

# 世界の石油・天然ガス資源と共水性ガス

福田 理 (燃料部)

## 1. ま え が き

本稿は 昭和53年10月30日 所内の研究発表会における著者の講演のうち、岩石物性 および石油・天然ガス鉱床賦存の場の研究に触れた部分を除いて その概要をとりまとめたものである。もともと上記講演の全内容についてまとめるということで 執筆を依頼されたのであるが 除いた2項目の内容は豊富・多彩で それを正確かつ簡潔にまとめることは 筆者の能力をはるかに超えているので 近い将来担当者自身による紹介が行われることを期待し 本稿においてはきわめて重要度の高いこれら2項目については触れないことにさせていただいた。

## 2. 世界の石油資源

世界の石油資源を総括的に論ずる際に準拠すべき資料としては 少し古くなったが 昭和50年(1975)に東京で

開催された第9回世界石油会議で発表されたモービル石油会社の J. D. MOODY の論文(福田 1975; 福田ほか5名 1975; 福田 1978 a) がまず挙げられるであろう。本論文が発表されてからすでに4年近くが経過しているが 本論文はさすがによくまとまっており また MOODY が結論として算出した究極埋蔵量に関する 2,769 億mt (メートル・トン) すなわち 2.03兆 bbl (バレル) という数字は 多くの学者が試算しているにも拘わらず 表1および図1に示されているように 1959年の L. G. WEEKS の試算以来 1,985兆 bbl (2,705億mt) という平均値の上下に分散している。それにしても 2兆bbl(2,729億mt) という WEEKS の推定値は 16年後の2.03兆bbl (2,769億mt) という MOODY の推定値にきわめて近い。

さて 2.03兆bbl (2,769億mt) という MOODY (1975) の究極埋蔵量は 地域別の究極埋蔵量の合計である。また 究極埋蔵量は累計生産量 P+P 埋蔵量 および未発見潜在量の合計であり それから未発見潜在量を除いたもの すなわち累計生産量に P+P 埋蔵量を加えたものが究極可採量である。まずこれ等の用語に与えられた MOODY (1975) による定義について説明しておこう。

累計生産量(cumulative production) は文字どおりある時点までに生産された石油の総量である。 P+P 埋蔵量 (P+P reserves) は確認埋蔵量 (proved reserves) に期待埋蔵量 (prospective reserves) を加えたものである。

表1 世界の石油の究極埋蔵量推定値の推移 (回収率40%の場合)

1942	PRATT, WEEKS and STEBINGER	600
1946	DUCE	400
1946	POGUE	555
1948	WEEKS	610
1949	LEVORSEN	1,500
1949	WEEKS	1,010
1953	MACNAUGHTON	1,000
1956	HUBBERT	1,250
1958	WEEKS	1,500
1959	WEEKS	2,000
1965	HENDRICKS (U.S.G.S.)	2,480
1967	RYMAN (Esso)	2,090
1968	Shell	1,800
1968	WEEKS	2,200
1969	HUBBERT	1,350—2,100
1970	MOODY (Mobil)	1,800
1971	WARMAN (BP)	1,200—2,000
1971	WEEKS	2,290
1972	WARMAN	1,900
1972	BAUQUIS, BRASSEUR and MASSERON (I.F.P.)	1,950
1973	WARMAN (B.P.)	1,915
1975	MOODY	2,030

(単位: 10億バレル)

(WARMAN 1973 に加筆)

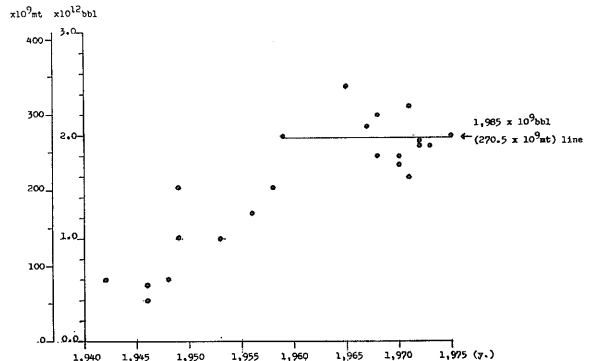


図1 石油の究極可採量の推定値の推移  
注 表1に区間で示されているものについては平均値をとった。また図中の横線は1959年以降の推定値の平均値を示す

表2 世界の石油の地域別の累計生産量と各種の埋蔵量 (1975年当初現在)

地 域	(A)	(B)	(A+B)	(C)	(A+B+C)	(A+B+C) ×0.6/0.4
	累 計 生 産 量	P+P 埋 蔵 量	究 極 可 採 量	未 発 見 潜 在 量	究 極 埋 蔵 量 (回 収 率 40%)	究 極 埋 蔵 量 (回 収 率 60%)
1 ソ連・中国ほか	6.8	17.5	24.3	40.9	65.2	97.8
2 米 国	14.5	7.0	21.5	11.6	33.1	49.65
3 カ ナ ダ	1.0	1.2	2.2	9.6	11.8	17.7
4 中 東	10.6	59.3	69.9	20.5	90.4	135.6
5 北 海	0.1	3.0	3.1	6.1	9.2	13.8
6 西ヨーロッパ	0.3	0.3	0.6	1.6	2.2	3.3
7 北アフリカ	1.9	5.4	7.3	4.5	11.9	17.7
8 ギニア湾	0.7	4.1	4.8	4.1	8.8	13.35
9 その他のアフリカ	—	—	—	1.1	1.1	1.65
10 ラテンアメリカ西北部	4.9	3.4	8.3	4.4	12.7	19.05
11 その他のラテンアメリカ	1.2	1.9	3.1	6.8	9.9	14.85
12 東南アジア	1.2	3.1	4.3	4.4	8.7	13.05
13 その他の極東	0.3	1.0	1.3	7.9	9.2	13.8
14 南 極	—	—	—	2.7	2.7	4.05
世界 の 合 計	43.5	107.2	150.7	126.2	276.3	415.35

(Moony 1975による: 一部修正)

確認埋蔵量が現在の経済・操業条件下で将来回収される合理的確実さのある原油量であるのに対して 期待埋蔵量は予見される技術および現在のコスト/利益関係に近い条件下で回収される合理的確実さをもつ原油量である。そして 既探掘であるが未開発の油層や 確認範囲の延長部の油層中の埋蔵量が期待埋蔵量に入るといことであるから これは確認埋蔵量よりはるかに小さい。たとえば 1975年当初の P+P 埋蔵量が  $786 \times 10^9$  bbl ( $107.2 \times 10^9$  mt) であるのに対して Oil & Journal 誌による確認埋蔵量は  $715.7 \times 10^9$  bbl ( $97.64 \times 10^9$  mt) であるから 期待埋蔵量は  $70.3 \times 10^9$  bbl ( $9.59 \times 10^9$  mt) である。既発見油田に関し 累計生産量と P+P 埋蔵量を加えたものが 究極可採量 (ultimate recovery) である。

確認埋蔵量や期待埋蔵量と対照的なのが未発見潜在量 (undiscovered potential) である。すなわち Moony (1975) によれば 現在と将来の経済的・技術的条件下において 既探鉱・未探鉱両地域でやがて発見されるべき原油量が未発見潜在量である。そして 究極可採量に未発見潜在量を加えたものを究極埋蔵量 (ultimate reserves) と呼ぶ。

以上に紹介した各種の埋蔵量に共通していることは回収できると想定される量だけが対象とされていることである。Moony (1975) は一次回収だけを考慮して 回収率を40%としているが 彼自身もいっているようにこれはかなり大きな回収率で 努力目標といったものが

多分に含まれている。また 海域については深度2,000 mまでが考慮されている。

Moony (1975) の試算の結果をとりまとめて示したのが表2であり またこれを図示したのが図2である。

図2には究極回収率を60%とした場合の究極埋蔵量を示す線も記入されているが 究極回収率を40%とした場合に対する究極埋蔵量の増加分 (図2のD) は凡例からも

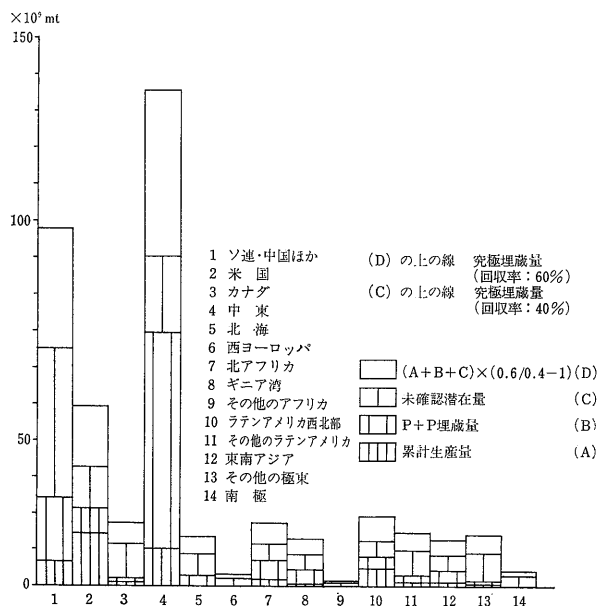


図2 世界の石油の地域別の累計生産量と各種の埋蔵量 (1975年当初現在) 注 表2を図化したもの

わかるように (A+B+C) の半分であることに注意されたい。

- ① ソ連・中国 ほか いわゆる共産圏である。ソ連や中国においては他の諸国において一般に二次・三次回収法とされているもの とくに水攻法を生産当初から適用した方が究極回収率を高めることができるという考え方に立って生産が進められており各種の埋蔵量の算出もこの観点から行われている。したがって Moody がソ連や中国の統計をそのまま採用しているとすれば 累計生産量に P+P 埋蔵量を加えた 1,780 億 bbl (243億mt) という究極可採量は 2/3 の 1,187 億 bbl (162億mt) 程度として考えなければならないかも知れない。何となれば 二次・三次回収までした場合の究極回収率は 60%程度とされているからである。また この場合Dも無意味となる。
- ② 米 国 累計生産量が P+P 埋蔵量を大きく上まわっているのは 米国およびラテンアメリカ北西部だけである。P+P 埋蔵量に未発見潜在量を加えた究極埋蔵量も 累計生産量の 1.28 倍にしかない。未発見潜在量が究極可採量の 53.95%しかないのは 早くから開発が行われ 探鉱も進んでいることを示す。
- ③ カ ナ ダ 探鉱・開発の日が浅い産油国の特徴がみられる。
- ④ 中 東 サウジアラビアを初めとする多くの産油国を擁する中東の底力が読みとれる。とくに P+P 埋蔵量がずば抜けて大きいことは この地域の石油資源の現時点における重要性をよく示している。
- ⑤ 北 海 英国やノルウェーの当事国にとっては 北海の石油資源量は大きいであろうが 究極可採量においてカナダや北アフリカを下まわっており 世界の石油資源に占める地位はそれほど高いとはいえない。
- ⑥ 西ヨーロッパ 問題にならない。
- ⑦ 北アフリカ カナダに次ぐ資源量を示す。
- ⑧ ギニア湾 東南アジアを少し上まわる資源量を示す。

- ⑨ その他のアフリカ 未発見潜在量しか計上されていない。
- ⑩ ラテンアメリカ北西部 開発の歴史の古いベネズエラを含むところから 累計生産量の占める割合が米国に次いで高いが 東南アジアを少し上まわる P+P埋蔵量および未発見潜在量を残している。
- ⑪ その他のラテンアメリカ P+P埋蔵量に未発見潜在量を加えた量においては ラテンアメリカ北西部を少し上まわるが 究極埋蔵量は後者より小さい。
- ⑫ 東南アジア 低硫黄原油の占める割合が大きいが 究極埋蔵量は北海にわずかに及ばない。
- ⑬ その他の極東 P+P埋蔵量に未発見潜在量を加えた量では 北海をわずかに上まわる。
- ⑭ 南 極 西ヨーロッパの究極埋蔵量を少し上まわる未発見潜在量だけが計上されている。

以上の地域別の数値の合計を求めると 次のようになる。

累計生産量(A)	435.0 億 mt
P+P 埋蔵量(B)	1,072.0 億 mt
究極可採量(A+B)	1,507.0 億 mt
未発見潜在量(C)	1,262.0 億 mt
究極埋蔵量(A+B+C)	
究極回収率 40%	2,769.0 億 mt
究極回収率 60%	4,153.5 億 mt

以上を棒グラフで示したのが図3である。

### 3. 石油資源の将来

#### 3.1 R/P からみた見通し

標題の R は埋蔵量 (reserves) のそして P は生産量 (production) の略号である。R として P+P 埋蔵量を取り これを P で割ったものも 1 つの R/P である。R (P+P埋蔵量) として前節で述べた 1,072 億 mt をとり 1974 (昭和49) 年の生産量としてプリティッシュ・ペトロリアム (BP) 社の 28,509 億 mt という値を採用すると R/P は 37.6 である。また R として前節で紹介した 976.4 億 mt という確認埋蔵量をとると R/P は 34.25 となる。もう1年さかのぼって R として1974年当初

の 857 億 mt という確認埋蔵量 (World Oil 誌による) をとり P として 1973 年の 27.591 億 mt という年生産量 (同誌による) をとると R/P は 31.06 となる。石油の寿命をおよそ 30 年とする「一般常識」の出所はこのあたりにある。

### 3.2 正規分布を利用した推定

石油の生産量は今後ある期間に増加し続けるにちがいないし 確認埋蔵量もまた今後ある期間は新油田の発見等によって増え続けるであろうから 石油資源の将来を R/P によって単純に割り切ってしまうことは 実情にそぐわない。そうかといって 石油資源の将来を厳密に考えると 新エネルギーの問題をも包含する全エネルギーの需給の問題という複雑かつ難解のものとなつて とも数学的に扱えない。そこで ある時点までの生産実績をそのままとり かつある埋蔵量を想定し 生産量の推移が誤差の正規分布曲線に相似のものになると仮定して この問題をとらえることがよく行われている。図 4 はその 1 例である。このような曲線は一般に石油生産量のサイクルと呼ばれている。

次に この推定方法を理解していただくために R (埋蔵量 以下同称) として 1975 年当初の Moody (1975) による究極可採量を採用した場合について ややくわしく述べておこう (福田, 1978b)。

年生産量の推移が誤差の正規分布曲線

$$N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (1)$$

の相似曲線となると仮定すると 何かと便利である。このつり鐘型の曲線と x 軸との間の面積 すなわち

$$\int_{-\infty}^{+\infty} N(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (2)$$

は 1 であり これを各種の R と考えることによって どんな R の値の例についても応用できるからである。

この場合 正規確率紙 (arithmetic probability paper) という便利なものが市販されている。これは 横軸に等間隔の x を目盛り 縦軸に E(t) をとり 函数

$$E(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3)$$

の値を目盛ったものである (図 5)。正規確率紙を使うと (1) を積分して得られる函数は (0, 0.5) の点を通る右上りの直線で現わされる。この場合 x 軸上の目盛りは直線の傾斜によってきまるが 逆に目的に応じて見易い目盛りを x 軸上につけておき それによる x のある値に対する E(t) の値を函数表によって求めて 正規確率紙上にプロットし この点と (0, 0.5) の点とを結んでもよい。著者は正規確率紙 2 枚を横にはり合し 太い縦線で示された間隔を 0.2 とした (図 6)。これはただ見易いという理由からである。

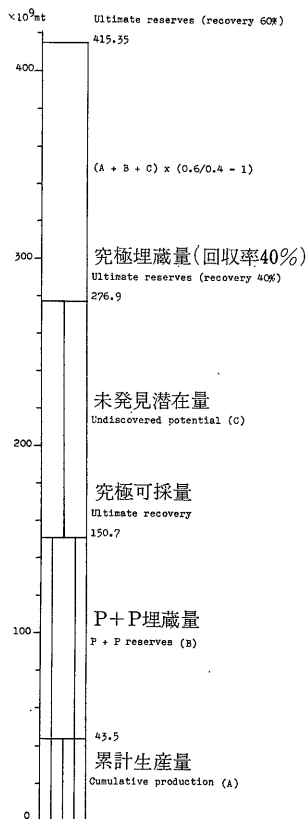


図 3 世界の石油の累計生産量と各種の埋蔵量 (1975 年当初現在)

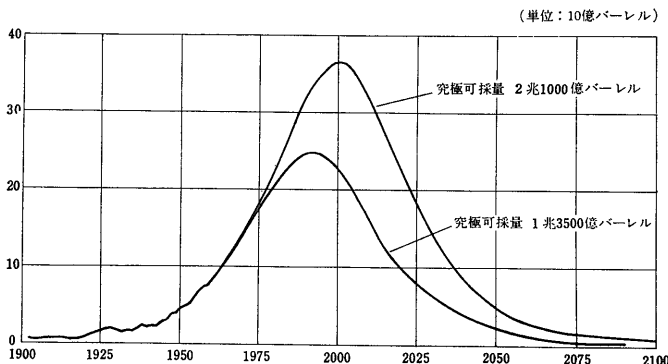


図 4 世界の石油資源と生産のサイクル (サイエンス 1971 年 12 月)

次にこれを具体的に説明しておこう。  $x$  が 2 の場合の(3)式の値を函数表で求めると 0.9772 である。 点 (2, 0.9772) を正規確率紙上で求め この点と点 (0, 0.5) とを結んだ線分を右上および左下に延長すればよいのである。(図6)。 もちろん  $-2$  に対する(3)式の値

$$1 - 0.9772 = 0.0228$$

を使い 点  $(-2, 0.0228)$  を正規確率紙上で求め この点と点 (0, 0.5) とを結んだ線分を左下および右上に延長してもよい。

1975 (昭和50) 年当初までの累計生産量 435 億 mt を究極可採量 1,507 億 mt で割ると 0.2887 となる。 これは究極可採量を 1 とした場合 その中の 0.2887 に相当するものが累計生産量であることを意味する。 これを式で示すと

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 0.2887$$

となる。 函数表には一般に  $x$  が 0 および正の場合しか示されていないから まず

$$1 - 0.2887 = 0.7113$$

に対応する  $u$  を求めると 0.557 である。 したがってこの符号を負にした  $-0.557$  が 0.2887 (1975年当初) に対応する  $u$  である。

次に World Oil 誌によれば 1974 (昭和49) 年の生産量はおよそ 28 億 mt であるから 同年当初までの累計生産量は 407 億 mt で これは 1,507 億 mt を 1 とする

と 0.27 に当る。 上と同様にしてこれに対応する  $u$  を求めると  $-0.613$  である。 これと上に求めた  $-0.557$  との差 0.056 が正規確率紙の横軸の 1 年に当る。 図6の横軸上の年代目盛 (A-A') はこれを使ってつけたものである。

正規確率紙による図6では 一般の読者には何とでもわかりにくいと思うので これを通常の直角座標で示したのが図7である。 本図の横軸の年代目盛は図6のものと同じである。 また図7の右の方には累計生産量の目盛も付しておいた。 この目盛(図のA)のつけ方は簡単で 1 を R (この場合には 1,507 億 mt) として その中を適当に分割すればよい。

また 図7を年生産量の変化に直したのが図8である。 本図を作成するには 先に示した誤差の正規分布に関する(1)式の  $x$  に対応する値を函数表によって順次求め これを直角座標上にプロットした点を滑らかな曲線で結べばよい。 本図の横軸の年代目盛は もちろん図6および図7のものと同じである。 図8の右側には年生産量そのものの目盛も添えられているが その作成方法は次のとおりである。 本図の年代目盛 (A-A') は本来の誤差の正規分布曲線のその

$$1 \div 0.056 = 17.857$$

倍となっている。 また  $x$  軸と曲線との間の面積はもちろん 1,507 億倍となっている。 それ故 1,507 億 mt に誤差の正規分布の式の最大値 0.3989 を乗じたものにさらに 0.056 を乗じて得られる 33.66 億 mt が この場合の最大年生産量である。 そして これに達するのは 1984 (昭和59) 年の後半である。 図8の縦軸の目盛(A)

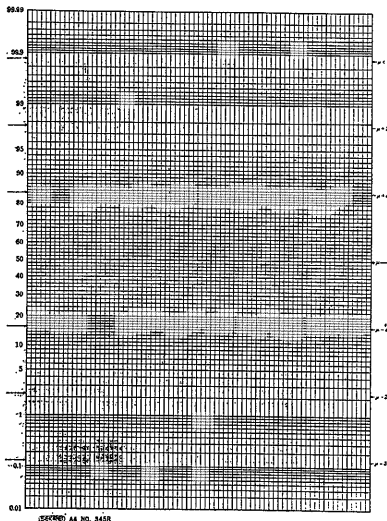


図5 正規確率紙 (arithmetic probability paper) の例 (SEKIREI A4\_No. 345 R)

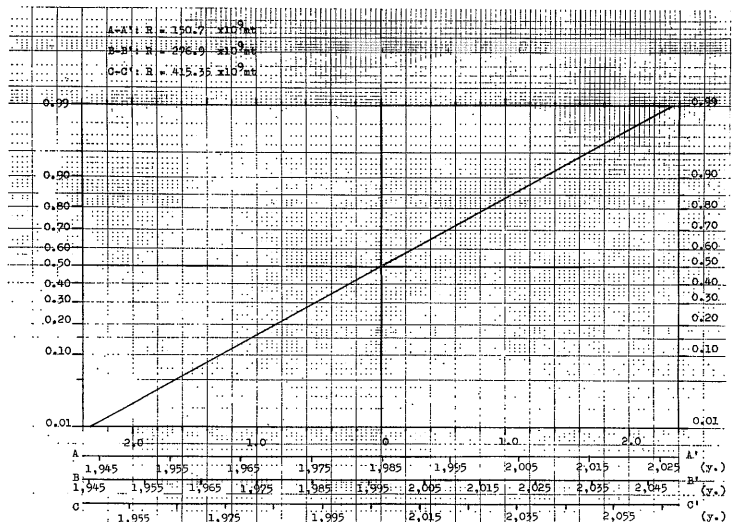


図6 正規確率紙による累計生産量の推移の予測 (各種の究極累計生産量 各種の埋蔵量 R を 1 とした場合)

A, A-A': R = 150.7 x10<sup>9</sup>mt  
 B, B-B': R = 276.9 x10<sup>9</sup>mt  
 C, C-C': R = 415.35 x10<sup>9</sup>mt

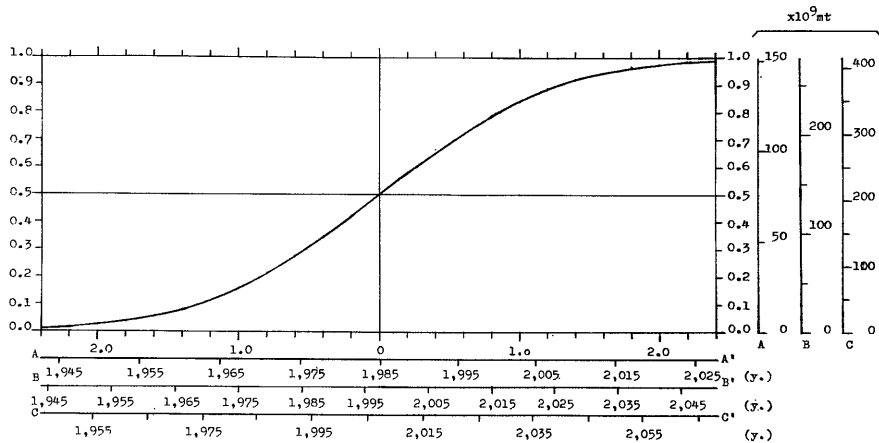


図7 累計生産量の推移の試算例

は 33.66 億 mt が 0.3989 になるようにしてつけたものである。

同様にして R を究極回収率を40%とした場合の究極埋蔵量 2,769 億 mt として作成した目盛が 図6の(B-B') 図7および図8の(B-B')と(B)として添えられている。この場合の年生産量の最大値は 1997(昭和72)年の49.7 億 mt である。また R を究極回収率を60%とした場合の究極埋蔵量 4,153.5 億 mt として作成した目盛が (C-C') および Cとして図6~8に添えられている。この場合の年生産量の最大値は 2007(昭和82) 年前半の 64.62 億 mt である。

recoverable reserves)で 石油の場合の究極可採量に相当するものであろう。わかり易くするために 表3の最低値 141.6×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup> および最高値 433.2×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup> を原油換算すると それぞれ 122.8×10<sup>9</sup>mt および 375.8×10<sup>9</sup>mt となる。すなわち1,228億mt ないし3,758億mt 相当の天然ガスの究極可採埋蔵量が試算されているのに対して Moody(1975) による石油の究極可採量は 1,507 億mt である。一方 Adams と Kirkby(1975)は 1974 (昭和49) 年当初現在の世界各地の天然ガスの確認埋蔵量とその合計について 表4に示すような試算の結果を与

#### 4. 世界の天然ガス資源

世界の天然ガス資源については 同じ第9回世界石油会議において British Petroleum (略してBP) 社のT.D. Adams と BP 開発社の M. A. Kirkby の連名の論文(福田 1975; 福田ほか5名 1975) が発表されている。この論文で扱われているのは もちろん油田ガスおよびいわゆる構造性ガスで 水溶性ガスを含む共水性ガスは入っていない。

世界の天然ガスの埋蔵量が論じられるようになったのは 石油の場合よりずっと後のことである。1956(昭和31)年以後のおもな試算例は表3に示すとおりである。これは究極可採埋蔵量(ultimate

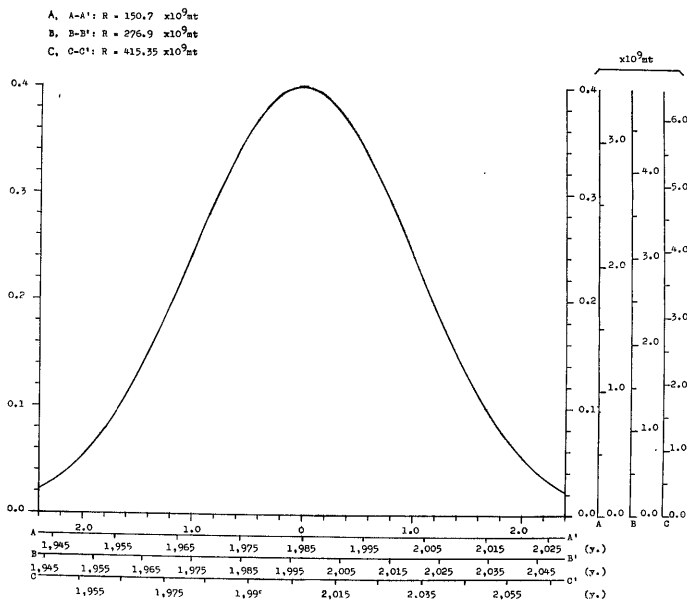


図8 世界の石油資源と年生産量の推移

表 3 世界の天然ガスの究極可採量の試算例

		$\times 10^{12}$ cf	$\times 10^{12}$ m <sup>3</sup>
1956	米国内務省	>5000	>141.6
1958	WEEKS	5000—6000	141.6—169.9
1959	WEEKS	6000	169.9
1965	WEEKS	7200	203.9
1965	HENDRICKS (USGS*)	15300	433.2
1967	RYMAN	12000	339.8
1967	Shell	10200	288.8
1968	WEEKS	6900	195.4
1969	HUBBERT	8000—12000	184.1—339.8
1971	WEEKS	7200	203.9
1973	KOPPACK (Shell)	7500	212.4
1973	HUBBERT	12000	339.8
1973	LINDEN	10400	294.5

\* United States Geological Survey (米国地質調査所)

えている。それによれば 世界の天然ガスの確認埋蔵量は  $65,020.6 \times 10^9 \text{m}^3$  すなわち原油に換算すると 564 億 mt である。これに対して MOODY (1975) による 1975 (昭和50) 年当初現在の石油の確認埋蔵量は 976.4 億 mt である。このように 石油と天然ガスの確認埋蔵量と究極可採量については あまり変らない試算が行われている。上の確認埋蔵量を R とし 1973 年の生産量  $1,359.3 \times 10^9 \text{m}^3$  (International Petroleum Encyclopedia, 1978 年版による) を P とし R/P を算出すると 47.8 となり 石油に比べて天然ガスの生産がおくれていることを示している。

### 5. わが国の石油・天然ガス資源

International Petroleum Encyclopedia の 1978 年版によれば 1978 年当初のわが国の石油および天然ガスの確認埋蔵量は それぞれ 900 万 mt および 150 億 m<sup>3</sup> である。そして 1977 年の石油および天然ガスの年生産量は それぞれ 50 万 mt および 27.7 億 m<sup>3</sup> であるから R/P はそれぞれ 18 および 5.4 である。石油の R/P はまだよいとして 上の天然ガスの確認埋蔵量のなかに生産量の約 20% を占める共水性ガスが入っていないとしても 5.4 という R/P は小さすぎる。ADAMS と KIRKBY (1975) によれば 1974 年当初のわが国の天然ガスの確認埋蔵量は 340 億 m<sup>3</sup> である。これから 1974 年から 1977 年までの生産量 109 億 m<sup>3</sup> を引いたものを 1977 年当初の確認埋蔵量

として R/P を算出すると 8.3 となる。また 340 億 m<sup>3</sup> を 1973 年の生産量 24.7 億 m<sup>3</sup> で割ると 13.8 となるから ADAMS と KIRKBY (1975) の見積りは その当時としては案外当を得たものであったかも知れない。それでも前節で求めた 1974 年当初現在の世界の天然ガス資源に関する R/P よりも異常に小さい。

### 6. 共水性ガス

前節で述べたように わが国の石油・天然ガス資源は世界的な視野でみると ないに等しいほど微々たるものである。それにも拘わらず わが燃料部石油課では重点調査・研究項目の 1 つとして共水性ガスをとり上げているが それにはそれだけの理由がある。

#### 6.1 共水性ガスとは

共水性ガスは 文字どおり 水に伴って産出するガスの総称である。産出範囲がもっとも広い共水性ガスは CH<sub>4</sub> を主成分とする 共水性可燃性ガス であり その中でもっとも普遍的に知られているのが 水溶性可燃性ガス である。これまで水溶性可燃性ガスと考えられているもののなかに 水溶性という特徴がむしろ少ないものがあることについては すでにくわしく論じてある (福田・永田 1977; 福田 1977b; 福田 1979)。水溶性可燃性ガスは一般に 水溶性ガス の名で呼ばれている。共水性可燃性ガスに対応するものが 共水性不燃

表4 世界の天然ガスの確認埋蔵量

地 域	×10 <sup>12</sup> cf	×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	%
中 東	728.3	20623.0	31.7
ソ 連	632.0	17896.1	27.5
北 ア メ リ カ	349.0	9882.5	15.2
西 ヨ ー ロ ッ パ	181.4	5136.6	7.9
ア フ リ カ	175.2	4961.1	7.6
南・ア ジ ア と 極 東	92.0	2605.1	4.0
南 ア メ リ カ	47.2	1336.5	2.1
大 洋 州	36.9	1044.9	1.6
中 国	30.0	849.5	1.3
東 ヨ ー ロ ッ パ	24.2	685.3	1.1
合 計	2296.2	65020.6	100.0

(ADAMS & KIRBY 1975)

性ガスであり 一般に主成分は CO<sub>2</sub> または N<sub>2</sub> である。このなかに純粹の水溶性不燃性ガスといえるものがあるかどうかは 現在のところ明らかでない。以上に述べたことをまとめて示すと 次のようになる。

共水性ガス

- 共水性可燃性ガス
- 水溶性可燃性ガス
- その他の共水性可燃性ガス

共水性不燃性ガス

- 二酸化炭素系共水性不燃性ガス
- 窒素系共水性不燃性ガス

以上のなかでもっとも出現頻度の高いのは 水溶性可燃性ガスを含む共水性可燃性ガスであるから とくにことわらない限り これ等をそれぞれ水溶性ガス (natural gas, dissolved-in-water type; 略称 NGDW) および 共水性ガス (natural gas, accompanied-with-water type; 略称 NGAW) と呼ぶことにする。

6.2 共水性ガス研究の意義

共水性ガス研究の意義は 地質学的なものとして現在のうちに将来の貴重な資源としての面の2つに分けられる。

6.2.1 地質学的意義と問題点

稼行に耐える共水性ガス鉱床は 一般に若い地層のなかに胚胎されている。もっとも 若いということが本来の条件ではなく 浸透率がある程度 (一般に 50md) 以上であればよいのであって 米国のメキシコ湾岸地域では 白亜系やジュラ系にも大規模な共水性ガス鉱床の賦存が知られている。しかし わが国では一般に上部中

新統以上の地層が探鉱・開発の対象になっている。

共水性ガス鉱床の賦存が考えられるような地層にあっては 構成粒子間の孔隙 とくにお互いに連絡のとれた孔隙は流体で満たされているはずである。このような流体のなかでもっとも一般的なのは水であるが トラップのあるところでは そこに連続相をなす石油や天然ガスが集積されていることがある。それが石油鉱床であり またいわゆる構造性ガス鉱床である。孔隙中の水と石油は天然ガスを溶解しているのが普通であり またこれに加えて石油や天然ガス泡の存在が推定されることもある (BERG, 1975; 福田・永田 1977; 福田 1977)。このように水 石油 および天然ガスは孔隙性・浸透性のある若い地層の重要な構成要素であるにも拘らず 一般に地質学の研究対象とされていない。これは他の自然科学の分野では考えられないことで 地質学が異常な発展過程をたどったことを示す1つの事例にはかならない。このような見方がお気に召さない読者には 地質学のなかにはいまだに博物学の域を抜け出せない分野があまりにも多すぎる といいかえておこう。

上に述べたことから明らかなように 流体を含む地層の研究は流体の部分も扱って完成するのであり 一般に行われているように 化石を含む固体の部分だけから組み立てられた地史は 必然的に不完全であるといわざるを得ない。一方 地層中の流体だけを専門に扱っている学者は 固体部分から知られる情報を忘れがちである。どちらもほめられることではないが とくに深く考えることなく前者の道を歩いておられる方が断然多いことだけは確かである。それだけに われわれ共水性ガスの学徒は 扱っている流体の地質学的意義をよく考えて 地質学を自然科学の1分野として恥しくないものにする



ことに貢献しなければならぬ。

話題をかえて 読者諸兄は地質柱状図というものについてお考えになられたことがおありだろうか。複雑な地質構造をもつ古い地層については 広範囲から断片的な柱状図をとって 鍵層や化石でつなぎ合わせたり また欠層があることを承知の上で 柱状図の断片を順序づけて並べたりして得られる総合柱状図なるものをもってある堆積盆地の地質柱状図とすることも止むを得ないことであろう。これとは対照的なのが下限の出ている水平層の柱状図であって 露出さえよければ 任意の堆積した場所における地質柱状図をとることができる。問題なのは緩傾斜の地層の地質柱状図である。このような地質柱状図もことわりなしに水平層のそれと同列に扱われていることが多いが わが国の代表的な上部鮮新統～中部更新統の1つである千葉県下の上総層群の地表における見掛けの厚さがおよそ3,000mにすぎないのに その傾斜方向の分布範囲はおよそ32kmにもわたっている事例についてみても いわゆる地質柱状図の実体がいかにつかみどころのないものであるかをおわかりいただけると思う。

幸い大規模な共水性ガス鉱床はこのような緩傾斜の地層に胚胎されており 私どものところには 堆積した場所にきわめて近いところで採取された地質柱状図以上に地質学的な価値のある試・資料がかなり集まっている。これらのなかでもっとも利用価値が高いのは 電気検層図をはじめとする各種の検層記録である。最近の外国の層位学の教科者はかなりのスペースを検層に当てているのだが なぜかわが国の大学系の層位学者には このような記録には見向きもされない方が多い。私どものところには 昭和37(1962)年～同41(1966)年の間に行われた大深度層序試錐の資料があるということで 多くの方が閲覧においでになるのだが たいいてい検層記録の山をご覧になり 一寸ひろげただけでお帰りになるのが実情である。すでに月におり立った人もある世の中に層位学にも積極的に近代技術を取り入れるべきだと考えるのだが いかがなものであろうか。私どもの報告書にもこのような資料をそのまま取り入れるのが本当なのだが それでは読んでいただけないので 解読の結果を地質柱状図の形として示しているのが実情であるが それでは折角ある物理性・化学性に関する情報が死んでしまうのである。一般の方が理解している地質屋らしく直接地下にとり組んで下さる地質屋の輩出に期待しているのは 果して著者だけであろうか。

以上の問題に関連してもう1つ忘れてはならないことは 一般に若い地層については地表より地下の方が層位学的素材が完備していることである。一寸考えればわかることだが これは不整合による欠除がより少ないことを意味する。われわれ共水性ガスの研究者はこの点に関して積極的に層位学に貢献することに努めているので 一般の層位学関係者にはわれわれのところにある資料の解読に必要な科学技術の勉強をお願いしたい。わが国を除く先進国では一般にそれがカリキュラムに組みこまれているのである。

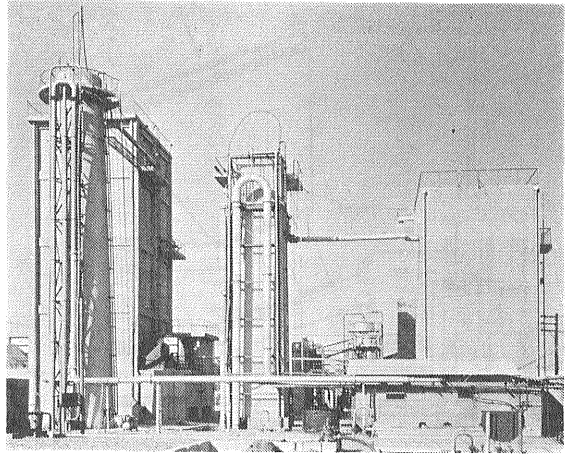
共水性ガス(広義)は地下深所の地質情報を伝えるものとしても 地質学的に貴重である。著者は共水性ガスに関する講座を本誌上に連載中であるが その1(福田 1979)で述べたように 同源的な共水性ガス(狭義)の中に副成分として入っているCO<sub>2</sub>は 年代をさかのぼるにつれて減少する傾向があり 一般的な含有量以上に含まれているCO<sub>2</sub>は 地下深所に現在なお生きている熱源のあることを示す。また 大阪府河内長野市石仏ガス田のCO<sub>2</sub>を主成分とする天然ガスに 1.42～5.43 vol. %のC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>までの炭化水素が含まれていることは 本ガス田付近の地表には領家帯の花崗岩類しかみられないが 地下深所には中・古生代の堆積岩類またはその変成岩類が伏在していることを示している。

## 6.2.2 現在の資源として

わが国の石油および共水性ガスを除く天然ガス資源がとるに足りないのに対して 共水性ガスの埋蔵量は案外大きい。すなわち 昭和50(1975)年当初現在の確認埋蔵量に準確埋蔵量を加えたものは4,000億m<sup>3</sup>を超える(地質調査所石油課 1975)。しかも この埋蔵量は当時計算できるだけの材料があるところだけについて積算されたものであり 石油の究極埋蔵量に相当するものはおそらく1兆m<sup>3</sup>を超えるであろう。というときすぎるとは思われないかと思われる読者も多いであろうが もともと共水性ガスの埋蔵量は本質的に多いのである。1例を挙げると 米国のメキシコ湾岸地域の共水性ガスの埋蔵量は105,000 quads すなわち2.97×10<sup>15</sup>m<sup>3</sup>もある(Brown, 1976; 福田 1977a)。これは石油換算で2,576兆mtという大きな量で 先に述べた回収率40%の場合の世界の石油の究極埋蔵量2,769億mtの9.3倍もある。これはまた米国の石炭の全埋蔵量のおよそ1.7倍に匹敵する量でもあるという。この天然ガスのコストを1,000cfを\$2.50 すなわち1m<sup>3</sup>当り8.8セントにできれば 1976年当時のOPEC諸国の輸出石油価額に対抗できることから いざとなればこれを石油価

額の引上げを押える武器にしようというのが米国の考え方である。

およそ3億mtというわが国の石油の年消費量を考えると1兆 $m^3$ すなわち石油換算で8億6,745万mtを超えると推定されるわが国の共水性ガスの究極埋蔵量はそれほど大きいとはいえないかも知れない。しかしこれを国民生活の向上に生かすことに使えば大きな資源である。天然ガスの特性は家庭燃料として使うことによって最高に発揮される(福田 1964a, b)がそれには4人世帯で1日当りおよそ $1m^3$ もあれば足りる。つまりおよそ1億1,000万人といわれるわが国民がこの割合で使っても1年当りおよそ $10,037.5 \times 10^6 m^3$ つまりおよそ100億 $m^3$ もあれば足りるのであり1兆 $m^3$ ではおよそ100年をまかなうことができる。



① ガス付随水を原料とするヨウ素回収工場  
(千葉県長生郡白子町伊勢化学工業(株)白子工場)

### 6.2.3 将来の資源として

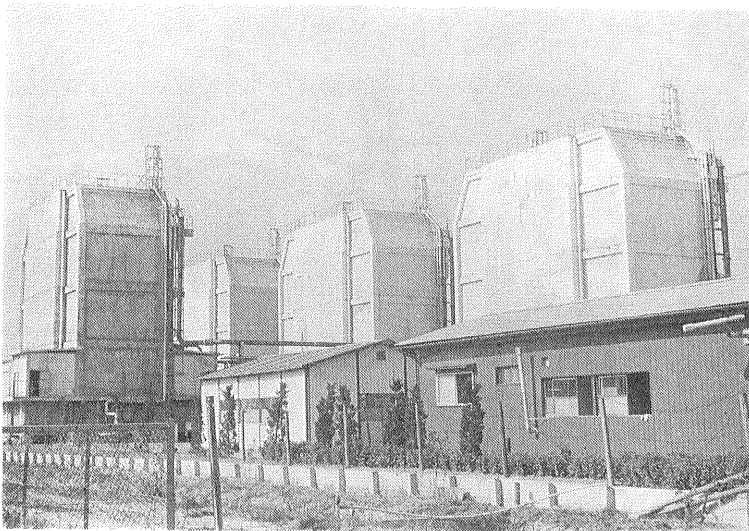
共水性ガスおよび付随資源のなかで将来資源としてとくに重要なのは共水性ガスの付随水中に高濃度で含まれていることのあるヨウ素 および共水性ガスとして産出することの多い二酸化炭素である。これ等に関する一般的なこと および現在の用途については すでにかなりくわしく論じ かつ紹介してあるので それぞれ下記の文献を参照していただくこととし ここではとくに将来資源としての面にスポットを当てて述べることにする。

【ヨウ素】 福田 1971; 福田 1976b, c; 太田 1977

【二酸化炭素】 福田 1974a, b, 福田 1976a; 福田・永田 1974

### 1) ヨウ素

ヨウ素は現在のところわが国が世界一の埋蔵量を誇る数少ない資源の1つである。わが国のヨウ素はチリ硝石の原料鉱石であるカリチュ (caliche) やコストラ (costra) の中に含まれているものとは対照的に 外浅海ないし半深海の堆積物に由来する後期中新世以新の若い地層中に賦存する共水性ガスの付随水中に含まれているものであり 塩分が海水並みの場合 その濃度は60~140 mg/lである。現在 このようなガス付随水から千葉・新潟・宮崎の3県下で年間およそ7,000mtのヨウ素が回収されており その大部分が輸出されているがそれでもヨウ素に富むガス付随水が大量に放流されてい



② ガス付随水を原料とするヨウ素回収工場  
(新潟県西蒲原郡黒崎村伊勢化学工業(株)黒崎工場)

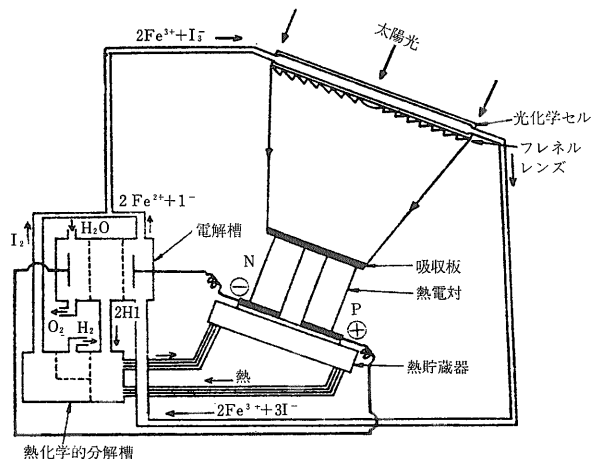
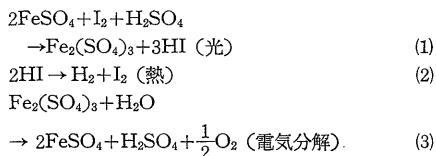


図9 ヨコハマ・マーク6のシステム図 (太田時男 1977)

現在のところわが国が世界一のヨウ素資源国であるということを反映してか この方面の研究ではわが国が世界の最先端を行っている といっても過言ではない。中でも脚光を浴びているのは 横浜国立大学工学部の太田時男教授を中心とするグループの研究で 開発された水素発生装置は順次ヨコハマ・マーク1～6の名で呼ばれている。

太陽光による水素生成装置として 比較的高い効率で稼動している唯一のものであるヨコハマ・マーク6の概要は次のとおりである。 まず 化学サイクルとしては

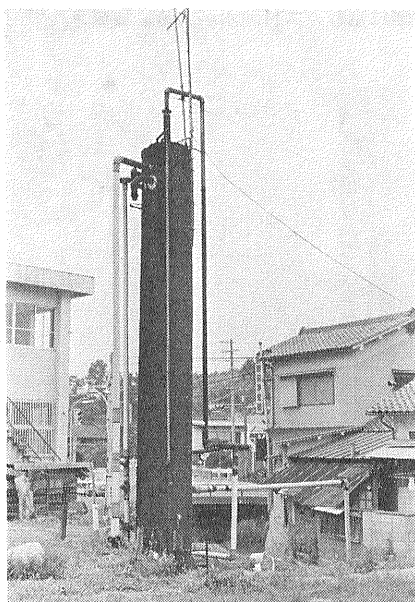


る。

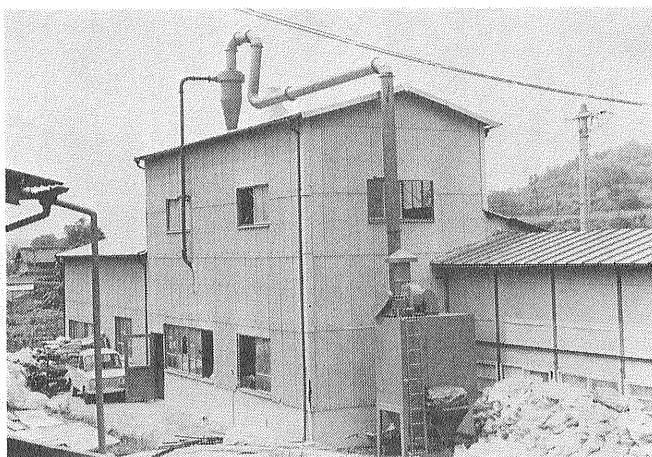
ヨウ素は古くから医薬・消毒剤の原料 色素・染料および中間体の製造 有機合成化学反応および触媒 写真・印刷 高純度金属の精錬 分析用試薬の製造 航空燃料添加剤 ゴム老化防止剤 発電機および電動機のブラシ および診断・治療用のアイソトープ等の広範囲にわたって使われているが 最近注目されているのは水素エネルギーの担い手としてである (福田 1976 b)。ヨウ素を水の分解による水素の製造に応用しようという考えのヒントは ヨウ素が光にもっとも鋭敏に反応する元素である (太田時男 1977) というにある。

であるが 基本反応は(1)式で 図9に示されているように  $2\text{Fe}^{2+}$  の電子を2個 ( $\text{I}^-$ )<sub>2</sub> へ太陽の光子エネルギーで移して 電気分解し易い状態にし これに使われなかった光子エネルギーを集めて熱に変え この熱で半導体熱電対の接合部を加熱し 5%程度の熱を電力に変換して電気分解に使い 95%程度の余熱を熱のまま (2)式の反応に利用する。システムとしては非常に高度な多重サイクルであり 水素生成の理論効率は25%を上まわる。

ヨコハマ・マーク1～6をはじめとするヨウ素を使う水の分解反応では ヨウ素は全量回収され くり返し使用できる。そして 1サイクル当りの水素分子の発生数が使われるヨウ素分子の数に等しいことは 上に紹介した化学サイクルから明らかである。水素およびヨウ素の原子量の概数はそれぞれ1および127であるから



③ 大阪府河内長野市石仏ガス(CO<sub>2</sub>)田における分離槽



④ CO<sub>2</sub> を利用したアルミニウムと塩化ビニールの回収工場 (石仏ガス田 (株)三和)

1 サイクル当り 1g の水素を発生させるのに必要なヨウ素は 127g である。

ところで 水素 1Nm<sup>3</sup> すなわちおよそ 89.3g の総発熱量は 3,050 kcal であり 原油 1mt のそれは 10.7×10<sup>6</sup> kcal であるから 1 サイクル当り 1mt の原油に相当する水素の生成に必要なヨウ素は

$$127g \times \frac{10.7 \times 10^6}{3.05 \times 10^9} \times 89.3 = 39.8 \text{ mt}$$

である。したがって このプロセスが 1年に10,000回 転するとすると わが国の年間の原油需要およそ 3億 mt 相当の水素の生成に必要なヨウ素は

$$39.8 \text{ mt} \times \frac{3 \times 10^8}{10^4} = 1.194 \times 10^6 \text{ mt}$$

すなわちおよそ 120万 mt である。しかし これは化学当量による理論的な計算値であり 反応を 100% 進行させるには 通常この 20~30% 増しが必要とされているから これをおよそ 150 万 mt と考えておいてよからう。

これに対して わが国のヨウ素の究極可採量は 小さ目に見積っても およそ 900 万 mt はある (福田 1976) とされており これに比べると累計生産量は微々たるものであるから これをまるまる究極可採量を考えてよい。これだけのヨウ素があると 実に年間 22.5 億 mt もの原油に相当する水素を生成するだけの施設を建設できるのである。ちなみに現在の世界の原油の年生産量はお

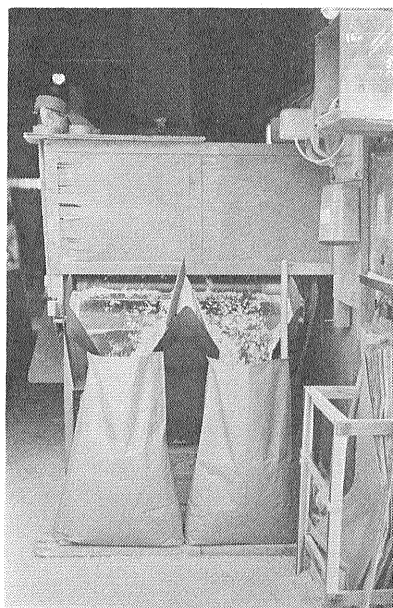


⑤ 回収された塩化ビニール (同上)

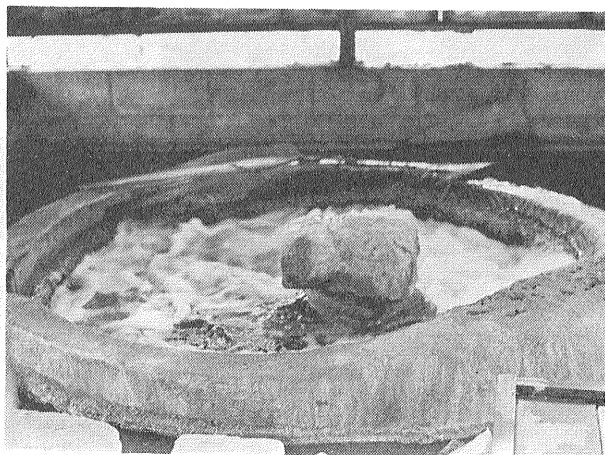
よそ 30 億 mt である。

## 2) 二酸化炭素

二酸化炭素も ヨウ素に負けなくらい 多方面の用途をもつ。需要の多い順でいえば 熔接 鋳物 消火器 およびその他で その他のなかには プラスチックやゴムに使われる発泡剤 消火器 消火剤 清涼飲料水 食品保存 生鮮食品の低温保存 クロレラ等の培養 温室栽培野菜の発育促進 および薬品原料等の用途が含まれている。また ほとんど知られていないが 河内長野市の石仏ガス田では 錠剤やトローチのアルミ箔—ビニール包装の切れ端から アルミニウムはアルミナとし ビニールはビニールのまま回収するのに 二酸化炭素が使われているし 二酸化炭素を原料としたプラスチックに代る高分子の製造も 小規模ながら行われている。



⑥ 回収されたアルミナ (同上)



⑦ 長野市松代旧 1 号井 (白泡は CO<sub>2</sub>)

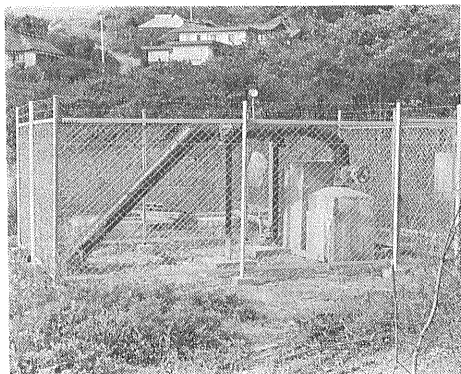
しかし 二酸化炭素が将来資源として重要視されるのは ヨウ素の場合と同様に 無公害のエネルギーや食料の原料となるクロレラやスピルリナ等の藻類の培養に使えることである。これ等藻類の培養はすでに小規模に行われているが 効率のよい大規模培養には それなりの工夫が必要である。これは結局は光合成であるし 水棲の藻類が同化作用に使うのは水に溶解した  $\text{CO}_2$  である。したがって 培養池は水深 10cm 程度の浅いものがよいし このような培養池の水に効率よく  $\text{CO}_2$  を溶解させる工夫が進められている。このようにして合成される有機物は  $1\text{m}^2$  当りおよそ 10g というのであるから 1年間に 300日稼働させるとして 3億 mt の石油におよそ相当するであろう同じ目方の有機物を合成させるのに必要な面積は 10万  $\text{km}^2$  である。これはわが国の面積のおよそ 27.9% であって 実際問題としては無理な話である。しかし 1万  $\text{km}^2$  から 3,000万  $\text{km}^2$  の有機物ができるのだから 捨てておく手はない。このような試算は米国や英国をはじめとする欧米諸国でひろく行われているが なぜかわが国は このように原理的にはわかっていて 工業化が問題であることには熱心でない。世界一の火山国であるわが国が世界一の二酸化炭素資源国であることは間違いないのだから ぜひ考え直して欲しいものである。有機物 とくにセルロースのメタン発酵によるメタンの発生が古くから知られていることも 世界のエネルギー問題を考える上に忘れてはならないことの 1つである。

## 7 受託調査

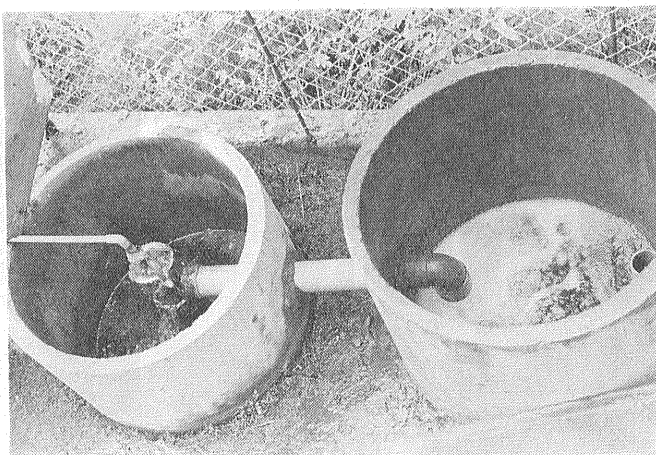
石油地質学の有名な教科書の 1つである A. I. LEVORSEN (1967) の目次は 次のようになっている。

- 1 序言と要約
- 2 石油の産状
- 3 貯留岩
- 4 貯留層の空隙
- 5 貯留層流体——水 油 ガス
- 6 貯留トラップ——概論と構造トラップ
- 7 貯留トラップ(続)——層位および流体トラップ
- 8 貯留トラップ(続)——組合せトラップと岩塩ドーム
- 9 貯留条件——圧力と温度
- 10 貯留メカニクス
- 11 石油の起原
- 12 石油の移動と集積
- 13 地下地質
- 14 石油地区
- 15 石油探鉱

本書で扱われているのは石油 油田ガス およびいわゆる構造性ガスであるが 共水性ガスについて教科書を作るとすると 似たような目次となるのであろう。すなわち このような流体鉱床を研究する場合 研究の対象の大半は坑井の掘削 坑井内での諸測定 仕上げ および産出試験なくしては得られない。石油地質という石油・天然ガス鉱床を地質学的に研究することであると思っておられる方が多いが 世界でひろく石油地質として認められているものの内容は 上の目次にみられるように それとはかなりちがっている。地質学的に(日本語)を「ジェオロジカルに」とおきかえるならば このちがいはかなり小さくなる。このような基本的なことをあえて持ち出したのは わが国の一般の地質学徒が理解している意味での「地質学」と“geology”との相違が年々増加するばかりであり また共水性ガスの研究の中核をなす資・料を 地質調査所独自の予算で取得することは 現状ではほとんど不可能であることを理解



⑧ 長野市松代新 3号井 (本井からは 1日当り 2,200 $\text{m}^3$  以上の  $\text{CO}_2$  が放出されている)



⑨ 小諸市吉野別宅の温泉井 (31°C の含食塩一重曹泉を付随水とする  $\text{CO}_2$  井で ガス量は 350 $\text{m}^3/\text{day}$  水量は 350 $\text{kl}/\text{day}$  で ガス水比は 1.0 である)

していただきたいからである。後者については 国立試験研究機関である地質調査所のやれる坑井掘削を伴う仕事は層序試験錐止りであり 石油公団といえども基礎試験錐止りで 現実に産出試験までもって行くことは困難である。

当所燃料部石油課の業務のなかで 受託調査の占める割合が大きい理由の学術的な面はここにある。当課の受託調査の多いもう1つの理由は 共水性ガスの研究をしているところが ほとんど見当らないことであるがこれについては 改めて説明するまでもあるまい。

## 8 む す び

わが国の石油・天然ガス資源は 比較的恵まれている共水性ガスを加えても わが国の消費量および世界の全資源から見ると 微々たるものである。しかし 若い地層中に賦存する共水性ガスに関する研究の地質学的意義はきわめて高く またその付随水に含まれるヨウ素の可採埋蔵量は現在のところ世界一で 回収されるであろうおよそ900万mtをもってすれば 年間22.5億mtもの原油に相当する水素の生成施設をまかなうことができる。さらに 共水性ガスとして産出することが多い二酸化炭素については その資源量は世界一であろうし これも藻類の培養を通じてエネルギー資源として脚光を浴びる日も近いと期待され またこれを原料とするプラスチックにかわる無公害素材の試験的製造はすでに開始されている。また 二酸化炭素を主成分とする共水性ガスの分析を通して得られる地下の情報も少なくない。

以上に述べたようなことから 私どもは誇りをもって共水性ガスの研究と取り組んでいる。受託調査等を通して 地方自治体や企業のご協力なくしては掘り下げた研究が不可能な面が多々あるので 「これまでのご協力に心から感謝の意を表するとともに 一層のご支援・ご協力をお願いする次第である」ということをもって擲筆の言葉としたいのである。

## 参 考 文 献

- BERG, R. R., 1975, Capillary Pressures in Stratigraphic Traps: *A. A. P. G.*, vol. 59, no. 6, pp. 939-956.
- BROWN, W. M., 1975, A Huge New Reserve of Natural Gas Comes within Reach: *FORTUNE*, October, pp. 219-220.
- 地質調査所石油課 1975 水溶型ガス鉱床の埋蔵量: 石油技術協会誌 40巻 4号 pp. 29-31.
- 福田 理 1964a b 関東平野(1)および(2): 地質ニュース 116号 pp. 14-19; 123号 pp. 40-48,
- 福田 理 1971 わが国のヨード資源: 地質ニュース 199号 pp. 1-23.
- 福田 理 1974a わが国および開発途上国の天然二酸化炭素資源問題: アジア親善交流協会研究資料 昭和49年度 No. 1 pp. 69-77.
- 福田 理 1974b 二酸化炭素農業のすすめ: 同上 昭和49年度 No. 2 pp. 79-98.
- 福田 理 1974c エネルギー問題とメタニゼーション: 同上 昭和49年度 No. 3 pp. 80-102.
- 福田 理 1975 世界石油会議東京大会より: 同上 昭和50年度 No.1 pp. 45-68.
- 福田 理 1976a 水素・人造メタン・太陽エネルギー: 同上 昭和50年度 No. 4 pp. 31-48.
- 福田 理 1976b 水素とヨウ素へ新エネルギーとそれにない手へ: 地質ニュース 264号 pp. 18-25.
- 福田 理 1976c 水溶型ヨウ素-ガス鉱床について: 天然ガス 19巻 9号 pp. 14-27.
- 福田 理 1977a アメリカの水溶性天然ガス: アジア親善交流協会研究資料 昭和51年度 No. 4 pp. 85-98.
- 福田 理 1977b 沖縄の天然ガスおよび付随・関連資源: 琉球列島の地質学研究 第2巻 pp. 121-132.
- 福田 理 1978a 図説世界の石油資源: アジア親善交流協会研究資料 昭和53年度 No. 2 pp. 1-14.
- 福田 理 1978b 図説石油資源の将来: 同上 昭和53年度 No. 3 pp. 31-40.
- 福田 理 1979 共水性ガスとその鉱床(その1): 地質ニュース 294号 pp. 1-15
- 福田 理・永田松三 1974 温泉と炭酸ガスも使いよう: 科学朝日 34巻 5号 pp. 109-114.
- 福田 理・永田松三 1977 具志頭R1号井自噴す: 地質ニュース 276号 pp. 1-17.
- 福田 理・永田松三 1978 宮崎県南那珂郡北郷町 R1号井自噴す: 地質ニュース 290号 pp. 1-22.

## 新 刊 紹 介

### 日 本 列 島 も の が た り

毎日新聞社の中学生新聞に1年間にわたって連載された内容を一冊の本としてまとめたものであり 中学生程度の読者を対象としている。第1章「冷たかった地球」から「むかしの地球はいまの月」「ゆで卵の地球」……「アルプス造山運動」「ただよう大陸」「プレート説」……「稲作のはじまり」「古墳時代」「これからの日本列島」「楽しい日本列島」まで54章にわたり 日本列島の地史が物語りふうに解説されている。各章とも最近のトピックスやかなり高度な内容の事が

らを平易な言いまわしと 著者とは長年のコンビであるマンガ家伊東章夫氏のさし絵により 楽しみながら日本列島の地史が理解できるように配慮されている。現在の学校教育で行われている地学が 地学現象の物理・化学的把握という面に力がかかっている点で 本書はその学校教育をはなれて地学を楽しく理解するという面ではかっこうの書と言えよう。ただ現在の地学教育の方向とはかなり質を異にするため 中学生読者層にとまどいが生じる事が懸念されないわけではない。

書 名 日本列島ものがたり  
著 者 井反正二  
発 行 築地書館株式会社【東京都中央区築地2-10-12  
Tel (03) 542-3731】  
サイズ・定価 18cm×19cm 117ページ 1,400円