

# ヘリウム資源問題(その2)

福田 理 (海外地質調査協力室) ・ 永田 松三 (技術部化学課)  
Osamu FUKUTA Shozo NAGATA

## 10 日本のヘリウム資源

残念ながら日本にはいまのところ資源と呼べるほどのヘリウムはない。それだからこそ日本にとってヘリウムを資源問題としてとり上げなければならないわけであるが以下にその心細い実情を少しくわしく述べておこう。

### 10. 1 資源調査の歴史

日本のヘリウム資源について集中的に調査された最初の例は大正10年(1921)から数年間にわたる東京大学航空研究所によるものである(山田 1922, 1923; 山口・嘉納 1926)。これはもちろん飛行船や浮上用気体としてのヘリウムをねらって行われたものである。この研究によって石川県の片山津(0.308容量%以下容量を略す)和倉(0.272%)福井県の芦原(0.184%)などの北陸地方の温泉群や鳥取県の吉方(0.214%)三朝(0.076%)玉造(0.088%)などの山陰地方の温泉群から産出するガスにヘリウム濃度の比較的大きいものがあることが明らかにされたがガス量そのものは僅かであった。これとは別に東京大学工学部の上床国夫(1927)の火山性の天然ガスすなわち火山・温泉ガスに関する研究結果が公表されているがその中で静岡県の修善寺温泉にも0.037%のヘリウムを含む温泉ガスがあったことが指摘されている。

日本では昭和36年(1961)頃からヘリウムの需要が毎年30%以上の割合で急上昇した。それより前原子炉の台頭によって冷却にヘリウムを使う原子炉の建設が日本でも計画されそれに対応して昭和37年(1962)度から5ヶ年計画でヘリウム資源の全国的調査が地質調査所によって実施された。その結果については牧(1973)および五十嵐・永田(1981)によって要約・報告されている。この5ヶ年計画後にはヘリウムに焦点をしばった組織的な調査・研究は行われていないが私どもは可燃性のものだけを分析していたのでは天然ガスのあり方を把握できないという観点に立って研究を進めているので分析技術の進歩とあいまってヘリウムに関する資料はむしろ急速に増えつつある。

### 10. 2 資源の概要

現在企業としてヘリウムを回収できるのは濃度0.3%までということであるから0.59%のヘリウムを含む天然ガスが発見されているといってもガス量そのものが僅かなので日本にはヘリウム資源といえるようなものは見つかっていないといえるかも知れない。しかし現在のヘリウム生産国の資源が潤渇したり回収技術が進歩したりした際には資源としての価値をもってくる時がないとはいえない。また今後のヘリウム資源対策を考える際の基礎資料としても日本のヘリウム資源のあらましについて知っておくことは必要であろう。

もともと私どもは石油・天然ガスをはじめとする各種の岩層中の流体を地質学的な研究対象として考えかつ扱ってきた。したがって天然ガスであればできるだけ全成分を把握するような分析を実施してきた。そのため地質調査所にはヘリウムを含む天然ガスの多数の分析値が集積されている。そのすべてについて紹介することは紙面が許さないので本稿においては0.01%以上のヘリウムを含む天然ガスについて略述し日本におけるヘリウムのあり方を読みとっていただくことにする。

日本の0.1%以上のヘリウムを含む天然ガスの例はそれほど多くない。その例を一覧表の形で示したのが表9である。またこれを地域別・ガス質別に整理したのが表10である。両表にみられるようにヘリウムに富んだ天然ガスには窒素系のガスが多いしまた地域別には北陸3県および島根県東部に多い。北陸3県の基盤をなしているのは先シルル紀のものとしてよく知られた飛騨變成岩(片麻岩および結晶片岩)でありまた島根県東部には白亜紀後期~古第三紀初期の花崗岩類がひろく分布している。このほかに常磐炭田南部(高萩市)および山形県寒河江市のそれぞれの2ヶ所からヘリウムに富むガスが知られているが前者の基盤をなしているのは白亜紀前期の花崗岩類でありまた後者の周辺のところどころに同様の花崗岩類の分布が知られている。表9の産地のなかで産出量のやや多いのは高萩のGSH-1であるがそれでも1日当り9.16m<sup>3</sup>に過ぎないしこれに次ぐ七尾市の和倉GSH-2では僅か3.7m<sup>3</sup>である。

表9 日本のヘリウムに富む天然ガス (He>0.1vol. %) 一覧

ガス源	所在地	水量(kl/d)	ガス量(m <sup>3</sup> /d)	He	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Ar	地質
黒雞温泉	富山県下新川郡宇奈月町	—	—	0.239	—	0.28	87.70	11.77	0.31	—	花崗岩
山田温泉	〃 婦負郡山田村	0.76	—	0.274	0.000	0.21	99.56	0.02	0.21	0.42	鮮新統
湯谷温泉	〃 東礪波郡庄川町	302	—	0.197	0.000	0.72	97.65	0.01	0.01	0.43	石英粗面岩
片山津温泉	石川県加賀市片山津	811	—	0.258	0.000	0.09	93.95	0.39	5.57	—	洪積層
辰ノ口温泉	〃 能美郡辰ノ口町	540	—	0.185	0.000	0.38	98.90	0.47	0.60	—	〃
湯涌温泉	〃 金沢市湯涌谷	360	—	0.134	0.000	0.83	99.06	0.08	0.03	0.47	緑色凝灰石
和倉温泉3号井	〃 七尾市和倉	—	—	0.493	0.000	0.20	98.43	0.16	0.68	—	〃
〃 2号井	〃 〃 〃	—	—	0.500	0.398	0.10	56.30	0.14	41.00	—	〃
和倉GSH-2	〃 〃 〃	26.8	2.7	0.254	0.756	2.40	95.22	—	tr	0.89	〃
芦原温泉へに屋	福井県坂井郡芦原町	—	—	0.146	—	0.76	90.80	0.45	9.79	—	洪積層
〃 芦原荘	〃 〃 〃	—	—	0.136	—	7.01	92.47	0.21	0.29	—	〃
湖東ホテル <sup>1)</sup>	滋賀県愛知郡愛東町	298	—	0.140	0.000	0.16	81.54	0.05	17.02	1.08	花崗岩
高橋GSH-1	茨城県高萩市高戸部	23.8	9.16	0.224	0.00	0.44	27.10	0.05	72.19	—	古第三系
向洋128号	〃 〃 上滝	—	—	0.59	0.00	2.43	56.46	0.01	40.51	—	〃
上野温泉	山形県寒河江市白石町	41.5	1.3	0.112	0.000	0.04	98.94	0.42	0.49	—	鮮新-中新統
熊野鉱泉	〃 〃 平塩	—	0.0n	0.127	0.000	0.36	96.69	0.54	2.28	—	〃
岩子温泉	栃木県那須郡南那須町	76	—	0.174	0.006	0.90	85.66	0.13	12.20	0.94	中新統
ユースホテル	島根県出雲市立久恵	5.0	0.29	0.209	0.000	0.03	97.22	—	0.54	—	安山岩
尾テキスタイル	〃 八東郡宍道町	19.0	—	0.180	0.000	0.22	97.08	tr	0.10	0.43	花崗岩
松江温泉	島根県松江市	—	—	0.150	0.017	0.33	95.77	0.59	0.90	2.23	安山岩
新松江温泉	〃 〃	—	—	0.125	0.040	0.37	96.74	0.00	0.35	2.41	安山岩
露頭	〃 出雲市立久恵	—	—	0.261	0.000	0.07	97.24	0.00	0.00	2.43	安山岩
フェニックス <sup>2)</sup>	宮崎県東諸県郡高岡町	1.0	0.7	0.111	0.007	0.21	50.83	0.53	47.93	0.36	中新統

1) ほかに0.05%のC<sub>2</sub>H<sub>6</sub>を含む

2) フェニックス国際観光(株)ゴルフ場

●補遺脱稿後、栃木県宇都宮温泉から0.436vol. %のHeを含むN<sub>2</sub>系の温泉ガスが発見された。

表9に含まれる産ガス地の多くは 古くからヘリウムの産地としてよく知られた地域に属するが 本表にはいわば新顔が2つ含まれている。 その1つは栃木県の岩子温泉である。 これは1980年に高野光永氏が南那須町で掘り当てた温泉ガスで 45°Cの温泉はヘルスセンターの源泉として利用されている。 塩素イオンはかなり多く 5,035mg/kgもある。 また 温泉には3.8キュリー (1.04マッヘ)/kgのラドンが含まれているという。 岩子温泉は東隣りの鳥山町を隔てて八溝山地と対峙しており 後者の西半分には 二疊~三疊系を貫く多くの白亜紀後期~古第三紀初期の花崗岩類が知られている。

もう1つは宮崎市にほど近い高岡町浦之名にあるゴルフ場(フェニックス国際観光(株)経営)の雑用水井から出るガスである。 これは宮崎層群綾部層中に掘削された浅井戸で 1日当たり0.7m<sup>3</sup>弱のガスを伴う19.8°Cの水が少量(およそ1kl/日)自噴している。 この水が直接出ている綾部層のガスでは0.111%という濃度のヘリウムは望むべくもない。 とにかく これは宮崎県下でもっともヘリウム濃度の高いガスであって よほど特殊な地質・地化学条件が揃わない限り その起原の説明は無理である。 首藤(1952)の地質図にはもよりのところに

表10 日本のヘリウムに富む天然ガス(その1 ヘリウム0.1vol. %以上)

地域別	
北陸(富山県 石川県 福井県)	11
島根県東部	5
常磐炭田(茨城県側)	2
山形県寒河江市	2
栃木県那須郡南那須町	1
滋賀県愛知郡愛東町	1
宮崎県東諸県郡高岡町	1
ガス質別	
N <sub>2</sub> 系	16
N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub> 系	5
N <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> 系	1
CH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub> 系	1

断層が記入されており それが基盤からのガスの通路になっているとしても それだけでは不十分であろう。

ヘリウムの濃度を0.01%までひろげると 産ガス地の数は110も増える。 そこでヘリウム濃度が0.01ないし0.1%の全産ガス地を列挙するのをやめ その地域別・ガス質別にまとめて示したのが表11である。 ガス質別

にみるとメタン系のものももっとも多く 次いで窒素系およびメタン-窒素系の順になっている。ところでヘリウム濃度が0.1%以上の場合には 窒素系のものももっとも多く 次いで窒素-メタン系のものとなる。このような事実から 地下深所から出てくるヘリウムに富むガスは 窒素系のもののように思われる。

地域別にみると ここでも常磐炭田および山形県下のものが多い。これら両地域におけるヘリウムを供給したであろう花崗岩類については 先にヘリウム濃度が0.1%の場合について述べておいたとおりである。次いで多いのが鹿児島県であるが 12のうち11は川内市および周辺にある。ただし ガス量そのものは僅かである。この川内川流域の温泉ガス中のヘリウムに関係がありそのような花崗岩類としては 出水山地の紫尾山西方に露出し紫尾花崗閃緑岩と呼ばれているものがある。残りの1つである鹿児島湾北岸の敷根産ガス地のヘリウムの起原は 南方の高隈山を中心に分布する花崗岩類に求められるであろう。これら2つの花崗岩類はともに中新世のものとしてされている。

川内川流域に次いでこの種のガスが多く知られている佐賀平野についてみると その北側の背振山地には 白亜紀後期ないし古第三紀初期の花崗岩類がひろく分布している。次の神奈川県とあるのは 旧川崎ガス田を指す。この地は断層の多いところで それとヘリウムとが無縁とは考えられない。しかし ヘリウムの供給源ということになると いまのところよくわからないというほかない。この神奈川県と匹敵する宮崎県のもの多くは 宮崎・日南両ガス田において宮崎層群の基底砂礫層に由来する。その下には白亜系 古第三系 および先日南中新統があるのだから ヘリウムの起原はこのあたりに求めるのが自然であろう。とはいっても このような堆積岩だけにヘリウムの起原を求めるのは無理のようで これらを買いた花崗岩類のあることが考えられる。実際 熊本県境の市房山や北方の尾鈴山麓には 第三紀中新世の花崗岩類が知られている。同様の花崗岩類に由来すると思われるヘリウムが最近発見されたのが 鹿児島北西部の川内川流域の温泉地で 花崗岩類は出水山地の紫尾山西方に露出し 紫尾花崗閃緑岩として知られている。また 鹿児島湾北岸の敷根産ガス地のガス中のヘリウムの起原も おそらく南方の高隈山を中心に分布する中新世の花崗岩類に求められるであろう。

高知県のは四万十系および秩父帯から産するガスである。前者については愛媛県境の鬼ヶ城山に露出する中新世の花崗岩類との関連が考えられる。また 後者については 黒瀬川構造帯の先シルル紀の花崗岩類

表11 日本のヘリウムに富む天然ガス (その2 ヘリウム0.1 vol. %未満 0.01vol. %以上)

地域別	
常磐炭田 (福島県 茨城県)	36
山形県	15
鹿児島県	12
佐賀県	8
神奈川県	7
宮崎県	7
鳥根県	5
高知県	4
長野県	3
滋賀県	3
三重県	2
沖縄県	2
埼玉県	1
千葉県	1
静岡県	1
奈良県	1
鳥取県	1
愛媛県	1
ガス質別	
CH <sub>4</sub> 系	37
N <sub>2</sub> 系	22
CH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub> 系	21
CH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> 系	11
CH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub> 系	11
N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> 系	5
CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> 系	1
CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> 系	1
N <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> 系	1

(三滝火成岩)との関係も 一応考えておく必要があるであろう。しかし 地表ではみられない花崗岩類との関係というものにわかに否定できそうもない。

県あたりの産ガス地が3件以下のものについては ガス量そのものがのやや多いものだけについて述べることにしよう。琵琶湖周辺は古くからヘリウムに富むガスの多いところとして知られているが ここでややまとまったガス量が知られているのは いずれも守山市内の深井戸であり かつガス質はメタン-窒素系である。ヘリウムの起原は琵琶湖の周辺にひろく分布する白亜紀後期ないし古第三紀初期の花崗岩類に求められそうである。ガスはいずれも古琵琶湖層群の基底に近いところから採取されている。これらは日本では数少ないまとまったガス量が知られている例なので その概要をまとめて表12として示しておく。

表12 琵琶湖周辺のヘリウムに富む天然ガス (He>0.01vol.%)

所在地	愛東町	守山市		守山市	守山市
坑井	湖東ホテル	レイク・ビワ		リゾート・クラブ	湖南開発
深度(m)	700	707	/	880	945
地質	花崗岩	古琵琶湖		古琵琶湖	古琵琶湖
水温(°C)	29.8	35.0		31.5	33.5
ガス(Nm <sup>3</sup> /d)	微量	21.4		相当量	相当量
水(Kl/d)	298	324		75	121
ガス(vol.%)			補正值		
He	0.140	0.034	0.036	0.014	0.013
H <sub>2</sub>	0.000	0.001	0.0011	0.000	0.000
O <sub>2</sub>	0.16	1.43	0.00	0.28	0.18
N <sub>2</sub>	81.54	28.19	24.50	21.63	19.62
Ar	1.08	0.26	0.279	0.31	0.35
CO <sub>2</sub>	0.05	1.82	1.95	3.48	4.62
CH <sub>4</sub>	17.02	68.28	73.23	74.28	75.12
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.005	0.006	0.0064	0.004	0.006
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
付随水(mg/l)			/		
pH	>8.4	7.3		7.1	7.0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	51	397		366	350
f.CO <sub>2</sub>	14	24		50	60
Cl <sup>-</sup>	67	383		177	74
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.26	11.6		12.1	8.4

(分析 永田松三)

次の沖縄県の2例も注目される。その1つは星砂で有名な竹富島東沖約3kmの海中ガス徴でガス量は目測で50m<sup>3</sup>/日程度と判断される。ガス質はメタン-窒素系である。ガス徴は竹富島のほぼ中央を東西に走る断層の延長上にあるが数ヶ所あるガスの出ているところは体温以上の温度が感じられかつ硫黄臭もあるということであるからこのガスが温泉ないし火山ガスとしての一面をもっていることも確かであろう。一方ガス中のメタンは古生層中の粘板岩または千枚岩に由来するものであろう。もよりの花崗岩としては石垣島に中新世のものが知られている。

もう1つは沖縄県2号試験井のガスである。これは島尻層群の基底粗粒層(T<sub>11</sub>部層)に由来するガスであるが沖縄本島の四万十累層群相当層(国頭層群)に由来するガスよりもヘリウムに富む点でも注目される。国頭層群の分布範囲にはこれを貫く玢岩類はあるが花崗岩類は知られていない。しかしこのガス中のヘリウムは0.028%という沖縄島の国頭層群に直接由来するガス中のものより多く竹富島沖の0.033~0.04%に次ぐ値を示す。これを本土のものとの比較においてみても花崗岩類の存在を考慮しない限り無理な値である。最近の地質図の中には国頭郡恩納村北東部にかなり大き

な中新世の花崗斑岩類を描出しているものもある。本坑井のガスのうち主成分のメタンは国頭層群中の粘板岩類および島尻層群の泥質層(とくにT<sub>10</sub>部層)から窒素は同層群および上記花崗斑岩類からそしてヘリウムはこの花崗斑岩類から供給されたものであろうが地下ではそれが花崗岩類で代表されていることも十分考えられる。

最近発見されたヘリウムに富む天然ガスの中で注目されるのは日本天然ガス興業(株)が千葉県流山市において掘り当てたものである。同社はこの流山市で掘削した坑井に対して流山NP-1という名を与えておりそれについて突込んだ調査を実施された。その結果には学術的にも価値のあるものが多数含まれる。ここでは同社のご好意に甘えてそのうちヘリウムに関する部分を紹介しておく。掘削深度1,525mの本坑井からはメタンを主成分とする天然ガスを含んだ地下水が自噴するが表13にみられるように稼動中に深度別に採取した地下水中の天然ガスに含まれているヘリウムの割合が下位ほど多くなっている。窒素の割合もこれと平行した変化を示す。これから地下深所からヘリウムに富んだ窒素系の天然ガスが上昇してきていることが想定される。

表13 流山NP-1の深度別ガス組成と水質 (試・資料提供 日本天然ガス興業株式会社)

方法	自 噴							リ フ ト						
	坑 口		1100		1200	1325	1425	1475	坑口	1100	1200	1325	1425	1475
ガス(vol. %)		補正值		補正值										
He	0.017	0.035	0.037	0.039	0.051	0.053	0.054	0.061	0.034	0.038	0.046	0.058	0.070	
H <sub>2</sub>	0.008	0.016	0.010	0.011	0.016	0.000	0.002	0.000	0.008	0.006	0.007	0.006	0.035	
O <sub>2</sub>	10.63	0	1.14	0	0.35	0.19	0.15	0.17	0.15	0.12	0.15	0.32	0.71	
N <sub>2</sub>	41.91	4.64	9.89	5.93	9.68	12.52	14.49	16.41	7.15	7.31	12.15	15.25	29.44	
CO <sub>2</sub>	0.45	0.91	0.68	0.72	0.71	0.44	0.43	0.47	0.82	0.55	0.51	0.51	0.39	
Ar	0.53	0.06	0.099	0.048	0.093	0.100	0.117	0.121	0.067	0.072	0.097	0.126	0.209	
CH <sub>4</sub>	46.46	94.32	88.15	93.23	89.08	86.68	84.76	82.76	91.74	91.88	87.02	83.72	69.13	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.010	0.020	0.021	0.022	0.021	0.014	0.010	0.010	0.024	0.026	0.017	0.012	0.010	
付随水 pH <sup>(mg/l)</sup>														
Cl <sup>-</sup>	13000		12800		13100	14300	14400	14600	12300	12300	12700	14400	14800	14900
Br <sup>-</sup>	49.2		47.4		48.1	51.5	51.7	52.6	45.4	46.3	46.8	53.0	52.0	53.6
I <sup>-</sup>	10.9		10.5		11.8	10.2	11.4	11.4	11.8	12.5	13.1	9.4	13.6	12.5
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	244		244		224	168	181	168	—	292	274	168	177	171
BO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	150		145		159	86	83	60	164	148	146	83	97	58
K <sup>+</sup>	67		67		67	67	67	71	63	62	63	63	65	67
Na <sup>+</sup>	7300		7200		7300	7900	8000	8000	6400	6400	6700	7600	7700	7800
Ca <sup>2+</sup>	475		475		470	585	610	660	430	430	440	590	635	685
Mg <sup>2+</sup>	158		155		155	185	190	183	170	170	160	195	195	190
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	11.4		—		—	—	—	—	11.9	—	—	—	—	—
Total Fe	1.8		—		—	—	—	—	2.0	—	—	—	—	—

(分析 永田松三・中沢博幸)

流山NP-1は深度1,475mで基盤に入っているがそれは堅硬なシルト岩および砂岩からなっており花崗岩類ではない。しかし坑底付近で0.070%坑口でも0.035%も含まれているヘリウムは他の実例からみて花崗岩類なしでは考えられない。もよりの筑波山付近をみると白亜紀前期の花崗岩類があり地下ではその根がひろがり流山市付近にまで及んでいるのであろう。すでに述べたように栃木県南那須町岩子温泉の温泉ガス中のヘリウムの起原は八溝山地の白亜紀後期～古第三紀の花崗岩類の地下にひろがり求められそうである。筑波山地においてもこの種の花崗岩類が前記の白亜紀前期の花崗岩類の北側にひろく分布しており流山NP-1から産出するヘリウムの起原がむしろこの種の花崗岩に求められることも十分考えられる。

宮崎市郊外の宮崎ガス田からもヘリウムに富む天然ガスが3例知られているがヘリウムの割合は0.014～0.017%で変化幅は僅かである。本ガス田のこれら3例の天然ガスはいずれも鳥尻層群の基底粗粒層に由来しており直接の基盤は広義の四万十層群に属する日南層群である。もよりの花崗岩類としては35kmないし50kmも離れた尾鈴山付近および市房山の中新世の

花崗岩類がある。宮崎ガス田の地下のあまり深くないところにもおそらくこの種の花崗岩類が伏在しているであろう。本ガス田においては現在新坑井が掘削されており本稿が出版される頃には新しい価値ある情報が増えられているであろう。

### 11 ヘリウム鉱床のでき方

かつてヘリウムは実験室で閃ウラン鉱から回収されたこともあるが現在企業的にヘリウムが回収されているのはヘリウムに富む天然ガスだけであるから本稿ではこの種の天然ガス鉱床だけをヘリウム鉱床としてそのでき方について述べることにする。

この問題を考えるに当ってまず想起していただきたいのはヘリウムは漏洩試験に使われるほど逃げ足の早い気体であることである。次に重要なことはヘリウムの生成速度がきわめて小さいことである。すなわち1gのウランおよびトリウムから1cm<sup>3</sup>のヘリウムができるにはそれぞれおよそ862万年および4,115万年もかかる。平均的な花崗岩類には1トン当り3.963gのウランおよび13.45gのトリウムが含まれているからそれから1cm<sup>3</sup>のヘリウムが生成されるにはおよそ68万年もかかることになる。

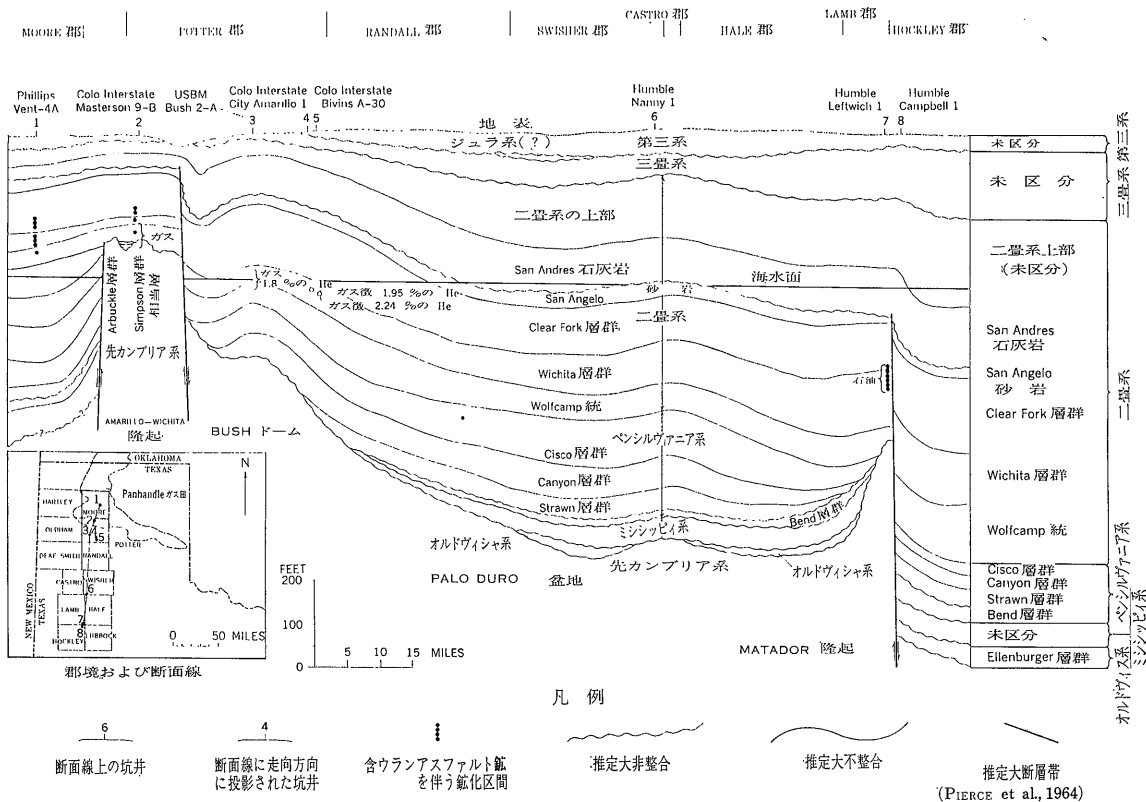


図7 ムーア郡からホックレイ郡に至る地質断面概念図

以上の2つから ヘリウム鉱床が形成されるには次の条件が満たされる必要のあることがわかる。

- 1) 貯留層の年代が古い。
- 2) しっかりした帽岩がある。

これは世界の代表的なヘリウム鉱床であるアメリカの Panhandle ガス田についてみるとよくわかる。

図7は本ガス田南部の断面図 また図8は地質柱状図である。先カンブリア系の基盤岩類は花崗岩 斑岩質流紋岩 および輝緑岩からなっている。試掘の際にもっとも頻繁に出てくるのは流紋岩類である。そして 輝緑岩の岩脈および貫入岩床がこれを貫いている。輝緑岩類はこの地の先カンブリア系の中で一番新しい岩石である。

この上に不整合に重なる企業名 “グラニット・ウォッシュ” (granite wash) は 基盤の先カンブリア系に由来する岩片が固まったもので おもに碎屑質の流紋岩 石英 桃色長石 黒雲母 チタン鉄鉱 および磁鉄鉱からなる。コアでみられるグラニッ

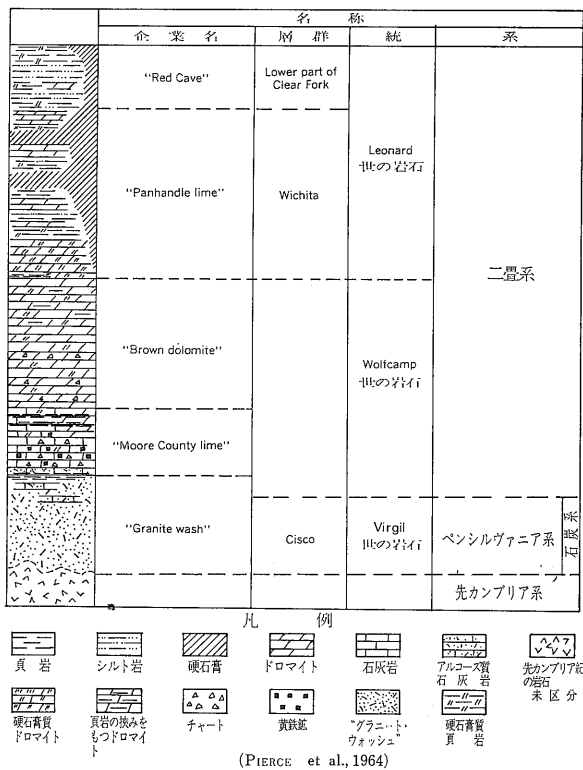


図8 パンハンドルガス田西部の地質柱状概念図

ト・ウォッシュは新鮮で 先カンブリア系と区別し難い。年代はペンシルヴァニア紀から二疊紀初期にまたがる。本ガス田を囲むベイズン側 (図9参照) ではグラニット・ウォッシュは数100mの厚さに達するが 隆起 (図7および図8参照) の冠部では薄く また まったくないところもある。ヘリウムに富むガスはこの冠部のグラニット・ウォッシュおよび先カンブリア系の割れ目からも出ている。

グラニットウォッシュの上に整合に重なっているのが 企業でムーア郡石灰岩 (Moore County lime) と呼んでいる地層で二疊系の最下部を占めている。本石灰岩は白色石灰岩 (White lime) と呼ばれることもある。本石灰岩はおもに淡桃灰色ないし白色の細粒~粗粒の結晶質ではあるが化石に富む石灰岩からなり 上部には多くの帯緑灰色ないし暗灰色の頁岩層が挟まれ また下部のアルコーズ相には赤色頁岩がみられる。本石灰岩中にみられるチャートは白色 灰色 褐色または赤色 滑らかで斑状または針骨状の外観をもっている。また本石灰岩中には小立方体状の黄鉄鉱および少量の白鉄鉱が散布されている。

本石灰岩は隆起の北胴部ではおよそ200フィートの厚さを示すが 冠部に向って薄化し ついには欠除するに至る。本石灰岩も重要なガス層であり また含ウランアスファルト鉱をもつ。

この上に整合に重なるのが企業で“褐色ドロマイト” (Brown dolomite) と呼ばれているドロマイトである。本ドロマイトとその下のムーア郡石灰岩とを合せたものがウォルフカンブ統で 二疊系の下部を代表する。本ドロマイトの色は 少くとも部分的には 2次孔隙に伴なう石油汚染によるものである。コア試験によれば石油は全体の容積のおよそ5%を占める。このドロマイトは本来淡オリーフ灰色または淡褐灰色ないし非常に明るい灰色で 細粒ないし粗粒の結晶からなる。頁岩のはさみ 白色結晶質硬石膏の不規則な形をした包有物 および枕木状のものが本ドロマイトにはみられるほか ときにはチャート帯および灰色の頁岩レンズもある。

褐色ドロマイトのほとんどすべての薄片に 二次的硬石膏および天青石の不規則な斑点および小さい脈がみられる。これらは含ウランアスファルト鉱のかたまりを含むことがある。この多孔質の褐色ドロマイトの模式的な鉱物学的関係を示したのが図10である。このもつ

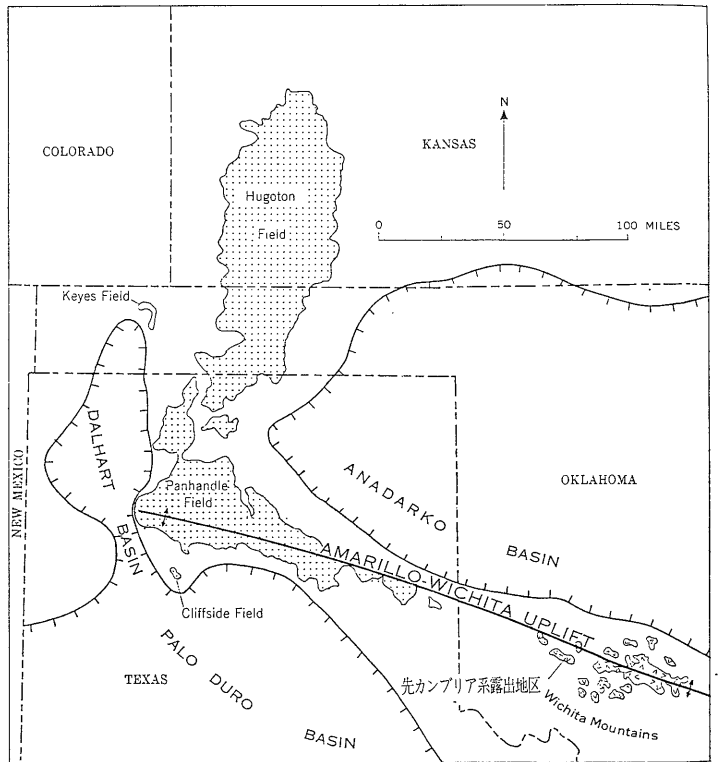


図9 パンハンドルガス田および周辺地質の構造特性 (PIERCE et al. 1964)

とも均一なドロマイトの厚さはおよそ50ないし300フィートで 岩相の水平変化によって変化し かつ構造的に高いところだけに堆積している。また 本ドロマイトは上方に向って緻密な硬石膏質ドロマイトに漸移している。後者は“パンハンドル石灰岩”の基底部にほかならない。

褐色ドロマイトは重要な貯留層である。その孔隙率は図10に示したような結晶質岩石内のこまかい孔隙網によるところが大きい。これに対して 浸透率は後から形成された割れ目によって増加している。本ドロマイトにも含ウランアスファルト鉱が少くない。すなわちヘリウムについていえば 本ドロマイトはガス層であると同時に母層でもある。

この上に整合に重なっているのが 上にも一寸触れた俗称“パンハンドル石灰岩” (Panhandle lime) である。これは公的にはウィチタ層群 (Wichita Group) として知られている。本層群はおもに淡黄褐色ないし淡オリーフ灰色の非顕晶質のドロマイト 淡黄褐色ないし赤味を帯びたシルト岩 栗色および緑色の頁岩 および硬石膏からなる。硬石膏およびドロマイトは多数の含ウランアスファルト小塊を含む。栗色の頁岩の多くは緑色の斑点および緑色のハローで囲まれた小さな含ウランアス

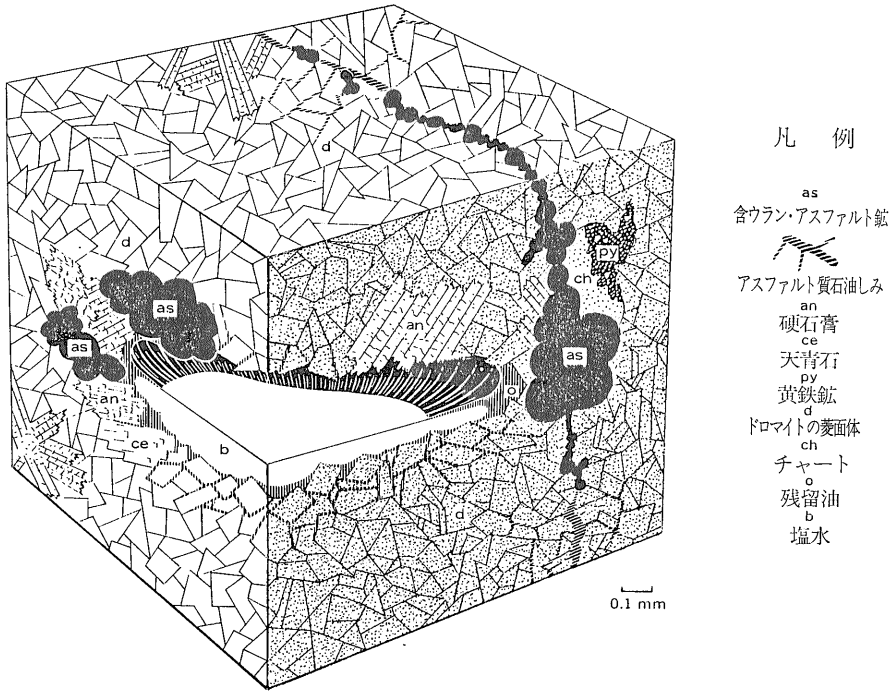


図10 多孔質褐色ドロマイトの模式的構造 (PIERCE et al., 1964)

ファルト鉱塊を含む。

パンハンドル石灰岩の下部は ドロマイト全般にわたって分散分布している硬石膏のために斑状にみえる。硬石膏が大量に集積しているのは普通非顕晶質のドロマイトである。この集積は方向性のないプリズム状の結晶のまわりに放射状に配列された硬石膏の結晶からなる。この硬石膏はドロマイトを置換したものであろう。このような硬石膏質のドロマイトはすぐれた帽岩となり得る。パンハンドル石灰岩の上部およびその上に重なる俗称“レッドケイヴ”の下部は塊状の硬石膏層および頁岩層を含む。この塊状硬石膏層の厚さは10ないし30フィートもあり かつ100平方マイルをこえるひろがりをもつらしい。このような地層の孔隙率および浸透率はきわめて小さく 下位層から供給される気体の散逸を妨げる。

パンハンドル石灰岩の上に整合に重なっているのが俗称“レッド・ケイヴ”(Red cave)である。これは公的にはクリアー・フォーク層群(Clear Fork Group)の下部に当る。俗称は掘削に対する抵抗が少ないところからきている。本層はおもに淡黄色ないし赤色のシルト岩からなり 硬石膏およびドロマイトを挟有する。このシルト岩 とくに硬石膏を伴うものは ぶどう房状の含ウランアスファルト鉱塊を相当量含んでいる。クリアー・フォーク層群全体の厚さは100~170フィート

程度である。

以上に述べたように パンハンドルガス田は含ヘリウムガス田の成立条件を満たしているばかりでなく ガス層がヘリウム母層でもあるという恵まれた条件もあわせて持っている。もちろん ヘリウムは基盤の先カンブリア系からも供給されているであろうし 含ウランアスファルト鉱中のウラン本来の起原も 先カンブリア系にあると思われる。

PIERCEほか(1964)によると パンハンドルガス田および周辺の天然ガス中のヘリウムの濃度は 図11のようになっている。本ガス田の南西部の南にあるクリフサイドガス田(Cliffside Field)は 米国鉱山局が粗製ヘリウム(濃度60~70%)の地下貯蔵に使っているのでよく知られている。図11にみられるように 本ガス田はかつて1.8%ものヘリウムを含む天然ガスがトラップされていたところであり ヘリウムをきわめて通しにくい帽岩があることは 含ヘリウムガス田の存在そのものによって証明されている。

以上のような在来型の含ヘリウムガス鉱床に対して 非在来型の水溶型含ヘリウムガス鉱床の存在を暗示しているのが宮崎ガス田であり 千葉県流山市の日本天然ガス興業(株)NP-1である。両者ともヘリウムを含む天然ガスは地下水に溶解していることは明らかである。このような形の天然ガスは 地下の条件にみあった溶解



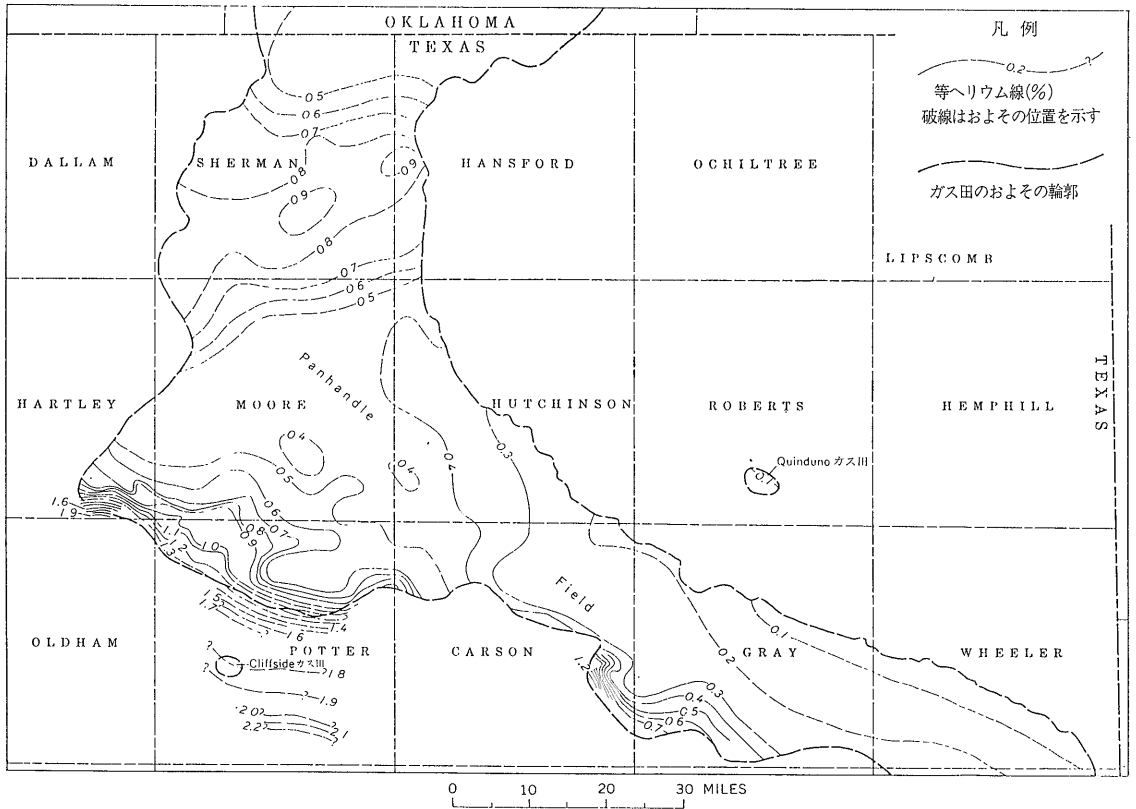


図11 パンハンドルのガス田および周辺地区におけるヘリウムの分布 (PIERCE et al., 1964)

度に達するまでは 帽岩がなくても保存されることは水溶型ガス鉱床成立の原理が教えてくれるところである。ちなみに 気体の分圧が760mmHg (101 325Pa) であるとき 温度 $t^{\circ}\text{C}$ の溶媒 1mlに溶解する気体の容積 (ml) を $0^{\circ}\text{C}$  760mmHg に換算した値を BUNSEN の吸収係数というが 純水に対するヘリウムおよびメタンのそれ ( $\alpha$ ) は表14に示すようになっている。ヘリウムの BUNSEN の吸収係数は メタンを含む一般の気体のように必ずしも温度の上昇とともに漸減していないが  $0^{\circ}\text{C}$  の場合についてみると メタンのそれのおよそ5.73分の1である。しかし 圧力が高くなると 表14にみられるように かなりの溶解度を示すに至り しかも BUNSEN の吸収係数の場合と同様に 温度による変化は僅かである。

このように メタンを主成分とする天然ガスについて水溶型鉱床が成立する以上 ヘリウムについても水溶型鉱床が成立し得るはずである。しかし 実際問題としてヘリウムを主成分とする天然ガスは考えられないからこれは比較的ヘリウムに富む水溶型天然ガス鉱床ということになる。この場合 ヘリウムの生成速度がおそい

ため 孔隙率および浸透率が十分であれば 古い地層ほど有利である。そこで有望視されるのが メキシコ湾岸地域の地圧帯に賦存が確認されている天然ガスである。一般に 地下における天然ガスは静水圧に応じて地下水に溶解しているのであるが 図12に示したように 地圧そのものがきいているのであるから 天然ガスの埋蔵量はきわめて大きく およそ $2,699 \times 10^{12} \text{Nm}^3$ もある (BROWN, 1976) ということである。これは石油換算で $3.716 \times 10^9$  トンという大きなもので 回収率を40%とした場合の世界の石油の究極資源量の8.6倍以上に当たっている。しかも 産ガス層はおもに上部中生界および古第三系であるということだから 常磐炭田程度のヘリウムを含む天然ガスの賦存を考えることは かなり現実的なことであろう。いまヘリウムの濃度を0.025%とすると 空気中の場合の50倍はあるのだから 回収技術の開発はそれほど難しいことではあるまい。

ヘリウムに富む水溶型ガス鉱床の成立に関連して もう1つ考えておかなければならないことがある。それは水中におけるヘリウムの拡散係数 簡単にいえば逃げ足の早さである。これについてはまったく手持ちの資

表14 ヘリウムおよびメタンの水に対する吸収係数( $\alpha$ )  
(カッコ内の数字は測定温度 $^{\circ}\text{C}$ を示す)

温 度 $^{\circ}\text{C}$	He $\alpha \times 10^2$	$\text{CH}_4$ $\alpha \times 10^2$
0	0.97	5.56
10	0.90 (11)	4.18
15	0.89	3.69
20	0.88	3.31
25	0.87	3.01
30	0.86	2.76
40	0.84	2.37
50	0.88 (56)	2.13
60	0.89	1.95
70	0.94	1.83
80		1.77
90		1.74
100		1.70

料がない。しかしヘリウムは原子量が小さくかつ単原子分子であるから同じ条件における拡散係数がメタンのそれよりはるかに大きいことは推測に難くない。しかしヘリウムの拡散係数が同じ条件においてメタンのその100倍あるとしてもそれが鉱床そのものの成立を危うくすることにはならないであろう。何となれば拡散という現象はある溶質をもった物質とそれをまったくもたないかより少ししかもたない物質とが接した場合に始めて起るのでしかもその濃度が等しくなれば自然に止むからである。水溶性ガス鉱床の場合についていうと一般にこれは上り傾斜側から浸入した天水との接触によって起るのであってそれによって鉱床そのものがまったく破壊されてしまった例はない。それは後生的な天然ガスの補給によるところが多くヘリウムについてもそれが十分考えられるのである。

## 12 国産ヘリウムの期待される生産量

すでに述べたことから明らかなように日本のヘリウム資源はまことに乏しいというほかない。しかし今後の対策を考える上からも無理をしてもこの程度しか出せないという実情を認識しておく必要はある。そこでまず考えられるのは常磐炭田の沖に当る磐城沖ガス田である。本ガス田は昭和59年(1984)春から生産を開始することになっており日産量は $120\text{m}^3$ と予定されている(武井 1982)。本ガス田の組成についてはまったく公表されていないがヘリウムの平均濃度を大きく目に見ても0.025%と想定しても1日に産出されるヘリウムの量は $300\text{m}^3$ にしかならない。しかもこの程度の濃度の

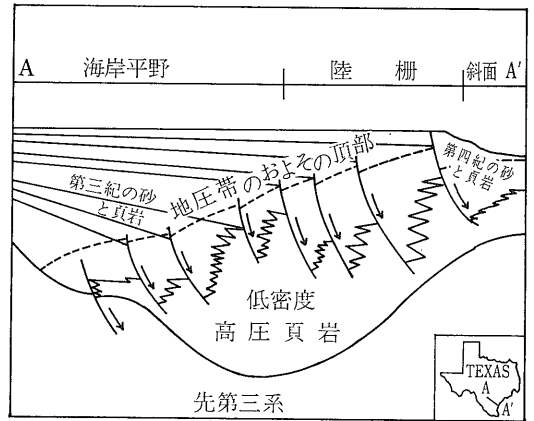


図12 南テキサス海岸を横切る傾斜方向の地質断面図 (大きな新生代のデルタ沈積物中の growth-fault system, およびそれ等と地圧帯のトップとの関係を示す)  
(JONES, 1975)

回収技術はまだ開発されていないのである。

次いで考えられるのは宮崎ガス田である。本ガス田においてはガス量を日産 $3,000\text{m}^3$ とすべく地元企業が試掘中であるが0.020%以上の平均ヘリウム濃度を期待することは困難である。かりにこの濃度を採用してみても産出されるヘリウムの量は1日当たり $0.6\text{m}^3$ にしかならない。これよりヘリウム濃度の高い流山ガス田は発見されているが現在の1坑井から期待できるガス量は無理をしても1日当たり $3,000\text{m}^3$ 止りと思われるのでヘリウム量も1日当たり $1.05\text{m}^3$ 止りということになる。本ガス田については増し掘りの余地がないわけではないが企業として増し掘りが有利かどうかということもありまたヘリウムの面からみると数坑の増し掘りでは問題にならない。

現在日本は年間およそ $200\text{m}^3$ のヘリウムを米国から輸入しその全部を使い切っている。これは1日当たりおよそ $5,500\text{m}^3$ にもなり $300\text{m}^3$ 程度のヘリウムが国産化できたとしても焼け石に水であることに変わりない。しかしそれでも石油よりはるかにましである。

## 13 対 策

ヘリウムは空気から回収するよりも低コストですむ地下資源すなわち天然ガスがある限りそれから回収され続けるであろう。しかし石油や一般の地下資源と異なりヘリウム資源は消費された量だけが減るのではない。すなわちヘリウムが回収されない状態で使われる天然ガス中のヘリウムも空気中に放散されてしまうのであって現在では回収・利用されるヘリウムよりも未回収のまま逃がしてしまっているヘリウムの方

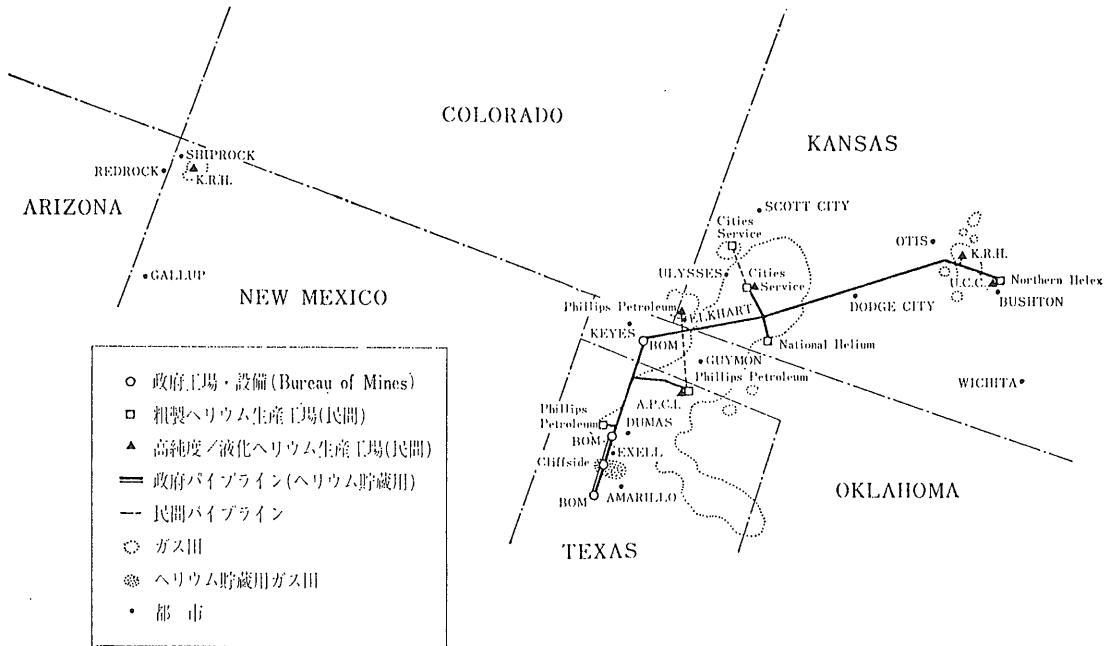


図13 米国のヘリウム工業 (田中 1982)

がはるかに多い。そのためヘリウム資源の枯渇は意外に早く1990年の後半には米国がヘリウムの輸出を止めるだろうという見方もある。その原因の一部が年率7ないし8%といわれるヘリウムの需要増にあることも事実であるがヘリウム資源の枯渇には上に述べたようにほかの資源にはみられない要因があることによるところが大きい。

さてヘリウムはいずれ空気から回収せざるを得なくなるのだからその技術開発をいまのうちからやっておかなければならないのはいうまでもない。これはヘリウム資源のない日本のような国ばかりでなく米国のようなヘリウム資源国にとっても同じである。しかし地下のヘリウム資源の回収が可能な現在においては資源国と無資源国とでは考えられる対策はおのずとちがってくる。

この際一般の方がまずお考えになるのは備蓄である。事実米国ですら13億 $m^3$ というヘリウムを備蓄しているのだから石油備蓄と同様なこの考えが出てくるのは不思議ではない。しかし次のような理由から日本ではヘリウムの備蓄はほとんど不可能である。第1の理由はわれわれが使っているヘリウムは液化ヘリウムという純度の高い状態で輸入されているのでありたとえ地下貯蔵に適したところがあったとしてもわざわざ再び粗製ヘリウムにしてしまうことは得策ではないだろう。米国における地下貯蔵は純度70%程度の粗製ヘリウムを

かつての含ヘリウム天然ガス田クリフサイド・ガス田(Cliffside gas field)に圧入している(図13)のであって出てくる際の純度は60%程度に落ちるといふ。本ガス田に入っていたガスのヘリウム濃度は1.8%ということであるからこのように純度が落ちるのは当然であろう。もともと天然ガスの地下貯蔵というのは漏洩のないことが保障されている枯渇ガス田を利用した例が多い。

ヘリウムの地下貯蔵に際してはヘリウムを通さないような帽岩たとえば硬石膏層が必要になるがわが国には硬石膏層を帽岩とする天然ガス鉱床そのものがない。

次に考えられるのは人工的な容器に貯えることであるが水素以上に漏れやすいヘリウム用の大きなタンクやポンプを作るのは容易なことではない。一般の気体であれば液化して貯蔵するという手もあるのだが液体ヘリウムは粘性をもたず膜流動というやっかいな現象を起すのだからこれも駄目である。

以上のように備蓄が難しいということになると輸入先を分散させるほかない。それには日本人が日本のために世界的規模でヘリウム資源探しをするほかない。その際すでに液化天然ガス(LNG)の製造施設のある付近で探し当てることができれば好都合である。何となればLNG製造の際の廃ガスは原料ガスそのものよりもヘリウムに富んでいるに相違ないからである。メタンの臨界温度が $-126^{\circ}C$ であるのに対してヘリウムのそれは $-269^{\circ}C$ であるからこれは当然の帰結である。

表15 世界各地の天然ガス中のヘリウム濃度 (vol. %)

地 域	ヘリウム
米国	
ニューメキシコ	7.5
テキサス	0.9~1.9
カンサス	1.4
ワイオミング	0.8
アラスカ	0.024
北海	
英国領域	0.05~0.12
ノルウェー領域	0.02
オランダ領域	0.06
アルジェリア	0.17
メキシコ	0.05
ナイジェリア	0.02
ポーランド	0.04
南アフリカ	2.9

(グリーンコ 1983)

パンハンドルガス田のようにヘリウム源貯留層および帽岩のあらゆる点で含ヘリウムガス鉱床の成立に適したところはあまりないであろうがこれに準じたものを採し当てることは不可能でないであろう。現に帽岩の条件の劣る北海ガス田のヘリウム濃度は0.02~0.12であるがもし本ガス田からのヘリウムの回収が可能ということになればわが磐城沖ガス田における回収も夢ではなくなるだろう。そのガス組成の公表がまたれる。

ヘリウム資源を海外に求めるとしてもやはりターゲットをある程度絞る必要があるだろう。この意味で参考になるのがガスレビュー誌No. 44に掲載された表15である。この表には入っていないが地質条件からみて中国本土の四川省をはじめとする各地の諸ガス田や台湾省のものについても見直しが必要であろう。とく

に台湾省のものについては表16のような古典的な資料もある。当時(大正15年頃)は坑井の深度も1,000m未満であったのに対して現在では数1,000mまでの探鉱が行われているのだからかなりの濃度のヘリウムを含んだ天然ガスがすでに発見されているかも知れない。しかも台湾省ではおもなガス田はパイプラインで結ばれておりかつ日産350万m<sup>3</sup>ものガス量があるのだから問題は濃度だけである。

日本の石油の生産量が需要の僅か0.5%程度であることはよく知られている。しかし国内石油資源の探鉱はいくらも変わらず続けられている。それには次の2つの理由があると思われる。1つは僅かではあっても自国資源があることの重要性に根ざすものでありもう1つは石油探鉱・開発技術学校としての役割りであろう。これはヘリウムについても同じであって見通しが暗いからといって国内資源の探鉱・開発をゆるがせにはならない。すでに述べたように鹿児島県下には12件の0.01~0.1%のヘリウムを含む天然ガスが知られているがそのうち11件までが昭和57年度に鹿児島県が地質調査所に依頼して実施した受託調査によって発見されている。このことから明らかなように日本のヘリウム資源そのものの調査・研究もまだまだ必要なのである。

このような心細い現状になってしまった大きな理由の1つにヘリウムの分析上の問題がある。現在天然ガスの分析はおもにガス・クロマトグラフによって行われているがその際一般にキャリアー・ガスとしてヘリウムが使われている。これはそれがヘリウム以外のガスの分析精度の向上に役立つからであるがそれでは必然的にヘリウムそのものの分析値は得られなくなる。ヘリウムを分析しようとするればキャリアー・ガスをとりにかえなければならないがその際一般に使われているのがアルゴンである。またアルゴンの精度のよい分析値を得ようとするればキャリアー・ガスとして酸素を

表16 中国台湾省のヘリウムを含む天然ガス (vol. %)

ガス田	深度 (m)	CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> S	重炭化 水素	O <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub> 貴ガス	He	地 層
六重溪		0.96	0.21	0	0.04	94.32	1.35	3.10	0.006	後竜溪統
六重溪	露頭	1.74	0.42	0.17	0.04	93.05	2.70	1.88	0.002	後竜溪統
凍子脚	露頭	1.70	0.46	0.05	0.08	92.96	1.26	2.40	0.002	後竜溪統
出礦坑		30.57	1.37	0.12	0.12	60.15	3.92	3.75	0.002	後竜溪統
出礦坑	632	31.07	0.54	0.06	0.10	61.53	2.57	3.23	0.006	後竜溪統
錦水	520	0.91	0.15	0.22	0.13	96.83	0	1.76	0.004	錦水統
錦水	818	0.57	0.40	0.14	0.08	90.25	4.16	4.31	0.006	後竜溪統
千秋寮	露頭	1.04	0.26	0.11	0	95.80	1.25	1.54	0.005	後竜溪統

(上床 1927)

使わなければならない。一般の天然ガスの分析におけるキャリアー・ガスとしてヘリウムが賞用されているのはメタン等の一般成分の精度のよい分析値を得るのに役立つからである。このような理由から1台のガスクロマトグラフによって天然ガスの全組成の精度のよい分析を実施するにはキャリアー・ガスのとりかえという案外厄介な仕事が必要になる。そのためか天然ガスの全組成の企業による精度のよい分析例は意外に少ない。

ヘリウム資源の探鉱といってもそれはヘリウムに富む天然ガスの探鉱にほかならない。このような場合ヘリウムの濃度だけに目をつけたのではどのような天然ガスにヘリウムが多いのかということはまったくわからずそれでは発展性がまったく期待できない。あれこれ考えてみると日本におけるヘリウム資源探鉱の第1歩は企業に天然ガスの試料の提出を義務づけ設備のとった国の試験研究機関において精度のよい分析を行うことになりそうである。

## 14 むすび

石油は戦略物資であるといわれるがこの際の戦略物資の意味は戦争に直接使える物資というよりも国際間のとり引きに使える物資という性格が強い。これは米国の穀物の輸出入をめぐる米ソ両国の動きをみているとよくわかる。この場合穀物が戦略物資である。しからば戦略物資たる条件とは何であろうか。以下にそれを列挙してみよう。

- 1) 相手国の生存にとって不可欠である。
- 2) 輸出の停止が自国の経済に響かない。

上の1)は戦略物資としての必要条件であるがこれだけでは十分ではない。これに対して2)は必要条件ではないが十分条件である。さらに必要・十分条件とはいえないが望ましい副条件として次のものが考えられるであろう。

- 3) 備蓄がきかない。

石油や穀物は輸出をストップすると相手国も困るが自国の経済も大きな影響を受ける。ところがヘリウムやレア・メタルは無資源の先進工業国の存在に不可欠な物資であるが消費量そのものが少ないため生産・輸出国にとって輸出の停止が致命傷にはならない。その上ヘリウム備蓄がきわめて困難であるという条件を備えているのだから戦略物資の最たるものである。それだけに日本としてもヘリウム対策が急がれるが本稿が少しでもそのお役に立てば幸せである。

本稿ではほとんど触れなかったがヘリウムについて言及しなければならないことがもう1つある。それは質量数3のヘリウム( $^3\text{He}$ )である。しかし $^3\text{He}$ について述べなければならないことはあまりにも多くかつそのなかには石油・天然ガスに関する見通しを根本的に変えるようなことも含まれているので近く稿を改めてご紹介しようと思う。

ヘリウムの歴史について特記しなければならないことが3つあった。それは1868年のNORMAN LOCKYER卿による太陽大気中のヘリウムの発見1895年のWILLIAM RAMSAY卿による空気中のヘリウムの検出および1905年のH. P. CADY教授による天然ガスからのヘリウムの分離である。米国の代表的なヘリウム企業の1つであるエア・プロダクツ(Air Products)社のパンフレットの表紙(図14)は上記3学者の肖像によって飾られている。1905年12月CADY・McFARLANDの両博士がヘリウムを分離した天然ガスを産出したのは図15に示した米国カンサス州Dexterのガス井でガスは1.84%のヘリウムを含んでいた。それからすでに80年近く経過してしまった現在ヘリウムにとって画期的なことがもうそろそろ起ってもよさそうな予感がする。もしそれがあるとすれば $^3\text{He}$ がらみであろう。すでにその兆しは世界各地でみえ始めている。

本稿を閉じるに当たり数々の貴重な資料の提供を惜しまれなかった日本ヘリウム(株)常務取締役田中聖三氏に心から感謝の意を表す。

## 文 献

- BROWN, W. M., 1976, A Huge New Reserves of Natural Gas Comes within Reach: *Fortune*, October, pp. 21-220.
- COCKETT, A. H. & SMITH, K. C., 1973, The Monatomic Gases: Physical Properties and Production: *Comprehensive Inorganic Chemistry*, Vol. I, pp. 139-211.
- DAVIS, C. L., 1981, Helium: *Mineral Facts and Problems*, 1980 Ed., 10pp.
- 福田 理 1977 沖縄の天然ガスおよび付随・関連資源: 琉球列島の地質学的研究 2巻 121-132頁
- 福田 理ほか24名 1970 第5次沖縄天然ガス資源調査・研究概報: 地質調査所月報 21巻 11号 627-672頁
- グリーコ, 1983, 「ヘリウム」(第1回): *ガスレビュー* No. 44, 13-14頁
- 五十嵐俊雄・永田松三 1981 わが国のヘリウム資源の現況: *新金属工業* 1981年夏期号 109-116頁
- JONES, P. H., 1975, Geothermal and Hydrocarbon Regimes, Northern Gulf of Mexico Basin: *Proc. 1st Symp. Geopressured and Geothermal Resources, Gulf Basin*, pp. 1-116.
- KATZ, D. L., 1968, Source of Helium in Natural Gases

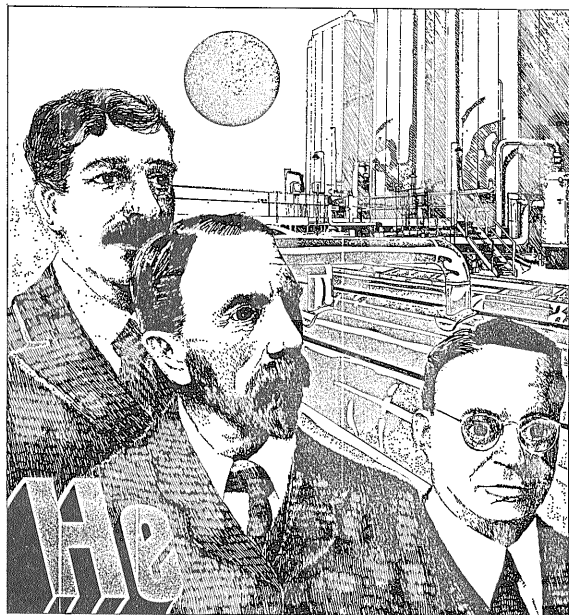


図14 ヘリウム界の3巨星  
 左上より LOCKYER卿 RAMSAY卿 およびCADY教授.  
 LOCKYER卿の右上の円はヘリウムの象徴“太陽”を表  
 わす。(Air Products社)

: *Helium Symposia Proceedings in 1968-A Hundred Years of Helium*, pp. 242-255.

牧 真一 1973 ヘリウムについて: 石油技術協会誌  
 35巻 1号 28-38頁

日本化学会編, 1975, 気体の溶解度: 化学便覧 基礎編 II  
 769-777頁

PIERCE, A. P., et al., 1964, Uranium and Helium in the  
 Panhandle Gas Field, Texas, and Adjacent Areas:  
*Geol. Surv. Prof. Pap.*, 454-G, pp. G1-G57.

首藤次男 1952 官崎層群の地史的な研究: 九州大学理学部研  
 究報告地質学之部 4巻 1号 1-40頁

田中聖三 1979 ヘリウムの利用とその需要: 高圧ガス誌 16  
 巻 2号 59-69頁

田中聖三 1982 ヘリウムの需要と供給——最近の情勢: 低温  
 工学 17巻 5号 283-294頁

武井友也 1982 磐城沖ガス田開発計画: 石油開発時報 54号  
 25-31頁

TULLY & DAVIS, 1981, Helium: *Minerals Yearbook*, 19  
 80, Vol. I, Metals and Minerals, pp. 397-403.

UWATOKO, K., 1927, The Sedimentary Natural Gases  
 from Oil and Coal Fields of Japan, with Special  
 Reference to Their Geologic Occurrence: *Bull. Am  
 er. Assoc. Pet. Geol.*, Vol. 11, no. 2, pp. 187-197.

山田延男 1922 本邦産天然瓦斯中のヘリウム及其他の成分の  
 含量に就て (第一報): 日本化学会誌 43巻 884-897頁

山田延男 1923 本邦産天然瓦斯中のヘリウム及其他の成分の  
 含量に就て (第二報): 日本化学会誌 44巻 1018-1026頁

山口文之助・嘉納吉彦 1926 本邦天然瓦斯中のヘリウム及其  
 他の成分の含量に就て (第三報): 日本化学会誌 47巻13-  
 19頁

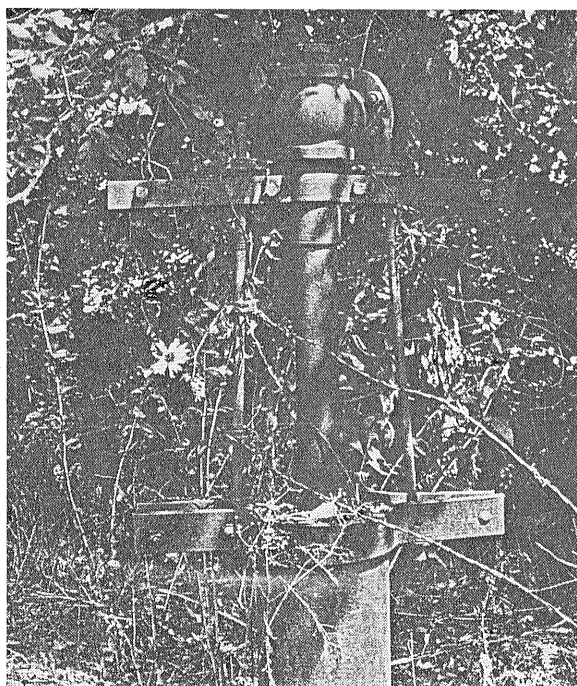


図15 最初のヘリウム井

米国カンサス州 Dexter にあり 1905年12月 CADY  
 および MCFARLAND は 本坑井から産するガスから  
 初めてヘリウムの分離に成功した。(KATZ, 1968)