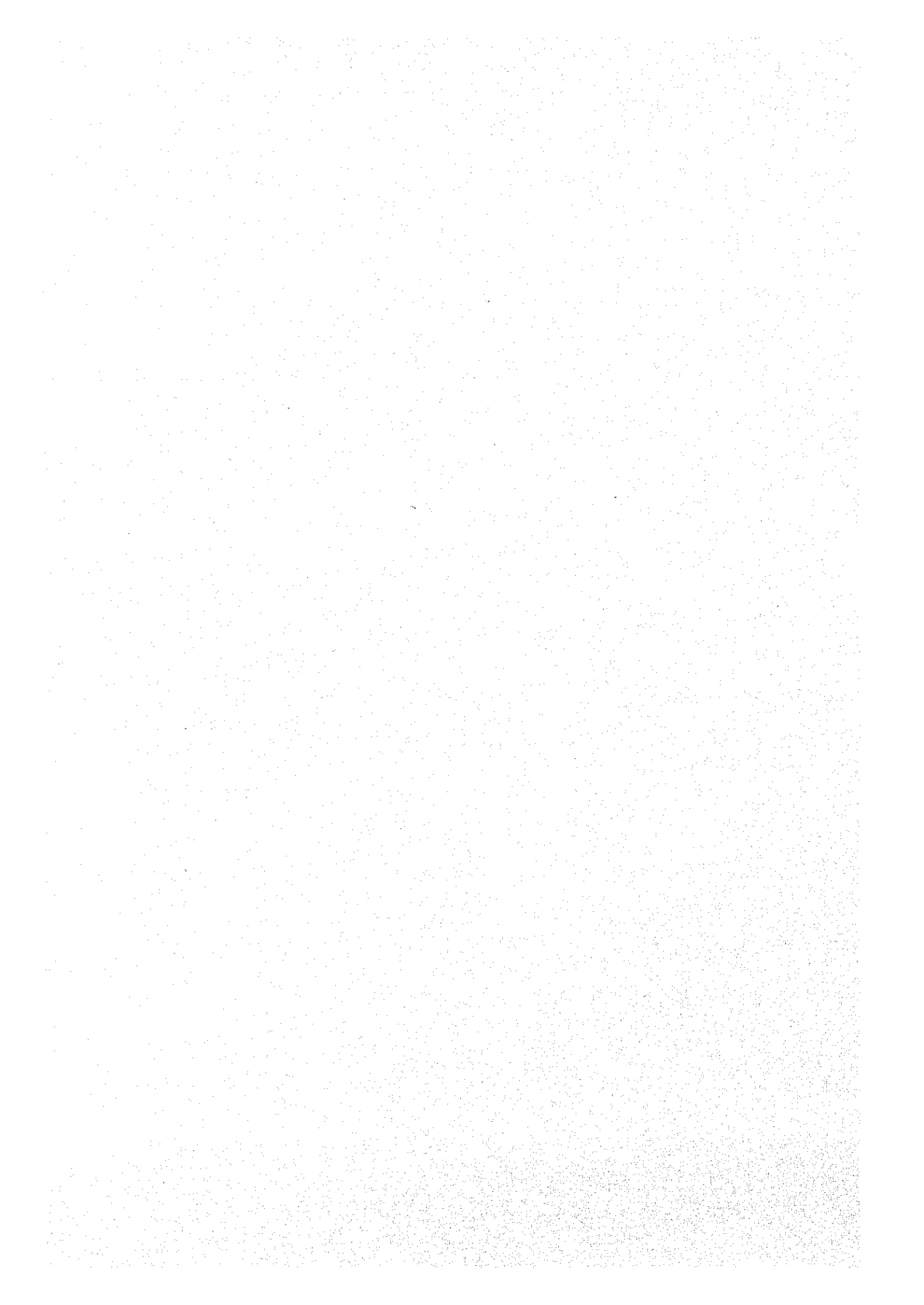


丹波国丹波郡丹波市丹波市丹波市丹波市  
丹波市丹波市丹波市丹波市丹波市丹波市

丹波市

丹波市丹波市丹波市

丹波市丹波市丹波市  
丹波市丹波市丹波市



ナミビア共和国オレンジ・カルクフェルド地域  
資源開発協力基礎調査報告書

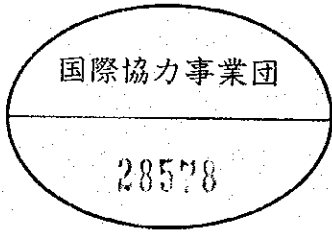
第 2 年 次



28578

平成 7 年 3 月

国際協力事業団  
金属鉱業事業団



国際協力事業団

28578

## は し が き

日本国政府はナミビア共和国政府の要請にこたえ、同国の南部及び北部に位置するオレンジ・カルクフェルド地域の鉱物資源賦存の可能性を確認するため、既存データ解析、地化学探査、ボーリング調査などの鉱床探査に関する諸調査を実施することとし、その実施を国際協力事業団に委託した。国際協力事業団は、本調査の内容が地質及び鉱物資源の調査という専門分野に属することから、この調査の実施を金属鉱業事業団に委託することとした。本調査は、平成5年度を第1年次とする2年次にあたり、金属鉱業事業団は3名の調査団を編成して平成6年8月13日から平成6年11月2日まで現地に派遣した。

現地調査は、ナミビア共和国政府機関、国家計画委員会、鉱山エネルギー省地質調査所の協力を得て予定どおり完了した。本報告書は、本年次の調査結果をとりまとめたもので、最終報告書の一部となるものである。

おわりに、本調査の実施に当たってご協力いただいたナミビア共和国政府関係機関ならびに外務省、通商産業省、在南アフリカ共和国日本国大使館及び関係各位の方々に衷心より感謝の意を表するものである。

平成7年2月

国際協力事業団

総裁 藤田 公郎

金属鉱業事業団

理事長 石川 丘

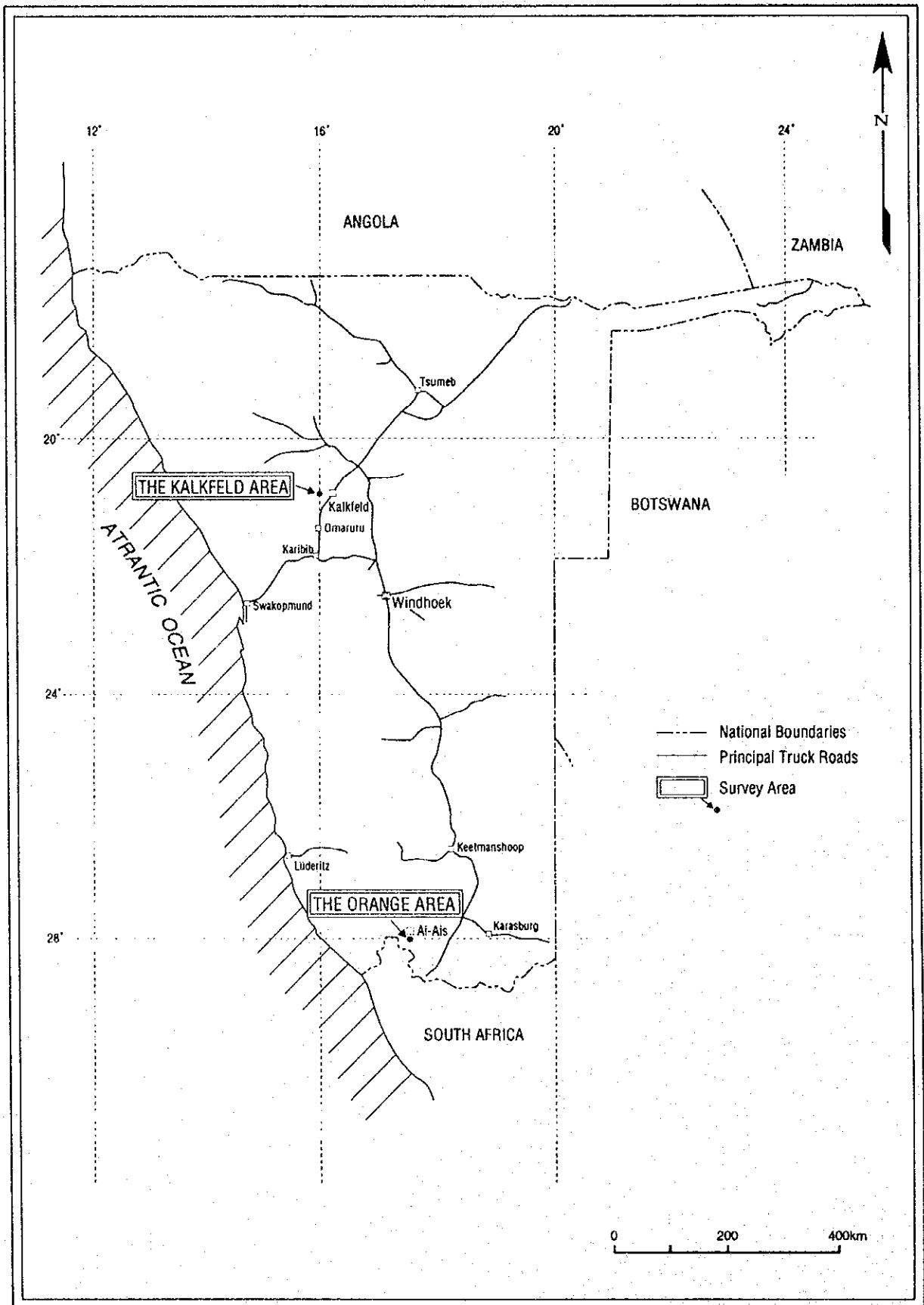


图 I - 1 - 1 調查地域位置图

## 要 約

本調査は、ナミビア共和国オレンジ・カルクフェルド地域において、地質状況及び鉱床賦存状況を解明することにより、新鉱床を発見することを目的として実施した。

第1年次はオレンジ地域とカルクフェルド地域の両地域で既存データ解析と地化学探査を実施し、新鉱床賦存性の高い地域を抽出した。第2年次にあたる本年次は、第1年次調査で抽出した鉱床賦存性の高いオレンジ地域のベフォルサイト中央・北東両岩体に対象を絞り、地化学探査とボーリング調査を実施した。これらの調査結果は次のように要約される。

オレンジ地域の地質は先カンブリア代のMokolian系ナマクア(Namaqua)変成複合岩体(1,200Ma±)とカンブリア代のNamibian系ナマ(Nama)層群(560-500Ma)を基盤とし、これをマリンカスクエラカーボナタイト複合岩体が岩柱状(MQC)に貫入している。

このMQCは、Kuboos-Bremen構造線沿いに、北東-南西方向に直線的に配列し、アルカリ貫入岩体群の一部を構成する。また、MQCはこのKuboos-Bremen構造線とpost-Karoo断層の交差部で形成されている。

MQCの侵食形態は浅所深成型である。侵食深度は中程度であり、類似カーボナタイトと比較すると、MQCは地下深部まで岩体が賦存する。

MQCは4箇所の主貫入部を有する。これらは閃長岩複合岩体(Msw, Msp), ソーバイト-閃長岩複合岩体(Mcs, Msu, Msr), ベフォルサイト北東岩体(Mcb2), ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)からなり、この順に貫入している。

カーボナタイトの主要鉱物は方解石、苦灰石、アンケライトであり、随伴鉱物はストロンチアナイト、燐灰石、重晶石、磁鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱や、バストネサイト、シンケザイト、モナザイト、パイロクロアなどのLa, Ce, Nd, Nb鉱物である。

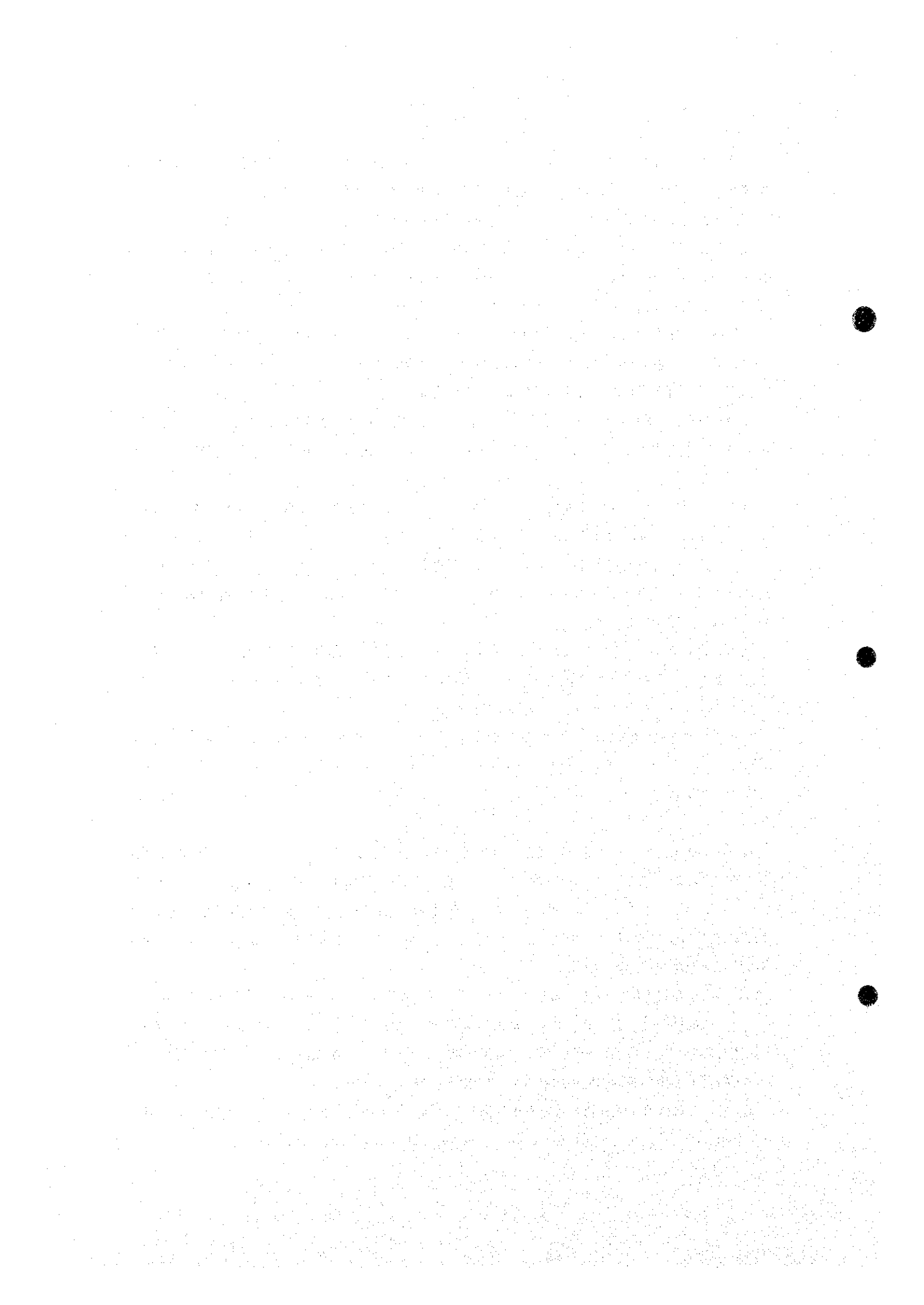
地表における地化学探査から、MQCはLa, Ce, Nd, Nb, Pを多く含む。特に希土類元素(La, Ce, Ndなど)はベフォルサイト両岩体(Mcb1, Mcb2)の外周部で、Nbは両岩体の中央部で富んでいる。Pはベフォルサイト北東岩体(Mcb2)に限って濃集する。カルクフェルド地域のカーボナタイトに較べNb, Pに富む。

ボーリング調査の結果から、これら有用元素が地表と同程度に濃集するが、地下で飛躍的に増加する傾向にはない。つまり、希土類酸化物は平均0.1%以下、Pは0.8~1.2%, Nbは0.1~0.2%である。

ナミビアのカーボナタイトに対する、このような地化学探査やボーリング調査からなる本格的な基礎調査は始めてであり、本調査によりオレンジ・カルクフェルド地域の希土類元素などの有用元素の分布状況が概略把握できた。

しかし、現在世界的に稼行されているカーボナタイトは、希土類元素5~13%を含む。これと比較すると、両地域のカーボナタイトは、希土類元素の含有量が低い。ナミビアの他のカーボナタイトと比較しても、希土類元素やNb, Pの含有量が低い。ボーリング調査結果からも、地下で希土類元素などの有用鉱物が飛躍的に増加するような傾向が認められなかった。

従って、今後は希土類元素などの有用鉱物の経済的な価値が高まれば、さらに密度の細かいボーリング調査により賦存量を明らかにし、改めて経済的評価を行うことも考えられる。





## 目 次

	頁
はしがき	
調査地域位置図	
要 約	
第I部 総 論 .....	1
第1章 序 論 .....	1
1-1 調査の経緯及び目的 .....	1
1-2 第1年次調査の結論と提言 .....	1
1-2-1 第1年次調査の結論 .....	2
1-2-2 第2年次調査への提言 .....	2
1-3 第2年次調査の概要 .....	2
1-3-1 調査地域 .....	2
1-3-2 調査目的及び調査方法 .....	2
1-3-3 調査団の編成 .....	4
1-3-4 調査期間 .....	4
第2章 調査地域の地理 .....	5
2-1 位置及び交通 .....	5
2-2 地形及び水系 .....	5
2-3 気候及び植生 .....	5
第3章 一般地質 .....	5
3-1 調査地域周辺の地質 .....	6
3-2 調査地域周辺の鉱床 .....	6
第4章 調査結果の総合検討 .....	6
4-1 地質構造、鉱化作用の特性と鉱化規制について .....	6
4-2 地化学異常と鉱化作用との関係について .....	7
4-3 鉱床賦存のポテンシャル .....	7
第5章 結論及び提言 .....	7
5-1 結論 .....	8
5-2 将来への提言 .....	8
第II部 各 論 .....	13
第1章 地化学探査 .....	13
1-1 調査方法 .....	13
1-2 地質調査 .....	13
1-2-1 地質概説 .....	13
1-2-2 地質各説 .....	13

	頁
1-2-3 帯磁率測定 .....	18
1-3 地化学探査 .....	18
1-3-1 探査手法 .....	18
1-3-2 調査結果 .....	19
1-4 考察 .....	21
第2章 ボーリング調査 .....	56
2-1 調査方法 .....	56
2-1-1 調査概要 .....	56
2-1-2 工法及び使用機材 .....	56
2-1-3 ボーリング作業 .....	56
2-1-4 掘進状況 .....	57
2-2 調査結果 .....	58
2-2-1 地質・鉱化 .....	58
2-2-2 コアによる地化学探査 .....	63
2-3 考察 .....	66
第Ⅲ部 結論及び提言 .....	105
第1章 結論 .....	105
第2章 将来への提言 .....	106
参考文献 .....	107
巻末資料	

図

図 I-1-1 調査地域位置図	
図 I-1-2 オレンジン地域調査位置図 .....	10
図 I-3-1 広域地質概略図 .....	11
図 II-1-1 オレンジ地域周辺の広域地質図 .....	23
図 II-1-2 オレンジ地域の地質及び地質断面図 .....	24
図 II-1-3 オレンジ地域の模式層序 .....	25
図 II-1-4 オレンジ地域の室内試験試料採取位置図 .....	26
図 II-1-5 オレンジ地域の酸素及び炭素同位体組成の頻度分布図 .....	27
図 II-1-6 オレンジ地域の帯磁率分布図 .....	29
図 II-1-7 オレンジ地域の地化学探査試料採取位置図 .....	31
図 II-1-8 オレンジ地域の地化学探査解析結果図 .....	33
図 II-1-9 オレンジ地域のY/Yb-Th/Yb図及びYb-Ce/Yb図 .....	41
図 II-1-10 オレンジ地域の希土類元素パターン .....	43

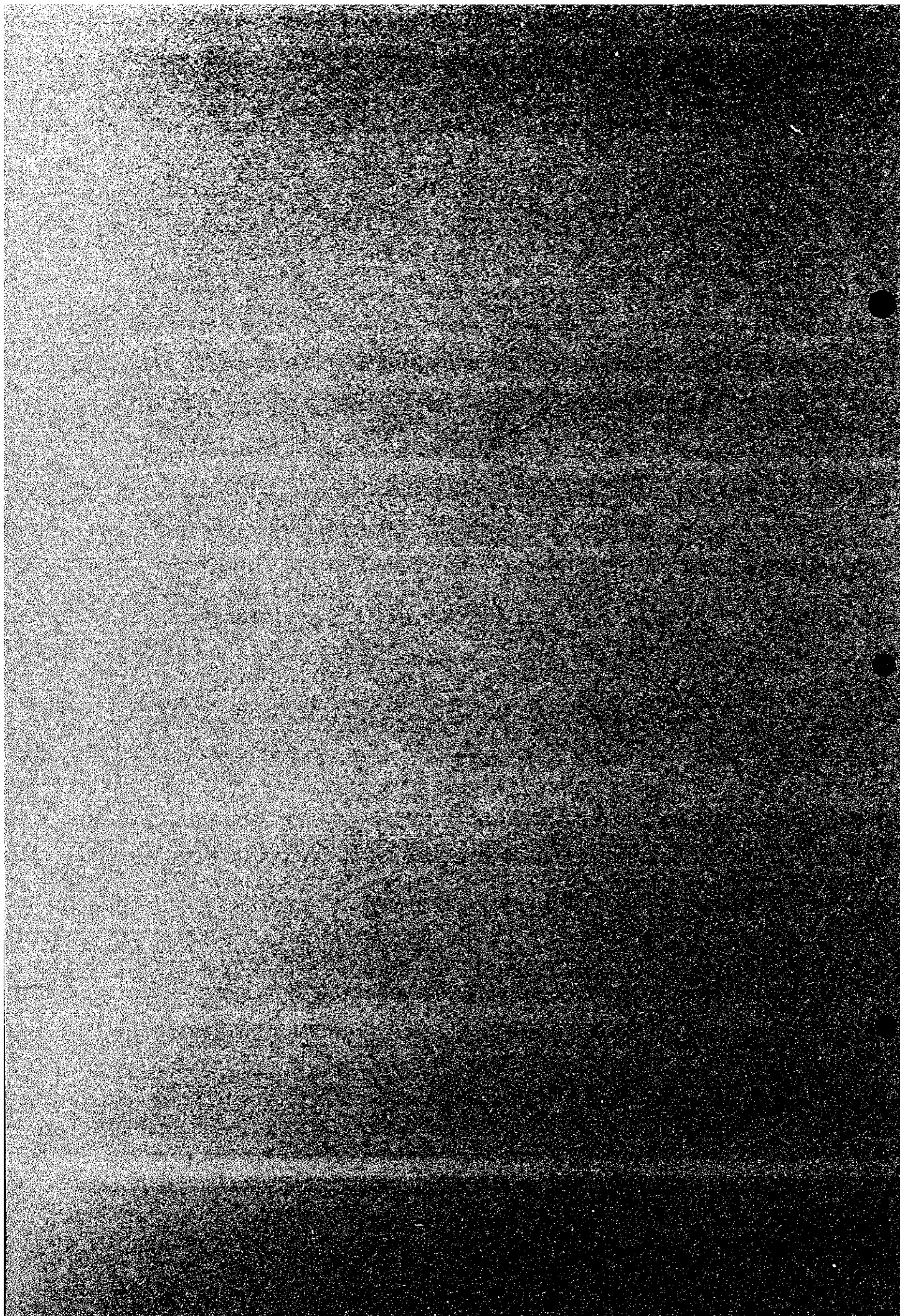
	頁
図Ⅱ-2-1 ボーリング調査位置図	68
図Ⅱ-2-2 ボーリング地質断面図	69
図Ⅱ-2-3 ボーリング地化学探査解析図	71
<b>表</b>	
表Ⅰ-1-1 調査数量一覧表	3
表Ⅱ-1-1 オレンジ地域の岩石研磨薄片の顕微鏡観察結果一覧表	47
表Ⅱ-1-2 オレンジ地域のX線回折試験結果一覧表	48
表Ⅱ-1-3 オレンジ地域のE P M A定量分析結果一覧表	49
表Ⅱ-1-4 オレンジ地域の酸素及び炭素同位体比測定結果一覧表	51
表Ⅱ-1-5 オレンジ地域の年代測定結果一覧表	52
表Ⅱ-1-6 M Q Cの各岩相の鉱物組み合わせ	53
表Ⅱ-1-7 地化学分析の各元素の分析方法, 検出限界及び精度	54
表Ⅱ-1-8 オレンジ地域の地化学分析値基本統計値一覧表	55
表Ⅱ-2-1 ボーリング使用機器一覧表	87
表Ⅱ-2-2 ボーリング使用消耗品一覧表	88
表Ⅱ-2-3 ダイヤモンドビット・リーマー使用状況一覧表	89
表Ⅱ-2-4 ボーリング工事工程表	90
表Ⅱ-2-5 ボーリング掘進実績表	91
表Ⅱ-2-6 ボーリングコアの岩石研磨薄片の顕微鏡観察結果一覧表	99
表Ⅱ-2-7 ボーリングコアのX線回折試験結果一覧表	100
表Ⅱ-2-8 ボーリングコアのE P M A定量分析結果一覧表	101
表Ⅱ-2-9 ボーリングコアの酸素及び炭素同位体比測定結果一覧表	102
表Ⅱ-2-10 ボーリングコアの地化学分析値基本統計値一覧表	103
<b>巻末資料</b>	
A-1 調査地域写真	1
A-2 顕微鏡写真	3
B-1 オレンジ地域試料一覧	6
B-2 オレンジ地域全岩化学分析・ノルム分析結果一覧表	23
B-3 オレンジ地域地化学分析結果一覧表	33
B-4 オレンジ地域地化学分析値の度数分布図及び累積度数分布図	57
B-5 オレンジ地域地化学分析値の散布図	61
B-6 オレンジ地域ボーリング柱状図	63

1

2

3

第 一 部  
總 論



# 第I部 総論

## 第1章 序論

### 1-1 調査の経緯及び目的

本調査は平成5年度から2年間継続するもので、今年度はその第2年次にあたる。調査の対象となったオレンジ・カルクフェルド地域は、希土類元素などを含むカーボナタイト鉱床の賦存ポテンシャルの高い地域である。しかし、これらの鉱床については開発が進んでおらず、これら鉱床に関する探鉱及び鉱床評価が急務とされている。したがって、ナミビア共和国政府は本地域における資源開発協力基礎調査を日本国政府に要請した。日本国政府はこの要請に応じて、本年度は地化学探査及びボーリング調査を実施し、本地域での新鉱床発見のための基礎調査を行うとともに、ナミビア共和国への技術移転を図った。

### 1-2 第1年次調査の結論と提言

#### 1-2-1 第1年次調査の結論

本調査地域はオレンジ地域とカルクフェルド地域の2地域(図I-1-1, 巻末資料A-1)からなり、第1年次は両地域で既存データ解析と地化学探査を実施した。この調査結果を踏まえ、第2年次にあたる本年度は、鉱床賦存性の高いオレンジ地域のベフォルサイト2岩体に絞って、地化学探査とボーリング調査を実施した。それに至る第1年次の調査結果は次のとおりである。

#### オレンジ地域

地質は先カンブリア代のナマクア(Namaqua)変成複合岩体(Ngn)とカンブリア代のナマ>Nama)層群(Nsh)を基盤とし、これをカーボナタイトを伴うマリнкаスクエラカーボナタイト複合岩体(MQC: Marinkas Quelle Complex)が貫入している。ナマクア変成複合岩体は片麻岩からなる。ナマ層群は粘板岩、頁岩や珪岩などからなる。MQCは閃長岩類、ベフォルサイト、ソーバイトなどからなる。この複合岩体は岩栓状形態を有する。カーボナタイトの主成分鉱物は方解石、苦灰石、アンケライトであり、副成分鉱物はマンガン方解石、菱鉄鉱、燐灰石、重晶石、磁鉄鉱、赤鉄鉱や、バストネサイト、モナザイト、シンケザイト、パイロクロアなどのLa, Ce, Nd, Nb鉱物からなる。地化学探査からもMQCにLa, Ce, Nd, Nb, Pを多く含む。特にLa, Ce, Nd, Nbはこの複合岩体のうち、ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)、ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)、及びその周辺部に濃集し、Pはベフォルサイト北東岩体(Mcb2)に濃集する。カルクフェルド地域のカーボナタイトに較べNb, Pに富む。

#### カルクフェルド地域

地質は先カンブリア代のダマラ(Damara)層群を基盤とし、これをカンブリア代の花崗岩類(Damaran Granitoid)やカーボナタイト複合岩体(Osongombo Diatreme)が貫入している。調査地域のダマラ層群は大理石からなる。カーボナタイト複合岩体は火山角礫岩とベフォルサイト、鉄鉱からなる。この複合岩体はダイアトリーム状形態を有する。カーボナタイトの主成分鉱物は苦灰石、アンケライトであり、副成分鉱物はマンガン方解石、方解石、ストロンチアナイト、燐灰石、針鉄鉱、赤鉄

鉍や、パイロクロアなどのNb鉍物からなる。地化学探査からも、カーボナタイト複合岩体にはLa, Ce, Nd, Th, Mn, Sr, Pを多く含む。特にLa, Ce, Nd, Nb, Pはカーボナタイト複合岩体のうちベフォルサイトに、Th, Mn, Srは鉄鉍部に濃集している。オレンジ地域のカーボナタイトに較べTh, Mn, Srに富む。

## 1-2-2 第2年次調査への提言

第1年次調査結果を踏まえ、第2年次の調査として次のことを提案した。

### オレンジ地域

マリンカスクエラカーボナタイト複合岩体(MQC)のうち、ベフォルサイト岩体及びその周辺に希土類元素(La, Ceなど)やNb, Pの濃集が認められた。しかし、これら元素の分布は不均質である。この分布状態はベフォルサイトの組織や鉍物組み合わせに関係していると想定される。従って、このベフォルサイトの希土類元素などの賦存状態を明らかにするため、さらに精密な岩質調査と地化学探査が必要である。また、地表での水平的な分布のほか、地下での濃集状況を明らかにするために、ボーリング調査が必要である。

### カルクフェルド地域

オレンジ地域に較べ、希土類元素を伴うベフォルサイトの分布域が狭く、また希土類元素の濃集が深部に予想されるので、オレンジ地域の2年次調査による地下状況把握結果を踏まえて、別途実施すべきである。

## 1-3 第2年次調査の概要

### 1-3-1 調査地域

調査地域位置を図I-1-1に示す。本年度各調査の概要は次のとおりである。

### 1-3-2 調査目的及び調査方法

第1年次調査で希土類元素、Nb, Pなどの濃集が認められたオレンジ地域のベフォルサイト岩体について、より詳細にこれら元素の賦存状況を明らかにするため、地化学探査とボーリング調査を実施した。

地化学探査には岩石を用い、地表の水平的な地化学異常を把握した。また、ボーリング調査により、地下の地質状況を明らかにするとともに、地化学探査結果と併せて、地下での鉍化状況を把握した。本報告書では、オレンジ地域の第1年次調査結果も加えて解析を行った。

オレンジ地域の調査位置を図I-1-2に、調査内容を表I-1-1に示す。



表 I - 1 - 1 調査数量一覧表 (1)

調 査 内 容	調 査 数 量			
	面 積		試料採取個数	
ベフォルサイト中央岩体	0.8 Km <sup>2</sup>		450 個	
ベフォルサイト北東岩体	0.2 Km <sup>2</sup>			
	計 1.0 Km <sup>2</sup>		計 450 個	
ボ ー リ ン グ 調 査	孔 番 号	掘 進 長	方 位	傾 斜
ベフォルサイト中央岩体	MJNO-1	150m	—	-90°
	MJNO-2	150m	—	-90°
	MJNO-3	150m	—	-90°
	MJNO-4	150m	—	-90°
	MJNO-5	150m	—	-90°
ベフォルサイト北東岩体	MJNO-6	150m	—	-90°
	MJNO-7	150m	—	-90°
	MJNO-8	150m	—	-90°
	掘進延長 1,200m			

表 I - 1 - 1 調査数量一覧表 (2)

試 験 項 目 等	数 量
地化学探査	
①岩石研磨薄片鑑定	10 件
②粉末X線回折	5 件
③酸素及び炭素同位体比測定	10 件
④EPMA定量分析	5 件
⑤化学分析	
γ <sub>N-7</sub> <sup>1</sup> (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Sc, Y, U, Th, Nb, Ta, Zr, Fe, Mn, Sr, P : 19成分)	450 件 (8,550成分)
γ <sub>N-7</sub> <sup>2</sup> (SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO, MnO, CaO, MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , LOI: 12成分)	100 件 (1,200成分)
⑥年代測定(Pb-Pb法)	1 件
ボーリング調査	
①岩石研磨薄片鑑定	10 件
②粉末X線回折	5 件
③酸素及び炭素同位体比測定	8 件
④EPMA定量分析	5 件
⑤化学分析	
γ <sub>N-7</sub> <sup>1</sup> (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Sc, Y, U, Th, Nb, Ta, Zr, Fe, Mn, Sr, P : 19成分)	240 件 (4,560成分)
γ <sub>N-7</sub> <sup>2</sup> (SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO, MnO, CaO, MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , LOI: 12成分)	60 件 (720成分)

### 1-3-3 調査団の編成

本調査推進のため、調査計画、協定の折衝、及び調査に参加した調査団員は下記のとおりである。

調査計画及び折衝：

日 本 側		ナミビア共和国側	
山本 恭久	金属鉱業事業団	Josephat Vatanavi Mazeingo	鉱山・エネルギー省
橋本 尚文	外 務 省	Brian G. Hoal	地 質 調 査 所
飯田 陽一	通 商 産 業 省	Gabriele I.C. Schneider	地 質 調 査 所
塩川 智	金属鉱業事業団		
内藤 耕	国際協力事業団		
奥泉 洋一	金属鉱業事業団		

現地調査団：

日 本 側		ナミビア共和国側	
金龍之緒（技術責任者）	同和工営(株)	Gabriele I.C. Schneider	地質調査所
今野宏秀（地化学探査）	同和工営(株)		
池田慶一（ボーリング調査）	同和工営(株)		

現地指導監督

高橋 健一 国際協力事業団  
 両角 春寿 金属鉱業事業団  
 奥泉 洋一 金属鉱業事業団

### 1-3-4 調査期間

調査は下記の工程で実施された。

調査期間 : 1994年8月 2日～1995年 2月20日

現地調査

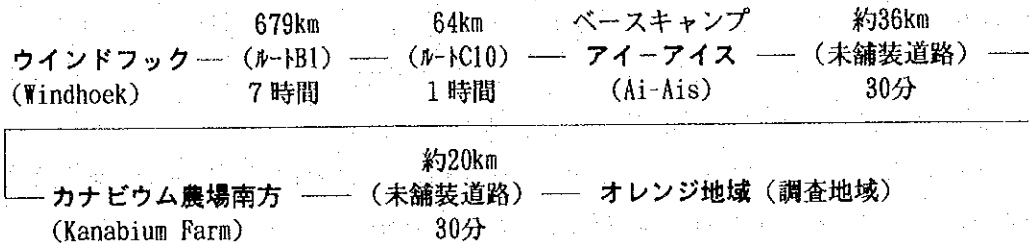
地化学探査 : 1994年8月13日～1994年 9月21日

ボーリング調査 : 1994年8月13日～1994年11月 2日

## 第2章 調査地域の地理

### 2-1 位置及び交通

オレンジ地域は行政区分ではカラスバーグ(Karasburg)地域に位置し、首都ウインドフックからの交通手段には車両を用いた。移動経路は次のようになる。



### 2-2 地形及び水系

国土面積は82万km<sup>2</sup>で、日本の面積の2倍である。アンゴラ、ザンビア、南アフリカ、ボツワナと国境を接し、西部は大西洋に面している。地勢は北東部の森林地帯、内陸高原部のサバンナ地帯、西海岸沿いの砂漠地帯に区分される。森林地帯や砂漠地帯は平坦な地形を、内陸高原部は丘陵～山岳地形を呈する。

オレンジ地域はサバンナ地帯と砂漠地帯の境界部付近に位置する。地形は構成する岩石の特徴を反映している。すなわち、基盤変成岩分布域は比較的急峻な地形を呈し、それを貫く花崗岩類はなだらかな山岳地形からなる。一方、カーボナタイトはこれら山岳地形の山頂部を形成している。

本地域には大きな河川は発達していない。河川は雨季のみ水が流下し、乾期には水がない。

### 2-3 気候及び植生

気候は南アフリカの地中海気候とアンゴラ以北の熱帯気候にはさまれた半乾燥亜熱帯気候である。1、2月が最も暑く、17～31℃である。一方、7月が最も寒く、6～18℃である。

首都のウインドフックでは7月の平均気温は13℃、12月のそれは23℃である。1年間の平均雨量は北部の森林地帯で600mm、西部の砂漠地帯で20mm、内陸高原サバンナでは350mmと、地域によってバラツキがある。雨は夏(10月～4月)に多く、冬期にはほとんど降らない。

主要な植生は地域により異なる。北部森林地帯では落葉広葉樹が繁茂し、内陸高原ではアカシヤ等のマメ科の喬木を伴う草地であり、砂漠地帯では灌木や苔蘚類が散点しているのみである。

### 第3章 一般地質

#### 3-1 調査地域周辺の地質

図I-3-1に調査地域周辺に広域地質図を示す。調査地域のマリンカスクエラカーボナタイト複合岩体(MQC)は、ナミビア共和国南部から南アフリカ共和国北西部にまたがるNE-SW方向に延びるクボース(Kubos)-ブレメン(Bremen)構造線上に配列したアルカリ貫入岩体群の一部を構成する(Kroner and Blignault, 1976)。アルカリ貫入岩体群はナマクア(Namaqua)変成複合岩体、ガリエブ(Gariep)層群、ナマ(Nama)層群を貫入している。アルカリ貫入岩体群の一つであるマリンカスクエラ閃長岩のRb-Sr年代は $505.88 \pm 18.68$ Maを示している(Smithies, 1990)。

マリンカスクエラカーボナタイト複合岩体と呼称される岩体は、1970年代初期に初めて記載され(Brignant, 1971)、この付近の詳細な地質図が作成されている(Schommarz, 1988)。

#### 3-2 調査地域周辺の鉱床

オレンジ地域及び周辺ではVerwoerd(1965, 1967), Dendle(1971), Hearth(1973), Schommarz(1988)により、カーボナタイトやアルカリ複合岩体に関するベースメタル、希土類元素や放射性物質などについて調査・探鉱された。

オレンジ地域付近のアルカリ貫入岩体群にはPb-Ag等の鉱化作用が確認されている(Blignault, 1979, Rio Tint, 1973, Smithies, 1990)。しかし、大規模に開発された鉱山はない。

### 第4章 調査結果の総合検討

#### 4-1 地質構造、鉱化作用の特性と鉱化規制について

オレンジ地域のカーボナタイト複合岩体(MQC)は、Schommarz(1988)ではマリンカスクエラ複合岩体(Marinkas Quelle Complex)と呼称されている。母岩はupper Mokolian代のナマクア変成複合岩体(Namaqua Metamorphic Complex)に属する片麻岩などで、これをMQCが貫入している。この岩体はRichtersveldからGreat Karas Mountainsに北東-南西方に直線的に配列する、Kuboos-Bremen構造線上のアルカリ貫入岩体群の一部を構成する。また、このMQCはKuboos-Bremen構造線とpost-Karoo断層の交差部で形成されている(Hearth, 1973)。

MQCは閃長岩類(Msw, Msp, Msu, Msr)、ソーバイト(Mcs)、ベフォルサイト(Mcb1, Mcb2)、カーボナタイト岩脈(Mcd)などからなる。ベフォルサイトやソーバイトなどのカーボナタイトの主成分鉱物は方解石、苦灰石、アンケライトであり、副成分鉱物は菱鉄鉱、マンガン方解石、燐灰石、重晶石、磁鉄鉱、赤鉄鉱、黄鉄鉱、白鉄鉱、磁硫鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱やバスタネサイト、モナザイト、シンケザイト、パイロクロアなどのLa, Ce, Nd, Nb鉱物からなる。希土類鉱物やNb, Pは、MQCのうち、後期貫入のベフォルサイト中央岩体(Mcb1)、ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)やカーボナタイト岩脈(Mcd)に濃集する傾向がある。

#### 4-2 地化学異常と鉱化作用との関係について

地化学探査ではLa, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Sc, Y, U, Th, Nb, Ta, Zr, Fe, Mn, Sr, Pの19成分を分析した。オレンジ地域ではマリンカスクエラカーボナタイト複合岩体(MQC)に希土類元素(La, Ce, Nd)やNb, Mn, Sr, Pを多く含む。これら元素のうち、希土類元素(La, Nd, Ceなど)はベフォルサイト中央岩体(Mcb1)とベフォルサイト北東岩体(Mcb2)の外周部に濃集し、岩体中央部では少ない。Nbはベフォルサイト中央岩体(Mcb1)とベフォルサイト北東岩体(Mcb2)のそれぞれ中央部で濃集し、これら岩体の外周部に濃集する希土類元素とは、分布状態が対角的である。Pはベフォルサイト中央岩体(Mcb1)の外周部、ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)、及びその周辺部に濃集するが、ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)の中央部には濃集していない。

ソーバイト(Mcs)にもLa, Ce, Nd, Nb, Mn, Sr, Pの濃集が認められるが、Sr以外はベフォルサイト両岩体より低い。閃長岩の一部(Msp)には希土類鉱物の産出が報告されているが、本調査ではベフォルサイト両岩体(Mcb1, Mcb2)やソーバイト(Mcs)と比較しLa, Ce, Nd, Nb, Mn, Sr, Pの含有量が少ない。

MQCの貫入順序は、古い順から閃長岩類(Msw, Msp, Msu, Msr)、ソーバイト(Mcs)、ベフォルサイト(Mcb1, Mcb2)、カーボナタイト岩脈(Mcd)となり、地化学探査によれば、後期の岩体ほど希土類元素やNbを濃集している。カーボナタイト(Mcs, Mcb1, Mcb2, Mcd)には磷灰石、重晶石や、パイロクロア、シンケザイト、モナザイトなどのLa, Ce, Nd, Nb鉱物からなり、地化学探査による元素の濃集と対応している。また、カルクフェルド地域のカーボナタイトに較べNb, Pに富む。

#### 4-3 鉱床賦存のポテンシャル

カーボナタイト複合岩体は貫入形態に基づき、ダイアトリーム状、岩栓状、円錐岩床、環状岩脈に分けられる。オレンジ地域のカーボナタイト複合岩体(MQC)は岩栓状形態を示す。複合岩体の露出面積は2km<sup>2</sup>である。

また、カーボナタイト複合岩体の形態は侵食の深さによって、火山円錐型、火山岩頸型、浅所深成型、深所深成型に分けられる(武内, 1973a)。つまり、火山円錐型はほとんど侵食のされていない本来の形態をとどめており、深所深成型になるにつれ、より侵食された深部の内部構造を観察していることになる。オレンジ地域のMQCは、貫入形態に基づけば岩栓状であり、侵食形態に基づけば浅所深成型で、貫入岩体上部がすでに侵食されている。

カーボナタイトの形態や深度と組成を他のカーボナタイトと比較すると、オレンジ地域のカーボナタイト(MQC)はOndurakorume複合岩体のように希土類元素(La, Ce, Nd)やNb, Pに富む岩体に類似し、地化学探査による希土類元素(La, Ce, Nd)やNb, P, Mn, Srの濃集とも対応している。

これら有用元素はMQCのうちベフォルサイト中央岩体(Mcb1)とベフォルサイト北東岩体(Mcb2)に比較的濃集している。

しかし、これら有用元素は遍在性があり、地下での連続性に乏しい。つまり、地表で希土類元素やPが濃集するベフォルサイト中央岩体(Mcb1)の外周部に位置するボーリングMJN0-1, 2地点は、地下でも希土類元素は濃集しているが、その連続性に乏しい。Pも高濃度と低濃度部が繰り返し、濃

度のバラツキが大きい。ボーリングMJN0-3, 4, 5地点はベフォルサイト中央岩体(Mcb1)の中央部に位置し、地表ではNbが高濃度であるが、希土類元素は低濃度である。地下ではNbが高濃度部と低濃度部が繰り返り、濃度のバラツキが大きい。希土類元素も地下で増加する傾向はない。ボーリングMJN0-6, 7, 8はベフォルサイト北東岩体(Mcb2)中央部に位置し、地表ではPやNbが高濃度である。地下でもPとNbの濃度が同程度である。

このように、地化学探査とボーリング調査から、有用元素のうち希土類元素はベフォルサイト中央岩体(Mcb1)とベフォルサイト北東岩体(Mcb2)の外周部に濃集し、これが地下にも連続するようであるが、その濃度は地表と同程度である。Nbはベフォルサイト中央岩体(Mcb1)とベフォルサイト北東岩体(Mcb2)の中央部で濃集する。地下では高濃度部は断続的に出現するが、その濃度は地表と同程度である。Pはベフォルサイト北東岩体(Mcb2)の地表に濃集し、地下でも同程度で濃集している。これらのことから、希土類元素やNb, Pなどの有用元素の地下での賦存状況は地表と同程度であり、濃度の飛躍的な増加は望めない。

ベフォルサイト両岩体(Mcb1, Mcb2)に含まれる希土類元素(R203)は、地表で最大2.7~3.2%、平均で0.12~0.16%、地下では最大で0.4~2.7%、平均0.1%以下である。Nbは地表で最大0.5~0.6%、平均0.08~0.12%である。地下では最大0.7~5.2%、平均0.1~0.2%である。Pは地表で最大3.4%、平均0.8%、地下で最大4.5%、平均1.2%である。

現在稼行し、カーボナタイトに関係する希土類鉱床には、アメリカのMountain Pass鉱床や中国のBaiyun Obo鉱床などがある。希土類元素(R203)の平均品位は、Mountain Passで5~10%、Baiyun Oboで1.2~13.5%である(kamitani, 1989)。また、カーボナタイトに関係する重金属鉱床には南アフリカのPhalaborwa 鉱床があり、Cu平均品位が0.48~0.57%、 $P_2O_5$ が10~25%、R203が0.4~0.9%である。ナミビアで探鉱されたカーボナタイトのうち、Ondurakorumeでは $Nb_2O_5$ が0.24%、R203が3%、 $P_2O_5$ が7%である。Kalkfeldでは $P_2O_5$ は7~8%である(Verwoerd, 1986)。

現在稼行されているカーボナタイトに関係する鉱床や、ナミビアの他のカーボナタイト鉱床と比較して、オレンジ地域のカーボナタイトは希土類元素やNb, P, Cuなどの有用元素が低濃度である。

## 第5章 結論及び提言

### 5-1 結論

本年次の調査オレンジ・カルクフェルド両地域のうち、特にオレンジ地域に絞り、地化学探査とボーリング調査を実施した。第1年次と本年次(第2年次)のオレンジ地域の調査結果の結論を次に述べる。

1. 地質は先カンブリア代のMokolian系ナマクア(Namaqua)変成複合岩体(1,200Ma±)とカンブリア代のNamibian系ナマ(Nama)層群(560-500Ma)を基盤とし、これをマリンスクエラカーボナタイト複合岩体が岩柱状(MQC)に貫入している。
2. このMQCは、Kuboos-Bremen構造線沿いに、北東-南西方向に直線的に配列する、アルカリ貫入岩体群の一部を構成する。MQCはこのKuboos-Bremen構造線とpost-Karoo断層の交差部で形成

されている。

3. マリンカスクエラカーボナタイト複合岩体の侵食形態は浅所深成型である。侵食深度は中程度であり、類似カーボナタイトと比較すると、さらに地下深部にこの岩体は連続する。
4. MQCは4箇所の主貫入部を有する。これらは閃長岩複合岩体(Msw, Msp), ソーバイト-閃長岩複合岩体(Mcs, Msu, Msr), ベフォルサイト北東岩体(Mcb2), ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)からなり、この順に貫入している。酸素及び炭素同位体比も、ソバイト(Mcs)からベフォルサイト北東岩体(Mcb2)になるに従い、 $\delta^{13}\text{C}$ 及び $\delta^{18}\text{O}$ に富む傾向にある。また、同一岩体内での変動を見ると、ベフォルサイトの中央部より周辺部で $\delta^{13}\text{C}$ 及び $\delta^{18}\text{O}$ に富み、接触部付近では再び減少する可能性がある。
5. カーボナタイトの主成分鉱物は方解石、苦灰石、アンケライトであり、副成分鉱物はストロンチアナイト、燐灰石、重晶石、磁鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱や、バストネサイト、シンケザイト、モナザイト、パイロクロアなどのLa, Ce, Nd, Nb鉱物からなる。
6. 地表における地化学探査から、MQCにはLa, Ce, Nd, Nb, Pを多く含む。特に希土類元素(La, Ce, Ndなど)はベフォルサイト2岩体(Mcb1, Mcb2)の外周部で、Nbは両岩体中央部で富む。Pはベフォルサイト北東岩体(Mcb2)に限って濃集する。カルクフェルド地域のカーボナタイトに較べNb, Pに富む。
7. ボーリング調査の結果から、これら有用元素が地表と同程度に濃集するが、地下で飛躍的に増加する傾向にはない。つまり、希土類酸化物で平均0.1%以下、Pは0.8~1.2%, Nbは0.1~0.2%である。

## 5-2 将来への提言

第1, 2年次の調査結果とその検討によって得られた結論に基づき、次のことを提言する。

ナミビアのカーボナタイトに対する、地化学探査やボーリング調査からなる本格的な基礎調査は、ナミビアでは始めてであり、本調査によりオレンジ・カルクフェルド地域の希土類元素などの有用元素の分布状況が概略把握できた。

しかし、現在世界的に稼行されているカーボナタイトは、希土類酸化物5~13%を含む。これと比較すると両地域のカーボナタイトは、希土類元素の含有量が低い。ナミビアの他のカーボナタイトと比較しても、希土類元素やNb, Pの含有量が低い。

ボーリング調査結果からも、地下で希土類元素などの有用鉱物が飛躍的に増加するような傾向が認められなかった。

従って、今後は希土類元素などの有用鉱物の経済的な価値が高まれば、さらに密度の細かいボーリング調査により賦存量を明らかし、改めて経済的評価を行うことも考えられる。

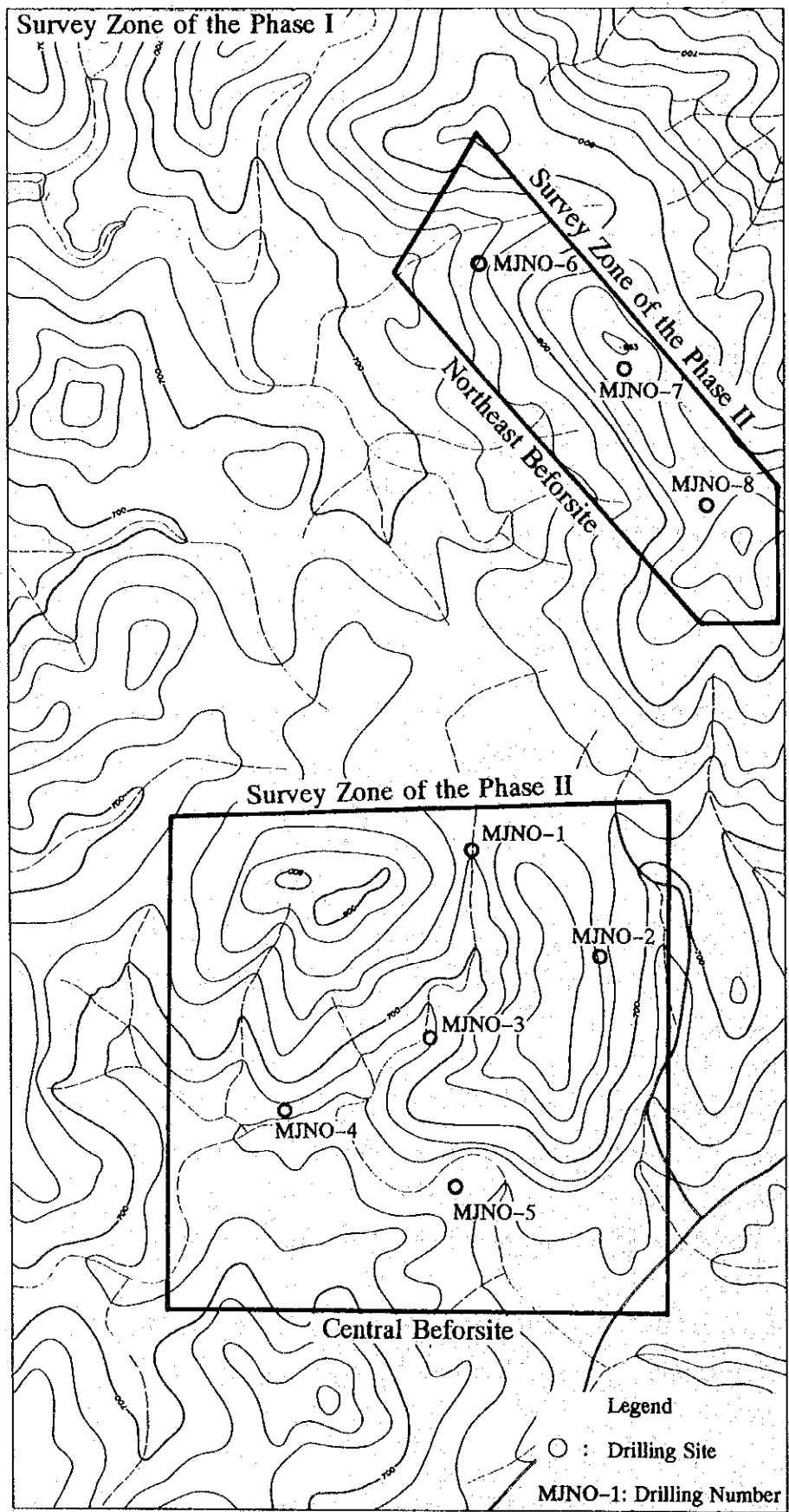


図 I-1-2 オレンジ地域調査位置図 0 100 200 300 400 500<sup>m</sup>



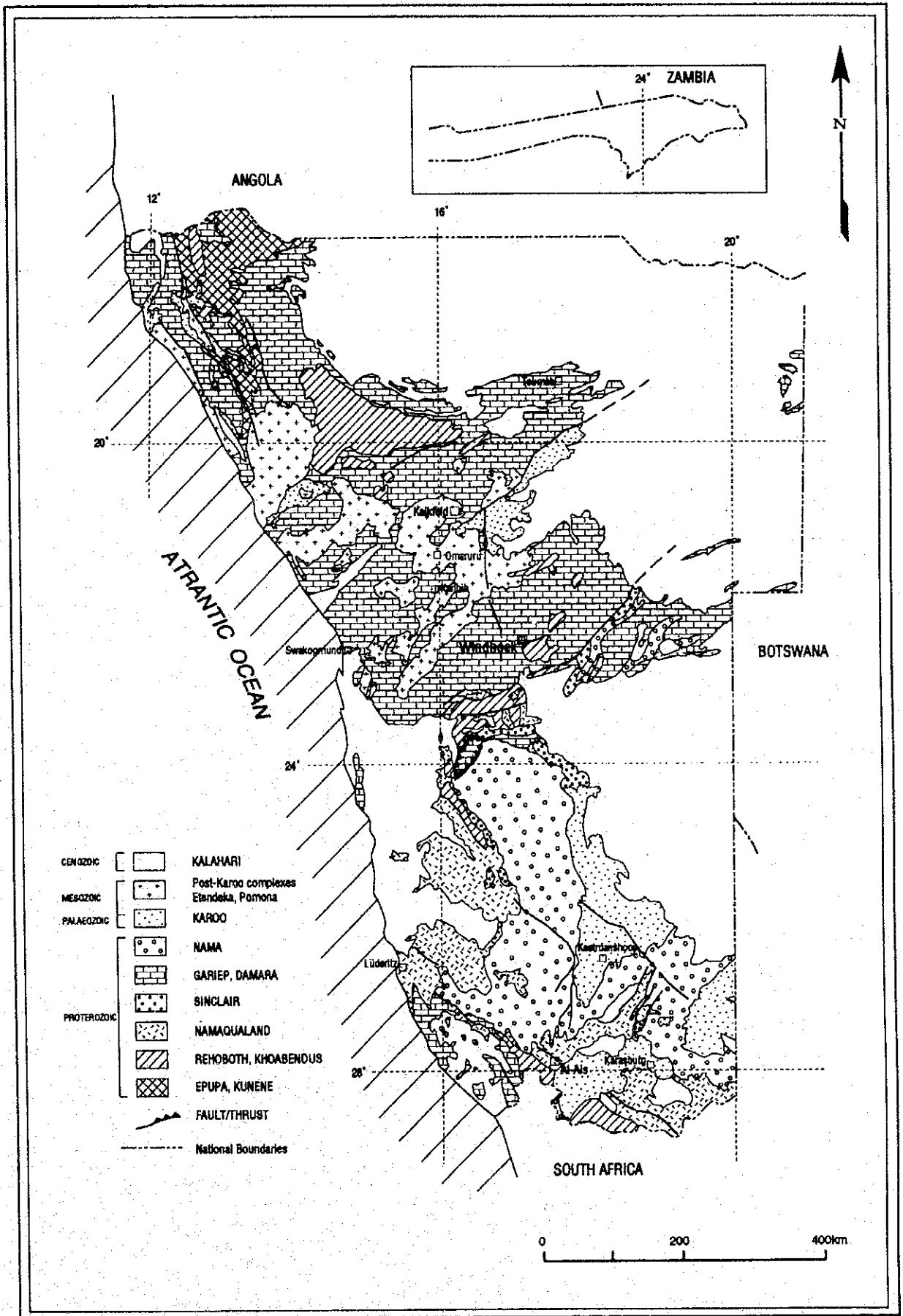
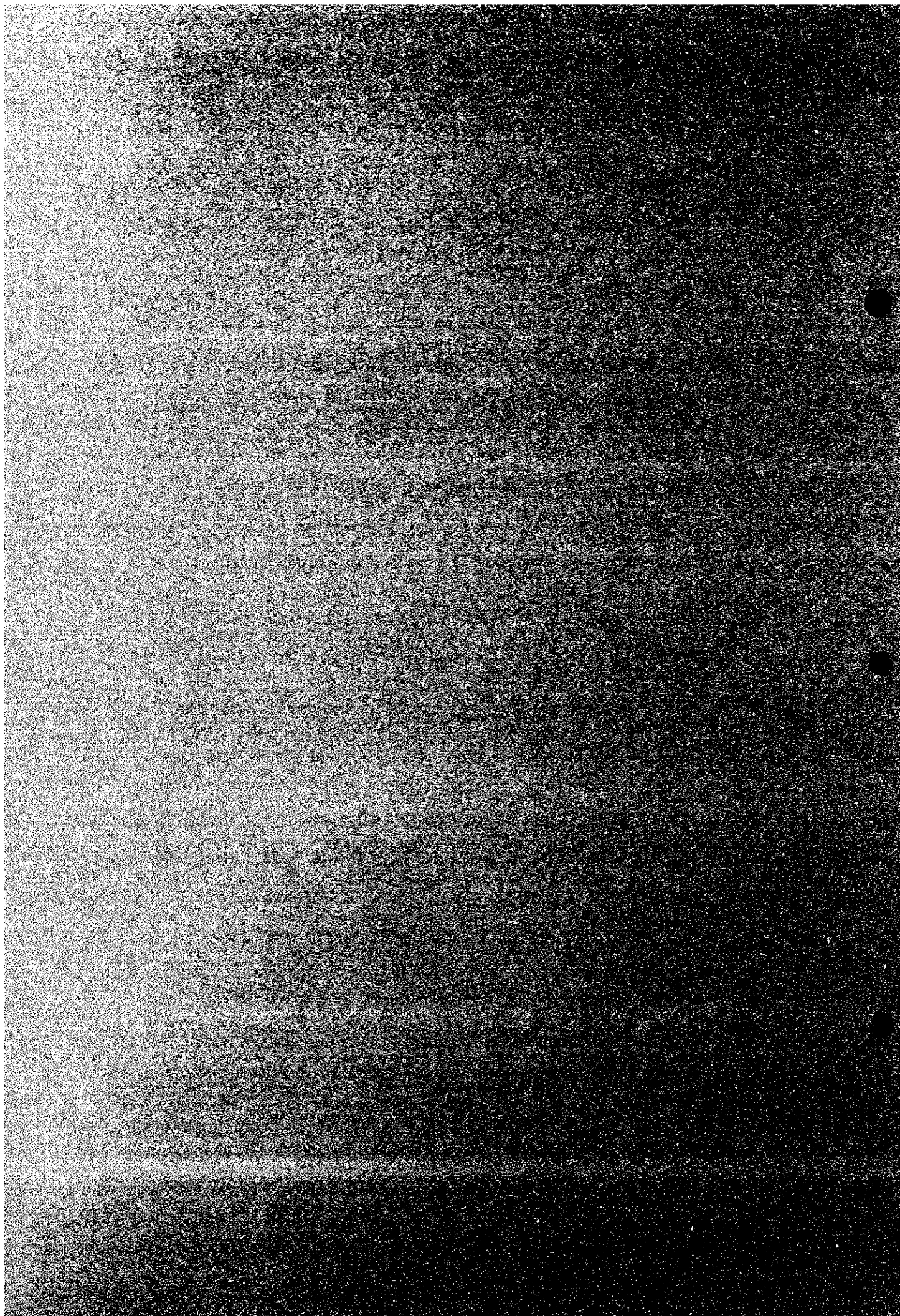


图 1-3-1 広域地質概略図



第 Ⅱ 部  
各 論



## 第II部 各 論

### 第1章 地化学探査

#### 1-1 調査方法

第1年次に既存の5万分に1地形図から縮尺2,500分の1の地形図を作成し、これをもとに地化学探査の現地調査を実施した。また、地化学試料採取の測線沿いに、地質のルートマップを作成するとともに、既存地質図と対比、補完することにより、新たな地質図を作成した。室内試験では、地化学分析のほか、岩相に差異の認められるものは岩石薄片及び研磨片の顕微鏡観察を行うとともに、必要に応じてX線回折試験、全岩化学分析を行った。

第2年次には、第1年次で希土類元素などの有用元素が特に濃集することが判明した。マリнкаスクエラカーボナタイト複合岩体のうち、特にベフォルサイト2岩体に絞り、地化学探査とボーリング調査を実施した。室内試験では、岩石研磨薄片鑑定(表II-1-1、巻末資料A-2)、X線回折試験(表II-1-2)、EPMA定量分析(表II-1-3)、酸素及び炭素同位体比測定(表II-1-4)、年代測定(表II-1-5)、全岩化学分析・ノルム分析(巻末資料B-2)、地化学分析(巻末資料B-3)を行った。これら分析試料の一覧を巻末資料B-1に、その採取位置を図II-1-4、7に示す。以下に、オレンジ地域の第1年次と第2年次の調査結果をとりまとめた。

#### 1-2 地質調査

##### 1-2-1 地質概説

オレンジ地域周辺の広域地質図を図II-1-1に、またSchommarz(1988)の地質図をもとにして、本調査結果を加えて改訂した地質図及び地質断面図を図II-1-2に、模式地質層序を図II-1-3に、MQCの岩相別鉱物組み合わせを表II-1-6に示す。

調査地域内の地質は、ナマクア(Namaqua)変成複合岩体、ガリエプ(Gariep)層群、ナマ(Nama)層群、マリнкаスクエラ(Marinkas-Quelle)カーボナタイト複合岩体(以下では、MQCと略称する)及びカルー貫入岩類から構成される。

##### 1-2-2 地質各節

###### 1. ナマクア(Namaqua)変成複合岩体(Ngn)

本岩体は、MQCを取り巻いて広く分布する。岩相は、粒径1mm前後の石英及び長石を主要構成鉱物粒とする石英-長石片麻岩からなる。一般にNW-SE走向、南傾斜の流理構造が発達する。MQCの周辺では、礫径が数cmから数mの角礫構造を呈し、礫間は暗緑色-青緑色角閃石、エジリン輝石、エジリン輝石質普通輝石、金雲母、炭酸塩鉱物、燐灰石等から構成される暗緑色を呈する網状脈によって充填されているほか、褐色カーボナタイトの細脈の発達が認められる。脈幅は変化が大きく、10cm以上となる場合がある。角礫構造は、MQC周縁部で顕著に発達しており、礫内が緑色鉱物、炭酸塩鉱物及びアルカリ長石による交代作用が進んで場合が多く、肉眼による岩相の識別を困難にしている。

鏡下の観察及びXRD試験結果では、MQCの貫入によるフェン岩化作用を被ったため、多量のカリ長石が普遍的に見い出される。主要造岩鉱物として石英、斜長石(曹長石)、カリ長石、霞石、エジリン輝石質普通輝石、普通角閃石、リーベック閃石、黒雲母及び金雲母が認められ、随伴鉱物としてスフェーン、燐灰石、方解石、蛍石及び不透明鉱物が認められる。また、二次変質作用により長石の一部は絹雲母化及び有色鉱物の一部は緑泥石化を被っている。また、MQCの北外縁部及びMQC内の捕獲岩塊の一部では、カンクリナイトが検出された。

## 2. ガリエブ(Gariiep)層群(Gdd)

本地域西側の石英-長石片麻岩中に幅約50mの粗粒玄武岩岩脈としてわずかに産する。岩脈は、ガンナコウリーブ岩脈類(Gannakouriep dyke suite)の一部を形成し(Schommarz, 1988)、後述するアンケライト質カーボナタイト岩脈(Mcd)によって貫入される。

## 3. ナマ>Nama)層群(Nsh)

本地域北部において、MQCの東側に分布するほか、MQC中の捕獲岩塊として産する。黒色粘板岩、頁岩、珪岩及び砂岩から構成される。本層群は、礫径が数10cmから数mの角礫構造を呈して産する。礫間は、暗緑色から青緑色を呈する網状脈によって充填されているほか、一部では、褐色カーボナタイト細脈が発達する。黒色頁岩礫には、弱い層理が認められる。珪岩は、淡緑灰色から白色を呈し、径5m程の巨礫には粗粒から細粒への級化構造が認められる場合がある。砂岩は、灰白色から淡緑色を呈し、主として石英及び長石の鉱物片から構成される。本層群全体が角礫化しているものと推定され、これらの岩相は、露頭における層理及び級化構造から推定される走向と非調和的に分布しており、各岩相の相互関係は不明である。

## 4. マリンカスクエラ(Marinkas Quelle)カーボナタイト複合岩体(MQC)

MQCは、NE-SW方向に伸長したほぼ楕円形の分布をし、3つに大別できる貫入岩体の中心があることが知られている(Schommarz, 1988)。本報告書では、Schommarz(1988)の分類を大部分踏襲したが、細粒閃長岩は未詳閃長岩に含めた。MQCを北から斑状閃長岩及び斑状霞石閃長岩を主体とした閃長岩複合岩体(Msw, Msp)、ソーバイト、斑状霞石閃長岩及び閃長岩からなるソーバイト-閃長岩複合岩体(Mcs, Msu, Msr, Msm)、及びアンケライト質ベフォルサイトを主としたベフォルサイト岩体(Mcb, Mfn, Mgr)と区分した。また、これらを最末期のカーボナタイト岩脈(Mcd)が切る。

### (1) 閃長岩複合岩体(Msw, Msp)

地域北部に、南東部が欠けた半環状の分布をする。半環状構造の外側を構成する斑状閃長岩(Msw)と中心部を構成する斑状霞石閃長岩(Msp)に区別されている。

斑状閃長岩(Msw)は、乳白色から灰色、一部灰緑色を呈する。粒径5mm前後の白色長石斑晶を含み、有色鉱物は少ないことを特徴とする。角礫構造が発達し、片麻岩礫や黒色頁岩礫を取り込む場

合が認められる。礫間は、暗緑色から青緑色の角閃石、エジリン輝石、炭酸塩鉱物等から構成される網状脈が充填される。褐色の方解石質カーボナタイト脈が発達する。

鏡下の観察及びXRD試験結果では、比較的多量の斜長石(曹長石)及びカリ長石が普遍的に見出される。主要造岩鉱物として石英、斜長石(曹長石)、カリ長石、霞石、カンクリナイト、ソーダライト、方沸石、エジリン輝石、エジリン輝石質普通輝石、普通角閃石、リーベック閃石、黒雲母及び金雲母が認められ、随伴鉱物としてスフェーン、ジルコン、燐灰石、方解石及び不透明鉱物が認められる。また、二次変質作用により長石の一部は絹雲母に、有色鉱物の一部は緑泥石及び緑簾石に交代されている。

斑状霞石閃長岩(Msp)は、乳白色から淡灰緑色、一部淡桃色を呈する。粒径5mm前後の白色から淡黄色を呈する長石及びエジリン輝石質普通輝石の斑晶を含み、1mm前後の黒雲母を含む場合がある。また、粒径5cmの長石巨斑晶が濃集する場合がある。全般に角礫構造を呈し、方解石質カーボナタイト脈が発達する。

鏡下の観察及びXRD試験結果では、比較的多量の斜長石(曹長石)及びカリ長石が普遍的に見出される。主要造岩鉱物として斜長石(曹長石)、カリ長石、霞石、カンクリナイト、方沸石、エジリン輝石またはエジリン輝石質普通輝石、黒雲母及び金雲母が認められ、随伴鉱物としてスフェーン、燐灰石、方解石及び不透明鉱物が認められる。また、二次変質作用により長石の一部は絹雲母に、有色鉱物の一部は緑泥石及び緑簾石に交代されている。Nb-Yを含むシンケザイトの存在が記載されているが(Schommarz, 1988)、本調査では確認できなかった。

## (2) ソーバイト閃長岩複合岩体(Mcs, Msu, Msr, Msm)

本岩体は、調査地域内の中央部に中心を持つ環状構造の後を残す変形した楕円形を示す。ソーバイト(Mcs)、斑状霞石閃長岩(Msr)、未詳閃長岩(Msu)及び細粒閃長岩シル(Msm)に区分されている。

ソーバイト(Mcs)は、調査地域南部から北部にかけての盆状地形の部分に広く分布する。白色を呈する粗粒の方解石を主体とし、粗粒のエジリン輝石質普通輝石、エジリン輝石あるいはリーベック閃石が濃集した縞状構造が認められる。アンケライト質ペフォルサイトとの接触部では、幅数10mにわたって金雲母及び燐灰石に富み、縞状構造が発達している。

鏡下の観察及びXRD試験結果では、主要造岩鉱物として方解石のほか、石英、曹長石、カリ長石、霞石、カンクリナイト、ソーダライト、方沸石、菱沸石、エジリン輝石、リーベック閃石、黒雲母、金雲母、苦灰石、アンケライト、クトナホライトからなり、スフェーン、ジルコン、燐灰石、磁鉄鉱、赤鉄鉱、針鉄鉱、重晶石、絹雲母及び緑泥石を随伴する。

方解石と苦灰石の炭素同位体比( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ )はそれぞれ、-5.5~-5.9パーミル、-4.7~-5.4パーミルの範囲にあり、酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ )はそれぞれ、6.5パーミル、7.7~8.3パーミルの範囲にある。 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は方解石より苦灰石で富む。

斑状霞石閃長岩(Msr)は、調査地域東部の片麻岩との接触部に分布する。本岩は、桃色を呈する

長石斑晶を含むこと特徴とする。

鏡下の観察及びXRD試験結果では、比較的多量のカリ長石が認められる。主要造岩鉱物は、斜長石(曹長石)、カリ長石、霞石、カンクリナイト、方沸石、エジリン輝石またはエジリン輝石質普通輝石、黒雲母及び金雲母を主要構成鉱物として、ザクロ石、スフェーン、燐灰石、カオリナイト、方解石及び不透明鉱物を随伴する。

細粒閃長岩シル(Msm)は、調査地域中央部に幅、1m前後の幅の岩脈として分布する。

未詳閃長岩(Msu)は、本岩体の北部及び南部で広く分布する。乳白色、灰緑色、灰色、明灰色等の色調を示し、構成鉱物の粒径の変化も大きい。アンケライト質ペフォルサイトの周辺では、角礫構造を呈し、礫間は緑色脈に充填される。

鏡下の観察及びXRD試験結果では、主要造岩鉱物は、斜長石(曹長石)、カリ長石、霞石、カンクリナイト、方沸石、エジリン輝石、エジリン輝石質普通輝石、リーベック閃石、黒雲母及び金雲母からなり、ザクロ石、スフェーン、ルチル、燐灰石、絹雲母、緑泥石、カオリナイト、方解石、褐簾石、緑簾石及び磁鉄鉱を随伴する。アンケライト質ペフォルサイト西側では、本岩の有色鉱物は、一部緑泥石化作用を被っている。

### (3) ペフォルサイト複合岩体(Mcb, Mfn, Mgr)

アンケライト質ペフォルサイト(Mcb)は、中央岩体(Mcb1)と北東岩体(Mcb2)の2岩体からなる。

ペフォルサイト中央岩体(Mcb1)は、ほぼ同心円状の環状構造の形態をとる。地表面は風化作用により赤褐色を呈し、周縁の片麻岩及びアルカリ岩と比較して明瞭な色調の差異がある。本岩体内の北及び東は急峻な地形をなす。岩体内の縞状構造は、ほぼ垂直に近い傾斜をもち、岩体の形態に調和的な走向を示す。岩体内の各所には不規則な形態の金雲母のアグリゲート及び針鉄鉱のアグリゲートが認められる。

この岩体の鏡下の観察及びXRD試験結果では、主要構成鉱物が苦灰石の場合とアンケライトの場合がある。副成分として、方沸石、金雲母、スフェーン、緑泥石、方解石、菱苦土石、ストロンチアナイト、パイロクロア、磁鉄鉱、赤鉄鉱、針鉄鉱及び燐灰石が認められる。またXRD試験により、希土類元素含有鉱物としてバストネサイトが同定された。

方解石と苦灰石の炭素同位体比( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ )はそれぞれ、 $-3.7\sim-4.1$ パーミル、 $-3.5\sim-3.9$ パーミルの範囲にあり、酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ )はそれぞれ、 $8.6\sim 10.5$ パーミル、 $8.5\sim 9.8$ パーミルの範囲にある。 $\delta^{13}\text{C}$ は方解石より苦灰石で富み、 $\delta^{18}\text{O}$ は苦灰石より方解石で富む。

ペフォルサイト北東岩体(Mcb2)は、N-S方向に伸長したレンズ状の形態をとる。この岩体周辺の角礫化したナマクア変成岩複合岩体の片麻岩、ナマ層群の頁岩及び珪岩、及び閃長岩中には、本岩から枝分かれしたカーボナタイトが発達する。また、本岩体中には岩体の伸び方向に平行な粗粒玄武岩及び粗面岩の岩脈が発達する。風化作用により表面は赤褐色、褐色から褐灰色を呈する。本岩体中は、風化・浸食作用の差異による縞状構造がよく発達しており、急傾斜の走向は岩体の形態に調和的である。粒径1mm前後の淡緑色燐灰石がこの流理構造に沿って配列する場合があるほか、細



脈状あるいはレンズ状に産する場合がある。

この岩体の鏡下の観察及びXRD試験結果では、主要炭酸塩鉱物が苦灰石の場合とアンケライトの場合がある。副成分として、曹長石、カリ長石、カンクリナイト、エジリン輝石、リーベック閃石、クロス閃石、金雲母、緑泥石、方解石、パイロクロア、菱鉄鉱、針鉄鉱、黄鉄鉱及び燐灰石が認められる。

E PMA定量分析によれば、パイロクロアは $(\text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Nb})_2\text{O}_6(\text{F})$ の組成を持つ。Na:Caの原子数比(Atomic Ratio)は、ほぼ1:1である。

方解石と苦灰石の炭素同位体比( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ )はそれぞれ、 $-4.9\sim-5.0$ パーミル、 $-4.8\sim-4.9$ パーミルの範囲にあり、酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ )はそれぞれ、 $8.0\sim 8.5$ パーミル、 $8.1\sim 8.4$ パーミルの範囲にある。 $\delta^{13}\text{C}$ は方解石より苦灰石で富み、 $\delta^{18}\text{O}$ は苦灰石より方解石でわずかに富む。

フェン岩(Mfn)は、南部のベフォルサイト岩体の周縁部に分布する。

鏡下の観察及びXRD試験では、斜長石(曹長石)、カリ長石、エジリン輝石質普通輝石、リーベック閃石、金雲母のほか、スフェーン、燐灰石、絹雲母、方解石、磁鉄鉱が同定された。

グラノファイヤーあるいは微晶質花崗岩(Mgr)は、ベフォルサイト中央岩体の中心部やベフォルサイト北東岩体の南縁部に小規模な岩体として分布する。白色から明灰色の細粒完晶質岩からなる。ベフォルサイト北東岩体中のこの岩体は、黄鉄鉱及び白鉄鉱を含み、風化面上では、黄色の鉄明礬石が生成している。

鏡下の観察及びXRD試験結果では、斜長石(曹長石)が大部分を占め、副成分とした少量の方沸石、黄鉄鉱、白鉄鉱及び燐灰石を含む。

全岩化学分析値をもとにノルム計算を行った。ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)のノルム鉱物とそのノルム(平均値)は磁鉄鉱(1.52wt%)、赤鉄鉱(2.10wt%)、ルチル(0.01wt%)、燐灰石(0.45wt%)、フォルステライト(0.08wt%)、ファヤライト(0.30wt%)、方解石(57.3wt%)、菱苦土石(31.41wt%)、菱鉄鉱(4.49wt%)、ストロンチアナイト(1.11wt%)である。ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)のノルム鉱物とそのノルム(平均値)は磁鉄鉱(0.66wt%)、赤鉄鉱(1.01wt%)、ルチル(0.05wt%)、燐灰石(4.39wt%)、フォルステライト(0.14wt%)、ファヤライト(0.71wt%)、方解石(54.67wt%)、菱苦土石(29.07wt%)、菱鉄鉱(5.61wt%)、ストロンチアナイト(1.46wt%)である。両岩体のノルムの差をt検定(危険率5%)により解析すると、ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)はベフォルサイト北東岩体(Mcb2)より磁鉄鉱、赤鉄鉱、方解石、菱苦土石に富み、燐灰石やストロンチアナイトに乏しい。フォルステライト、ファヤライトや菱鉄鉱のノルムは両岩で差がない。

ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)に含まれる方鉛鉱を用いて、Pb-Pb法による年代測定を実施した。年代は、Stacy and Kramers(1975)の提案によるモデル年代計算法に基づいて算出した。方鉛鉱試料は同一採取地点の2試料(4測定値)を用いた。得られた年代は329Maである。

#### (4) カーボナタイト岩脈(Mcd)

カーボナタイト岩脈(Mcd)は、幅数cmから数mの岩脈として産する。MQCの母岩であるナマク

ア複合変成岩体及びナマ層群中に多数発達する。アンケライト質ベフォルサイト及び方解石質ソーバイトのものがある。露頭では、共に鉄鉱物の酸化作用により褐色を呈する。

鏡下の観察及びXRD試験では、方解石、苦灰石、アンケライトを主成分鉱物として、斜長石(曹長石)、カリ長石、菱沸石、エジリン輝石またはエジリン輝石質普通輝石、リーベック閃石、クロス閃石、金雲母、燐灰石、菱鉄鉱、ストロンチアナイト、モナズ石及びバストネサイトが含まれる。

E P M A定量分析によればこのバストネサイトは(Ce, Nd, La, Pr, Ca, Fe, Sr)CO<sub>3</sub>(F, OH)の組成を持つ。原子数比(Atomic Ratio)はCe:Nd:La:Pr:Ca:Fe:Srが2.6:1.5:0.8:0.5:0.4:0.05:0.05である。F:OHが3.5:2.5である。

方解石と苦灰石の炭素同位体比( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ )はそれぞれ、-3.4~-5.9パーミル、-3.2~-5.4パーミルの範囲にあり、酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ )はそれぞれ、7.5~14.5パーミル、8.7~11.2パーミルの範囲にある。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ともバラツキが大きい。

## 5. カルー(Karoo)貫入岩類(Kdd, Ktd)

カルー貫入岩脈類は、粗粒玄武岩(Kdd)及び粗面岩(Ktd)の岩脈から構成される。ともにNE-SW方向及びNW-SE方向の走向のものがある。岩脈幅は、数10cmか数mであるが、比較的連続性は良い。

粗粒玄武岩(Kdd)の鏡下の観察結果では、主要造岩鉱物として、斜長石、単斜輝石、普通角閃石、黒雲母からなり、絹雲母、緑泥石、方解石、白チタン石及び不透明鉱物を随伴する。粗面岩(Ktd)の鏡下の観察結果では、主要造岩鉱物として、石英、曹長石、カリ長石、霞石、エジリン輝石質普通輝石、黒雲母からなり、蛍石、絹雲母、緑泥石、方解石、黄鉄鉱を随伴する。

### 1-2-3 帯磁率測定

ベフォルサイト両岩体と周辺岩体の帯磁率を、パイソン帯磁率計により測定した。その測定結果を図II-1-6に示す。ベフォルサイト中央岩体は100CGSemu以上を示す場合が多く、岩体の南東部では200CGSemu以上を示す。特に、500CGSemu以上は岩体南東部に楕円状に分布する。一方、ベフォルサイトは、ベフォルサイト中央岩体より弱く、100CGSemu以下の場合が多い。500CGSemu以上は岩体北部に散見されるだけである。

帯磁率がベフォルサイト北東岩体より、ベフォルサイト中央岩体で強いのは、磁鉄鉱がベフォルサイト中央岩体で富んでいることと対応する。

## 1-3 地化学探査

### 1-3-1 探査手法

オレンジ地域の地化学探査は第1年次と第2年次に実施した。地化学探査試料は岩石とし、第1年次は採取間隔は、マリカスクエラカーボナタイト複合岩体(MQC)分布域では50m×75mグリットとし、その周辺では100m×150mグリットとした。

第2年次には、第1年次で希土類元素などの有用元素が特に濃集することが判明した、マリカ

スクエラカーボナタイト複合岩体のうち、特にベフォルサイト2岩体に絞って地化学探査を実施した。採取間隔は25m×25mグリットとし、第1年次採取地点を補完した。

地化学分析成分は、La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Sc, Y, U, Th, Nb, Ta, Zr, Mn, Sr, P, 及びFeの19成分である。

### 1-3-2 調査結果

岩石地化学探査試料採取位置を図Ⅱ-1-7に、地化学探査解析図を図Ⅱ-1-8に、地化学分析結果を巻末資料B-3に示す。また、分析方法や検出限界などを表Ⅱ-1-7に、岩相別の基本統計値を表Ⅱ-1-8に示す。地化学分析値の度数分布や累積度数分布を巻末資料B-4に、散布図を巻末資料B-5に示す。

#### 1. 希土類元素 (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb及びLu)

ランタノイド系列に属する希土類元素は、地化学的に類似した挙動を取る。希土類酸化物(R2O3)はMQCのソーバイト(Mcs), ベフォルサイト中央岩体(Mcb1), ベフォルサイト北東岩体(Mcb2), カーボナタイト岩脈(Mcd)に濃集している。ソーバイト(Mcs)では最高5,500ppm, 平均1,029ppmである。ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)では最高32,716ppm, 平均1,665ppmである。ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)では最高27,224ppm, 平均1,252ppmである。カーボナタイト岩脈(Mcd)では最高21,657ppm, 平均9,871ppmである。

ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)では1,000ppm以上の高濃度部は、岩体中央部より外周部に多く分布しており、10,000ppmを越えるところも認められる。また、外周部のフェン岩化した閃長岩(Mfn)及び片麻岩(Ngn)中でも1,000ppm以上の濃集が認められる。閃長岩や片麻岩で希土類酸化物が高濃度の部分は、ベフォルサイトとの貫入部付近であり、ベフォルサイトの網状脈が発達している。

ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)でも1,000ppm以上の高濃度部は、岩体中央部より、外周部に多く分布しており、10,000ppmを越えるところも認められる。

カーボナタイトの網状脈が発達するナマ層群(Nsh)中にも高濃集部が認められるが、これらの網状脈中に希土類元素が濃集していることによる。

希土類元素の含有が報告されている斑状霞石閃長岩(Msp)岩体は、最高2,763ppm含むが、ベフォルサイトと比較して、顕著な濃集は認められない。

XRD試験では、希土類鉱物としてバストネサイト(Ce, Nd, La, Pr, Ca, Fe, Sr)CO<sub>3</sub>(F, OH)や、モナズ石(Ce, Nd, La, )(PO<sub>4</sub>)が同定されている。

ベフォルサイト両岩体(Mcb1, Mcb2)における各希土類元素の分布状況をみると、軽希土類元素(La, Ce, Nd)はt検定にれば、両岩体で差は認められないが、中～重希土類元素(Bu, Tb, Yb, Lu)は、ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)に濃集する。

## 2. Sc及びY

これらの元素は、調査地域北方のナマ層群(Nsh)中に、100ppm以上の高濃度帯が認められる。一方、MQCでは、顕著な低濃度帯を形成することを特徴とする。

## 3. U及びTh

MQCのうち、カーボナタイト岩脈(Mcd)の一部で、Thが最高716ppmを示す以外、カルクフェルド地域内のカーボナタイト(オソングンボダイアトリーム)と比較して、U、Thとも広範囲な高濃度異常は認められない。相対的には、ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)の周縁部で、わずかな高濃度域を形成している。

## 4. Nb及びTa

Nbは、MQC内では相対的に高濃度となっている。特にベフォルサイト中央岩体(Mcb1)では、外周部より岩体中央部で1,000ppm以上の高濃集が認められる。希土類酸化物(R2O3)が外周部で濃集するのは対照的な分布傾向を示す。

ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)でも、周辺部より岩体内部で1,000ppm以上濃集している。北部の斑状霞石閃長岩(Msp)でも1,000ppm以上の濃集部が確認されたが、その分布域は狭い。

XRD試験では、Nb鉱物としてパイロクロア(Na, Ca)<sub>2</sub>(Nb)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(F)が同定されている。

Taは、ベフォルサイト両岩体周辺の閃長岩類(Msu, Msr)、フェン岩(Mfn)、やカーボナタイト岩脈(Mcd)でわずかに濃集するが、あまり顕著ではない。

## 5. Zr

Zrは、ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)やベフォルサイト北東岩体(Mcb2)で、100ppm以下の顕著な低濃度帯を形成することを特徴とする。珪酸塩鉱物を主体とする閃長岩類(Msu, Msr)や基盤の片麻岩(Ngn)分布域では、1,000ppm以上の高濃度地点が散点する。

## 6. Mn

Mnの高濃度分布域は、ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)やベフォルサイト北東岩体(Mcb2)の形態に調和的である。5,000ppm以上の濃集は、これらの岩体内に限られる。これら岩体内のMn濃度分布は、他の成分と比較して、均質と言える。ベフォルサイト両岩体では濃度の差はない。

## 7. Sr

MQCのうち、カーボナタイト岩脈(Mcd)、ベフォルサイト中央岩体(Mcb1)、ベフォルサイト北東岩体(Mcb2)、及びソーバイト(Mcs)で高濃度を示し、それらの岩相の分布と調和的である。特にカーボナタイト岩脈(Mcd)及びベフォルサイト北東岩体(Mcb2)での濃集は著しく、Srの含有量として最高22,060ppmに達する。