

第3章 地熱開発計画

3-1 地熱開発の現状

3-1-1 地熱開発の体制

ルワンダにおける地熱開発政策を所管している官庁はインフラストラクチャー省（MININFRA）であり、上級エンジニアや法務官等が数名在席するエネルギー部門において、地熱エネルギー政策や地熱法等の法整備に関する取り組みが展開されている。一方、調査・解析や掘削等の技術側面を含む地熱開発等に関する業務は、インフラストラクチャー省の管轄下にある Rwanda Energy Group（REG）の地熱開発ユニット（Geothermal Development Unit）が担当している。2016年2月現在、GDUの地熱開発ユニット長にヒアリングした情報では、地熱ユニットに所属するスタッフ数は8名であり、各分野とその所属人数は以下のとおりである。また、その後3名のスタッフが地熱ユニットに追加されており、この3名は現在日本の大学の修士課程に在籍している。

ユニット長	: 1名
地化学	: 2名
物理探査	: 2名
貯留層	: 1名
坑井掘削	: 1名
多目的利用	: 1名

スタッフにはアイスランド、ニュージーランド、ケニア、日本等で研修やトレーニングを受けた者もいるものの、地熱開発調査に実際に携わった経歴がほとんどないため、地熱調査に係る専門技術や開発のノウハウを熟知しているとは言えない。そのため、ルワンダにおける地熱開発調査実施においては、国外の専門家による支援や、地熱ユニットのスタッフの能力強化が必要な段階にある。

3-1-2 他ドナーによる地熱開発調査の支援動向

第1回現地調査において収集できた他ドナーによる地熱開発調査の支援情報は次のとおりである。

(1) EU

1) Gisenyi-Karisimbi 地域における地熱資源調査

ルワンダ北西部の Gisenyi-Karisimbi 地域における地熱資源調査の実施が計画されている。この調査では、地表調査（地質調査、地化学調査、TEM 法探査及び磁気探査）及びスリムホール掘削が計画されている。2014年1月現在、実施者（コンサルタント）の調達が完了しておらず、調査自体は開始されていない。プロジェクト名は次のとおりである。

「The study in support of developing Geothermal Resources in Rubavu - Karisimbi」

2) Bugarama 地域における地熱資源調査

ルワンダ、ブルンジ及びコンゴの3カ国を対象とした地熱資源調査が実施中である。この調

査では、地表調査（地質調査、地化学調査、磁気探査、TEM 法探査）、熱流量孔及び地熱資源総合解析（地熱系概念モデル構築）が計画されている。更に、3カ国のうちの1地点において、深部調査井の掘削が計画されている。コンサルタントとして Reykjavik Geothermal (RG)が決定している。プロジェクト名は次のとおりである。

「Regional Project for Geothermal Exploration in Rwanda, Burundi and DRC」

3) EUEI-PDF による地熱開発に係る政策及び法制度の調査

本調査では、ルワンダにおける地熱セクターへの民間参入促進の政策提言及びカウンターパートの能力強化が目的とされている。本調査は、2014年1月から約1年間の予定で実施され、地熱開発に係る資金調達（民間も含めた）、地熱開発の戦略及びアクションプラン、更には地熱開発促進のための新しい法制度の提案がされる予定である。

4) インハウス専門家による支援

地熱関連の政策、戦略及び地熱管理法への支援として、インハウスコンサルタントを現在3名雇用している。

(2) UNEP

1) Kinigi-Karisimbi 地域における地熱資源探査及び測定機器の供与

ルワンダ北西部の Kinigi-Karisimbi 地域における地熱資源調査の実施計画が UNEP に提出された。

この実施計画には、地表調査（地質調査、地化学調査、重力探査、磁気探査及び MT 探査）及び地熱資源総合解析（地熱系概念モデル構築）が含まれており、本プロジェクトでは、重力計及び磁力計各1セットが供与される予定であった。2014年1月現在、実施者（コンサルタント）の調達が完了しておらず、調査自体は開始されていない。プロジェクト名は次のとおりである。

「FUNDING FOR A STEPWISE EXPLORATION, APPRAISAL AND MONITORING OF GEOTHERMAL RESOURCES IN KARISIMBI-KINIGI AREA」

この実施計画の技術的な評価は ARGEO プログラム下で行われたが、残念ながらこの実施計画は否決された。UNEP は別の地域の地表調査の支援をする用意をしている。

(3) BTC

1) 地熱井掘削のためのリグ掘削に係る準備調査と「Detailed staffing requirements and institutional arrangements」の実施が計画されたが、実行されなかった。

2) 地熱調査支援

Karisimbi における掘削に係る支出を考慮に入れ、Kinigi での試掘は支援された。必要であれば実施済みの地表調査の補完調査を考えている。この支援は Karisimbi における掘削の結果が判明した後に差し控えられた。

3) Geothermal Energy Advisory Committee (GEAC) の策定支援

ルワンダの地熱分野の問題は専門性の欠如であることから、EWSA（現 EDCL）に対して Geothermal Energy Advisory Committee の策定、そのための6名の専門家雇用が支援された。専

門家の分野は、①発電所設計、②地熱リスク分析及び投資計画、③掘削、④貯留層モデリングと管理、⑤環境社会配慮、⑥地熱調査・開発計画政策である。GEAC は設立されなかった。

(4) ICEIDA

2013年6月25日～29日にEWSA（現EDCL）への技術研修が実施された。追加のOJTはKarisimbiにおける掘削において実施された。この研修では、地表調査、掘削、検層及び噴出試験などの内容に関する講義が実施された。

(5) WB

これまでのところ、ルワンダにおける地熱分野への支援には現状は深く関わっていない。しかしながら、WBは坑井試験機器をKarisimbiプロジェクトのために購入した。基本的には低コスト運転の発電設備へのサポートを希望するが、地熱リソースが確認され、政府の要請があれば地熱への支援を実施する考えはある。

(6) KfW

地熱開発リスク軽減便宜ファンド（GRMF）は、資源の確認ができていない地熱開発初期段階の地表調査と試掘に対するファンドで、KfWが開始しアフリカ連合（AU）が主催している。現在は、KfWとEUによりファンドされているが、英国国際開発省（DfID）や北欧ファンドも支援に関心を示している。ファンド適格国はリフトバレーに属している国々で、ルワンダも含まれる。地表調査費用の80%まで、試掘費用の40%までが供与される。EDCLはKinigi地域の試掘支援を申請し、この申請は2015年12月に採択された。

(7) AfDB

JICAがMPを実施しポテンシャルの確認ができ、ビジネスとしての実現可能性があるならばAfDBも支援していきたいとの考えはある。

3-1-3 地熱資源開発の状況

(1) 既存調査の経緯と概要

ルワンダではこれまでに多くの機関によって地熱開発調査が実施されてきており、それらの結果に基づき、北西部のKarisimbi地域、Kinigi地域及びGisenyi地域の3地域と南西部のBugarama地域が地熱開発有望地域として抽出されている（図3-1.1）。これまでに実施された地熱資源調査結果の経緯と概要は以下のとおりである。

1982年、BGRM (French Bureau of Geology and Mines) によりMashyuza地域、Gisenyi地域、Kibuye地域、Ntaresi地域及びMusanze地域で地化学調査が実施され、Gisenyi地域とBugarama地域で100℃以上の温度が地下に分布することが推定された。2006年にはChevron社によりBugarama地域及びGisenyi地域を対象とした地化学調査が実施され、温泉水等を用いた地化学温度計による解析が実施された。

2008年、BGR (Germany Institute for Geosciences and Natural Resources)が、KenGen (Kenya Electricity Generating Company)、ISOR (Icelandic Geo Survey)及びITER (Institute for Technology and

Renewable Energies)と共同で Gisenyi 地域、Karisimbi 地域 及び Kinigi 地域で地化学調査、物理探査及び土壌ガス調査等を実施した。その結果、①Karisimbi 火山の南斜面に 200°C 以上の地熱系が存在する、②Lake Karago 周辺では 150~200°C の地熱系が存在する、③Karisimbi の熱源は約 5km の深さに存在する、との調査結果を得た。

2009 年、KenGen により Karisimbi 火山の南斜面で補足地表調査（地化学調査及び物理探査）を行うとともに、初期環境影響評価（EIA）を実施した。翌 2010 年 2 月に Kigali で開かれたワークショップでは、それらの結果に基づいた地熱系概念モデルや 3 本の調査井掘削地点などについて議論された。また、同年、火山数、地表熱フラックス、土壌ガスフラックス及びモンテカルロ法等による地熱ポテンシャル評価が実施され、ポテンシャル値として各評価手法の平均値 120 MWe (±50 MWe) が導かれ、次の 5~6 年の発電規模として 50 MWe が初期目標値として合理的であると結論づけられた。(United Nations University Geothermal Training Program 2009 Number 25)

2010 年には、KenGen により、物理探査（MT 調査、TEM 調査）、地化学調査（土壌ガス調査：二酸化炭素、水銀及びラドン）、水理地質等の補足調査が実施された。その結果、Karisimbi 火山南山麓地域から南方の Mukamira を経て更に南東方向の Karago 湖にかけての地域に地熱系が発達する可能性を指摘した。また、この地域の調査井掘削に関して、2,000~3,000m の傾斜井掘削が推奨された。

2011 年に実施された MININFRA によるルワンダ内の地熱ポテンシャル評価では、ルワンダ内の地熱ポテンシャルは 700 MWe 以上、このうち、北西部に 300 MWe の地熱ポテンシャルがあると推定された（表 3-1.1）。しかし、このポテンシャル評価は、単位面積当たりの掘削生産井数と 1 本の生産井出力を、それぞれ 10 本と 4 MWe と仮定して、物理探査などから評価された開発有望地域の面積にそれぞれの値を乗じて算出したものであり、地下構造を十分に反映した評価結果とはなっておらず、算出された値の妥当性については課題がある。

2011~2012 年、IESE (Institute of Earth Science and Engineering)により、Kinigi 地域、Gisenyi 地域及び Karisimbi 地域を対象とした地質調査、地化学解析、物理探査（MT 探査、TEM 探査、CSAMT 探査）、微小地震解析、ボーリング孔による熱流量調査等が実施された。その結果、地質構造や流体流動の概念モデルが提示されるとともに、調査井による貯留層確認が必要として、3 本の垂直調査井掘削地点が提案された。

2012 年 4 月には、Karisimbi 地域における 3 本の調査井掘削ターゲットを検討する目的で、第 1 回の Validation workshop が開催されたが、物理探査の解析結果が不十分との評価を受け、掘削ターゲットの決定は延期された。

2013 年 1 月、再解析結果検討のため、UniServices、GDC (Geothermal Development Company)、RG (Reykjavik Geothermal)、KenGen 及び EWSA (現 EDCL) による Validation workshop が開催された。その結果、Karisimbi 火山周辺の比抵抗モデルは、高比抵抗帯（新期火山）、低温粘土の熱水変質による低比抵抗帯（粘土キャップ）、高度の熱水変質による比較的高い比抵抗帯（地熱貯留層）及び深部の低比抵抗帯（熱源）から成り、熱源は Karisimbi 火山に向かって浅く、南部方向には急激に沈みこんでいること、Karisimbi 火山方向の NW と NE 方向の断層系をターゲットとした 3,000m の傾斜調査井を掘削するとの結論がまとめられた。

2013 年 7 月 18 日、Karisimbi 地域において、ルワンダ初となる地熱調査井 KW-01 (Karisimbi Well No.1)の掘削が開始され、10 月 23 日に深度 3,015m に到達して掘削が完了した。

(2) 地熱資源開発進捗状況及び今後の調査計画

ルワンダでは、稼働している地熱発電所はなく、各地熱地域の地熱資源開発の段階はいずれも調査段階にある。2014年3月までに、Karisimbi 地域において地熱調査井2本の掘削が完了しているが、発電に適した地熱貯留層の存在は確認されなかった。ルワンダではこれまでに政府や国際機関の支援により地熱資源調査が実施されてきた。それらの結果に基づき、北西部の Karisimbi 地域、Kinigi 地域及び Gisenyi 地域の3地域と南西部の Bugarama 地域が地熱有望地域として抽出された。これまでのルワンダにおける地熱資源調査のほとんどは、これら4地域を対象に実施されてきた。

ルワンダの地熱開発関係機関からの聴取や既存文献等の収集・整理結果から、ルワンダの各地熱地域の資源調査状況は表 3-1.2 (2014年1月現在) 及び表 3-1.3 (2015年2月現在) のようにまとめられた。また、2016年2月現在の資源調査状況を表 3-1.4 に示す。

地表調査のうち、広域調査については、Gienyi の Mufunnba Cone と Bugarama の Bize を除く地域で実施済みである。物理探査は、MT/CSMT 探査が北西部の Karisimbi 地域、Kinigi 地域及び Gisenyi 地域で実施され、JICA は2015年にデータ再解析を実施した。また、空中重力探査と空中磁気探査がルワンダ全土を対象に実施されているが、地熱有望地域4地域についてはこれらの探査範囲外となっている。そのため、JICA は、2014年に Bugarama 地域で、2015年に Kinigi 地域で重力探査を実施した。調査井掘削が Karisimbi 地域で実施されたが、有望な地熱貯留層の存在は確認されなかった。

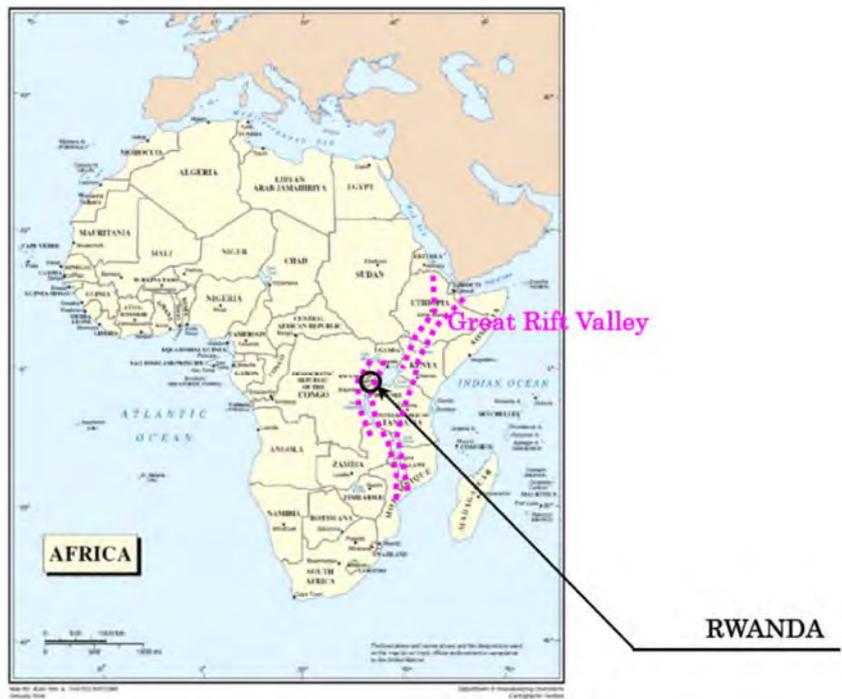


図 3-1.1 ルワンダの地熱有望地域

表 3-1.1 ルワンダ内の地熱開発有望地域と地熱ポテンシャル

Geothermal Prospect	Karisimbi	Gisenyi	Kinigi	Bugarama	Other areas	Total
Approximate Resource Area (km ²)	25	30	25	50	20	150
Estimated Development Resource area (km ²)	8	5	4	2	2	
Number of wells per km ²	10	10	10	10	10	
Average well Productivity (MWe)	4	4	3	3	2	
Resource potential (MWe)	320	200	120	60	40	740
Targeted Generation by 2017	160	150				310

[出所] インフラストラクチャー省 (2011) より抜粋

表 3-1.2 各地熱地域の地熱資源開発の進捗状況及び今後の調査計画 (2014年1月現在)

Field Name	Surface Study (conducted)							Surface Study (planned)					Slim hole drilling	Integrated Analysis (Construction of geothermal conceptual model)	Exploratory Well		Remarks	
	Preliminary Study		Detailed Study (~ 10km ²)		Geophysical Study			Geological Study	Geochemical Study	Geophysical Study					Deep well drilling	Well test		
	Geological Study	Geochemical Study	Geological Study	Geochemical Study	Gravity	Magnetic	MT/CsMT			Gravity	Magnetic	MT/CsMT						
Karisimbi	Done	Done	Done	Done	None	None	Done	-	-	Partly covered by the study in Kinigi and Gisenyi	-	-	None		KW-01 (3,015m) KW-02 (on-going)	KW-01: not productive		
Kinigi	Done	Done	Done	Done	None	None	Done	Planned by UNEP (April-June2014?)	Planned by UNEP (April-June2014?)	Planned by UNEP (April-June2014?)	Planned by UNEP (April-June2014?)	Planned by UNEP (April-June2014?)	-	Planned by UNEP (July 2014?)	-	-		
Gisenyi	Done	Done	Done	Done	None	None	Done	Planned by EU (March-May2014?)	Planned by EU (March-May2014?)	Planned by EU (March-May2014?)	Planned by EU (March-May2014?)	-	Planned by EU (March-May2014?)	-	-	-	schedule: 2months delay	
Bugarama	Done	Done	None	None	None	None	None	Planned by EU (Feb.-April2014)	Planned by EU (Feb.-April2014)	-	Planned by EU (May-Aug2014)	TEM, Dec. 2013 to June 2014	Planned by EU (March-Nov.2014?)	Planned by EU (Nov.-Dec.2014)	Planned by EU (Jan.-Oct.2015)	-	-	Preliminary survey of geology and geochemistry started.
Others	Done	Done	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

[出所] EWSA 提供資料を基に JICA 調査団で作成

表 3-1.3 各地熱地域の地熱資源開発の進捗状況及び今後の調査計画 (2015年2月現在)

Prospect	Area	Surface Study (conducted)										Surface Study (planned)					Slim hole drilling	Integrated Analysis (Construction of geothermal conceptual model)	Exploratory Well		Remarks
		Preliminary Study		Detailed Study (~10km ²)		Geophysical Study				Integrated Analysis (Construction of preliminary geothermal conceptual model)	Geological Study	Geochemical Study	Geophysical Study			Deep well drilling			Well test		
		Geological Study	Geochemical Study	Geological Study	Geochemical Study	Gravity	Magnetic	MT/CSM/T	Data Re-analysis				Gravity	Magnetic	MT/CSM/TEM						
Karisimbi	Karisimbi	Done	Done	Done	Done	None	None	Done	Done by ISOR (MT etc.) (2014) Done (MT) by JICA (2015)	Done before exploratory well drilling	-	-	-	-	-	None	-	KW-01 KW-02	KW-01 and KW-02: not productive		
	Karago	Done	Done	Done, supplemental study is desirable	Done, supplemental study is desirable	None	None	Partly covered	Partly covered	Done by JICA (2015)	-	-	-	-	-	-	-	-	Plan to apply UNEP?		
Kinigi	Kinigi	Done	Done	Done, supplemental study is desirable	Done, supplemental study is desirable	None	None	Done	Done by ISOR (MT etc.) (2014) Done (MT) by JICA (2015)	Done by JICA (2015)	-	-	-	-	-	-	-	Planned 3 slim holes (max. 2,500m depth). Application for Grant of 40% to be re-submitted to African Union Commission in May 2015, result will be shown by September 2015. GRMF			
Giseryl	Giseryl	Done	Done	Done, supplemental study is desirable	Done, supplemental study is desirable	None	None	Done	Done by ISOR (MT etc.) (2014) Done (MT) by JICA (2015)	Done by JICA (2015)	Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	-	Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	TEM: Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	-	Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	-	-		
	Iriba	Done	Done	Done, supplemental study is desirable	Done, supplemental study is desirable	None	None	None	None	Done by JICA (2015)	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Muhumba Cone	Done	Done	None	None	None	None	None	None	Done by ISOR (MT etc.) (2014) Done (MT) by JICA (2015)	None	Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	-	Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	TEM: Start of Procurement procedure (Jan.2015), financed by EU (6 months)	-	-	This area is included by study area of Giseryl by EU		
Bugarama	Mashyza	Done	Done	Done by EU (2014), by JICA (2015), supplemental study is desirable	Done by EU (2014), by JICA (2015), supplemental study is desirable	Done by JICA (2015)	Done by EU (2014)	TEM Done by EU (2014)	None	Done by JICA (2015)	-	-	-	-	-	Planned by EU (2015): 300m depths (3-5 holes)	Planned by EU (2015)	One well in one selected country: Planned by EU (2016)	-		
	Bize	Partly done	Partly done	None	None	None	None	None	None	None	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

[出所] EDCL 提供資料を基に JICA 調査団で作成

表 3-1.4 各地熱地域の地熱資源開発の進捗状況及び今後の調査計画 (2016年2月現在)

Progress of Geothermal Resource Study and Future Plan of the Study in Rwanda (as of February, 2016)																					
Prospect	Area	Surface Study (conducted)										Surface Study (planned)					Slim hole drilling	Integrated Analysis (Construction of geothermal conceptual model)	Exploratory Well		Remarks
		Preliminary Study		Detailed Study (~10km ²)		Geophysical Study				Integrated Analysis (Construction of preliminary geothermal conceptual model)	Geological Study	Geochemical Study	Geophysical Study			Deep well drilling			Well test		
		Geological Study	Geochemical Study	Geological Study	Geochemical Study	Gravity	Magnetic	MT/CSM/T	Data Re-analysis				Gravity	Magnetic	MT/CSM/TEM						
Karisimbi	Karisimbi	Done	Done	Done	Done	None	None	Done	Done by ISOR (MT etc.) (2014) Done (MT) by JICA (2015)	Done before exploratory well drilling	-	-	-	-	-	None	-	KW-01 KW-02	KW-01 and KW-02: not productive		
	Karago	Done	Done	Done, supplemental study is desirable	Done, supplemental study is desirable	None	None	Partly covered	Partly covered	Done by JICA (2015)	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Kinigi	Kinigi	Done	Done	Done, supplemental study is desirable	Done, supplemental study is desirable	None	None	Done	Done by ISOR (MT etc.) (2014) Done (MT) by JICA (2015)	Done by JICA (2015)	-	-	-	-	-	-	JICA (2015)	GRMF: Application for drilling of 3 slim holes (max. 2,500m depth) was approved in December 2015 (Grant of 40%).	-		
Giseryl	Giseryl	Done	Done	Done, supplemental study is desirable	Done, supplemental study is desirable	None	None	Done	Done by ISOR (MT etc.) (2014) Done (MT) by JICA (2015)	Done by JICA (2015)	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	-	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	-	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	-	-		
	Iriba	Done	Done	Done, supplemental study is desirable	Done, supplemental study is desirable	None	None	None	None	Done by JICA (2015)	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Muhumba Cone	Done	Done	None	None	None	None	None	None	Done by ISOR (MT etc.) (2014) Done (MT) by JICA (2015)	None	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	-	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	-	Study started in December, 2015 (survey period: 6 months).	A part of this area is included by study area of Giseryl by EU		
Bugarama	Mashyza	Done	Done	Done by EU (2014), by JICA (2015), supplemental study is desirable	Done by EU (2014), by JICA (2015), supplemental study is desirable	Done by JICA (2015)	Done by EU (2014)	TEM Done by EU (2014)	None	Done by JICA (2015)	-	-	-	-	-	EU: Additional three thermal gradient holes will be drilled at depths between 100-300m.	Planned by EU (2016) after drillings	One well in one selected country: Planned by EU (2016)	-		
	Bize	Partly done	Partly done	None	None	None	None	None	None	None	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

[出所] EDCL 提供資料を基に JICA 調査団で作成

3-1-4 Karisimbi 調査井 KW-01 掘削結果

(1) KW-01 掘削状況

1) 掘削概要

Karisimbi 地域における 1 本目の調査井 KW-01 (Karisimbi Well No.1)は、2013 年 7 月 18 日に掘削を開始、10 月 23 日に深度 3,015m に到達して掘削が完了した。口元の座標は経距と緯距がそれぞれ 768,745m と 9,828,070m であり、口元の標高は 2,675m である。

KW-01 の総合柱状図を図 3-1.2 に示す。本坑井では、9-5/8 インチのケーシングが深度 1,299m まで挿入されており、その後 8-1/2 インチで深度 3,015m まで掘削した後、裸坑で仕上げられている。掘削終了後には、透水性や坑内圧力温度分布を調査するために注水試験や温度検層が実施された。

2) 掘削方位と傾斜

本坑井は垂直井として掘削されたが、本坑井の掘削軌跡を確認するために、掘削方位・傾斜測定が実施されている。その結果を表 3-1.5 に示す。

本坑井は深度 1,801m までほぼ垂直に掘削されているが、深度 2,211m での傾斜が 7.87 度、坑底（深度 3,003.5m）での傾斜が 11.21 度と、深度とともに傾斜角が増加する傾向にあった。また、EWSA の掘削報告書には口元～坑底の水平距離が約 580m と記載されているが、収集データから水平距離を試算したところそれほど大きくはないと推定される。しかし、測定データが少ないことから正確な評価はできない。

表 3-1.5 KW-01 の掘削方向測定結果

Depth (m)	Inclination (Degree)	Azimuth (Degree)
340	1.38	28.90
790	0.47	73.84
1331	4.99	270.78
1399	4.67	144.96
1504	5.04	336.83
1657	4.30	338.89
1801	3.72	145.17
2211	7.87	345.51
3003.5	11.21	229.17

[出所] EWSA 提供資料

3) 坑井地質

深度 3～56m、深度 76～322.5m 及び深度 328～1,302m の区間では、全量逸水のために部分的にしかカッティングスが採取できていない。そのため、これらの区間では、ジャンク・サブ等によるスポット的なカッティングス採取が実施された。

9-5/8 インチケーシング挿入後の深度 1,302m 以深では、ほぼ連続的に試料が採取され、カッティングス観察の結果、地表から深度 334m までは火山岩が、深度 960m 以深では花こう岩が分布していることが確認された。なお、火山岩と花こう岩の地質境界付近では、カッティングスが採取されていないために、地層境界の深度は明らかになっていない。

カッティングス中に含まれる変質鉱物（熱水から析出した成分や熱水と岩石が反応すること

によって二次的にできた鉱物)は地下温度を推定する手がかりとなる。本坑井では深度約 2,500m 以深で緑泥石 (Chlorite) が分布しており、深度 1,500m 以深において 150 °C 以上の温度に達している可能性が考えられる。これ以外にも何種類かの鉱物が判定されているものの、一般的な地熱井に比べて本坑井の変質鉱物が全体的に少ない。これは、本坑井付近での地熱活動がそれほど活発でない可能性、地質の特徴に起因する可能性 (地熱活動があっても、変質鉱物が生成しにくい地質条件)、変質鉱物の認定問題 (調査手法の問題) などが考えられる。これらの可能性を検証するためには、変質鉱物の出現分布を詳細に把握することができる X 線分析などの岩石分析が必要であり、予定されているアイスランドでの岩石試料分析結果に基づき、変質鉱物の出現分布を再把握することが望まれる

(2) 地質概要(坑井試験)

本坑井では、掘削途中で数多くの温度検層 (temperature logging) が実施されているが、これらのほとんどがケーシングセメンティングの効果を評価するために実施されたものであるため、これらのデータから地層温度を評価することは困難である (図 3-1.3、図 3-1.4 及び図 3-1.5)。また、深度 3,015m までの掘削完了後に実施された温度検層も 1 回であるため、貯留層温度を解析することは不可能である。更に、①この検層が掘管内で実施されていること、②検層途中で機器が停止したりしていること、などから、このデータが地層温を反映したデータとは言い難い状況である。以上の理由により、温度検層結果から深部地熱貯留層の温度を評価することは困難である。しかしながら、本坑井周辺の地層温度が高いことを示すデータは少なくともも得られていないのが現状である。

(3) エアリフト

本坑井では、深度 1,253 m にエア管をセットして坑内水を汲み出しているが、期間中の汲み出し量は約 19m³ であり、坑内水が十分に入れ替えられる程の量ではなかった (図 3-1.6)。また、図 3-1.7 に示すように、深度 1,900 m 以浅では温度はエアリフト前後で変化しているが、それ以深の温度はほとんど変化していない。このことから、エアリフト中は、深度 1,950 m 付近から温度の低い流体が坑内に流入していた可能性が考えられるが、この温度が深部貯留層温度を十分に反映しているかどうかは明らかではない。

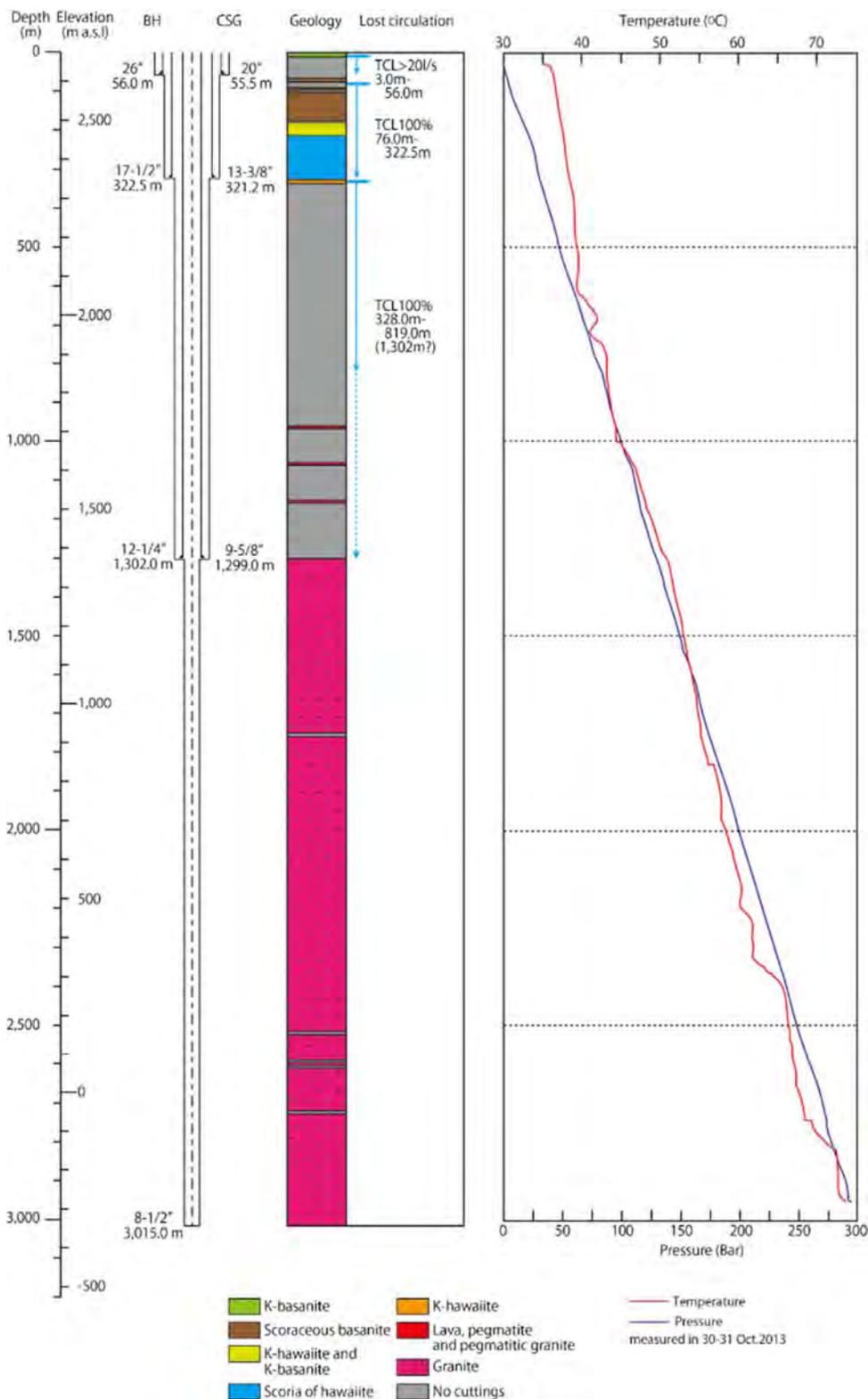
(4) 透水性

ケーシング挿入区間である浅部では全量逸水があり、その区間においては透水性の高い地層の存在が示唆される。しかしながら、生産ゾーンである深度 1,302m 以深においては、エア混合掘削のため透水性の存在は把握しにくいという点があるものの、透水性の高い地層の存在を示す掘削データは確認できていない。また、高温の地熱流体の存在を示唆する熱水変質の存在も認められていない。

本坑井の生産ゾーンの定量的透水性評価のために還元試験が実施され、図 3-1.8 に示すように、還元指数として 0.63 (l/s/bar) の値が得られている。この値は、一般的な地熱井の値としては、透水性が低い類に分類される。また、図 3-1.9 に示すように、エアリフト後の坑内圧力がエアリフト前と比べて低いのは、坑内水が汲みだされた後の地層からの流体流入が遅いことを意味しており、このことは KW-01 周辺の地層の透水性が低いことを裏づけていると考えられる。

(5) KW-01 の評価

深度 1,302 m より浅部では深度 328 m のような規模の大きな透水性構造が存在しているが、これより深部の掘削中には大規模な逸水はなく、地熱流体の通路となる地熱構造の存在は確認されていない。また、深部の地熱貯留層温度については、評価に有効なデータが得られていないが、検層やエアリフト試験結果等からは本坑井周辺の地層温度が低い可能性が考えられる。このように、これまでに収集した報告書やデータからは、本地域の重要な課題となっている熱源の存在、高温流体の通り道となる断層等の高透水性を有する地質構造に関する有望な示徴は示されていないのが現状である。



[出所] EWSA 提供資料をもとに JICA 調査団で作成

図 3-1.2 Well KW-01 総合柱状図

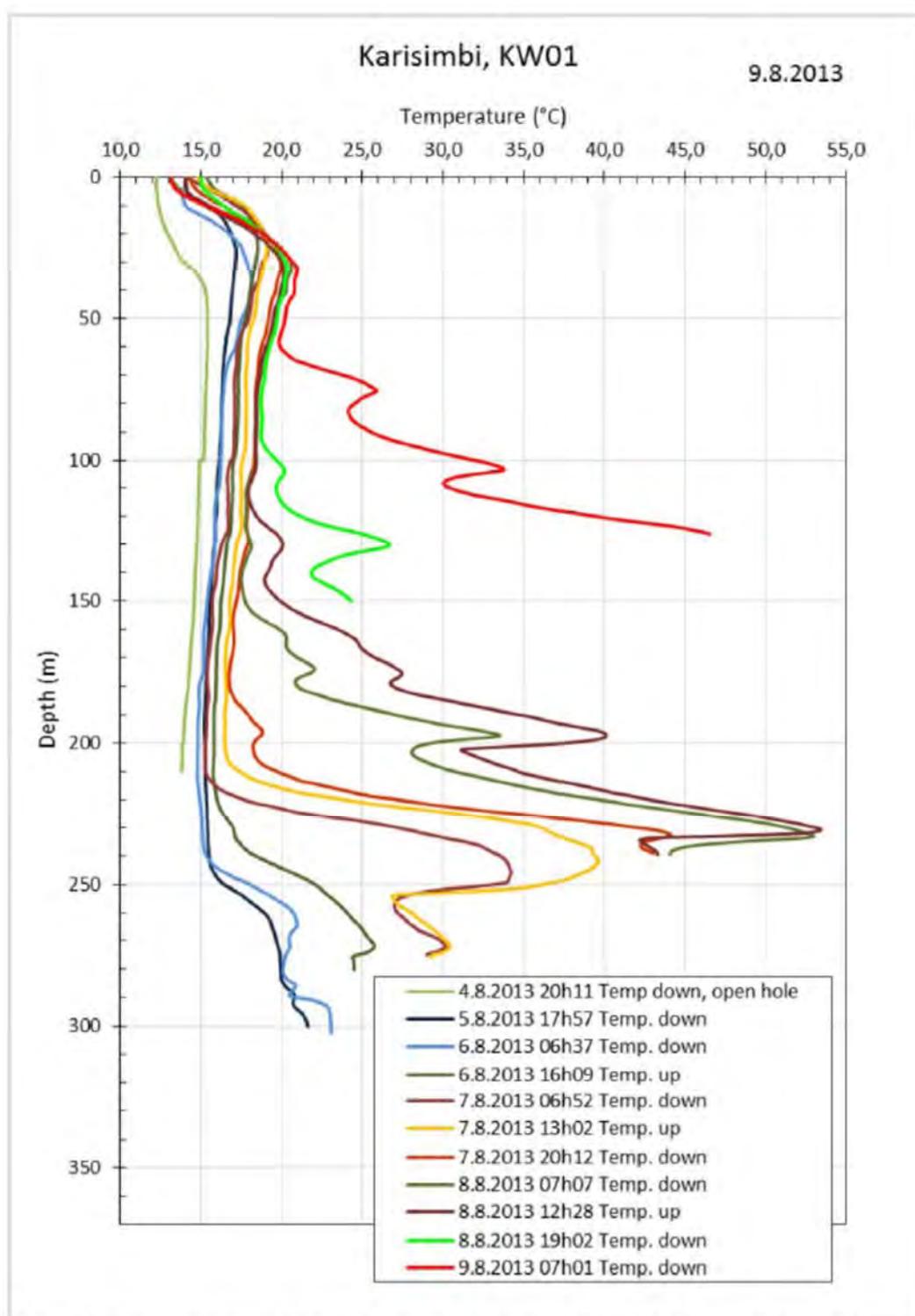
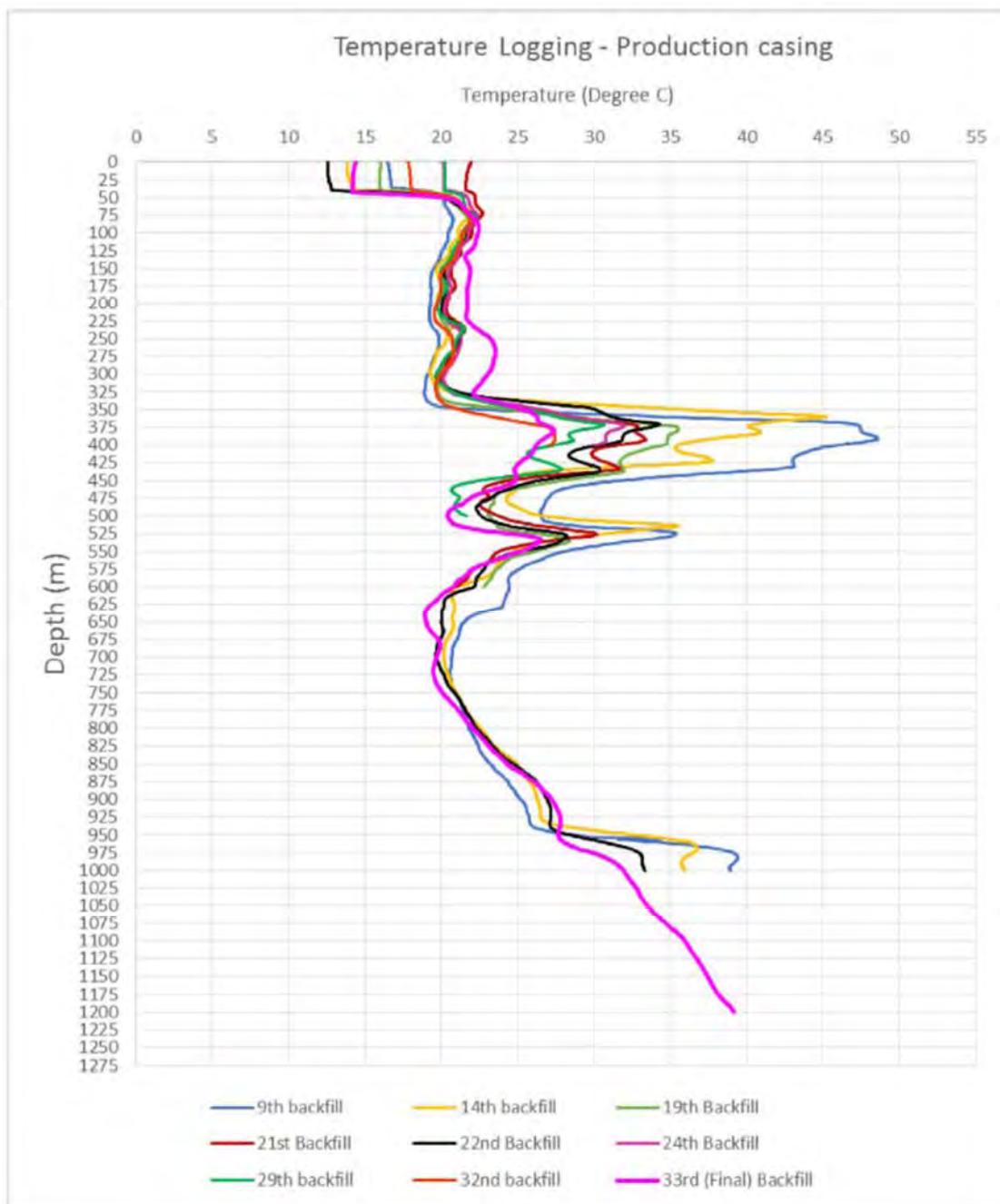


Figure 2. Temperature logs in 13 3/8" anchor casing to monitor level of cement in annulus.

[出所] EWSA 提供資料

図 3-1.3 Well KW-01 13-3/8"ケーシング区間の温度検層結果



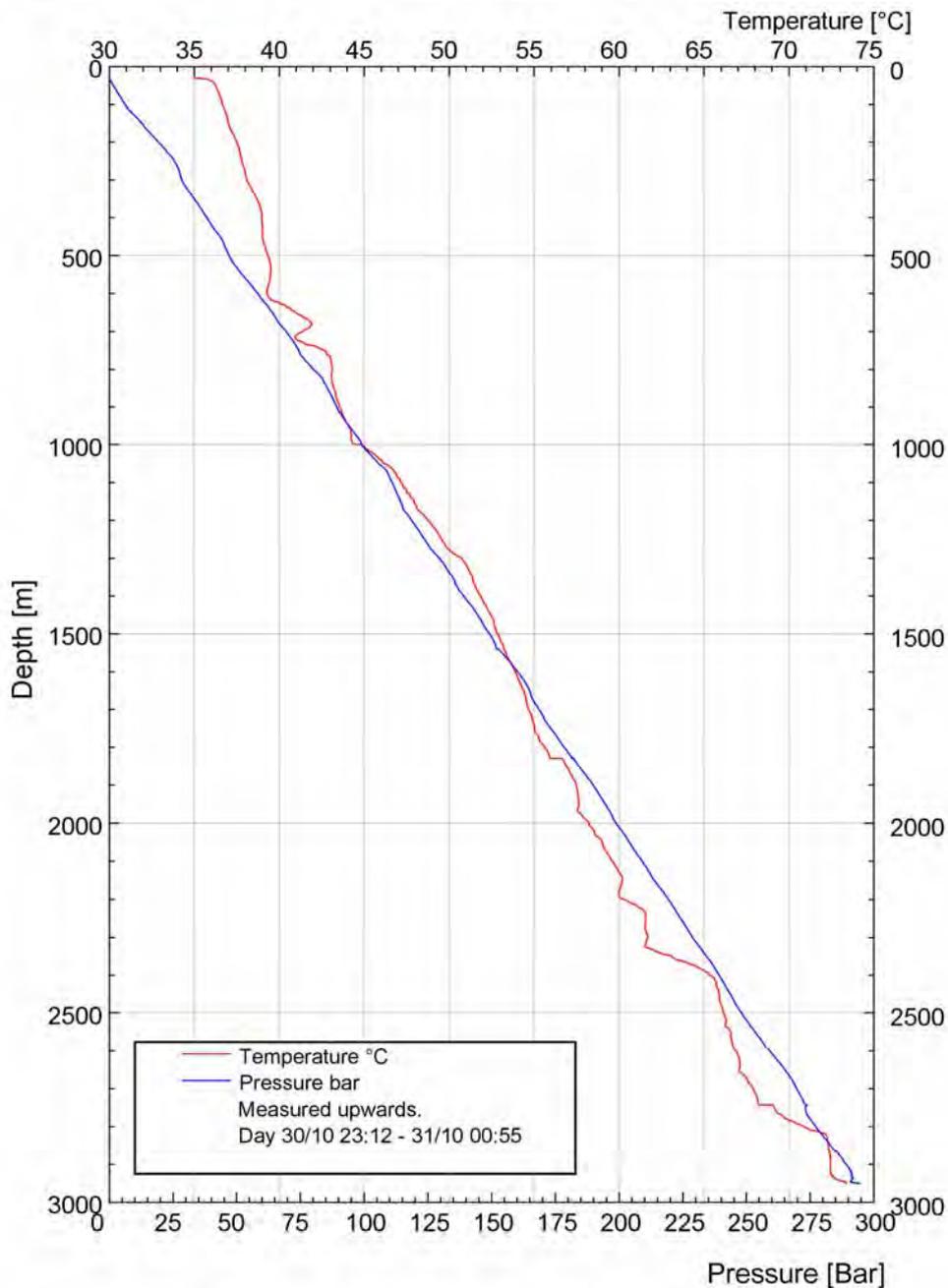
[出所] EWSA 提供資料

図 3-1-4 Well KW-01 9-5/8”ケーシング区間の温度検層結果



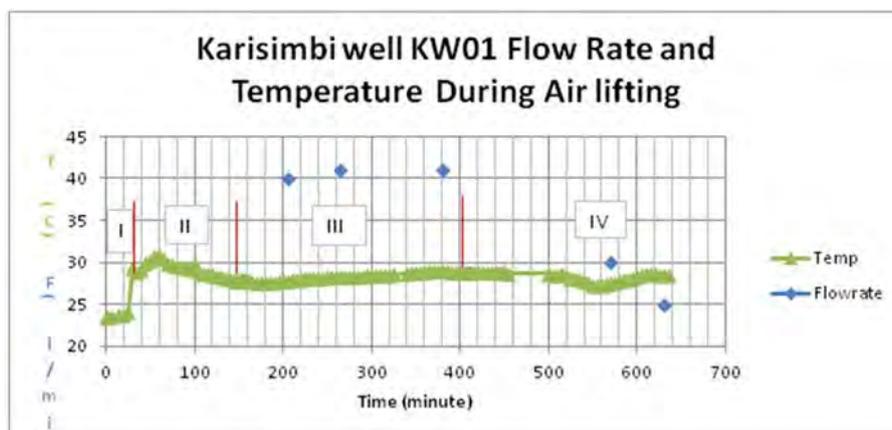
Karisimbi Well KW-01

Oktober 31st 2013
BjKr/and many others



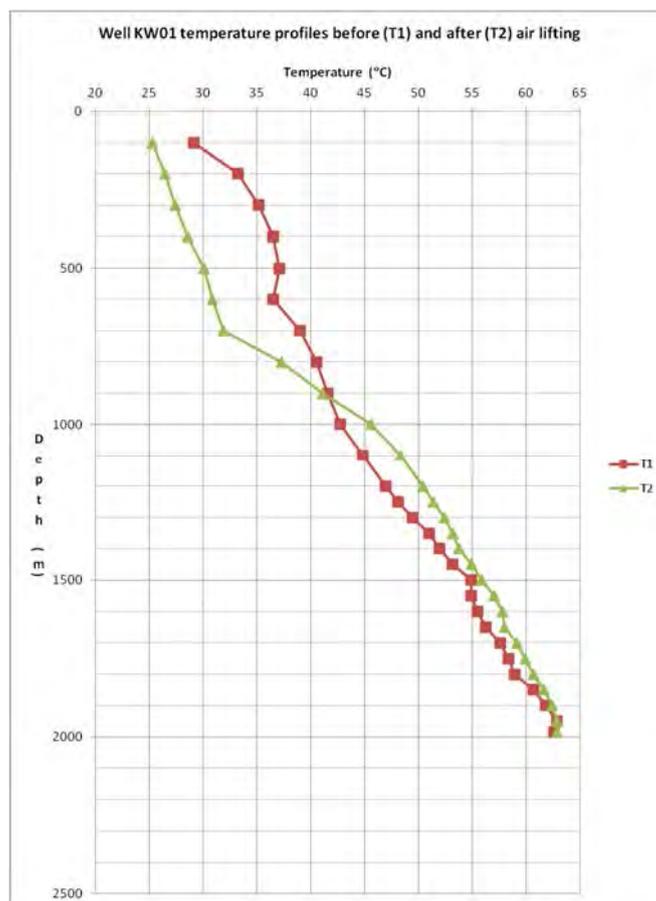
[出所] EWSA 提供資料

図 3-1.5 Well KW-01 温度検層結果



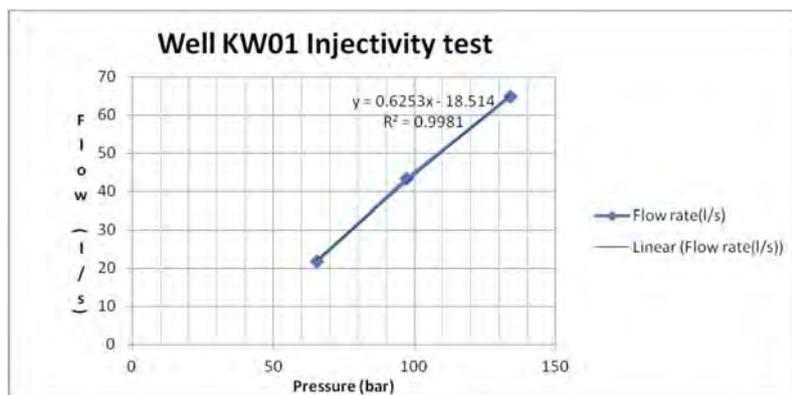
[出所] EWSA 提供資料

図 3-1.6 Well KW-01 エアリフトによる噴出流体の流量と温度の変化



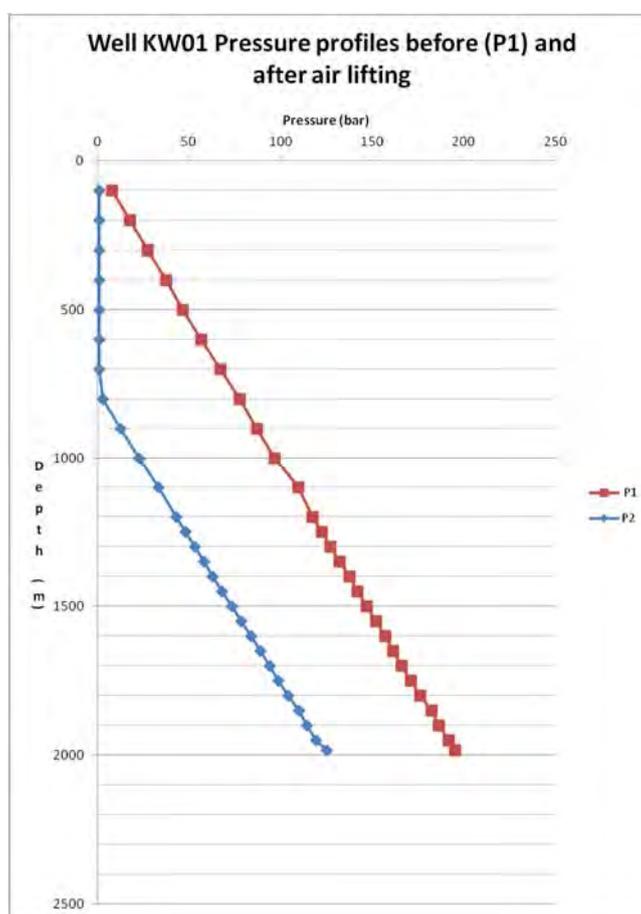
[出所] EWSA 提供資料

図 3-1.7 Well KW-01 エアリフト前後の温度検層結果



[出所] EWSA 提供資料

図 3-1.8 Well KW-01 インジェクション試験解析結果



[出所] EWSA 提供資料

図 3-1.9 エアリフト前後の坑内圧力分布

3-1-5 Karisimbi 調査井 KW-02 掘削結果

(1) KW-02 掘削状況

Karisimbi 地域における 2 本目の調査井 KW-01 (Karisimbi Well No.1)は、KW-01 から北西方向に約 1.8km 離れた地点で、2013 年 12 月 14 日に掘削を開始し、2014 年 3 月 22 日に掘削を完了した。この坑井は坑内トラブルのために KW-01 で確認できなかった地下の状況を確認することを目的として、予定掘削深度 3,500 m までの掘削が計画された。しかし、地質状況や回帰泥水温度が低温であったことから、深度 1,378 m で掘削終了が決定された。

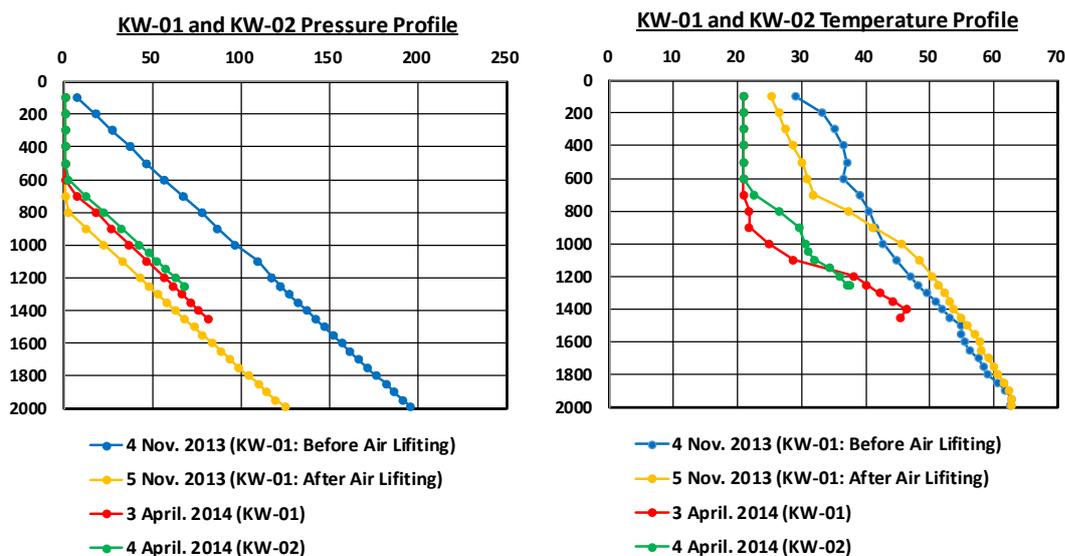
掘削終了後の坑井試験では、温度・圧力検層、還元試験及びフォールオフテストが実施された。その結果、還元指数が 0.4 l/s/bar、最高温度は深度 1,256 m の 37.4°C（温度回復 13 日後）であったことから、KW-02 周辺も温度・透水性の観点から発電には適していないと結論づけられた。

(2) KW-01 及び KW-02 検層結果の比較

KW-01 では、2014 年 4 月 3 日に深度 1,450 m までの温度・圧力検層が KUSTER 検層機器を用いて実施され（降下深度は 1,452 m）、その結果、深度 1,450 m で温度 45.4°C、圧力 81.5bar を示した。KW-01 のエアリフト前後の温度・圧力検層結果と今回実施された両坑井での検層結果を下図に示す。

KW-01 の 2014 年 4 月の温度分布は、2013 年 11 月の温度検層結果と比べて浅部の温度は低くなっているものの、深部の温度は以前の測定温度分布と大差なかった。また、2014 年 4 月の KW-01 と KW-02 の温度分布はよく似通った傾向を示している。これらのことから、両坑井の深度 2,000m までの区間の温度回復は期待できないと判断される。

一方、今回測定された KW-01 の圧力分布は、エアリフト後の圧力分布よりも若干高くなっているが、この圧力分布は KW-02 の圧力分布とほぼ同じである。このように、KW-01 と KW-02 は 1.8km 離れているものの、これらの温度・圧力分布はほぼ同じ傾向を示している。したがって、KW-01 と KW-02 は同じ水理及び温度構造内に掘削されたと考えられる



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-1.10 KW-01 及び KW-02 温度・圧力検層結果

3-2 地熱ポテンシャル評価

3-2-1 詳細調査対象地域の選定

(1) 既存調査結果収集及びレビュー

1) 地熱資源に関する既存データ

ルワンダにおける地熱資源調査に係る各種の現地視察や初期的な調査・検討は、いくつかの国際機関の協力を得ながら実施されてきた。それらのうち、系統立った調査がされており、既存調査の経緯及び調査結果を把握する上で特に重要と考えられる調査・報告書は以下のとおりである。

- Chevron (2006) : Preliminary Assessment of Rwanda's Geothermal Energy Development Potential
- UWERA RUTAGARAMA (2009) : Assessing Generating Capacity of Rwanda Geothermal Fields from Green Field Data Only
- BGR (2009) : Geothermal Potential Assessment in the Virunga Geothermal Prospect, Northern Rwanda
- Stephen A. Onacha (2010) : Rwanda Geothermal Resources Exploration and Development for 2011-2017
- Uwera Rutagarama and Theoneste Uhorakeye (2010) : Geothermal Development in Rwanda: An Alternative to the Energy Crisis
- Stephen A. Onacha (2011) : Rwanda Geothermal Resources Potential
- MININFRA (2011) : Rwanda Geothermal Resources Potential
- IESE (2011) : Geothermal Prospects in Rwanda

- IESE (2012) : Geoscientific Surveys of the Rwandan Karisimbi, Gisenyi and Kinigi Geothermal Prospects (Final Report)
- EWSA (2013) : Data and Final Report, Validation Workshop

上記の既存調査に係る資料をルワンダ関係機関から収集するとともに、公表されている文献などからも補足的に収集を行った。収集されたデータ・情報は以下の項目に関するものである。

- 地形のデジタルデータ
- 衛星画像データ
- Karisimbi の調査井データ
- 温泉水・鉱泉水の化学分析データ
- ルワンダ内の地熱資源に関する報告書や公表文献

2) 既存データのレビュー

i) 広域地質構造

ルワンダは、大陸分裂の場である東アフリカ地溝帯（East African Rift System）に位置する。地溝は、伸張応力場において地殻が正断層によって陥没し、凹地を形成する地質構造である。東アフリカ地溝帯に沿っては火山活動が活発で、その火山活動に伴い地熱地帯が地溝帯内に数多く分布する。ケニアやエチオピアにおいては、地溝帯内の地熱地帯において地熱発電所が稼働している。東アフリカ地溝帯は、東地溝帯（Eastern Rift Valley）と西地溝帯（Western Rift Valley）に細分され、アルバート湖（Lake Albert）からエドワード湖（Lake Edward）、Kivu 湖（Lake Kivu）、タンガニーカ湖（Lake Tanganyika）へと続く西地溝帯にルワンダは位置する（図 3-2.1）。



[出所] (Rutagarama and Uhorakeye, 2010 を引用)

図 3-2.1 東アフリカリフトバレーの位置

ルワンダの地質は古原生代の花こう岩、ミグマタイト、片麻岩及び雲母片岩から成る

Ruzizian 基盤岩類と、それを覆う中生代の Kibaran 帯から成る。Kibaran 帯は片岩や珪岩など、堆積岩起源の変成岩から成る。Kibaran 帯には花こう岩が貫入する。ルワンダ北西部及び南西部には新生代～現在までの火山岩が分布する。

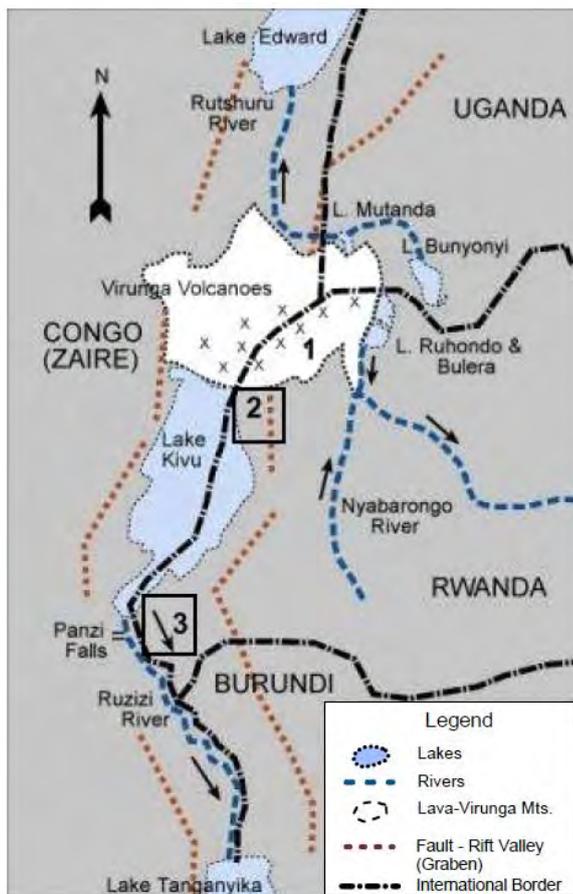
ルワンダの主要な地層は北西部及び南西部の第三紀／第四紀溶岩地域を除いて中生代中期 (Burundian) のものである。これらの地層は Kibaran 期 (Burundian 造山運動) に褶曲作用を受けている。またラテライト及び厚い沖積層が先カンブリア時代の基盤岩類を覆っている。これら先カンブリア時代の基盤岩類には古中生代の花こう岩及び片麻岩が含まれる。なお、基盤岩は花こう岩、ペグマタイト、metabasics、ミグマタイト及び中生代由来の変形した変成堆積岩による貫入を受けている。

ii) ルワンダの地熱地域

ルワンダには主要な地熱地域として、北西部の火山国立公園と Kivu 湖に近い東アフリカ地溝帯の西リフトバレーに関連した断層域の 2 つの地域が抽出されている (Rutagarama, 2009)。

Demange et al. (1982) は以下の 3 地域を定義した (図 3-2.2)。

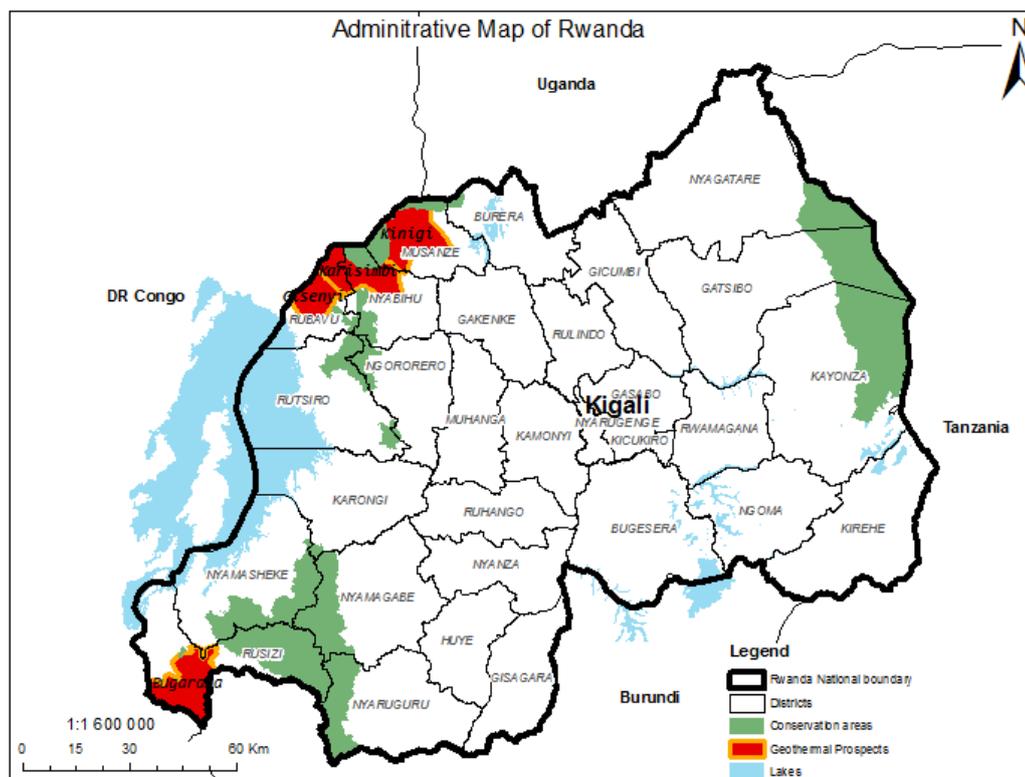
- ① Virunga 火山複合体から成る北西部
- ② Kivu 湖北部に位置する Gisenyi の温泉地域
- ③ Kivu 湖地域南部の Bugarama 地域



[出所] (Rutagarama, 2009)

図 3-2.2 ルワンダの地熱地域

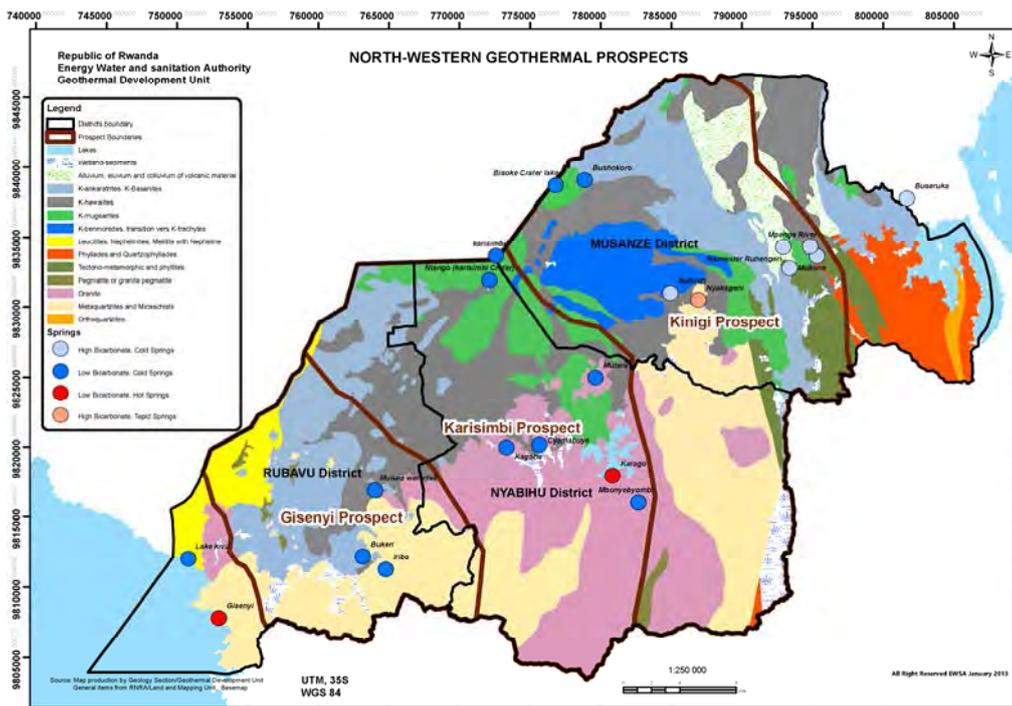
EWSA はルワンダ内に 4 か所の有望地域 Karisimbi, Kinigi, Gisenyi 及び Bugarama を抽出した (図 3-2.3)。



[出所] EWSA 提供資料

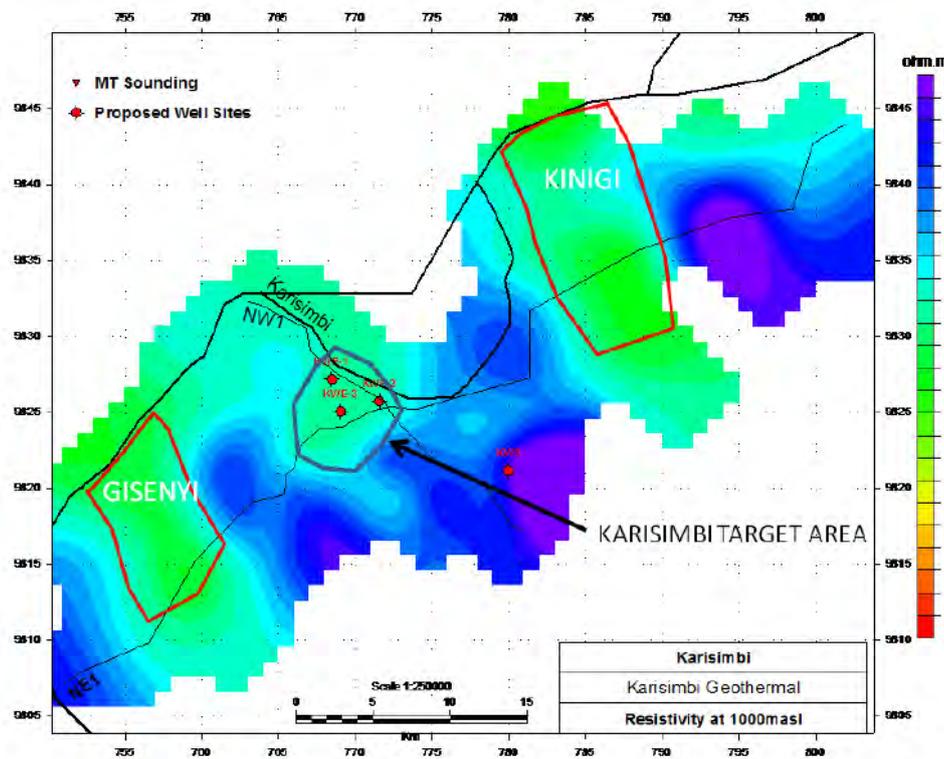
図 3-2.3 ルワンダの地熱有望地域

図 3-2.4 に北西部の地熱地域及び温泉・冷泉の湧出地点を、図 3-2.5 に北西部の地熱地域の位置と地下の比抵抗分布を示す。EWSA への聞き取り調査によると、抽出された有望 4 地域の厳密な範囲は決められておらず、北西部の 3 地域については、図 3-2.5 に示される比抵抗構造のうち、相対的に比抵抗値が高いエリアを 3 地域に区分している。



[出所] EWSA 提供資料

図 3-2.4 ルワンダ北西部の地熱地域



[出所] (MININFRA, 2011)

図 3-2.5 ルワンダ北西部の地熱地域と地下の比抵抗分布 iii) ルワンダの地熱ポテンシャル

MININFRA (2011) により示されたルワンダ内の地熱ポテンシャルは 700MWe 以上であり、このうち北西部は 300MWe の地熱ポテンシャルを有していると推定された (表 3-1.1)。このポテンシャル評価は、単位面積当たりの掘削生産井数と 1 本の生産井出力を、それぞれ 10 本と 4MWe と仮定して、物理探査などから評価された開発有望地域の面積にそれぞれの値を乗じて算出されたものである。一般には、地熱ポテンシャル評価を行う際はそれぞれの地域の地下構造が考慮されるが、MININFRA (2011) の手法では、地下構造の検討が反映された評価結果とはなっておらず、算出された値の信頼性が高いとは言い難い。しかしながら、各有望地域において、物理探査を含む補足地表調査の実施が各ドナーにより計画されており、今後、地域毎に地下構造の情報が蓄積されると考えられれば、資源ポテンシャルを見直すことが望まれる。

iv) ルワンダの主要な地熱地域

ルワンダの主要な地熱地域は、西地溝帯内に位置する北西部 (Kivu 湖の北方) の Karisimbi 地域、Kinigi 地域、Gisenyi 地域、及び南西部 (Kivu 湖の南方) の Bugarama 地域である。以下、これらについて取りまとめる。

Karisimbi 地域

ルワンダではこれまで北西部を中心に地熱資源探査を目的とした地表調査 (地質、地化学及び物理探査) が実施されており、特に Karisimbi 地域については、調査井掘削計画のための地下構造に関する検討が進められてきた。KenGen (2010)、Namugize (2011)、IESE (2012)、Namugize et al. (2013) などに基づく Karisimbi 地域の地熱概念モデルは以下のとおりまとめられる。

Karisimbi 山は、西地溝帯を横断する Virunga 火山帯 (Virunga Volcanoes Range: VVR) を構成する火山のひとつである。Virunga 火山帯は 8 つの火山から成り、Karisimbi 山はそれら火山のうちで最も標高が高く (標高 4,507m)、かつ最も大きな火山体である。Karisimbi 火山は、有史における噴火の記録はないが、現在でも火山活動が活発なコンゴ共和国の Nyiragongo 火山及び Nyamuragira 火山に隣接しており、第四紀後期に活動している (図 3-2.6)。このように、本地域は第四紀後期の火山である Karisimbi 山の南麓に位置し、本火山の活動に関連するマグマ溜まりが本地域の地熱系の熱源と考えられている。

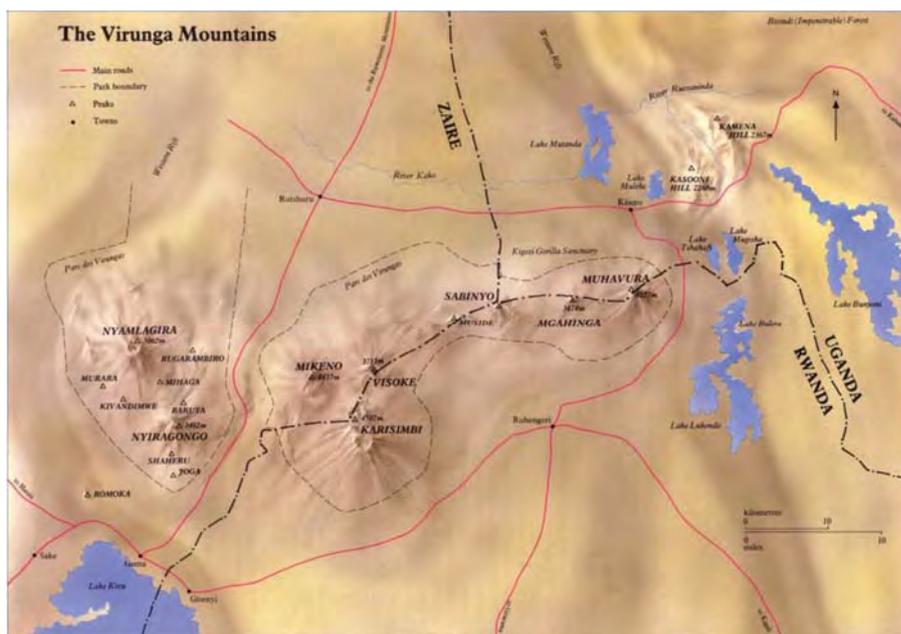
Karisimbi 地域の地質は、先カンブリア紀の花こう岩及び片麻岩とそれを覆う火山岩類から成る。火山岩類の層厚は数百 m から 1,000m 程度と推定されている。Karisimbi 地域の広域地質構造は、西地溝帯を形成する正断層の存在で特徴づけられる。本地域では、流体の流動を規制する高透水性ゾーンとして、NE-SW 方向及び NW-SE 方向の断層が推定されている (KenGen, 2010、EWSA, 2013)。

Karisimbi 地域では、噴気帯及び熱水変質帯の存在は報告されていない。本地域から最も近い温泉は約 18 km 離れた Karago 地域であり、その他 Gisenyi にも温泉が湧出する (図 3-2.7 及び図 3-2.8)。北西部において最も温度の高い温泉は、Karago 地域の 64°C である。IESE (2011) では、Karago 地域における 50cm 深地温として 72°C が確認されている。ただし、Karago 地域においても熱水変質帯や温泉堆積物 (トラバーティン) の存在は報告されていない。また、二酸化炭素ガスが冷泉とともに噴出している地点が複数ある。本地域では下部地殻やマントルが地下の比較的浅部に位置していると推定されており、二酸化炭素ガスは、浅部に位置する下部地殻もしくはマントル起源と考えられている。

Karisimbi 地域の温泉・冷泉の起源は天水である。天水は基盤岩である花こう岩及び変成岩まで浸透し、地下深部で加熱された天水が、断層に伴われる高透水性ゾーンに沿って上昇していると考えられている（図 3-2.9）。温泉の地化学データに基づく浸透した天水は地下深部で 90～110℃ まで加熱されている（IESE,2012）。地下深部の高温の地熱貯留層を起源とする温泉は本地域には湧出しておらず、地化学データからは高温の地熱貯留層の存在を示唆するデータは得られていない。

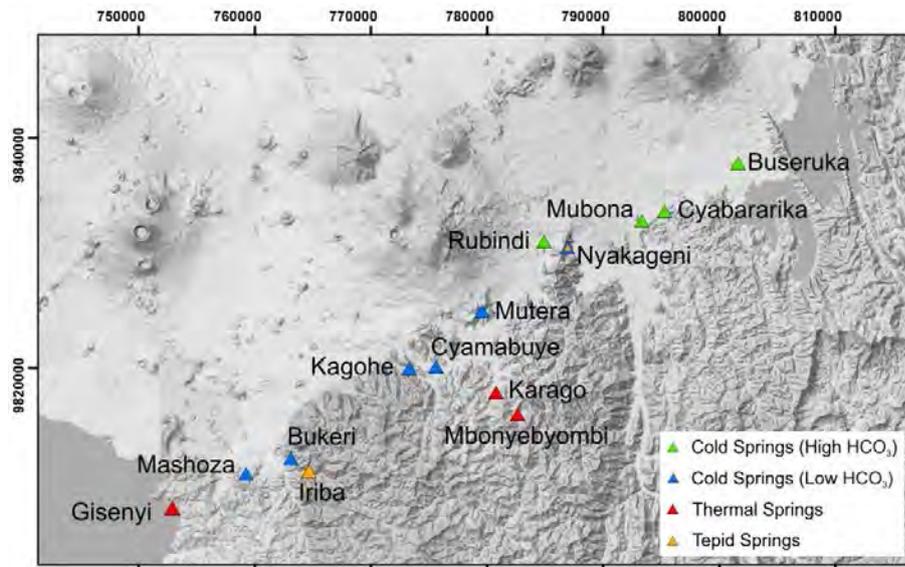
本地域では電磁探査（MT 探査や TEM 探査など）結果に基づき、地熱貯留層の位置や広がり が検討されている。電磁探査データの解析及び解釈については、調査実施機関毎に様々な解釈と議論があるが、概ね以下のような地熱構造モデルが考えられている（EWSA, 2013）。

本地域では極浅部に高比抵抗域が水平的に分布し、これは新期の溶岩に対比されている。その下位に相対的な低比抵抗域が分布し、これは粘土化変質によるものと解釈されている。低比抵抗域の下位には高比抵抗域が分布し、この高比抵抗域が地熱貯留層の分布を示すものと推定されている。更に、高比抵抗域の下位には本地域の地熱系の熱源を示すと解釈されている顕著な低比抵抗域が存在する。ただし、前述のとおり、電磁探査データの解析と解釈には実施機関毎に議論があり、地熱貯留層の存在や位置を精度高く把握できているとは言えず、調査井による地熱貯留層の確認が必要であるとされている。



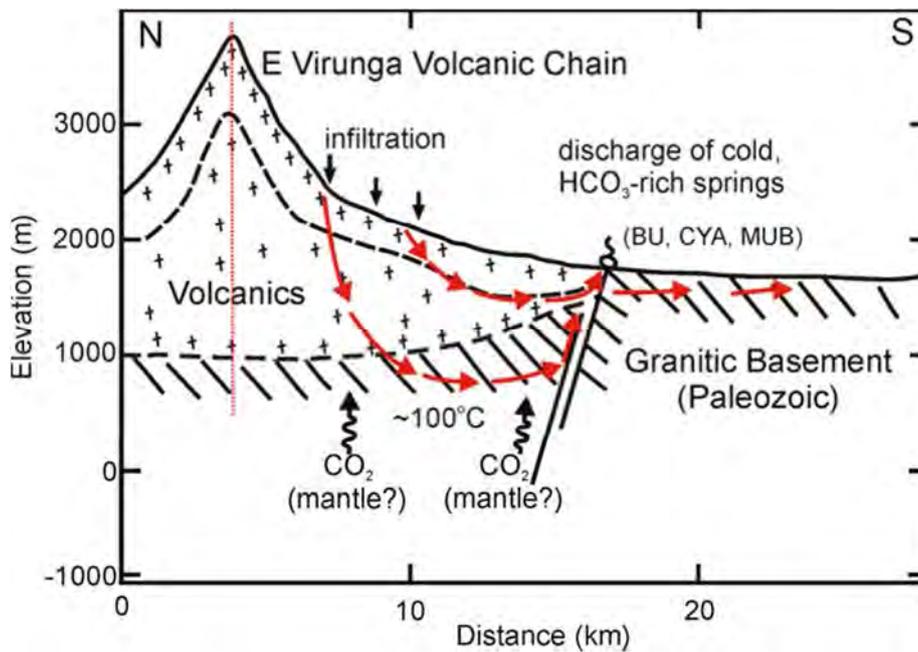
[出所] (KenGen, 2010)

図 3-2.6 Virunga 火山帯の火山



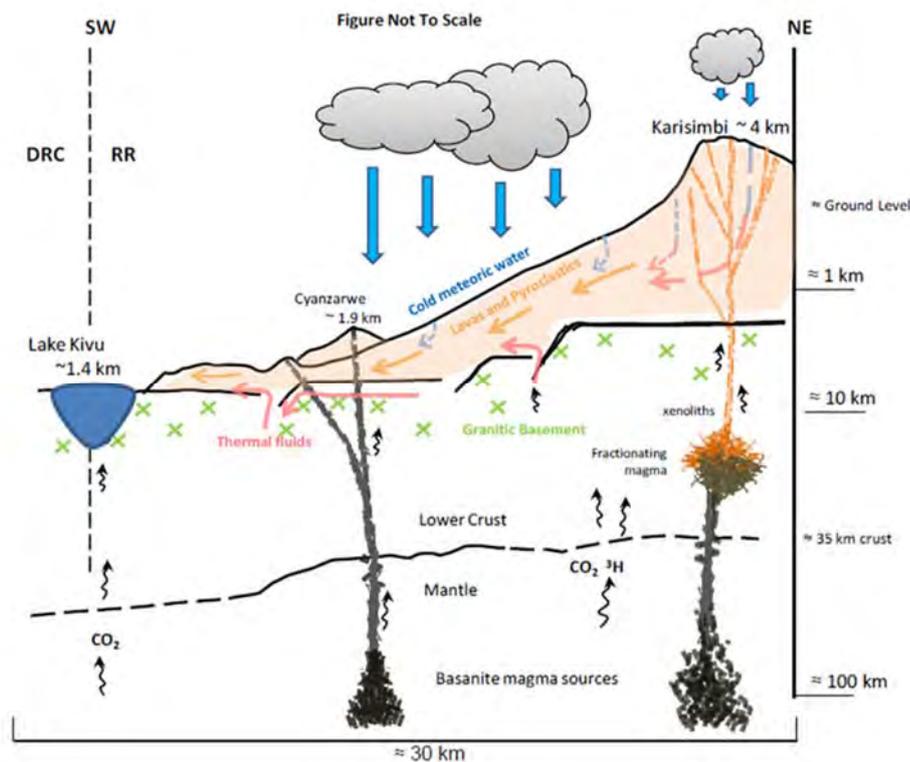
[出所] (IESE, 2012)

図 3-2.7 ルワンダ北西部に湧出する温泉・冷泉の位置



[出所] (IESE, 2012)

図 3-2.8 Karago 地域付近の温泉の流体流動モデル



[出所] (IESE, 2012)

図 3-2.9 Karisimbi 地域の地熱概念モデル

Kinigi 地域

Kinigi 地域は Visoke 火山と Sabinyo 火山との間にある。Kinigi 地域では、谷地形や火山円錐丘及び海拔 2,000～4,000m 以上の標高をもつ火山などの地形が卓越している。なお火山円錐丘とは外形が円錐形に近い形状の火山体である。

Kinigi 地域の地表地質は主に Sabyinyo 火山由来（一部は Visoke 由来）の溶岩であるが、南西縁には Karisimbi 由来の溶岩も分布している。また、Sabyinyo 火山由来であることが明白な火山泥流やデブリ（巨礫堆積物）も薄く分布している。2本の井戸（掘削深度 51m 及び 60m）が Nyange 小学校付近と Buhunge に掘削され、地表層、火山灰、溶岩及び破碎火山岩が認められたが、基盤版類には到達していない (IESE, 2012)。

本地域の地質構造の特徴として、北西－南東系、南－北系及び北東－南西系の断層が認められている。北西－南東系及び南－北系の断層は活動が古く、中期原生代基盤構造の pre-rift に関連したものと報告されている。北東－南西系の断層は最も新しい時代に活動した断層である。ただし、新期の火山岩に覆われている。リモートセンシング調査 (Jolie et al., 2009) により Kinigi 地域にこれらの断層の存在が認められている (EWSA 内部資料)。

Kinigi 地域の地熱徴候としては冷泉とトラバーチンのみが知られている。冷泉としては Rubindi 1, 2, Cyabararika 1, 2, Buseruka 1, 2 及び Nyakageni があり、トラバーチンは Mpenge 川、Kigombe 川及び Mugara 川に沿う南北と、Ruhondo 湖沿岸付近の Buseruka 川の周囲に広がっている。なお、トラバーチンとは、緻密な縞状構造を持つ化学的沈殿による石灰岩のことで、産状の 1 つとして湧泉の沈殿物がある。温泉や噴気孔、泥地または hot ground は確認されていない。また水温は 16～23.5°C の範囲である (EWSA 内部資料)。

Gisenyi 地域

Gisenyi 地域は Gisenyi 都市部から数 km 南方の Kivu 湖東側沿岸沿いの地元醸造場近くに位置し、いくつかの小さな温泉が存在する。その温泉は角レキ化した珪岩由来の Na-HCO₃ 温泉であり、その泉温は 70～75°C である。本地域の温泉水についての地化学分析結果から、地化学温度にして 150～210°C の貯留層温度を持った地熱系が存在することが示唆されている (Newell et al., 2006; BGR, 2009)。

本地域の地質構造の特徴に基づき、本地域に湧出する熱水は東アフリカ地溝帯の東側境界付近に位置する正断層に沿って垂直に上昇していると考えられている。流体は貯留層から流れる際に、低温地下水または Kivu 湖由来の水と混合している可能性が指摘されている。また温泉から噴出するガスの量が少ないことから、貯留層熱水は上昇中に脱ガスしている可能性もある。

流体流動モデルのもう 1 つの可能性として、温泉が Virunga 火山由来の高温貯留層から北部への流体流動の終点であることが考えられる。なお、Virunga 火山はコンゴ民主共和国に位置している (Chevron, 2006)。

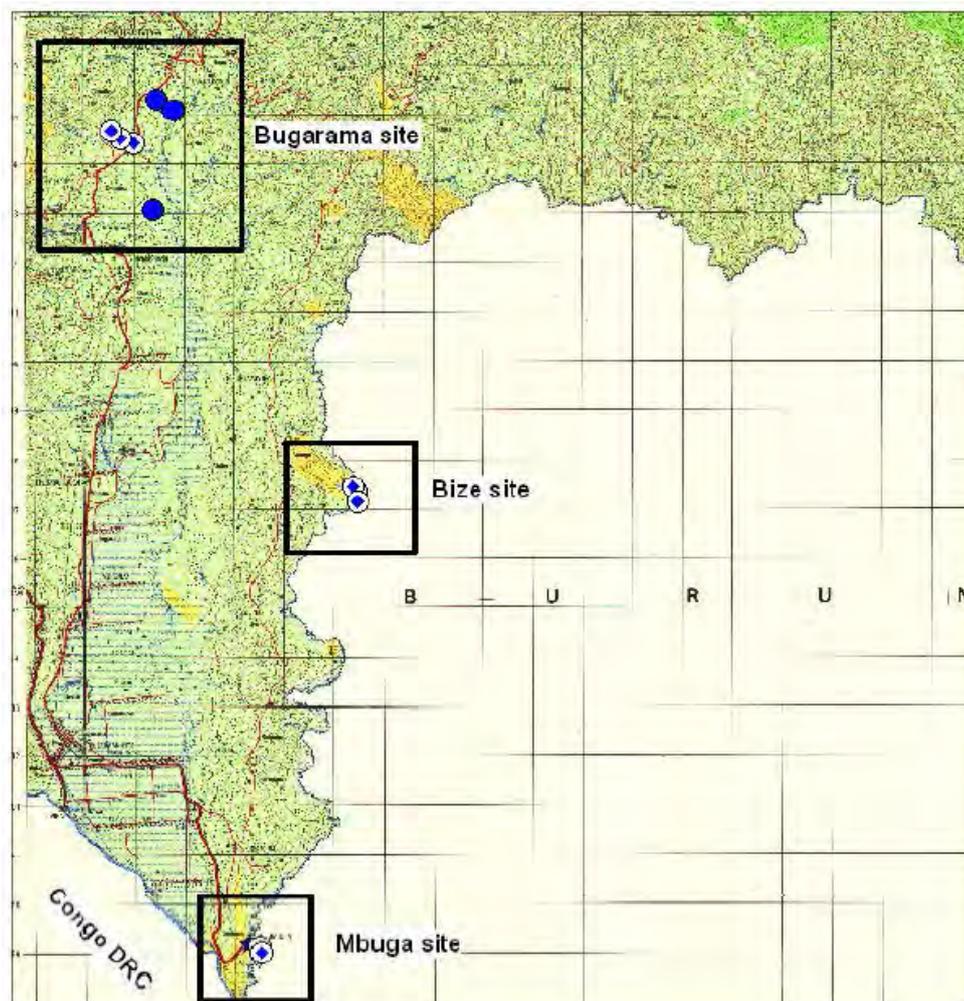
Bugarama 地域

南西部の地熱地域は東アフリカ地溝帯系が西方分岐した断層により規制されている。

Bugarama 地域は Cyangugu 都市部の約 13km 南東部、Rubyiro River valley に位置している (図 3-2.10)。Rubyiro River valley は正断層に囲まれた地溝であると考えられている。地熱徴候としては温泉や低温泉、トラバーチン堆積層が存在し、トラバーチンは近年、付近のセメント工場により採掘が行われている。温泉は地溝の西端から噴出する 50°C 以上の薄い Na-HCO₃ 温泉であり、トラバーチン堆積層の上に大きな溜まりを形成している。流量は 50L/s 以上で、大量のガスを伴っている。溜まりの縁辺沿いにあるより高温の湧出孔には赤茶色の酸化鉄が堆積している。Bugarama 地域の温泉水地化学分析によると、100～130°C の低温地熱系の存在が示唆される (Newell et al., 2006)。セメント工場のスタッフによると、トラバーチン堆積層もまた Burundi から南方向へ同様の地質構造に沿って生成している可能性がある (Chevron, 2006、Rutagarama, 2009)。

火山活動による初生玄武岩溶岩は温泉地域の南部及び西部に分布している。これら溶岩の年代は不明であるが、活動中のマグマによる地熱系の熱源とするには古すぎると考えられる

(Chevron, 2006)。Bugarama 地溝中に玄武岩が存在するにもかかわらず、その産状はマグマが熱源となり得ることを示唆しておらず、むしろ地熱流体は花崗岩や珪岩、千枚岩及び Cyangugu 複合岩体中の他の原生代の岩体の接触部中を流動している (IESE, 2011)。



[出所] (Rutagarama, 2009)

図 3-2.10 ルワンダ南西部の主要地熱地域

(2) 衛星画像解析を利用した地熱有望地域の確認

本プロジェクトにおいては、地球観測衛星が取得した衛星画像データ及び地形データ（数値標高モデル）を用いて、ルワンダ全土をカバーするベースマップを作成するとともに、地形、地質、インフラ等に関する情報を抽出した。また、既知の温泉が分布する地熱地域を対象に、高分解能及び高スペクトル分解能を有するデータを用いて、地熱兆候（変質鉱物、熱異常域）の抽出を試みた。

1) 使用データ

本プロジェクトにおいて使用するデータを以下に示す。衛星画像データに関しては、光学センサである Landsat-7/ETM+、Landsat-8/OLI/TIRS 及び Terra/ASTER データを使用した。なお、対象地域においては降水量が比較的多く、光学センサの衛星画像には雲の被覆が認められる。そこで、雲の影響を受けない合成開口レーダである ALOS/PALSAR データを併用した。また、数値標高モデルに関しては ASTER/GDEM データを利用した。更に、衛星画像データと数値標高モデルを用いた立体地形解析図を作成し、地形判読の補助資料とした。

【衛星画像データ：光学センサ】

Landsat-7/ETM+データ

Landsat-8/OLI/TIRS データ

Terra/ASTER データ

ALOS/PRISM データ

【衛星画像データ：合成開口レーダ】

ALOS/PALSAR データ

【数値標高データ】

ASTER/GDEM データ

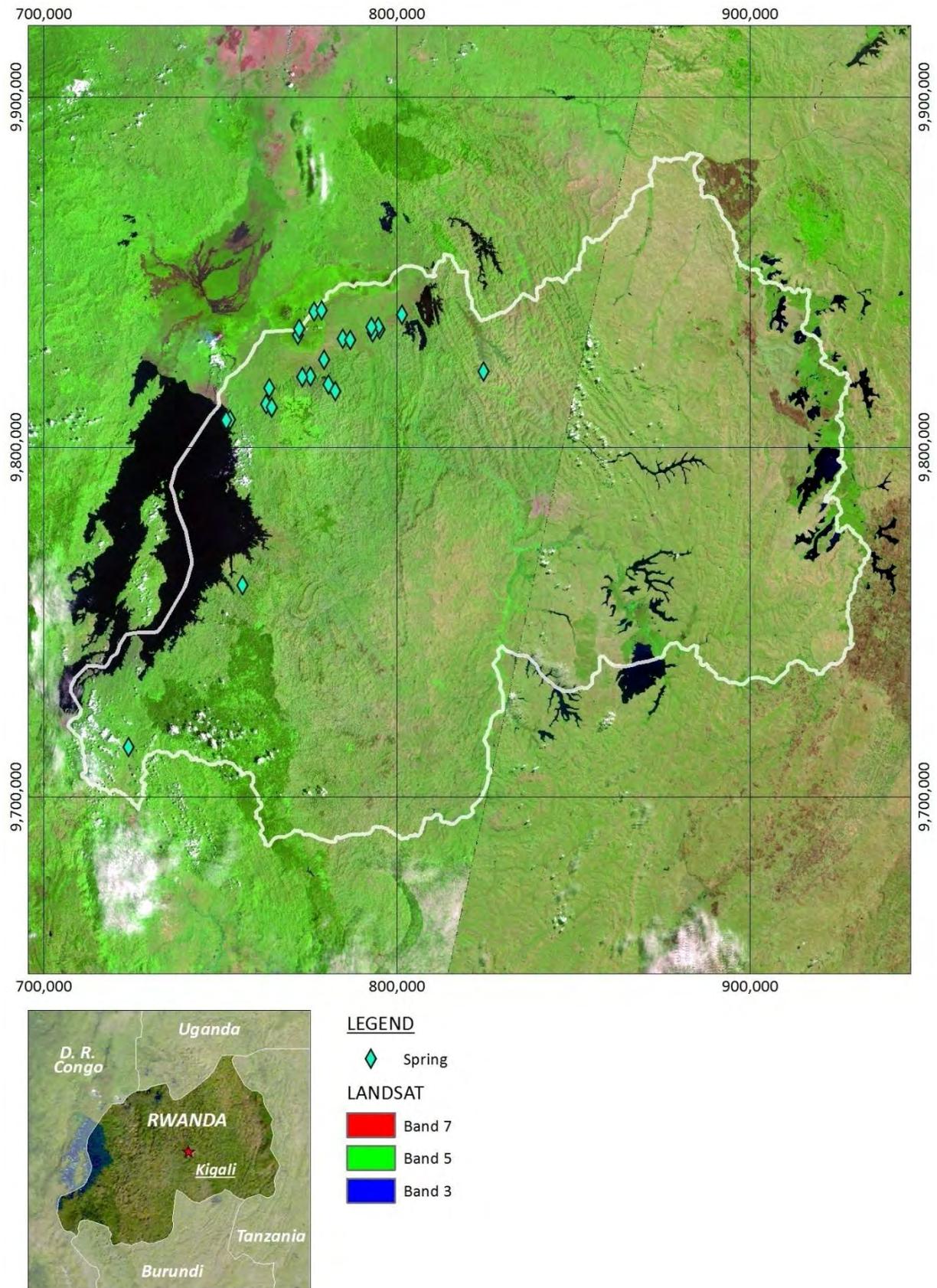
2) ベースマップの作成

ベースマップとして Landsat-7/ETM+及び Landsat-8/OLI/TIRS データによるフォールス・カラー画像（図 3-2.11）及び ASTER/GDEM データによる陰影段彩図（図 3-2.12）を作成した。また、ルワンダ全土の地形及び地質を概観するため、ASTER/GDEM データを用いた予察的な地形解析を実施した。なお、Landsat-7/ETM+及び Landsat-8/OLI/TIRS データは、米国の地球観測衛星 Landsat 7 号に搭載された光学センサ Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)、Landsat 8 号に搭載された Operational Land Imager (OLI) 及び Thermal Infrared Sensor (TIRS) によって撮影された画像データであり、Landsat-7/ETM は可視域から近赤外域、短波長赤外域及び熱赤外域に 8 つの観測波長帯（Landsat-8/OLI/TIRS は 11 の観測波長帯）を有する。また、ASTER/GDEM データは、光学センサである Terra/ASTER の立体視機能を用いて作成した数値標高モデル（Digital Elevation Model: DEM）である。なお、Landsat-7/ETM+及び Landsat-8/OLI/TIRS データは米国地質調査所（United State Geological Survey: USGS）の Web サイトより、また、ASTER/GDEM データは一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構（J-Spacesystems）の Web サイトより無償で入手することができる。

Landsat-7/ETM+及び Landsat-8/OLI/TIRS データに関しては、ルワンダ全土をカバーする 4 シーンを入手し、8 つの観測波長帯（Landsat-8/OLI/TIRS は 11 の観測波長帯）より 3 バンドを選択し、それぞれの反射強度に色の 3 原色である青、緑及び赤を割り当てることによってフォールス・カラー画像を作成した（図 3-2.11）。使用した観測波長帯のうち、近赤外域のバンド 4（Landsat-8/OLI/TIRS はバンド 5）の波長域においては、植物の反射が非常に強くなるので、同画像で植生の被覆域は明るい緑色に発色する。また、岩石や土壌の露出域は褐色～赤色～白色に、水域は黒色～暗青色に発色している。

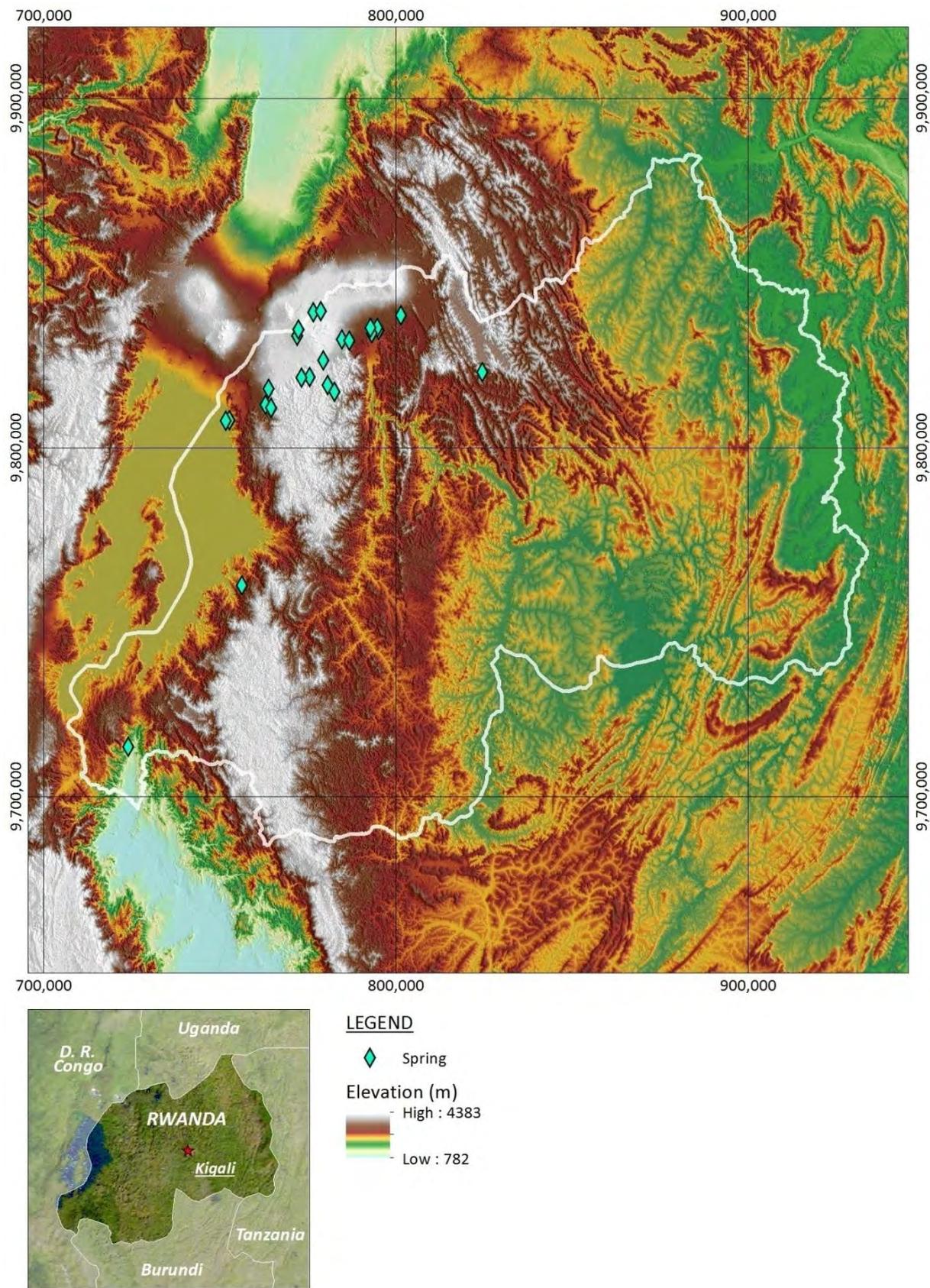
ASTER/GDEM に関しては、ルワンダ全土をカバーするデータを手入れし、地形及び地質に関する情報を収集するため、各種地形解析を実施した。地形解析の一例として、ASTER/GDEM データによる傾斜量/陰影重合図を図 3-2.13 に示す。傾斜量解析とは、DEM データの標高値を用いて地形の険しさを定量化する手法であり、地形のみならず地質構造の肉眼判読や岩相識別にも有効である。一方の陰影図は、地形を立体的に観察する地形解析手法のひとつであり、DEM データに対して光源（太陽）の方位及び角度を設定し、光源に向いている斜面を明るく、光源に背を向けている斜面を暗く表現することによって、疑似的に地形の陰影情報を得る手法である。傾斜量/陰影重合図においては、起伏のある地形や風化に対して強い地形が暗青色で表現されて

おり、ルワンダにおいて広く分布する原生代の基盤岩類の分布域と良い対応を示す。一方、コンゴ民主領内からギブ湖、ブルンジ領内に抜ける地溝帯は平坦な地形を呈しており、傾斜量/陰影重合図においては白色に発色している。また、ルワンダ北西部に分布する新生代の火山岩類（玄武岩）も白色に発色するが、火山岩体は円形もしくは環状の暗青色で表現されており、その区別は容易である。原生界基盤岩類と地溝帯及び新生界火山岩類の分布域との境界は明瞭であり、既知の温泉の分布はこの境界部もしくは火山岩体近傍に限定される（図 3-2.14 及び図 3-2.15）。以上より、地熱地域における詳細な情報抽出に関しては、地溝帯及び新生界火山岩類周辺においてのみ実施することとした。



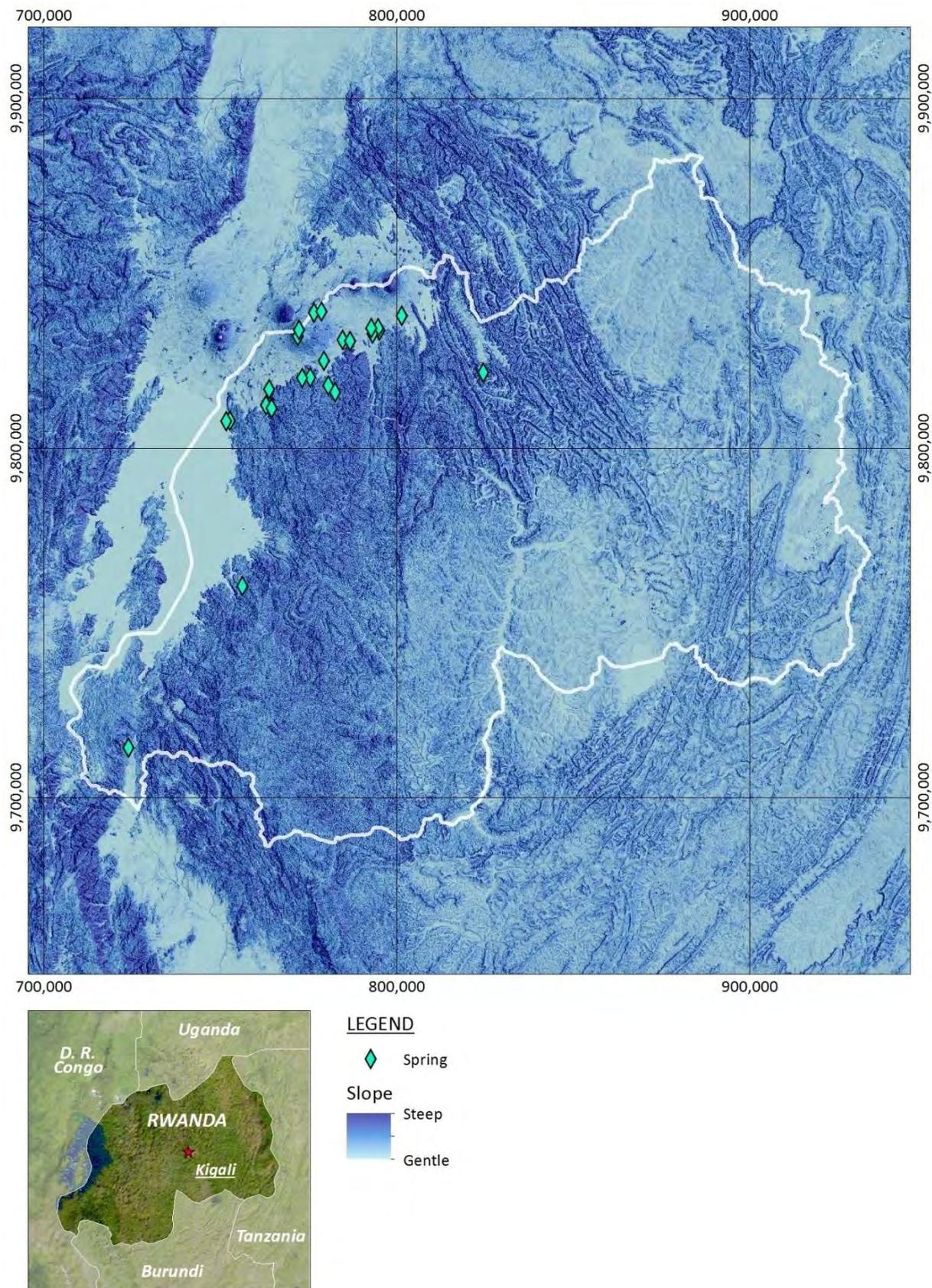
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.11 Landsat フォールス・カラー画像



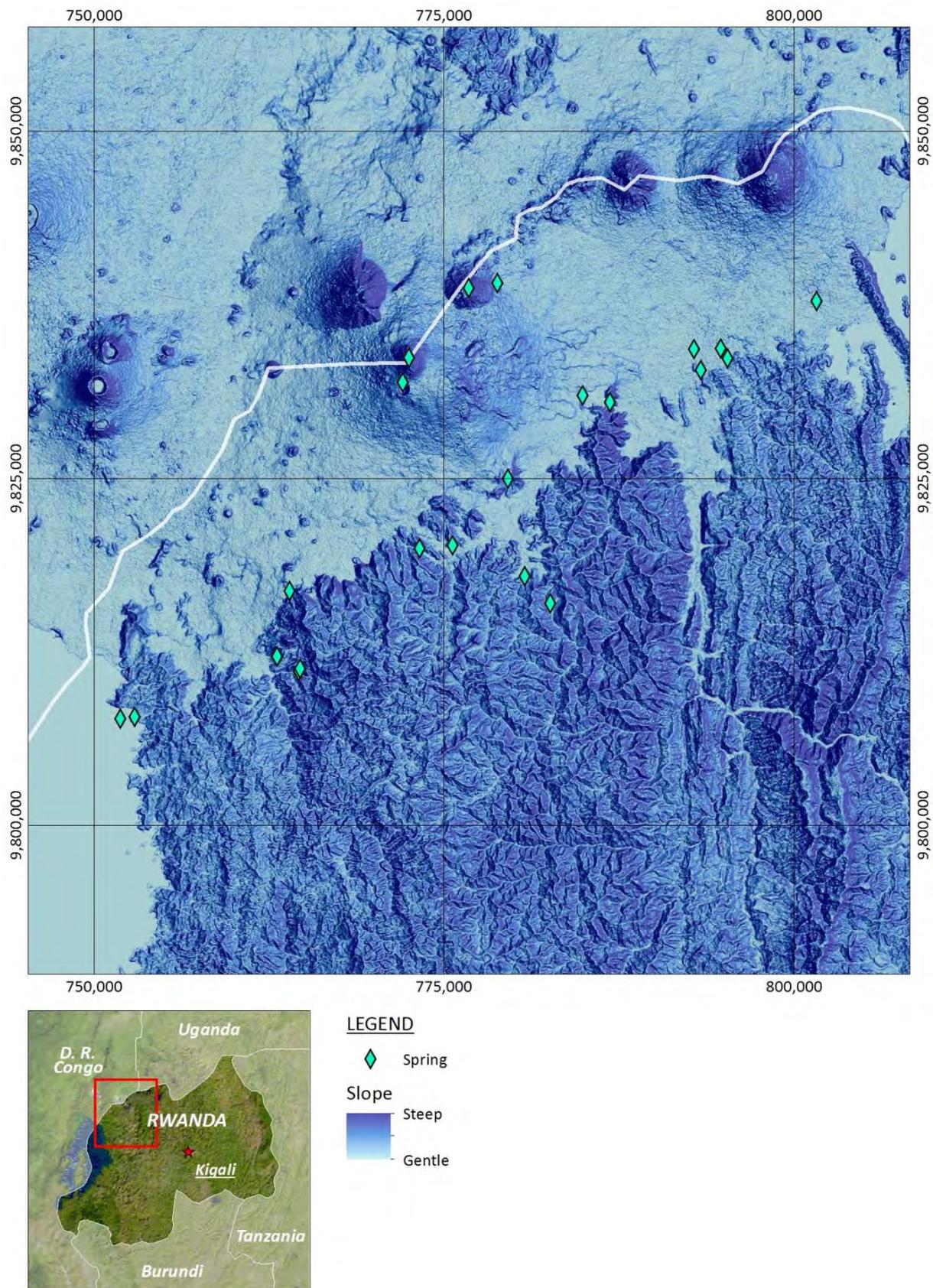
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.12 ASTER/GDEM 陰影段彩図



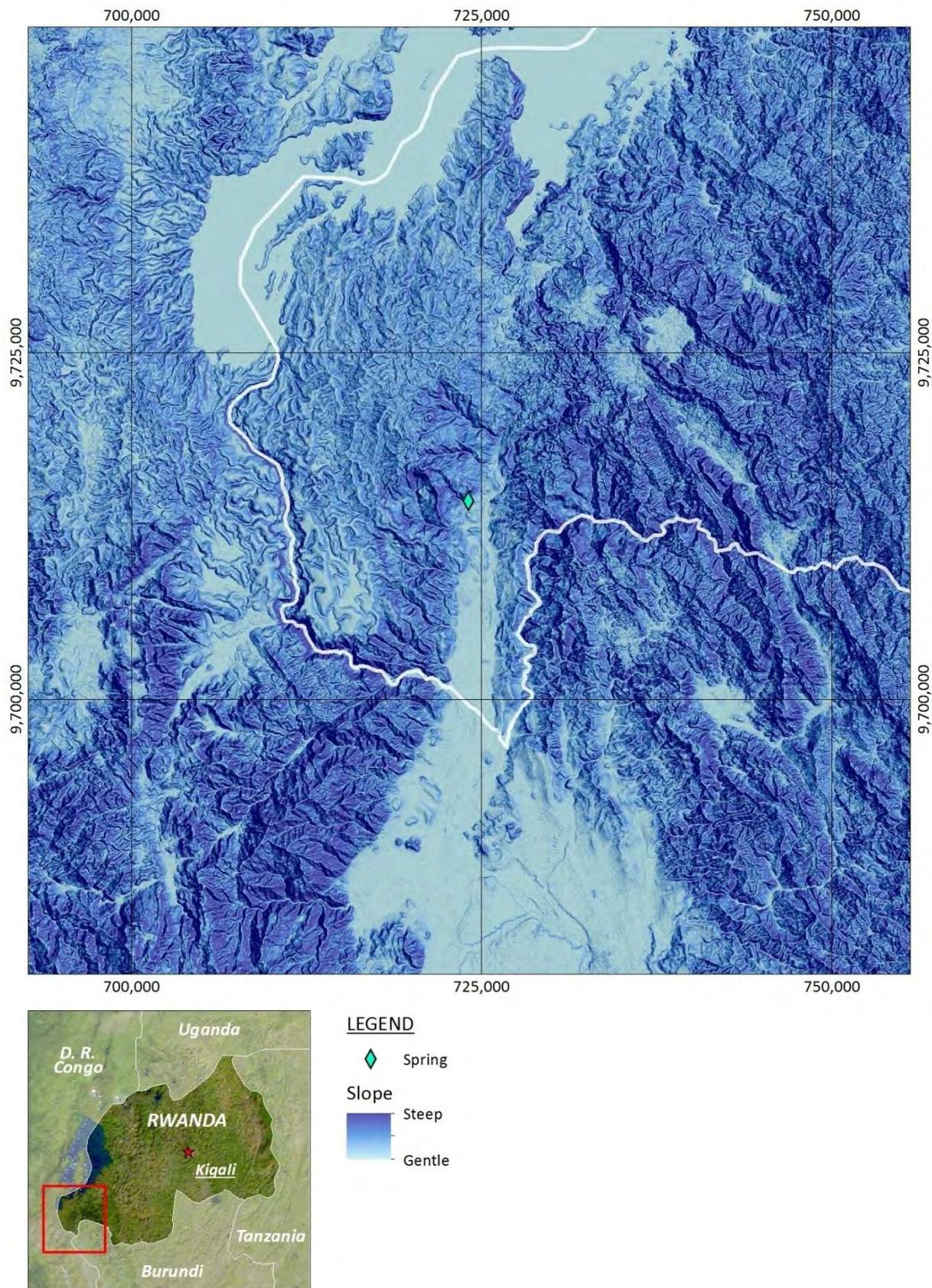
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.13 ASTER/GDEM 傾斜量/陰影重合図



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.14 ルワンダ北西部における ASTER/GDEM 傾斜量/陰影重合図



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.15 ルワンダ南西部における ASTER/GDEM 傾斜量/陰影重合図

(3) 地熱地域の GIS によるプロフィール作成

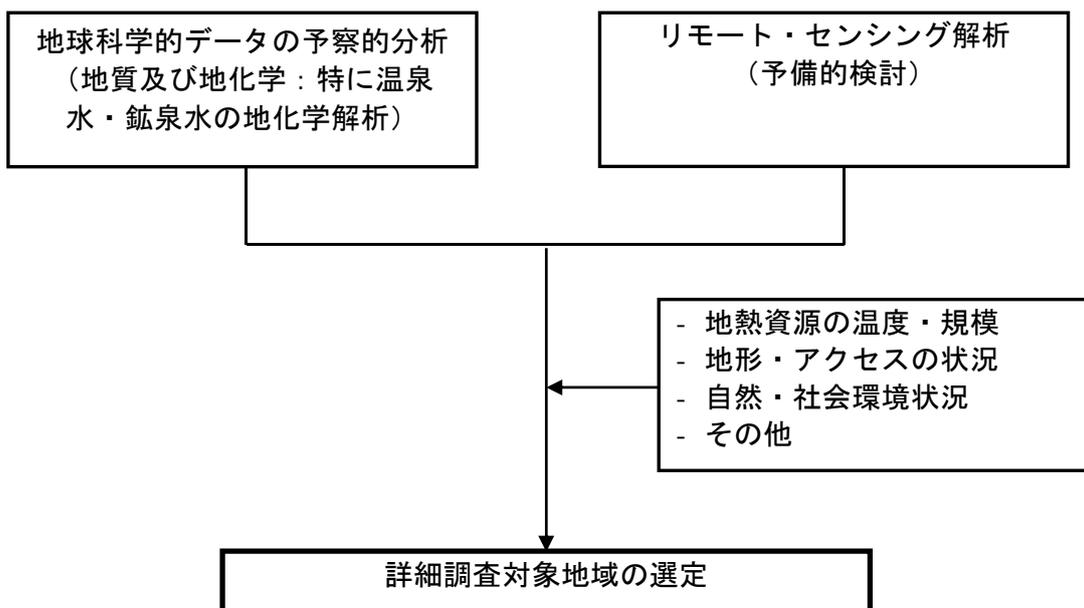
本調査では、収集した既存の情報と衛星画像データを利用した解析により、重要もしくは興味深いとされた地熱地域を対象に、抽出した情報を集約し、GIS を活用したプロフィールの作成を行った。まず、人工衛星画像を利用して各地熱有望地域の位置図を作成し、温泉・冷泉の位置を統合した。次いで、選定された地熱地域を対象に実施した各種調査結果を集約した。位置座標、地質、地質構造、火山分布、熱水変質帯・温泉・冷泉の位置、温泉の温度は GIS フォーマットに整理し、地熱開発データベースに格納した。

(4) 詳細調査対象地域の選定

既存データレビュー及び予察的リモート・センシング解析結果に基づき、詳細調査対象地域の選定を以下のとおり行った。「詳細調査対象地域」とは、地熱資源の有望性及び地熱開発の進展の可能性の観点から重要もしくは興味深いと考えられる地域として選定した。本調査の詳細調査対象地域とは、より精度の高い地熱ポテンシャル評価を実施する対象地域を意味するものである。そのために、抽出された地域において、ポテンシャル評価に必要な各種調査や解析を本調査で実施した。選定フローを図 3-2.16 に示す。また、詳細調査対象地域選定のために検討・評価した 4 つの項目を表 3-2.1 に示す。

ルワンダの地熱資源に係る既存情報に基づく作業の最初として、既往の調査・検討によって地熱資源有望性の観点から重要もしくは興味深いとされた地熱地域や地熱地帯に関するレビューを前節で行った。前節で述べたように、重要な地熱地帯は、ルワンダ北西部にその多くが認められている。これまでの調査関係者は、ルワンダの以下の地熱地帯を重要な地域と位置づけている。これらの地域では各種地表調査が実施されているとともに、Karisimbi 地域では地熱調査井が掘削されている。このように、これら 4 つの地熱地域はルワンダの主要な地熱地域と位置づけられており、本調査でもこれらの地域を詳細調査対象地域として取り扱い、より詳細な検討を行う。

- Karisimbi
- Kinigi
- Gisenyi
- Bugarama



[出所] JICA調査団で作成

図 3-2.16 詳細調査対象地域の選定手順フロー

表 3-2.1 詳細調査対象地域選定のための検討・評価項目

項目	内容
1. 地熱開発進捗状況	進捗状況は次の段階に区分： - 初期調査 - 精密地表調査 - 地熱井掘削調査 - 今後調査実施の計画の有無
2. 地熱資源	- 地熱貯留層の存在確認 - 現在の地熱活動（温泉・噴気帯の存在） - 過去（から現在まで）の地熱活動（熱水変質帯の存在） - 火山活動や地熱系の熱源の存在 - 地熱流体の流動を規制する地質構造の存在
3. 自然・社会環境	- 保護林・国立公園 - 社会環境上の制約
4. 地形・アクセス	- 地形 - アクセス道路、その他インフラストラクチャー

[出所] JICA調査団で作成

ルワンダの地熱地域すべてが調査の段階であり、開発段階（地熱発電所建設段階）にある地域はない。主要な地熱地域ではすでに初期調査は完了している。Karisimbi、Kinigi 及び Gisenyi 地域では、地質・地化学調査及び MT/CSMT 探査（物理探査）の精密地表調査が実施済みである。ただし、重力探査及び磁気探査が実施された地域はない。空中重力探査及び空中磁気探査がルワンダ全域をカバーする形で実施されているものの、主要な地熱地域はその探査の範囲外となっており、主要な地熱地域において利用可能な重力探査・磁気探査のデータはない。地熱井掘削に関しては、Karisimbi 地域ではこれまで2本の地熱調査井の掘削が完了しているが、地

熱発電に適した地熱貯留層の存在は確認されていない。詳細調査対象地域選定のための検討・評価項目のうち、以上が「地熱開発進捗状況」である。以下に、「地熱資源」、「自然・社会環境」及び「地形・アクセス」の状況をまとめる。

1) 地熱資源

i) 地質データの予察的分析

表 3-2.2 に、各地熱地域に関する地質、地質構造及び火山活動の概要を取りまとめた結果を示す。

表 3-2.2 主要地熱地域における地質状況に関するレビュー結果

Field Name	Geology	Geological structure	Surface hydrothermal alteration	Fumarole, Hot spring	Volcanism
Karisimbi	Surface to few hundred meters: Tephrite-basanite and trachy-andesites lavas and pyroclastic rocks Basement: Proterozoic granites with pegmatite lenses and spatially related gneisses	NE-SW trending faults and NW-SE trending faults	None	None*1)	
Kinigi	Surface to few hundred meters: Tephrite-basanite and trachy-andesites lavas and pyroclastic rocks Basement: Proterozoic granites with pegmatite lenses and spatially related gneisses	Regional geological structure: the field is located in a NW-SE fracture zone between the Visoke and Sabinyo Volcanoes. The tectonic features are materialized by NW-SE, N-S and NE-SW trending faults.	None	None	Located in the chain of Quaternary volcanoes, Karisimbi, Visoke, Sabinyo, Gahinga, and Muhabura, along the Rwanda-Uganda-Congo border (the East Virunga Range). Some have had historic eruptions (Visoke and Muhabura, for example)
Gisenyi	(Tephrite-basanite and trachy-andesites lavas and pyroclastic rocks: thinner or absent) Basement: Proterozoic granites with pegmatite lenses and spatially related gneisses	The field is located in normal fault zone near the eastern boundary of the East African Rift.	None	Hot spring (Na-HCO ₃ type) : 70 - 75°C	
Bugarama	Tertiary volcanic rocks (basaltic lavas) are at both south and west of the hot spring area. Basement: granites, quartzites, phyllites and other Proterozoic rocks belonging the Cyangugu Complex	The field is located at graben formed by normal faults.	Travertine	Hot spring (Na-HCO ₃ type) : 50 - 65°C	Tertiary volcanic rocks are in the field, but no data of the age. Toshibinda volcano (in DR Congo) is located 40km NW of Bugarama hot spring

1) There is a possibility of that hot spring and hydrothermal alteration occurs at Bonde crater in Karisimbi (EWSA staff's comment)

[出所] JICA調査団で作成

地熱系の熱源の観点からは、第四紀後期以降の火山活動のある北西部の地熱地域が最も興味深い地域であり、そこでは資源ポテンシャルが高い地熱地域が存在する可能性がある。南西部の Bugarama 地域には新しい火山活動は存在しておらず地表に湧出する温泉の熱源は現時点では詳細はわかっていない。

前節で記述したとおり、これら重要とされる 4 地域の地質は、地表付近～深度数 100m から基盤岩の変成岩から成る。変成岩が分布する地域では、地熱流体が流動・貯留される高い透水性を有する地質構造は、一般には断裂と考えられる。特に断層は、垂直方向に高い透水性を与えるため、断層の存在の有無は、地熱資源を評価する上では重要な項目となる。断層の存在に関する詳細な検討は今後、実施される予定であるが、これまでの調査において、地形や地表地質のデータ、また、物理探査データからいくつかの断層の存在が推定されている。南西部の Bugarama 地域においても、断層の存在が推定されている。

衛星画像解析の結果、既知の温泉の分布は、原生界基盤岩類と地溝帯及び新生界火山岩類の分布域との境界部もしくは火山岩体近傍に限定されることが確認された (図 3-2.14 及び図 3-2.15)。

以上の衛星画像解析及び既存地質データのレビューに基づくと、地溝帯及び新生界火山岩類

周辺域がルワンダの地熱地域として最も興味深い地域として抽出される。

ii) 地化学データの予察的分析

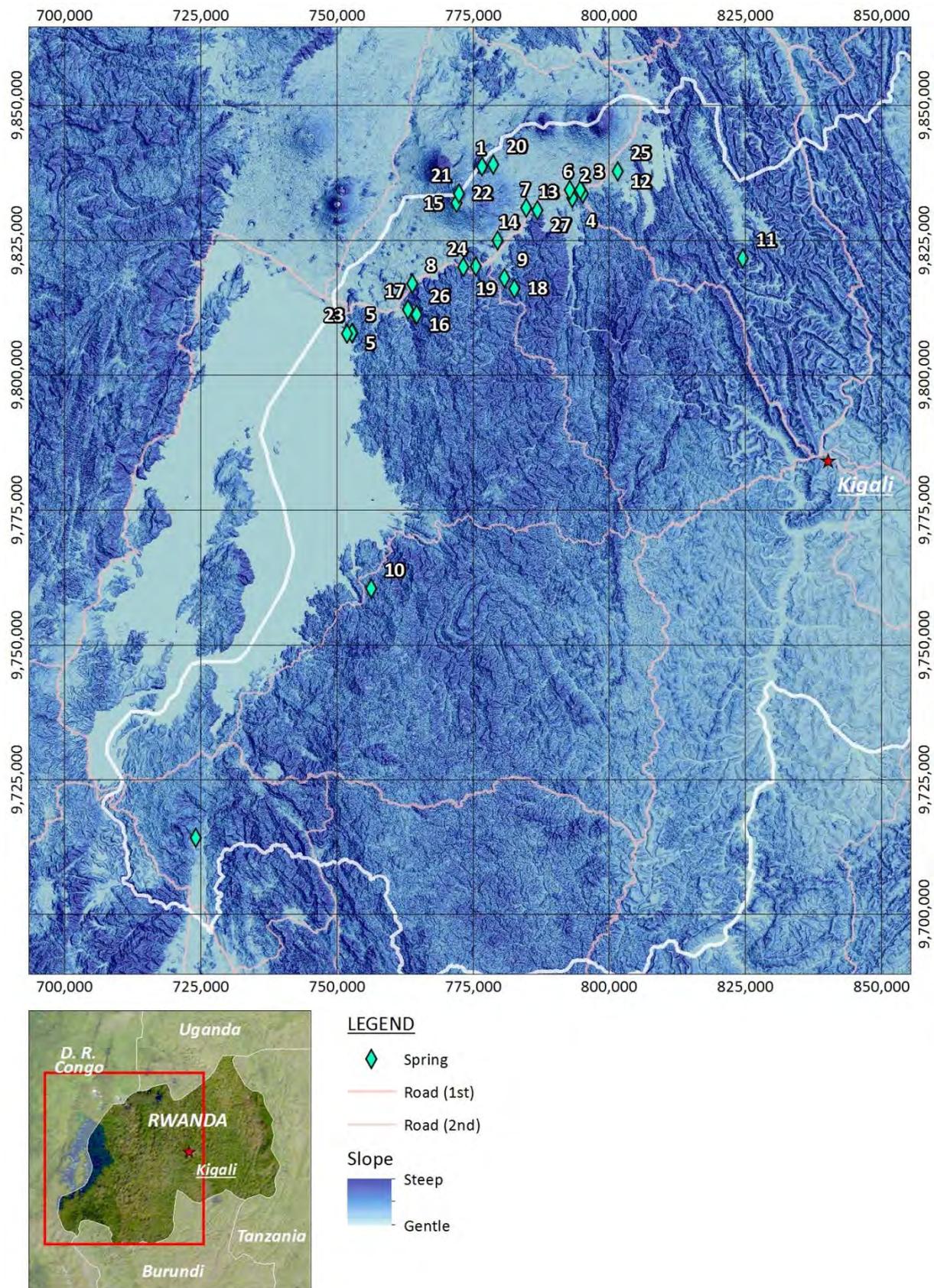
地熱資源探査の初期段階においては、地表の温泉水や鉱泉水に係る地化学的な解析・評価が、資源の評価において最も有効であると考えられる。地化学的な解析・評価により、高温の地熱水の存在やその地下での温度に関する推定が可能となる。EWSA から提供された温泉水・鉱泉水の既存化学データを用いて、以下のとおり予察的な地化学解析を実施した。

a) 地化学調査に係る情報収集・整理

既存調査による地化学調査関係のデータは、温泉水・地表水の地化学データ、土壌ガス調査結果がある。

既存調査による温泉水・地表水の地化学データは、Chevron (2006) と BGR (2009) にまとめられている。Chevron (2006) では地化学調査により、ルワンダ北西部地区 (Gisenyi) と南部地区 (Mashyuzza) において地熱ポテンシャル評価を行った。BGR (2009) ではルワンダ北部の Virunga 地域の地熱ポテンシャル評価を実施した。試料採取地点を図 3-2.17 に、主要成分の化学組成を表 3-2.3 に示す。主要イオンによる陽イオンと陰イオンのイオンバランスは良いので、分析結果は信頼性があると考えられる。BGR (2009) では温泉付随ガスの分析も実施している。ガス組成を表 3-2.4 に示す。

土壌ガス調査は BGR (2009) と KenGen (2010) により実施されている。BGR (2009) では有望地域をほぼ網羅する 500km² におよぶ地域 (845 地点) で、CO₂、CH₄、H₂S と微量含まれる He、Ar、ラドンガス測定が実施された。KenGen (2010) では Karisimbi 火山の南部の 300km² において 140 地点について CO₂、ラドンと試験的に Hg 測定が実施された。CO₂ ガス調査結果を図 3-2.18 に示す。CO₂ ガス異常は Gisenyi から Kinigi にかけて広範囲に広がっている。この分布について IESE (2012) は Karisimbi 火山直下のマグマを起源として広がっていることを示すものではないとしている。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.17 温泉・湧水・地表水位置図

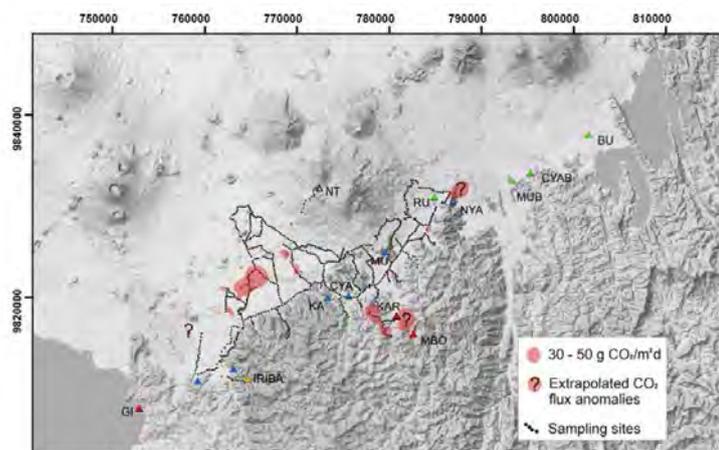
表 3-2.3 温泉水・地表水の化学・同位体組成一覧表

Ser. No.	No.	Name	x	y	m asl	T	E.C.	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	B	SiO ₂	δD	δ ¹⁸ O	Tritium	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Refer.
						°C	μS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	‰	‰	(TU)		
1	5	Gisenyi	752918	9807842	1454	68	2450	7.4	495	38.2	35.3	11.2	195	55.8	1140	2.14	56.2	-9.7	-3.5	0.03	0.7671	1
2	9	Karago	780826	9817960	2288	64.1	1250	7.2	253	14.7	21.2	2.4	76.6	77.9	537	0.34	84	-12.4	-3.72	0.07	0.7844	1
3	-	Mashyuza	-	-	-	47	-	6.5	307.8	48	76	55	128	46	1061.7	4.5	75.1	-	-	-	-	2
4	11	Bitagata	824694	9821590	1859	36.6	458	7.1	5.9	9	38.3	31	5	7.68	289	0.07	23.2	-16.6	-4.17	-	-	1
5	18	Mbonyebyombi	782654	9816022	2220	34.5	921	7	187	11.5	20.2	2.4	51.8	44.2	414	0.22	60.3	-12.8	-3.86	0.3	0.7893	1
6	10	Mpatsi	756430	9760506	1698	31.2	1670	7	208	23.1	144	16.8	40.8	31.2	1050	1.28	86.3	-11.2	-3.61	-	-	1
7	16	Iriba	764682	9811128	2016	22.3	2290	7	394	17.2	76.6	23.2	287	67	846	0.42	58.3	-8.8	-3.44	0.42	0.8004	1
8	25	Nyakageni	-	-	1878	20.5	-	7.3	229	43.1	71.3	23.2	72.6	31.5	854	-	62.7	-	-	-	-	1
9	12	Buseruka	801673	9837772	1823	17.4	4080	6.5	239	226	149	356	12.9	69.4	3200	0.43	99.8	-11.8	-4.32	0.05	0.7065	1
10	4	Mubona	793373	9832788	1803	19.5	3050	6.7	160	180	112	225	22.3	41.4	2200	0.28	72.1	-10.5	-3.77	0.3	0.7069	1
11	2	Cyabararika	795307	9833654	1816	18.5	2880	6.4	157	159	121	204	7.6	44.6	2100	0.25	69.2	-9.5	-3.77	0.3	0.7071	1
12	7	Rubindi	784924	9831002	2104	18	1960	7.1	105	114	32.9	145	14.7	12.2	1320	0.17	94.3	-10	-3.63	0.05	0.7086	1
13	14	Mutera	779612	9824965	2383	17.4	215	7.4	4.5	5.1	21.6	9.9	2.6	6.51	91.2	0.02	55.7	-9.6	-3.02	1.92	0.7086	1
14	17	Bukeri	-	-	-	-	247	7.5	9.9	9.3	21.3	9.4	5.6	16.1	98.3	0.02	57.4	-5	-2.72	1.89	0.7115	1
15	19	Cyamabuye	775639	9820169	2361	16	442	7	13.9	21.3	34.9	17.4	12.5	24.6	158	0.04	47.7	-7.1	-2.77	-	-	1
16	24	Kagohe	-	-	-	-	456	7	19.2	6.2	46.6	15.3	11.7	34	166	0.03	41.3	-9.3	-3.36	1.63	0.7264	1
17	1	Bisoke crater lake	776795	9838704	3586	10.2	28	4.5	0.5	1.3	0.6	0.3	1.5	1.47	3.5	<0.01	2.1	-3.9	-2.29	-	-	1
18	3	Mpenge River	794832	9834356	1824	15.5	757	7	37.7	52	28.3	44.8	4.4	7.15	478	0.04	52.6	-8.8	-3.52	-	-	1
19	8	Mutura waterfall	764004	9816898	2245	16.1	190	6.9	7.1	7.9	15.9	7.7	3.4	15.8	78.3	0.01	35.6	-5.9	-2.97	-	-	1
20	20	Bushokoro (Bisoke)	778849	9839060	2678	11.4	94	6.7	4.2	4.8	8	3.4	1	2.68	51.9	0.02	36.8	-10.6	-3.77	-	-	1
21	15	Ntango (Karisimbi)	772094	9831936	3574	10.9	37	7.3	1.2	2	2	0.9	2	6.5	6	0.02	13	-5.8	-2.98	-	-	1
22	23	Lake Kivu	-	-	-	-	1189	9	102	83.9	9.3	78.1	25	16.6	780	0.15	7.3	-	-	-	-	1
23	6	Rainwater Ruhengeri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.7	-2.18	-	-	1
24	21	Karisimbi, partly	772561	9833680	4516	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-99.7	-14.63	-	-	1
25	22	Karisimbi, completely	751898	9807709	1468	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-97.5	-14.22	-	-	1

表 3-2.4 ガス組成一覧表

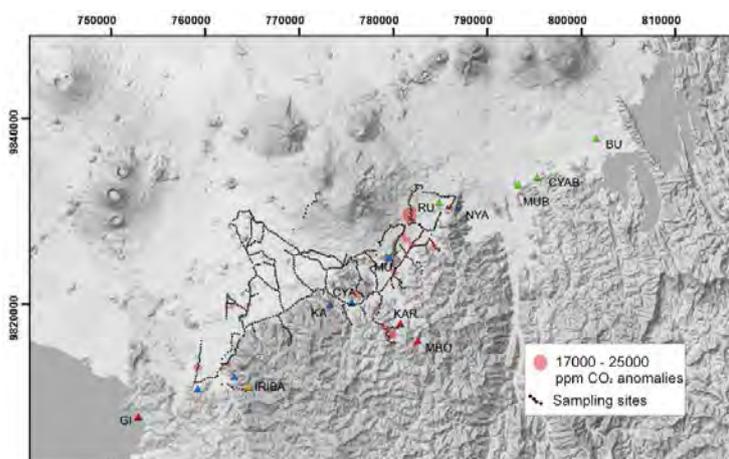
Ser. No.	No.	Name	³ He/ ⁴ He	N ₂	O ₂	CO ₂	δ ¹³ C	CH ₄	Refer.
				vol%	vol%	vol%	‰	ppm	
1	5	Gisenyi	2.30E-07	23.8	5.7	70.1	-8.0	2881	1
2	9	Karago	1.01E-09	39.2	3.1	57.1	-9.5	5705	1
3	18	Mbonyebyombi	1.02E-07	76.7	7.4	15.7	-13.3	944	1
4	16	Iriba	1.18E-07	54.4	4.5	41.0	-11.5	202	1
5	25	Nyakageni	1.29E-06	7	2.1	90.9	-5	96	1
6	12	Buseruka	1.87E-06	5.7	1.8	92.5	-9.6	5	1
7	4	Mubona	-	15.9	4.1	80	-9	99	1
8	2	Cyabararika	2.46E-06	12.9	3.1	84	-8.4	30	1

- Hot spring (High temp.)
 - Hot spring (Low temp.)
 - Cold spring (High HCO₃)
 - Cild spring
 - Surface/Rain water
- Reference
1: BGR (2009)
2: Chevron (2006)



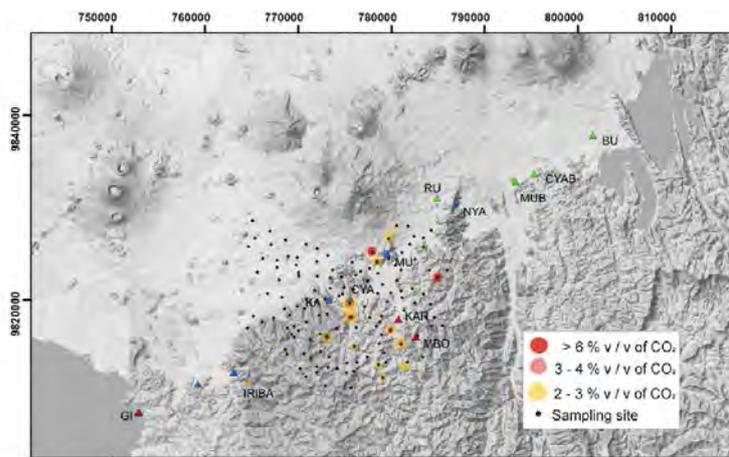
[出所] BGR (2009)

(1) 地表における CO₂ 濃度分布



[出所] BGR (2009)

(2) 土壌ガスにおける CO₂ 濃度分布



[出所] Kengen (2010)

(3) 土壌ガス中の CO₂ 濃度分布図

図 3-2.18 CO₂ ガス調査結果

b) 地化学調査に係る予備的検討

温泉水及び地表水の化学組成

既存調査結果を用いた予備的検討を温泉水・地表水の分析データを用いて実施した。

本地域の温泉水はほぼ中性で HCO_3 型を示し (図 3-2.19)、泉温及び HCO_3 含有量により 4 タイプに区分される (表 3-2.5)。

➤ 高温温泉 (タイプ I)

Gisenyi、Karago、Mashuza がこのタイプに属する。中性で泉質は HCO_3 型で、陽イオンは $\text{Na}+\text{K}$ から成る。泉温は 47°C 以上を示し、最高温度は Gisenyi の 68°C である。Cl 濃度が比較的高く、Gisenyi が 195mg/L である。

➤ 低温温泉 (タイプ II)

Bitagata、Mbonyebyombi、Mpatsi、Iriba、Nyakabeni がこのタイプに属する。中性で泉質は HCO_3 型で、陽イオンはほとんどが $\text{Na}+\text{K}$ から成る。泉温は約 $20\sim 37^\circ\text{C}$ とタイプ I より低い。Cl 濃度は Iriba で 287mg/L とタイプ I と同程度を示すが、その他の温泉では低い。

➤ 高 HCO_3 湧水 (タイプ III)

Buseruka、Mubona、Cyamabuye、Kagohe がこのタイプに属する。中性で泉質は HCO_3 型、陽イオンは $\text{Ca}+\text{Mg}$ から成る。水温は $17.5\sim 19.5^\circ\text{C}$ と低いが、 HCO_3 の含有量が $1,320\sim 3,200\text{mg/L}$ と高いことが特徴である。

➤ 低 HCO_3 湧水 (タイプ IV)

Mutera、Bukeri、Cyamabuye、Kagohe がこのタイプに属する。中性で泉質は HCO_3 型、陽イオンは $\text{Ca}+\text{Mg}$ から成る。本地域の平均的な地下水と考えられるが、 HCO_3 がやや高い濃度 (166mg/L) を有する箇所がある。

地表水では Mpenge River と Lake Kivu の HCO_3 濃度はそれぞれ 478mg/L 、 780mg/L と高濃度である。

温泉ガス組成

高 HCO_3 湧水 (タイプ III) の Buseruka、Cyabaratika、Munona と Nyakageni は CO_2 ガス含有量が異常に多く $80\sim 92\%$ を示している。この CO_2 ガスは低 CH_4 濃度や $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$ 、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ より、深部地殻あるいはマントル起源であることを示している (IESE,2012)。

同位体組成

➤ 水素・酸素同位体組成

水素・酸素同位体組成はほとんどの温泉水・地表水でウガンダの地域的な天水ライン (Bahati,2005) や局地的な天水ライン (JICA,2013) から負の同位体シフトを示している (図 3-2.20)。この原因については明らかにされていないが、今後の調査により検討する必要がある。

➤ トリチウム濃度

トリチウム濃度は高トリチウム濃度と低トリチウム濃度の 2 つに区分される (図 3-2.21)。低 HCO_3 湧水は 1.63TU と高トリチウムを示し、循環時間が短いと推定される。一方、温泉及び高 HCO_3 の湧水は 0.42TU 以下の低トリチウム濃度を示して、循環時間が長いと推定される。この中でも高温の Gisenyi と Karago は 0.07TU 以下の特に低いトリチウム濃度を示している。温度の低い Mbonyebyombi と Iriba はややトリチウム濃度は高く、地表水により希釈されていると考えられる。また、高 HCO_3 の Buseruka と Rudindi も 0.05TU と低トリチウム濃度を示し、循環時

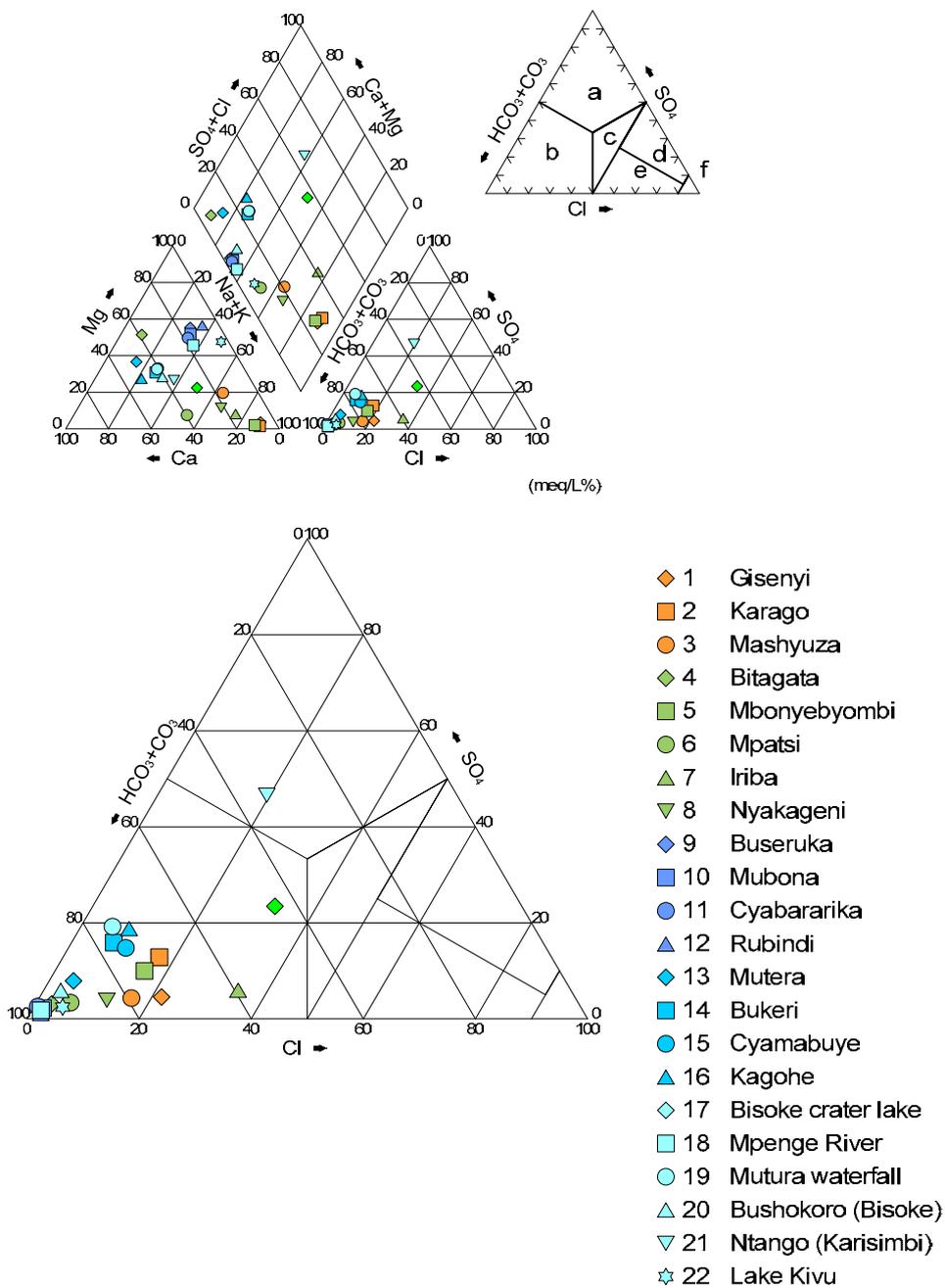
間が長いことを示している。

➤ ストロンチウム同位体

ストロンチウム同位体は高 Sr 同位体と低 Sr 同位体に区分される (図 3-2.22)。高 Sr 同位体 (0.76 以上) はタイプ I と II に区分される温泉の Gisenyi、Karago、Mbonyebyombi、Iriba が相当する。低 Sr 同位体はタイプ III と IV の湧水が相当する。ストロンチウム同位体は流体を涵養している母岩の地層を反映する。Virunga 火山岩類のストロンチウム同位体は 0.7060~0.7100 である (Rogers et al., 1998)。Type III の高 HCO₃ 湧水の値は 0.7065~0.7086 とそれらの値に近く、火山岩から湧出していることと調和的である (IESE, 2012)。基盤岩のストロンチウム同位体の値は Kibiro 近辺のウガンダで測定された片麻岩が 0.784 (Bahati et al., 2005)、先原生代の花崗岩の値がやや低い 0.726 でタイプ IV の Kagohe の値とほぼ同じである。タイプ I と II の温泉は 0.767~0.800 と高く、流体流動は片麻岩中で生じていることを示している (IESE, 2012)。

地化学温度

地化学温度一覧を表 3-2.6 に示す。Na-K-Mg 三成分 (図 3-2.23) によれば地化学温度は、マグネシウム (Mg) 濃度が高く未平衡である。カルシウムを加味した Na-K-Ca 温度は、温度の高い温泉 (Gisenyi、Karago、Mashyuza) は 159~204°C を示している。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.19 温泉・地表水のトリリニアダイアグラム

表 3-2.5 温泉・地表水の総括表

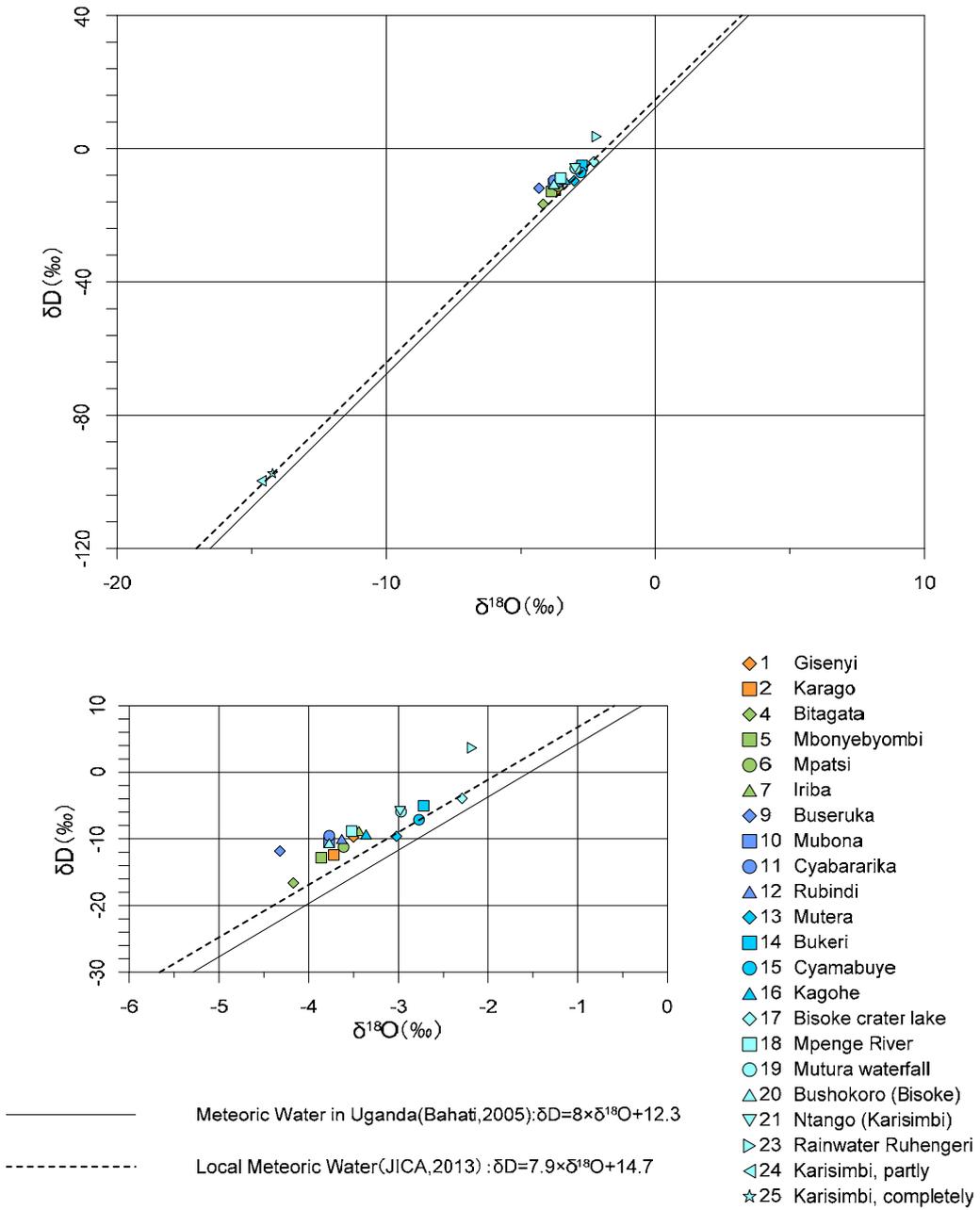
Type	Temp. (°C)	pH	E.C. (μ S/cm)	Chemical Composition		Cl (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Tritium (TU)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
				Cation	Anion				
I Hot Spring (High Temp.)	47.0-68.0	6.5-7.4	1250-2450	Na+K	HCO ₃	76.6-195	537-1140	0.03-0.07	0.767-0.784
II Hot Spring (Low Temp.)	20.5-36.6	7.0-7.3	458-2290	Na+K	HCO ₃	5-287	289-1050	0.3-0.42	0.790-0.800
III Cold Spring (High HCO ₃)	17.4-19.5	6.4-7.1	1960-4080	Ca+Mg	HCO ₃	7.6-22.3	1320-3200	0.05-0.3	0.707-0.709
IV Cold Spring (Low HCO ₃)	16.0-17.4	7.0-7.5	215-456	Ca+Mg	HCO ₃	2.6-12.5	91.2-166	1.63-1.92	0.709-0.726

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.6 地化学温度一覧表

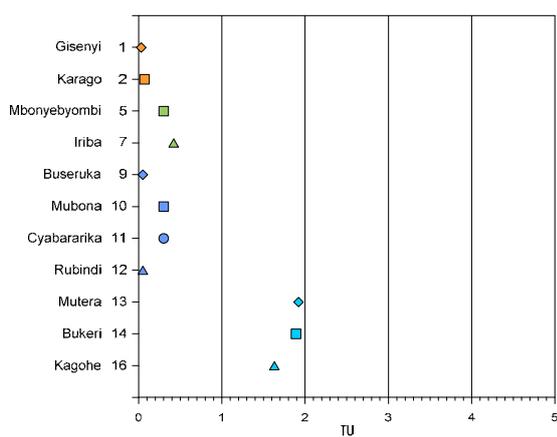
Ser. No.	Name	Temp. °C	SiO ₂ (adia.)	SiO ₂ (cond.)	SiO ₂ (chalc.)	Na-K (Truesdell,1976)	Na-K (Fournier,1979)	K-Na (Giggenbach,1992)	Na-K-Ca (Truesdell,1975)	K-Mg (Giggenbach,1992)
			°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	Gisenyi	68.0	107	107	78	161	196	212	181	98
2	Karago	64.1	125	128	100	136	174	192	159	93
3	Mashyuza	47.0	120	122	94	241	258	270	204	83
4	Bitagata	36.6	74	69	37	-	-	-	52	52
5	Mbonyebyombi	34.5	110	111	82	140	179	196	157	87
6	Mpatsi	31.2	126	129	102	199	226	241	91	80
7	Iriba	22.3	109	109	80	113	155	174	142	69
8	Nyakageni	20.5	112	113	84	267	278	288	211	91
9	Buseruka	17.4	133	137	110	-	-	-	-	99
10	Mubona	19.5	118	120	91	-	-	-	-	99
11	Cyabararika	18.5	116	118	89	-	-	-	-	97
12	Rubindi	18.0	130	134	107	-	-	-	-	93
13	Mutera	17.4	107	107	77	-	-	-	-	52
14	Bukeri	-	108	108	79	-	-	-	-	65
15	Cyamabuye	16.0	101	100	70	-	-	-	-	77
16	Kagohe	-	95	93	63	-	-	-	-	51

[出所] JICA 調査団で作成



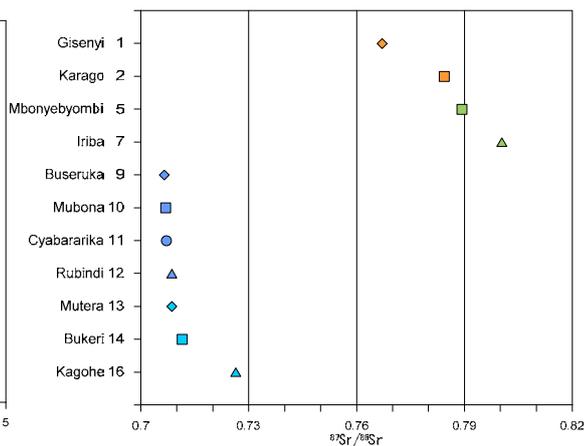
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.20 水素・酸素同位体組成図



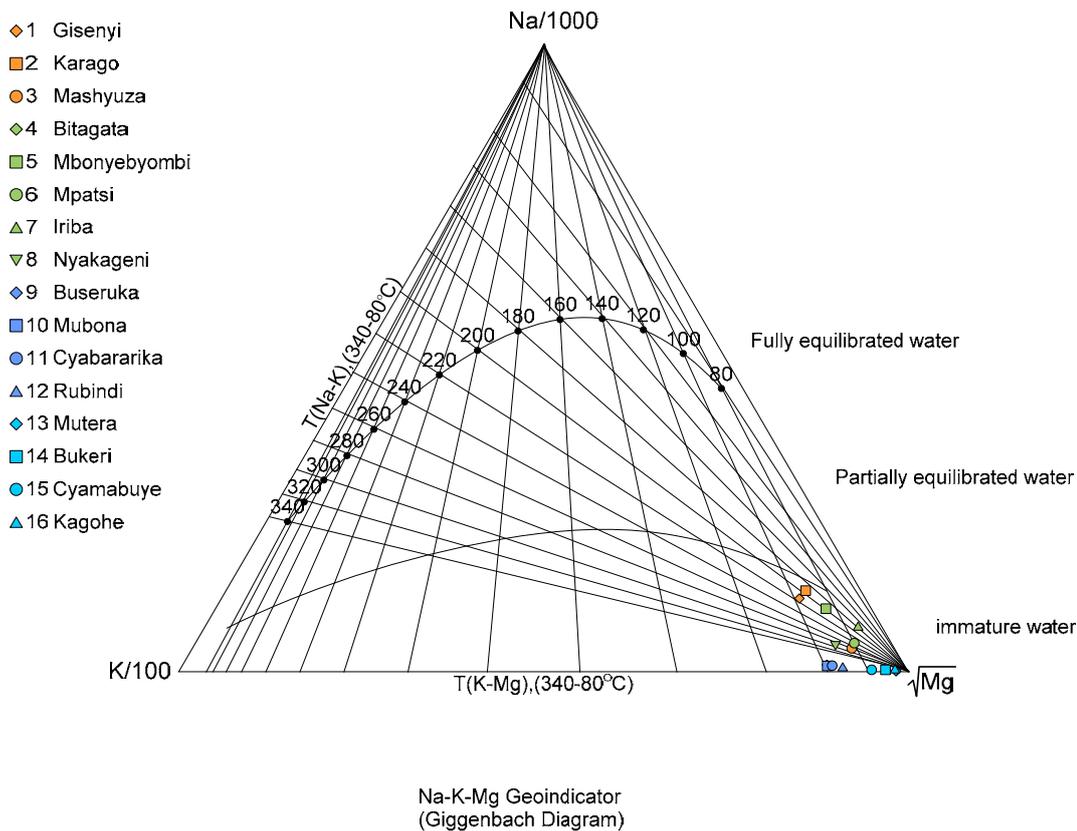
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.21 トリチウム濃度



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.22 ストロンチウム同位体組成



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.23 Na-K-Mg 三成分図

iii) 主要地熱地域視察結果

第1年次の調査では、主要4地域の位置やアクセス、土地利用などの状況を把握するために、各地域の予察調査を実施するとともに、高温泉の Gisenyi、Mashyuza、HCO₃ 濃度が高い湧水である Cyabararika、Rubindi を視察した（図 3-2.24、表 3-2.7）。高温泉の湧出地点の状況は次のとおりである。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.24 現地視察位置図

表 3-2.7 温泉・湧水測定結果一覧表

No.	Spring	Date	GPS No.	Temp.	pH	Cond. (μS/cm)	Flow Rate (L/min)	Remarks
1	Mashyuza	15/1/2014	22	41.0	—	—	(1000+)	Loc.1
2			24	53.7	6.4	2,280	—	Loc.1
3			30	36.4	8.3	2,020	200	Loc.3
4			31	43.0	6.5	2,170	200	Loc.2
5	Cyabararika	17/1/2014	46	18.5	6.3	3,090	100	Cold spring
6			47	17.8	7.1	1,063	—	River
7			48	17.0	7.2	1,000	—	River
8	Rubindi	17/1/2014	56	17.9	6.6	2,090	100	Loc.1
9			57	17.6	7.1	299	200	Loc.2
10			69	73.0	7.5	2,770	20	Loc.1
11	Gisenyi	18/1/2014	71	68.4	—	—	10	Loc.1
12			73	72.5	—	—	—	Loc.1
13			74	70.3	7.1	2,690	5	Loc.2
14			75	57.5	7.3	2,720	10	Loc.2

[出所] JICA 調査団で作成

a) Gisenyi 地域

Kivu 湖の北側に位置し、湖畔より 70°C 以上の温泉が温泉ガスを伴って湧出している。湧出地は主として 2 カ所ある（写真 3-2.1～3-2.3）。南側湧出地（Loc.1）は、20m×30m の範囲において数カ所から湧出が認められる。最高温度は 73°C、pH は 7.5 である。北側湧出地（Loc.2）では、20m×20m の範囲において数カ所から温泉の湧出が認められる。最高温度は 70.3°C、pH は 7.1 を示す。



[出所] Google earth

写真 3-2.1 Gisenyi 地域 温泉湧出地点
Loc. 1 地点、Loc 2 地点に数カ所温泉が湧出



写真 3-2.2 (1) Gisenyi 地域 (Loc.1)
20m×30m の範囲に温泉湧出



写真 3-2.2 (2) Gisenyi 地域 (Loc.1)
最高温度：73°C



写真 3-2.3 (1) Gisenyi 地域 (Loc.2)
20m×20m の範囲に温泉湧出



写真 3-2.3 (2) Gisenyi 地域 (Loc.2)
最高温度：70.3°C

b) Bugarama 地域 (Mashyuza 温泉)

Mashyuza 温泉は Bugarama 地域の南方に位置しており、温泉プール（50m 南方に位置）が主たる湧出地点で、周辺でも温泉が湧出している（写真 3-2.4～3-2.7）。3 カ所の温泉湧出地点が確認された。①温泉プールでは温泉ガスを伴い、大量の温泉が湧出しており、湧出の中心部では湖面が数 cm 盛り上がっている（Loc.1）。温泉プールの西側に湧出地点が多くあり、最高 53.7°C で、pH は 6.4 である。②道路脇での湧出地点での温度は 43°C（Loc.2）、③北東側では小河川が湯川となり温度は 36.4°C である（Loc.3）。



[出所] Google earth

写真 3-2.4 Bugarama 地域 (Mashyuza 温泉)

1: 温泉プール 2: 道路脇の温泉湧出地点 3: 湯川 中央部は温泉沈殿物採取箇所



写真 3-2.5 (1) Mashyuza 温泉 (Loc.1)
温泉プール：湧出箇所が盛り上がる



写真 3-2.5 (2) Mashyuza 温泉 (Loc.1)
温泉プール：ガスを伴い温泉湧出



写真 3-2.6 Mashyuza 温泉 (Loc.2)
道路脇での温泉湧出 (43°C)



写真 3-2.7 Mashyuza 温泉 (Loc.3)
湯川 (36.4°C)

c) Cyabararika 湧水

Cyabararika 湧水は Ruhengeri の東部に位置する湧水地点でありガスを伴い湧出している。湧水の水温は 18.5℃、周辺の河川でもガスを伴い湧出している（写真 3-2.8）。



写真 3-2.8 (1) Cyabararika 湧水
湧水地全景



写真 3-2.8 (2) Cyabararika 湧水
大量のガスを伴い湧出(18.5℃)



写真 3-2.8 (3) Cyabararika 湧水
周辺河川でもガスを伴い湧出



写真 3-2.8 (4) Cyabararika 湧水
周辺には玄武岩溶岩が分布

d) Rubindi 湧水

主として2カ所の湧出地、①直接河床から湧出する地点 (Loc.1)、②斜面にパイプが設置してある地点 (Loc.2)、がある (写真 3-2.9~3-2.11)。



写真 3-2.9 Rubindi 湧水
湧水全景



写真 3-2.10 (1) Rubindi 湧水 (Loc.1)
ガスを伴い湧出している。



写真 3-2.10 (2) Rubindi 湧水(Loc.1)
遠景



写真 3-2.11 Rubindi 湧水(Loc2)

e) Karago 温泉

EWSA によれば、Karago 湖の水位上昇により、Karago 温泉は水没しているとの情報である。このため EWSA より現地の写真と情報を入手した（写真 3-2.12）。Karago 温泉の泉温は高く（64.1℃）、pH は中性（7.2）であるが湧出量は少ないとのことであった。IESE（2012）によれば、温泉及び CO₂ ガスが Karago 湖南の湖岸から湧出し、湧出量は 1L/sec.以下とのことである。



写真 3-2.12 (1) Karago 温泉
湧出地全景（写真提供：EWSA）



写真 3-2.12 (2) Karago 温泉
湧出地点（写真提供：EWSA）

2) 自然・社会環境及び地形・アクセス

ルワンダの主要な地熱地域の自然・社会環境及び地形・アクセスの状況調査結果を表 3-2.8 に示す。本調査の目的は、これまでの調査により選定された地熱地域の社会基盤状況を確認し、将来的な地熱開発に向けて、道路・用水などの基礎データを収集することである。

表 3-2.8 主要地熱地域における自然・社会環境及び地形・アクセスの状況

Field Name	Altitude (m. a.s.l.)	Base camp (hours to the site)	Site Condition	Topography	Surface Condition	Land Use	Water for Drilling	Natural/Social and Environmental Constraints
Karisimbi	2,675 m (at the KW-01)	60 minutes from Gisenyi city by car (40 km).	No resident	Flat location and gentle slope at the foot of Mt. Karisimbi	Soft soils. Many boulders and outcrops of volcanic rocks	Cultivated area (Irish potatoes)	No stream exists. Drilling water of exploratory wells is taking at lake Karago (18 km from KW-01 to the water in-take point along the road)	Close to the Volcanoes National Park. Following constraints are arisen: 1) compensation of cultivated area 2) impact to the ecosystem in lake Karago due to taking drilling water
Kinigi	2,576 m (at the proposed drilling site No.1)	30 minutes from Ruhengeri city by car (20 km). 5 km to the site, unpaved road	Few residents	Flat location and gentle slope	Soft soils. Many boulders and outcrops of volcanic rocks	Cultivated area (Irish potatoes)	No stream exists. 20 km from Ruhengeri 41 km from Lake Karago 30 km from Lake Ruhodo via Ruhengeri	Close to the Volcanoes National Park. Following constraints are arisen: 1) resettlement of residents 2) compensation of cultivated area
Gisenyi	1,470 m (at hot spring site)	25 minutes from Gisenyi city by car (6 km).	Hot spring is close to residential area (distance: 100m) Bath use of the hot spring	High relief topography at the coast of Kivu lake	Soft soils. Outcrops of hard metamorphic rocks at steep slope.	Uncultivated area	Close to the Lake Kivu	
Bugarama	1,180 m (at hot spring site)	50 minutes from Cyangugu city by car (15 km). From Kibangiro town to the site, unpaved road	No resident. Hot spring is located close to cement factory. Bath use of the hot spring	Flat location. Hot spring is located at topographic boundary of graben (flat) and steep slope of the mountain	Hard travertine deposits (thick) near hot spring. In the graben, gravels and alluvium. In the mountains, hard.	Mining area of travertine deposits near hot spring. In the graben, cultivated area (rice)	A river runs in the bottom of the graben. 1.2 km from the river to the hot spring	

[出所] JICA 調査団で作成

3) ルワンダにおける詳細調査対象地域の選定

詳細調査対象地域の選定のために、既存地球科学データのレビュー、人工衛星データ解析、現地視察（主に温泉湧出地点及び主要 4 地域のインフラストラクチャーなどの状況把握）により「地熱開発進捗状況」、「地熱資源」、「自然・社会環境」及び「地形・アクセス」の 4 つの項目について評価した。表 3.2-9 及び表 3.2-10 に各項目の評価結果及び選定された詳細調査対象地域の概要をそれぞれ示す。

表 3-2.9 主要地熱地域の地熱開発進捗状況及び地熱資源

Field Name	Exploration Stage				Resource Potential					
	Detailed Geological and Geochemical Study	Geophysical Study	Exploratory Well Drilling	Existing Exploration Plan	Confirmation of Reservoir Existence	Active geothermal manifestations (Hot spring/Fumarole)	Past - (Active) geothermal manifestations (hydrothermally-altered zones)	Volcanic activity and possible heat source	Geological structure suitable for formation of geothermal reservoir	
									Geological structures	Geophysical exploration data
Karisimbi	Done	Gravity:None MT/CSMT:Done	KW-01: 3,015m KW-02: Suspended	Presence	None	None	None	Presence of Quaternary volcanoes	NE-SW trending faults and NW-SE trending faults	Data seems to be not sufficient for detection of structures
Kinigi	Done	Gravity:None MT/CSMT:Done	None	Presence	None	None	None		Regional geological structure: the field is located in a NW-SE fracture zone between the Visoke and Sabinyo Volcanoes.	Data seems to be not sufficient for detection of structures
Gisenyi	Done	Gravity:None MT/CSMT:Done	None	Presence	None	Presence (Na-K-Ca: 181°C)	None		The field is located in normal fault zone near the eastern boundary of the East African Rift.	Data seems to be not sufficient for detection of structures
Bugarama	None	Gravity:None MT/CSMT:None	None	Presence	None	Presence (Na-K-Ca: 204°C)	Travertine	Not exist in and around the field. Toshibinda volcano (in DR Congo) is located 40km NW of Bugarama hot spring	The field is located at graben formed by normal faults.	Data seems to be not sufficient for detection of structures
Other Fields	at preliminary study stage			unknown	None	Presence (Karago, etc.) (in Karago Na-K-Ca: 159°C)	unknown	-	-	-

* Orange colored cells are positive information for the selection of promising fields

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.10 主要地熱地域の地熱開発進捗状況、地熱資源にかかる評価結果及び詳細調査実施項目

地域	地熱開発進捗状況	地熱資源	詳細調査実施
Karisimbi	<ul style="list-style-type: none"> - 精密地表調査が実施されており、地熱系概念モデル再構築に必要な地表探査データが取得済み（データの品質・精度の確認やデータ再解析は必要） - 地熱調査井データが存在 - 地表調査が計画されており、今後、データが増える見込み 	<ul style="list-style-type: none"> - 新期の火山活動が存在 - 地質構造（地熱流体の流動に関連する）がある程度把握されている 	<ul style="list-style-type: none"> - 補足地質・地化学調査 - 物理探査データ再解析 - 地熱系概念モデルの検討
Kinigi	<ul style="list-style-type: none"> - 精密地表調査が実施されており、地熱系概念モデル再構築に必要な地表探査データが取得済み（データの品質・精度の確認やデータ再解析は必要） 	<ul style="list-style-type: none"> - 新期の火山活動が存在 - 地質構造（地熱流体の流動に関連する）がある程度把握されている 	<ul style="list-style-type: none"> - 補足地質・地化学調査 - 物理探査データ再解析 - 地熱系概念モデルの検討
Gisenyi	<ul style="list-style-type: none"> - 地表調査が計画されており、今後、データが増える見込み 	<ul style="list-style-type: none"> - 新期の火山活動が存在 - 現在の地熱活動の存在を示唆する温泉が存在 - 地質構造（地熱流体の流動に関連する）がある程度把握されている 	<ul style="list-style-type: none"> - 補足地質・地化学調査 - 物理探査データ再解析 - 地熱系概念モデルの検討
Bugarama		<ul style="list-style-type: none"> - 新期の火山活動が存在 - 地質構造（地熱流体の流動に関連する）がある程度把握されている 	<ul style="list-style-type: none"> - 補足地質・地化学調査 - 重力探査 - 地熱系概念モデルの検討
Virunga 火山地域南縁部地域（Karago 地点等）	<ul style="list-style-type: none"> - 初期調査のみ 	<ul style="list-style-type: none"> - 比較的新しい時代の火山活動の存在が推定される火山地形が存在 - 温泉の湧出温度が相対的に高い地点が存在（Karago 地点及び Mbonyebyombi 地域） 	<ul style="list-style-type: none"> - 補足地質・地化学調査 - 地熱系概念モデルの検討

[出所] JICA 調査団で作成

現時点においては、これまでの調査で抽出されているルワンダ北西部（新期火山地域）及び南西部の Bugarama 地域が最も興味深い地域として抽出される。また、Virunga 火山地域南縁部には、複数の温泉・冷泉の湧出地点があるとともに、比較的新しい時代の火山活動の可能性のある火山地形が認められる。このように、Virunga 火山地域南縁部地域は、流体の通路となる高

透水性の地質構造の存在と地熱系の熱源となりうる火山活動の存在が推定されることから、本地域も詳細調査対象地域として選定した。また、詳細調査実施項目に関しては、既往調査及び他ドナーによる調査計画も考慮して、調査実施項目を計画した。これらについてルワンダカウンターパートと最終的な協議を行い、詳細調査対象地域及び調査実施項目を決定した。

3-2-2 詳細調査対象地域における地質・地化学調査

詳細調査対象地域における地質・地化学調査は、JICA 調査団による第2次現地調査において実施された。チームは以下に示す JICA 調査団の専門家とカウンターパートである EWSA のメンバーにより構成された。JICA 調査団は現地踏査と室内分析のための岩石試料及び温泉水・鉱泉水試料の採取を実施した。それらの分析では、追加データの取得もしくは既存データのクロスチェックを目的として、岩石試料中の変質鉱物の同定と水試料の化学・同位体分析を実施した。

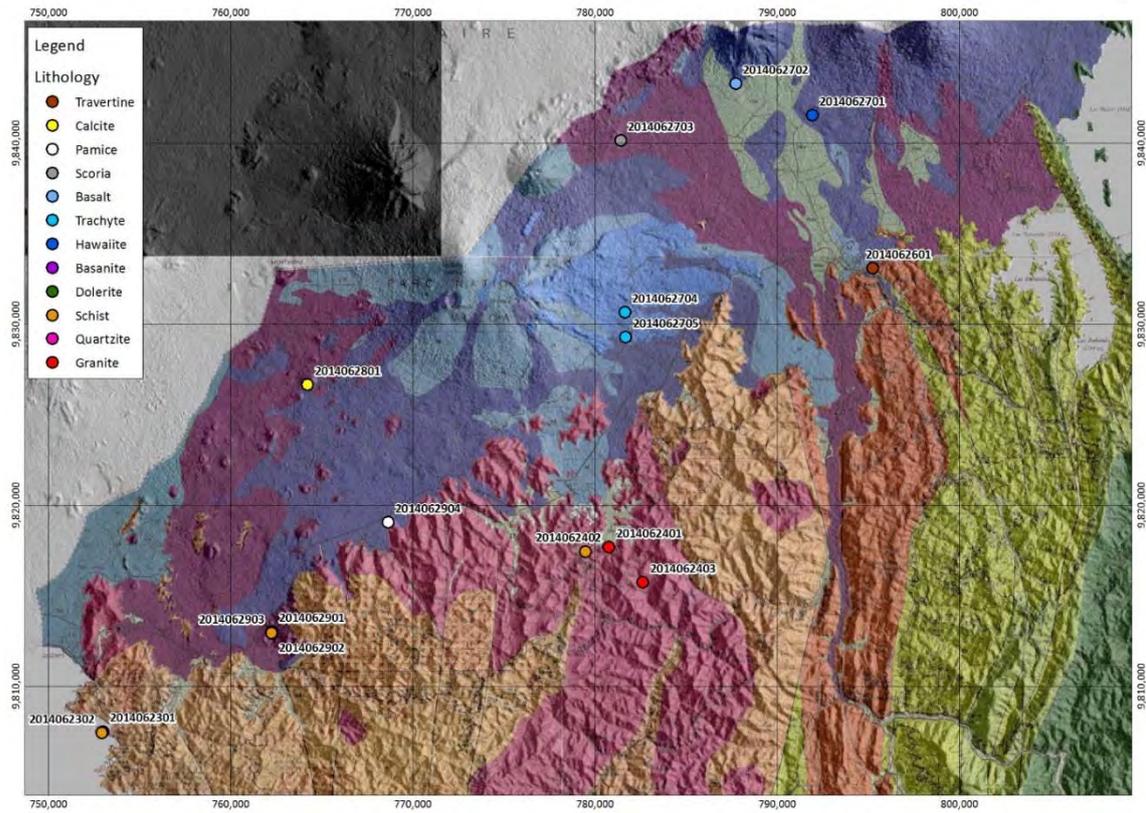
JICA チーム:副田団員（地質）、景山団員（地質）、内山団員（地化学）

EWSA: Jean Claude N.（地質）、Assouman M.（地質）、Gilbert H.（地化学）

(1) 地質調査結果

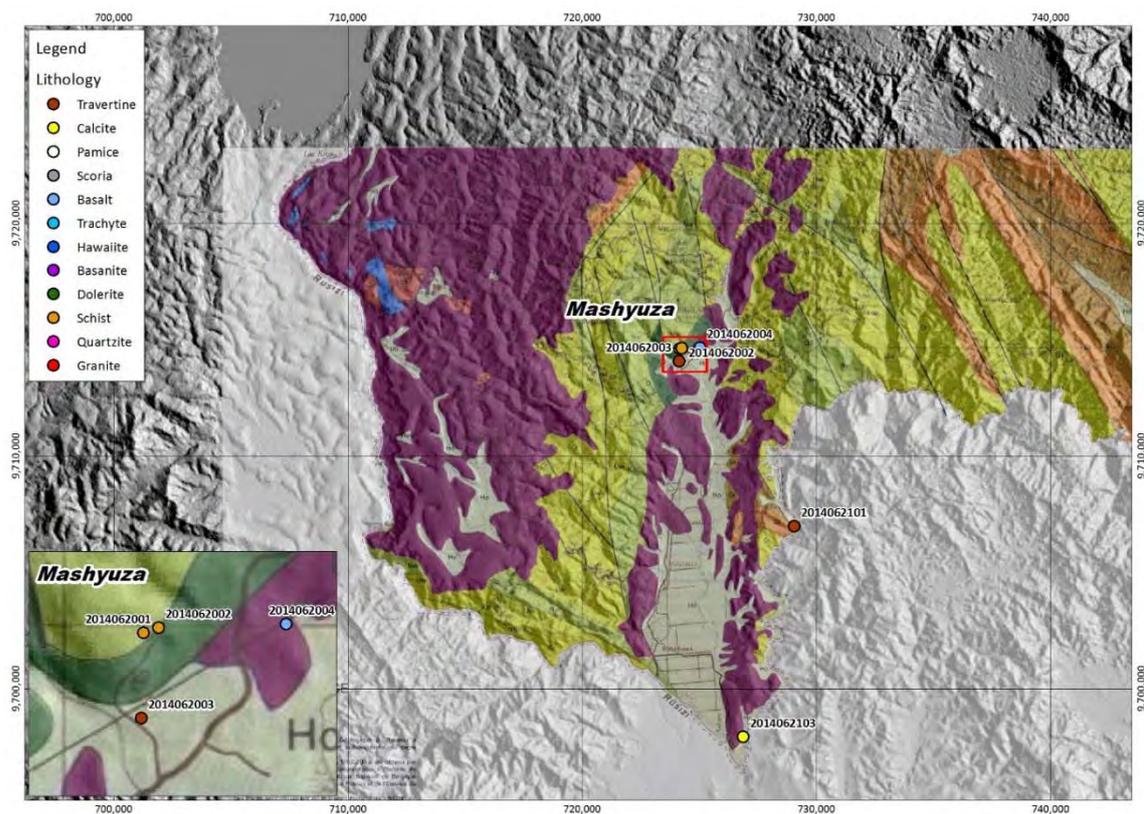
地質調査は、詳細調査対象地域の地熱資源評価のための補足データの取得を目的として実施した。調査項目は野外における地質調査（層序、熱水変質帯、断裂系の確認等）及び変質岩の室内分析である。

地表踏査により採取された岩石試料中の変質鉱物を同定するために薄片観察、X線回折分析及びスペクトル分析を実施した。変質帯の変質鉱物種の同定は、対象地域の地熱活動の活動域、地熱流体の性状、地熱流体の流動を規制する地質構造など、地熱構造を評価する上での基礎資料となる。地熱活動の岩石熱源年代に関する情報を得ることを目的として岩石試料年代測定を実施した。図 3-2.25 及び図 3-2.26 に岩石試料採取位置を示す。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.25 岩石試料採取地点位置図 (ルワンダ北西部域)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.26 岩石試料採取地点位置図 (ルワンダ南西部域)

1) 岩石試料分析

i) 岩石薄片観察結果

岩石薄片の観察結果を以下に述べる。岩石薄片写真を別添資料 2-1 に示す。

062004 (ID:0620-13-02) ; Mashyuza, Bugarama

岩石は玄武岩である。石基は 0.2~0.3mm 程度の斜長石の柱状結晶、0.1mm 以下の輝石、橄欖石及び不透明鉱物より成る。石基の斜長石には流理が見られる。また、石基の一部は、方解石に変質している。

062902 (ID:0625-59-01) ; Iriba

岩石は玄武岩である。斑晶は輝石、橄欖石及び斜長石から成る。石基は斜長石、輝石、橄欖石及び 0.1mm 以下の細粒な不透明鉱物よりなる。

062702 (ID:0627-85-01) ; Southern flank of Mt. Sabinyo

岩石は安山岩である。斑晶は斜長石、黒雲母及び角閃石から成る。石基は細粒な斜長石、黒雲母、角閃石及び不透明鉱物から成る。

ii) X 線回折分析結果

X 線回折分析により同定された鉱物の一覧を表 3-2.11 に示した。分析の結果、確認された粘土鉱物は、カオリナイト、スメクタイト、イライト、混合層鉱物そしてローモンタイトである。

Bugarama 地域の Mashyuza 地域の 062001 (ID:0620-07-01)の粘土質岩からは、石英、雲母が認

められた。また、粘土鉱物としてカオリナイト及びイライトが検出された。

Bugarama 地域の Mashyuza 地域の 062003 (ID:0620-10-01)のトラバーチンはカルサイトから成り、粘土鉱物としてスメクタイトが検出された。

Gisenyi 地域の 062301 (ID:0623-32-01)のトラバーチンはカルサイト、石英及び雲母から成り、カオリナイト、スメクタイト、イライト及び混合層鉱物が検出された。また、石英及び雲母は細層物起源と考えられる。

Cyabararika 地域の 062601 (ID:0626-76-01)のトラバーチンはカルサイトから成り、カオリナイト及びスメクタイトが検出された。

Bize, Bugaram 地域の 062101 (ID:0621-17-01)のトラバーチンはカルサイト及び微量の石英から成り、イライト及びカオリナイトが検出された。

Bonde crater 地域の 062801 (ID:0628-96-01)のカルサイトは輝石、ローモンタイト、パイライト、プレーナイト及びシングナイトから成り、粘土鉱物としてカオリナイト及びローモンタイトが検出された。

表 3-2.11 X線回折分析結果

No.	Location	Sample ID	Bulk analyses (Quartz index)								Oriented analyses						
			quartz	mica	augite	kaolinite	laumontite	calcite	pyrite	prehnite	syngenite	illite	kaolinite	smectite	mixed layer	laumontite	feldspar
1	062001	0620-07-01	46.1	14.5		3.3						○	○				
2	062003	0620-10-01						15.9					○				
3	062301	0623-32-01	24.6	39.6				14.9				○	○	○	○		
4	062601	0626-76-01						16.2					○	○			
5	062101	0621-17-01	0.8					16.4				○	○				
6	062801	0628-96-01			2.5		0.8		1.0	1.6	2.2		○			○	

[出所] JICA 調査団で作成

iii) K-Ar 年代測定結果

地熱系の熱源評価に関わる火山活動の時期を把握するために、火山岩の年代測定を行った。結果は以下のとおりである。

062004 (ID: 0620-13-02) ; Mashyuza, Bugarama

年代測定の対象は玄武岩であり、得られた年代値は 12.2 ± 0.4 Ma である。

062902 (ID:0625-59-01) ; Iriba

年代測定の対象は玄武岩であり、得られた年代値は 1.0 ± 0.4 Ma である。

062702 (ID: 0627-85-01) ; Southern flank of Mt. Sabinvo

年代測定の対象は安山岩であり、得られた年代値は 0.5 ± 0.1 Ma. である。

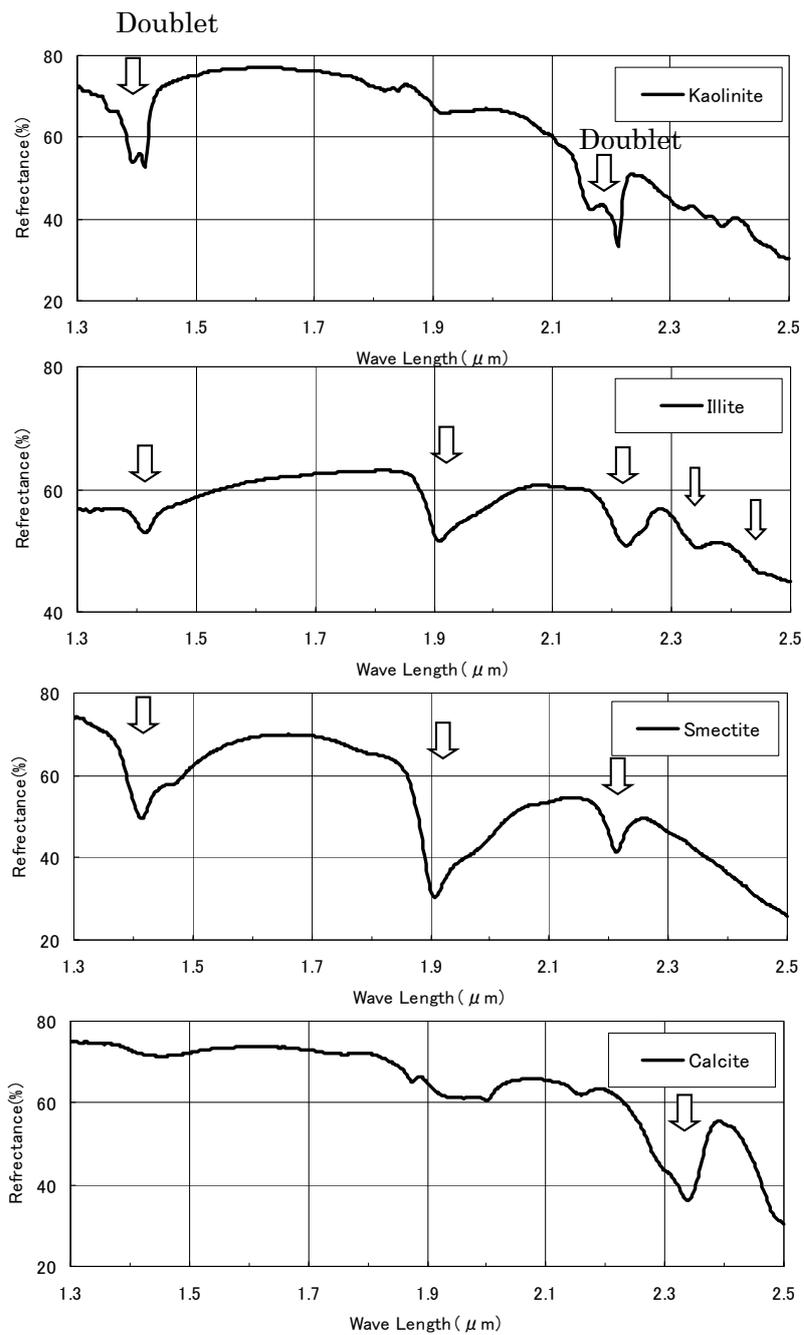
062904 (ID: 0629-107-01) ; Ngangare crater

年代測定の対象はバサナイトであり、得られた年代値は 1.8 ± 0.1 Ma. である。

iv) スペクトル測定

本プロジェクトで測定した波長帯は短波長赤外（1,300～2,500nm）の領域に相当する。図 3-2.27 は、米国地質調査所のスペクトルライブラリより、典型的なカオリナイト（kaolinite）、絹雲母（sericite）もしくはイライト（illite）、スメクタイト（smectite）、方解石（calcite）の反射スペクトルを示したものである。短波長赤外域には粘土鉱物や炭酸塩鉱物に固有の吸収帯が 1,400nm、1,900nm 及び 2,165～2,345nm の間に存在している。これらの吸収帯は、鉱物を構成する水分子やアルミニウムと水酸化基（Al-OH-）などの分子振動に起因するものであり、その吸収帯の波長位置や波形の特徴から鉱物の同定や化学組成の推定が可能となる。例えば、図 3-2.27 に示したカオリナイトのスペクトルには、2,200nm 付近に特徴的なダブルレットもしくはショルダーが現れることにより識別が可能となる。また、絹雲母もしくはイライトは 2,200～2,345nm に幅広の吸収帯が、スメクタイトは 2,200nm 付近に明瞭な吸収帯を有する。方解石は 2,330nm 付近に幅広かつ深い吸収が見られる。

赤外反射スペクトルにより同定された鉱物の一覧表を表 3-2.12 に示す。また、測定結果を別添資料 2-2 に示す。同定された鉱物はカオリナイト、絹雲母もしくはイライト、スメクタイト、ノントロナイト（nontronite、鉄に富むスメクタイト鉱物）、鉄明礬石（jarosite）、白雲母（muscovite）及び方解石である。カオリナイトは全ての片岩（062001、062002、062401、062402 及び 062903）及び花崗岩（062401）において同定される。イライトは片岩、花崗岩、トラバーチン（062301）、砂岩（062302）及び軽石（062902）において同定される。スメクタイト及びノントロナイトは南西部において採取された玄武岩及びトラバーチンにおいて同定される。方解石は全てのトラバーチンにおいて同定された。また、X 線回析分析を実施した 4 試料に関しては、X 線回析分析と同様の同定結果が得られている。一方で、北西部で採取された火山岩の試料に関しては、粘土鉱物や炭酸塩鉱物は同定されなかった。



[出所] USGS

図 3-2.27 代表的な粘土鉱物及び方解石のスペクトル

表 3-2.12 スペクトル測定結果一覧表

Sample	Rock Name	kaolinite	illite (sericite)	smectite	nontronite	jarosite	muscovite	calcite	Remark
062001	schist	○	○						Same as 0620-07-01 for X-ray analysis.
062002	schist	○	○						Strongly kaolinized.
062003	travertine				○			○	Same as 0620-10-01 for X-ray analysis.
062004	basalt			○		○			
062101	travertine			○				○	
062102	basalt			○	○				
062103	basalt				○				
062301	travertine		○	○	○			○	Same as 0623-32-01 for X-ray analysis.
062302	sandstone		○			○	○		Medium to coarse grained.
062401	granite	○	○						
062402	schist	○							With pegmatite.
062403	granite		○	○					
062601	travertine							○	Same as 0626-76-01 for X-ray analysis.
062701	hawaiite								
062702	basalt								
062703	scoria								
062704	trachyte								
062705	trachyte								
062801	basanite								
062901	scoria								
062902	pamice		○						
062903	schist	○	○						
062904	pamice								

[出所] JICA 調査団で作成

2) 地熱有望地域における情報抽出

地熱地域においては、高分解能及び高スペクトル分解能を有する Terra/ASTER データを用いた情報抽出を実施した。また、天候の影響を受けない合成開口レーダの ALOS/PALSAR データも併用した。ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer) は日本の経済産業省が開発した高性能光学センサであり、米国航空宇宙局 (the National Aeronautics and Space Administration: NASA) の地球観測衛星 Terra に搭載されている。ASTER は可視域から近赤外域、短波長赤外域及び熱赤外域に 14 の観測波長帯を持ち、地表上のローカル及びリージョナルなスケールの様々な事象 (地質、植生、大気、海洋、火山など) の情報を取得することが可能である。PALSAR (Phased-Array type L-band Synthetic Aperture Radar) は、国産の地球観測衛星 ALOS (だいち) に搭載されている合成開口レーダであり、L バンド (1.27GHz) のマイクロ波

を地表に照射することにより、地表上の様々な事象を観測する。両センサの諸元を表 3-2.13 及び表 3-2.14 に示す。

本プロジェクトにおいては、既知の温泉が分布する地域をカバーする Terra/ASTER データ 10 シーン及び ALOS/PALSAR データ 4 シーンを購入した。ルワンダ北西部における Terra/ASTER データによるフォールス・カラー画像を図 3-2.28 に、ALOS/PALSAR 画像を図 3-2.29 に示す。また、ルワンダ南西部における Terra/ASTER データによるフォールス・カラー画像を図 3-2.30 に、ALOS/PALSAR 画像を図 3-2.31 に示す。また、重力探査を実施した Bugarama 地域を対象に ALOS/PRISM の立体視ペア画像を購入しより詳細な地形判読を実施した。

表 3-2.13 Terra/ASTER の諸元

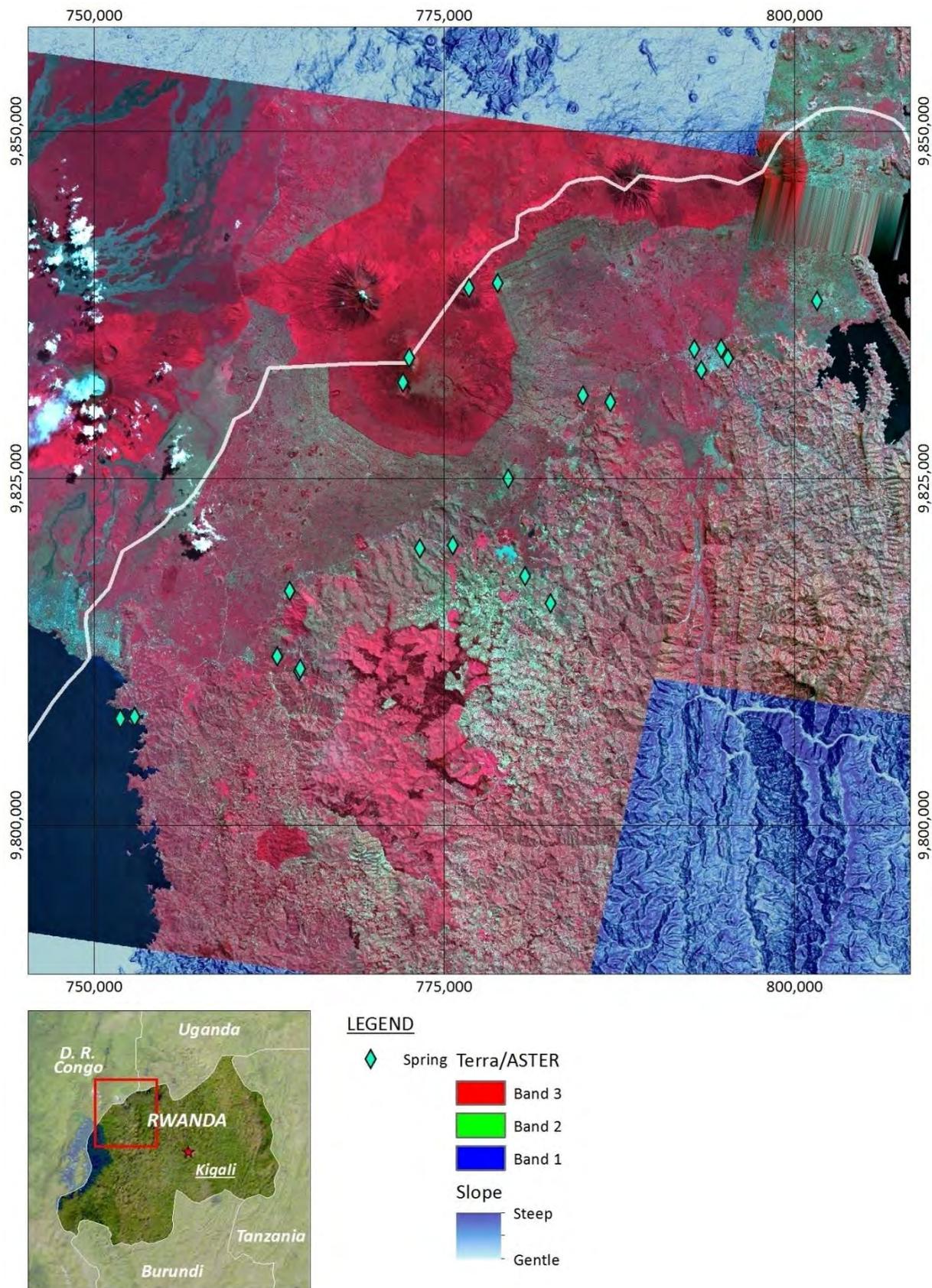
衛星高度	705 km
軌道	太陽周期準回帰軌道
回帰日数	16 日
打ち上げ年	1999 年
センサ種別	光学センサ (受動型センサ)
センサ	<p>ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 可視近赤外放射計 (VNIR) 空間分解能 : 15m バンド 1 : 0.52 – 0.60 マイクロメータ バンド 2 : 0.63 – 0.69 マイクロメータ バンド 3 : 0.78 – 0.86 マイクロメータ 短波長赤外放射計 (SWIR) 空間分解能 : 30m バンド 4 : 1.600 – 1.700 マイクロメータ バンド 5 : 2.145 – 2.185 マイクロメータ バンド 6 : 2.185 – 2.225 マイクロメータ バンド 7 : 2.235 – 2.285 マイクロメータ バンド 8 : 2.295 – 2.365 マイクロメータ バンド 9 : 2.360 – 2.430 マイクロメータ 熱赤外放射計 (TIR) 空間分解能 : 90m バンド 10 : 8.125 – 8.475 マイクロメータ バンド 11 : 8.475 – 8.825 マイクロメータ バンド 12 : 8.925 – 9.275 マイクロメータ バンド 13 : 10.25 – 10.95 マイクロメータ バンド 14 : 10.95 – 11.65 マイクロメータ</p>

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.14 ALOS/PALSAR の諸元

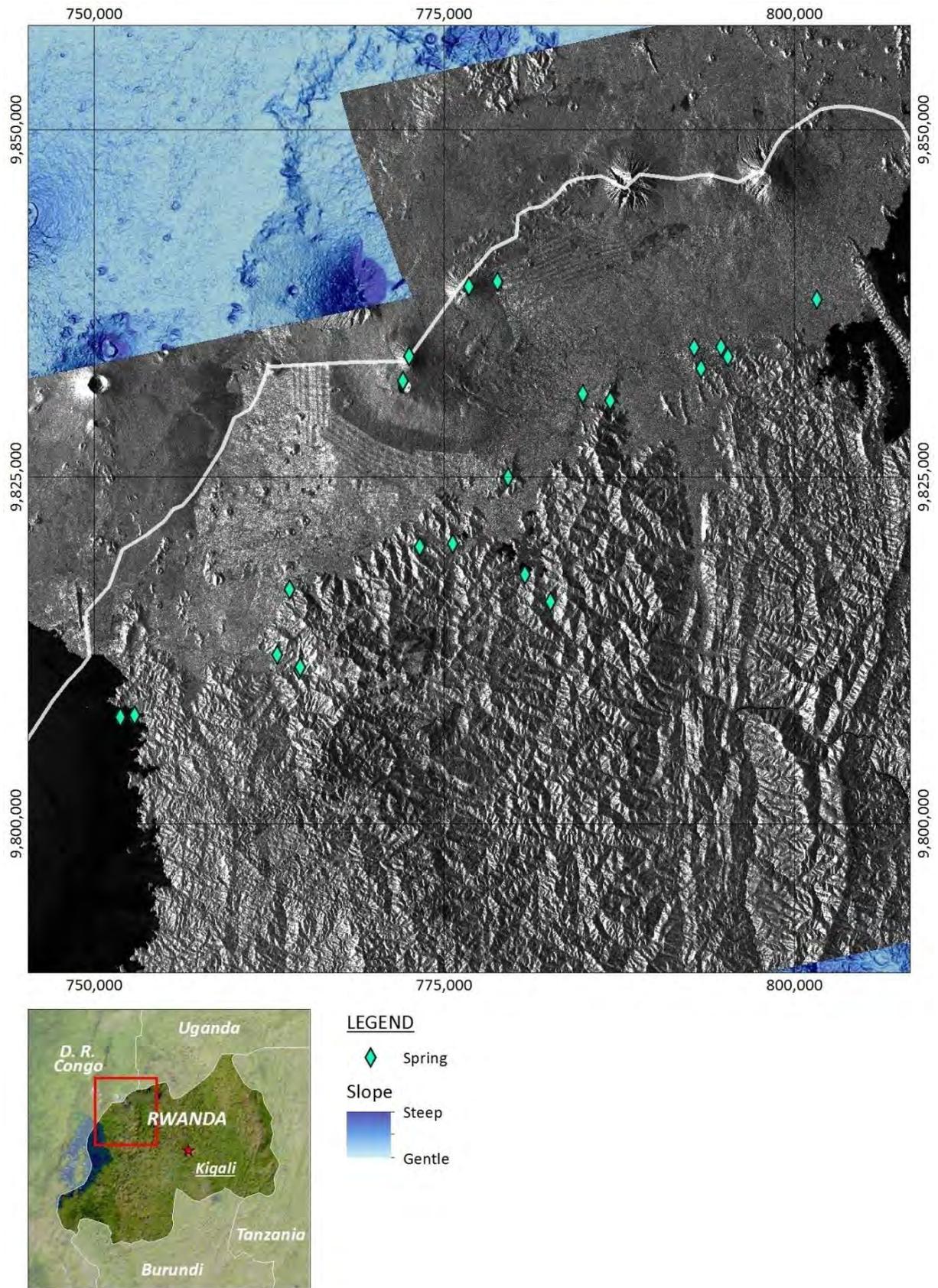
衛星高度	626 km
軌道	太陽周期準回帰軌道
回帰日数	46 日
打ち上げ年	2006 年
センサ種別	合成開口レーダ（能動型センサ）
センサ	PALSAR 空間分解能：7m～44m（高分解能モード） 100m（広域モード） Lバンド合成開口レーダ：1.27 GHz

[出所] JICA 調査団で作成



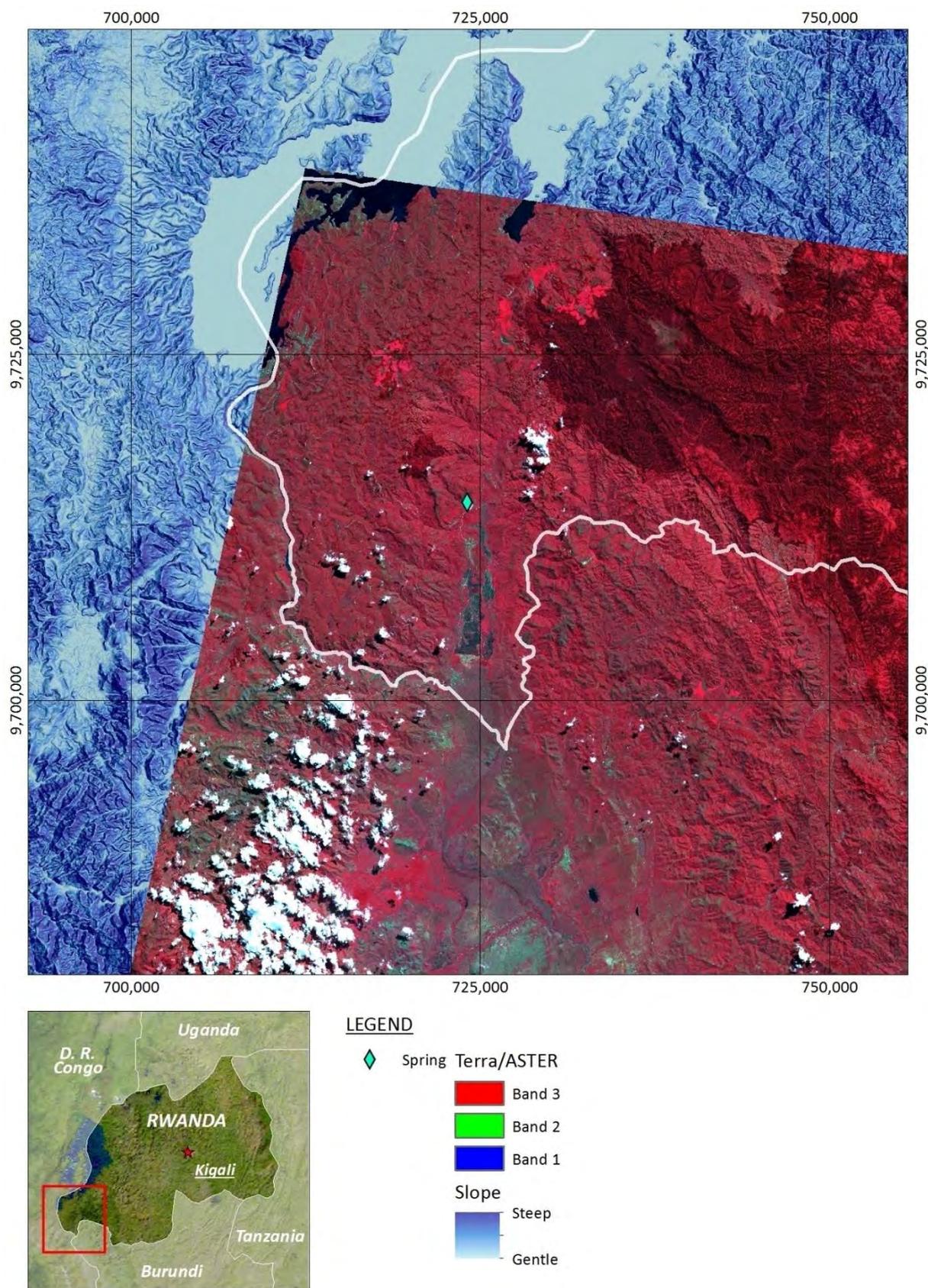
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.28 ルワンダ北西部における Terra/ASTER フォールス・カラー画像



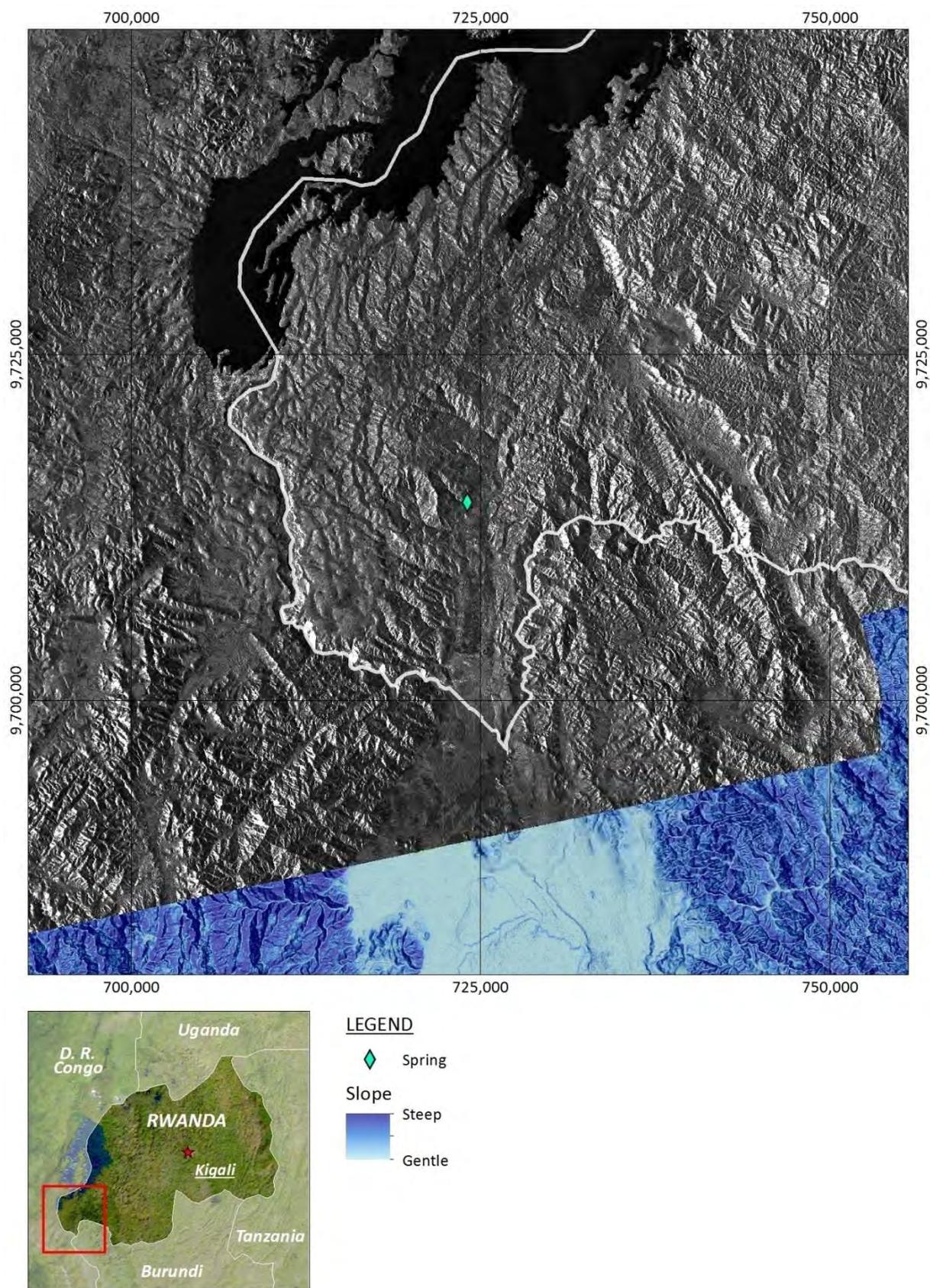
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.29 ルワンダ北西部における PALSAR 画像



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.30 ルワンダ北西部における Terra/ASTER フォールス・カラー画像



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.31 ルワンダ南西部における PALSAR 画像

3) 地質調査結果

ルワンダ北西部における衛星画像判読結果を図 3-2.32 に示す。本地域の地質は、主として新生代の Virunga 火山複合体よりなり、環状の火口及び山体となだらかな裾野を有する成層火山が観察される。火山複合体においては、衛星画像や地形解析結果において火山活動に関連する火口円錐丘や環状構造が確認される。北部から南西部にかけて広がる低地は EARS の西部リフト（アルバート・リフト）に対応する。火山複合体及び西部リフトと、抵抗性の高い地形を有する原生代の基盤岩類との境界は非常に明瞭であり、湧水はこれら境界や基盤岩類中の南北及び北西－南東方向に伸長するリニアメントに沿って分布している。

i) Karisimbi 地域

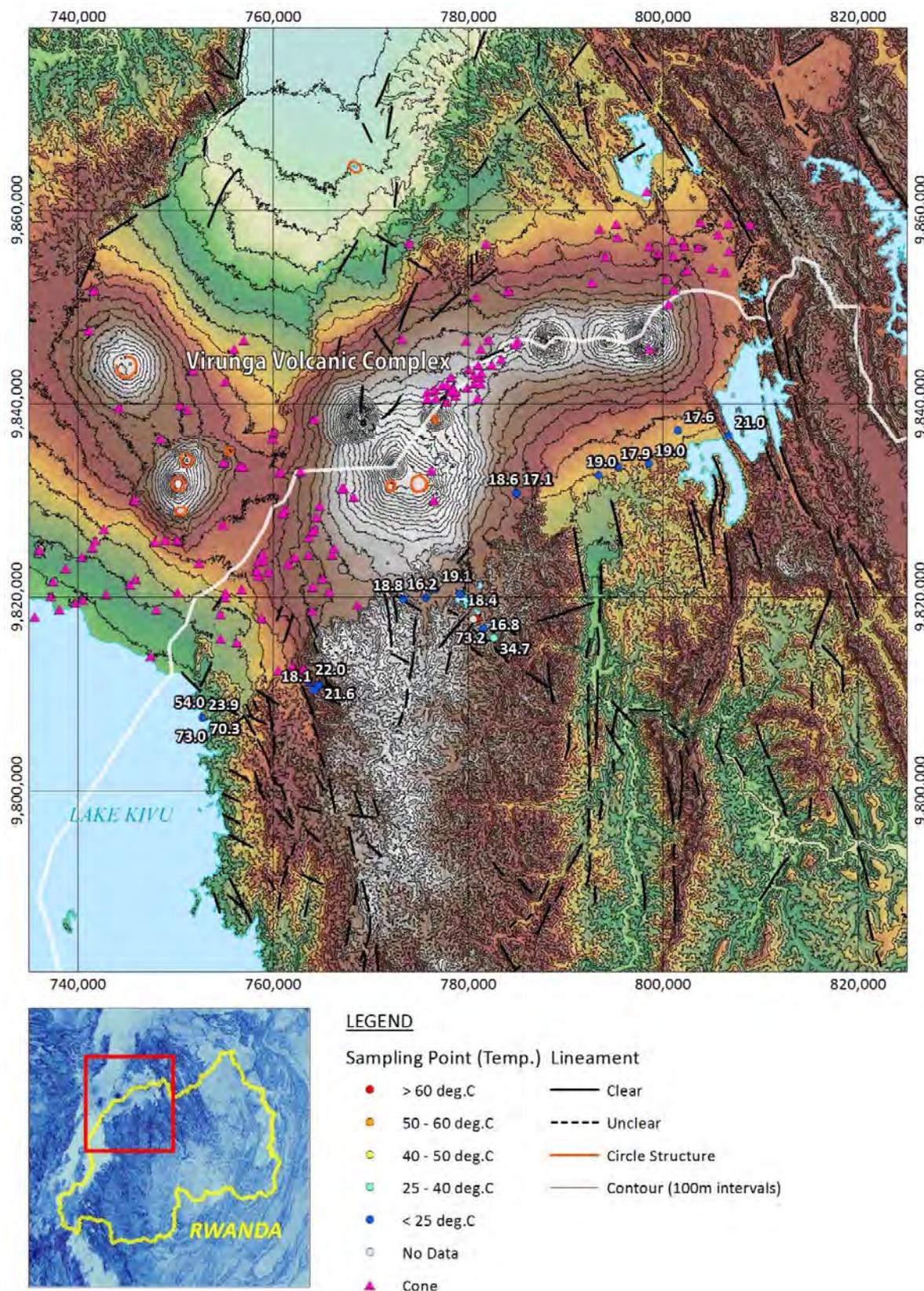
Karisimbi 地域はルワンダ北西部、Western Province の the Nyabihu and Rubavu districts に位置する。また、Karisimbi 地域北部は第四紀後期火山（Nyiragongo, Nyamuragira, Karisimbi, Bisoke, Mikeno, Sabinyo, Gahinga and Muhabura）が存在する Virunga Volcanoes Range（VVR）であり、地域南部は原生代のマイロナイト化した花崗岩－千枚岩複合眼帯を形成する Butare Horst に位置する。

Karisimbi 地域は大地溝帯に伴う正断層地域に位置し、北東－南西系及び北西－南東系の断層が確認されている（KenGen (2010)及び EWSA (2013)）。北東－南西系の断層（Accommodation Zone）は Butare Horst の原生代基盤岩と第四紀火山帯との間に生じていると考えられる（BGR, 2009）。

Karisimbi 及び Gisenyi 地域における衛星画像判読結果を図 3-2.33 に示す。Karisimbi 地域の北端には成層火山である Karisimbi 山が位置する。Karisimbi 山は標高が高く、降水量も多くなると予想されるため、良好な地下水涵養源になり得る。また、山体に浸透した地下水は透水性の高い溶岩や火山砕屑物を通して、南側の裾野に向かって流下すると考えられる。西側の裾野においては多くの火口円錐丘が観察されるが、東側及び南側の裾野においては非常に少ない。また、西側の裾野においては、NE-SW から NE-SW 方向に配列する火口円錐丘が観察されることより、同地域の地下には同方向の断裂帯が伏在することが予想される。多くの冷泉は Virunga 火山複合体と基盤岩類との境界に位置している。しかしながら、Karago においては泉温 73.2°C の温泉が湧出しており、周辺の基盤岩類中には北西－南東方向に伸長するリニアメント群が観察される。

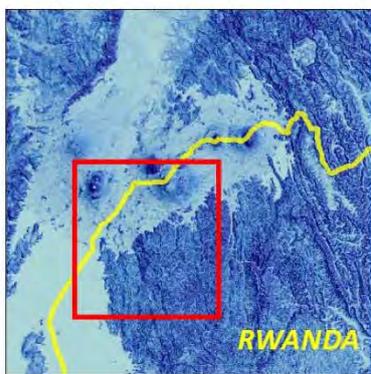
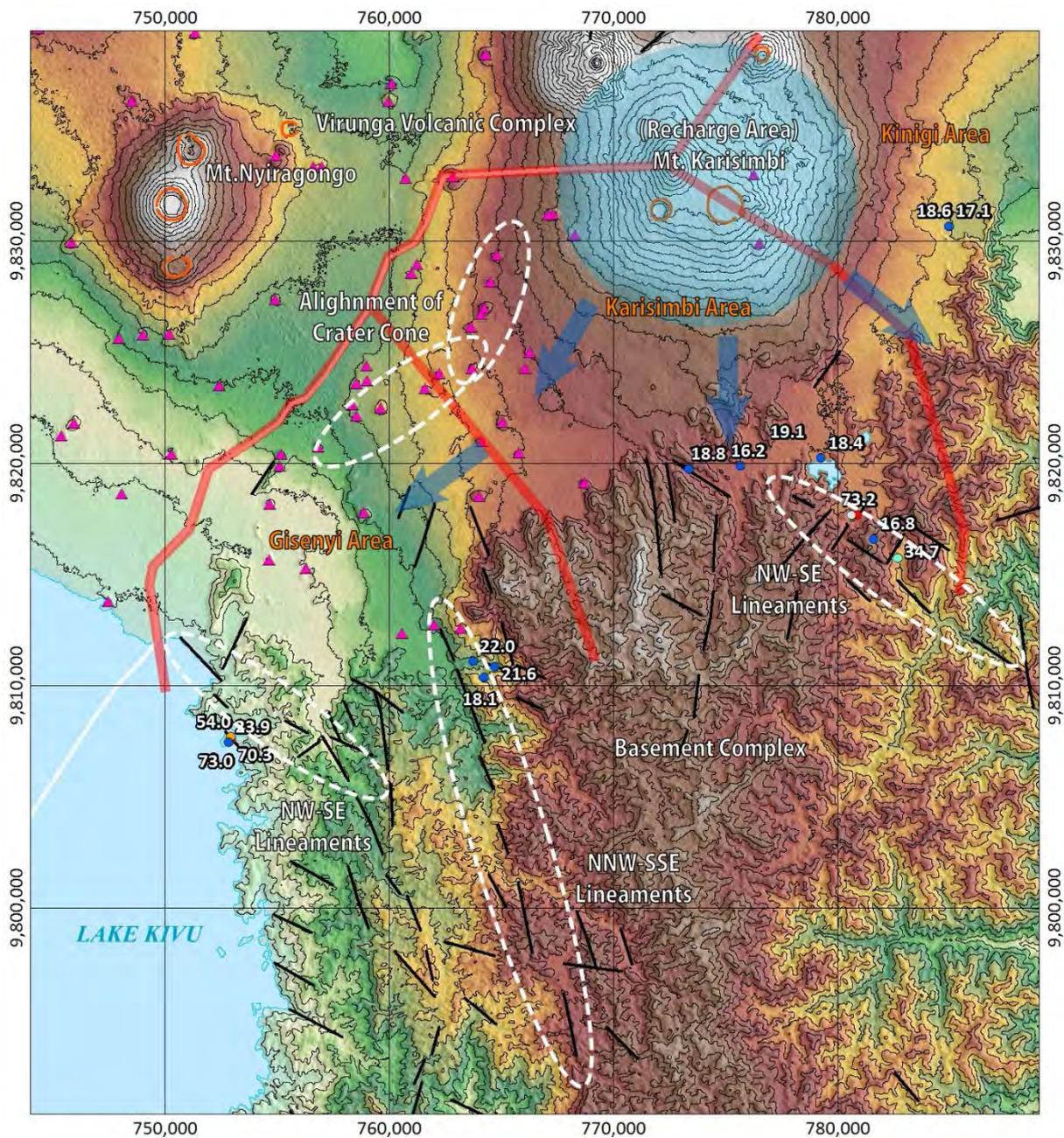
Karisimbi 地域の火山地域において、噴気や温泉及び変質帯のような地表地熱徴候は認められない。ただし、Butare Horst の Karago では温泉が認められている。その最高温度は 73.2°C が計測されている。また Karago 温泉の 2.6 km 南東にある Mbonyebyombi では最高温度 34.7°C の温泉が認められる。これらの温泉は花崗岩により形成されており、両温泉とも明瞭な熱水変質及び熱水性鉱床は認められない。ただし、温泉周辺には北西－南東系の地形リニアメントが認められる。

北部火山域の地形境界及び Accommodation Zone が認められる南部の the Butare horst には冷泉が存在し、CO₂ ガスを含む。地表踏査の状況を写真 3-2.13 に示す。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.32 ルワンダ北西部における広域衛星画像判読結果



LEGEND

Sampling Point (Temp.) Lineament

- > 60 deg.C
- 50 - 60 deg.C
- 40 - 50 deg.C
- 25 - 40 deg.C
- < 25 deg.C
- No Data
- ▲ Cone
- Clear
- - - Unclear
- Circle Structure
- Contour (100m intervals)

[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.33 ルワンダ北西部 Karisimbi 及び Gisenyi 地域における衛星画像判読結果

		
<p>Karago温泉</p>	<p>Karago温泉近傍の花こう岩露頭</p>	<p>Mbonyebyombi温泉</p>
		
<p>Mbonyebyombi温泉近傍の花こう岩露頭</p>	<p>Iribaの冷泉</p>	<p>Iriba地域、雲母片岩とペグマタイト (Gw)。Bikore川沿いに露出</p>
		
<p>Bisate cone</p>	<p>Bisate coneを構成するスコリア</p>	<p>Branca (Mt. Karisimbi)の東麓の溶岩 (トラカイト)。複数の溶岩堆積面に区分できる</p>
		
<p>Branca (Mt. Karisimbi)の東麓の溶岩 (トラカイト)</p>	<p>Bonde crater のクレーター壁</p>	<p>Chamabuye の冷泉</p>

写真 3-2.13 Karisimbi 地域における地質調査状況

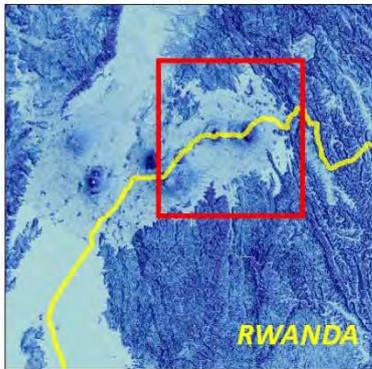
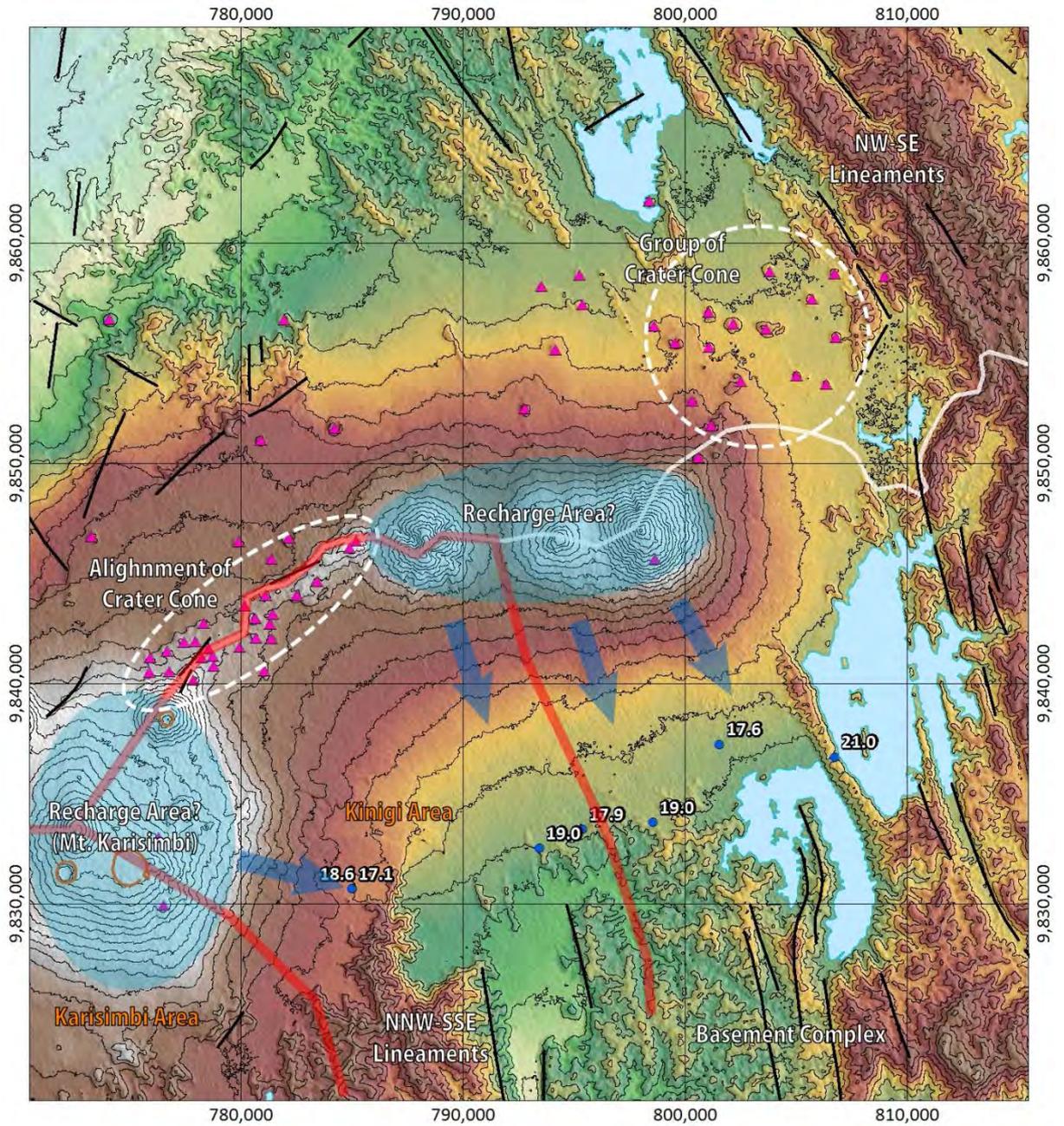
ii) Kinigi 地域

Kinigi 地域はルワンダ北西部に位置する。Kinigi 地域北部は、第四紀後期の火山が分布する Virunga Volcanoes Range (VVR) にあり、Kinigi 地域南部は原生代のマイロナイト化した花崗岩—千枚岩複合岩帯により形成される Butare Horst に位置する。

Kinigi 地域北部の地表地質は溶岩により特徴付けられ、その溶岩は Sabyinyo 火山由来及び一部 Visoke 由来のものである。また、Sabinyo 由来の火山泥流及び土石流（巨礫堆積物）も認められるが、その分布は薄い。

Kinigi 及び Buseruka 地域における衛星画像判読結果を図 3-2.34 に示す。Kinigi 地域の北端には、Karisimbi 山、Visoke 山及び Sabinyo 山の成層火山が位置する。これらの火山体は良好な涵養域になると考えられ、浸透水は良好な帯水層である溶岩や火山碎屑岩を通して、山体西側及び南側の裾野に流れていると考えられる。幾つかの冷泉（泉温 17.1～19.0°C）は火山複合体及び基盤岩類との境界に位置している。Visoke 火山と Sabinyo 火山の間の稜線に沿って、東北東—西南西に伸長する火口円錐丘の配列が観察され、断裂帯の伏在が指摘される。

Kinigi 地域の火山地域において、噴気や温泉及び変質帯などの地熱地表徴候は認められない。ただし、Rubindi, Mubona, Cyabararika 等の冷泉が北部火山地域の地形境界及び Accommodation Zone が存在する南部 the Butare horst に確認される。冷泉には CO₂ ガスが含まれており、周辺には方解石で構成されているトラバーチンが認められる。地表踏査の状況を写真 3-2.14 に示す。



LEGEND

- | Sampling Point (Temp.) | Lineament |
|------------------------|----------------------------|
| ● > 60 deg.C | — Clear |
| ● 50 - 60 deg.C | - - - Unclear |
| ● 40 - 50 deg.C | — Circle Structure |
| ● 25 - 40 deg.C | — Contour (100m intervals) |
| ● < 25 deg.C | |
| ○ No Data | |
| ▲ Cone | |

[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.34 ルワンダ北西部 Kinigi 及び Buseruka 地域における衛星画像判読結果

		
<p>Mubona の冷泉。ガスバブリングを伴う</p>	<p>Mubona に露出する火山岩 (バサナイト)</p>	<p>Mubona 近傍において火山岩の上位に発達するトラバーティン</p>
		
<p>Cyabararika の冷泉。ガスバブリングを伴う。地質は火山岩</p>	<p>Cyabararika 近傍において火山岩の上位に発達するトラバーティン</p>	<p>Rubindi の冷泉。ガスバブリングを伴う。湧出地点は溶岩流の末端部に位置する</p>
		
<p>Mt. Sabyinyo の南麓に分布する溶岩台地</p>	<p>Mt. Sabyinyo の南麓に分布する溶岩台地</p>	<p>Mt. Sabyinyo の南麓、緩傾斜の火山山麓面を構成する土石流堆積物 (地質図では Hov と表記)</p>

写真 3-2.14 Kinigi 地域における地質調査状況

iii) Gisenyi 地域

Gisenyi 地域はルワンダ北西部に位置する。Gisenyi 地域北部は第四紀後期火山が分布する Virunga Volcanoes Range (VVR)であり、Gisenyi 地域南部は原生代のマイロナイト化した花崗岩—千枚岩複合岩帯を形成する Butare Horst である。

Gisenyi 地域は大地溝帯に伴う正断層帯に位置し、その地質構造は南北系の“Recent” Border Fault 及び Accommodation Zone という 2つの断層が卓越している (BGR, 2009)。

Gisenyi 地域は、Karisimbi 山、コンゴ民主共和国領内の Nyiragongo 山及び Kivu 湖との間に広がる狭小な平坦地に位置している (図 3-2.33)。本地域においては幾つかの火口円錐丘が観察されるが配列は認められない。一方で、地形特徴より NE-SW 方向に伸長するリニアメント群が抽

出され、この方向性は Karisimbi 地域における火口円錐丘の配列方向とも一致する。Gisenyi 地域の Kivu 湖沿岸においては、泉温 70.3~73.0°C の温泉が湧出しており、周辺には NW-SE 方向に伸長するリニアメント群が観察される。

Kivu 湖海岸線 (Gisenyi 温泉) には温泉やシンター堆積物が分布している。温泉の最高温度は 73.0°C である。また、第四紀後期の火山円錐丘がある Iriba には冷泉が確認されている。地表踏査の状況を写真 3-2.15 に示す。

		
<p>Gisenyi 温泉。湧出孔周辺にトラバーティンが発達</p>	<p>Gisenyi 温泉近傍に露出する Butare 層 (Gw)。変成作用を受けた砂岩・泥岩</p>	<p>Gisenyi 温泉近傍の Kivu 湖岸に見られる礫のコンクリーション (カルサイトによる)</p>
		
<p>Iriba 地域、ドレライトの巨礫</p>	<p>Iriba の冷泉</p>	<p>Iriba 地域、雲母片岩とペグマタイト (Gw)。Bikore 川沿いに露出</p>
		
<p>Iriba 地域の北方、火山岩 (Hawaiite) と雲母片岩 (Gw) の不整合。CP との現地協議</p>	<p>Bisate cone</p>	<p>Bisate cone を構成するスコリア</p>

		
<p>Branca (Mt. Karisimbi)の東麓の溶岩（トラカイト）。複数の溶岩堆積面に区分できる</p>	<p>Branca (Mt. Karisimbi)の東麓の溶岩（トラカイト）</p>	<p>Kirerema cone を構成するスコリア</p>
		
<p>Bonde crater</p>	<p>Bonde crater のクレーター壁</p>	<p>Bonde crater のクレーター壁に付着するカルサイト</p>
		
<p>Gikobe crater。Iriba の冷泉から約 3km 北西に位置する</p>	<p>Gikobe crater。複数のクレーターが存在</p>	<p>Gikobe crater のクレーター壁。噴火時期の異なる複数の火山噴出物が観察される</p>
		
<p>クレーターコーンの最上部のスコリア</p>	<p>クレーター内に露出する雲母片岩・石英岩（Gw）</p>	<p>クレーター内に露出する雲母片岩・石英岩（Gw）</p>



写真 3-2.15 Gisenyi 地域の地質調査状況

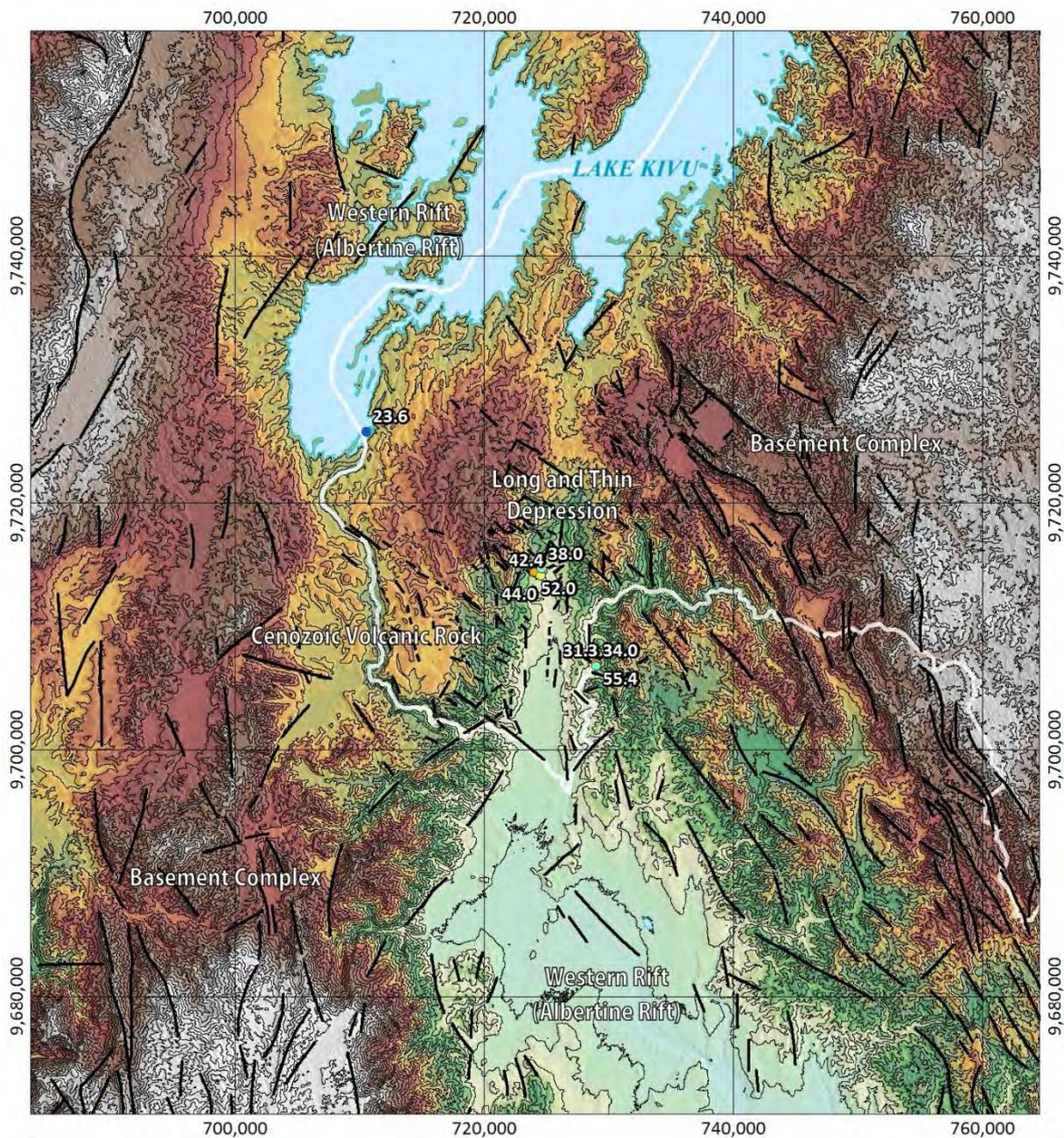
iv) Bugarama 地域

ルワンダ南西部における衛星画像判読結果を図 3-2.35 に示す。本地域の地質は、主として原生代の基盤岩類と新生代の火山岩類よりなるが、北西部で見られるような成層火山や火口円錐丘は観察されない。本地域の北部、Kivu 湖周辺に位置する連続性の良いリニアメントを伴う低地は、EARS の西部リフトに対応している。また、本地域の中央部には狭長な低地が抽出され、その形状は中央部から南部にかけて広がっている。

Bugarama 地域は Cyangugu の約 13 km 南東、the Rubyiro River valley に位置し、原生代基盤岩、第三紀の玄武岩及び第四紀の沖積層から成る。Bugarama の地質構造は南北系の断層が卓越している。

Bugarama 地域では、温泉やシンター堆積物、熱水変質帯が認められている。トラバーチン堆積物の上に、温泉が広く貯まっている箇所があり、その西縁部に主要な地熱地表徴候が認められている。Mashyuza の温泉の最高温度は 52.0 °C が計測されており、シンターは温泉周辺に堆積し、熱水変質帯は温泉付近に認められる。また、Bize の地熱徴候は Mashyuza 温泉の 8 km 南東でも認められる。温泉やシンター堆積物が Ruhwa river の谷底に確認されており、その最高温度は 55.4 °C である。

Bugarama 地域における衛星画像判読結果を図 3-2.36 に示す。本地域においては、狭長な低地が北から南にかけて位置しており、その形状は北に向かって狭くなっている。また、低地の伸長方向と平行な南北方向のリニアメント群が優勢であるが、一部には NW-SE 及び NE-SW 方向のリニアメントも観察される。Mashyuza 温泉（泉温 38.0~52.0°C）は NE-SW 方向の明瞭なリニアメントに位置しており、Bize 温泉（泉温 34.0~55.4°C）は南北系のリニアメントに沿って分布している。Mashyuza 温泉周辺の地形は温泉の北西が最も高く、周辺の地下水流動系の涵養源になっていると考えられる。加えて、上記高地と温泉の間に位置する NW-SE 方向に伸長するリニアメントは、地下水の移動経路として機能する可能性がある。地表踏査の状況を写真 3-2.16 に示す。



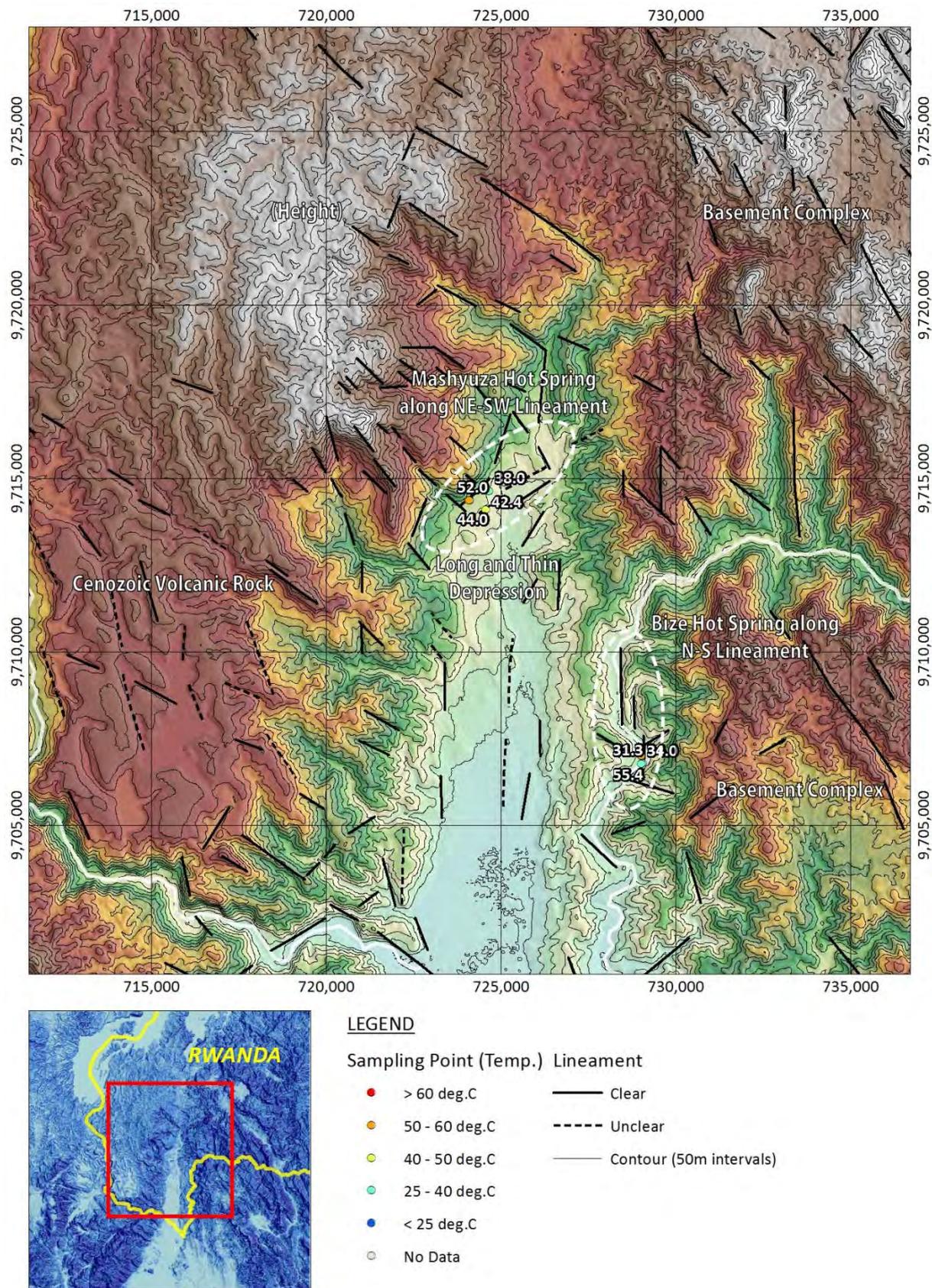
LEGEND

Sampling Point (Temp.) Lineament

- > 60 deg.C
- 50 - 60 deg.C
- 40 - 50 deg.C
- 25 - 40 deg.C
- < 25 deg.C
- No Data
- Clear
- - - Unclear
- Contour (100m intervals)

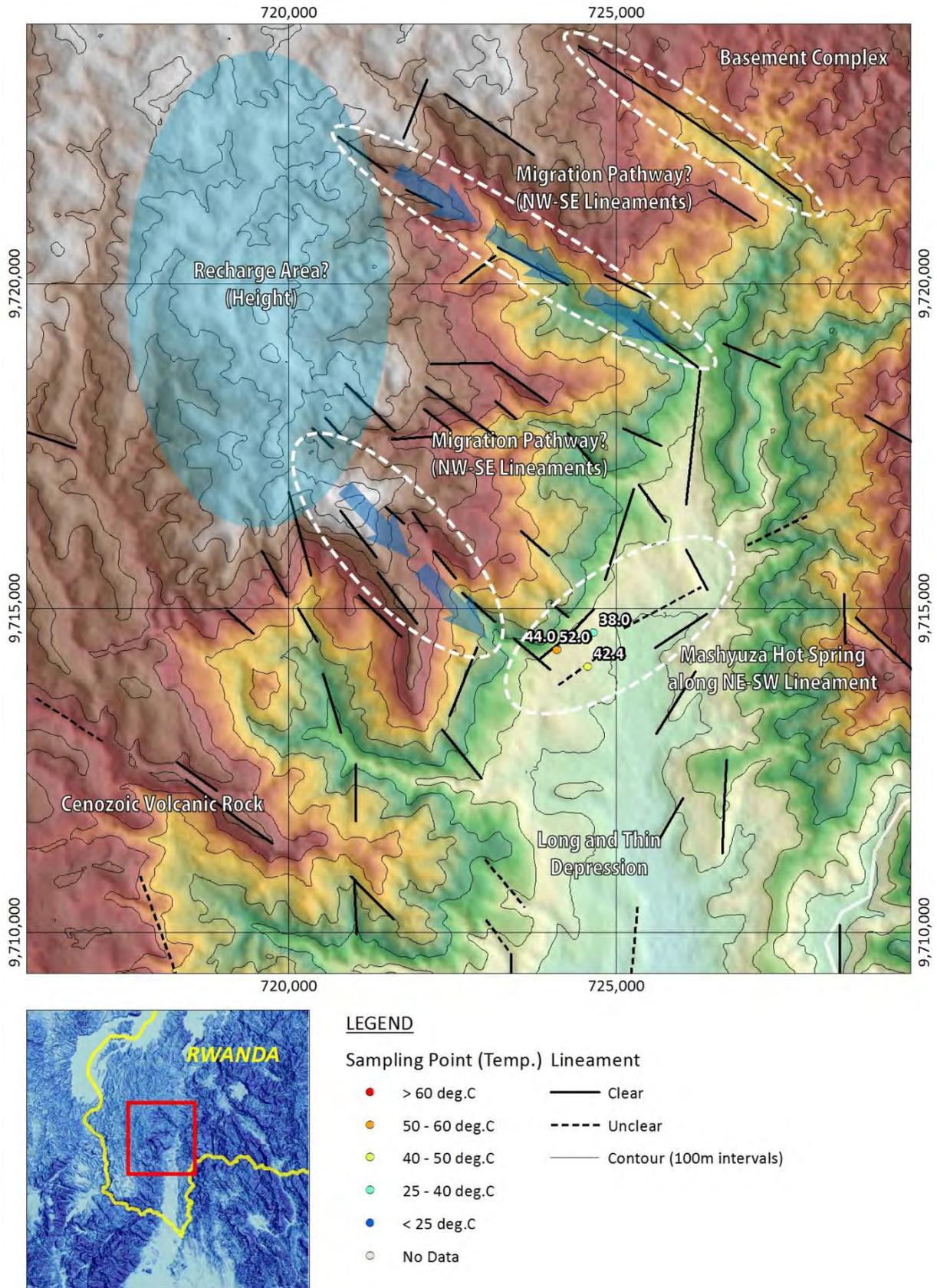
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.35 ルワンダ南西部における広域衛星画像判読結果



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.36 ルワンダ南西部 Bugarama 地域における衛星画像判読結果



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.37 Mashyuza 温泉周辺における衛星画像判読結果

		
<p>Mashyuza 温泉。山地と低地の地形境界に湧出する</p>	<p>Nyungwe 層 (Nw) に発達する断層</p>	<p>風化変質した Nyungwe 層 (Nw) : カオリナイト化</p>
		
<p>Mashyuza 温泉の下流側に厚く堆積するトラバーティン (カルサイト)</p>	<p>トラバーティンに含まれる貝化石</p>	<p>Bize 温泉。ブルンジとの国境の河川 Ruhwa 川右岸に湧出する。ブルンジ側にも温泉があるとのこと</p>
		
<p>Bize 温泉周辺に発達するトラバーティン</p>	<p>Bugarama 地域に広く分布する第三紀火山岩 (玄武岩)</p>	<p>変形・破碎の進んだ Nyungwe 層 (Nw) の観察・記載</p>

写真 3-2.16 Bugarama 地域の地質調査状況

(2) 地化学調査結果

31 地点の温泉水及び湖水について調査、試料採取し（表 3-2.15）、そのうちより選定した 21 試料を日本に持ち帰り分析した（表 3-2.16）。詳細な分析結果は地域毎（Karisimbi, Kinigi, Gisenyi, Bugarama）に示す。

表 3-2.15 試料一覧

Location No.	date	place	air		hot water		pH		EC	Longitude	Latitude	Elevation
			°C	°C	-	°C	mS/m	degree(E)				
Ma1	20-Jun	Mashyuza	27.0	44.0	6.3	(53)	200	-2.58266	29.01562	1,193		
Ma2	20-Jun	Mashyuza	27.0	52.0	6.2	(51)	220	-2.58274	29.01551	1,197		
Ma3	20-Jun	Mashyuza	27.0	42.4	6.5	(42)	220	-2.58506	29.01984	1,143		
Ma4	20-Jun	Mashyuza	27.0	38.0	8.4	(38)	220	-2.58032	29.02058	1,153		
Bi1	21-Jun	Bize	27.2	55.4	6.6	(53)	290	-2.64922	29.05995	1,051		
Bi2	21-Jun	Bize	27.2	31.3	-	-	-	-2.65120	29.06024	1,046		
Bi3	21-Jun	Bize	27.2	34.0	7.0	(35)	230	-2.65133	29.05991	1,040		
Ki1	21-Jun	Lake Kivu -S	23.7	23.6	9.2	(24)	123	-2.47986	28.89402	1,457		
Gi1	23-Jun	Gisenyi	22.0	73.0	7.0	(32)	270	-1.73990	29.27396	1,463		
Gi2	23-Jun	Gisenyi	22.0	70.3	7.2	(36)	270	-1.73899	29.27367	1,467		
Gi3	23-Jun	Gisenyi	22.0	54.0	-	-	-	-1.73877	29.27360	1,463		
Ki2	23-Jun	Lake Kivu -N	22.0	23.9	9.1	(25)	127	-1.74091	29.27292	1,462		
Kalw1	24-Jun	Karago	12.9	-	-	-	14	-1.64793	29.52383	2,273		
Ka1	24-Jun	Karago	12.9	73.2	7.8	(23)	138	-1.64810	29.52459	2,278		
Karw	24-Jun	Karago	12.9	-	-	-	-	-1.64825	29.52221	2,293		
Mb1	24-Jun	Mbonyebyombi	15.5	34.7	6.9	(32)	103	-1.66558	29.54093	2,217		
Mb2	24-Jun	Mbonyebyombi	15.5	16.8	6.8	(18)	19	-1.65787	29.53121	2,475		
Kalake	24-Jun	Karago Lake	-	18.4	7.7	(20)	20	-1.62504	29.51017	2,302		
Nt1	25-Jun	Nteranya	19.0	18.1	7.0	(19)	51	-1.71450	29.37526	2,043		
Ir1	25-Jun	Iriba	19.0	21.6	6.4	(21)	260	-1.70997	29.37955	2,098		
Ir2	25-Jun	Iriba	19.0	22.0	7.9	(23)	103	-1.70787	29.37092	1,961		
Ru1	25-Jun	Rubindi	24.4	18.6	6.3	(20)	250	-1.53061	29.56135	2,110		
Ru2	25-Jun	Rubindi	24.4	17.1	7.0	(18)	31	-1.53061	29.56135	2,110		
Mu1	25-Jun	Mubona	23.4	19.0	6.4	(20)	310	-1.51399	29.63706	1,808		
Cy1	26-Jun	Cyabararika	21.6	17.9	6.3	(19)	300	-1.50611	29.65443	1,809		
Mt1	26-Jun	Mata	21.6	19.0	6.9	(20)	29	-1.50327	29.68294	1,854		
Bu1	26-Jun	Buseruka	24.5	17.6	6.3	(19)	320	-1.47121	29.70993	1,821		
Bl1	26-Jun	Lake Bulera	25.0	21.0	8.0	(22)	13	-1.47640	29.75660	1,861		
Kg1	29-Jun	Kagohe	19.0	18.8	6.9	(20)	53	-1.62954	29.45733	2,376		
Cm1	29-Jun	Cyamabuye	21.5	16.2	6.7	(18)	53	-1.62817	29.47783	2,362		
Ny1	29-Jun	Nyrakigugu lake	18.8	19.1	8.7	(19)	25	-1.62065	29.48685	2,339		

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.16 温泉水及び湖水の地化学分析結果

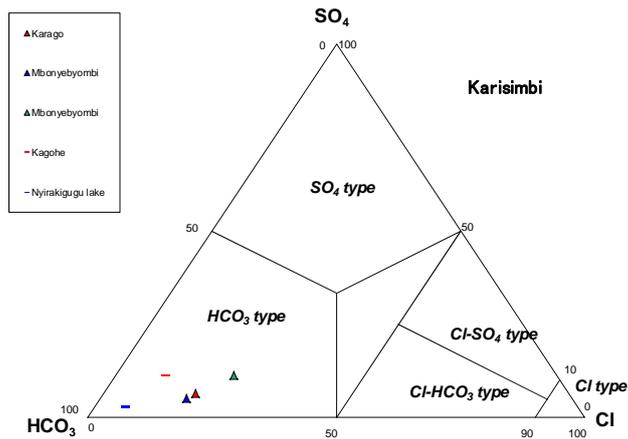
Sample name	Date	Chemical component														Isotope	
		pH	EC	Na	K	Li	NH ₄	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	F	B	T-SiO ₂	δD (H ₂ O)	δ ¹⁸ O (H ₂ O)
		- (°C)	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	‰
Ma1	2014/6/20	7.01 (25)	196	296	47.0	1.10	0.03	75.8	55.3	127	43.4	1110	1.61	2.21	41	-	-
Ma2	2014/6/20	6.83 (26)	201	323	49.1	1.08	0.22	76.9	55.6	126	49.2	1100	1.68	1.18	42	-5	-2.4
Bi1	2014/6/21	6.99 (26)	252	346	111	1.38	0.56	82.6	79.5	150	106	1400	2.85	2.06	50	-5	-2.3
Ki1	2014/6/21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	3.8
Gi1	2014/6/23	7.20 (26)	243	555	46.0	0.46	0.09	36.8	11.0	230	60.7	1130	5.47	0.63	58	-10	-3.0
Gi2	2014/6/23	7.19 (26)	248	553	46.9	0.45	0.12	36.0	10.7	220	59.9	1180	5.16	0.57	59	-10	-3.2
Ki2	2014/6/23	8.85 (26)	117	106	82.6	<0.01	<0.01	8.52	79.4	26.0	16.6	626	1.41	0.04	8	26	3.8
Ka1	2014/6/24	7.64 (26)	126	255	15.3	0.42	0.18	21.2	2.35	79.3	78.1	555	8.04	0.08	91	-11	-3.6
Mb1	2014/6/24	7.21 (26)	91.2	178	11.8	0.29	0.05	19.1	2.34	54.0	44.7	415	6.36	0.05	62	-13	-3.7
Mb2	2014/6/24	6.60 (26)	15.4	5.72	1.06	<0.01	0.04	12.7	5.41	5.1	6.7	24	0.40	<0.01	31	-9	-3.2
Nt1	2014/6/25	6.63 (26)	39.8	9.59	8.48	<0.01	0.92	40.5	15.6	8.9	10.1	220	0.58	<0.01	48	-3	-2.3
Ir1	2014/6/25	6.79 (26)	248	439	19.1	0.52	0.10	86.7	25.1	320	75.0	970	2.87	0.11	58	-9	-3.2
Ru1	2014/6/25	6.61 (26)	238	149	150	0.07	0.03	44.2	206	23.6	16.8	1660	1.30	0.05	110	-10	-3.1
Ru2	2014/6/25	7.06 (26)	28.1	12.5	17.0	<0.01	0.02	16.2	12.0	6.6	7.1	144	0.53	<0.01	46	-5	-2.3
Mu1	2014/6/25	6.51 (26)	294	172	185	0.05	0.03	117	243	22.5	42.0	2140	1.92	0.06	76	-10	-3.4
Cy1	2014/6/26	6.50 (26)	286	175	171	0.05	0.04	130	230	16.9	44.2	2090	1.94	0.06	75	-10	-3.5
Mt1	2014/6/26	6.80 (26)	20.7	5.85	5.13	<0.01	0.03	16.9	10.4	5.0	3.1	109	0.17	<0.01	35	-7	-2.4
Bu1	2014/6/26	6.56 (26)	305	184	175	0.05	0.06	131	253	15.6	57.5	2260	1.92	0.07	80	-13	-3.7
Bl1	2014/6/26	7.57 (26)	12.5	7.33	7.49	<0.01	0.03	6.54	3.94	5.4	4.4	61	0.43	<0.01	2.71	15	2.0
Kg1	2014/6/29	6.84 (26)	46.7	18.9	5.94	0.04	0.02	49.3	14.5	12.1	35.7	159	1.38	<0.01	38	-9	-3.0
Ny1	2014/6/29	7.34 (26)	24.2	5.66	7.27	<0.01	0.12	21.7	12.1	5.0	6.2	124	0.76	<0.01	14	8	0.2

[出所] JICA 調査団で作成

1) Karisimbi

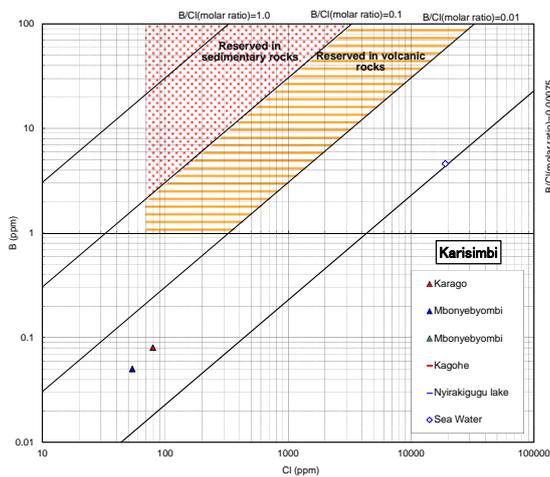
ここでは Karago, Kagohe, Mbonyebyombi の温泉及び Nyirakigugu 湖の湖水までの範囲を Karisimbi 地域とする。すべての試料は HCO₃ を主成分（最大で 626mg/L、表 3-2.16）とする伝導加熱型（HCO₃ 型）の温泉水に分類される（図 3-2.38）。深部熱水の混入の指標となる、Cl 濃度は最大で 79.3mg/L と低く、試料の Cl 濃度と B 濃度の関係からも、伝導加熱型であることが支持された（図 3-2.39）。また、酸素及び水素同位体比は天水と同程度の値を示しており（図 3-2.40）、高温下の水-岩石反応によって生じる酸素同位体の正のシフトは起きていないことから、深部熱水の混入はほとんどないことが推定される。シリカ温度と Cl 濃度の関係で、Karago と Mbonyebyombi は同一直線上にプロットされ、このことはこれらの温泉水が混合関係にあることを示唆する（図 3-2.41）。これは同一起源の流体が混合しており、混合率の異なる温泉であることを意味する。

貯留層温度の決定に関して、Na-K-Mg 比温度計は平衡に達していないため適用できない（図 3-2.42）。これは、比較的浅部の低温の帯水層から多量に HCO₃ が添加された影響による可能性がある。地化学温度計の計算結果を比較すると、溶解度に基づいて計算されたシリカ温度が適切と考えられる（図 3-2.43、表 3-2.17）。また図 3-2.44 から、Karisimbi ではシリカ温度の α-クリストバライトが適切と考えられ、最高温度は Karago の 81°C と推定した。



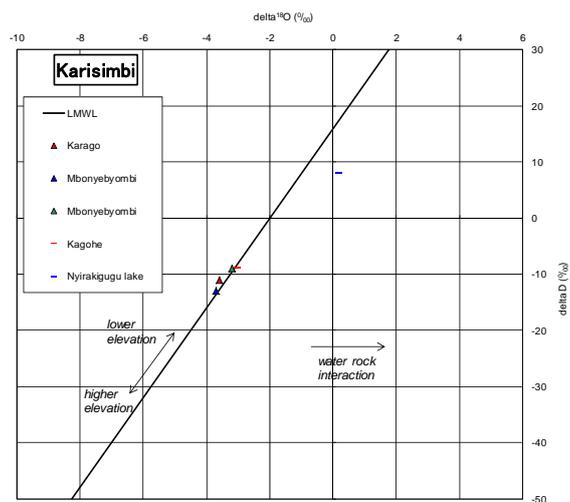
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.38 主要陰イオンの三成分図 (Karisimbi)



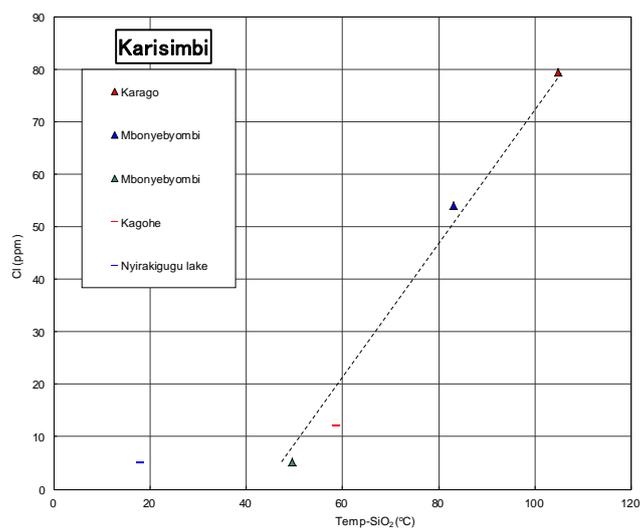
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.39 Cl 濃度と B 濃度の関係図 (Karisimbi)



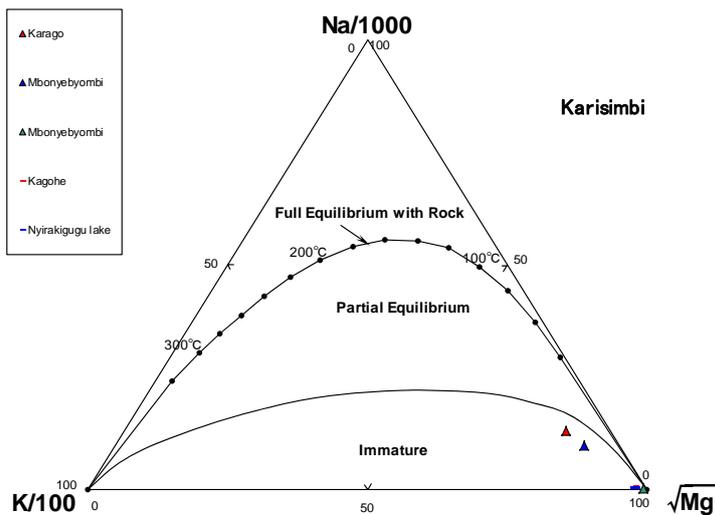
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.40 水の酸素同位体比と水素同位体比の関係図 (Karisimbi)



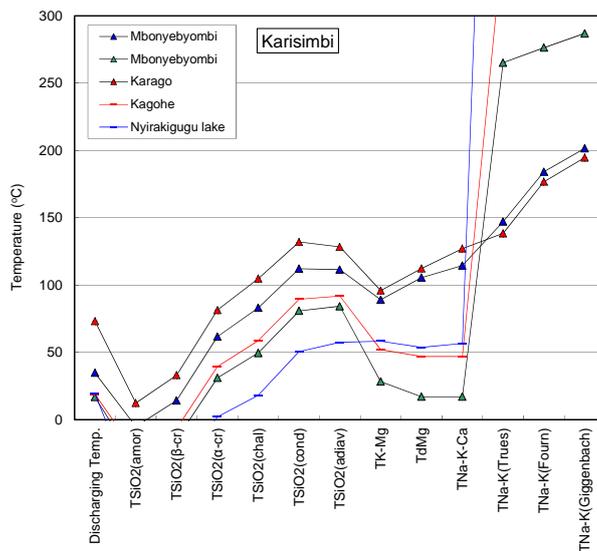
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.41 シリカ温度と Cl 濃度との関係図 (Karisimbi)



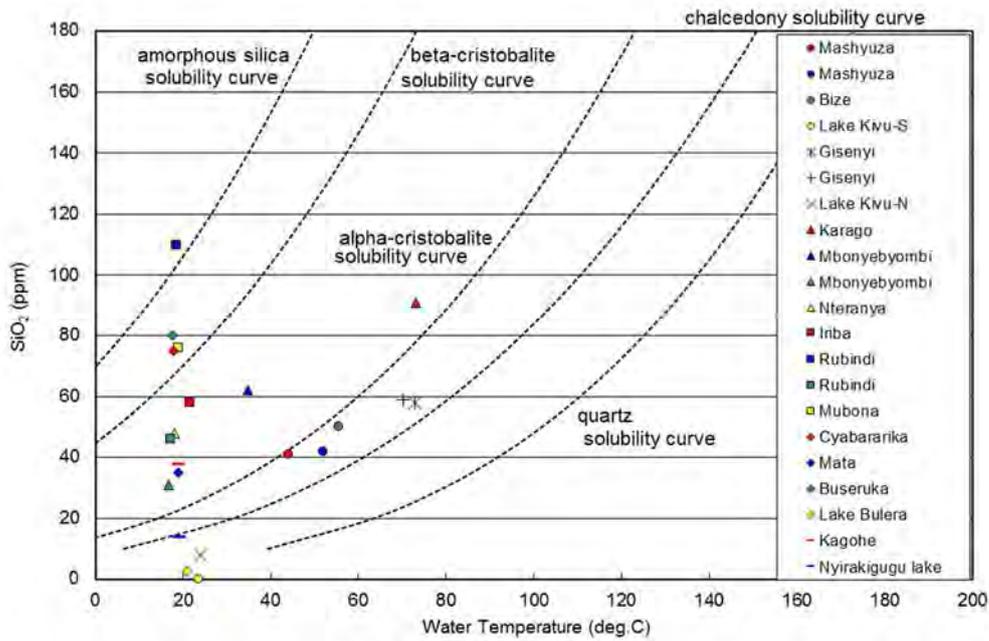
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.42 Na-K-Mg 三成分図 (Karisimbi)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.43 Karisimbi の地化学温度



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.44 シリカ鉱物の溶解度曲線

表 3-2.17 地化学温度計算結果

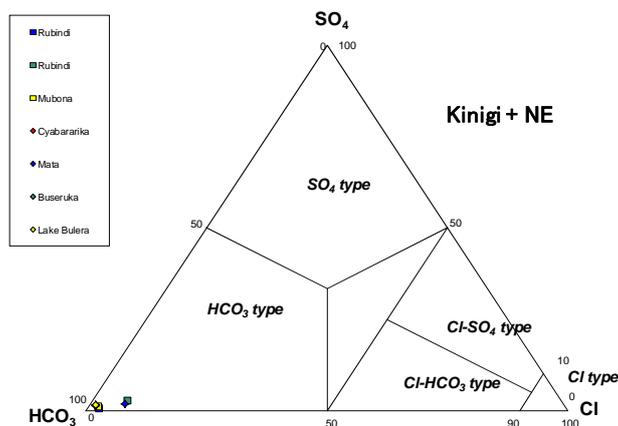
Area		Karisimbi					Kinigi + NE		
Site		Karago	Mbonyebyombi	Mbonyebyombi	Kagohe	Nyirakigugu lake	Rubindi	Rubindi	Mubona
Sample No.		Ka1	Mb1	Mb2	Kg1	Ny1	Ru1	Ru2	Mu1
(°C)	Discharging Temp.	73.2	34.7	16.8	18.8	19.1	18.6	17.1	19.0
Geothermometry (°C)	TSiO2(amor)	12	-5	-32	-25	-56	22	-17	4
	TSiO2(β-cr)	33	14	-14	-7	-41	43	1	24
	TSiO2(α-cr)	81	62	31	39	2	92	48	72
	TSiO2(chal)	105	83	49	59	18	116	68	94
	TSiO2(cond)	132	112	81	89	51	143	98	122
	TSiO2(adiav)	128	111	84	92	57	137	99	120
	TK-Mg	96	89	28	52	58	97	78	101
	TdMg	112	106	17	47	54	not applicable	35	not applicable
	TNa-K-Ca	127	114	17	47	57	209	99	186
	TNa-K(Truesdell)	138	147	265	356	870	728	909	763
	TNa-K(Fournier)	177	184	276	340	612	549	629	565
	TNa-K(Giggenbach)	195	201	287	344	574	522	587	536
Area		Kinigi + NE				Gisenyi			
Site		Cyabararika	Mata	Buseruka	Lake Bulera	Gisenyi	Gisenyi	Nteranya	Iriba
Sample No.		Cy1	Mt1	Bu1	Bl1	Gi1	Gi2	Nt1	Ir1
(°C)	Discharging Temp.	17.9	19.0	17.6	21.0	73.0	70.3	18.1	21.6
Geothermometry (°C)	TSiO2(amor)	3	-28	6	-94	-8	-7	-16	-8
	TSiO2(β-cr)	23	-10	26	-82	11	12	3	11
	TSiO2(α-cr)	71	36	74	-43	58	59	50	58
	TSiO2(chal)	93	55	97	-31	79	80	70	79
	TSiO2(cond)	122	86	125	2	109	110	100	109
	TSiO2(adiav)	120	89	122	13	109	109	101	109
	TK-Mg	99	52	98	71	105	106	59	72
	TdMg	not applicable	52	not applicable	49	76	77	54	60
	TNa-K-Ca	179	52	180	85	174	176	54	106
	TNa-K(Trues)	713	663	700	736	168	170	666	112
	TNa-K(Fourn)	542	517	536	553	201	203	519	155
	TNa-K(Giggenbach)	517	496	511	525	218	219	498	174
Area		Gisenyi	Bugarama						
Site		Lake Kivu-N	Mashyuza	Mashyuza	Bize				
Sample No.		Ki2	Ma1	Ma2	Bi1				
(°C)	Discharging Temp.	23.9	44.0	52.0	55.4				
Geothermometry (°C)	TSiO2(amor)	-71	-22	-21	-14				
	TSiO2(β-cr)	-57	-4	-3	5				
	TSiO2(α-cr)	-15	43	44	51				
	TSiO2(chal)	-1	62	63	72				
	TSiO2(cond)	32	93	94	102				
	TSiO2(adiav)	41	95	96	103				
	TK-Mg	94	84	85	102				
	TdMg	not applicable	21	22	19				
	TNa-K-Ca	234	141	204	184				
	TNa-K(Trues)	613	243	238	360				
	TNa-K(Fourn)	492	260	256	343				
	TNa-K(Giggenbach)	475	272	268	346				

[出所] JICA 調査団で作成

2) Kinigi

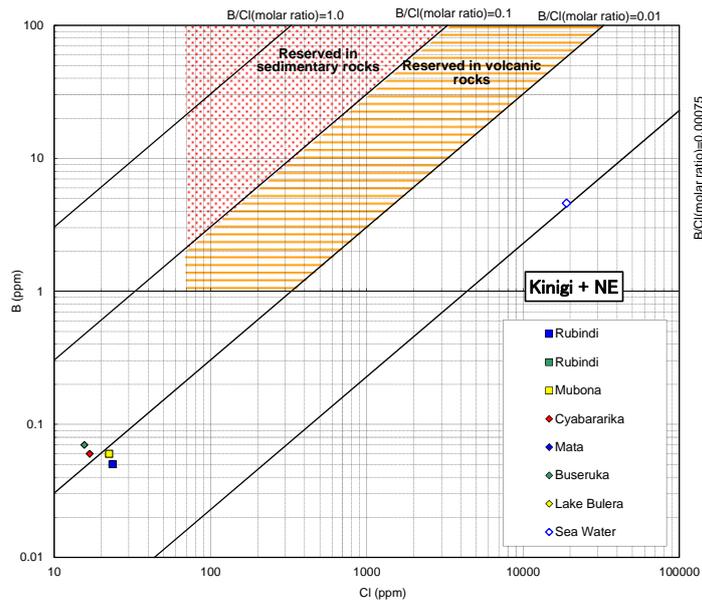
ここでは Rubindi, Mubona, Cyabararika, Mata, Buseruka の温泉及び Bulera 湖の湖水までの範囲を Kinigi 地域とする。すべての試料は HCO_3 を主成分（最大で 2,260mg/L、表 3-2.16）とする伝導加熱型（ HCO_3 型）の温泉水に分類される（図 3-2.45）。深部熱水の混入の指標となる、Cl 濃度は最大で 23.6mg/L と低く、試料の Cl 濃度と B 濃度の関係からも、伝導加熱型であることが支持された（図 3-2.46）。また、酸素及び水素同位体比は天水と同程度の値を示しており（図 3-2.47）、高温下の水-岩石反応によって生じる酸素同位体の正のシフトは起きていないことから、深部熱水の混入はほとんどないことが推定される。シリカ温度と Cl 濃度の関係で、Rubindi と Mata は同一直線上にプロットされ、このことはこれらの温泉水が混合関係にあることを示唆する（図 3-2.48）。これは同一起源の流体が混合しており、混合率の異なる温泉であることを意味する。

貯留層温度の決定に関して、Na-K-Mg 比温度計は平衡に達していないため適用できない（図 3-2.49）。これは、比較的浅部の低温の帯水層から多量に HCO_3 が添加された影響による可能性がある。地化学温度計の計算結果を比較すると、溶解度に基づいて計算されたシリカ温度が適切と考えられる（図 3-2.50、表 3-2.17）。また図 3-2.44 から、Kinigi ではシリカ温度のアモルファスシリカ（Rubindi のみに適用）もしくは β -クリストバライト（Rubindi 以外に適用）が適切と考えられ、最高温度は Buseruka の 26°C と推定した。



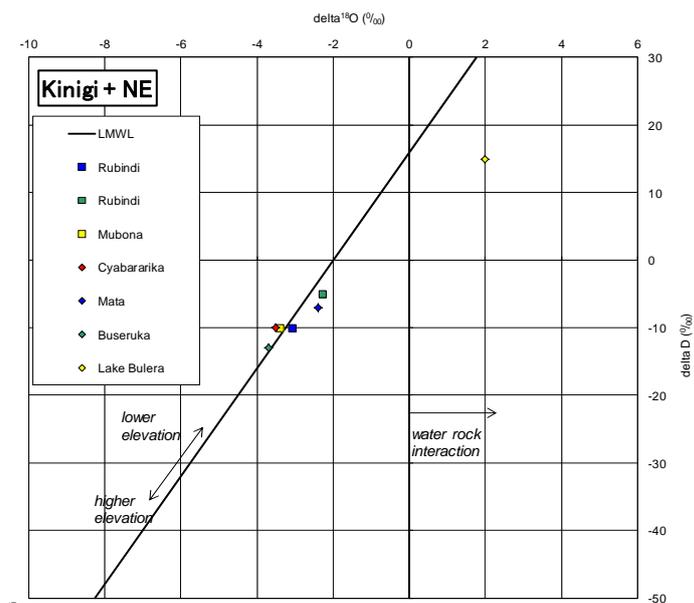
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.45 主要陰イオンの三成分図 (Kinigi)



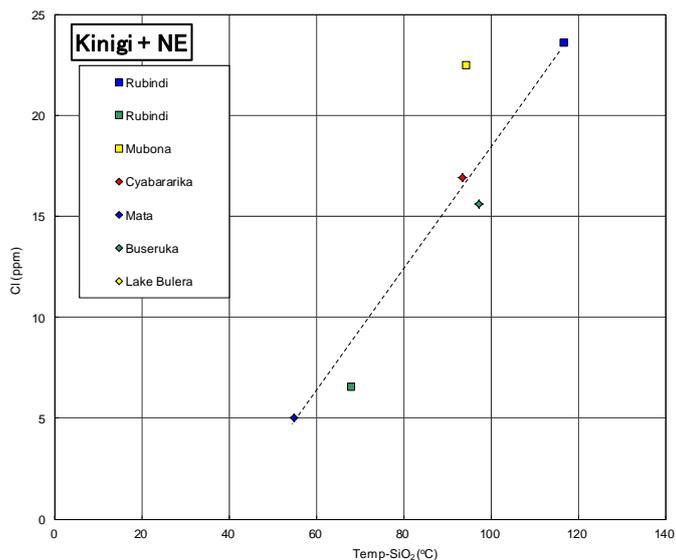
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.46 Cl 濃度と B 濃度の関係図 (Kinigi)



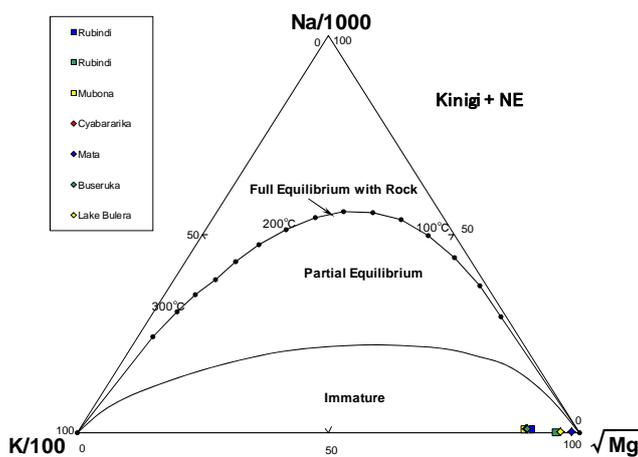
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.47 水の酸素同位体比と水素同位体比の関係図 (Kinigi)



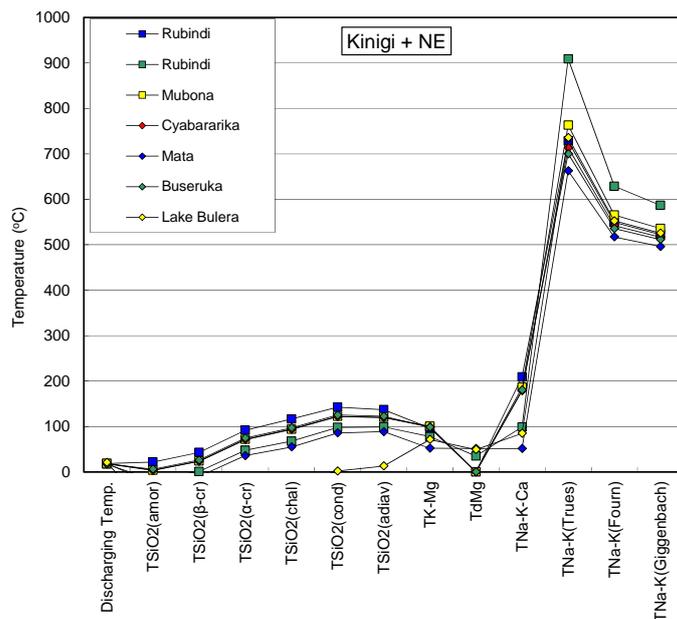
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.48 シリカ温度と Cl 濃度の関係図 (Kinigi)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.49 Na-K-Mg 三成分図 (Kinigi)



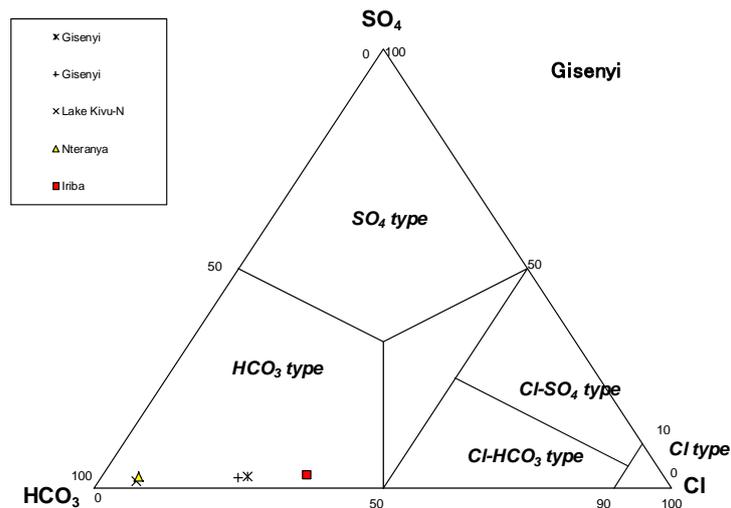
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.50 Kinigi の地化学温度

3) Gisenyi

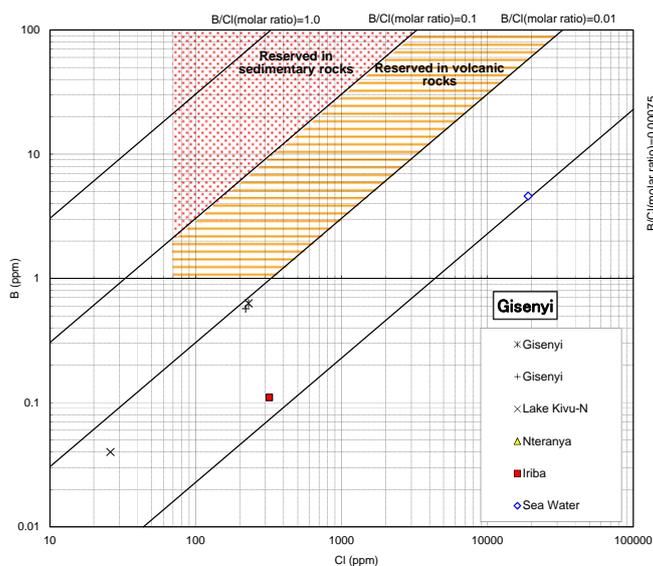
ここでは Gisenyi, Iriba, Nteranya の温泉及び Kivu 湖の湖水までの範囲を Gisenyi 地域とする。すべての試料は HCO_3 を主成分（最大で 1,180mg/L、表 3-2.16）とする伝導加熱型（ HCO_3 型）の温泉水に分類される（図 3-2.51）。深部熱水の混入の指標となる、Cl 濃度は最大で 320mg/L であり、深部熱水の混入の可能性が示唆される。また、試料の B 濃度は Cl 濃度に比べ低い値を示しており（図 3-2.52）、変成岩がこれらの温泉の形成に関与している可能性がある。ただし、酸素及び水素同位体比は天水と同程度の値を示しており（図 3-2.53）、高温下の水-岩石反応によって生じる酸素同位体の正のシフトは起きていないことから、深部熱水が混入している場合でも少量であることが推定される。シリカ温度と Cl 濃度の関係で、Gisenyi と Iriba の温泉水は混合関係になく（図 3-2.54）、これらの温泉水はそれぞれ別の起源を持つことが推定される。

貯留層温度の決定に関して、Na-K-Mg 比温度計は平衡に達していないため適用できない（図 3-2.55）。これは、比較的浅部の低温の帯水層から多量に HCO_3 が添加された影響による可能性がある。地化学温度計の計算結果を比較すると、溶解度に基づいて計算されたシリカ温度が適切と考えられる（図 3-2.56、表 3-2.17）。また図 3-2.44 から、Gisenyi ではシリカ温度のカルセドニーが適切と考えられ、最高温度は Gisenyi の 80°C と推定した。



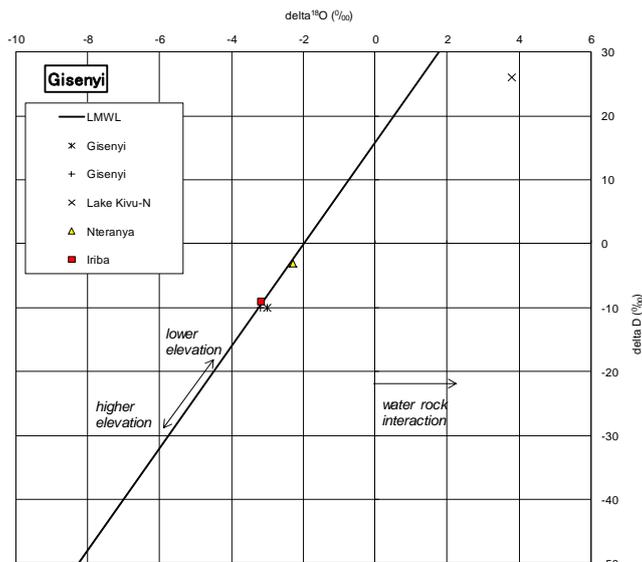
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.51 主要陰イオンの三成分図 (Gisenyi)



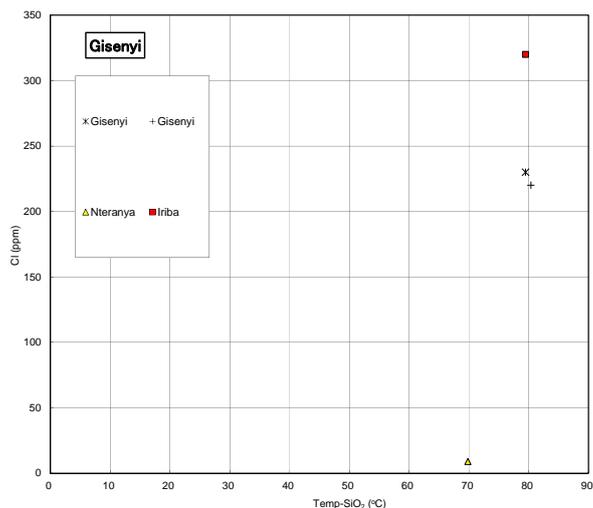
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.52 Cl 濃度と B 濃度の関係図 (Gisenyi)



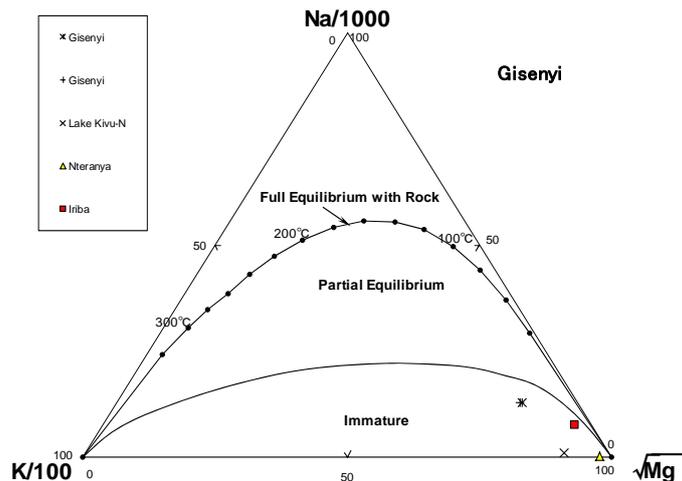
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.53 水の酸素同位体比と水素同位体比の関係図 (Gisenyi)



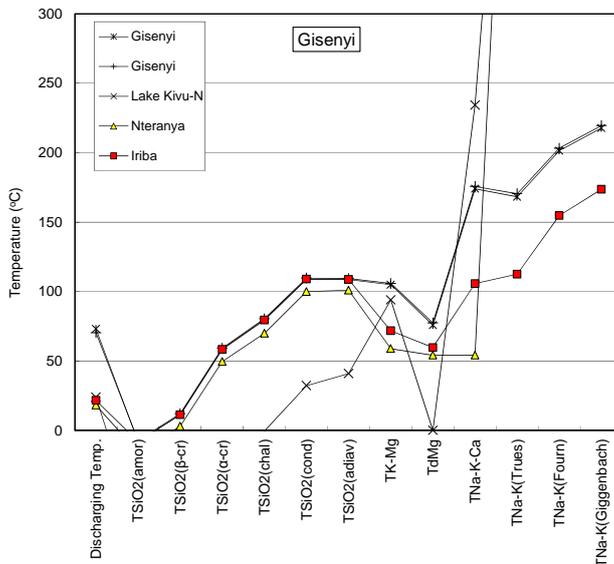
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.54 シリカ温度と Cl 濃度の関係図 (Gisenyi)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.55 Na-K-Mg 三成分図 (Gisenyi)



[出所] JICA 調査団で作成

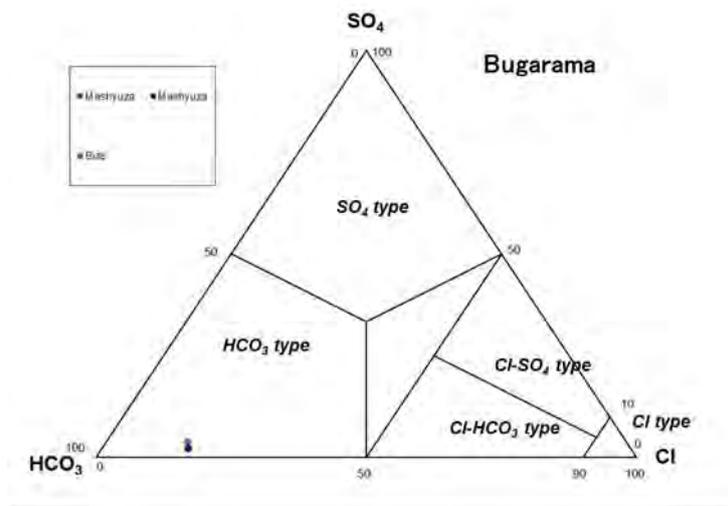
図 3-2.56 Gisenyi の地化学温度

4) Bugarama

ここでは Mashyuza と Bize の温泉までの範囲を Bugarama 地域とする。すべての試料は HCO_3 を主成分（最大で 1,400mg/L、表 3-2.16）とする伝導加熱型（ HCO_3 型）の温泉水に分類される（図 3-2.57）。深部熱水の混入の指標となる、Cl 濃度は最大で 150mg/L であり、深部熱水の混入の可能性が示唆される。また、試料の Cl 濃度と B 濃度の関係から（図 3-2.58）、火山岩がこれらの温泉の形成に関与している可能性がある。ただし、酸素及び水素同位体比は天水と同程度の値を示しており（図 3-2.59）、高温下の水-岩石反応によって生じる酸素同位体の正のシフトは起きていないことから、深部熱水が混入している場合でも少量であることが推定される。シリカ温度と Cl 濃度の関係で、Mashyuza と Bize は同一直線上にプロットされ、このことはこれ

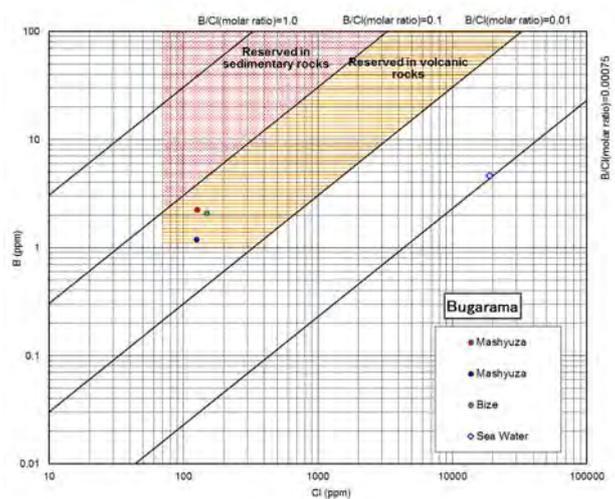
らの温泉水が混合関係にあることを示唆する (図 3-2.60)。これは同一起源の流体が混合しており、混合率の異なる温泉であることを意味する。

貯留層温度の決定に関して、Na-K-Mg 比温度計は平衡に達していないため適用できない (図 3-2.61)。これは、比較的浅部の低温の帯水層から多量に HCO_3 が添加された影響による可能性がある。地化学温度計の計算結果を比較すると、溶解度に基づいて計算されたシリカ温度が適切と考えられる (図 3-2.62、表 3-2.17)。また図 3-2.44 から、Bugarama ではシリカ温度のカルセドニーが適切と考えられ、最高温度は Bize の 72°C と推定した。



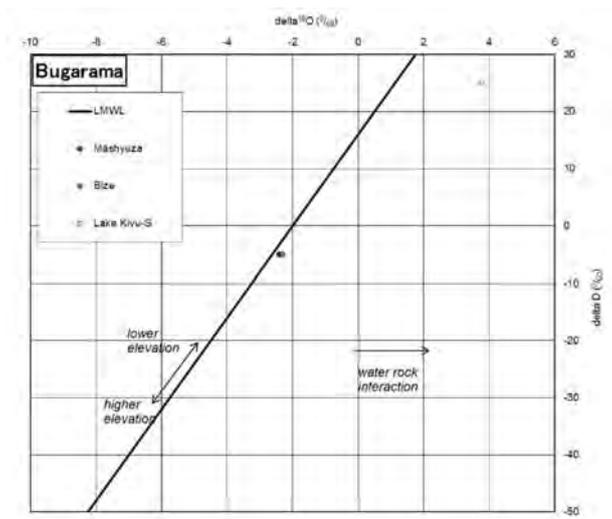
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.57 主要陰イオンの三成分図 (Bugarama)



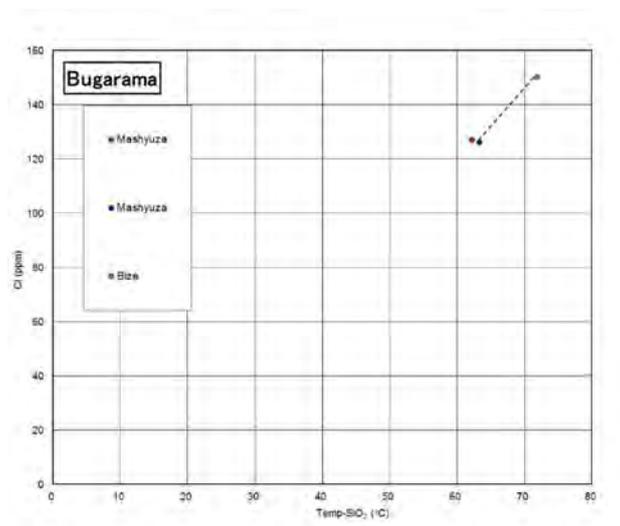
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.58 Cl 濃度と B 濃度の関係図 (Bugarama)



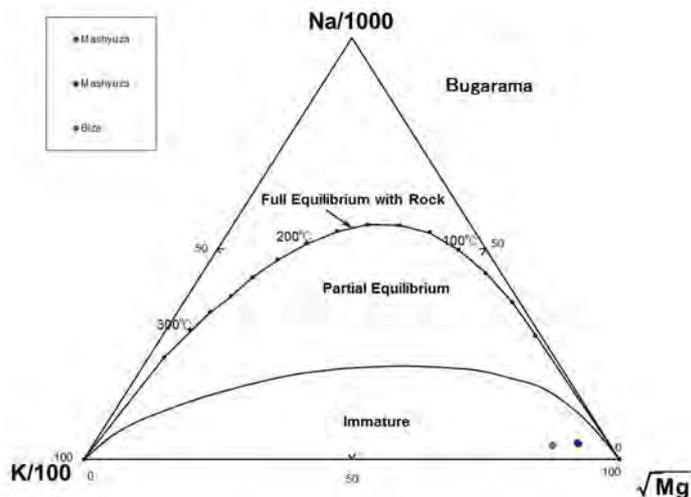
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.59 水の酸素同位体比と水素同位体比の関係図 (Bugarama)



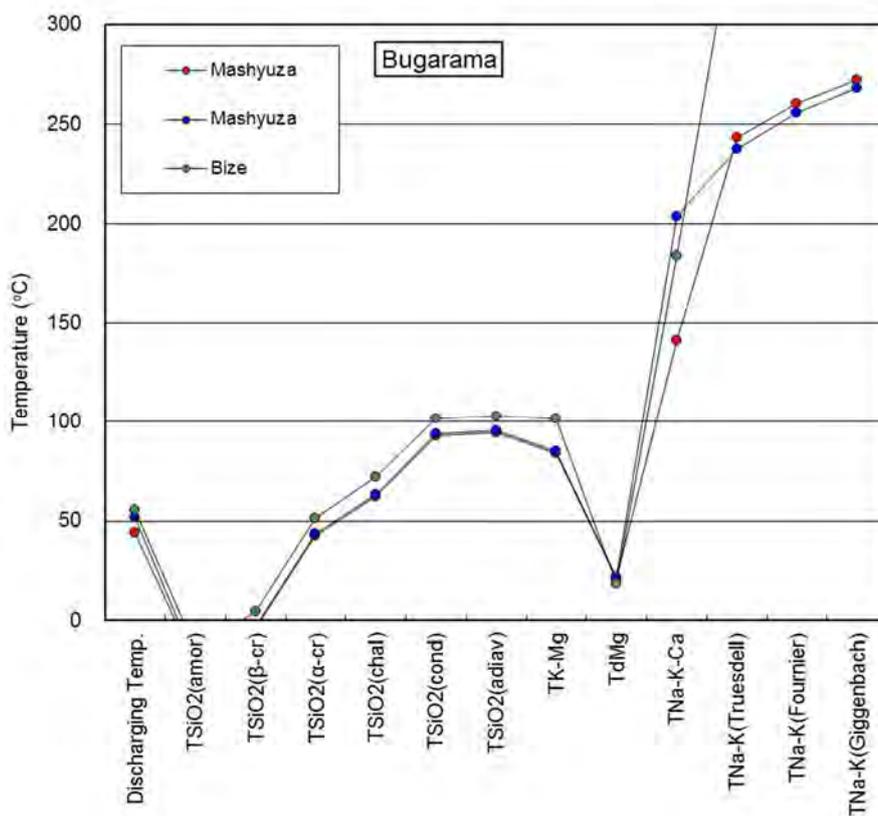
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.60 シリカ温度と Cl 濃度との関係図 (Bugarama)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.61 Na-K-Mg 三成分図 (Bugarama)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.62 Bugarama の地化学温度