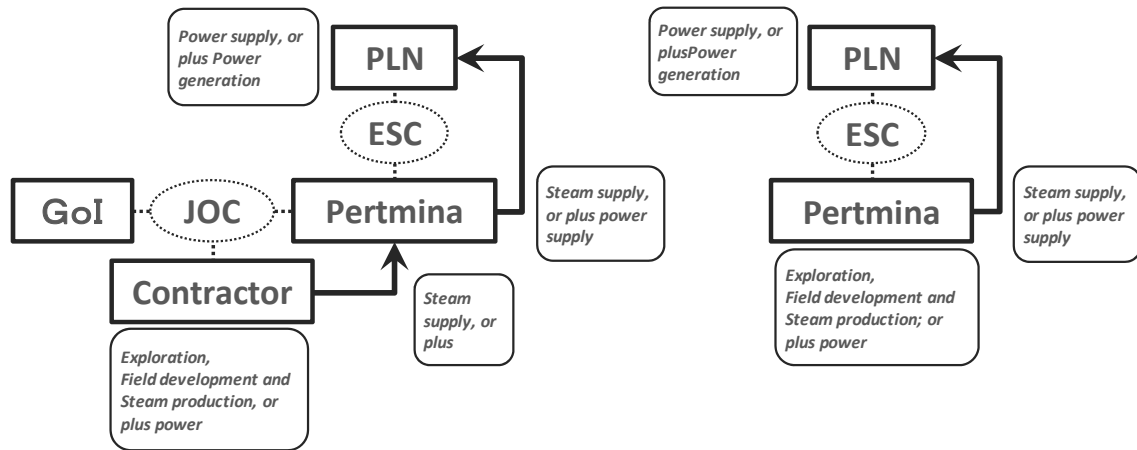
5.7.4 他国の例 – インドネシア国

インドネシア国の地熱開発は、基本的に大統領令 PD-45(1991)に定められた事業形態で進められてきている。その後種々の制度改定が行われてきているが、エネルギー鉱山省が地熱鉱区と定めている 58 の地区のうち、2014 年時点で稼働している 10 か所地熱発電所は全て当時の枠組に沿った流れから実現しているものである⁴。大統領令 PD-45(1991)では次に 2 つの事業形態が定められている (図 5.7.4 (R.4))。

1. 国営石油開発会社 Pertamina あるいは Pertamina と Joint Operation Contract (JOC) を締結した民間事業者が蒸気開発を行い、蒸気を国有電力会社 PLN に供給する。
2. Pertamina あるいは Pertamina と Joint Operation Contract (JOC)を締結した民間事業者が蒸気開発と発電を行い、Energy Sales Contract (ESC)に基づいて国ある電力会社 PLN に電力を販売する。

³ Newspaper of IEE JAPAN, 5th December, 2014

⁴ Asnawir Nasution, Endro Supriyanto (2011) Current status and new geothermal development areas in Indonesia, Proceeding of 9th Asian Geothermal symposium; Indonesia's Geothermal Development
(<https://cdm.unfccc.int/filestorage/Z/P/1/ZP1SYO0E8W64BH53JR2ITVCM9LQAND/Enclosure%204.pdf?t=TkR8bml0cWF0fDAGVFsNfUufjbrBydRA8ZJ2>)



出典：調査団作成

図 5.7.4 (R.4) インドネシア国 民営化前の地熱開発実施体制

この事業形態の特徴は、蒸気開発は Pertamina か、Pertamina と JOC を締結した事業者が行うという点である。すなわち、Pertamina は民間事業者から供給された蒸気を PLN に提供するか、あるいは独自に発電を行って電力を PLN に販売する機能を有している。Pertamina は 2003 年に民営化され地熱部門は 2006 年に Pertamina Geothermal として分離されたが、現在稼働している地熱発電所の全ては、上記の構図のもとで蒸気確認が進んだものである。表 5.7.1 (R.1) に示した現在稼働中ないしは建設中の地熱発電所の表からも明らかである。換言すれば、Pertamina あるいは JOC を締結した民間事業者以外の事業者は蒸気開発に参入していないことを示す。2011 年にインドネシア国は試掘調査に民間投資を呼び込む目的で地熱ファンド (Geothermal Fund Facility) を設立した。エネルギー鉱山省が定める 58 の地熱鉱区のうち少なくとも 32 鉱区 (2013 年時点) で事業者に探査権が付与されているが、地熱ファンドを活用した調査が実施されたという情報は得ていない。なお、PLN は離島の小規模地熱発電を独自に行っている。

表 5.7.1 (R.1) インドネシア国の稼働中地熱発電所 (2015 年現在)

No.	Name	Province	Capacity (MW)	DOC	Steam Production	Power Generation	JOC/ESC
1	Kw. Kamojang,	West Java	30	1983	PT. PGE	PLN	JOC, ESC
			55x2	1988			
			60	2008	PT. PGE		(PPA)
2	Kw. Darajat	West Java	55	1994	PT. Chevron	PLN	JOC, ESC
			90	2000	PT. Chevron		JOC, ESC
			110	2007	PT. Chevron		(PPA)
3	G. Wayang Windu	West Java	110	2000	PT. Star Energy		JOC, ESC
			117	2009	PT. Star Energy		(PPA)
4	G. Salak	West Java	60x3	1994	PT. Chevron		JOC, ESC
			65	1997			
5	G. Dieng	Central Java	60	1999	PT. Geodipa		JOC, ESC
6	G. Sibayak	North Sumatra	2	1996	PT. PGE		ESC
			5	2007	PT. PGE		(PPA)
			6	2007			
7	Sarulla	North Sumatra	(330MW)	(2016)	Consortium		JOC, ESC
8	Kw. Ulubelu	Lampung	55x2	2012	PT.PGE	PLN	ESC
			55	(2016)	PT.PGE		(PPA)
			55	(2017)			
9	Kw. Lahendon	North Sulawesi	20	2001	PT. PGE	PLN	ESC
			20	2007	PT. PGE		(PPA)
			20	2009			
10	Kw. Ulumbu	West Flores	5	2014	PT. PLN		-
11	Kw. Mataloko	Central Flores	1.8	2011	PT. PLN		-

Source: Based on Asnawir Nasution and Endro Supriyanto (2011), edited by JICA Team with information of “Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report” (Ruggero Bertani 2015) and others. Shaded: after privatization of PERTAMINA; DOC: Date of Commencement