

もう1つのヘリウムとメタン(その1)

福田 理 (海外地質調査協力室)

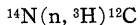
Osamu FUKUTA

1 まえがき

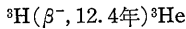
ヘリウムには安定同位体が2つある。その1つは質量数が4のヘリウム-4(⁴He)で もう1つは質量数が3のヘリウム-3(³He)である。空気中における両者の濃度は⁴Heが5.2vpm(容量100万分率)であるのに対して³Heが 6.8×10^{-6} vpmであるから 原子比は76.47万対1である。先端技術の担い手であり かつ資源的にも重要なのはもちろん⁴Heであるが ³Heは別の意味で⁴Heに負けない重要性をもつ。この³Heとの関わりにおいて重要なのもう1つのメタン すなわち非生物起原のメタンである。しかも このメタンはすでに使われているかも知れないし また世界のエネルギー事情に根本的な変革をもたらすかも知れないのである。

2 ヘリウム-3の生成とマントル

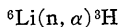
質量数3の水素(³H) すなわちトリチウム (tritium) は 上層大気中での宇宙線によって誘起される核反応によって 常に生成されている。すなわち 宇宙線の反応から生ずる速い中性子は



なる反応によって³Hをつくる。³Hは放射性で



なる反応によって³Heとなる。大気中に見出される痕跡量の³Heは おもにこの反応によって生成されると考えられている。人工的にはトリチウムはリチウムと熱中性子の反応



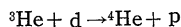
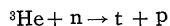
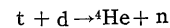
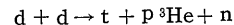
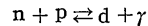
によって作られ この³Hから³Heができるが この核反応は自然界にはほとんどない。

上の文の末尾の“ほとんど”がゴシックになっているのは この“ほとんど”のない文献が多いからである。上の反応は地表に近いところでも少しは起っている。リチウムには⁶Liおよび⁷Liの2つの同位体があり 存在比はそれぞれおよそ7.9%および92.1%である。リチウムの地殻中の存在度は65g/tonで 輝石 角閃石 および雲母に見出される。したがって 速い中性子さ

えあれば この反応は地殻中でも起る。地表近くではこの中性子は宇宙線から僅かながら供給されるし また地下深所では核分裂によってできる。しかし 地殻中の⁶Liは上に述べたように少ないので 地殻中で³Heが生成される割合は⁴Heのそれに比べてずっと小さい。

しかし ビッグバンの昔にまでさかのぼって 宇宙に目を転ざると 様子が大分ちがってくる。爆発説とも呼ばれているビッグバン宇宙論によると ヘリウムができたのはビッグバンの3分後である(小尾 1982)という。そして このヘリウムの形成はビッグバンの1秒後からおよそ100万年間続いた光の時代 すなわち宇宙の主役が物質ではなく光であった時代の最大のできごとであった。ビッグバンの1秒後の100億Kという温度下では陽子と中性子とが結びついて原子核を作ることはできないが 3分ほどたって温度が10億Kより下ると 陽子と中性子とが結びついて重水素になり それに中性子が反応してトリチウム(三重水素 ³Hまたは³T)ができこれが陽子を捕えてヘリウムを作ることが可能になったというのが 小尾(1982)の解説である。

最初に陽子 すなわち水素の原子核と 中性子nとがあったとすると ヘリウムができるまでの原子核反応は



の順で進行する(杉本・浜田 1975)。ここでdは重陽子 すなわち²H tは三重水素 すなわちトリチウム ³Hを表わす。また γ はガンマ線すなわち高エネルギー光子である。

すでに述べたように ³Heはもともと安定同位体であるから 速い中性子や重水素がなければ トリチウムや⁴Heができる反応は起らない。また トリチウムは不安定で β^- 崩壊によって³Heになる。このトリチウムの半減期は12.46年で 決して長くはないから かつて

の宇宙における ^3He と ^4He との比は 現在の地球上におけるものよりかなり大きかったことが想定される。このような想定を実証するのによく使われるのが隕石である。COCKETT & SMITH (1973) によると 隕石中の ^3He と ^4He との比はおよそ0.2である。これは空気中における ^3He と ^4He との比 0.7647×10^{-8} のおよそ 26.154 万倍もある。一方 隕石の全ヘリウムの含有率はまちまちで 10^{-9} ないし 10^{-6}cc/g であるという。

太陽星雲と呼ばれるガスと微塵の雲の中で 地球を初めとする惑星がなお物質を集めて生長していたおよそ46億年以前の特徴を現在まで保っている岩石を CHAPMAN (1977) にしたがって始原岩石 (genesis rocks) と呼ぶことにしよう。隕石のほとんどは一種の始原岩石であって その化学的・鉱物学的特徴を調べてみると驚くそれが初期の太陽系に特徴的な環境のなかで形成されたことがわかるという。加えて ある種の隕石の含有物中には ごく初期の太陽星雲凝縮物の標本的なものがあるしさらに含有物の一部には太陽系の形成に先立つと思われるものさえみられるという。

このような隕石中の ^3He と ^4He の存在比が 空気中のものよりはるかに大きい以上 地球全体の ^3He と ^4He の存在比は後者より大きいと考えざるを得ない。しからばこの ^3He に富むヘリウムはどこに保存されているのであろうか。この場合 おもに鉄およびニッケルからなるという核は考えにくいし 地殻の厚さは地球の半径に比べて僅かであるということになると 結局その大部分はマントルにあることになる。また 地殻はウランやトリウムからの ^4He 生成の場でもあるから ここに ^3He に富むヘリウムがあったとしても 次第に薄められてしまいうに相違ない。

3 ヘリウム-3の一般的性質

^3He および ^4He の物理的性質をまとめて示したのが表1である。本表にみられるように ^4He に比べて ^3He の性質には不明のままに残されているものが多い。なお 本表のもとになった COCKETT & SMITH (1973) の TABLE 11には 天然ガス中の ^4He の濃度が0.2-8%と記されているが 日本のものについてみても 南関東ガス田から 0.00001%のものまでが確認 (杉崎ほか2名 1963) されており かつ CH_4 などの ^4He 以外のガスの発生・供給量が多ければ ^4He の濃度はいくらかでも小さくなり得るので 誤解を避けるため本表では 0-8%とした。

表1に示された諸項目の大部分については 上級の教科書や専門の辞典類に出ているので 説明はそれらに譲

表1 ^3He および ^4He の物理的性質

元素		^3He	^4He
原子番号		2	2
原子量		3.0160	4.0026
気体の性質			
相対的存在度			
地殻	^4He 原子当り		1.000
宇宙	^4He 原子当り		1.000
陸域の岩石	重量%		3×10^{-7}
濃度			
空気	vpm	7×10^{-6}	5.24
天然ガス		1×10^{-6} vpm	0-8 %
0°Cにおける密度			
1.01325 bars	g/l		0.17847
Boyle 温度	K		25
比熱			
25°C, 1.01325 bars (<i>C_p</i>)	J/mole K	20.80	20.80
比熱比			
25°C, 1.01325 bars における (γ)			1.630
音の速度			
(<i>v</i>)	m/sec	1123	969.9
<i>v</i> / γM		1947	1948
0°Cにおける熱伝導度			
1.01325 bars (<i>k</i>)	W/m K		0.1430
0°Cにおける粘度			
1.01325 bars (ρ)	μ poises		185
帯磁率			
10^{-6} cgs/g mole			-1.9
0° Cにおける屈折率			
1.01325 bars for $\lambda = 5893 \text{ \AA}$	$10^6(n-1)$		35
25°Cにおける電媒常数			
1.01325 bars	$10^6(\epsilon-1)$		63.9
分極度	\AA^3		0.204
第1イオン化ポテンシャル			
	volts		24.586
25°Cの水中における溶解度			
分圧 1.01325 bars	ml/kg		8.51
臨界パラメーター			
臨界温度	K	3.324	5.20
臨界圧力	bars	1.164	2.29
臨界密度	g/ml	0.0418	0.0693
液体の性質			
標準沸点における			
温度	K	3.191	4.215
液体の密度	g/ml	0.0582	0.1248
蒸気の密度	g/l	25.7	16.75
蒸発の潜熱	J/mole	25	83.2
比熱 (<i>C_v</i>)	J/mole K	12	14.4
表面張力	mN/m	0.02	0.10
粘度	mP	0.019	0.030
熱伝導度	mW/m K	0.020	0.031
固体の性質			
三重点における			
融解の潜熱	KJ/mole	0.013*	0.023†
融解時の容積変化	%	4.5	5
熱膨張の平均係数	10^{-3} K^{-1}	4	3
グリューナイゼン係数		2.2	1.95
ゼロ・ポイント・エネルギー (零点エネルギー)			
	KJ/mole	0.263	0.197
蒸発の潜熱	KJ/mole	0.019	0.050

* 3.0 Kにて † 4.0 Kにて (COCKETT & SMITH, 1973; 一部改訂)

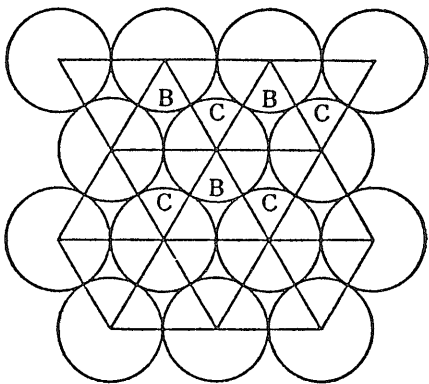


図1 最密パッキング (六方最密結晶のでき方) (吉岡 1977)

同じ大きさの球を平面上にもっとも密に並べるとこのようになる。この正三角形の網の面をAとする。この網目には上向きと下向きのそれとがある。第2層を積むとき 上向きの正三角形の重心の上に球の中心がくるようにするやり方と 下向きの正三角形の重心の上に球の中心がくるやり方の2通りがある。初めのようにして第2層をB面 また後のようにして第3層をC面と呼び、次に第3層をつくる時2通りのやり方がある。今度はC面かA面かである。もしA面がくると第1層と同じ配置になり 以後の積み方もABABとくり返すものが考えられる。これは明らかに六方の対称性をもった構造になり 六方最密 (または稠密) の積み方と呼ばれる。

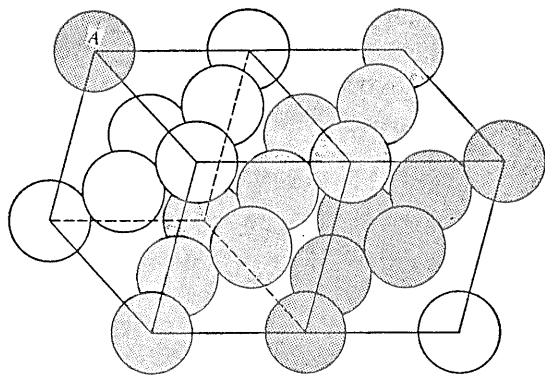


図2 面心立方構造 (立方最密結晶のでき方) (吉岡 1977)

第3層にC面がくる場合には 第4層にはA面がくることになり 以後はBCABCAとくり返す積み方ができる。この場合にはABCの3層で1つの周期が完成する。これが図の面心立方構造で (111) 面を層面と考えたときの積み方になっているので 立方最密 (または稠密) の積み方と呼ばれる。

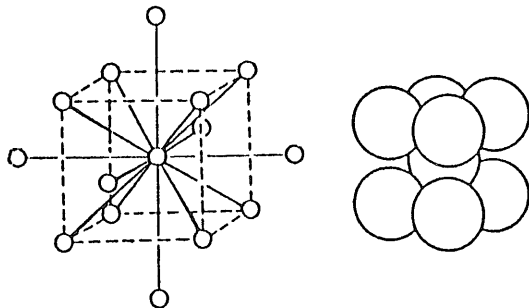


図3 体心立方構造 (桐山 1958)

右の図から明らかなように これは最密な積み方にはなっていない。リチウム以下の第1族の金属元素はすべてこの結晶格子をもつ。

ることにし ここでは著者が探し出すのに骨を折ったグリーンナイゼン常数 (GRUNEISEN constant) についてひと言触れておこう。結晶のなかでは 原子やイオンは静止していないで 平衡位置の付近で振動している。

これが格子振動である。前稿 (福田・永田 1983) で述べたように 1気圧のもとでは 大部分 ^4He からなるヘリウムは 温度をいくら下げても固体にならず 粘性のない超流動現象を示す液体になる。しかし 極低温にして圧力をかけると 六方最密や面心六方の結晶になる (図1・2)。これは3重点をもつ他の希ガス類についても同様である。金属元素は上の2つの結晶のほかには体心立方 (図3) の結晶が加わるだけであるから ヘリウム以下の希ガス類の固体は むしろ金属に似ているといえるだろう。希ガス類が最密充填格子の結晶となるのは その原子が閉殻構造をしており 球対称の電荷分布をもっているからである。

格子振動数の変化の割合 ($\Delta\omega/\omega$) が体積変化の割合 ($\Delta V/V$) に比例するとし

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\gamma \frac{\Delta V}{V}$$

とおいたときの γ がグリーンナイゼン常数である。この関係を使って格子振動数を体積の関数と考えると ある温度の格子振動の全自由エネルギーは体積の関数になる。一方体積が変化すれば歪のエネルギーが生ずる。この両者のエネルギーの和を 温度が一定で体積について極小になるとすると 体積膨脹係数と格子振動による単位体積当りの比熱 C_V および圧縮率 β との間に

$$\alpha = \gamma C_V \beta$$

という関係が得られる。この式に実験値を入れて γ を算出してみると 多くの結晶について $\gamma \sim 2$ 程度の値が得られるという (吉岡 1977)。これをヘリウム以外の希

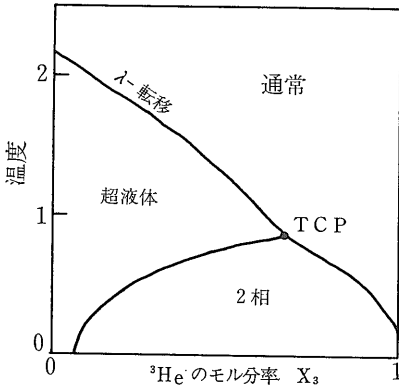


図4 飽和蒸気圧下における ^3He - ^4He 混合物の状態図 (Hess 1974) 横軸 X_3 は ^3He 濃度 三重点TCPは $X_3=0.67$ $T=0.87\text{K}$ にある

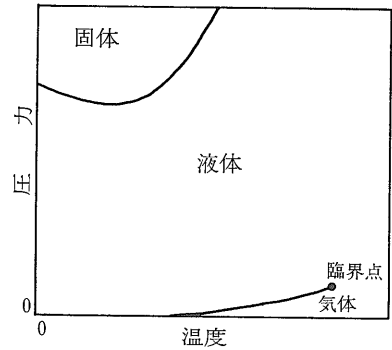


図5 ヘリウム-3の状態図 (Hess 1974) 臨界温度 $T_c=3.32\text{K}$ 臨界圧力 $P_c=1.17\text{bars}$ 融解曲線上の最小値 $T=0.32\text{K}$ $P=29.3\text{bars}$

ガスについてみると ネオン(2.85) アルゴン(2.4) クリプトン(2.3) およびキセノン(2.9) であり ^3He (2.2) および ^4He (1.96) というヘリウムの値は クリプトンに次いで小さい。本常数のくわしいことについては 結晶物理学の教科書(三宅ほか4名 1958; 吉岡 1977など)を参照されたい。

^3He の性質のなかでも注目されるのは やはり液体に関するものである。表1に示された臨界パラメーターのいずれをとってみても ^3He のそれは ^4He のものより小さく 原子量のちがいをよく反映している。また三重点における融解の潜熱も ^3He は ^4He に比べてはるかに小さい。

4 液体 ^3He - ^4He 混合物

液体 ^4He に ^3He を加えると λ -転移が起る温度は低くなる(図4)。図4にみられるように 温度が0.87K以下のところでは均一溶液は不安定で 超流動を示さない富 ^3He -相と 超流動を示す富 ^4He -相とになっている。この ^3He - ^4He 混合物の状態図においては 相の境界を示す曲線の2つの分枝は λ -転移線と角張った接触を示している。この交点 すなわち3重点は 第2級の λ -転移が第1級の相転移になるところである。

温度が絶対0度に近づくにつれて 富 ^3He -相は急激に純 ^3He になるが ^3He は富 ^4He -相におよそ6%ほど残る。温度が0.5K以下になっても かなりの数の振動量子(phonons) および回転運動量子(rotons)が ^4He に残っている。この純粋な超流動性の ^4He は ^3He 原子の気体状溶質の不活性溶媒である。 ^3He の本来の蒸気圧が無意味なものになるような極低温においても ^3He は潜熱を吸収して蒸発し 超流動性の ^4He に入りこむ

ことができる。この原理に基づいて作られたヘリウム-3希釈冷却装置は 連続して繰返し運転することによって約10mKの温度を また一気に ^3He を蒸発させることによって4mKという超低温を得ることができる。

5 純液体ヘリウム-3

図5の状態図に示されているように 液体 ^3He は34barsの圧力下でのみ絶対0度で固体になる。液体 ^3He には温度を下げてても λ -転移は起らない。これは ^3He の質量数が奇数(3) であるため λ -型の相転移はそれが偶数である場合にのみ可能であるという。その代り約0.5K以下の低温では 標準的な金属における電子が縮退しているのと同じ意味で 液体 ^3He も徐々に縮退状態になる。以上に関する理論的な裏づけについては 量子統計学の教科書 たとえば古典的なものでは BRILLOUIN (1928) の “Statistique Quantique” (邦訳あり)などを参照されたい。

熱力学における CLAUDIUS-CLAPEYRON 方程式によると 融解曲線は負のスロープをもつ(図5参照)。これは POMERANCHUK 冷却として知られた実用的な応用面をもつ。すなわち もし上の負のスロープ内の凝固圧における液体 ^3He がさらに断熱的に圧縮されると それは凝固し始めるとともに冷却を伴う。もとの温度が十分低ければ 冷却の度合は相当なものとなる。

6 超液体ヘリウム-3

1957年 BCS理論は対をなす電子のメカニズムを使って ある種の金属に超電導現象がどうして起るかを説明することに成功した。BCSは J. BARDEEN, L. N. CO-

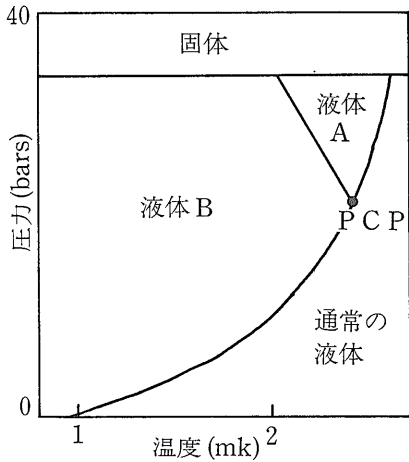


図6 ミリケルビン温度下におけるヘリウム-3の状態図 (HESS 1974)
超液体にはA Bの2相がある。
PCPは多重臨界点を示す。

OPER, および J. R. SCHRIEFFER の 3 学者の頭文字である。反対のスピンおよび運動量をもった 2 つの電子はゼロのネット・スピンをもつ対となり 超伝導に対応する巨視的量子状態になる。同様のメカニズムが 液体 ^3He に超液体への転移があるという結果を導く。その転移温度を予測することは困難であったが その可能性は ^3He を使ってより低い温度を得る研究のためのテクニック発展の動機を与えた。この転移は ^3He -希釈冷却装置で到達できる温度の範囲では起らず もっと温度を下げても必要がある。粉末硝酸セリウム-マグネシウム (CMN) または液体 ^3He に浸されたこれと関連性のある常磁性塩を使って 断熱的に消磁状態をつくる POMERANCHUK 圧縮筒や 適当な金属内での核スピンの断熱的消磁によって この温度低下は可能である。

1972年 POMERANCHUK 圧縮筒を使って D. D. OSHEROFF, R. C. RICHARDSON, および D. M. LEE は 2.7 mK および 2.2mK 付近で相転移があることを発見した。図6にみられるように 液体 ^3He には液体AおよびBの2つの超液体相がある。

^3He 原子間の強力であるが遠くには届かない斥力が超伝導体内における電子対のように 対を作って相対的角運動量をもたない状態になることを妨げる。その代り ^3He 対は軌道角運動量の 1 量子単位をもつ。 ^3He 対はまたスピン角運動量の 1 量子単位をもつ。超液体状態においては 以上の対をなす軌道およびスピンの両角運動量は つながって巨視的軌道角運動量ベクトル L および巨視的スピン角運動量ベクトル S を与える。 2 つの超液体相AおよびBはちがった対のつながり方をし

ている。すなわち 液体Aにおいては ある量子化軸に関して “up” のスピンをもったつながりと “down” のスピンをもったつながりとがある。また 液体Bにおいては つながりはより等方的である。

図6の状態図は液体Bが液体Aより広い範囲にわたって安定であることを示す。 B-A転移は小さい潜熱を伴う第1級のものであるが A-BまたはA-通常液体転移は第2級のもので 超伝導相転移の場合のように比熱のジャンプを伴う (前稿の λ -転移を参照)。これらの転移線は多重臨界点 (polycritical point) で一緒になる。磁場があると B-A転移は低温に向って不明瞭になり また多重臨界点は消失する。 A-通常液体転移は 磁場に平行なスピンをもつ対だけが超液体である中間相 A_1 の出現に伴って 2 つになる。

超液体 ^3He 相は非常に複雑な組織を示す。それは核磁気モーメントを介して外部の磁場につながるスピントル S および S と弱くつながり かつ固相との境界および流動速度場と影響し合う軌道角運動量 L があるためである。他方 このような特性はすでに紹介したBCS理論に現われるパラメーターの決定ばかりでなく このような相互作用の研究に関して 核磁気共鳴 (nuclear magnetic resonance, NMR) を非常に強力なテクニックにした。そればかりでなく 核磁気共鳴に関する研究は 核磁気帯磁率 比熱および熱伝導 通常の音波 (非衝撃波) および超音波 (それから超液体の密度が得られる) の減衰 および振動する細線を濡らすことによって決定されるような粘度の測定を可能にした。

なお 本節の解説はおもに HESS (1974) によるものである。

7 ヘリウム-3の用途

以上に述べたことから知られるように ^3He を用いて超低温を得る技術はすでに実用の域に達しており また超液体 ^3He 相の特性は 核磁気共鳴を多くの先端技術の基礎研究にかかわる強力なテクニックとした。しかしこのような場合に使われる ^3He は核反応装置中でつくられるトリチウムの β^- -崩壊によって得られるから 天然の ^3He に資源としての意味はない。しかし その他の面ではすでに有効に使われている。それを大別すると 石油・天然ガス資源とのかかわりがあるものと そうでないものとなる。前者については次稿の後半にゆずり 今回は後者だけを扱うことにする。

8 核原料鉱床探査とヘリウム-3

DYCK (1976) によると ウラン鉱床およびトリウム鉱床が ${}^6\text{Li}$ に富むことはほとんどないため ${}^3\text{He}$ の生成は ${}^4\text{He}$ の生成より少くしたがってこれらの鉱床の内部および近傍では ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$ は増加するにちがいない。そしてウラン鉱化帯を貫いたさく井坑から得られた水中の ${}^4\text{He}$ 濃度と ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$ との間には正相関関係のあることが知られている (CLARKE & KUGLER 1973)。

1960年代の初期に行われた水素爆弾の実験は地表水系に若干の ${}^3\text{He}$ を付加したため ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$ の自然比は乱された。 ${}^3\text{H}$ の半減期を12.5年として計算するとこの自然比がもと通りになるにはおよそ60年が必要である (DYCK 1976)。このような人工的な ${}^3\text{H}$ については ${}^3\text{He}$ の生成がなければ地下水中のウラン鉱によるヘリウムとそれ以外の岩層によるヘリウムの同位体比にはちがいがあらずである。

9 地球上のヘリウム-3

すでに述べたように太陽星雲中の塵やガスが集って地球ができたことが現在ひろく認められており始原岩石と考えられている隕石中の ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ の存在比が空気中のそれよりはるかに大きくかつ地殻中のこの存在比もきわめて小さいことからマントル中のこの存在比はかなり大きいことが考えられる。しかればこの考え方を支持する事実はあるのだろうか。

1969年 CLARKE et al. は太平洋深部の海水中に空気中のものに比べて ${}^3\text{He}$ が非常に多いことを見出しこの過剰な ${}^3\text{He}$ は地球誕生時の太陽系星雲中にあった始原 ${}^3\text{He}$ の遺物が漏洩してきたものであると結論している。同時に MAMYRIN et al. (1969) は南千島列島の火山ガス中の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比が空気中のものより明らかに高いことを見つけている。彼等もまたこの ${}^3\text{He}$ の増加は地球深部におかれた物質に由来するものと考えた。

その後もこの問題に関する多くの研究が世界各地でひろく行われ地体構造上同じ性質の地域において採取された天然ガスおよび岩石試料はまったくよく似た ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ を示すことが注目された。このような始原ヘリウムの放出は新生代火山地区に共通して見出されている。

大西洋中央海嶺や東太平洋海嶺を含む大洋中央海嶺 (Mid-Oceanic Ridge) から得られた岩石試料の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は極端に高い $(1.3 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ というほとんど一定の値を示す。これは空気の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比である 1.31×10^{-6} のおよそ10倍である。LUPTON & CRAIG (1975) はこれをMOR (Mid-Oceanic Ridge)-型と定義している。

ハワイ諸島およびアイスランドのような高温地点の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は $(2.0-5.0) \times 10^{-5}$ もあり明らかにMOR-型

のものより高い (KANOOKA & TAKAOKA 1980)。日本やカムチャッカのような沈み込み帯に沿う地区においては ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比の上限は 1.1×10^{-5} である (NAGAO et al., 1981; KAMENSKY et al., 1971)。これはMOR-型のヘリウムと沈み込み岩板の運動によってできた地殻堆積物中の放射性壊変起原のヘリウムの混合によって生じたと推定される。他方大陸試料の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は一般に低い。この値は試料が採取された地区の地質年代によって変化する。先カンブリア系およびヘルシニア造山でできた基盤における一部のガス鉱床の平均 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比はそれぞれ 2.4×10^{-8} および 6.2×10^{-8} である (KAMENSKY et al., 1971)。またPOLYAK et al. (1979)によればソ連邦の陸地産のガスの ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比にみられる地域差は熱流量の地域差と符合している。

最近 WELHAN & CRAIG (1979) は東太平洋海嶺の北緯21度にある熱水噴出孔が混濁した水を流していることを報告した。それによればブリューム (plume; 立ち上る雲状のもの) と周囲の海水との混合物は溶存水素および同メタンのほかにマントル起原のヘリウムを含んでいるという。この水素およびメタンはともに本来マントルの成分として玄武岩から絞り出されたものかまたは水素は化学反応によって玄武岩-水系の中で生成されたものであろう。マントルからの非生物起源のメタンの発散は地殻内でも観察されるらしい。

10 日本のヘリウム-3のあらまし

現在日本においてヘリウム-3関連の地球化学的研究を精力的に進めているのは脇田宏を中心とする東京大学地殻化学実験施設のグループである。彼等の研究は ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比から緑色凝灰岩層中の石油・天然ガスの一部をマントル起原のものと考えるところまでできているがそれについては次号にゆずり本号においてはそれ以外の分野に重点をおいて総合的に述べることから始めることにしよう。

11 松代地震断層帯のヘリウム・スポット

昭和40年から同42年 (1965~1967) にまたがる長野県松代群発地震 (swarm earthquakes) についてはまだ鮮やかな記憶をもっておられる読者も少なくないと思う。この地方の地質と地震にかかわる断層については多くの報告 (松田 1970; MORIMOTO et al., 1967; NAKAMURA & TSUNEISHI 1966 1967; 沢村ほか4名 1967; TSUNEISHI & NAKAMURA 1970など) がある。そのうち昭和41年の地震に伴う断層帯上の土壌ガスに脇田ほか5名

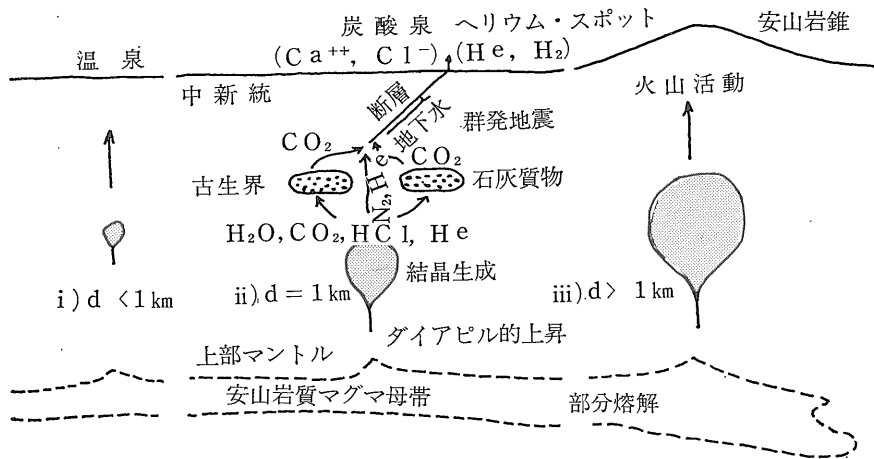


図7
 上部マントル起源のマグマのダイアピルの上昇とそれに伴うヘリウム・スポット形成の模式図 (WAKITA et al., 1987)
 マグマの規模によりそれに伴う現象が異なる。
 i) 直径 (d) < 1km
 温泉などの局部的なもの
 ii) 同 (d) = 1km
 群発地震
 iii) 同 (d) > 1km
 火山活動

(1978) はヘリウムが濃集されているところのあることを発見し(図7) これをヘリウム・スポット (Helium spots) と名づけ その起原を上部マントルに由来する上昇注入型マグマ (diapiric magma) に求めた。その根拠に使われているのがヘリウム-3で ヘリウム・スポットにおけるヘリウムの濃度は 350vpm (容量百万分率) という高いものまであり その $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は $(8.90 \pm 31) \times 10^{-8}$ であるという。

まず NAKAMURA & TSUNEISHI(1966) は 昭和41年6月までの調査結果に基づいて 地割りによるとは考えられない地割れの分布およびその変位方向などから 基盤岩中に潜在する北西-南東方向の地震断層を皆神山北東方に推定した。これが松代地表断層帯の研究の発端である。彼等によれば その後の諸観測・観察の結果は ますます潜在断層帯の存在を確実なものにしたという。そして第2報 (中村・恒石 1967) では断層帯の

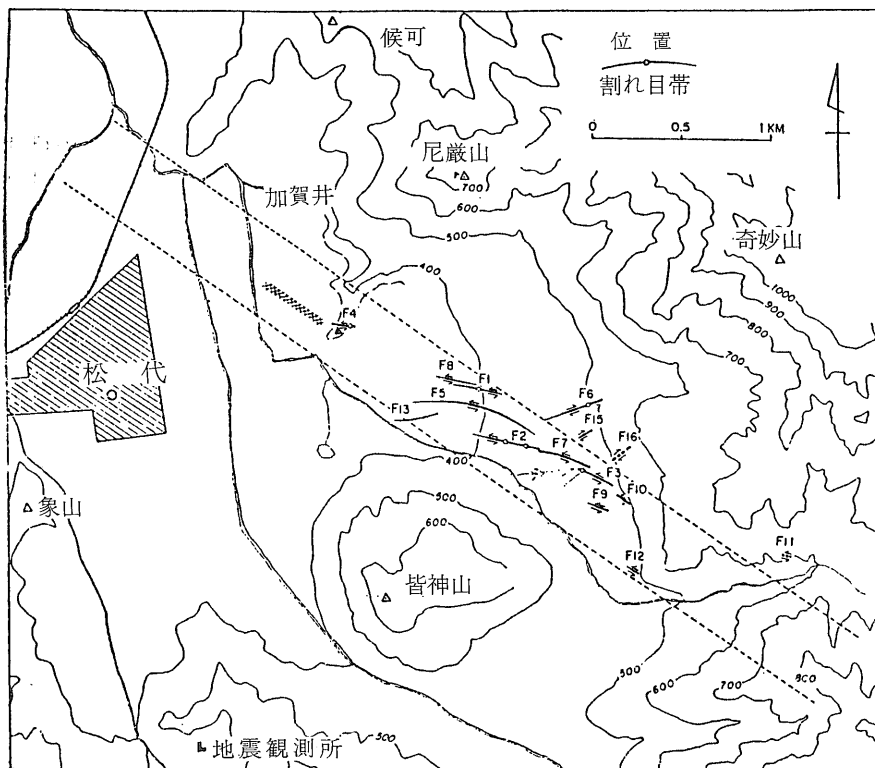


図8
 地下の断層によって生じた割れ目帯と変位測点個所 (TSUNEISHI & NAKAMURA 1970)

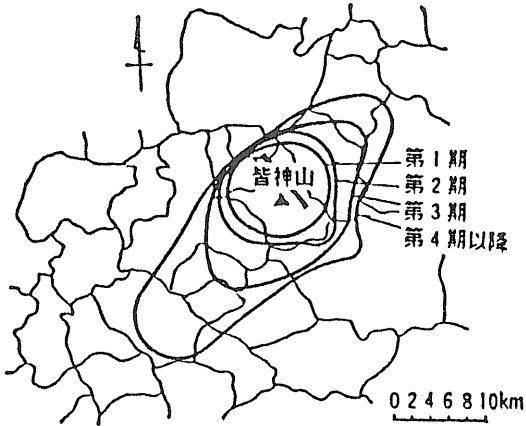


図9 松代群発地震の震央域の拡大 (萩原ほか 中村 1971)

形や方向が確定され かつ断層は全体としてはドーム状に隆起する地域内において 北東側が相対的に10~20 cm 落ちていると推定されている. 第3報(TSUNEISHI & NAKAMURA 1970) はいわば総合報告で 松代断層帯は既存の断層が再動したのではなく 地震に伴って新たに形成されたものであり 長さ比べて大きな幅をもち(図8) 震源が北東方向にのびる地質構造に支配されて分布している(図9・10)にも拘らず 断層帯は地

質構造を横断する方向に現われており 全体の地震のうち一部しか断層変位に直接関与していないことなどが指摘されている. しかし 多くの地震の発震機構は東西に主圧力方向に向けた四象限型であり その節線の1つと断層の方向との一致にみられるように 地震を起した応力配置と断層帯を形成したそれとは等しく またその応力配置は中部日本に共通しており 松代地震が群発型であるという特殊性をもちながらも 全体的な応力場に支配されていることがわかってしまう. ともかく ヘリウム・スポットはこのような性格の断層帯の中に見出されたのである.

一方 松田(1967)の地質図には NAKAMURA & TSUNEISHI (1966 1967) および TSUNEISHI & NAKAMURA (1970) の断層帯推定の基礎となった沖積層中を雁行する割れ目が記入されており かつ推定断層帯の北東側をほぼ並走する断層が記入されている(図11). この断層は中新世の角閃岩および閃緑岩を切っており 新しい断層帯もこれらを切っているものと思われる. いずれにしてもこの地震断層帯は古典的な地質調査の手法では発見できなかったものであり それのみに頼りがちな地質学的解釈の危険性に関する認識を新たにさせられる.

この断層帯上の土壌ガスには ヘリウムが空気中の場合(5.2vpm)よりはるかに濃集されているが 断層帯外の土壌ガスのそれは後者と同じである. 観測された最高濃度は 約350vpmであるが ヘリウムは断層帯の全域に均一に分布しているのではなく およそ50m×30m程度の面積をもつ“ヘリウム・スポット”においてのみ濃集されている.

水田に水のはたはる時期にはヘリウム・スポットでは気泡がみられ その出ているところの数は1スポット当りおよそ200~300である. ガスの産出レートは活動的な流出孔では1分間に100ml また普通の流出孔では同じく10ml 程度である. ガスの主成分は窒素で 約20%の二酸化炭素を伴なう. もよりの二酸化炭素泉ではおよそ93%が二酸化炭素で 7%の窒素を伴なう. 微量成分であるヘリウムは窒素に富むガスでは350vpmも含まれている例があるが 二酸化炭素に富むガスでは5vpmほどである.

ヘリウム・スポットの面積から それから1秒間に放出されるガスは約50 ml であり またヘリウム濃度を350

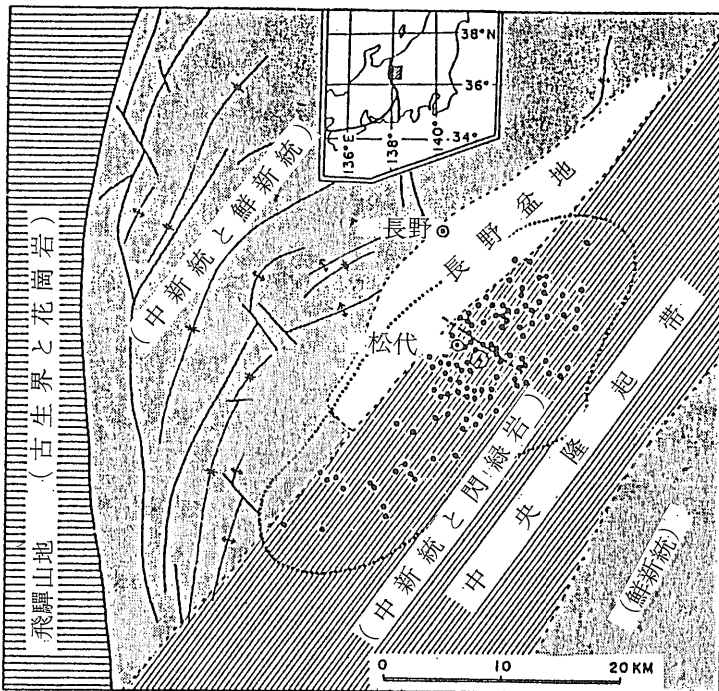


図10 松代付近の地質概要と震央域 (TSUNEISHI & NAKAMURA 1970)

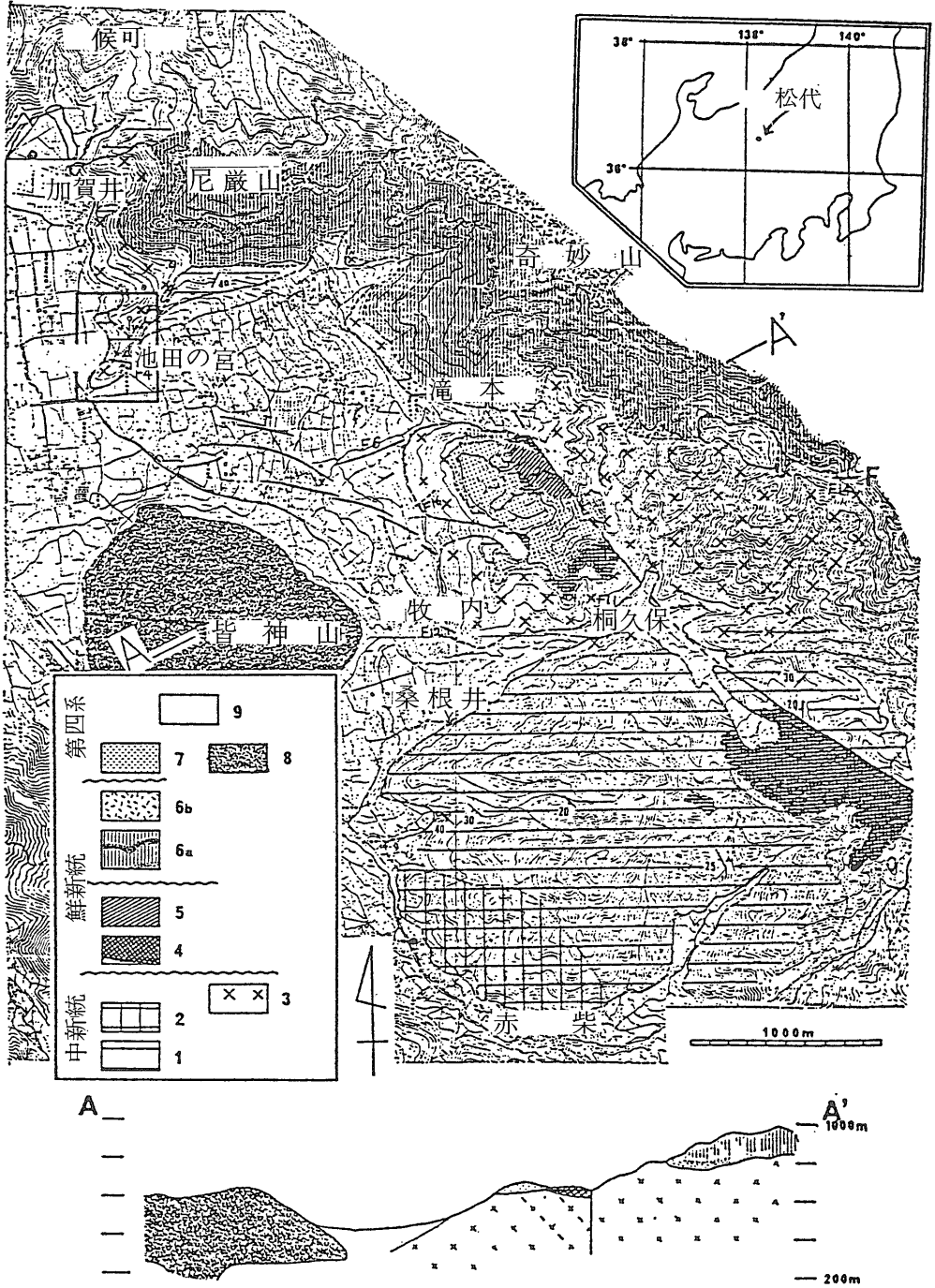


図11 長野市松代町東部の地質図(松田 1967)

1. 海成泥岩
 2. 輝石安山岩(海底熔岩)
 3. 角閃玢岩および閃緑岩
 4. 保基岳火山岩類(橄欖石玄武岩および輝石安山岩 地上熔岩)
 5. 滝本累層(頁岩および礫岩 淡水堆積物)
 - 6a. 奇妙山火山岩類 下部(ハッチは輝石-紫蘇輝石 安山岩熔岩 粗い点は熔結凝灰岩および集塊岩 細い点は凝灰角礫岩)
 - 6b. 奇妙山火山岩類 上部(輝石-角閃石安山岩の熔結火砕流堆積物)
 7. 牧内火山角礫岩(大部分奇妙山火山岩類に由来する)
 8. 皆神山熔岩(含角閃石輝石-紫蘇輝石安山岩)
 9. 沖積堆積物(大部分扇状地堆積物 古地こり堆積物で 土壌に覆われる)
- 沖積地区において雁行状に並んだ太い線は 1966年に現われた地震による割れ目を示す

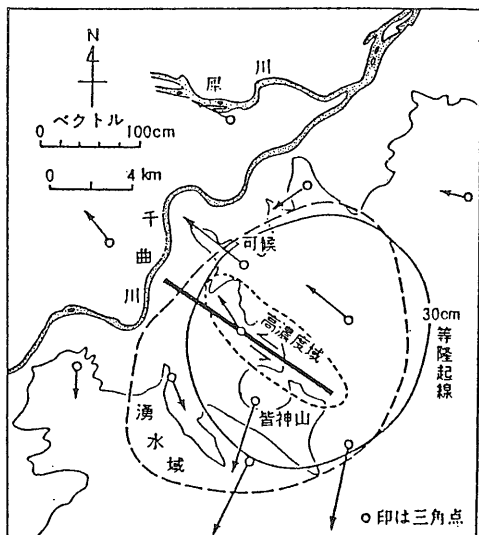


図12 1966年までの水平変動 30cm等隆起線と9月の湧水域・高濃度水湧水域 (中村 1971)

vpm とすると ヘリウム量はおよそ 3×10^{10} 原子/cm²/sec と計算される。標準状態の気体 1 cm³ は 2.706×10^{19} 分子を含むから これはおよそ 1.109×10^{-9} cm³/cm²/sec であり 0.9578 cm³/m²/日である。すなわち 1 m² から 1 日に 1 cm³ 弱のヘリウムが放出されていることになる。

ヘリウム・スポットおよび二酸化炭素泉から得られたガスに関する ³He/⁴He 比は それぞれ $(8.90 \pm 0.31) \times 10^{-6}$ および $(8.87 \pm 0.55) \times 10^{-6}$ で ほとんど同じである。この比は空気に関するものの約 6 倍もあり 千島列島の火山・温泉ガスや カムチャッカおよび南極のマントル起原の超苦鉄質捕獲岩のものに近いという。マントルから導かれた始原ヘリウムがあることは 太平洋や大西

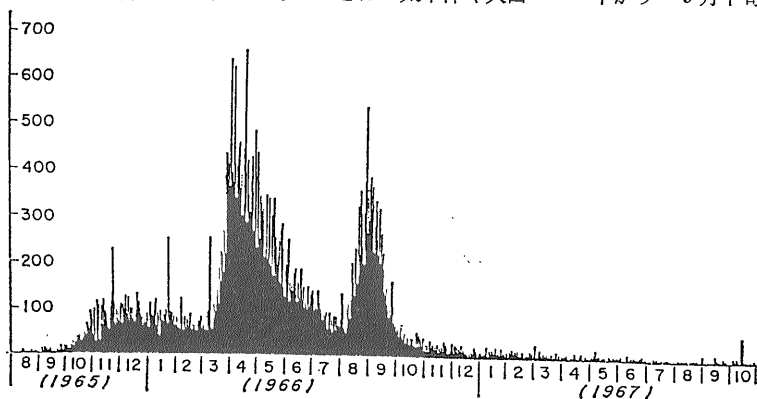


図13 松代地震観測所において感知された有感地震数の推移 (TSUNESHISHI & NAKAMURA 1970)

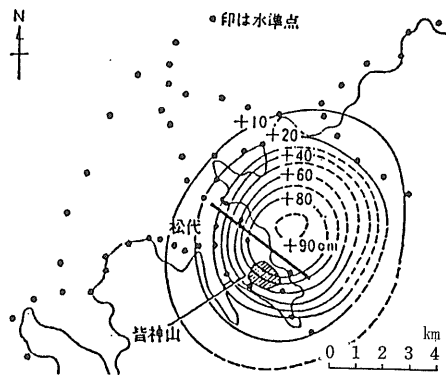


図14 松代地震震央域中央部の隆起 (1966年9月まで) (中村 1971)

洋の海嶺に由来するソレイアイトの硝子質の縁辺部 キラウエア火山の噴気孔ガス および紅海の塩水について明らかである (WAKITA et al., 1978).

ヘリウム・スポット以外にも 松代群発地震にかかわる著しい現象があった。中でも著しかったのは大量の高濃度地下水の噴出である。その噴出地点は北西から南東に走る断層帯と一致し およそ長さ 5 km 幅 1 km の範囲に限られている (図12)。この範囲のおよそ70箇所から合計 10⁷m³ もの地下水が噴出したと推測されている。ある個所では噴出レートは1分間に 12m³ もあったと昭和41年の暮に記録されている。

本地震の震源密集地域は群発地震が始まる (図13) までは著しい隆起域であった (図14)。ところが 昭和41年9月上旬にピークを迎えた第3期の地震活動のあとを受けて 中旬には震央域の中央部の最大隆起域から面的な地下水噴出が起った。この噴出を境として 隆起域は沈降を始めた。また 水漬けになった山腹は強度が下がり 9月下旬から10月上旬にかけて 湧水域内で大小の地すべりが発生している。中村 (1971) によれば 沈下は昭和42年以降も僅かに進行しており 総沈下量はおよそ 10⁷m³ とみられ 湧水量に等しい。このようなことから 中村 (1971) は松代群発地震は火山の噴火とよく似ており マグマが演ずる役割りを水が代って演じ これひきがねとなってこの群発地震が起ったのではないかと述べているが 著者もまったく同感である。しかし 直接目につく形で上昇してきたのは地下水であっても その本当の

表2 松代町加賀井地区の温泉ガスの組成 (vol.%)

深 度m	He	O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄
90	0.002	0.24	12.09	87.67	tr.
500	0.002	0.14	5.82	94.04	tr.
	0.006	0.27	12.10	87.42	0.24

(永田・伊藤 1967)

原因はマントル起原のマグマの上昇にあったにちがいない。このようにみえてくるとヘリウム・スポットは周火山現象の1つとしてできたに相違ない。

以上に述べたようなことから WAKITA et al. (1978) ももちろんこのヘリウムの起原を松代群発地震とかかわりがあるものと考えている。この地区のヘリウムの産出レートが高かった場所と時期は群発地震の時空両面での分布と密接な関係があるようである。そのほか地面の隆起 重力変動 断層 地下水流出のような諸現象もヘリウム・スポットと大なり小なり関係がありそうである。

これらの現象のもっともありそうな原因は小さいが浅いマグマの貫入であろう。直径1kmほどのマグマの小塊が上部マントルから分離すると地殻との密度差によってダイアピルのように上昇する。上昇につれ

てマグマの温度が低下すると安山岩質岩の結晶化が始まり H₂O, HCl, CO₂, N₂ および He のような揮発性の物質が放出される。このようなガスの放出は短期間に行われるので上昇注入岩体(ダイアピル)は多数の小岩体からなると思われる。上昇する液状のマグマは局所的な地下水の混入により孔隙圧を増し先在構造応力場において地殻中の地層の有効応力を減ずる。その結果地震が起き地下水は断層から地表に流れ出る。その上昇の途中でマグマから出た塩酸は本地区に伏在すると思われる古生層中の石灰岩のような石灰質物質と反応する。このような可溶成分はCaイオン Clイオンおよび -1 ~ -3 という $\delta^{18}C_{PDB}$ をもった CO₂ を著しく濃集する。ここに PDB は世界的に炭素同位体の標準として使われている Pee Dee ベレムナイトを現わす。これが負であることは PDBより ¹⁸C が少ないことを示す。新しく形成されたCO₂ はもともと炭酸泉から出ているガスを希釈する。地表に至る通路に石灰質物質のない他の通路を通る場合には本来のガスの組成がよく保存されかつヘリウム・スポットができるであろう(図7)というのが 脇田ほか5名(1978)の考え方である。

ダイアピル様マグマが小さく直径が1km以下の場合には温泉のような局所的な地熱現象ができるだけで

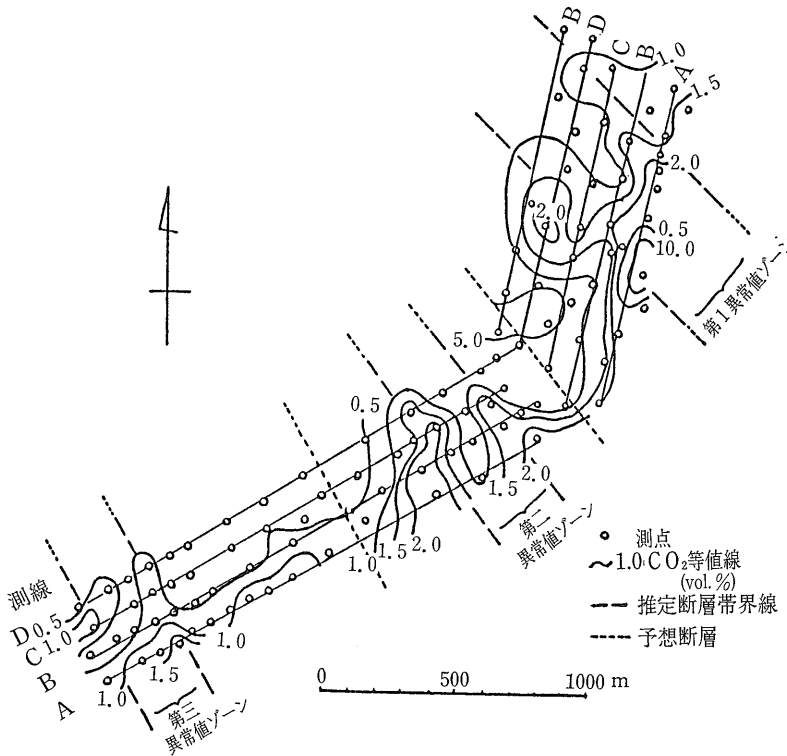


図15 長野市松代町千曲川右岸における地化学探査測点と土壌ガス CO₂ 等値線 (永田・伊藤 1969).

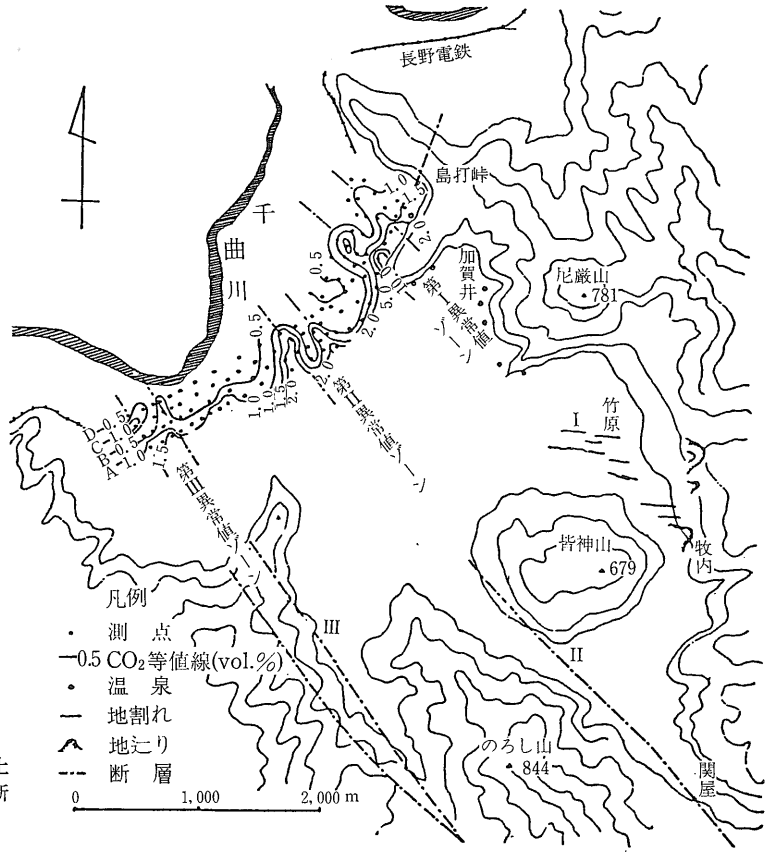


図16 長野市松代町北西部における土壌ガス中のCO₂濃度等値線と断層帯 (永田・伊藤 1969).

あろう。他方 その容積が十分大きい (たとえば直径1 km以上) と 噴火に至るであろう。ダイアビル様マグマの直径が1 km というのは 群発地震を起すのに手ごろの大きさのようである。

松代はもともと日本でも有数の二酸化炭素産地であり長野市が(株)富士ボーリングに依頼して調査したところによれば 昭和51年(1976)当時 5坑井から1日当り4,000m³以上の二酸化炭素が産出していた。このほかに現場の状況がガスの計量に適していない坑井もあるので 松代から産出している二酸化炭素は おそらく1日当り数1,000Nm³を下らないと思われる。これは函館市の湯の川温泉に匹敵する湧出量である。昭和51年私どもは長野県から依頼された受託調査の一環として松代地区の7坑井について調査したが 100万分台のヘリウムを含むガスを見出し得なかった。しかし 昭和41年(1966)に本地震地域の地化学探査を行った 永田・伊藤(1967)は加賀井地区の3坑井のガスについて 表2に示すような興味ある分析結果を発表している。このように3坑井のガスは0.002~0.006vol.%のヘリウムを含むが これは日本の天然ガスとしてはむしろ多い方である。しかし10年後の昭和51年(1976)の調査ではす

でに100万分台では検出できなくなっていたのである。なお これら3坑井のうち一陽館のものを除く2坑井は恒石・中村(1970)が示した断層帯(図8)の中に入っているようである。

ところで 脇田ほか5名(1978)の論文が発表されるより11年も前に 永田・伊藤(1967)は松代地震断層帯の一部を地化学探鉱の手法によってつかんでいた。彼等も土壌ガス法を使っているが 指標には二酸化炭素が採用されている。この年の彼等の調査は図15の測線Aだけについて行われ 3条の二酸化炭素異常値ゾーンのあることが明らかにされた。しかし 1本の測線では異常値ゾーンの方向がわからないので 後年彼等は測線を4本または5本にして再調査した(永田・伊藤 1969)。その結果 3条の異常値ゾーンは 図15 および図16に示したように 北西-南東方向に並走しているらしいことが知られるに至った。図16に TSUNEISHI & NAKAMURA (1970)が断層帯を想定した根拠となった地割れが記入されている。永田・伊藤(1969)の第I異常ゾーンはまさに地割れの分布の延長方向にあり 彼等が断層帯の伏在を考えていたことは明らかであろう。

(以下次号)