

共水性ガスとその鉱床(その5)

福田 理 (燃料部)
Osamu FUKUTA

2 ガス層流体

2.1 総説

共水性可燃性天然ガス鉱床のガス層に含まれる流体としては、主成分となる CH₄ を含む炭化水素系のガス副成分として加わる CO₂ O₂ N₂ Ar He および H₂ 等のガス、ガス付随水として産出する水のほかに、時には原油もあるわけであるが、原油については石油地質学の教科書や石油鉱業便覧(石油技術協会 1963) 石油事典(石油学会 1966) などにゆずり、本稿ではそれ以外のガス層流体のおもな諸性質について述べることにする。

ガス層流体の諸性質は化学的性質と物理的性質とに大別される。これらの諸性質は天然ガス鉱業上、地質・探鉱・さく井・開発・生産および利用の各部門に関係する基礎的因子であるが、化学的性質はどちらかといえば地質・探鉱および生産・利用の分野で重要であるのに対して、物理的性質は開発・生産技術の分野に貢献す

るところが大きい。また、これ等の諸性質は物理探鉱学、油層工学、さく井学、および採油・ガス学などの基礎知識として重要であるばかりでなく、若い地層に関する地質学一般を近代自然科学の水準まで引き上げるのに、欠くことのできない基礎知識でもある。

2.2 共水性ガスの化学的性質

2.2.1 一般的性質

先に述べたように、共水性ガスには他源的なものもあるから、共水性ガスと一般的な可燃性天然ガスとの間には、本質的な相違はない。すなわち、共水性ガスは CH₄ を主成分とする低級の炭化水素およびその他の数種類のガスからなる。低級炭化水素および関連ガスの燃焼に関するものを除くおもな性質は、表41に示すとおりである。

共水性ガスの主成分は、一般に可燃性天然ガスと呼ばれているものと同じで、アルカン族炭化水素(alkanes)の炭素数が1(n=1で表わされる)のメタン(CH₄)である。

表 41 低 級 炭 化 水 素 お よ び 関 連

名 称	式 子	重 子	沸 点 (°F, 14.696psiaでの)	蒸 気 圧 (psia, 100°Fでの)	融 点 (°F, 14.696psiaでの)	臨 界 値			液 体 の 密 度 (60°F, 14.696psiaでの)		
						力 圧 (psia)	度 温 (°F)	種 容 比 (ft ³ /lb)	重 比 (60°F/60°F)	lb/gal	密度の温度関係
1 メタン	CH ₄	16.042	-258.68	...	-296.46	673.1	-116.5	0.0993	0.25	...	...
2 エタン	C ₂ H ₆	30.068	-127.53	...	-297.89	708.3	+ 90.09	0.0787	0.40	...	...
3 プロパン	C ₃ H ₈	44.094	-43.73	190	-305.84	617.4	206.26	0.0730	0.5077	4.224	0.00171
4 n-ブタン	C ₄ H ₁₀	58.120	31.10	51.6	-217.030	550.7	305.62	0.0704	0.5844	4.863	0.00111
5 2-メチル・プロパン(i-ブタン)	C ₄ H ₁₀	58.120	10.89	72.2	-255.280	529.1	274.96	0.0725	0.5631	4.685	0.00123
6 n-ペンタン	C ₅ H ₁₂	72.146	+ 96.933	15.570	-201.498	489.5	385.92	0.0690	0.63116	5.2528	0.00086
7 2-メチル・ブタン(i-ペンタン)	C ₅ H ₁₂	72.146	+ 82.134	20.44	-255.800	483	370.0	0.0685	0.62476	5.1995	0.00091
8 2,2-ジメチル・プロパン(ネオペンタン)	C ₅ H ₁₂	72.146	49.105	...	+ 2.210	464.0	321.08	0.0671	0.601	5.00	0.00093
37 一酸化炭素	CO	28.010	-313.6	...	-340.6	150	-218	0.0515	0.801	...	...
38 二酸化炭素	CO ₂	44.010	-109.3	...	...	1,073	88.0	0.0348	0.8159	6.802	...
39 硫化水素	H ₂ S	34.076	-76.5	554.6	-121.9	1,306	212.7	...	0.79	6.58	...
40 空 気	N ₂ O ₂	28.966	-317.7	...	...	547	-221.3	0.0517	0.856	...	...
41 水 素	H ₂	2.016	-422.9	...	-434.4	188	-399.8	0.5168	0.07	...	...
42 酸 素	O ₂	32.000	-297.4	...	-361.1	730	-181.8	0.0373	1.14	...	...
43 窒 素	N ₂	28.016	-320.4	...	-345.6	492	-232.8	0.0515	0.808	...	...
44 水	H ₂ O	18.016	212.0	0.9492	32.0	3,206	705.4	0.0400	1.000	8.337	...

が n=2 のエタン (C₂H₆) 以上の低分子量のアルカン族炭化水素 ならびに n=2 のエチレンで代表される低分子のアルケン族炭化水素 (alkenes) が 少量ながら含まれていることもあるが 共水性ガスを除く可燃性天然ガスとちがって ブタン (C₄H₁₀) 以上のアルカン族炭化水素や芳香族炭化水素を含むことはまれである。よく知られているように ブタン以上のアルカン族炭化水素には異性体があり ブタンについてのイソブタン (i-C₄H₁₀) およびノルマルブタン (n-C₄H₁₀) ならびにペンタンについてのイソペンタン (i-C₅H₁₂) およびノルマルペンタン (n-C₅H₁₂) は分析表によく出てくる。

炭化水素以外の不純物としては 二酸化炭素 (CO₂) 窒素 (N₂) アルゴン (Ar) ヘリウム (He) 水素 (H₂) および硫化水素 (H₂S) がある。これらのうち 二酸化炭素および窒素は不純物といえないほど多量に含まれていることがよくあり 両者を合せたものが 50 vol. % を超えることがあるばかりでなく いずれか単独で 50 vol. % を超えることもまれでない。このように炭化水素以外のガスが半分以上になると もはや通常の意味での可燃性ガスではなくなる。また 遊離ガスとして産する CH₄ を主成分とするガスのなかには フランスの Lacq ガス田のガス (H₂S: 14.57 vol. %) やカナダの Grossfield ガス田のガス (H₂S: 38.10 vol. %) のように多量の H₂S を含むもの また 米国のテキサス・オクラホマ・ニューメキシコなどのガスのように 時には 7~10vol. %

もの著量の He を含むものもあるが 共水性ガスにはこのような組成のガスは知られていない。共水性ガスの組成についてはすでに詳しく述べてあるので 参考までにそれ以外のガスの組成の例をまとめて 表42および表43として示しておく。

2.2.2 燃 焼

燃焼はきわめて複雑な現象で 炭化水素類の燃焼に限ってみても 一冊の本ができるほどであるが くわしいことは BRADLEY (1969) などの著書にゆずり ここではごく概略だけを述べることにする。表44は低級炭化水素その他の単体ガスの燃焼に関する性質をまとめて示したものである。

1) 燃焼方式と燃焼状態

i) 一次空気の混入割合による分類

A. 赤 火 式

一次空気なしで燃料ガスを空气中に噴出・燃焼させる方式で ガスと空気との混合は 炎の周囲からの拡散のみによって行われるところから 赤火式燃焼の炎を拡散炎ともいう。燃焼反応はきわめておそく 炎は長く伸びて赤黄色となり 炎の温度も比較的低温である。5 000kcal/Nm³ の都市ガス (比重 0.5) の場合 最高温度は約900°Cである。図40はこの都市ガスの赤火炎の温度分布を示す。炎が赤黄色となるのは ガス成分中

ガ ス の お も な 性 質

ガスの密度 (60°F, 14.696psiaでの)		比熱 (60°F, 14.696psiaでの)		発熱量 (60°Fでの)			燃 潜 熱 (Btu/lb, 14.696psia の沸点での)	屈 折 率 nD (68°Fでの)	燃 焼 所 要 空 気 量 (ft ³ /ft ³)	燃 焼 限 界 (空气中のvol%)			
理 想 気 体		理 想 気 体		真発熱量	総 発 熱 量					限	限		
重 比 (空気=1)	ガスの ft ³ /lb ガスの ft ³ /gal	C _p	C _v	Btu/蒸気ft ³ (14.696psiaでの)	Btu/蒸気ft ³ (14.696psiaでの)	Btu/液体lb	蒸 発 潜 熱 (Btu/lb, 14.696psia の沸点での)	燃 焼 所 要 空 気 量 (ft ³ /ft ³)	下	上			
0.555	23.61	...	0.5271	0.402	911	1,012	...	219.7	...	9.53	5.0	15.0	1
1.046	12.52	...	0.4097	0.343	1,631	1,783	...	210.7	...	16.67	3.22	12.45	2
1.547	8.471	35.78	0.3885	0.342	2,353	2,557	21,554	183.5	...	23.82	2.37	9.50	3
2.071	6.327	30.77	0.3970	0.363	3,101	3,369	21,190	165.9	...	30.97	1.86	8.41	4
2.067	6.339	29.70	0.3872	0.352	3,094	3,354	21,152	157.8	...	30.97	1.80	8.44	5
2.4906	5.2601	27.680	0.3972	0.370	3,709	4,009	20,965	153.8	1.35748	38.11	1.40	7.80	6
2.4906	5.2601	27.398	0.3880	0.361	3,698	4,001	20,929	145.9	1.35373	38.11	1.32	...	7
2.4906	5.2601	26.3	0.3914	0.364	3,685	3,987	20,878	135.8	1.342	38.11	...	...	8
0.9670	13.550	...	0.2484	0.177	...	321	...	91	...	2.39	12.50	74.20	37
1.5194	8.569	(58.3)	0.1991	0.153	...	...	...	248	...	...	...	...	38
1.1764	11.050	(72.7)	0.254	0.192	621	672	...	236	...	(7.2)	4.30	45.50	39
1.0000	13.089	...	0.241	0.171	...	...	...	92	...	...	...	...	40
0.0696	188.679	...	3.408	2.42	273	324	...	192	...	2.39	4.00	74.20	41
1.1047	11.848	...	0.2188	0.156	...	...	...	92	...	...	...	...	42
0.9672	13.532	...	0.2482	0.177	...	...	...	86	...	...	...	...	43
0.6220	...	175.44	0.4446	0.332	...	...	...	970.3	1.3330	...	...	...	44

表 42-1 わが国の天然ガスの組成例(ガス井ガス)

ガス田	中 央 領 土										東 部 領 土										東 部 領 土										東 部 領 土									
	井	NK-3	NK-2	SK-8	SK-7B	SK-1	SK-1	SK-7D	SK-6D	R3	SK-1	SK-2	海井 130	海井 134	海井 43	海井 126	SK-8	SK-9	井	NK-3	NK-2	SK-8	SK-7B	SK-1	SK-1	SK-7D	SK-6D	R3	SK-1	SK-2	海井 130	海井 134	海井 43	海井 126	SK-8	SK-9				
深 度 (m)	835	1,863	905	1,253	1,772	1,434	2,146	2,694	1,100	1,040	1,578	940	1,150	1,571	1,746	1,696	1,818	井	NK-3	NK-2	SK-8	SK-7B	SK-1	SK-1	SK-7D	SK-6D	R3	SK-1	SK-2	海井 130	海井 134	海井 43	海井 126	SK-8	SK-9					
層 名	西山層	推谷層	西山層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層	西山層	推谷層			
組 成 (mol.%)	CH ₄	99.01	85.70	99.26	98.87	84.69	96.41	95.19	82.62	99.4	99.26	90.78	98.1	96.4	92.6	92.6	88.31	89.98	CH ₄	99.01	85.70	99.26	98.87	84.69	96.41	95.19	82.62	99.4	99.26	90.78	98.1	96.4	92.6	92.6	88.31	89.98				
	C ₂ H ₆	0.05	8.12	0.15	0.17	7.09	2.22	2.53	8.38	0.3	0.30	6.13	0.9	2.2	4.2	4.4	6.54	5.71	C ₂ H ₆	0.05	8.12	0.15	0.17	7.09	2.22	2.53	8.38	0.3	0.30	6.13	0.9	2.2	4.2	4.4	6.54	5.71				
	C ₃ H ₈	0.01	3.15	0.01	0.05	3.69	0.08	1.06	4.50	Tr.	0.14	1.99	Tr.	Tr.	1.1	1.3	2.93	2.32	C ₃ H ₈	0.01	3.15	0.01	0.05	3.69	0.08	1.06	4.50	Tr.	0.14	1.99	Tr.	Tr.	1.1	1.3	2.93	2.32				
	i-C ₄ H ₁₀	0.01	0.56	—	0.02	0.62	0.14	0.22	0.90	—	0.02	0.36	Tr.	0.1	0.4	0.4	0.58	0.46	i-C ₄ H ₁₀	0.01	0.56	—	0.02	0.62	0.14	0.22	0.90	—	0.02	0.36	Tr.	0.1	0.4	0.4	0.58	0.46				
	n-C ₄ H ₁₀	—	0.93	—	0.01	2.03	0.06	0.32	1.61	—	0.03	0.43	Tr.	Tr.	0.4	0.4	0.90	0.75	n-C ₄ H ₁₀	—	0.93	—	0.01	2.03	0.06	0.32	1.61	—	0.03	0.43	Tr.	Tr.	0.4	0.4	0.90	0.75				
	i-C ₅ H ₁₂	—	0.27	—	0.01	0.45	0.05	0.12	0.57	—	0.02	0.12	—	—	—	—	0.28	0.25	i-C ₅ H ₁₂	—	0.27	—	0.01	0.45	0.05	0.12	0.57	—	0.02	0.12	—	—	—	—	—	—	—			
	n-C ₅ H ₁₂	—	0.22	—	Tr.	0.30	0.02	0.09	0.46	—	Tr.	0.66	—	—	—	—	0.21	0.18	n-C ₅ H ₁₂	—	0.22	—	Tr.	0.30	0.02	0.09	0.46	—	Tr.	0.66	—	—	—	—	—	—	—			
	C ₆ H ₁₄ + C ₈ H ₁₈ + C ₁₀ H ₂₂ + CO ₂	—	0.16	—	Tr.	0.27	Tr.	0.03	0.41	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.34	C ₆ H ₁₄ + C ₈ H ₁₈ + C ₁₀ H ₂₂ + CO ₂	—	0.16	—	Tr.	0.27	Tr.	0.03	0.41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
	N ₂	0.85	0.89	0.58	0.87	0.66	1.02	0.43	0.48	0.3	Tr.	—	0.9	0.9	0.4	0.3	—	—	N ₂	0.85	0.89	0.58	0.87	0.66	1.02	0.43	0.48	0.3	Tr.	—	0.9	0.9	0.4	0.3	—	—				
	H ₂ S	0.07	—	—	—	—	0.01	0.01	0.07	—	—	0.13	0.1	0.3	0.4	0.2	—	—	H ₂ S	0.07	—	—	—	—	0.01	0.01	0.07	—	—	0.13	0.1	0.3	0.4	0.2	—	—				
計	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	計	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00				

(注) () 内の数字は推定

(石油鉱業便覧 1963)

表 42-2 わが国の天然ガスの組成例(油田ガスと油井ガス)

油 田	八 幡 嶺							中 川							東 部 領 土							東 部 領 土															
	井	八 幡 150	高 野 160	外 堀 川 105	外 堀 川 107	外 堀 川 114	SK30	SK3	SK13	海 井 145	SK-1	井	八 幡 150	高 野 160	外 堀 川 105	外 堀 川 107	外 堀 川 114	SK30	SK3	SK13	海 井 145	SK-1	井	八 幡 150	高 野 160	外 堀 川 105	外 堀 川 107	外 堀 川 114	SK30	SK3	SK13	海 井 145	SK-1				
深 度 (m)	250	1,020	1,243	1,456	1,417	1,735	722	1,034	1,487	835	1,924	深 度 (m)	250	1,020	1,243	1,456	1,417	1,735	722	1,034	1,487	835	1,924	深 度 (m)	250	1,020	1,243	1,456	1,417	1,735	722	1,034	1,487	835	1,924		
層 名	推谷層 (VII)	船川層 (VII)	外川層 (VII)	外川層 (IX)	外川層 (X)	外川層 (XI)	天徳寺層 (II)	船川層 (V)	船川層 (XII)	寺泊層 (Ic)	七 谷 層 (GI)	層 名	推谷層 (VII)	船川層 (VII)	外川層 (VII)	外川層 (IX)	外川層 (X)	外川層 (XI)	天徳寺層 (II)	船川層 (V)	船川層 (XII)	寺泊層 (Ic)	七 谷 層 (GI)	層 名	推谷層 (VII)	船川層 (VII)	外川層 (VII)	外川層 (IX)	外川層 (X)	外川層 (XI)	天徳寺層 (II)	船川層 (V)	船川層 (XII)	寺泊層 (Ic)	七 谷 層 (GI)		
ガ ス 組 成 (vol.%)	CH ₄	76.00	74.4	76.7	78.1	82.7	69.1	71.43	66.60	62.89	95.5	※92.06	※92.06	76.00	74.4	76.7	78.1	82.7	69.1	71.43	66.60	62.89	95.5	CH ₄	76.00	74.4	76.7	78.1	82.7	69.1	71.43	66.60	62.89	95.5	※92.06	※92.06	
	C ₂ H ₆	0.98	11.5	11.9	10.7	8.7	15.8	8.58	9.40	12.16	2.3	5.62	14.35	0.98	11.5	11.9	10.7	8.7	15.8	8.58	9.40	12.16	2.3	C ₂ H ₆	0.98	11.5	11.9	10.7	8.7	15.8	8.58	9.40	12.16	2.3	5.62	14.35	
	C ₃ H ₈	0.24	2.4	2.3	4.7	4.7	10.4	12.41	7.80	11.84	0.2	1.54	4.85	0.24	2.4	2.3	4.7	4.7	10.4	12.41	7.80	11.84	0.2	C ₃ H ₈	0.24	2.4	2.3	4.7	4.7	10.4	12.41	7.80	11.84	0.2	1.54	4.85	
	i-C ₄ H ₁₀	0.73	1.5	1.2	1.1	1.2	1.0	1.90	2.30	3.80	0.5	0.17	0.77	0.73	1.5	1.2	1.1	1.2	1.0	1.90	2.30	3.80	0.5	i-C ₄ H ₁₀	0.73	1.5	1.2	1.1	1.2	1.0	1.90	2.30	3.80	0.5	0.17	0.77	
	n-C ₄ H ₁₀	—	2.3	1.4	1.7	1.3	2.5	3.82	3.80	5.02	0.3	0.30	0.89	—	2.3	1.4	1.7	1.3	2.5	3.82	3.80	5.02	0.3	n-C ₄ H ₁₀	—	2.3	1.4	1.7	1.3	2.5	3.82	3.80	5.02	0.3	0.30	0.89	
	i-C ₅ H ₁₂	—	1.1	1.3	1.1	1.1	0.8	0.84	2.30	1.54	0.2	0.05	0.15	—	1.1	1.3	1.1	1.1	0.8	0.84	2.30	1.54	0.2	i-C ₅ H ₁₂	—	1.1	1.3	1.1	1.1	0.8	0.84	2.30	1.54	0.2	0.05	0.15	
	n-C ₅ H ₁₂	—	0.8	—	0.9	—	Tr.	0.70	1.97	1.97	0.2	0.19	0.23	—	0.8	—	0.9	—	Tr.	0.70	1.97	1.97	0.2	n-C ₅ H ₁₂	—	0.8	—	0.9	—	Tr.	0.70	1.97	1.97	0.2	0.19	0.23	
	C ₆ H ₁₄ + C ₈ H ₁₈ + C ₁₀ H ₂₂ + CO ₂	—	—	—	—	—	—	0.32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.32	—	—	—	—	C ₆ H ₁₄ + C ₈ H ₁₈ + C ₁₀ H ₂₂ + CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	N ₂	20.80	1.0	1.2	0.5	0.3	0.4	—	7.80	2.61	—	—	—	—	20.80	1.0	1.2	0.5	0.3	0.4	—	7.80	2.61	—	N ₂	20.80	1.0	1.2	0.5	0.3	0.4	—	7.80	2.61	—	—	—
	H ₂ S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	H ₂ S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

(注) ※ 第1段セパレーターからのガス組成で セパレーター圧力は52 atmg 同温度は21°C ※※ 第2段セパレーターからのガス組成で セパレーター圧力は7.8 atmg 同温度は13°C ※※※ 第3段セパレーターからのガス組成で セパレーター圧力は1.0 atmg 同温度は11.5°C

(石油事典 1969)

の重炭化水素が 空気と接触しないうちに 温度上昇によって熱分解を起こして析出した炭素粒子が 高温燃焼ガスによって灼熱・発光するためである。これは製造ガスによる都市ガスよりも 天然ガスや LP ガスに多くみられる現象である。この赤黄色の炎が低温の物体に接触すると 温度低下のため 炭素粒子は物体の表面に煤となって付着する。煤の粒子の大きさは100~2,000Å (オンゲストローム 10⁻⁸cm)といわれている。

図41はある火口径の赤火炎がガス流量によってどのように変わるかをわかり易く示したものである。ガス流量の小さい時はガス噴出は層流状態で 流速の増加とともに炎も長くなる。このような炎を層流拡散炎ともいう。

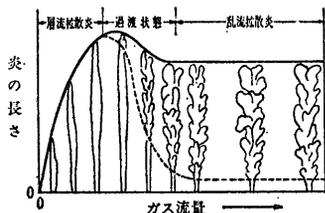
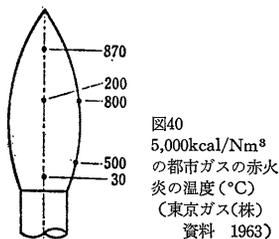


図41 赤火炎のガス流量による変化 (東京ガス(株) 資料 1963)

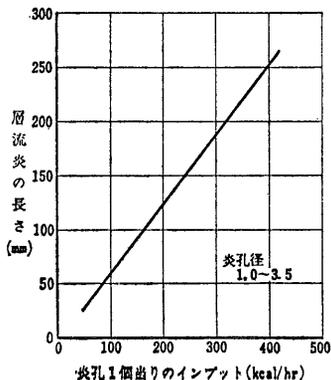


図42 赤火層流炎の長さのインプットによる変化 (天然ガスの場合) (東京ガス(株)資料 1963)

表43 海外主要ガス田のガス(生ガス)組成の例

ガス田		Hugoton	Deep Lake	Leduc	Cortemaggiore	Lacq	Groningen*	Iffassi R'Mel	Sui
国		アメリカ	アメリカ	カナダ	イタリア	フランス	オランダ	アルジェリア	パキスタン
深 度 (m)		900	2,100	1,500	1,300	4,000+	3,000+	2,000 ~ 2,500	1,100 ~ 1,500
ガス組成 (vol.%)	CH ₄	71.51	98.50	72.88	95.9	70.25	81.80	79.5	88.42
	C ₂ H ₆	7.0	0.87	9.97	1.4	3.21	2.80	7.5	0.98
	C ₃ H ₈	4.4	0.17	5.09	0.4	0.91	0.38	2.5	0.26
	i-C ₄ H ₁₀	0.29	0.04	0.72	0.2	0.65	0.22	5.0	0.37
	n-C ₄ H ₁₀	0.70	0.02	1.76					
	i-C ₅ H ₁₂	0.02	0.01	0.99	0.1	0.30	0.22	5.0	0.37
	n-C ₅ H ₁₂								
	C ₆ H ₁₄ +CO ₂	—	0.08	0.46	—	—	0.22	—	—
	N ₂	15.5	—	0.72	0.2	9.65	0.80	—	7.35
	H ₂ S	—	—	7.41	1.8	0.24	14.00	—	2.46
He	0.58	—	—	—	—	—	—	0.16**	
計		100.00	100.00	100.00	100.0	100.00	100.00	100.00	100.00
比重 (air=1)		0.705	0.567	0.758	0.580	0.793	0.64	0.804	0.65
発熱量 (kcal/Nm ³)		8,860	9,110	10,600	9,050	8,335	7,980	10,400	8,310

(注) * 低温(-12°C, 74atmg.)で液化分を除去したガス

** H₂S の他微量の有機いおう分をふくむ

【参考】 特異な組成のガスの例

○ H₂S の多いガスの例

Grossfield (カナダ アルバータ州) H₂S=38.1%

Panther River (カナダ アルバータ州) H₂S=37.0%

Masjid-i-Sulaiman (イラン) H₂S=32%

CH₄=68%

○ N₂, CO₂ の多いガスの例 (いずれも西パキスタンのガス田)

	Mari	Uch
CH ₄	66.2%	27.3%
C ₂ H ₆	0.2	0.7
C ₃ H ₈	—	0.3
C ₄ H ₁₀ +	—	0.3
N ₂	19.5	25.2
CO ₂	14.1	46.2

(石油事典 1969)

表44 低級炭化水素およびその他のガスの燃焼に関する諸性質

名称	分子式	比重(空気=1)	発 熱 量 ⁽¹⁾				燃 焼 方 程 式	理論空気量 (Nm ³ /Nm ³)		理論燃焼ガス量 (Nm ³ /Nm ³)			着火温度 (°C)		爆発限界 ⁽²⁾ (容積%)		
			kcal/kg		kcal/Nm ³			O ₂	空気	CO ₂	H ₂ O	N ₂	合計	酸素中	空気中	下限	上限
			総発熱量	真発熱量	総発熱量	真発熱量		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
一酸化炭素	CO	0.967	2420	2420	3020	3020	2 CO + O ₂ = 2 CO ₂	0.5	2.38	1	0	1.88	2.88	590	610	12.5	75.0
水素	H ₂	0.0695	33910	28570	3050	2570	2 H ₂ + O ₂ = 2 H ₂ O	0.5	2.38	0	1	1.88	2.88	450	530	4.15	75.0
メタン	CH ₄	0.555	13280	11930	9520	8550	CH ₄ + 2 O ₂ = CO ₂ + 2 H ₂ O	2	9.52	1	2	7.52	10.52	645	645	4.9	15.4
アセチレン	C ₂ H ₂	0.906	12030	11620	14090	13600	2 C ₂ H ₂ + 5 O ₂ = 4 CO ₂ + 2 H ₂ O	2.5	11.90	2	1	9.40	12.40	—	335	1,580.5	3
エチレン	C ₂ H ₄	0.975	12130	11360	15290	14320	C ₂ H ₄ + 3 O ₂ = 2 CO ₂ + 2 H ₂ O	3	14.28	2	2	11.28	15.28	485	540	3.2	34.0
エタン	C ₂ H ₆	1.049	12410	11330	16820	15370	2 C ₂ H ₆ + 7 O ₂ = 4 CO ₂ + 6 H ₂ O	3.5	16.7	2	3	13.2	18.2	500	530	2.5	15.0
プロピレン	C ₃ H ₆	1.481	11770	11000	22540	21070	2 C ₃ H ₆ + 9 O ₂ = 6 CO ₂ + 6 H ₂ O	4.5	21.4	3	3	16.9	22.9	420	455	2.2	9.7
プロパン	C ₃ H ₈	1.550	12040	11070	24320	22350	C ₃ H ₈ + 5 O ₂ = 3 CO ₂ + 4 H ₂ O	5	23.8	3	4	18.8	25.8	490	510	2.2	7.3
ブチレン	C ₄ H ₈	1.937	11630	10860	29110	27190	C ₄ H ₈ + 6 O ₂ = 4 CO ₂ + 4 H ₂ O	6	28.6	4	4	22.6	30.6	400	445	—	—
正ブタン	C ₄ H ₁₀	2.091	11840	10920	32010	29510	2 C ₄ H ₁₀ + 13 O ₂ = 8 CO ₂ + 10 H ₂ O	6.5	30.9	4	5	24.4	33.4	460	490	1.9	8.5
イソブタン	C ₄ H ₁₀	2.064	11820	10890	31530	29050	2 C ₄ H ₁₀ + 13 O ₂ = 8 CO ₂ + 10 H ₂ O	6.5	30.9	4	5	24.4	33.4	460	490	1.9	8.5
—	C _m H _n	—	—	—	—	—	C _m H _n + (m + n/4) O ₂ = m CO ₂ + n/2 H ₂ O	m + n/4	4.76(m + n/4)	m	n/2	3.76(m + n/4)	4.76m + 1.44n	—	—	—	—

(都市ガス工業 1968)

速度が増すと それにほぼ比例して ガスと空気との接触をうながす拡散混合が増加するため 炎の長さはほぼ一定になる。 乱流拡散炎の長さは ほぼ次の式で定まる。

$$L - \beta = (60 \sim 70) \times d$$

ここに L: 炎の全長 (cm)
 β: 火口付近の層流部の長さ (cm)
 d: 火口の直径 (cm)

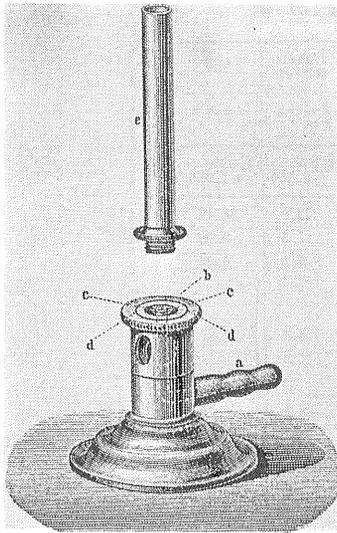


図43-1
実験用ブンゼンバーナー
a : ガス管とりつけ部
b : ノズル
c : バーナー管接続部
d : 一次空気ダンパ
e : バーナー管
(SCHMIDT 1907)

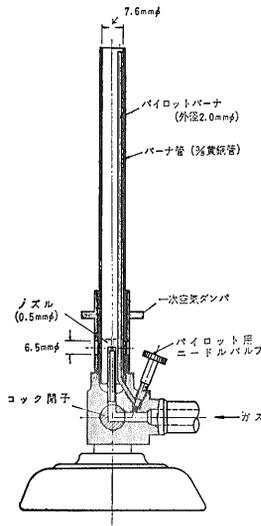


図43-2
実験用ブンゼンバーナー
(パイロットバーナー付)
(都市ガス工業 1968)

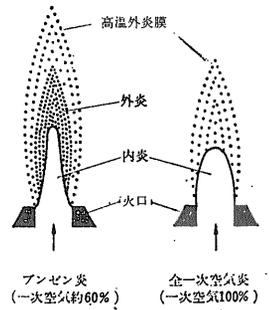


図44 ブンゼン炎と全一次空気炎
(東京ガス(株)資料 1968)

これ以上ガスの噴出速度を増すと 拡散速度がそれについてゆけず 炎は火口を離れて 吹き飛ばされてしまう。

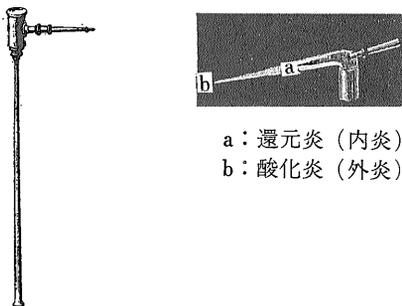
B. ブンゼン式

ガスをノズルから噴出させ そのエネルギーで燃焼に必要な空気の一部 すなわち一次空気を空気孔から吸いこませ 混合管のなかで両者をよく混合させてから火口で燃焼させる。この際 さらに燃焼に必要な空気は 周囲の大気から拡散によってとりこまれる。この燃焼方式をブンゼン式といい 工業用燃焼器具の多くはこの方式によるものである。そのもっとも簡単なものは 理化学実験でよく使われるブンゼン灯 (Bunsen burner, 図43) である。

ブンゼン式燃焼による炎は 内炎 (innere Flamme) と外炎 (äussere Flamme) という2つの判然と区別された領域と その外周をとりまく目に見えない高温外炎膜とからなっている (図44)。この方式の燃焼では まず

次空气中の酸素がガス中の可燃成分と化合する。その初期反応が行われるところが内炎で 不安定な中間生成物である炭素粒子や CO H_2 アルデヒド およびアルコールなどを含み これらが還元性をもっているところから 内炎は還元炎と呼ばれることもある。いわば不完全燃焼のため分離された炭素粒子が灼熱されて光輝を放つので 内炎は光輝は著しいが 温度はそれほど高くない。外炎においては 二次空気の拡散によって燃焼が完全に行われて もはや炭素粒子をとどめない。したがって 光輝は弱いが 温度は炎のなかでもっとも高い。外炎には熱せられた酸素があつて 酸化性があるところから 外炎は酸化炎と呼ばれることもある。

この内炎の還元性と外炎の酸化性を利用したのが 金属の簡便な定性分析法としてよく使われる吹管分析 (blowpipe analysis) である (図45)。これは白金線の端に硼砂末をつけて熱し いわゆる硼砂球を造り これに金属化合物をつけて 酸化炎または還元炎内で熱すると 金属によっては特有の著しい色を呈することを利用したもので 吹管は酸化炎または還元炎を硼砂球に吹きつけるのに使われる。この発色反応を硼砂球反応 (borax bead reaction) といい それによる色は表45に示すとおりである。



a : 還元炎 (内炎)
b : 酸化炎 (外炎)

図45 吹管と吹管分析
a : 還元炎 (内炎)
b : 酸化炎 (外炎)

炎は可燃物が気体であるか または熱せられて可燃ガスを生ずる場合にできるのであつて 固体のまま燃える場合には炎はできない。木炭の燃焼がそれであるが わずかに炎を伴っているのは 熱せられて生じた可燃ガスが燃えている部分である。石油や蠟燭の炎では 内炎の内側に炎心 (Kern der Flamme) と呼ばれる暗色

の部分がある。これは熱せられて生じた未燃焼の可燃ガスからなり 細い管でこれを炎外に導いて点火すると焼える。

ブンゼン式燃焼の場合 一次空気が少なかったり 二次空気のとり入れが十分でないと 炭化水素の熱分解によって遊離された炭素粒子が白熱状態となり 内炎の先端に赤黄色の部分が見られる。これをイエローチップ (yellow tip) という。また 供給空気の不足はモヤモヤした炎をつくり 不完全燃焼を起こし その結果 煤や一酸化炭素が廃気中に含まれてくる。

ブンゼン式燃焼は 赤火式燃焼に比べて 反応が迅速で しっかりした短い高温の炎が得られる。図44は 5,000kcal/Nm³ の都市ガス (比重: 0.5) のブンゼン炎の温度分布の1例である。

ブンゼン式燃焼のうち 一次空気比がおよそ 0.4 以下で 内炎がはっきり区別できない燃焼方式を セミブンゼン式燃焼として区別することもある。

iii) 全一次式燃焼

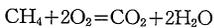
燃焼に必要な実気量の 100%またはそれ以上を一次空気として含むガス・空気混合気における燃焼を全一次式燃焼という。これはまたプラスト式燃焼ともいわれ ブンゼン式燃焼よりも一次空気を多く含む燃焼方式のほか 赤外線をおもに発生する燃焼器具などによる燃焼がこれに含まれる。この方式の燃焼は内炎だけで行われ 二次空気は不要である。図44の右図はこの方式の燃焼による炎の構造で ブンゼン炎の外炎に相当する区域はなく 肉眼では内炎しか見えない。炎の温度はブンゼン式よりも多少高くなる。

2) 理論酸素量と理論空気量

あるガス 1 Nm³ を完全に燃焼させるための最少酸素量および最小空気量を それぞれ理論酸素量および理論空気量という。理論酸素量はガスの組成から化学量論的に簡単に算出できる。一般にガスの発熱量 1,000 kcal/Nm³ 当りの理論空気量はおよそ 0.9Nm³/Nm³ でほとんど変化がない。

例題として CH₄ および C₃H₈ (プロパン) の理論酸素量と理論空気量を求めてみよう。

CH₄ の燃焼反応は次の式で示される。



この式は 1容の CH₄ と 2量の O₂ とが燃焼して 1容の CO₂ と 2容の水蒸気とができることを示してい

表45 硼砂球反応による発色

金 属	酸 化 炎	選 元 炎
ニ ッ ケ ル	褐	灰 色 不 透 明
コ バ ル ト	青	青
ク ロ ム	緑	緑
マ ン ガ ン	紫	灰 色 不 透 明
鉄	黄	暗 緑
銅	青	赤

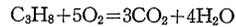
(亀高・櫻本 1950)

る。したがって 理論空気量は 2Nm³/Nm³ である。一方 空気中にはおよそ 21 vol. %の酸素が含まれているので この場合の理論空気量は

$$(100/21) \times 2 = 9.52 (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

となる。

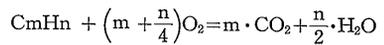
また C₃H₈ の燃焼反応は次の式で示される。



この式から CH₄ の場合と同様にして理論空気量を求めると 23.81 Nm³/Nm³ となる。

このように C₃H₈ の理論酸素量および理論空気量は CH₄ のその2.5倍にもなるが これは家庭燃料として好ましいことではない。

参考までに記しておくとして m個の C と n個の H とからなる炭化水素 CmHn の完全燃焼反応は 次の式で示される。



また 混合ガスの理論空気量は 次の式で求められる。

$$L_o = \frac{1}{21} \{ a \cdot (O_2)_a + b \cdot (O_2)_b + \dots - (O_2) \}$$

ここに L_o: 混合ガスの理論空気量 (Nm³/Nm³)

a b ……: 成分ガスの vol. %

(O₂)_a, (O₂)_b, ……: 成分ガスの理論酸素量

(O₂): 混合ガス中の O₂ vol. %

表46は宮崎県日南ガス田北郷町 R 1 号井のガスの理論空気量の計算例である。

表46 北郷町 R1 号井のガスの理論空気量の計算例

組	成	理論酸素量 × vol. %
He	0.004 vol. %	_____
H ₂	0.014 "	0.5 × 0.014 = 0.007
O ₂	0.19 "	-0.19
N ₂	1.21 "	_____
CO ₂	35.18 "	_____
CH ₄	63.14 "	2.0 × 63.14 = 126.28
C ₂ H ₆	0.22 "	3.5 × 0.22 = 0.77
C ₃ H ₈	0.00n "	_____
H ₂ S	22.9 ppm	_____
		21) 126.867
		理論空気量 = 6.04(Nm ³ /Nm ³)

3) 燃焼生成物

成分中の可燃性ガスが炭化水素 水素 およびCO(一酸化炭素) からなるガスが燃焼すると 成分中の C は CO₂ に また H は H₂O になる。おもな単体ガスの理論燃焼ガス量は 表44の右の方に示されている。また都市ガスのような混合ガスの空気中での燃焼生成物は次の式で求められる。

$$\begin{aligned}
 (\text{CO}_2)_v &= [\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{CH}_4] + m[\text{CmHn}] \\
 (\text{H}_2\text{O})_o &= [\text{H}_2] + 2[\text{CH}_4] + n/2[\text{CmHn}] \\
 (\text{N}_2)_v &= [\text{H}_2] + 0.79A
 \end{aligned}$$

ここに (CO)_v (H₂O)_v および (N₂)_v は 1Nm³ の混合ガスを完全燃焼させた時のそれぞれの生成ガスの体積(Nm³) [CO₂] [CO] [CH₄] [CmHn] [H₂] および [N₂] は混合ガス 1Nm³ 中のそれぞれの成分ガスの体積 (Nm³) また A は混合ガスの理論空気量(Nm³/Nm³) である。表47は北郷町 R1 号井のガス 1Nm³ が空気中で完全燃焼した場合の燃焼生成物の計算例である。

4) 発熱量

可燃性ガス 1Nm³ が完全燃焼する際に発生する熱量をそのガスの発熱量という。この際 H₂ とか炭化水素中の水素原子は 燃焼によって H₂O となるが 高温のためこれは水蒸気の状態にある。発生した熱量からこの水蒸気のもつ蒸発熱を引いたものを真発熱量といい 蒸発熱を含めたものを総発熱量という。総発熱量と真発熱量との差は ガス中の水素原子%が異なるため 一定でない。CO は H を含まないので 燃焼の際 H₂O を発生せず 総発熱量と真発熱量とは同一である。混合ガスの発熱量は各成分の含有量と発熱量との積の総和として求められる。なお 発生する水蒸気 1Nm³ の蒸発熱は 480 kcal である。おもな可燃性単体ガスの発熱量は表43に示されている。

参考までに北郷町 R1 号井のガスについて発熱量を求めると 表48のようになる。

表47 北郷町 R1 号井のガスの燃焼生成物の計算例

成分	含有量 ④ (Nm ³ /Nm ³)	燃焼反応式	CO ₂ (Nm ³)		H ₂ O(Nm ³)		N ₂ (Nm ³)
			① 生成比	④×① 生成量	③ 生成比	④×③ 生成量	
He	0.00004						理論空気量 6.04Nm ³ 中の N ₂ 6.04 × 0.79 = 4.7716(Nm ³)
H ₂	0.00014	H ₂ + 1/2O ₂ = H ₂ O			1	0.00014	
O ₂	0.019						0.0121
N ₂	0.0121						
CO ₂	0.3518			0.3518			
CH ₄	0.6314	CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + H ₂ O	1	0.6314	1	0.6314	
C ₂ H ₆	0.0022	C ₂ H ₆ + 7/2O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O	2	0.0044	3	0.0066	
C ₃ H ₈	0.0000n						
H ₂ S	0.0000229*						
小 計				0.9876		0.63814	4.7837
全 計							6.40944Nm ³

* H₂S は使用前に除去されるので計算に入れてない

5) 着火温度

可燃性ガスが燃焼を持続し得る最低温度を着火温度 (Ignition temperature, 発火温度ともいう) という。燃焼を行うには 可燃性ガスと酸素または空気とを接触させると同時に これらの混合ガスがある一定温度以上に達していることが必要である。着火温度は ガスが加熱されて酸化反応によって発生する熱量と 外気に放散される熱量との平衡によってきまるもので ガスの周囲の条件およびガスと酸素または空気との混合割合によって変わる。おもな単体ガスの空気中での着火温度は表43に示されている。酸素中における着火温度は 空気中により 大体20~50°C 低くなり。一般に ガスの燃焼は発熱反応であるため 一度反応が起こると その熱が周囲のガス—空気混合気を着火温度以上に熱するため 反応は次々に伝播して行く。

6) 燃焼限界および爆発限界

可燃性ガスは 純粋の状態では燃焼あるいは爆発を起こさないが 酸素または空気とある割合で混合すると燃焼あるいは爆発を起こすようになる。たとえばある可燃性ガスを空気で薄めていくと はじめは 火がつかないが ある混合割合になると火がつく。つまり燃焼するようになる。このように 燃焼し得る可燃性ガスと酸素または空気との混合割合の限界を燃焼限界 (burning limit) という。その限界は混合気中の可燃性ガスの体積百分率をもって表わされ 燃焼し得る最高濃度を上限 また最低濃度を下限という。この燃焼限界内で爆発的に燃焼する範囲ととくに爆発限界 (explosion limit) という。おもな単体ガスの空気中における爆発限界は表44に示されている。

混合ガスの大体の爆発限界は 次の LeCHATELIER の実験式によって求められる。

$$L = \frac{100}{\frac{R_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \frac{P_3}{N_3} + \dots}$$

ここに L: 混合ガスの爆発限界 (上限または下限)

$N_1 N_2 N_3 \dots$: それぞれの可燃性ガスの爆発限界 (上限または下限)

$P_1 P_2 P_3 \dots$: 混合ガス中のそれぞれのガスの分圧または容積百分率

次に 不活性ガスおよび空気を含まない混合ガスの爆発限界を求める例を示しておこう。混合ガスの組成を CH_4 (40%) H_2 (40%) および CO (20%) とすると表43および LeCHATELIER の式から

表48 北郷町 R 1 号井のガスの発熱量の計算例

成分	含有量 x (Nm ³ /Nm ³)	総発熱量 H ₀ (Kcal/Nm ³)	H ₀ × x (kcal)	発生する 水蒸気 ²⁾ (Nm ³)
He	0.00004			
H ₂	0.00014	3,050	0.427	0.00014
O ₂	0.0019			
N ₂	0.0121			
CO ₂	0.3518			
CH ₄	0.6314	9,520	6,010.928	1.2628
C ₂ H ₆	0.0022	16,820	37.004	0.0066
C ₃ H ₈	0.0000 n			
H ₂ S ¹⁾	0.0000229			
		総発熱量	6,048.359	1.26954
			-609.3792	× 480
		真発熱量	5,438.9798	609.3792

- 1) H₂S は使用前に除去されるので計算に入れてない
2) 表45参照 1容のガスの燃焼でできる水蒸気量に乘じたもの

$$L_{\text{上限}} = \frac{100}{\frac{40}{15.4} + \frac{40}{75.0} + \frac{20}{75.0}} = 28.9(\%)$$

$$L_{\text{下限}} = \frac{100}{\frac{40}{4.9} + \frac{40}{4.15} + \frac{20}{75.0}} = 5.15(\%)$$

不活性ガスを含む混合ガスの爆発限界を求めるには 図46のようなグラフが必要である。その例題として CO_2 (6.2%) CO (27.3%) H_2 (12.4%) CH_4 (0.7%) および N_2 (53.4%) という組成の発生炉ガスの爆発限界を求めてみよう。図46を使う関係から この成分ガスを $CO-CO_2$ H_2-N_2 および CH_4 の3組に分けて それぞれの組の爆発限界を求めると 次のようになる。

不活性ガスの 可燃性ガスに 対する比	容積合計 %	爆発限界	
		上限	下限
27.3%CO+6.2%CO ₂	$\frac{CO_2}{CO} = 0.23$	33.5	70.0 16.0
12.4%H ₂ +53.4%	$\frac{N_2}{H_2} = 4.30$	65.8	76.0 23.0
0.7%CH ₄	0	0.7	15.4 4.9

これから次のようにして混合ガスの爆発限界が求められる。

$$L_{\text{上限}} = \frac{100}{\frac{33.5}{70.0} + \frac{65.8}{76.8} + \frac{0.7}{15.4}} = 72.5(\%)$$

$$L_{\text{下限}} = \frac{100}{\frac{33.5}{16.0} + \frac{65.8}{23.0} + \frac{0.7}{4.9}} = 19.6(\%)$$

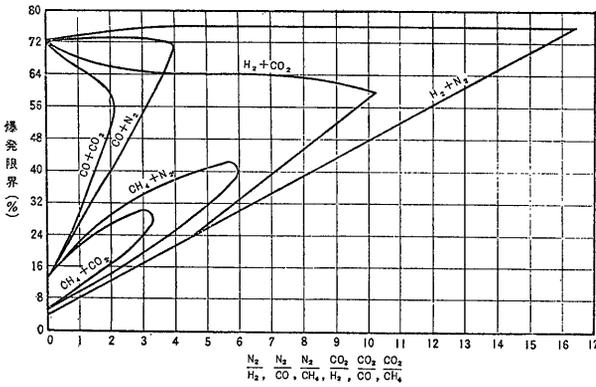


図46 H₂ CO および CH₄ を N₂ または CO₂ と混合した場合の爆発限界 (都市ガス工業 1968)

不活性ガスのほかに酸素を含む混合ガスの爆発限界を求めるのは少し複雑であるが、原理的には上の例と変わらない。例題として CO₂ (9.5%) C₂H₄ (5.4%) C₃H₆ (3.0%) O₂ (1.6%) CO (9.5%) H₂ (28.6%) CH₄ (24.6%) および N₂ (17.8%) という組成の都市ガスの爆発限界を求めてみよう。それにはまず N₂ および CO₂ という不活性ガスをそれぞれ H₂ および CO と組合せてから図46を使うとよい。

$$1/(14.03+1) \sim 1/(2.02+1) = 6.65\% \sim 33.1\% \text{ となる。}$$

7) 火炎温度

可燃性ガスの燃焼によって生ずる炎の温度は、空気との混合状態および周囲の状況などによって異なる。この火炎温度の測定ははなはだ困難であるところから、理論的に求められる火炎温度がしばしば用いられる。この理論火炎温度 (theoretical flame temperature) は、ガスが理論空気量で燃焼した時発生した熱が全部燃焼生成物を熱するのに用いられるとした場合の温度である。このようにこれは熱損失をまったく考えない場合の温度であるから、実際の火炎温度よりかなり高い値となる。

図47は 5,000 kcal/Nm³ の都市ガス (比重 0.5) のブレンゼン燃焼炎の温度分布の実測例で、最高温度約 1,700°C となる位置は、内炎錐の尖端のわずか上方である。この火炎温度が最高になる点は、ほぼ一次空気量が理論空気量となる点に当る。一方、同じ条件下の理論火炎温度は約 2,055°C であり、実際の最高温度をおよそ 350°C も上まわっている。また、図48は天然ガスのブレンゼン炎の温度分布の実測例で、最高温度 1,863°C となる位置は、やはり内炎錐の尖端の少し上方である。

理論火炎温度 T_{th} は次の式で計算できる。

$$T_{th} = \frac{HI+Q}{\sum G \cdot C_p}$$

ここに C_p : 0°C と T_{th} °C との間の平均比熱 kcal/Nm³・°C
 HI : 可燃性ガスの真発熱量 kcal/Nm³
 Q : 空気および可燃性ガスの保有熱量 kcal/Nm³
 G : 燃焼生成物の容積 Nm³

この計算に用いられるそれぞれの燃焼生成ガスの平均定圧容積比熱は、表49に示されている。

一例として乾燥しておりかつ 500°C に予熱された空気のなかで CH₄ を理論空気量で完全燃焼させた時の理論火炎温度を求めてみよう。この場合上の式のなかですぐ求められるのは CH₄ の真発熱量 HI で、これは表43から 8,550kcal/Nm³ である。また CH₄ の燃焼反応式は CH₄+2O₂=CO₂+2H₂O で、理論酸素量は 2Nm³/Nm³ であり、理論空気量は 2×(100/21)=9.52(Nm³/Nm³) で、そのなかに含まれる窒素の体積は 7.52Nm³/Nm³ となる。一方、表48から空気の 0°C ~ 500°C 間の平均比熱は 0.32kcal/Nm³ であるから

$$Q = 0.32 \times 9.52 \times 500 = 1,520 \text{ (kcal/Nm}^3\text{)}$$

となる。したがって上の式は

成分	容積 (%) ④	爆発限界		爆発に必要な空気量⑤ (Nm ³ /Nm ³)		④×⑤× $\frac{1}{100}$	
		下限	上限	下限	上限	下限	上限
9.9%CO ₂	19.0	29.0	66.0	2.45	0.515	0.405	0.098
+9.5%CO ($\frac{CO_2}{CO}=1.00$)							
17.8%N ₂	46.4	7.3	73.5	12.7	0.36	5.89	0.167
+28.6%N ₂ ($\frac{N_2}{H_2}=0.62$)							
C ₂ H ₄	5.4	3.2	34.0	30.3	1.94	1.64	0.105
C ₃ H ₆	3.0	2.2	9.7	44.5	12.5	1.34	0.376
CH ₄	24.6	4.9	15.4	19.4	5.50	4.77	1.35
O ₂	1.6	—	—	-4.75	-4.75	-0.076	-0.076
合計	—	—	—	—	—	14.03	2.2

この表のなかで ④×⑤× $\frac{1}{100}$ の合計は、この都市ガス 1Nm³ の爆発に必要な空気量 (Nm³) の上限と下限を示す。すなわち必要な空気量はこの都市ガスの容積の 2.02~14.03 倍である。したがって爆発限界はこの数値に 1 を加えた逆数を求めればよい。すなわち

$$T_{th} = \frac{8,550 + 1,520}{\Sigma G \cdot C_p}$$

となる。ここで C_p は T_{th} の関数であるから まず T_{th} を仮定し 上の式から算出した T_{th} が仮定と一致するまで計算をくり返す必要がある。

いま $T_{th} = 2,300^\circ\text{C}$ と仮定すると 各燃焼生成ガス CO_2 H_2O および N_2 の $0^\circ\text{C} \sim 2,300^\circ\text{C}$ 間の平均比熱は 表48より それぞれ 0.588 0.477 および 0.360 kcal/Nm³・°C となる。したがって

$$\Sigma G \cdot C_p = 1 \times 0.588 + 2 \times 0.477 + 7.52 \times 0.360 = 4.25$$

となる。それ故 $T_{th} = (8,550 + 1,520) / 4.25 = 2,370^\circ\text{C}$ で仮定の $2,300^\circ\text{C}$ より 70°C だけ大きくなる。

次に $T_{th} = 2,400^\circ\text{C}$ と仮定して同様の計算を行うと

$$\Sigma G \cdot C_p = 1 \times 0.590 + 2 \times 0.482 + 7.52 \times 0.362 = 4.28$$

となり T_{th} は $2,353^\circ\text{C}$ で 仮定した $2,400^\circ\text{C}$ より 47°C 小さくなる。したがって 比例配分によって求める理論火炎温度は

$$T_{th} = 2,300 + \frac{100 \times 70}{70 + 47} = 2,360^\circ\text{C}$$

となる。

8) 燃焼速度

火炎面が未燃焼ガスに侵入する速度を燃焼速度 (burning velocity) という。ガスの噴出状態によって 燃焼速度は層流燃焼速度と乱流燃焼速度とに区別されるが

表49 各種ガスの平均定圧容積比熱 (Kcal/Nm³°C latm 0~t°C)

t (°C)	N ₂	O ₂	H ₂ O	CO ₂	空 気
0	0.310	0.312	0.354	0.382	0.311
100	0.311	0.314	0.358	0.406	0.312
200	0.311	0.319	0.362	0.429	0.313
300	0.313	0.324	0.367	0.448	0.315
400	0.315	0.329	0.362	0.464	0.318
500	0.318	0.333	0.378	0.478	0.321
600	0.321	0.337	0.384	0.491	0.324
700	0.324	0.341	0.390	0.502	0.327
800	0.327	0.344	0.396	0.512	0.330
900	0.330	0.348	0.402	0.521	0.333
1,000	0.333	0.350	0.409	0.530	0.336
1,100	0.336	0.353	0.415	0.537	0.339
1,200	0.338	0.355	0.421	0.543	0.341
1,300	0.340	0.357	0.427	0.548	0.343
1,400	0.343	0.359	0.432	0.553	0.346
1,500	0.345	0.361	0.438	0.558	0.348
1,600	0.347	0.363	0.443	0.563	0.350
1,700	0.349	0.364	0.448	0.568	0.352
1,800	0.351	0.366	0.453	0.572	0.354
1,900	0.352	0.367	0.458	0.576	0.355
2,000	0.354	0.368	0.462	0.579	0.357
2,100	0.355	0.369	0.466	0.582	0.358
2,200	0.356	0.370	0.470	0.585	0.359
2,300	0.358	0.371	0.474	0.588	0.361
2,400	0.359	0.372	0.478	0.590	0.362
2,500	0.360	0.373	0.482	0.593	0.363
2,600	0.361	0.374	0.485	0.595	0.364
2,700	0.362	0.375	0.488	0.597	0.365
2,800	0.363	0.376	0.491	0.598	0.366
2,900	0.364	0.377	0.494	0.599	0.367
3,000	0.665	0.378	0.497	0.600	0.368

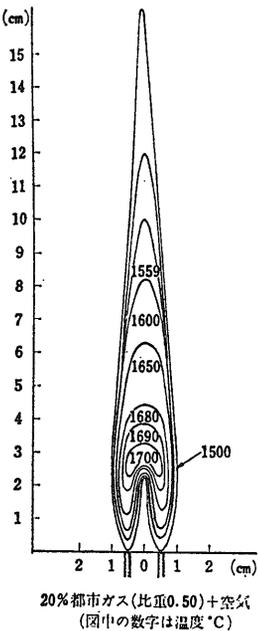
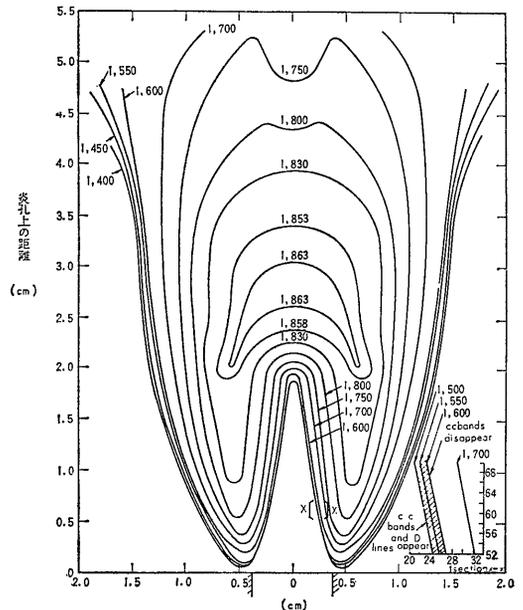


図48
天然ガス (空気中に 8.7%) のベンゼン炎の温度分布
(都市ガス工業 1968)



一般に燃焼速度といえは前者を指す。燃焼速度は可燃性ガスと空気または酸素との混合割合 温度 および圧力などによって 著しく異なってくる。一般に 温度が高くなるほど また圧力が高くなるほど 燃焼速度は大きくなる。

a) 単体ガスの燃焼速度

一般に プンゼン炎の燃焼面は非常になめらかで 静止している。このような場合 ガスは層流燃焼速度 S_b (cm/sec) をもって燃焼している。以下この S_b を燃焼速度と呼ぶことにする。図49におもな単体ガスの燃焼速度の一次空気 (%) に対する変化を示す。本図にみられるように 各単体ガスはそれぞれある一次空気比のところで最大の燃焼速度を示し この比がある値より小さくても また大きくても燃焼速度は小さくなる。各単体ガスでは H_2 が 282cm/sec というたび離れて大きな最大燃焼速度を示すが CH_4 C_2H_6 C_3H_8 および C_4H_{10} などの炭火水素は C_2H_4 (エチレン) の 72 cm/sec という最大燃焼速度を除くと およそ 40cm/sec くらいの最大燃焼速度を示す。

b) 酸素の影響

燃焼反応は可燃性ガスと空気中の酸素との接触によって進行する。したがって 助燃ガス (空気や酸素のように燃焼に関与する不燃性ガス) 中の酸素濃度が大きいほど燃焼速度は大きくなる。図50はおもなガスに対する酸素の影響を示す最大燃焼速度特性図である。

いま M : 助燃ガス中の O_2 の割合を示す数値で $M=0.21$ は空気を意味する

$(S_M)_{max}$: 任意の M の時の最大燃焼速度 (cm/sec)

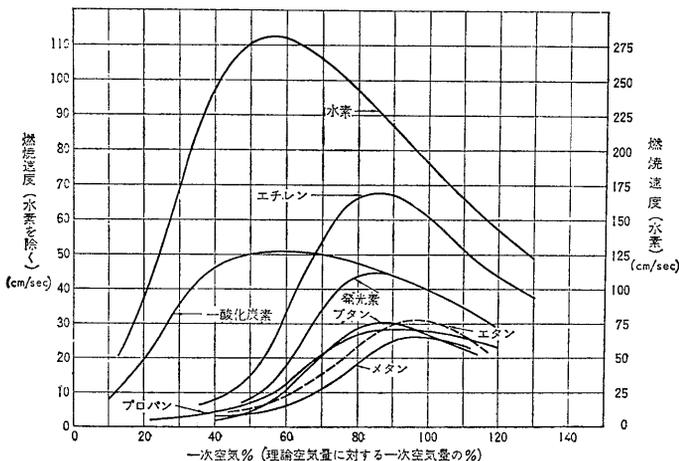


図49 おもな単体ガスの燃焼速度の一次空気率に対する変化 (都市ガス工業 1968)

$(S_{0.21})_{max}$: $M=0.21$ の時の最大燃焼速度 (cm/sec)

X : 最大燃焼速度の時の可燃性ガスの vol. %

$k n a b$: 各可燃性ガスについての定数 (表50) とすると 次の関係がある。

$$(S_M)_{max} = (S_{0.21})_{max} \{k(M-0.21)n+1\}$$

$$(S_M)_{max} = aX - b$$

次に 5,000kcal/Nm³ で比重0.50の都市ガスを O_2 (60%) および N_2 (40%) からなる助燃ガスで燃焼させた時の最大燃焼速度 およびその時の都市ガスの容積 % を求める問題を 表50および上の関係式を使って解いてみよう。問題の助燃ガスの M は $O_2/(O_2+N_2)=60/100=0.60$ である。それ故 上の関係式および表50より 最大燃焼速度 $(S_{0.60})_{max}$ は

$$\begin{aligned} (S_{0.60})_{max} &= (S_{0.21})_{max} \{k(M-0.21)n+1\} \\ &= (70.8) \{5.61(0.60-0.21)^{0.703}+1\} \\ &= (70.8)(5.61 \times 0.514+1) \\ &= 275(\text{cm/sec}) \end{aligned}$$

また $(S_M)_{max} = aX - b$ の関係から

$$X = \frac{(S_M)_{max} + b}{a} = \frac{275 + 149}{11} = 38.5$$

すなわち 混合気体の都市ガスが 38.5 vol. % の時最大燃焼速度 275cm/sec となる。

c) 予熱温度の影響

工業用燃焼装置では その用途に応じて 可燃性ガスおよび空気を予熱し 温度を上げてから燃焼させることがある。これは 予熱することによって 燃焼速度を早め かつ高温の炎を得ることができるからである。

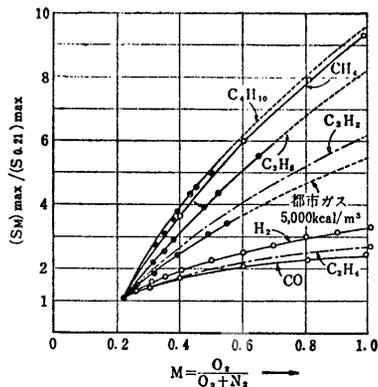


図50 おもなガスの最大燃焼速度に対する酸素の影響 (東京ガス(株)資料 1963)

図51はおもなガスの最大燃焼速度と予熱温度との関係を示している。またこれらの間の関係は一般に次の式で示される。

$$(Sb)_{max} = a \cdot T_i$$

ここに $(Sb)_{max}$: 最大燃焼速度 (cm/sec)
 T_i : 予熱温度(°K 範囲は300~600°K)
 a n : 各可燃性ガスについての定数

定数 a および n については 表50を参照されたい。

ここで注意しなければならないのは 図52にみられるように 最大燃焼速度となる時の可燃性ガスの容積百分率が 予熱温度に関係なく一定であることである。

9) インプットとアウトプット

ガス燃焼器具が単位時間に良好に燃焼することのできるガス量には限界があり この限界以上で燃焼させると不完全燃焼や不安定な燃焼の原因となる。ガス燃焼器具が単位時間に消費するガスの総発熱量をインプット (input, kcal/hr) といひ また単位時間に加熱の目的物に対して有効に与えられる熱量をアウトプット (output kcal/hr) という。したがって インプットに熱効率を乗じたものがアウトプットである。

$$[\text{アウトプット}] = [\text{インプット}] \times [\text{熱効率}]$$

いま ガス器具に与えられるインプットを I とした場合 次のようなよく使われる関係式がある。

$$I = H \cdot V = H \cdot K \cdot \sqrt{\frac{P}{d}} = K \sqrt{P} \cdot \frac{H}{\sqrt{d}}$$

$$= K \sqrt{P} \cdot WI$$

ここに H : ガスの総発熱量
 V : ガスの流量
 P : ガスの圧力
 d : ガスの比重
 K : 定数

$$WI \text{ (ウォッペ示数 } W_{\text{OBBE Index}}) = \frac{H}{\sqrt{d}}$$

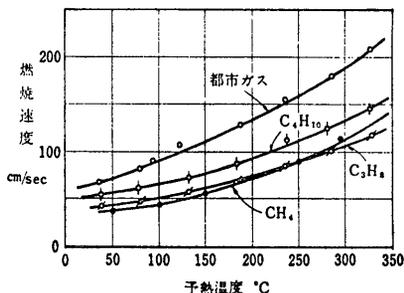


図51 おもなガスの最大燃焼速度に対する予熱温度の影響 (東京ガス(株) 資料 1963)

表50 おもなガスの最大燃焼速度の実験式に対する定数

可燃ガス	M の 範囲	k	n	a	b	(Sb)max
都市ガス (比[0.50])	0.21 ≦ M ≦ 1.0	5.61	0.703	—	149	70.8
C ₃ H ₈	0.21 ≦ M ≦ 1.0	9.43	0.880	11	96	45.5
C ₄ H ₁₀	0.21 ≦ M ≦ 1.0	11.30	0.820	33	93	37.5
CH ₄	0.21 ≦ M ≦ 1.0	10.30	1.07	43	—	39.2
H ₂	0.21 ≦ M ≦ 0.6	3.42	0.962	—	—	282
	0.6 ≦ M ≦ 1.0	2.58	0.662	—	—	
CO	0.21 ≦ M ≦ 0.6	1.77	0.643	—	—	43
	0.6 ≦ M ≦ 1.0	1.51	0.484	—	—	

このうち ウォッペ示数はガスの組成のみによって定まる。上の式はインプットとウォッペ示数との間に次の関係があることを意味する。

- i) ガスのウォッペ示数が一定で ガス圧力が変化した場合 燃焼器具に与えられるべきインプットは ガス圧力の平方根に比例して変化する。
- ii) ガス圧力が一定で ウォッペ示数が変化した場合 燃焼器具に与えられるべきインプットは ウォッペ指数に比例して変化する。

これは供給ガスの圧力や組成が変化すると 燃焼器具に支えられるべきインプットも変わってくることを意味する。それ故 燃焼器具に与えられるインプットを厳密に一定にする必要がある場合には ガバナーと呼ばれる制御機器が用いられる。

10) 燃焼性 融通性 互換性

各種のガス燃焼器具は 組成の異なるガスに対してある程度の融通性をもっているが 同じインプットで完全燃焼させるには 燃焼性 すなわす燃え易さの変動を燃焼器具によってきまる一定の制限内におさめなければならない。この制限内に入るガスが 互換性のあるガ

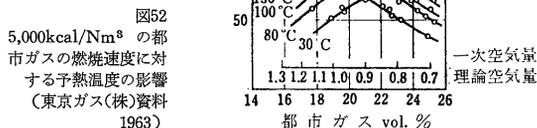


図52 5,000kcal/Nm³ の都市ガスの燃焼速度に対する予熱温度の影響 (東京ガス(株)資料 1963)

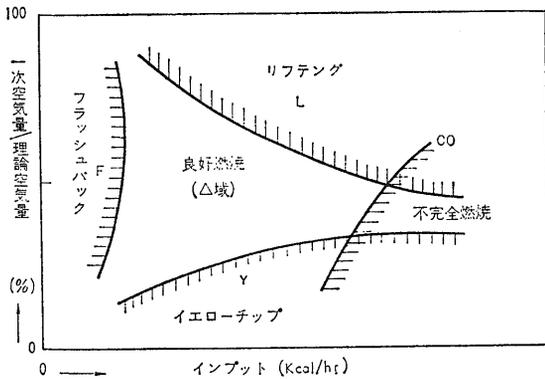


図53 バーナーの特性 (都市ガス工業 1968)

である。都市ガスに例をとるとある一定区域内に供給されるガスは組成・比重などに多少の変動はあっても各種の燃焼器具に対して互換性をもったものとなければならない。

燃焼器具の融通性はバーナーの特性とそれを取り囲む燃焼室などの外部環境によってきまる。バーナーの特性は普通図53のようなグラフによって示される。本図のなかの燃焼に関する用語のうちイエローチップについてはすでに述べてあるのでフラッシュバックおよびリフティングについて簡単に説明しておこう。

[フラッシュバック] ブンセン方式をとっているバーナーでは一次空気孔の開き具合によって一次空気量の多少がきまり炎の状態が変化する。一次空気量が少ないうちは先端の丸い長い内炎で比較的低温の低い燃焼を行うがそれが理論空気量に近づくにつれて炎は短かく燃焼は烈しく炎の温度も高くなりついにはバーナー内に火が戻りいわゆるフラッシュバック (flash-back 逆火) の現象を起こすに至る。一般に炎がバーナーの火口で安定して燃焼しているには火口からのガス-空気混合気体の平均噴出速度とこの混合気体の燃焼速度とが釣り合っている場合である (図54)。一次空気量と理論空気量との比を百分率で表わしたものを一次空気比という。

[リフティング] ガスや空気混合気体の平均噴出速度がその燃焼速度より大きくなると炎は火口に接触して燃えずに図55のように火口から離れて燃えるようになる。これがリフティング (lifting 煽火) でフラッシュバックの反対の現象とみることができる。

以上の予備知識を念頭におかれて 図53をみていただ

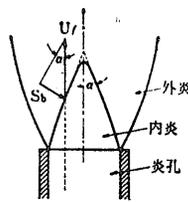


図54
安定燃焼しているブンゼン炎 (東京ガス(株)資料 1963)

U_r : 噴出速度
 S_b : 燃焼速度
 α : 内炎の頂角

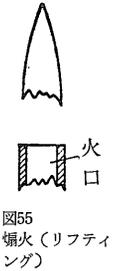
$$S_b = U_r \cdot \sin \alpha$$


図55
煽火 (リフティング)

ければ 図の意味はおのずと明らかであろう。まず図53の4曲線で囲まれた良好な燃焼域は同じバーナーでもガスの燃焼性によって異なる。たとえば一般的な傾向としてガス中に重炭化水素が多くなるとL曲線が下りY曲線が上ってきて燃焼域がせまくなりインプットを下げないと使えなくなることがある。このようにガスの燃焼性の変化に伴ってバーナーの燃焼域が変化することはバーナーの特性から互換性の問題を検討することが可能であることを示しガスによるこの燃焼域の変化が燃焼器具の融通性内にある時それらのガスは互換性があるということができるのである。ただし図53はあるガスを探す目的には適当でなくガスの燃焼性を主体とする各種の図表を使う方法が実際には行われている。

外部環境もガスの互換性に大きく影響する。たとえばバーナーでは良好に燃焼していても外炎が長く伸びるようなガスはコンロなどでは鍋底までの高さまたストーブなどではスケルトンの影響で図53の不完全燃焼 (CO) 線が左方へ移動して燃焼域をせまくする。このようにバーナーで良好に燃焼するということがあるまま互換性があるということにならない点にも注意する必要がある。

11) 都市ガス原料としてのメタン

燃焼速度は各種の燃料ガスの用途を考える上にもっとも重要な性質であるが H_2 のようにそれが大きすぎても扱いにくいしまた値段が高すぎても困る。この点からいえば都市ガスとしてもっとも古い歴史をもつ $3,600 \text{ kcal/Nm}^3$ の石炭ガスや最近まで都市ガスの主流であった $5,000 \text{ kcal/Nm}^3$ の各種の原料による製造ガスなどはよい燃料ガスである。共水性ガスばかりでなく一般の天然ガスの主成分である CH_4 はこの点ではこれらのガスに比べて多少落ちるが H_2 を添加して燃焼速度を上げることも可能である。しかしこのよう

必要があるのは 特殊な工業的利用の場合だけであつて 一般の燃料用としては CH_4 を主成分とする天然ガスを そのまま都市ガスのパイプに流すだけでよい。一般に天然ガスは $9,000\sim 9,800 \text{ kcal/Nm}^3$ の高カロリーであり 製造ガスにつきものの CO を含まない。まれに H_2S を含むものもあるが 脱硫は容易である。このような長所が燃焼速度が石炭ガスで代表される製造ガスより劣る点を補って余りあるところから 都市ガス原料の天然ガス転換が世界の多くの都市で急速に進められつつあり とくに米国では 10数年前に天然ガス転換がほとんど完了してしまつた。

天然ガスを都市ガス原料とする場合 もっともよいのはそのストレート供給である。これは天然ガスの特性を生かしたもっとも合理的かつ低コストの供給方法であ

つて これには次のような利点がある。

- i) 熱損失がまったくない。
- ii) 高カロリー・低比重であるから 導管断面積 送圧 およびホルダーなどがおよそ半分ですむ。すなわち 同じ施設で石炭ガスの場合のおよそ 2.5 倍の発熱量のガスを送ることができる。
- iii) 製造ガスにみられるような CO 硫黄分 ナフタリン およびベンゾールなどの不純物を含まないので 圧送器・ホルダーなどの機械設備や メーター類に対する腐食・カス詰りなどのトラブルがなく また漏洩による CO 中毒もなくなる。
- iv) 組成が安定している。

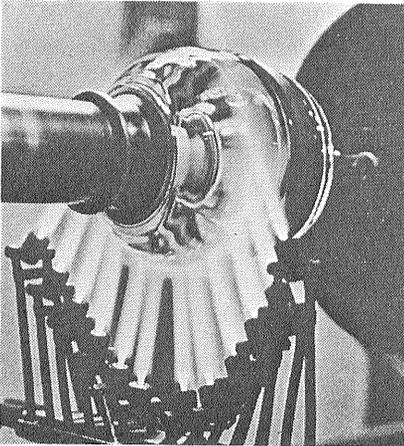


図56
天然ガスによる大型送信管の封止作業
天然ガスの炎は細くも ま平たくもすることができ
るため LP ガスとちがって用途がきわめて広い
(大多喜天然ガス(株)提供)

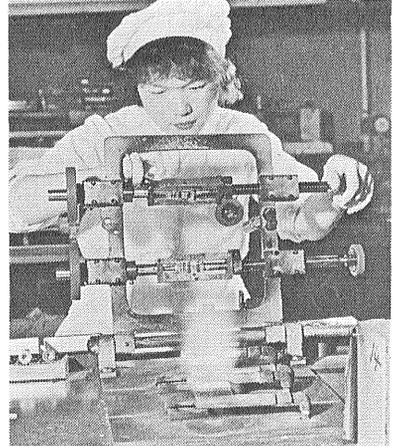


図57
ブラウン管用電極のピーディング(玉つけ)作業
天然ガスは赤火(一次空気がない)でも またいろいろ
な一次空気量でもよく燃え LP ガスとちがって
霧囲気のコまかい調整が容易である
(大多喜天然ガス(株)提供)

・ 人事異動

地質調査所では 次のとおり人事異動が行われました。

(氏名)	(新)	(旧)
大町 北一郎	文部省 出向 (山形大学理学部応用地質学科教授)	地質調査所 海洋地質部長
水野 篤行	地質調査所 海洋地質部長 昇任 海洋鉱物資源課長 併任	海洋鉱物資源課長

昭和 55 年 4 月 16 日
工業技術院

・ おしらせ

広島市の政令都市への移行にともなつて 地質調査所中国出張所の住居表示が55年4月1日から下記のとおり変更になりました。

旧 730 広島市上八丁堀 6 番 30 号
新 730 広島市中区上八丁堀 6 番 30 号 広島合同庁舎内
地質調査所 中国出張所
Tel (0822) 21 - 1 9 4 5