

タイ国の地熱エネルギー資源

高島 勲(地殻熱部)・河田 清雄(地質部)
Isao TAKASHIMA Kiyoo KAWADA

まえがき

工業技術院国際産業技術研究 (ITIT 研究) の一環として地質調査所とタイ国の鉱物資源局 (Department of Mineral Resources DMR) との間で 非火山地帯の地熱エネルギー開発の共同研究 (1980~1983) が発足し 筆者らは1980年の8月に約2週間の日程で タイ国北部の主としてチェンマイ州とチェンライ州に分布する温泉・地熱地帯のうち タイ国の要請で最も有望な5ヶ所を駆け足で調査してきた。

タイ国北部には古都チェンマイ (Chiang Mai) を中心に約40ヶ所以上もの温泉・地熱地帯があるが その中のあるものは山中の辺境の地にあり DMR でも充分に実態を掴んでいなかった。温泉・地熱地帯の一部はタイとビルマの国境近くにあり この辺りには山岳民族 (Hill tribe) の住む地域があり これらの部族や村人の通報などにより 温泉の位置などが分った例も多いときいている。

タイ国側では電力公社 (Electricity Generating Authority of Thailand EGAT) が中心となり これに DMR と地元のチェンマイ大学が協力して1977年から北部タイの地熱エネルギー資源について調査をつづけてきた。

EGAT はタイ国の電力関係を全て把握する巨大な組織であるが この中の Special Energy Division が中心となり開発調査のための予算面を担当し 現地調査は主として DMR とチェンマイ大学が担当した。

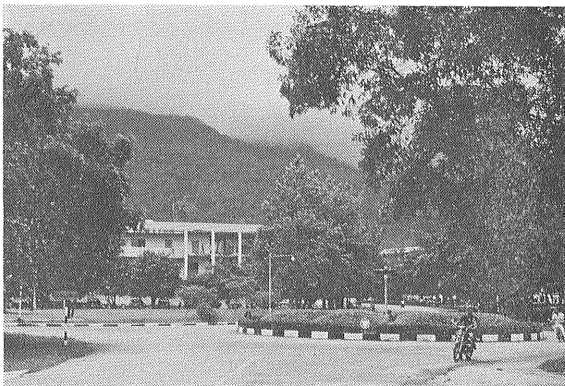


写真1 チェンマイ大学構内の一部

タイ国はエネルギー資源に乏しい国であり 石油の99%を海外に依存している。また 国内外の状況も楽観をゆるさず インフレに悩み外貨事情も極端に悪いことなどから石油にかわる代替エネルギーとしての地熱エネルギー資源の開発は急務とされている。

従来 地熱の開発地域がすべて火山帯にあるのに対して タイ国の温泉・地熱地帯はヒマラヤ褶曲帯の後背地である印度支那地塊にあり 断裂帯による深部地熱によるものと考えられる。このような地熱資源の本格的な研究はなされておらず 熱源などに不明の点が多い。今後開発の予定される深部地熱のモデル地としても その開発研究は注目されている。

タイ国側では開発に多大な期待をよせており 日本の開発技術の援助を強く要望している。

今回の調査は共同研究の初年度に当り 短期間ではあったが その調査資料とタイ国側で公表されている諸資料をもとに北部タイの地熱エネルギー資源について紹介する。

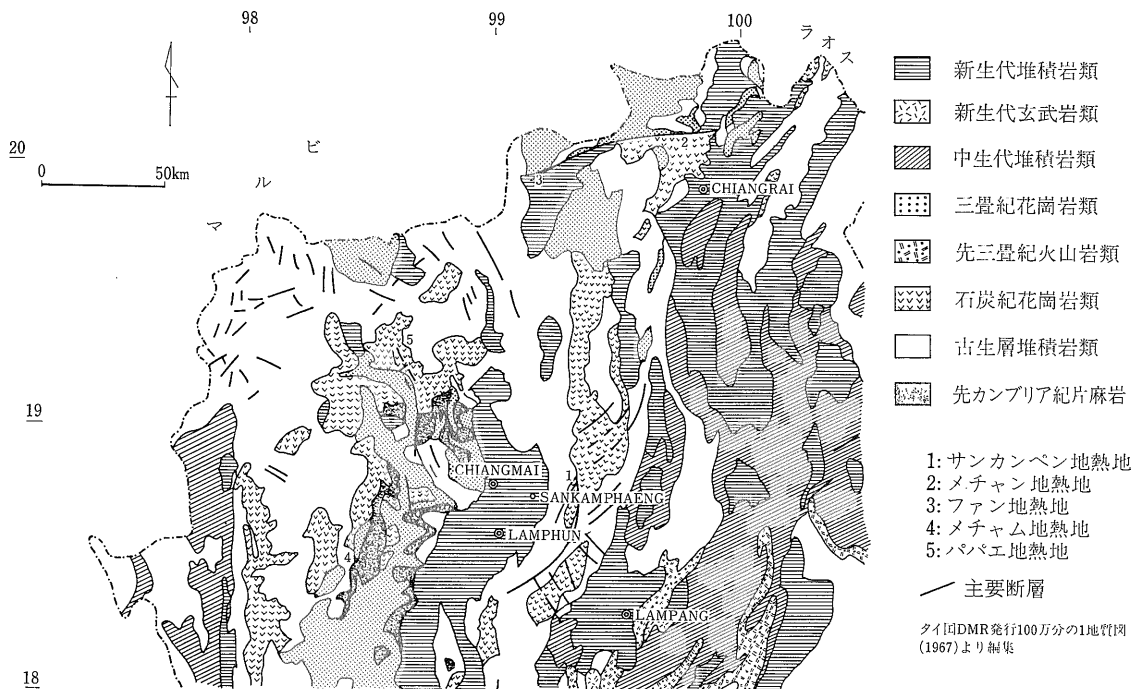
I 地質の概要

1 タイ国をとりまく地質環境

タイ国北部の地熱地帯の地質にふれる前にタイ国の地質を規制している印度支那半島の地質の成り立ちを簡単に述べる。この陸地はインドシニア (Indosinia) と呼ばれ ジュラ紀中期頃までに印支運動 (Indosinian movement) により 陸化し現在にいたる大きな構造単位として存在してきた。現在の南東アジア亜大陸の輪郭は白亜紀から現世までつづいたアルプス・ヒマラヤ造山運動によりできあがったもので アルプス・ヒマラヤ造山帯はヒマラヤービルマスマトラーインドネシア中央部ーフィリピンー台湾ー日本とつづき この変動帯の内側に印度支那陸塊はかかえこまれた形となっている。

印度支那半島で最も古い基盤岩類はカンボジア国境に近いベトナム領のコンタム (Kontum) 高原 ベトナム北部の紅河 (Red River) 沿いの地域 ビルマ北部のミイットキイナ (Myitkyina) 周辺地域 タイ北部のチェンマイ周辺地域などが知られており 先カンブリア紀の片麻岩とこれに伴う古生代の花崗岩類が分布している。

これら古い地塊の外側には ヘルシニアン インドシ



第1図 タイ北部地質略図

ニアン アルパイン(ヒマラヤ)などの造山帯が形成されており大陸地殻が外側に向かって成長していったと云われている (D. R. Workman; 佐藤正訳, 1979)

印度支那地塊に対するアルプス・ヒマラヤ造山運動の影響は白亜紀～第三紀～第四紀に起ったゆるやかな波曲と断層地塊化運動の形で出現する。

北部タイに現在みられる地質構造要素は地質時代と強さの程度が異なる複数の造山運動によりもたらされたものであり とくに造山運動後の断裂運動が強く支配しており 断裂運動は第三紀以後も現在までつづき 上部第三系や更新統の段丘に影響をあたえている。

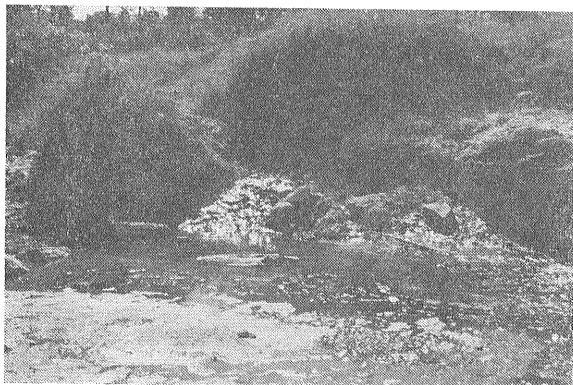


写真2 サンカンペンの温泉湧出地点と変質帯

このような断裂運動が北部タイの地質構造を規制していることは明らかである (第1図)。

2 温泉・地熱地の地質

a サンカンペン (Sankamphaeng) 地域

サンカンペン地熱地域はチェンマイの東方約30kmのところであり 温泉は古生層帯中の小渓谷沿いに約1kmにわたり20ヶ所が知られている。湧出場所は古生層の上をおおう沖積層中にある。

地域を構成する古生層は下部から石炭紀のメ・サ(Mae Tha)層群と二畳紀のラトブリ (Ratoburi)層群からなる。

主要な岩層は 砂岩 粘板岩 チャート 酸性凝灰岩 石灰岩および玄武岩溶岩 (塩基性海底火山噴出物) などからなる。これらの古生層岩石中には一般に剝離がよく発達している。温泉・地熱地域周辺の古生層岩石は温泉変質作用をこうむっており 酸性凝灰岩中にはラミナに沿って多量の明礬石を生じ ラミナを切って硬石膏の細脈がみられる。温泉・地熱地域から約2km南西方の玄武岩溶岩中には パンペリー石を生じており 緑泥岩・緑簾石・パンペリー石変成相を示している。

この地域が広範な埋没変成作用を被ったかどうかは岩石試料の不足のため明かではないが 塩基性岩についてみるかぎり上記の変成相が認められる。

温泉・地熱地域の東方 約10kmのところには巨大な

パソリス状花崗岩体が 古生層中に入っている。この花崗岩は三疊紀の黒雲母花崗岩である。

主岩相は中粒～粗粒の黒雲母花崗岩で 長径 3 cm に達するカリ長石を含む。周縁相として細粒～中粒状黒雲母花崗岩がみられる。

b メチャン (Mae Chan) 地域

メチャン地熱地域はチェンライ州にあり チェンマイ北東方約150kmの地点にある。メチャン川の河谷中に温泉が湧出し 地域一帯は三疊紀の花崗閃緑岩で 一部は圧砕され ミロナイト化している。

花崗閃緑岩は中粒～粗粒で灰色を呈し 黒雲母と少量の角閃石を含む。長径 5 cm に達するカリ長石の斑状結晶が含まれる。

圧砕状花崗閃緑岩は淡灰色～淡緑色でミロナイト化し破片状組織を呈する。

メチャン地熱地帯は ENE—WSW 方向のメチャン川の断層谷中にあり この断層はチェンマイ州のファン (Fang) から東方にのびており 延長 100 km に達する。

c ファン (Fang) 地域

ファン地熱地域はチェンマイ北方約 150 km のビルマ国境近くのメチャイ (Mae Chai) 川の河谷にあり 河川の上流部は NNW～SSE 方向を示し 断層による規制をこうむっているものと思われる。

地域を構成する岩石は石炭紀の片麻状花崗岩で 中粒



写真3 割れ目に富む古生層の酸性凝灰岩 (サンカンペン)

～粗粒状で 灰色を呈する。岩質は黒雲母花崗閃緑岩である。地熱地域に近接するメチャイ川沿いに分布する片麻状花崗閃緑岩は著しい圧砕をこうむり ミロナイト化し 花崗岩本来の組織は殆んど失われている。

地熱地域の北西方には 古生層と先カンブリア紀の片麻岩が分布している。古生層は東から西に向って カンブリア系 オルドビス系 シルル～デボン系 下部石炭系の地層が発達している。

先カンブリア紀と考えられる片麻岩は メチャイ川の上流に分布し 白雲母・黒雲母・斜長石・微斜長石・石英片麻岩で 著しい変形をこうむっている。斑状大型の斜長石や微斜長石の含まれることから正片麻岩 (Orthogneiss) の可能性がある。

地熱地域の南方 約数 100 m の地点には デボン～下部石炭系の粘板岩や石灰岩層が分布し これらの中には浅熱水性螢石鉱床がみられる。したがって 地熱地域の外側にも古い地熱変質帯が形成されたことは明らかである。

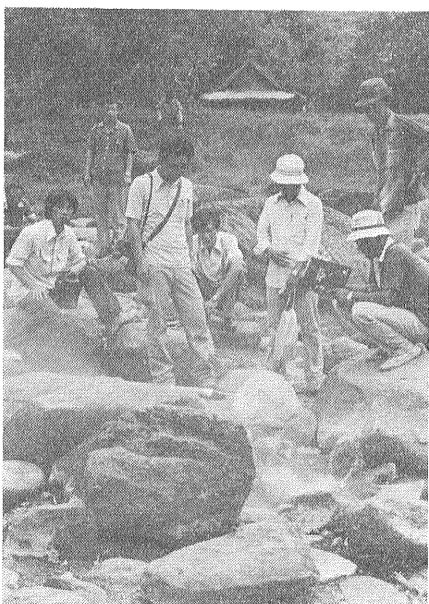


写真4 ファンの沸騰泉

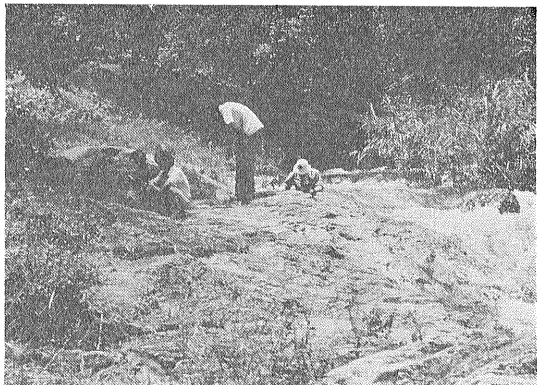


写真5 石炭紀の圧砕状花崗岩 (ファン)



写真6 メチャムの温泉徴候地全景

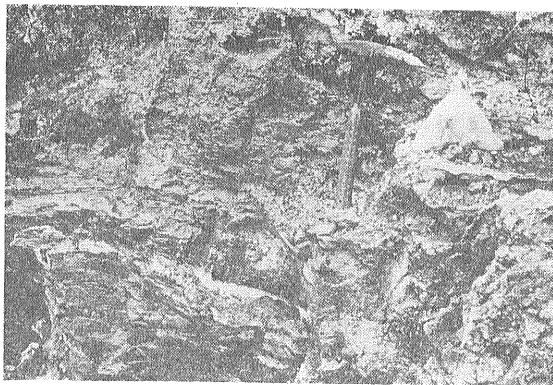


写真7 メチャムの温泉沈殿物（主として方解石）

d メチャム (Mae Cham) 地域

メチャム地熱地域はチェンマイ南西方約80kmのところであり 石炭紀の片麻状花崗岩により構成される。

温泉は沖積層中から15ヶ所以上も湧出しているが 露出不良のため詳細は不明である。

地熱地域から下流のメチャム川沿いには ミグマタイト (西ドイツの地質調査所の印刷による地質図ではアナテキシティック帯 *anatectic aureole*) および先カンブリア紀の縞状片麻岩が広く分布し 一部には石灰質岩石起源の透輝石・スカポライト・方解石・斜長石・石英片麻岩が認められる。縞状片麻岩は黒雲母・斜長石・微斜長石・石英片麻岩を主体とし 白雲母・黒雲母・斜長石・微斜長石・石英片麻岩が含まれる。また 柘榴石の巨晶を含むペグマタイトやアプライト脈が認められる。

e パパエ (Pa Pae) 地域

パパエ地熱地域はチェンマイの北西方 約80kmのところであり 地域一帯は石炭紀の片麻状黒雲母花崗閃緑岩が分布している。露出不良のため詳細は不明であるが 周辺にはシルルヘデボン系の珪化した変質の著しい

古生層岩石の巨大な転石が多数あることから 温泉の湧出地域は片麻状黒雲母花崗閃緑岩体と上記の古生層との境界部付近と考えられる。

3 地熱地域周辺の岩石の化学組成

温泉地熱地のうち サンカンペン メチャム メチャムの3ヶ所の代表的な岩石の化学分析を行った結果を第1表に示す。ファンとパパエの2ヶ所については適当な試料が得られなかった。

SK1: サンカンペン温泉地熱地の貯留岩層を形成すると考えられる岩石で 二疊系に属する酸性凝灰岩である。Al₂O₃とCaOが極端に少なく SO₃が6.69%も含まれる特異な岩石で モード鉱物として明礬石を多量に生じている。これら多量の明礬石の生成は温泉変質作用によるものと考えられる。

SK2: 二疊紀の海底火山噴出物で 玄武岩溶岩である。かんらん石の仮象および輝石の斑晶が認められる。緑泥石 緑廉石 パンペリー石を生じ 緑泥石—緑廉石—パンペリー石変成相を示す。



写真8 パパエの噴気帯の全景



写真9 パパエの沸騰泉 (高さ1.5m)

第 1 表 北部タイ温泉地熱地域周辺の岩石の化学組成

	SK-1	SK-2	SK-3	SK-3b	HOD-1	HOD-2	HOD-3	TP-2	MCN-2
SiO ₂ (%)	78.34	46.36	72.87	67.88	68.59	49.95	70.56	74.09	68.33
TiO ₂	0.27	2.38	0.24	0.57	0.50	0.51	0.53	0.07	0.65
Al ₂ O ₃	6.64	12.47	13.63	14.79	14.98	13.34	14.07	15.46	13.89
Fe ₂ O ₃	0.27	2.87	0.31	0.16	0.24	0.12	0.44	0.28	0.12
FeO	2.26	9.34	2.23	4.06	3.27	5.03	2.69	0.47	3.88
MnO	0.01	0.18	0.04	0.05	0.09	0.07	0.04	0.01	0.07
MgO	0.09	7.95	0.90	2.15	1.69	3.24	1.24	0.13	2.12
CaO	0.01	11.31	1.25	2.07	2.56	19.25	1.53	1.51	2.83
Na ₂ O	0.08	2.97	2.89	2.62	4.12	1.46	2.80	5.30	2.54
K ₂ O	2.01	0.56	4.76	4.44	2.76	2.08	5.04	1.43	4.36
P ₂ O ₅	0.03	0.27	0.12	0.20	0.22	0.11	0.15	0.07	0.19
+H ₂ O	2.90	2.88	0.35	0.55	0.41	0.11	0.16	0.40	0.40
-H ₂ O	0.10	0.23	0.26	0.02	0.04	0.22	0.20	0.20	0.12
Total	93.01	99.77	99.85	99.56	99.47	95.49	99.45	99.42	99.50
		SO ₃				CO ₂			
		6.69				4.29			

分析は東京石炭鉱物研究所

SK 3 : 三疊紀の花崗岩で パソリス状に古生層を貫いている。中粒～粗粒の斑状花崗岩で 白雲母および黒雲母を含む。

SK 3 b : SK 3 と同じ岩体であるが 優黒質の部分で黒雲母にとむ。

HOD 1 : メチャム地熱地域南西方のメチャム川沿いに露出する先カンブリア紀の片麻岩に伴う 片麻状花崗岩で 岩質は黒雲母花崗閃緑岩である。

HOD 2 : 先カンブリア紀の片麻岩中の石灰質起源の片麻岩で スカポライト 単斜輝石(透輝石) 方解石 斜長石 石英片麻岩である。多量のCO₂は方解石に関係している。

HOD 3 : メチャム川沿いに露出する先カンブリア紀の準片麻岩で 黒雲母 斜長石 微斜長石 石英片麻岩である。

TP 2 : 上記の片麻岩に伴う片状の細粒花崗岩で 黒雲母 白雲母 斜長石 微斜長石および石英からなる。

MCN 2 : メチャムの温泉地熱地の貯留岩層で メチャム川の断層帯に分布するため 変形をこうむっている。中粒～粗粒で カリ長石の斑状組織が著しい 角閃石 黒雲母花崗閃緑岩で 多量のチタン石を含む。

角閃石には 普通緑色角閃石のほかに藍色を呈するアルカリ角閃石が含まれる。モードでの多量のチタン石の存在は TiO₂ の含有量が高いことでもわかる。

北部タイの地熱地域周辺の岩石中のウランおよびトリウム量についてみると 試料 SK 3 と Te Panon 2 についてはウランの含有量はトリウムのそれを上廻っている。

SK 3 は三疊紀花崗岩で Te Panon 2 は石炭紀の片麻状花崗岩である。

第 2 表 北部タイ温泉地熱地域周辺の岩石中のウラン トリウムおよびカリウム含有量(ガンマースペクトロメトリー法による)

試料 No.	Th(ppm)	U(ppm)	K ₂ O(%)	岩石名
SK 2	1.7	0.5	0.30	アルカリ玄武岩
SK 3	22.0	25.2	5.27	両雲母花崗岩
SK 3b	33.1	8.9	4.28	〃 〃
Mae Chan 2	46.9	12.6	4.09	角閃石黒雲母花崗閃緑岩
Mae Cham 2	120.0	12.1	5.36	準片麻岩
Fang 1	17.5	3.3	2.58	正片麻岩
Fang 2	27.6	6.5	3.97	ミロナイト
Te Panon 2	3.8	3.9	1.58	片麻状花崗岩
Hod 1	9.4	7.9	2.94	片麻状花崗岩
Hod 2	18.5	3.4	2.00	石灰質片麻岩
Pa Pae 1	35.7	7.0	2.95	片麻状花崗岩

SK : サンカンペン Mae Chan : メチャム Mae Cham : メチャム Fang : ファン Te Panon : テパノン Hod : ホード Pa Pae : パパエ テパノンとホードはメチャム川流域
分析者 金谷 弘

第3表 主要5地熱地域の調査一覧表

項目	サンカンペン	メチャン	ファン	メチャム	パパエ	文献等
地質	1/1.5万	←	←	1/20万	←	Chuvairoj et al.(1980), Baum et al.(1970)
温泉分析	主成分, 微量成分	←	←	←	←	KRTA (未公表)*, 本報告
温泉水同位体	D, ¹⁸ O, トリチウム		D, ¹⁸ O, トリチウム		D, ¹⁸ O	_____, 未公表データ
ガス分析	○	○	○	○	○	_____
放熱量	温泉放熱量		温泉放熱量	←	←	_____
岩石放射能	○	○	○	○	○	Ramingwong et al.(1979)
比抵抗	探査深度 500 m	←	←			_____ (1980 a)
水理調査	天水供給量	←	←	←	←	_____ (1979)
1m 深地温	○	○	○			Thienprasert and Raksaskulwong(1980 a. b)
地震探査	反射法	←				同上
地化学探査	CO ₂ , Hg, Rn					未公表, 本報告
変質帯調査	○					本報告
微小地震	○					未公表
地殻熱流量	水井戸利用		水井戸・石油井利用			Ramingwong et al.(1980 b) Thienprasert et al.(1978)
総合解析	第1次	予備	←	予察	←	Ramingwong et al.(1980 b), 本報告

*Kingston Reynolds Thom and Allardice Ltd. (ニュージーランド) が1976年に行った未公表調査報告書

日本の花崗岩類についてみると Th/U 比は 3 ~ 5 が一般的である。上記のような特異な岩石は日本には知られていない。恐らく 島弧のそれとくらべ印度支那陸塊の大陸地殻の特異性を示すものであろう。

今後 より多くの試料について検討しなければならぬが 地熱地周辺の岩石中にこのような傾向のみられることは 地熱の発生源について何等かの示唆を与えるものかも知れない (第2表)。

II 地熱調査

1 地熱調査の概要

北部タイの地熱地域については タイ独自の調査に加え ニュージーランド 西独などがさまざまな分野で研究を進めてきた。これらの調査・研究を通じて 前述の5ヶ所が第1次の開発候補地として指定された。第3表はこの5ヶ所について これまでに行われた調査の一覧表であり 現在の各地点の状況が理解されよう。

日タイ共同研究の目的は 第3表の各項目の補足と必要な追加調査の実施 そして それらのデータを使用した総合解析の作業である。

2 温泉分析

第4表に5地熱地域の代表的分析値と それから求められた推定地下温度を示した。これらの温泉は ほぼ同じ泉質を持っており 全般的な特徴として 固形物総

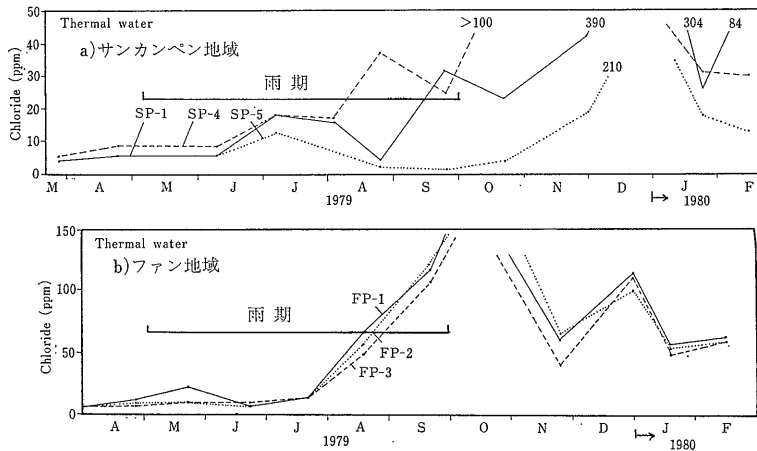
量が少く (大体 1000 ppm 以下) 弱アルカリ性 そして Cl 濃度が数 10 ppm 以下と すでに開発されている世界のどの地熱地域のものと比較しても著しく低い値を示している。この組成は アメリカのロスアラモス研究所で進められている高温岩体研究で 花崗岩中を人工的に循環させたときに得られる熱水の化学組成と比較的よく似ている (LASL, 1979)。SiO₂ および Na—K—Ca 濃度から求められた地下温度は 大体 155—207°C であり 掘削後は多くの場合 この値より高くなるので 蒸気タービン利用の発電に必要な 180°C 以上という条件は一応満たしていると考えられる。

今回の共同研究では 熱水の循環路の推定と貯留層 (部) の存在の可能性を検討するため 温泉水について F Br I の分析を行い 第4表に同時に示した。今のところ 反応の対象物である岩石の側の分析値が無いため 明確な解釈はできないが サンカンペンでは Br I の濃度は高く 堆積岩と反応した熱水の可能性が高い。この反応が貯留層中で行われたものか 単に割れ目を通っただけのものかは明らかではないが この点については泉質の季節的な変化が一つの示唆を与えているように思われる。すなわち サンカンペン ファンでは第2図に示したように 乾期に Cl 濃度の著しい上昇が見られる。このことは 雨期には定まった通路だけを通り 岩石からの溶出の少ない熱水のみであるものが 乾期に

第4表 主要5地熱地域の熱水の化学組成と地化学温度

泉源名	T (°C)	pH	Li	Na	K	Rb	Cb	Mg	Ca	SiO ₂	Cl	SO ₄	HCO ₃	TNKC (°C)	T _{SiO₂} (°C)	F	Br	I
サンカンベン 1	98	8.2	.35	151	13.5	.21	.28	0.18	2.42	148	26	35	312	192	159	17.3	10.8	1.5
〃 2	100	8.9	.36	155	14.5	.22	.30	0.12	0.70	150	20	40	278	207	160	16.9	8.3	1.1
メチャン 1	99	8.6	.32	138	8.1	.17	.35	.03	1.62	169	28	53	232	171	167	20.1	4.0	0.4
〃 2	99	8.6	.32	137	8.1	.17	.35	.03	1.66	165	25	52	231	171	165			
ファン 1	99	9.0	.61	122	7.9	.15	.29	0.04	0.72	191	23	44	185	181	174	20.4	4.3	0.6
〃 2	99	9.5	.58	122	7.8	.14	.29	0.05	0.46	193	27	22	146	184	174	20.6	5.5	0.6
メチャム 1	92	8.2	.29	123	2.4	.03	.05	.91	6.48	138	16	34	240	110	155			
〃 2	95	8.9	.25	112	5.3	.07	.06	.01	0.87	140	16	22	224	161	156	16.8	2.2	1.6
パパエ 1	99	9.3	.24	90	6.0	.08	.08	0.02	0.98	208	12	35	118	174	179			
〃 2	100	9.1	.25	90	6.1	.08	.08	0.01	1.02	213	9	27	138	175	180	11.3	2.9	0.4

温度 PH 以外の単位は mg/l. F, Br, I は今回の共同研究での分析その他は KRTA (未公表) からの抜粋



第2図
サンカンベンおよびファン地域の Cl 濃度の季節変化 (Ramingwong et al. 1980 a による)

は水理条件が変化し 岩石と十分反応した貯留層中の高濃度熱水を多量に含んで湧出してきていることを表わしている可能性がある。ファンでも同様の傾向が認められるが 熱水の中の Br I はあまり多くなく 貯留層と考えられる堆積岩との反応の明確な証拠は得られていない。この点については 母岩となる岩石の化学分析やその他のデータを加え さらに検討する必要がある。

3 同位体分析

D および ¹⁸O の分析がファンとパパエで行われている (第3図)。また チェンマイ大学の Dr. Ratanasathien の未公表データによれば サンカンベンについても分析結果があり パパエと同じように ¹⁸O のシフトがほとんど無い分布となっている。 ¹⁸O シフトが見られない理由は 水/岩石が高いことによるものであり 開発さ

れている地熱地域ではニュージーランドのワイラケイがその例としてあげられている。 ¹⁸O シフトと水理モデルの関係について明確な解答は出されていないが ワイラケイのように 貯留層として熱水が保持されている場合には水/岩石が高く 割れ目を満たすような場合にはそれが低いという可能性もあろう。この考えに立てば サンカンベン パパエでは貯留層的な部分があり ファンでは割れ目を満たすような貯留部があることになる。このような推定は 後述の地熱地域モデルに一応取り入れてあるが その当否は将来の問題であろう。

ファンでは ¹⁸O のほかに D のシフトも見られる。その原因は 熱水の上昇途中での蒸気分離であり 分離された蒸気は地熱徴候地の南方および南東方の電気探査低抵抗分布地域 (おそらく中低温の温泉の分布地域) へ供給されているものと思われる。

上述の未公表資料にはトリチウム分析値も示されており ファンで19.9TU (T/U×10¹⁸) サンカンペンで4.5および9.0TUとなっている。トリチウムによる水(熱水)の年代としては新しい地下水の混入が無いとして一般に次のように考えられている(森・陶山1980)

- (1) 3TU 以下の水は30年より古い
- (2) 3—20TUの水は1952—1962の水爆実験による高濃度のトリチウムを含む
- (3) 20TU 以上の水は最近の高濃度トリチウムを含む

従って サンカンペンの熱水は30年前に近いやや古い年代のものであり ファンは数年といったオーダーの非常に新しい水といえよう。但し サンカンペンでは化学分析から表流水の混入が推定されており この影響を考えれば 深部へ循環している熱水の年代は30年以上となる。

4 ガス分析

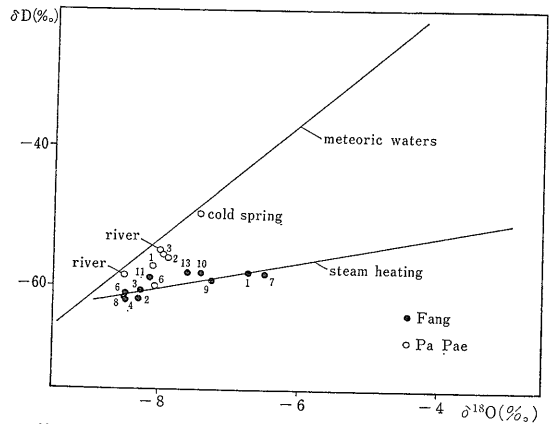
温泉ガス中の H₂O CO₂ H₂S H₂ Ar O₂ N₂ CH₄ について分析が行われ CH₄—CO₂ の平衡から推定地下温度が計算されている (KRTA 未公表) その最高温度はサンカンペン247°C ファン197°C パパエ179°C メチャン172°C メチャム170°C となっている。

5 地温勾配と地殻熱流量

タイでは 地熱探査のための井戸は1本も無いが 広域的な熱構造調査として 水井戸 カリ探査井 石油探査井等を利用した熱流量の測定が行われ 地熱との関係も議論されている (Thienprasert et al. 1978)。これによれば ファンからマレー半島に延びる花崗岩・温泉分布域は全般的に地温勾配が高く タク (Tak) 地域では 50—90°C/km という値を示し (調査井深度120—160m 4本) 熱流量として約 2.5 HFU (1 HFU=42 mWm⁻²) が求められている。

地熱地域の近傍では ファン盆地の石油探査井のデータがあり 地温勾配 72—93°C/km 熱流量約 2.2—3.6 HFU という値が180と200mの2本の井戸について得られている (Barr et al. 1979)。サンカンペン地熱地域については 50—80mの水井戸3本の測定結果として地温勾配54—96°C/km 熱流量4.4—8.1 HFU という値が報告されている (Ramingsong et al. 1980 b)。

上述の2地熱地域の地温勾配の結果をそのまま利用すれば 地化学温度計で推定された180°C程度の温度には地下約2kmで到達することになる。しかし そのよ



第3図 ファンおよびパパエの D, ¹⁸O 分析 (Ramingsong et al. 1980 a による 一原資料は KRTA の調査報告書)

うな単純な結論を下すことは 測定に使われた井戸が最大でも 200m という浅いものであったことから 非常に危険である。地下浅部に温泉貯留層があれば 浅井戸から求めた地温勾配はかなり高くなるが その値は必ずしもその地域の深部のものとは一致していない。地熱地帯では 上昇路に沿って その地域の地温勾配から推定されるより著しく浅い所に高温の熱水が存在することもよくあることである。従って 地熱地域からはなれた浅い井戸から得られた地温勾配が高いという事実は単に地熱開発の可能性の高い地域として位置づけるためにのみ利用し 具体的に貯留層の深度決定には用いないのが無難であろう。

なお 同じ花崗岩帯にあるランバン (Lampang) 地域で掘られた 630m という熱流量調査井としては最も深い井戸の結果が地温勾配 15.5°C/km と著しく低いこと (Thienprasert et al. 1978) も 浅い井戸からのデータを深部に直接適用することの危険性を示唆しているように思われる。

6 その他の調査と地熱地域のモデル化

第5表は これまで述べてきた地質 地化学調査を含むほぼすべての調査結果の概要と 今後の開発に参考となるデータを示したものである。これらのデータから以下に述べるような各地熱地域のモデルを作成し 今後の調査の基本とした。

第4図は サンカンペンのモデルである。地熱微候地の周辺の花崗岩地域から侵透した雨水が地下で主として伝導的に熱せられ 断層を通じて上昇 一部貯留層を形成し 残りは浅部で地下水の混合を受けて湧出する。深部と浅部に二つの貯留層的な部分を推定したのは Na

第5表 主要5地熱地域の地熱調査結果の概要

項 目	サンカンベン	メチャン	ファン	メチャム	ババ	エ
P H	8.3 — 9.0	8.2	7.9 — 9.1	8.2 — 8.5	8.5	
泉 温 (°C)	99	99	100	98	100	
地化学温度 Tsi (°C)	160	167	174	156	180	
T _{NKC} (°C)	207	171	184	161	175	
全湧出量 (l/s)	72.0		26.0	12.5	17.5	
温泉放熱量 (MWt)	6.7		2.9	3.6	3.6	
地殻熱流量 (HFU)	4.4 — 8.1		2.9 — 5.3			
温泉関連の地質構造	断 層	断 層	断層の交点, 花崗岩の境界		花崗岩の境界	
推定貯留岩	砂岩・粘板岩・チャート	花崗閃緑岩	花崗岩(+粘板岩-石灰岩)	片 麻 岩	片麻状花崗岩(+古生層)	
変質鉱物*	Q, Se, K, Ch, M, H	Q, Se, H(2)	Q, Se, K, M, H	Q, Se, M, Gp(3)	Q, Se, H(2)	
(試料数)	Ah, Gp, Al, Ja(28)		Ah(5)			
古地温(°C)	120 — 150	≒100	120 — 150	≒100	≒100	
比抵抗(深度500m)	100Ω以下2ヶ所	低比抵抗部なし	50Ω以下2ヶ所			
天水供給量(kg/day/km ²)	150×10 ⁴	260×10 ⁴	220×10 ⁴	80×10 ⁴	90×10 ⁴	
利用可能表流水	十 分	豊 富	十 分	豊 富	豊 富	
地 形	平 坦 地	平 坦 地	平 坦 地	平 坦 地	山 岳 地	
集落からの距離	チェンマイから25km	メチャンから7km	ファンから10km	集 落 な し	集 落 な し	

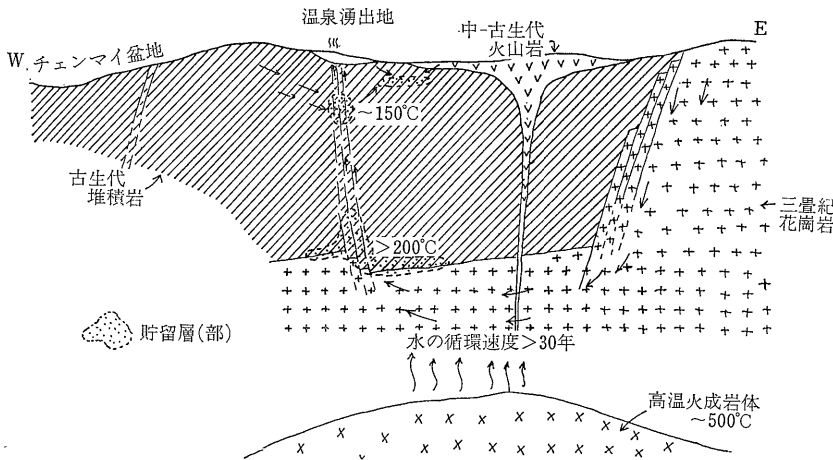
* 変質 鉱 物 名 Q:石 英 Se:セリサイト K:カオリン Ch:緑 泥 石 M:モンモリロナイト
 H:ハロイサイト Ah:硬石こう Gp:石こう Al:明ばん石 Ja:鉄明ばん石
 Ramingwong et al. (1979) に一部加筆・修正

—K—Ca と SiO₂ による地下推定温度 (TNKC Tsi) がかなり異なっていることによる。前者は三成分の比を取るため浅部の地下水混入の影響が少なく 208°C という値を示すのに対し 含有量の減少が直接 Tsi に反映する後者は 159°C という低い値を示したものであろう。このことは浅部地下水に多く含まれる Mg がサンカンベンの熱水に多いことから支持される。そして浅部混合部での滞留時間は TNKC の平衡を変えさせるほど長くはないということになる。また熱水の一部は分離上昇し 東および南東に広い温泉帯水層を形成しているものとみられる。深部貯留層の位置としては微小地震が徴候地の東側の断層で多いこと 東および南東に温

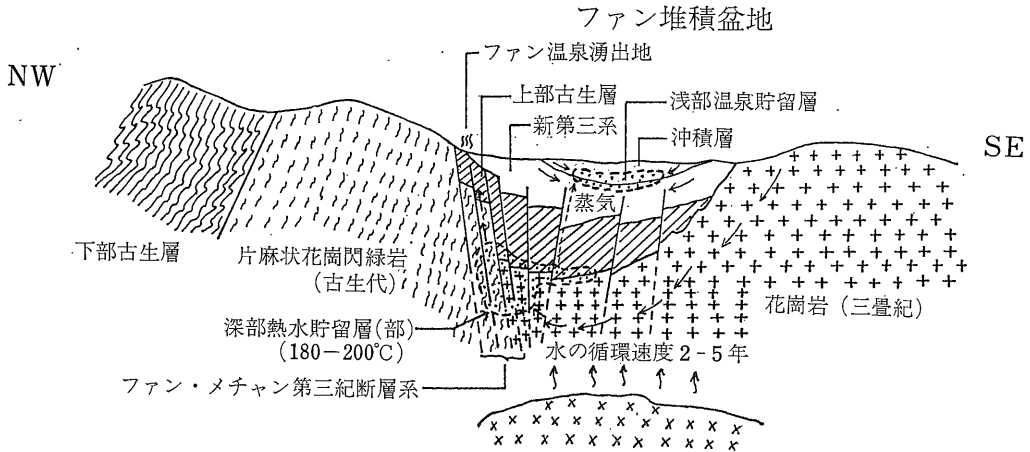
度の高い水井戸があること (Ramingwong et al. 1980 b) などから一応徴候地の東—南東部と考えられる。同位体のデータを基に貯留層の形態熱水循環年数なども表示した。

第5図はファンのモデルである。同位体のデータから熱水の循環時間は比較的短く分離蒸気はファン盆地の高地温勾配に関与しているものとみられる。TNKC と Tsi の差が少ないので浅部での地下水混入は少ないと考えられる。

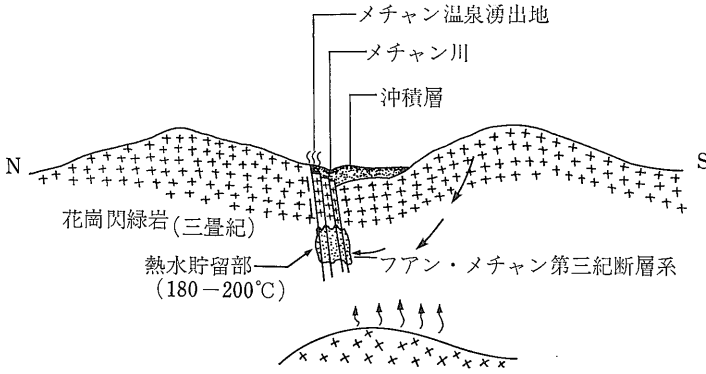
メチャンは電探による低比抵抗部の欠除 F が高く Br I が少ないという花崗岩との反応を示す熱水の特性から第6図のような貯留層なしの単純なモデルが考



第4図
 サンカンベンの地熱モデル
 (Ramingwong et al. 1980 a に加筆・修正—第5図 第6図も同じ)



第5図 ファンの地熱モデル



第6図
メチャムの地熱モデル

られる。このモデルが正しいとすれば 本地域は 開発にはあまり適当でないと思われる。

パペエとメチャムは地質・その他のデータが少なくモデルを作る段階には無いが 地化学温度・放熱量などからは共に有望な地域であり 今後の調査が期待される。

III サンカンペン地熱地域の地点調査

1 調査内容

これまでの調査から サンカンペン地熱地域は 今後優先して開発指向の調査をすべき地域として選ばれ 1982年には深度1000m程度の探査ボーリングを行う方向で検討が進められている。ここでは ボーリング地点決定のためにサンカンペン地域でのみ行われた調査や電気探査など そのために役立つ調査の結果を紹介する。

2 地化学探査

地化学探査としては CO₂ Hg Rn の濃度分布図作成が行われた。このうち 現時点で一応のデータが得られているのはCO₂調査である。測定は総計85点について行われ 測定密度は 地熱微候地で 約 50m間隔 そ

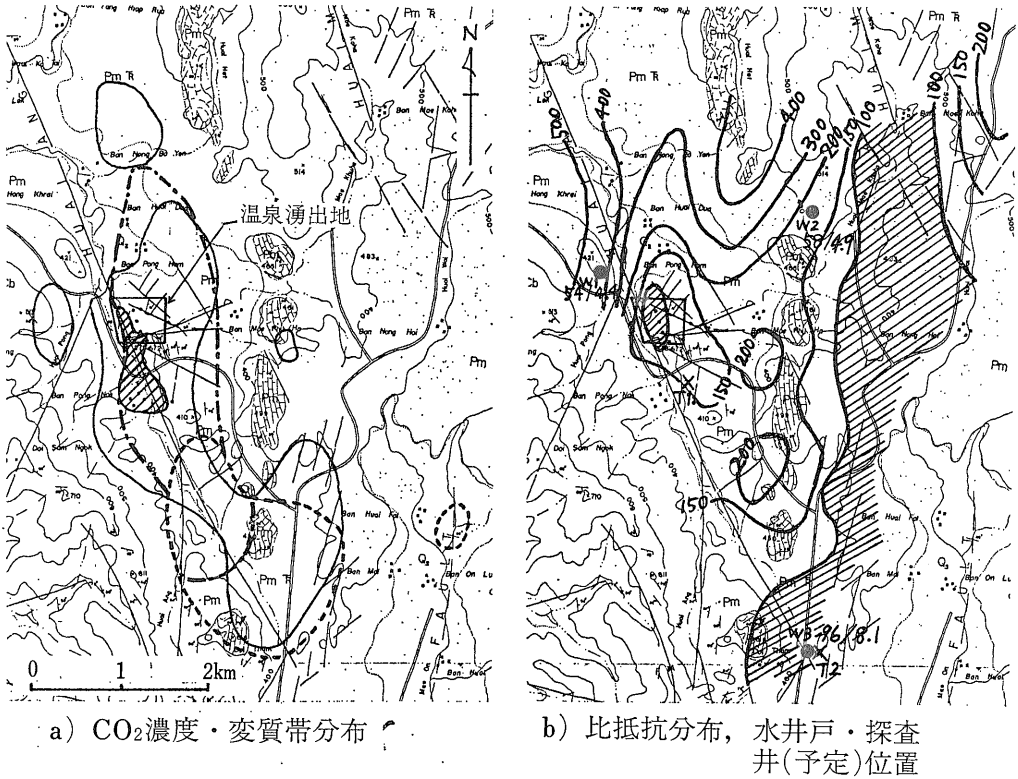
の他は数100m間隔となっている。調査範囲は 約6 × 3 kmである。この結果 微候地における高濃度地域の存在 断層とCO₂分布の密接な関係 そして 地熱活動の南東方向への伸びなどが明らかになった (第7図(a))。

3 変質帯調査

CO₂調査とほぼ同じ範囲について計28個を採取し X線分析を行った。検出された変質鉱物は 第5表に示したとおりであるが セリサイトとしたものは 源岩の雲母鉱物との区別が明確でないため 粘土鉱物のカオリンとモンモリロナイトを基準に分帯を行った。結果はCO₂分布と合わせて第7図(a)に示したが ここでも断層との関係 南東方向への伸びなどがよく認められる。

4 電気探査

約6 × 4 kmの範囲について比抵抗法による調査が行われた。第7図(b)は深度500mにおける比抵抗分布であり 100 Ωm以下の低比抵抗部は微候地に小さく その東側に南北方向の伸びで広く分布している。このうち後者は やや高温の地下水によるものであろう。同



第7図 サンカンペンにおける各種調査結果と探査井の予定位置

じ図に示された水井戸のデータでは 東側の低比抵抗部分に掘られたもの(W3)は温度勾配 熱水量とも他の地域の井戸より高く 地下浅部の熱水の存在を示しているように思われる。

電気探査は 本地域以外にファン メチャンで行われているが いづれの地域でも低比抵抗帯の絶対値はかなり高くなっている。これは 地下に存在する熱水が非常に塩分濃度の低いものであることによる。従って地下水帯との区別等 実際の適用に当って慎重な解析が必要である。サンカンペンの場合には 前述の化学的検討から かなり塩分濃度の高い熱水を含んだ深部貯留層の存在が推定されており これを検出するために MT法など より深部に対する電気探査の実施が望まれる。

5 その他の調査

サンカンペンでは 1m深地温調査 磁気探査 そして反射法地震探査が行われている。しかし 現在のところ 探査深度や調査地域の不足から ボーリング地点 決定のための調査としては 有効性が少ない。

なお 1m深地温調査からは 伝導による放熱量見積りが可能である(浦上 1974)。本地域の地温30°C以上の範囲 約0.2km²について温度勾配 土壌の熱伝導率などを適当に仮定して求めた放熱量は1~2MWt程度となる。この値に温泉放熱量7MWtを加え さらに地温30~25°Cの部分の放熱量 蒸気による放熱量を考慮すれば サンカンペン地域の総放熱量は10~15MWt程度とみられる。開発後は 一般にこの値の10~20倍のエネルギーが取り出されており 電力への変換効率を加味すれば 本地域で期待される発電能力は数10MWeとなる。もちろん タイの地熱は これまでに開発された火山性地熱とは型が異なるため 単純な比較はできないが 一応の参考値とはなり得るであろう。

6 ボーリング地点の選定

前述の地熱モデルおよびその他の調査結果から サンカンペン地域で予定されている1000m級探査井の位置として 第7図(b)のT1 T2が選ばれている(Ramingwong et al. 1980 b)。T1は 地熱候地地のすぐ近くであり

中心地における温度上昇 熱水組成の変化等を求めることが目的であり T2は徴侯地の東あるいは南東に存在すると推定されている深部貯留層の探査が主目的となるであろう。

IV タイの地熱の起源

1 構造帯地熱資源の持つ意味

まえがきの中でも述べたように タイの地熱はアルプス・ヒマラヤ造山帯の後背地に位置している。このような地熱資源は 温度的に低いため 一般の関心は少ないが McNitt (1970) は将来 中・低温資源の利用法が確立された場合には この型の資源が世界の地熱開発に及ぼす影響は 分布面積の広さからいって これまでの第四紀火山に伴なわれた地熱より大きいと述べている。

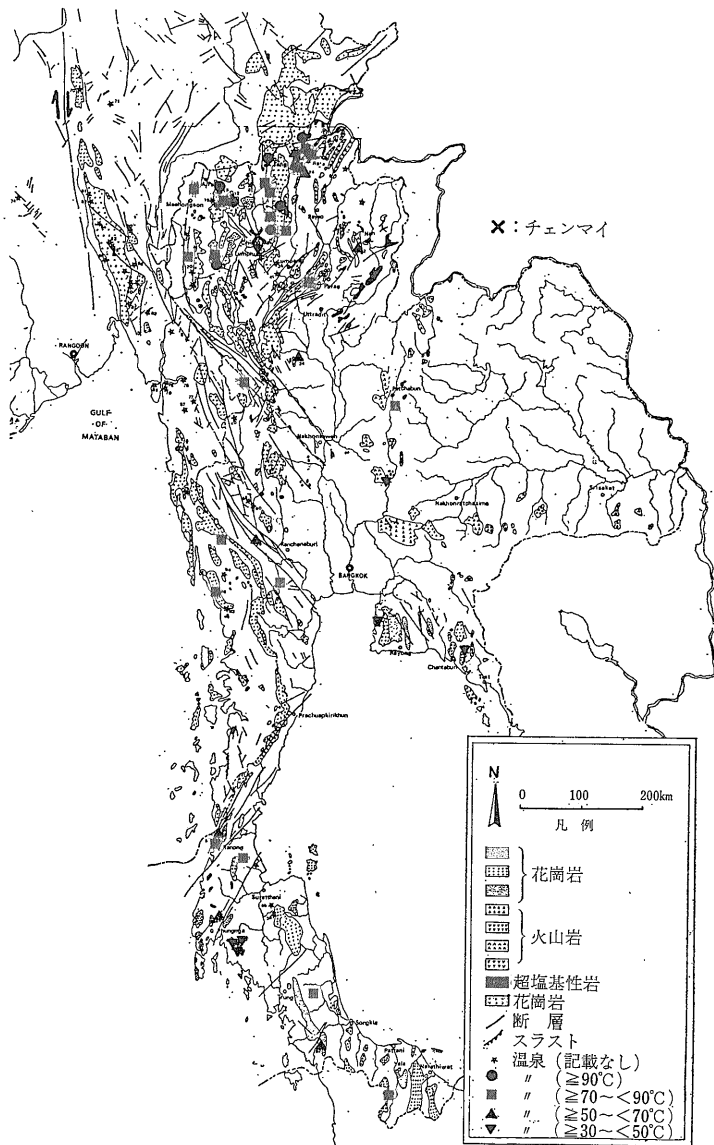
最近 トルコ インド チベットなどこの型の地熱資源の開発への機運が高まってきており 総資源量の大きさと相まって その起源の研究の持つ意義は非常に高くなっている

2 温泉の分布と地質

第8図は タイそしてビルマの一部の温泉分布を地質略図上に示したものである。この図で特徴的なことは 90°C以上の温泉すべてと 70~90°Cの温泉の大部分がチェンマイを中心としたタイ北部に集中していることである。温泉は ほとんど花崗岩地域にあり 花崗岩と温泉が密接な関係をもっていることを示唆している。同様なことは

古い時代の温泉活動の化石である浅熱水性螢石鉱床の分布にも認められる。このことから 温泉 螢石鉱床の形成を同一の成因で説明した第9図のようなモデルが提案されている(熱源としては花崗岩ではなく 玄武岩の活動を考える人もいる)

花崗岩と温泉の関係は 日本でも認められているが 笹田 (1978) は その関係は構造規則に帰着するのではないかと述べ 花崗岩の通路としての役割を重視している。タイ北部についてもこの考えは適用され 多くの断層が温泉地周辺に発達している。そして このうちの一つ ファン西方の断層は 2 kmの垂直ずれを持って

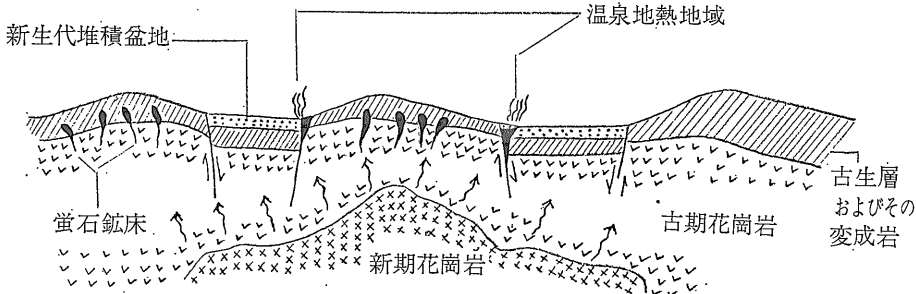


第8図 タイおよびビルマ(一部)の地質と温泉分布

おり (GGM 1972) 通路として適している。

3 熱源

本地域の地熱の主要熱源としては 放射性元素の崩壊によるものと 構造的な原因による高温物質の上昇が考えられる。前者に関しては 例えば南部のソングクラ (Songkhla) 周辺の花崗岩からの発熱量は日本の西南日本の花崗岩からの値の3倍以上あり 10 kmの厚さを仮定すれば地熱熱流量として1.2HFUを生ずると計算されている (Ishihara and Mochizuki 1980)。このように高い発熱量は明らかに本地域の地熱の熱源の一端を担って



第9図 タイ北部における温泉・地熱地帯と浅熱水性螢石鉱床の分布概念図 (Ramingwong et al. 1980 a による)

いるであろう。しかし これまでに示した多くのモデルに描かれていたように 後者による熱の寄与ということが重視されている。

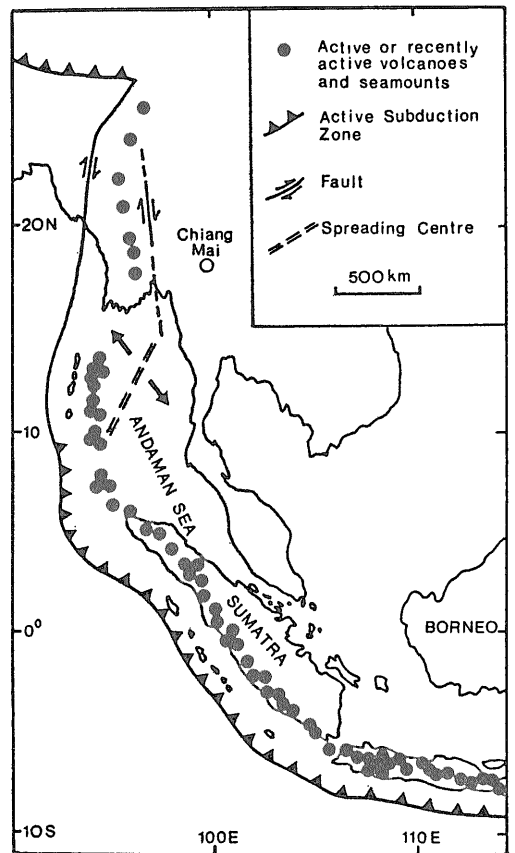
構造的なモデルの一例は 第10図に示されるようなものであり アンドAMAN海の膨張とそれに伴うタイ北部ビルマの引張応力場の発生 そして それによる断層帯盆地の形成 塩基性岩の貫入と高熱流量の発生が考えられている (Barr et al. 1979)。また ビルマは地震活動が西から東へ向って深くなるという分布と発震時の伏角の性質とから 地質構造上島弧と同じ性格を持っているとされている (三東 1971)。このようなことから タイ北部では 地表の火山活動は認められないが 地下に地熱活動の熱源となる火成活動が生じている可能性がある。

但し 熱水の化学組成に火山性の成分の関与がほとんど無いことからみて 溶融マグマの発生は無く 単に熱いマントル物質の上昇と それによる地下温度の高まりがあるだけとみられる。岩崎 (1970) は 500°C 以下の岩石の加熱では Cl などハロゲンの発生はほとんど無いとしており この結果を適用すれば タイでみられる低 Cl 熱水の熱源は 少なくとも熱水と接する範囲内では 500°C 以下と考えるのが妥当であろう。

今後の研究開発の方向

火山国でないタイでの地熱開発は始まったばかりであり タイ政府としても 非火山性の地熱が本当に利用できるものかどうか疑問を持っている。この疑問に答えるため なるべく早く 実際のデモンストレーションプラントを動かしたいという希望がタイ側の研究者から強く出されている。このため 最も有望な地点とみられるサンカンペンでは 前述のように 来年(1982年)にも探査ボーリングが行われることになっている。一般的な地熱探査においては これまで述べてきたサンカンペンの探査に加え 深部の情報をより良くつかむための電気探査(MT法など)や重力探査などがボーリングに先行

して行われるのが普通である。しかし 地熱の井戸が1本も無く かつ 既存の地熱地帯とは異なる非火山性の地熱地帯という地熱開発の処女地では 実際に試掘を行い 深部での温度条件や熱水のあり方などを確め 地熱開発の可能性を探るのも悪くないであろう。但し 地熱探査の常として 貯留層に当たらず 蒸気や熱水の噴出が無い場合も十分に考えられる。その場合でも



第10図 タイ周辺の広域的構造 (Barr et al. 1979 による)

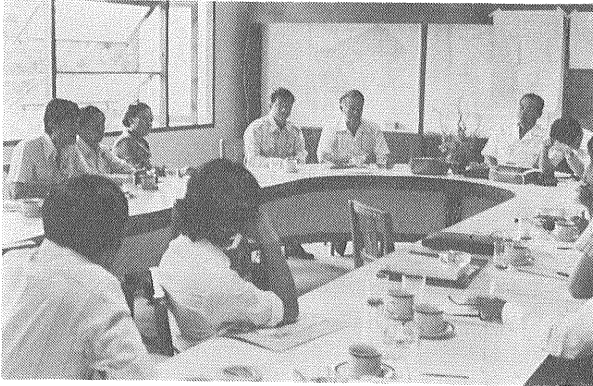


写真10 調査終了後のミーティング（鉱物資源局チェンマイ支所）

孔内の検層 コアの調査等を十分に行い 井戸が単に貯留部に当たらなかつただけで 地域としては開発の可能性が残っているのかどうかなど 正しい評価を行うことが必要である。いずれにしろ 探査ボーリングからはタイの地熱について一歩進んだ情報が得られるはずであり その結果が期待される。

タイの地熱開発を一層進めるためには サンカンペンで行われようとしている開発指向の調査以外に全国的な調査が必要であり 基本的な地質図の作成に加えて 温泉地のカタログ作り（地点 温度 pH 湧出量 主要化学組成など）ランドサット 空中写真利用の構造図作成などが求められる。また タイの温泉の起源を探るために 岩石 水の F Br I など微量成分の分析 ガス 水 岩石の同位体分析（D He T ^{18}O ^{13}C ^{34}S など）岩石放射能の分析と地殻熱流量との関係 地震発生メカニズム 削剝により深部の情報を得ることのできる螢石鉱山の 鉱物・地球化学などの研究が進められなければならないであろう。

謝 辞

本研究の実施に関していろいろお骨折りいただいた工業技術院国際研究協力課の与田潤専門職 富樫幸雄前専門職（現地質調査所鉱床部）化学分析結果に関しご教示いただいた地質調査所地殻熱部茂野博・比留川貴 そして放射性元素の分析を行っていただいた同所 物理探査部の金谷 弘の各氏に対し厚くお礼申し上げます。

参考文献

- Barr, S.M. et al. (1979): Hot springs and geothermal gradients in northern Thailand., *Geothermics*, vol. 8, p. 85-95.
- Baum, F. et al. (1970): On the geology of northern Thailand., *Beih. Geol. Jb.*, Heft 102, 24 p.
- Chuaviroj, S. et al. (1980): Geology of geothermal resources of northern Thailand: Sankampaeng, Fang and Mae Chan areas., *EGAT*, 45, 49 and 50 p.
- GGM (German Geological Mission to Thailand) (1972): Final report., *Geol. Surv. Federal Republic Germany, Hannover*, 94 p.
- Ishihara, S. and Mochizuki, T. (1980): Uranium and thorium contents of mesozoic granites from Peninsular Thailand., *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 31, p. 369-376.
- 岩崎 岩次 (1970): 火山化学, 講談社, 東京, p. 49-50.
- LASL (1979): Hot dry rock energy extraction field test: 75 days of operation of a prototype reservoir at Fenton Hill., Ed. by Tester J. W. and Albrigh, T. N., p. 42-86.
- McNitt, J. (1970): 探査の指針となる地熱地帯の地質学的環境 (角 清愛訳), 国連地熱ピサシンポジウム論文抄録集, 地熱別冊第5号 地熱調査会 p. 85-99.
- 森 康夫・陶山 淳治 (1980): 地熱エネルギー読本, オーム社, 東京, p. 89-90.
- Ramingwong, T. et al. (1979): Thailand geothermal studies project. Technical Paper no. 1., *EGAT*, 64 p.
- (1980 a): Geothermal resources of northern Thailand: Sankampaeng, Fang and Mae Chan geothermal systems., *EGAT*, 244 p.
- (1980 b): Report of evaluation on geothermal energy resources of northern Thailand: San Kampaeng, Fang and Mae Chan systems., *EGAT*, 26 p.
- 三東 哲夫 (1971): ヒマラヤ連峰周辺の地震活動, *科学*, vol. 41, p. 231-240.
- 笹田 政克 (1978): 地熱とカウ岩, *地質ニュース* no. 284, p. 18-24.
- Thienprasert, A. et al. (1978): Geothermal gradients and heat flow in northern Thailand., *UN ESCAP, CCOP Technical Bull.*, vol. 12, p. 17-31.
- Thienprasert, A. and Raksaskulwong, M. (1980 a): San Kampaeng geothermal energy resource., *EGAT*, 75 p.
- (1980 b): Fang geothermal energy resource., *EGAT*, 15 p.
- 浦上 晃一 (1974): 地温測定, 地熱調査ハンドブック., 地熱別冊第6号, 地熱調査会, p. 7-19.
- Workman, D. R. (1979): インドシナ半島の地質構造 (佐藤正訳), *地球科学* 16, 世界の地質, 岩波書店, 東京, p. 385-398.