

RIIS-SD-74-1

産業安全研究所安全資料

SAFETY DOCUMENT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1974

セーフ・ギャップについて

鶴見平三郎

労働省産業安全研究所

目 次

1. ま え が き.....1	
2. セーフ・ギャップについての研究 の現状.....1	
2.1 セーフ・ギャップ測定装置.....1	
2.1.1 小容積の測定容器.....2	
2.1.2 大容積の測定容器.....4	
2.2 容器の容積とセーフ・ギャップ.....5	
2.2.1 測定容器の内部容積または外部容積 とセーフ・ギャップ.....6	
2.2.2 測定容器内の火炎伝ば方向および 点火位置とセーフ・ギャップ.....7	
2.2.3 測定容器の開口比とセーフ・ ギャップ.....9	
2.3 容器の形状とセーフ・ギャップ.....10	
2.3.1 測定容器の形状の影響.....10	
2.3.2 ギャップの長さの効果.....12	
2.4 セーフ・ギャップに対する 障害物の影響.....15	
2.4.1 ギャップの外部における障害物.....16	
2.4.2 ギャップの内部における障害物.....18	
2.5 雰囲気中の圧力または容器内部の圧力と セーフ・ギャップ.....20	
2.5.1 測定容器の内部のガスおよび蒸気の 圧力がセーフ・ギャップに及ぼす影響.....20	
2.5.2 雰囲気中の圧力のセーフ・ギャップに 及ぼす影響.....20	
2.6 可燃性ガスまたは蒸気の温度とセーフ・ ギャップ.....21	
2.7 雰囲気中の湿度とセーフ・ギャップ.....22	
2.8 可燃性ガスおよび蒸気の濃度とセーフ・ ギャップ.....23	
2.9 ガスおよび蒸気の乱れとセーフ・ギャッ プ.....25	
2.10. ギャップからの燃焼生成物の噴出、フ ランジの温度および雰囲気中のガス のギャップを通じての容器内部への拡散.....26	2.10.1 ギャップからの燃焼生成物の噴出.....26
	2.10.2 フランジの温度.....27
	2.10.3 外部ガスのギャップを通じての容 器内部への拡散.....27
	2.11 最も危険な分類に属するガスおよび蒸 気のセーフ・ギャップ.....27
	2.11.1 水素-空気系混合ガスのセーフ・ ギャップ.....27
	2.11.2 アセチレン-空気系混合ガスのセ ーフ・ギャップ.....29
	2.11.3 二硫化炭素-空気系混合ガスのセ ーフ・ギャップ.....30
	2.12 セーフ・ギャップ実験値の統計的処理... 31
	3. セーフ・ギャップと他の安全工学定数 との相関 32
	3.1 最小点火電流とセーフ・ギャップとの相 関.....32
	3.2 消炎距離および消炎直径とセーフ・ギャ ップとの相関.....33
	3.3 UFL/LFLおよびLFL・4Hとセーフ ・ギャップとの相関.....34
	4. 各種のガスおよび蒸気に関する実験的 最大セーフ・ギャップの数値.....34
	4.1 空気と単一成分のガスまたは蒸気の混 合物に関する実験的 maximum セーフ・ギャ ップ.....35
	4.2 二三の規定におけるセーフ・ギャップ.....37
	5. 歴史的にみたセーフ・ギャップについ ての研究 38
	6. あとがき.....41
	7. 参考文献一覧42

セーフ・ギャップについて

1. まえがき

防爆電気機器の防爆施設上の重要性については、周知の事実であり、今さら多言を要しない。この重要な防爆電気機器のうち耐圧防爆構造の基礎となるものは所謂雰囲気ガスに火炎逸走を生ぜしめないスキの値であろう。この値はセーフ・ギャップ(Safe Gap)と称せられており、ドイツにおいてはスパルト・バイテ(Spaltweite)といわれている。そしてこのうち最も重要な数値は、その対象となるガスおよび蒸気に固有な値である実験的最大セーフ・ギャップ(Maximum experimental safe gap, 以下M.E.S.G.という。)とこのM.E.S.G.の値に対して統計的な処理を行なった統計的最大セーフ・ギャップ(Statistical maximum safe gap, 以下S.M.S.G.という。)である。

すなわちこのセーフ・ギャップの値は、耐圧防爆構造の電気機器を設計する際に知らなければならない数値の一つとして応用工学的にみて極めて意義深いものがある。

またこの値の限界値は、可燃性ガスおよび蒸気の種類に用いられるなど、安全工学上の一定数として広く用いられており、燃焼学的にみてもセーフ・ギャップによるところの火炎の消炎の挙動は、極めて興味深いものがあるといわなければならない。そしてこれらの事情は、燃焼学上権威のある学界誌の一つであるといわれている"Combustion and Flame"にも、しばしばセーフ・ギャップをテーマとする論文が集録されていることから裏書きされよう。

この資料は、このセーフ・ギャップの性格を実用工学的な観点から、各項目毎に浮彫りするように努めたものであり、やや難解と思われるセーフ・ギャップの消炎理論などについては、一切ふれないこととし、これについては別の報文にゆずることとした。

この中に引用した文献は、筆者が、昭和47年度在外研究員として、イギリスの国立鉱山保安研究所および西ドイツ国立物理工学研究所に留学中に入手したものを中心として取りまとめたものであり、筆者の在外研究報告の一部をなすものである。

2. セーフ・ギャップについての研究の現状

この章においては、まずセーフ・ギャップの測定容器にはどんなものがあるかということについて述べ、ついでセーフ・ギャップに影響を及ぼす各パラメータごとに研究結果、これは主として実験結果であるが、これを記載することとした。

最初に測定容器の種類を言及したのは、セーフ・ギャップが測定のプロセスに支配されるプロセス定数であるからに外ならない。

またこの章においては、主として研究の現状について解析したが、これの背景となる歴史的な研究の内容については、5章においてふれているからこれを併せて参照せられたい。

なお、セーフ・ギャップの消炎理論、寸度の理論的計算方法などについてはいまだ研究されつつある事項であり、別の機会にゆずることとした。

2.1 セーフ・ギャップ測定装置

セーフ・ギャップ測定装置を分類すると、アメリカ型のものとヨーロッパ大陸型のそれとに大別される。アメリカ型の場合は、円筒状のものであり、Underwriters' Laboratories, Inc.(米, 以下ULという。)およびExplosive Atmospheres Laboratory(加)の研究報文にそれぞれみられるものである。これに反して大陸型のものについては、Safety in Mines Research Establishment(英), Electrical and Allied Industries Research Association(英)およびPhysikalisch-Technische Bundesanstalt(西独, 以下P.T.B.という。)の研究論文にみられる球型のものである。

その他の諸国と称しても、セーフ・ギャップの研究については、耐圧防爆構造の電気機器を設計し製作するという観点から、二三の工業化された諸国に限定されるのであるが、例えばソ連の代表的な研究機関であるГосударственный институт по проектированию и исследованию взрывобезопасного электрооборудованияの研究報文などにおいては、球

状のものを用いており、Główny Instytut Górnicwa Ośrodek Naukowo-Badawczy Kopalnia Dowswiadczalna "Bar bara" Polska (ポーランド) においては、前記西独のP.T.B.において用いられた旧型の立型円筒状容器を用いた報告などがみられている。

この章においては、耐圧防爆構造の電気機器を設計するという実用的観点を重視し、測定容器の内容積を中心として分類し、図示して説明する。

2.1.1 小容積の測定容器

容積何ccをもつて小容積とするかは、厳格な定義はないが、ここでは、測定容器の構成部分である外部容器と内部容器のうち内部容器の容積1000cc以下をもつて区分し解説する。測定容器の容積が小容量のものが用いられるようになったのは、小型の耐圧防爆構造の電気機器を設計する際、フランジのギャップを決定するための基礎データが必要になったことと、実験の容易さの必然性という二つの観点からによる。

図2-1-1にしめす容器は、内容積200ccのものであつて、P.T.B.によって開発されたものであり、K. Nabert¹⁾の報文、Berggewerkschaftliche Versuchsstreche Dortmund Derne (西独、以下B.V.S.という。)のK.H. Grobleben²⁾の論文などこの容器を用いての多数の研究成果がみられており、この外観写真をしめすと図2-1-2のとおりである。この容器は、標準容器として1969年にInternational Electrotechnical Commission³⁾(本部ジュネーブ、

以下IECという。)に提案され、討議の結果近い将来IEC⁴⁾によって正式な測定容器として採択される予定である。

上述の容器は、内容積固定型のものであり現実の小容積の耐圧防爆構造電気機器の設計上の要請を満たすものではないという観点に立つて、D.H. Jones⁵⁾によって内容積可変型の容器が報文にあらわれている。これはピストンを用いて内容積を5ccから2500ccまで変化しうるものであり、円筒型である。この容器についてもIEC⁶⁾において討議の対象となつた。これを図でしめすと図2-1-3のとおりである。

セーフ・ギャップ測定の確率的な処理が、大きな問題としてクローズ・アップされてきたことにもないH. PhillipsとS.K. Shaw⁷⁾は、図2-1-4にしめす容器を用いて1測定点150回以上の実験を行なつた。試料の点火確認は、フォト・トランジスタを用いて自動的に測定を行なうものであり、内容積は200ccの固定型である。



図 2-1-2 セーフ・ギャップ測定容器

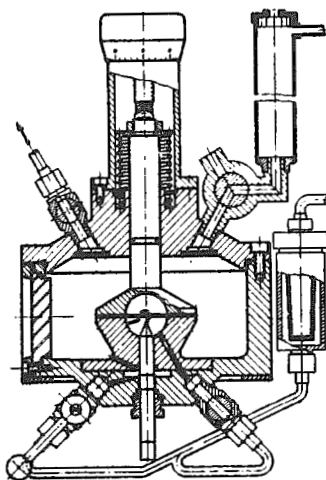


図 2-1-1 セーフ・ギャップ測定容器

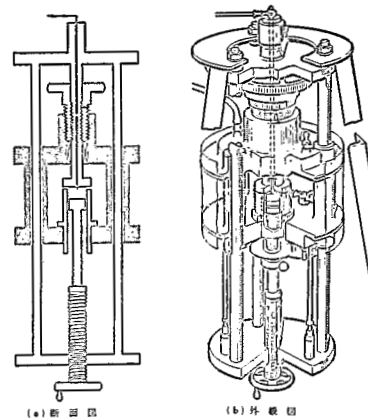


図 2-1-3 小容積のセーフ・ギャップ測定容器

E. D. Dainty および G. K. Brown⁸⁾あるいは同氏らに S. Silver¹⁰⁾が加わることによって円筒状横型のアメリカ型の典型的といえる測定容器を用いて研究を行なわれた。この容器を図示すると図 2-1-5 のとおりであり、内部容積は、 24 in.^3 (約 393 CC) から 55 in.^3 (約 901 CC) まで変化させることができる。この容器についても IEC¹¹⁾における討議の討象

となり、その報文をみる事ができる。前記の同氏らのは、さらに A. D'Aoust¹²⁾と共同してさらに、超小型耐圧防爆構造電気機器を設計するうえの要望に応えるため、この装置に図 2-1-6 にしめす特殊なアタッチメントを取りつけ、研究を行なっている。これらの円筒型測定容器について写真でしめすと図 2-1-7 のとおりである。

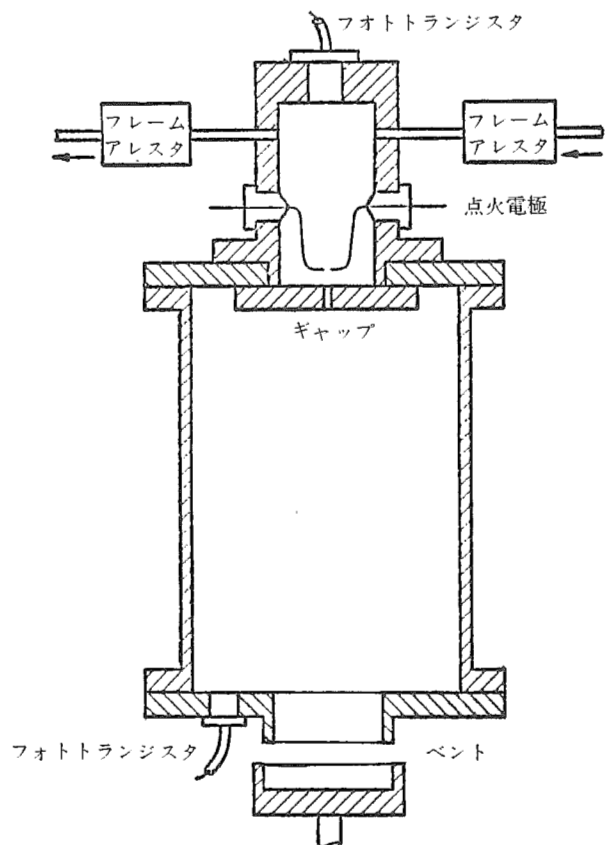


図 2-1-4 測定容器断面図

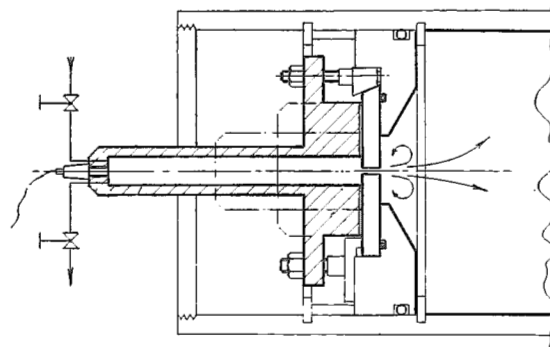


図 2-1-6 測定容器アタッチメント

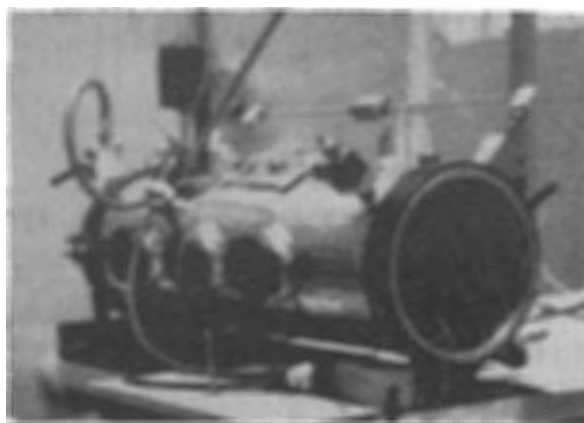


図 2-1-7 セーフ・ギャップ測定容器

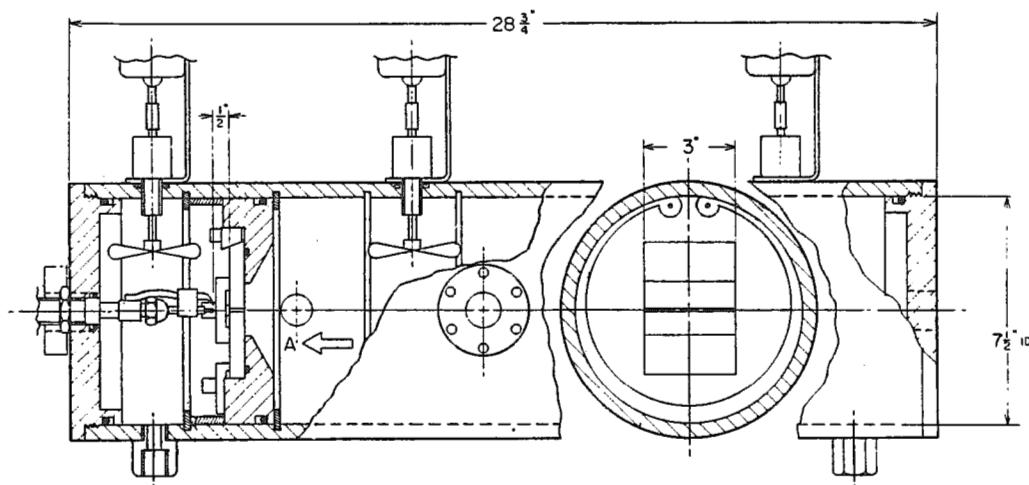


図 2-1-5 セーフ・ギャップ測定容器

2.1.2 大容積の測定容器

測定容器の内部容積が1ℓ以上8ℓまでの測定容器について、現在においても使用されているもののみをここで解説する。特に内容積8ℓ型のもは、歴史的にみてセーフ・ギャップの研究が、世界各国において取りあげられてきた当初から用いられているが、それらのうち現在研究者によつて使用されていないものもある。前述のとおり現在研究に用いられていないものについては、この章ではふれない。

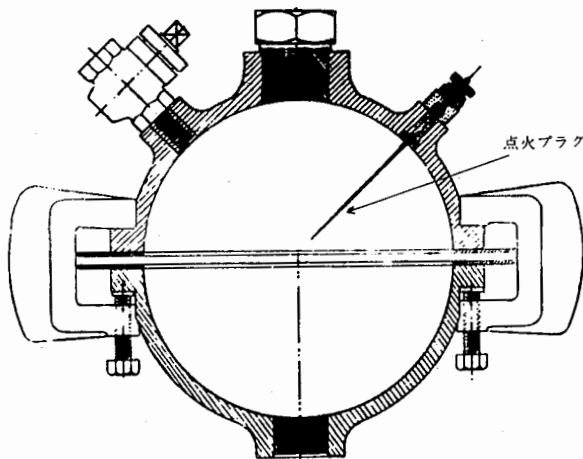


図 2-1-8 セーフ・ギャップ測定容器

図2-1-8は、内容積8ℓの測定容器であり、任意のフランジをクリップ止めして使用できる便利さがあり、多くの研究報文に紹介されている。この図はI. C. F. StathamおよびR. V. Wheeler¹⁾の論文から引用したものであって、外部容器がないのは、実験に際し、この容器を開放型容器に収納して用いるためである。

図2-1-9は、P. B. Smith およびD. A. Badel²⁾論文から引用したものであり、内部容器の試料ガスまたは蒸気の濃度と外部容器のそれとを任意に設定できる便利さを有しており、B. S. 229³⁾の付表Aのセーフ・ギャップのデータのうち、内外のガスまたは蒸気の濃度を任意に変えたものについては、すべてこの容器を用いた研究の結果とみて差し支えない。

前記の容器は、主として英国の論文によつてみられる測定容器であるが、これに対して西独のK. Naber⁴⁾は図2-1-10のような容器をその研究に用いた。この容器の内容積は、8ℓであり、前に記載したものと同じ大きさである。

図2-1-11および図2-1-12は、それぞれソ連型の測定容器であり、前者については、ソ連の規格である

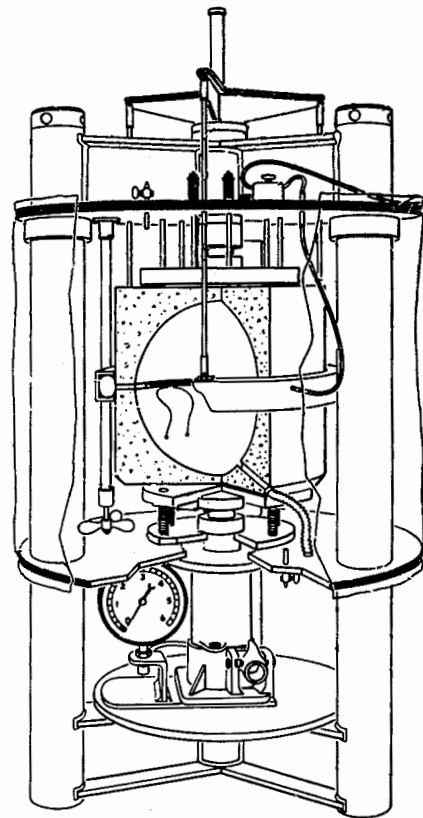


図 2-1-9 測定容器断面図

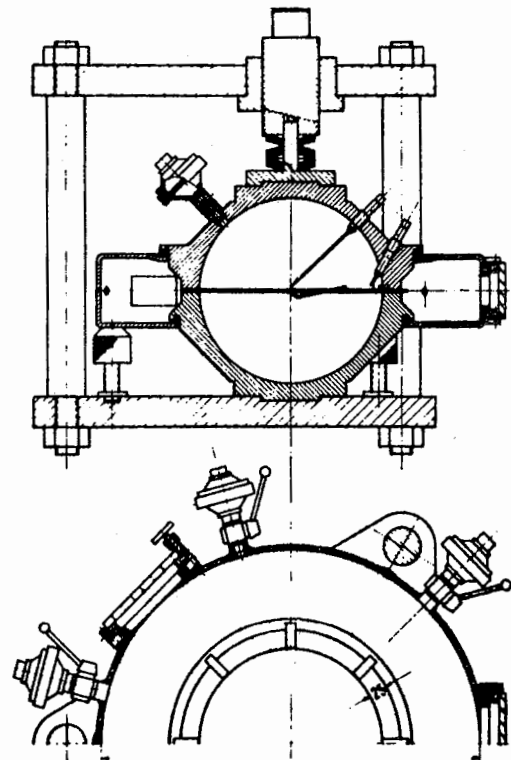


図 2-1-10 セーフ・ギャップ測定容器

ПИБЭ⁵⁾に規定されている公式のタイプであつて、その容積が2.5 lの球形容器である。

後者については、A. M. Kotlyarskii⁶⁾の報文に用いられているものであり、同じく球形容器である。

図2-1-13は、J. PilarskiおよびJ. Ciok⁷⁾の報文にみられるものでありポーランドの代表的研究機関であるBarbara試験炭坑などの研究所で現に用いられているものであつて、D. Müller-Hillebrand⁸⁾などの著書ないし報文に用いられているものの改良型である。

2.2 容器の容積とセーフ・ギャップ

セーフ・ギャップが測定容器の容積に対して依存性を有していることは、セーフ・ギャップがプロセス定数であるという性格を有していることから当然のことである。それがために多数の研究者によつて各種のガスおよび蒸気を対象として研究がなされており、本項においては、このうち代表的と思われる結果について抜萃して紹介することとするが、セーフ・ギャップは

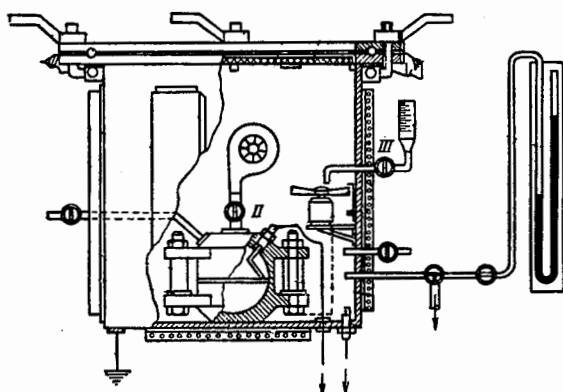


図 2-1-11 混合気体セーフ・ギャップ測定装置

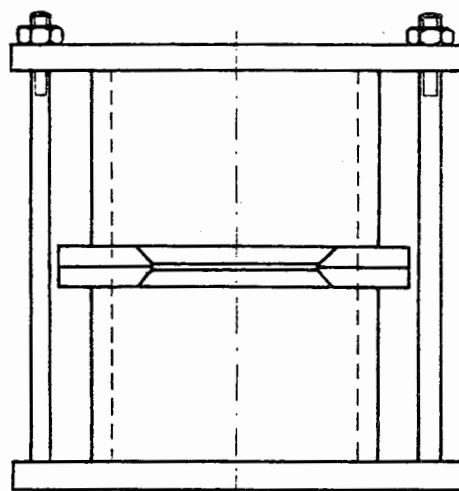


図 2-1-13 セーフ・ギャップ測定容器

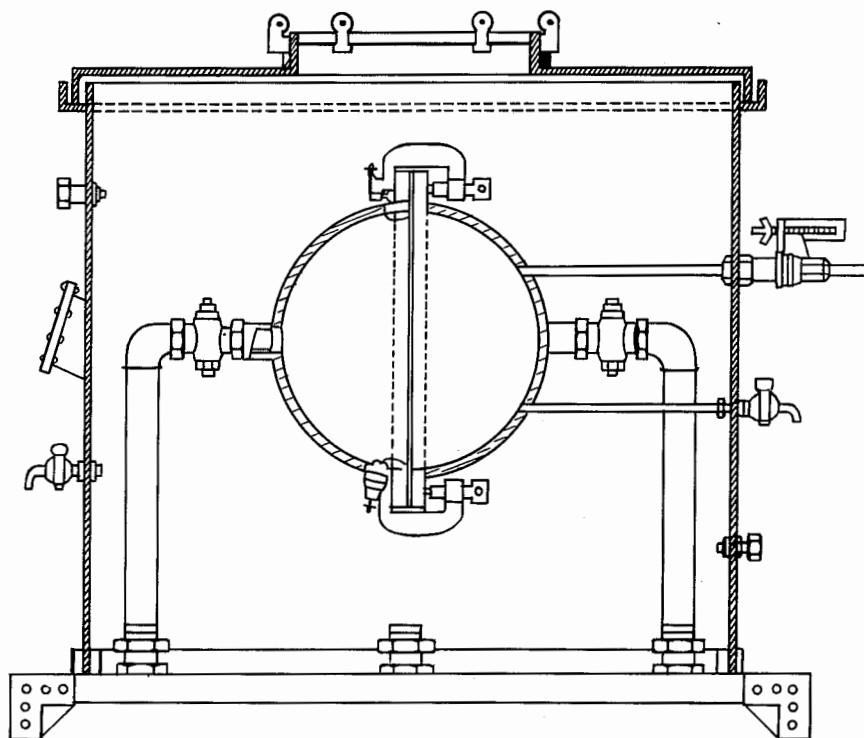


図 2-1-12 セーフ・ギャップ測定容器

また、二三の火炎速度の早いガスおよび蒸気のそれを除いて、点火位置と開口比に対しても依存性を有しているので、これらのことについても併せて本項において抄録する。

2.2-1 測定容器の内部容積または外部容積とセーフ・ギャップ

P. B. Smith¹⁾は、CH₄-空気系の混合ガスを用いて容器内部の容積が如何にセーフ・ギャップに影響するかを表2-2-1のように発表しており、容積が減少すればCH₄の場合は、セーフ・ギャップは急激に減少することをしめしている。なおこの実験における開口比をしめすと、表2-2-2であり、小容積の容器の開口比は、A容器の場合のそれに比し1.35の指数をしめているが、セーフ・ギャップはさらに減少しておりこのことはセーフ・ギャップは、開口比よりも内部容積に対して大きな依存性を有していることを表わしているといえよう。

表2-2-1

容器の内部容積の影響ギャップの長さ1 in.

容器の内部容積 cu. ft.	セーフ・ギャップ in.
0.24	0.078
0.047	0.068
0.0034	0.050

表2-2-2 測定容器の容積と開口比

容器の区分	容積 V: cu. ft.	ギャップの開口 面積R: sq. in.	開口比 R/V
A	0.24	0.0312	0.13
B	0.047	0.0176	0.38
C	0.0034	0.0060	1.76

CH₄のようなガスと、対照的なH₂のようなガスに対しては、この容積に対するセーフ・ギャップの挙動がどうなるであろうか、研究者にとって興味ある解析の対象として取りあげられた。これらのうち主要な論文をここに集録すると、D. H. Jones and N. L. Heathcote²⁾, G. K. Brown, E. D. Dainty and S. Silver³⁾があげられこれらの結果は、IECの文書⁴⁾にもそれぞれ取りあげられている。この結果について前者の報告については、表2-2-3に、後者のそれについては、表2-2-4および図2-2-1にしめす。その

外IECの報文⁵⁾の中には、イギリスの研究者によって行なわれた特殊の測定容器を用いて内部容積を変化させることによって測定した結果があり、これを図2-2-2にかかげる。この際のH₂-空気系混合ガスの濃度は、32%であり、この研究の報告者は、小容積の容器においては、内外のH₂-空気系混合ガスの濃度の差が、大容積の場合ほど顕著な影響をセーフ・ギャップに与えないとしている。

表2-2-3 各種の容積およびギャップの点火確率 (ギャップの長さ1" および1/2", 側面点火, H₂/空気系混合ガス)

ギャップの長さin	ギャップ in	実験回数	結果	外部ガスの点火確率	
8-liter 球状+:					
1*	{	0.012	40	40I	1.0
		0.011	40	40N	Nil(M.E.S.G.)
1/2	{	0.009	40	40I	1.0
		0.008	20	1I 19N	0.05
		0.007	40	40N	Nil(M.E.S.G.)
4-liter 半球状+:					
1	{	0.014	20	20I	1.0
		0.013	20	7I 13N	0.35
		0.012	20	20N	Nil(M.E.S.G.)
500-cu.cm 球状+:					
1	{	0.014	20	20I	1.0
		0.013	20	1I 19N	0.05
		0.012	30	1I 29Nφ	0.033
		0.011	20	20N	Nil(M.E.S.G.)
1/2	{	0.011	40	40I	1.0
		0.010	20	9I 11N	0.45
		0.009	40	40N	Nil(M.E.S.G.)
250-cu.cm 半球状φ:					
1	{	0.015	20	20I	1.0
		0.014	20	19I 1N	0.95
		0.013	20	1I 19N	0.05
		0.012	20	20N	Nil(M.E.S.G.)
1/2	{	0.014	40	40I	1.0
		0.013	40	39I 1N+	0.975
		0.012	40	40N	Nil(M.E.S.G.)

Notes.- * E.R.A. R.R. D/T117 1959.による
 + 内部ガス濃度 32% 外部ガス濃度 24%
 φ " " 32% " 28%
 φ " " 28% " 28%
 φ 26回目に点火
 + 31回目に非点火

これらの結果は、 H_2 - 空気系混合ガスの場合でもセーフ・ギャップは内部容積に対して依存性をしめしているけれども、K. Nabert⁷⁾は、 H_2 - 空気系混合ガスおよび都市ガス0.1 lから100 lまでについてのセーフ・ギャップについて報告をし、小容積の場合で

も内部容積の依存性がないことを図2-2-3および図2-2-4にそれぞれしめし、これに反論していることは注目に値しよう。

これまでガスおよび蒸気の爆発等級表の両極端に属する CH_4 および H_2 について解説したが、その中間領域に位置するガスおよび蒸気については、どうなっているであろうか、W. B. Whitney⁸⁾, K. Nabert⁹⁾, IEC¹⁰⁾の文書および再びK. Nabert¹¹⁾の研究ならびに報告からみても後掲の図2-3-2ならびに図2-3-7, 図2-2-5, 表2-2-5および図2-2-6のとおりであり、K. Nabertの報告は、10 lまでの依存性および図2-2-6においては、消炎距離との関連をしめしている。ただし各表にしめされた値は、実験条件の差異があり、完全に一致をみているとはいえない。

外部容積とセーフ・ギャップの関係については、報文が少ないのであるが、K. Nabert¹²⁾によれば図2-2-7の報告がなされており、外部容器の容積が大きいく程、セーフ・ギャップは大きい。対象ガスは C_2H_4 - 空気系混合物である。

2.2.2 測定容器内の火炎伝ば方向および点火位置とセーフ・ギャップ

セーフ・ギャップがプロセス定数であるからには、たとえ同じ容積の測定容器を用いても測定条件であるギャップに対する火炎伝ば方向および点火位置にセーフ・ギャップの値は依存性を有している。

前者について、 H_2 - 空気系混合ガスのような火炎速度の早いガスに関してはどうであろうか、その挙動についてG. K. Brown, E. D. Dainty and S. Silver¹⁾が表2-2-6のような結果を発表しており、有意な関連を認め難いが、少なくとも同一の測定容器については下向伝ばの値がシビヤなそれをしめしている。 H_2 - 空気系混合ガスと同じ様な火炎速度の速い C_2H_2 - 空気系混合ガスについては、K. Nabert²⁾が1 lの測定容器を用いて水平、上向および下向伝ばの3つの観点から研究を行ない、図2-2-8の如き結果を得ているが、いずれの場合においてもセーフ・ギャップは直径の50%の位置で最大値をえている。

観点を変えて CH_4 , C_2H_4 , C_6H_{14} および OCH_2CHCH_3 の各空気系混合ガスについて前記のK. Nabert³⁾が小容積の容器および円筒状容器による報告を図2-2-9および図2-2-10のように行っているが、前者についても後者についても有意な関連を

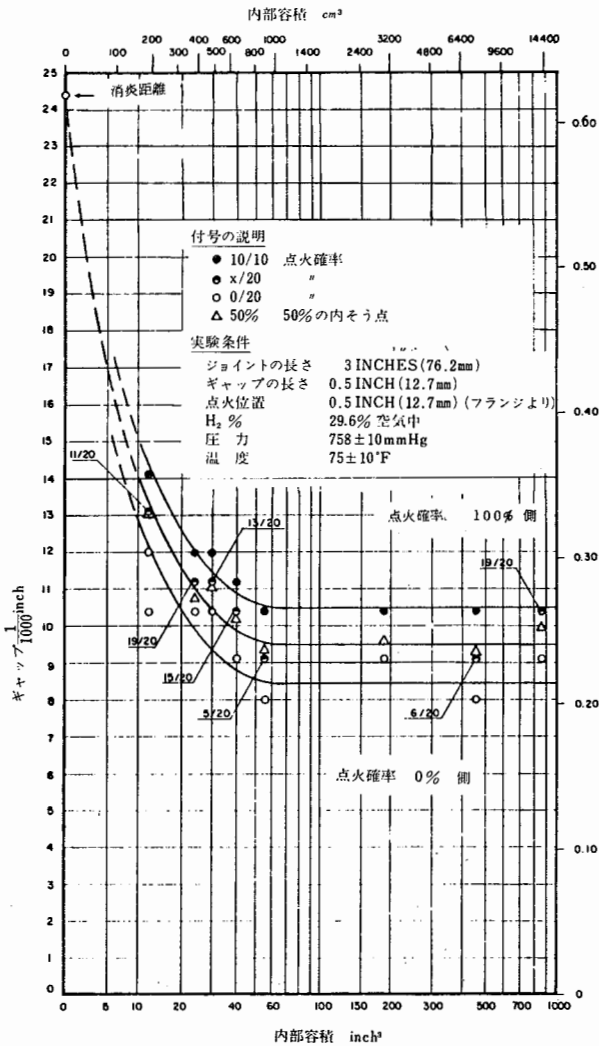


図 2-2-1 H_2 /空気ガスに対する内部容積とギャップとの相関

表 2-2-4 内部容積とギャップとの関係
(ギャップの長さ 1/2")

内部容積		最大ギャップ		点火回数 実験回数
cu in.	cm ³	inch	mm	
11.9	195	0.0104	0.264	0/10
		0.0120	0.305	0/20
		0.0131	0.333	11/20
		0.0141	0.358	10/10
24.0	393	0.0104	0.264	0/20
		0.0112	0.284	19/20
		0.0120	0.305	10/10
29.8	488	0.0104	0.264	0/20
		0.0112	0.284	13/20
		0.0120	0.305	10/10
39.7	651	0.0091	0.231	0/20
		0.0104	0.264	15/20
		0.0112	0.284	10/10
55.0	901	0.0080	0.203	0/20
		0.0091	0.231	5/20
		0.0104	0.264	10/10
188	3,081	0.0091	0.231	0/20
		0.0104	0.264	10/10
457	7,490	0.0080	0.203	0/20
		0.0091	0.231	6/20
		0.0104	0.264	10/10
860	14,095	0.0091	0.231	0/20
		0.0104	0.264	19/20

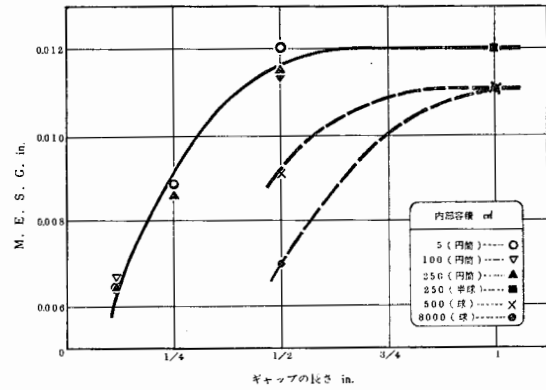


図 2-2-2 M.E.S.G.と容器容積およびギャップの長さの相関
(H₂/空気, 側面点火)

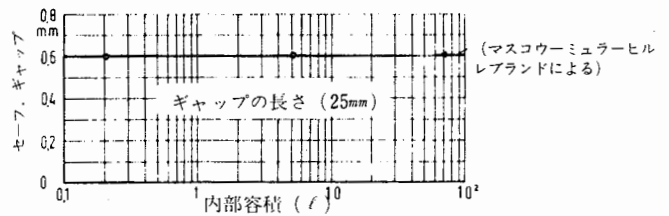


図 2-2-3 内部容積の関数としてのM.E.S.G.

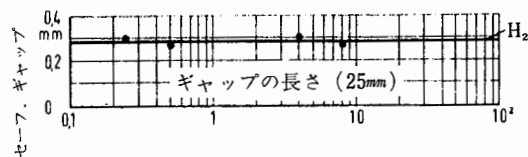


図 2-2-4 内部容積の関数としてのM.E.S.G.

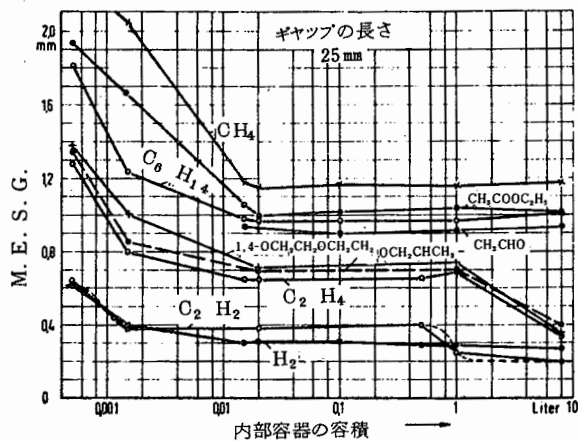


図 2-2-5 内部容器の容積とM.E.S.G.

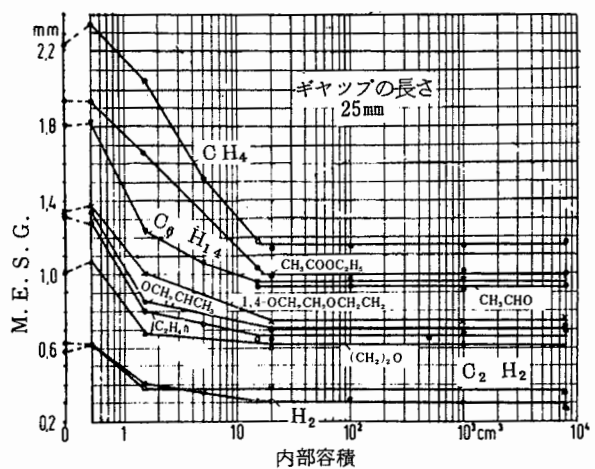


図 2-2-6 内部容積とM.E.S.G.

表 2-2-5 代表的なガスおよび蒸気のM.E.S.G.と内部容積およびギャップの長さとの関係

種類	ギャップの長さ mm	容器の内部容積				
		8ℓ (s)	500ml (s)	50ml (c)	10ml (c)	2ml (c)
C ₃ H ₈	25	0.96	-	0.96	-	-
	12.5	-	-	0.79	-	0.96
	6	-	-	0.66	0.66	0.79
C ₂ H ₄	25	0.68	-	0.74	-	-
	12.5	0.53	-	0.56	-	0.63
	6	-	-	0.51	0.51	0.56
C ₂ H ₂	25	0.25	0.40	0.46	-	-
	12.5	-	0.35	0.38	-	-
	6	-	-	0.33	0.35	0.33
H ₂	25	0.28	0.28	0.33	-	-
	12.5	0.18	0.23	0.25	-	0.25
	6	-	-	0.23	0.23	0.23

* (s) 球状 (c) 円筒状 ギャップ mm

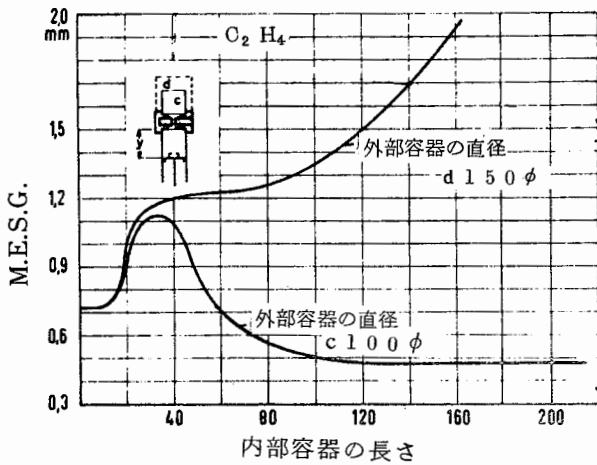


図 2-2-7 外部容積の関数としてのM. E. S. G.

各種ガスについて推測するには、さらに実験を必要とする。

2.2.3 測定容器の開口比とセーフ・ギャップ

測定容器の開口比のセーフ・ギャップに与える影響については、I. C. F. Statham and R. V. Wheeler¹⁾ E. D. DaintyおよびG. K. Brown²⁾の研究がみられ

いずれもCH₄-空気系混合ガスを用いての研究結果である。開口比とは、前記のStathamによればつぎの式で定義づけられる。

$$\text{開口比} = \frac{O}{V} = \frac{\text{ギャップのフランジにおける開口面積}}{\text{測定容器の容積}}$$

これは、ギャップの圧力効果との関連において重要なことでありCH₄-空気系の混合ガスのような気体においては、開口比の増加にともなつて測定容器内部の爆発圧力の減少がみられ、これについてG. K. Brownらの実験結果をかかげると図2-2-11のとおりである。

これらの実験に対し既出のK. Nabert³⁾は、C₆H₁₄-空気系混合ガスのセーフ・ギャップを、測定容器のスキマ板を変えることによつて開口比をパラメータとしての研究の発表を図2-2-12のとおり行っている。

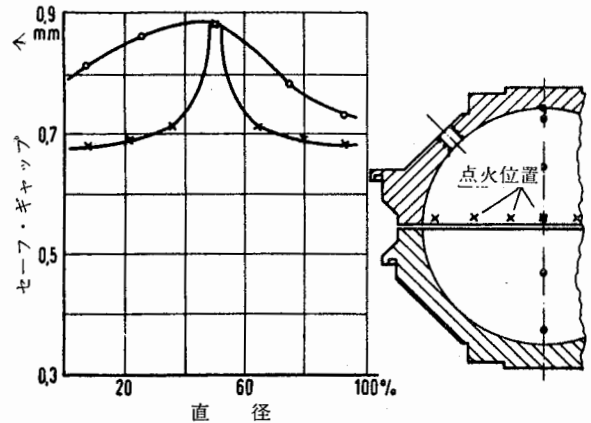


図 2-2-8 点火位置とセーフ・ギャップ (1ℓ測定容器使用)

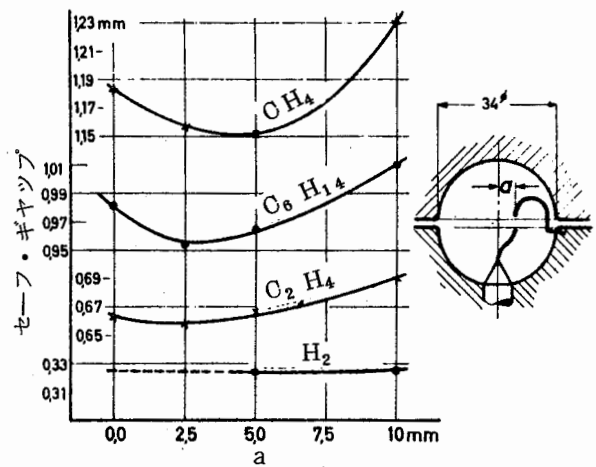


図 2-2-9 点火位置とセーフ・ギャップ (0.02ℓ測定容器使用)

る。この結果によれば、開口比の増加によつてセーフ・ギャップは、単純に増加せず、一定の開口比において最小値をしめしていることが了解するが、前者の研究と矛盾する内容をもっているというべきであろう。

2.3 容器の形状とセーフ・ギャップ

セーフ・ギャップの測定容器については、本稿の2.1ですでに記載したが、円筒状、球状および角形状に分けられる。セーフ・ギャップは、例えば発火点、引火点などの安全工学定数と同様に、測定容器の形状に支配されるものであり、この2.3においては、前段で容器の形状の影響を論及し、後段において容器の形状の一部であるギャップの長さについてのみ取りあげ

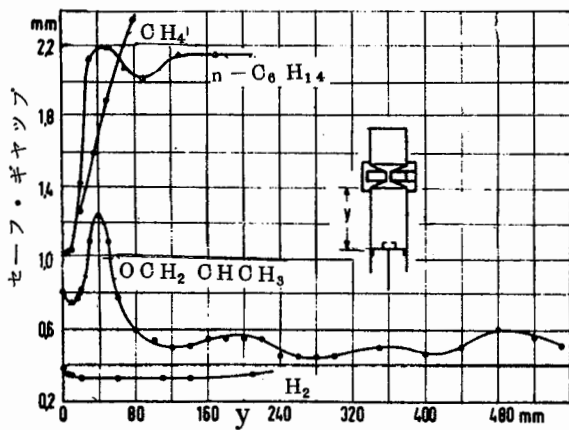


図 2-2-10 点火位置 y の関数としてのセーフ・ギャップ

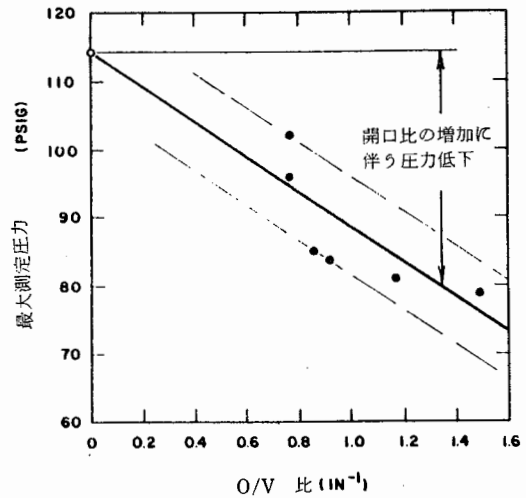


図 2-2-11 開口比と最大測定圧力

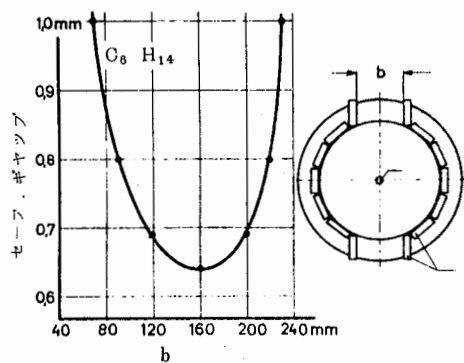


図 2-2-12 ギャップ開口部分 b とセーフ・ギャップ (測定容器の内容積は 8 l)

論述する。

表 2-2-6 火炎伝ば方向による影響 (H₂ - 空気系混合ガス)

内部容積		ギャップの長さ		ギャップ		火炎伝ばの方向	点火回数 — 実験回数
in ³	cm ³	inch	mm	inch	mm		
29.8	488	0.5	12.7	0.0104	0.264	水平伝ば	0/20
				0.0104	0.264	上方伝ば	0/10
				0.0104	0.264	下方伝ば	5/10
				0.0112	0.284	水平伝ば	13/20
				0.0120	0.305	水平伝ば	10/10
				0.0120	0.305	上方伝ば	10/10
				0.0120	0.305	下方伝ば	10/10
				0.0120	0.305	下方伝ば	10/10
188	3,081	0.5	12.7	0.0091	0.231	水平伝ば	0/20
				0.0091	0.231	上方伝ば	0/10
				0.0091	0.231	下方伝ば	0/10
				0.0104	0.264	水平伝ば	10/10
				0.0104	0.264	上方伝ば	9/10
				0.0104	0.264	上方伝ば	9/10

2.3.1 測定容器の形状の影響

測定容器に対するセーフ・ギャップの依存性は、特に小容量の容器において顕著である。E. D. Dainty, G. K. Brown および A. D. Aoust¹⁾ は 15.0 in³ の小容量の角形容器を用いてこの研究を行った。容積は前記のとおり一定であり、点火点は、ギャップの内部の端か

ら $\frac{1}{2}$ in の距離とし、使用したガスは、 H_2 - 空気系混合ガスの $29.6 \pm 0.4\%$ である。火炎伝ば方式は、下向伝ばとし、その他の実験条件はすべて同一とした。この結果をしめすと図 2-3-1 のとおりであり、同図に図示されている C 型のような長方形のものが、最も大きなセーフ・ギャップを記録した。この研究は、実際に耐圧防爆構造の電気機器を設計する際に大きな示唆を与えるものといえよう。なおギャップの長さは、いずれの場合においても $\frac{1}{2}$ in である。

H. G. Riddlestone²⁾ は、容器の形状、ギャップの長さ、測定容器の内容積をそれぞれパラメータとして C_3H_8 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 H_2 の 4 種類の空気系混合ガスについて研究を行なったが、この研究では、セーフ・ギャップに及ぼす影響は、容積が 50cc から 8ℓ になるにともないギャップが大巾に増加しているので前記 2.2 にも記載したように、容積の依存性が最も顕著ではあるが、測定容器の形状によるそれも無視できない。この内容については、図 2-3-2 にしめす。

K. Nabert³⁾ は、ギャップの内外面の端部の半径が

セーフ・ギャップに及ぼす効果について、取りまとめ図 2-3-3 のような注目すべき発表をしている。同氏によれば、ギャップの端部のアールが大きいほど、セーフ・ギャップの値は、低い値をしめしており、 C_2H_4 - 空気系混合ガスを除いて他のガスは、リニヤーの傾向をもっている。これらのことは、耐圧防爆構造の電気機器を設計する際、そのフランジの加工について十分留意しなければならないことであり、同氏の発表は実用面からみて高く評価されるべきであろう。

I. C. F. Statham と R. V. Wheeler⁴⁾ は、同様にギャップ端部の影響についての研究成果を発表している。この結果は、図 2-3-4 にしめすとおりであるが実験条件としては、 CH_4 - 空気系混合ガスを用い、端部のアールは、 $1/10$ in 一定とし、等しい開口比に対するギャップの内外部にアールがある場合と無い場合とを比較し、プロットしたものであつて、この図によればアールのある場合には、圧力放散効果は大きい、セーフ・ギャップは小になることになり、圧力効果とセーフ・ギャップとの関係について一つの問題

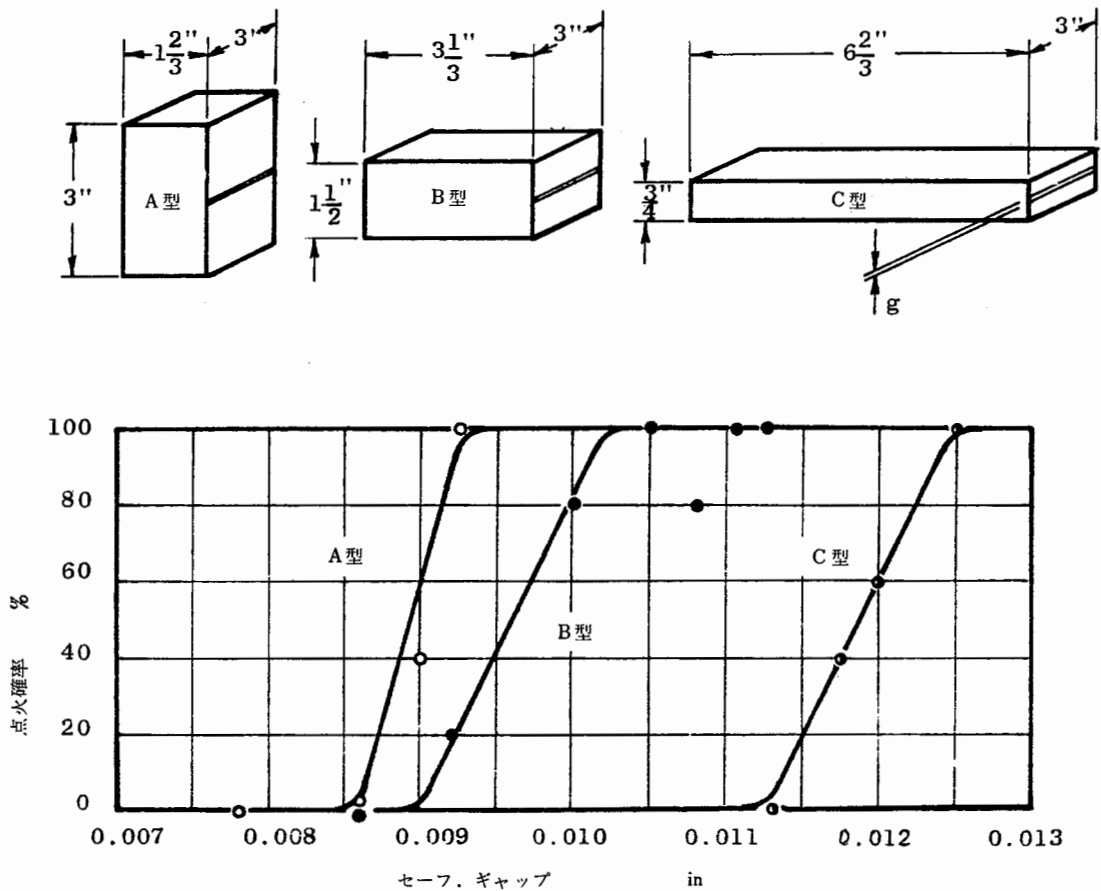


図 2-3-1 実験的ギャップとその点火確率に与える容器の形状の影響

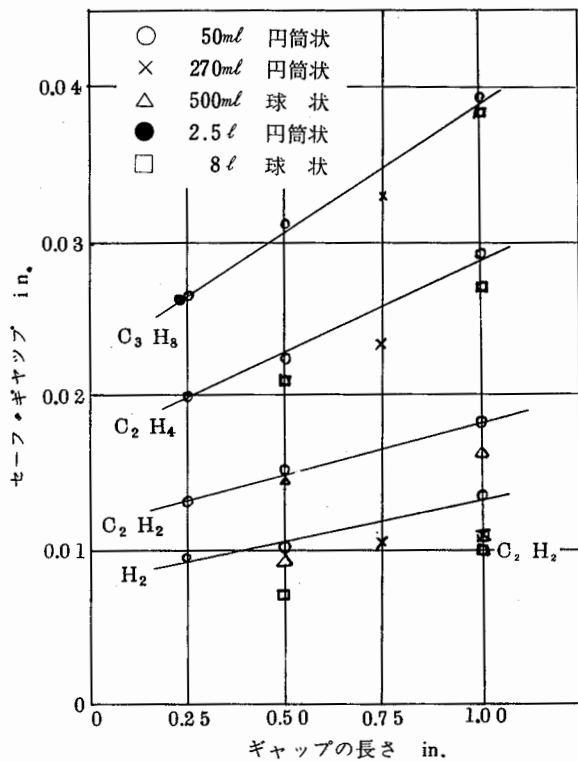


図 2-3-2 容器の形状によるセーフ・ギャップの比較

点をなげかけているものといえよう。

2.3.2 ギャップの長さの効果

M. E. S. G. は、ギャップの長さと反比例に近い傾向をしめすであろうことは、予想に難くない。そして研究は、実際の電気機器の耐圧防爆構造の容器のフランジに適用しようという実用的見地から、首題の効果を巨視的にとらえるという立場よりも、^{*} 1 in. と 1/2 in. の 2 点をとらえて研究が集中された。設計者にとって、フランジを長くすれば、セーフ・ギャップが小さくなるのが解っていたとしても、フランジの長さには、一定のオプティマムの長さが存在するからに外ならない。

最初に単一のガスまたは蒸気について、ギャップの長さが 1 in の場合と 1/2 in の場合では、M. E. S. G. にどんな差異があるか、 C_5H_{12} , $(CH_2)_2O$, CH_3COCH_3 および $CH_3COC_2H_5$ の各空気系混合ガスについて H. Robinson と H. L. Williams⁵⁾, T. J. A. Brown と N. Simpson⁶⁾⁷⁾⁸⁾ の各氏の論文から

* (注) この本の各図表において特記のない場合にはフランジの長さは 1" (25mm) である。

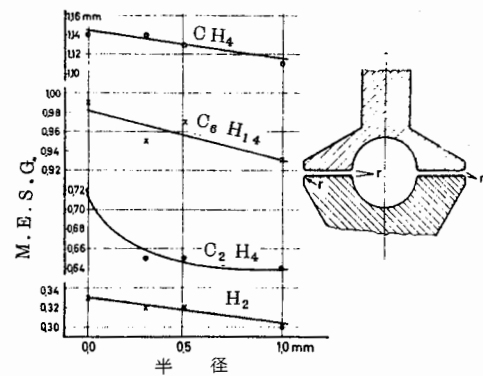


図 2-3-3 ギャップの端部のアールの M. E. S. G. に及ぼす影響

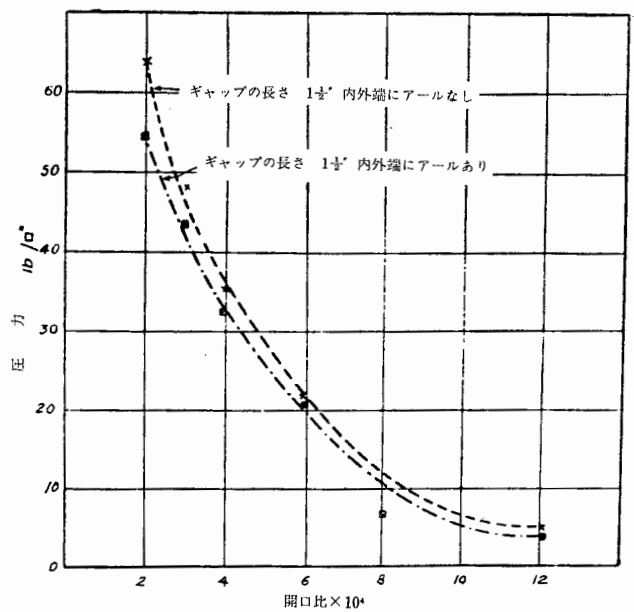


図 2-3-4 ギャップの内外端のアールの効果 (ギャップの長さ 1 1/2 in)

掲載してみることにしたい。最も注意しなければならないことは、他の項に記載したセーフ・ギャップの数値と同等に、研究に使用した測定容器内外のガスおよび蒸気によってその数値に差異があることであり、表 2-3-1 から表 2-3-4 にその実験条件をも併記した。

ついで設計すべき耐圧防爆構造の容器が、小型化するにつれて測定容器を小容量のものに対してセーフ・ギャップとギャップの寸度を測定することの必要性が高まってきた。この要請に応じて各国の研究者がこの研究を取りあげている。C. E. R. Bruce⁹⁾ および E. D. Dainty と G. K. Brown¹⁰⁾ は CH_4 -空気系混合ガスを対象とし、H. G. Riddles tone¹¹⁾ は、 C_3H_8 , C_2H_4 , C_2H_2 および H_2 の各空気系混合ガスについ

てギャップの長さ $\frac{1}{4}$ in.までを、さらにH.G.Riddlestone¹²⁾は、他の論文においてC₃H₈-空気系混合ガスを用いてギャップの長さ $\frac{1}{8}$ in.について研究を行なっており、これらの結果については、図2-3-5、図2-3-6、図2-3-7および表2-3-5にしめす。また、K.Naberi¹³⁾は、20CCの小型容器を用いてCH₄、n-C₆H₁₄、C₂H₄、C₂H₂およびH₂の各空気系混合ガスについて取りまとめているので小容量の場合のギャップの長さとのセーフ・ギャップの関連という立場から各種の実験条件に基くそれを図2-3-8に掲げることとした。

石油化学工業の興隆を始め化学工業の複雑高度化にともない危険場所におけるガスまたは蒸気は、単一成分のそれでない混合ガスである場合の方がより一般的となってきた。したがって研究者は、各種混合ガスについてのセーフ・ギャップをギャップの長さ1 in.および $\frac{1}{2}$ in.の場合についてまず測定し、かかる現場に装備される耐圧防爆構造の電気機器の容器を設計する際のデータとした。D.H.JonesとD.W.Woodhead¹⁴⁾¹⁵⁾が発表した結果について引用すると表2-3-6と図2-3-9であり、極めて貴重な研究成果である。この実験は、内容積8 lの球状容器を用いて行ったものである。

しかし以上記載した報文をもつて、セーフ・ギャップとギャップの長さの関係をすべて解明されたと考えることは、早断であり、その外にP.B.Smith¹⁶⁾¹⁷⁾およびE.D.DaintyとG.K.Brown¹⁸⁾¹⁹⁾の研究報告がある。前者の論文は、油入電気機器の油面上における分解ガス - Smithは、このガスをArc Gasと定義しているのであるが - そして彼の報文では、このガスの主成分は、H₂とC₂H₂の混合ガスであるとし定量的な成分について報告していない。このArc Gasを測定容器の内部ガスとし、外部ガスにCH₄-

表2-3-1 C₅H₁₂のセーフ・ギャップ

実験名 ギャップの長さ	A	B	C	D	E
実験条件	1 in.	1 in.	1 in.	$\frac{1}{2}$ in.	$\frac{1}{2}$ in.
内部の空気中の蒸気の濃度	3.0%	3.0%	3.1%	3.2%	3.0%
外部の空気中の蒸気濃度	3.0%	3.0%	2.2%	2.2%	3.0%
M.E.S.G. 10 ⁻³ in.	40	37	35	31	33
S.M.S.G. 10 ⁻³ in.	-	29	29	24	26

表2-3-2 (CH₂)₂Oのセーフ・ギャップ

ギャップの長さ 実験条件	$\frac{1}{2}$ in.	1 in.
内部の空気中のガス濃度	9.6 %	8.5 %
外部の空気中のガスの濃度	8.0 %	8.5 %
M.E.S.G.	0.019 in.	0.026 in.
S.M.S.G.	0.012(3) in.	0.020 in.

表2-3-3 CH₃COCH₃のセーフ・ギャップ

実験名 フランジの長さ	A	B	C
実験条件	$\frac{1}{2}$ in.	1 in.	1 in.
内部の空気中の蒸気の濃度	5.2 %	5.0-6.2%(5.9)	5.0 %
外部の空気中の蒸気の濃度	6.8 %	4.0-6.0%(4.5)	8.0 %
M.E.S.G.	0.034 in.	0.040 in.	0.040 in.
S.M.S.G.	0.025 in.	0.033 in.	

表2-3-4 CH₃COC₂H₅のセーフ・ギャップ

実験名 ギャップ長さ	A	B	C
実験条件	$\frac{1}{2}$ in.	1 in.	1 in.
内部の空気中の蒸気の濃度	4.6 %	4.5 %	4.8 %
外部の空気中の蒸気の濃度	2.9 %	3.7 %	4.0 %
M.E.S.G.	0.030 in.	0.033 in.	0.040 in.
S.M.S.G.	0.023 in.	0.027 in.	

表2-3-5 ギャップの長さ $\frac{1}{8}$ "を用いてのセーフ・ギャップ(3.85% C₃H₈使用)

ギャップ (in.)	実験回数	外部引火の回数
0.022	13	13
0.021	20	6
0.020	23	0

空気系混合ガスを用いた場合の実験では、ギャップの長さを増加してもセーフ・ギャップの値に影響を与えない。この実験結果は、図2-3-10のとおりであり

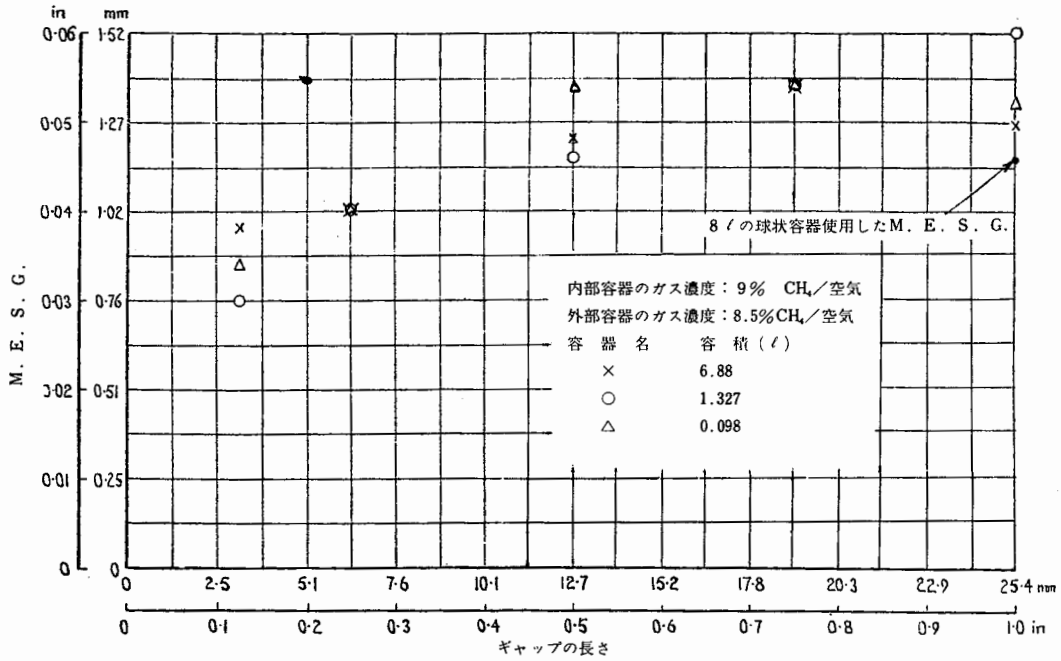


図 2-3-5 小型円筒状測定容器を用いた場合のM. E. S. G. とギャップの長さとの関係

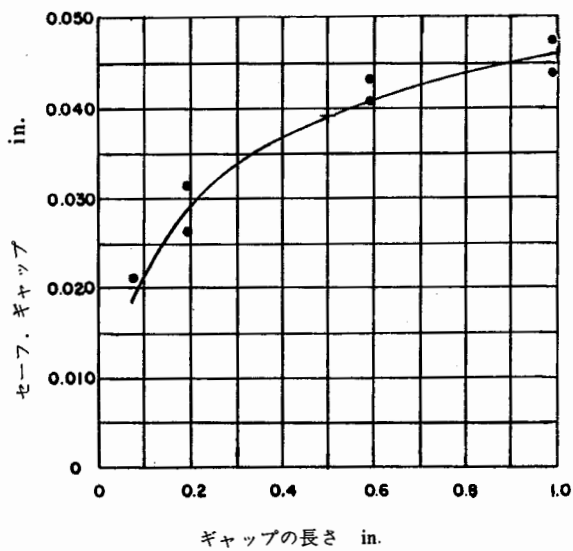


図 2-3-6 セーフ・ギャップとギャップの長さとの関連(各種データを使用)

この図にしめされている実験容器の寸度は、表 2-3-7 で与えられている。

後者の Dainty と Brown の研究は、小さい径のチャンネルを用いての研究であり、チャンネルの安全直径とその長さは、必ずしも直線関係に近いものでないことをしめしており、これらの因子として境界層の影響を考察すべきであるとしているが、本稿は、理論の紹介を目的としないので、別の稿にゆずることとする。この研究のモデル図および結果については、図 2-3-11 および図 2-3-12 をそれぞれ参考として頂きたい。

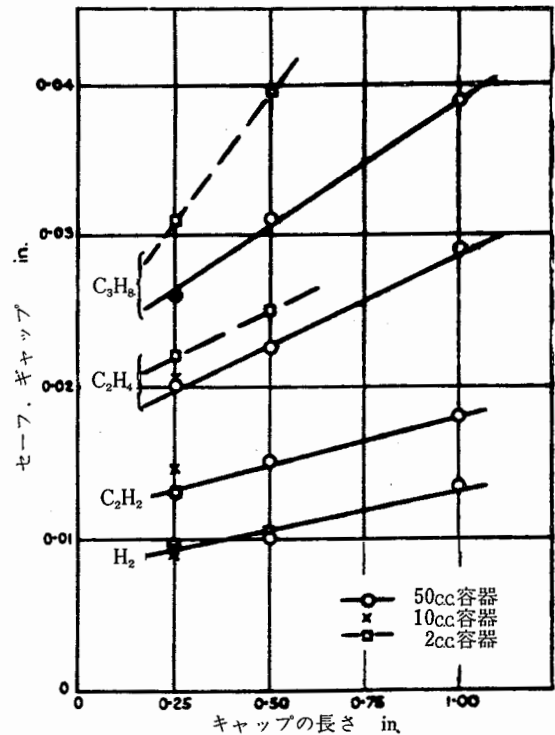


図 2-3-7 小容積の容器におけるセーフ・ギャップとギャップの長さ

表 2-3-7 測定容器の寸度

区 分	内 部 容 器		容 積 l
	直 径	長 さ	
A	9.9	5.45	6.9
B	5.6	3.3	1.33
C	1.94	2.0	0.097

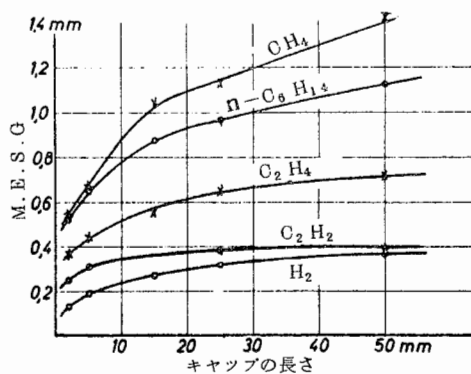


図 2-3-8 M.E.S.G. とギャップの長さの関連 (0.02ℓ測定容器の容積)

2.4 セーフ・ギャップに対する障害物の影響

セーフ・ギャップを測定する際、内部容器内で生じた爆発により、外部容器の可燃性ガスまたは蒸気が発火する過程において、火炎または高温度の燃焼生成物の流れに対してそれを乱すような障害物が存在する場合には、セーフ・ギャップの寸度に影響を及ぼす。本稿では、その理論について一切ふれないが、その影響に関する実験結果について、ギャップ外部における障

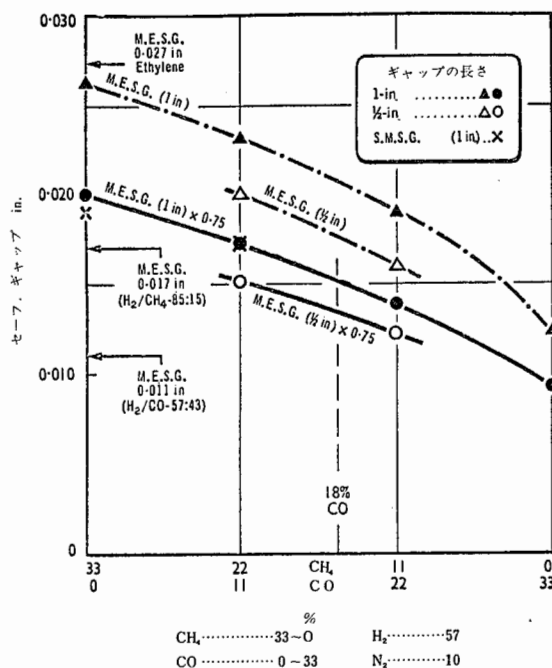


図 2-3-9 各種成分の石炭ガスのセーフ・ギャップ (8ℓ容器使用)

害物の影響とギャップ内に存在する障害物のそれとに分けて記述することにする。

これらの実験結果は、耐圧防爆構造の電気機器の設計および保守に安全工学上の立場から極めて有益な示

表 2-3-6 各種成分の混合ガスのセーフ・ギャップ測定結果

	%											
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
H ₂	100				85	57		57	57	57	57	54
CH ₄		100			15		25	33	22	11		10.5
CO			100			43			11	22	33	21
C ₂ H ₂				100								5
N ₂							75	10	10	10	10	9.5
空気に対する混合ガス 当量濃度	29.6	9.5	29.6	7.8	22.5	29.6	29.6	18.2	21.2	25.5	31.8	22.8
内部ガス濃度	32	9	34	11	20	32	27	16	18	24	36	24
外部ガス濃度	24	7.5	30	5	20	32	26	16	18	24	32	24
セーフ・ギャップ 10 ⁻³ in.												
1-in.ギャップの長さ												
M.E.S.G.	11	46	36	10	17	11	81	26	23	19	12	19
S.M.S.G.	-	35	28	4	-	5	70	19	17	-	-	-
M.E.S.G.×0.75	8	35	27	7	13	8	61	20	17	14	9	14
1/2-in.ギャップの長さ												
M.E.S.G.	7	38							20	16		
S.M.S.G.	-	32							-	-		
M.E.S.G.×0.75	5	29							15	12		

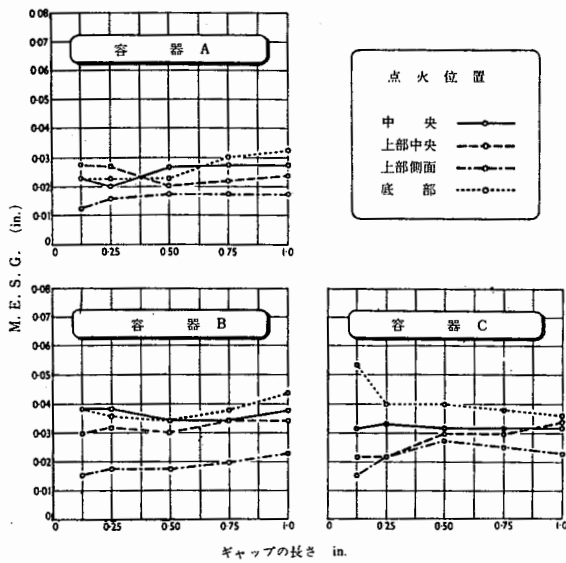


図 2-3-10 内部ガスとしてアークガス、外部ガスとしてCH₄を用いた場合のセーフ・ギャップとギャップの長さの関係

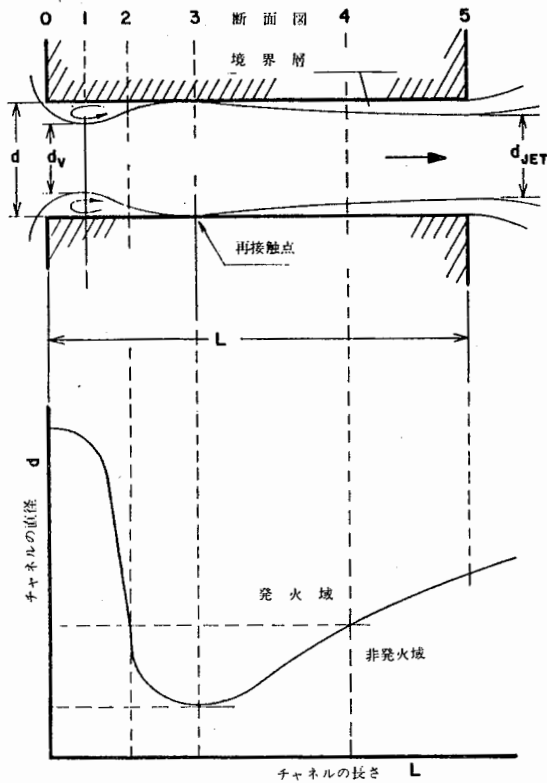


図 2-3-11 チャンネル中のガスの着火機構モデル図

唆を与えるものと信ずる。

2.4.1 ギャップの外部における障害物

ギャップの外部における障害物については、各種の

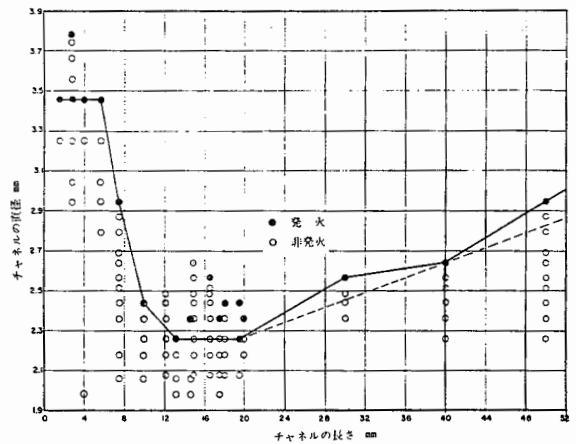


図 2-3-12 チャンネルの安全直径と長さとの関連(9.5%±0.1 CH₄ 使用)

物質が考えられる。多くの報文に使用されている障害物は、金属板、絶縁テープおよびゴムバンドであり、実際の耐圧防爆構造の電気機器を設置する場合において極めて重要な知見をしめしているものといえよう。

D.W. Woodhead, D.H. Jones および J.R. Blackwell¹⁾は、図 2-4-1, 図 2-4-2 および 図 2-4-3 にしめす測定容器を用いて金属板の環状の障害物および二次フランジの影響について興味深い結果を発表しており、図 2-4-1 にしめす装置を用いた金属板を用いた障害効果については、表 2-4-1 のとおりであり、少なくともギャップより 1 in. の距離に火炎または燃焼生成物の流れを阻害するものがあれば、セーフ・ギャップの値に影響があることを物語っている。無論内部容器内の点火源の位置によってこの値はさらに変動しよう。

同様に図 2-4-2 の装置を用いた結果は表 2-4-2 のとおりであり、ギャップの寸度とギャップからの障害物の距離の相関を如実に解明している。表 2-4-3 には、二次フランジのセーフ・ギャップに及ぼす影響をまとめている。これは図 2-4-3 の装置を用いたものであり、図中の B および D の長さを任意に変化して実験しており、極めてユニークな実験といえよう。さらに同氏は、実用的な観点から、粘着性の紙テープ・ゴム・バンドおよび絶縁テープによる影響を研究し、表 2-4-4 のような発表をしており、大いに参考となるところがある。これらの実験は、すべて H₂ - 空気系混合ガスを対象としたものである。

以上の発表がなされた翌年、D.H. Jones および N.L. Heathcote²⁾は、やはり H₂ - 空気系混合ガス

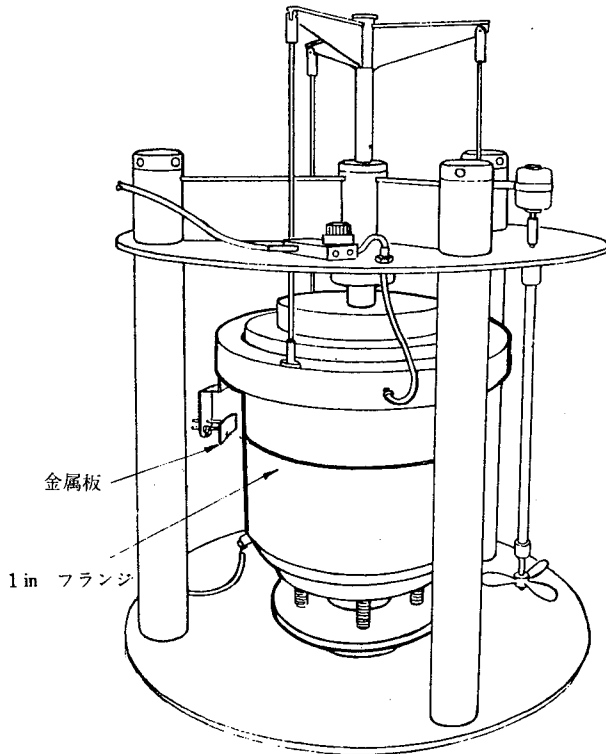


図 2-4-1 金属板による障害物の効果を測定するための測定容器

を用いてギャップ外部の障害物の影響に関する論文を発表した。この論文は多岐にわたっており、ここでその全容を引用することは不可能であるが、その実験装

表 2-4-1 金属板障害物のセーフ・ギャップに及ぼす影響

ギャップ in.	障害物の ない場合	フランジからの金属板の距離 in.							
		$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	1
0.011	(40N)						6I 14N		20N
0.009			20I		20N				
0.007			20N						

表 2-4-2 環状の障害物のセーフ・ギャップに及ぼす影響

ギャップ in.	(M.E.S.G.)	フランジからの環帯の距離 in.										
		$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$
0.011	(M.E.S.G.)										20I	20N
0.009								4I 16N	20N			
0.007			20I		20N							
0.006			20N									

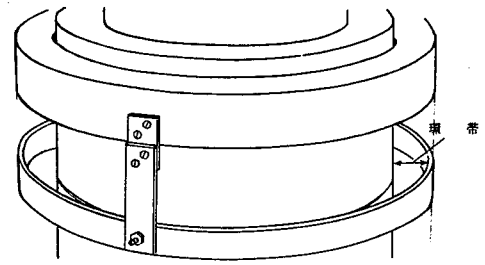


図 2-4-2 環状の障害物の取付図

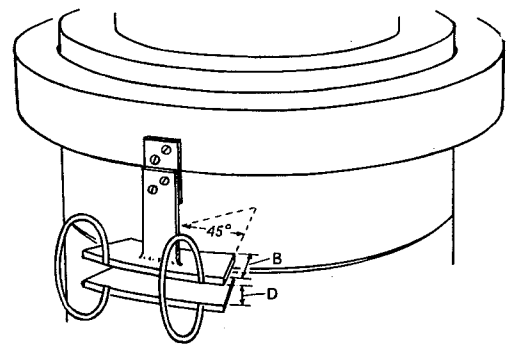


図 2-4-3 二次フランジによる障害物の取付図

置および二三の重要な研究について集録するとつぎの図 2-4-4、図 2-4-5 および図 2-4-6 のとおりであり、その結果の要約を、表 2-4-5 にしめす。ここで重要なことは、同氏らが、セーフ・ギャップに対する最小安全間隔(Minimum Safe Distance 以下、M. S. D. という。)という概念を始めて明らかにしたことであり、この概念はセーフ・ギャップの寸度に影響を及ぼさないところの障害物とギャップ外端の最小距離であると定義される。M. S. D. とセーフ・ギャップとの関連をあらわすと図 2-4-7 のとおりであり、この M. S. D. も測定容器の容積に対して依存性を有していることは、注目されよう。

表2-4-3 二次フランジのセーフ・ギャップに及ぼす影響

二次フランジの長さ (B) in.	ギャップ in.	D の 長 さ in.							
		$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	1
1	0.009		2 I		2N		2 N		
	0.007		2 N		2N		2 N		
2	0.009	2 I	2 I	2 I	2 I	2 I	1 N	2 N	2 N
	0.007	2 N	2 N	2 N	2 N	2 N	2 N		
3	0.009		2 I		2 N		2 N		
	0.007		2 N		2 N		2 N		
2	0.009						10 I 10 N		20 N
	0.007		8 I 12 N		20 N				
	0.005		20 N						

表2-4-4 粘着性の紙テープ、ゴム・バンドおよび絶縁テープのセーフ・ギャップに及ぼす影響

ギャップ in.	実験回数 20 回の結果
(1) 粘着性の紙テープ 0.011 (M.E.S.G.)	20 N
(2) ゴム・バンド	
0.007	10 I 10 N
0.006	20 N
(3) 絶縁テープ	
0.005	7 I 13 N
0.004	12 I 8 N
0.003	3 I 17 N
0.002	20 N

表2-4-5 各種容積別、障害物の種類別およびギャップの長さ別の M.S.D.

ギャップの長さ in.	M.E.S.G. テスト回数 20 回または 40 回 in.	障害物, 1 in. 巾 (実験回数 20 回)			
		環 状		セーフ・ギャップ	セーフ・ギャップ
		(i) セーフ・ギャップ $\frac{1}{4}$ in. の位置にある場合 in.	(ii) M.S.D. in.	セーフ・ギャップ [ゴムバンド] in.	セーフ・ギャップ [絶縁テープ] in.
8-L 球 状					
1	0.011	0.006	$1 \frac{3}{4}$	0.006	0.002
$\frac{1}{2}$	0.007	0.004	$1 \frac{1}{4}$		
500-CC 球 状					
1	0.011	0.008	$\frac{1}{2}$	0.008	0.004
$\frac{1}{2}$	0.009	0.006	1		

これらの障害物の影響は、前述の H₂-空気系の混合物の場合のみに見られる現象ではない。D. H. Jones および G. Taylor³⁾ は、C₂H₂、C₂H₄、C₅H₁₂ および H₂ と CH₄ の混合ガスと各空気系の混合気体を用いて各種の知見を得ているのでここに紹介する。測定に用いられた容器の断面は、図 2-4-8 のとおりであり、その測定結果の要旨は表 2-4-6 のとおりであ

る。

これらの研究は、イギリスの諸研究機関によつてなされたものであるが、西独の P. T. B. においても障害物の影響について、障害物の固さの面からの探究がなされており、K. Nabert⁴⁾ の報文が発表されているが、ここでは、大部にわたるので掲載を省略する。研究

対象として取りあげたガスおよび蒸気は、OCH₂CH₂CH₃、OCH₂CH₂OCH₂CH₂、CH₃CHO、CH₃(CH₂)₄CH₃、CH₃COOC₂H₅、C₂H₄、CH₄ それに C₂H₂ および H₂ の各種ガスと空気の混合したものである。

2.4.2 ギャップの内部における障害物

ギャップ内部における障害物には、グリース、オイル、ペイント、ガスケット¹⁾などがあげられよう。しかしここでは、セーフ・ギャップの寸度と最も関連が深いスキマ板 (Shim) を取りあげて論ずることとした。前者のグリースなどの影響については、大部にわたるので本稿では、解説を省略する。

表2-4-6 各種ガスおよび各種障害物の M.E.S.G. に対する影響 (実験回数 20 回または 40 回)

ガスおよび蒸気	障害物なし in.	環帯 ($\frac{1}{4}$ in. の位置) in.	絶縁テープ in.
(1) 側面点火			
C ₂ H ₂	0.010	0.005/6	0.003
H ₂	0.011	0.005/6	0.002
H ₂ /CH ₄	0.017	0.009	0.009
C ₂ H ₄	0.027	0.013	0.011
C ₅ H ₁₂	0.039	0.039	0.034
(2) 中心点火			
C ₂ H ₄	0.068:20 I 0.066:18 I 2N 0.064:10 I 10N	0.013:3 I 17N	0.014:1 I 19N
M.E.S.G.	0.062:20 N	0.012:20 N	0.013:20 N
C ₅ H ₂	0.094:20 I 0.092:18 I 2N 0.090:5 I 15N 0.088:1 I 19N 0.086:1 I 19N	0.044:2 I 18N	0.076:1 I 19N
M.E.S.G.	0.084:20 N	0.043:20 N	0.072:20 N

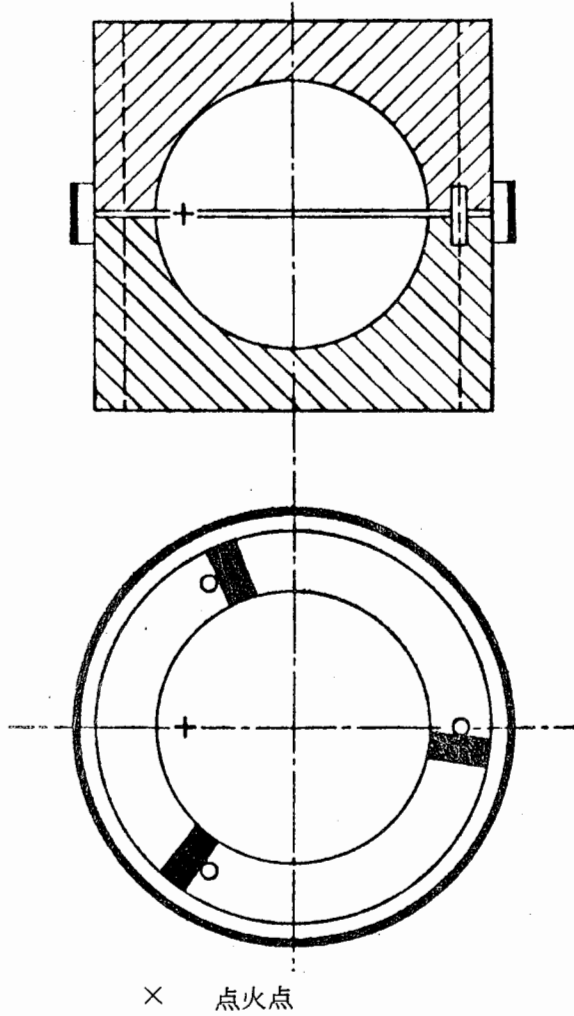


図 2-4-4 環状の障害物の効果を測定するための容器(内容積500cc)

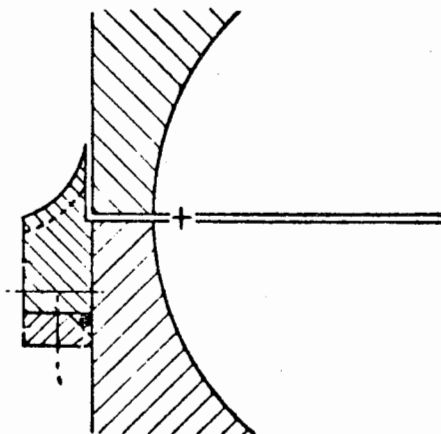


図 2-4-5 障害物の効果を測定するための容器(容積8l)

シリーズ	スキマ板の数	ギャップ	実験結果	1	2
1	3	0.011	40 N (W.E.S.G.) 10 N		
2	9	0.011			
3	2	0.009	10 N 1 I 9 N		
4		0.011			
5	2	0.009	10 N 10 N		
6		0.011			
7	特別な形のスキマ板	0.007	10 N		
8		0.009	1 I 9 N		
9		0.011	4 I 6 N		
10	-	0.007	10 N		
11		0.009	1 I 9 N		
12		0.011	10 N		
13	-	0.009	10 N		
14	-	0.011	10 N		
15	-	0.011	10 N		
16	-	0.009	10 N		
		0.011	9 I 1 N		

I : 外部の混合ガス発火
N : 外部の混合ガス非発火
+ : 点火位置
O : スピゴット

表 2-4-7 スキマ板の形状配置方法個数および点火源の位置のセーフ・ギャップに及ぼす影響(ギャップの寸度0.007 0.009および0.011in)

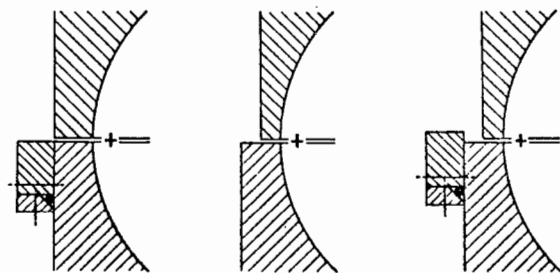


図 2-4-6 障害物の効果を測定するための容器(容積8l)

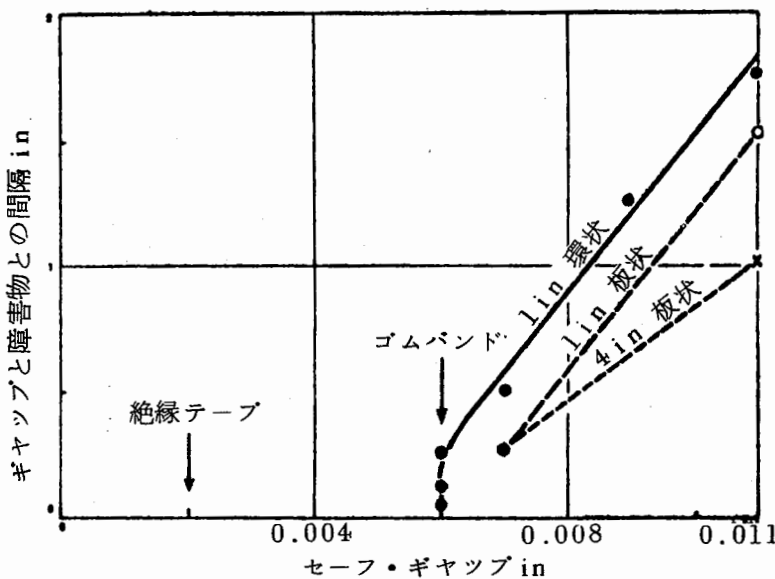
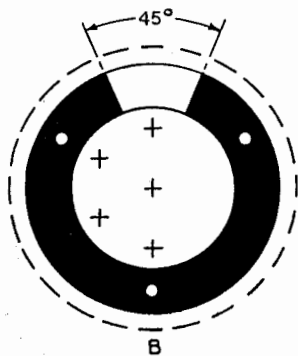


図 2-4-7 M.S.D.とセーフ・ギャップ



○: 容器スピゴット +: 点火点
 - - - - - 外部の障害物の位置 (環帯またはテープ)

図 2-4-8 障害物の影響についての測定容器 (容積8ℓ)

D.W. Woodhead, D.H. Jones および J.R. Blackwell²⁾は、測定容器のスキマ板の形状を変えることによってセーフ・ギャップの寸度に如何なる影響を与えるかを研究した。使用したガスはH₂-空気系混合ガスであり、スキマ板の形状、寸法、配置方法、点火源の位置および測定されたセーフ・ギャップの寸度については、表 2-4-7 の一覧表を参照して頂きたい。

2.5 霧囲気の圧力または容器内部の圧力とセーフ・ギャップ

燃焼の挙動は、圧力に対して依存性を有しているから、当然セーフ・ギャップは、霧囲気の圧力または容器内部の圧力に支配される。このことは、実用的見地

から安全工学的にみて極めて重要な事項であり、厳密な意味からいえば、開放型の容器を用いてセーフ・ギャップを測定した場合においては、その時の大気圧による補正を必要としよう。したがって多数の研究者によつてセーフ・ギャップに及ぼす圧力の影響に関する研究がなされており、この項においては、測定容器内部のガスおよび蒸気の圧力がセーフ・ギャップに及ぼす効果と霧囲気のそれとに二つに分けて詳述する。

2.5.1 測定容器の内部のガスおよび蒸気の圧力がセーフ・ギャップに及ぼす影響

K.H. Grobleben¹⁾は、これについての興味のある研究結果を発表しており、その詳細は、図 2-5-1 から図 2-5-4 までの図表にしめすとおりであり、いずれも初圧の上昇とともにセーフ・ギャップは、減少している。同氏は、さらにフランジの表面の形状の変化について、加圧下の状況で実験を行なっているが、CH₄-空気系混合ガスについては、ラビリンス構造の方がセーフ・ギャップの値が大きいかかわらず、H₂-空気系混合ガスを使用した実験においては、逆の効果をしめしていることは注目し値いしよう。

これらの実験は、B.V.S. で行なわれたものであるが、P.T.B. の K.Nabert²⁾は、n-C₆H₁₄, CH₄, C₂H₄ および H₂ 各ガスおよび蒸気と空気系の混合ガスについてこの初圧と M.E.S.G. の関係を取りまとめ、1/P に対してリニヤ-の関係があることを見出している。この結果については、図 2-5-5 および図 2-5-6 にそれぞれしめすことにする。

2.5.2 霧囲気の圧力のセーフ・ギャップに及ぼす影響

H. Phillips¹⁾²⁾は、前記の Grobleben の実験結果を用いて、理論計算によつて CH₄, H₂ および都市ガスの各々の空気系の混合ガスについて、圧力とギャップの寸度について算定し、図 2-5-7 のような図表をえた。これらの理論計算をふまえた上で、H. Phillips および S.K. Shaw³⁾は、点火確率 P とパラメータ n を用いて、大気圧の変動に伴うギャップに対する影響を解明し、図 2-5-8 の結果を発表した。これらの結果を実用的な観点から整理すると図 2-5-9 の

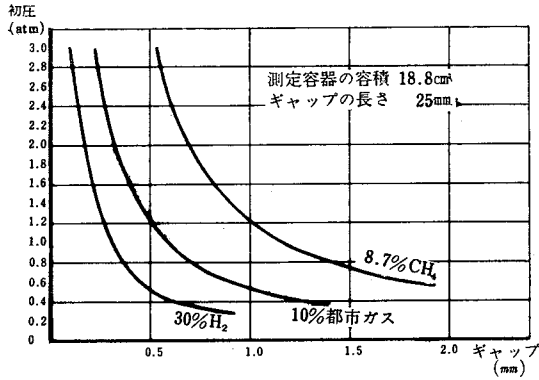


図 2-5-1 初圧のセーフ・ギャップに及ぼす影響

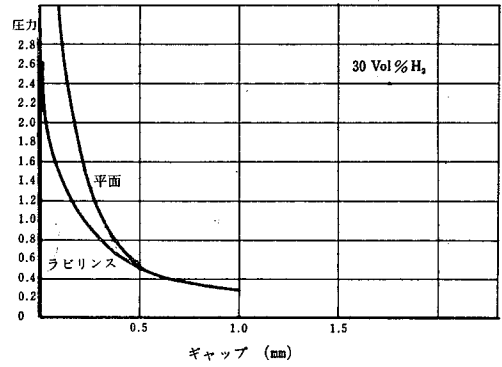


図 2-5-4 初圧のセーフ・ギャップに及ぼす影響

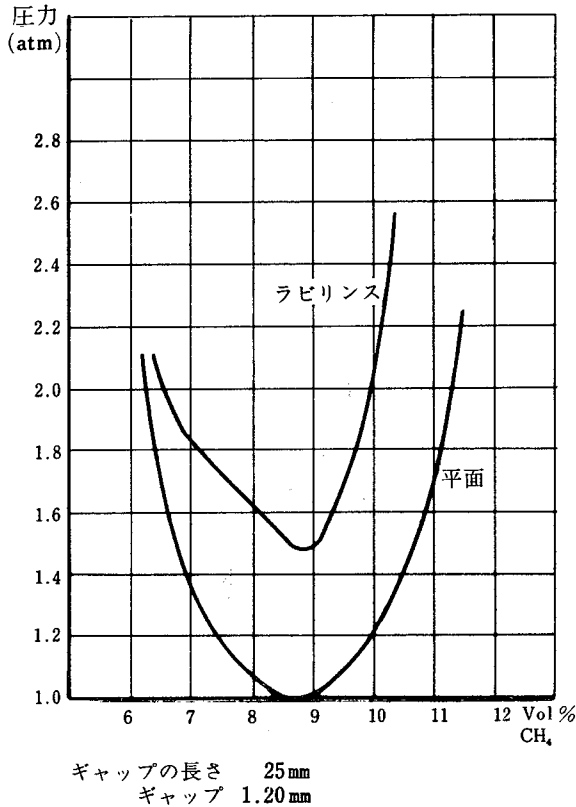


図 2-5-2 フランジの形状別、初圧の影響、CH₄/空気を 使用

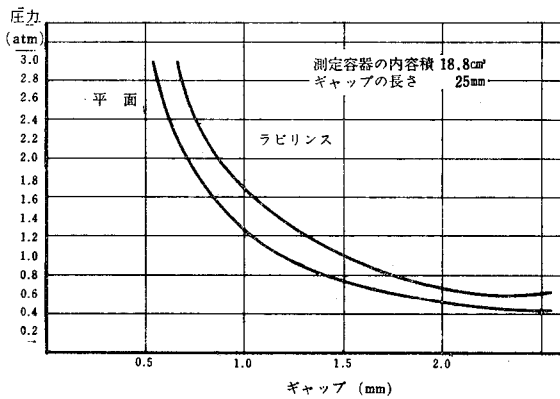


図 2-5-3 フランジの形状別、初圧別のセーフ・ギャップ (8.7% CH₄/空気を 使用)

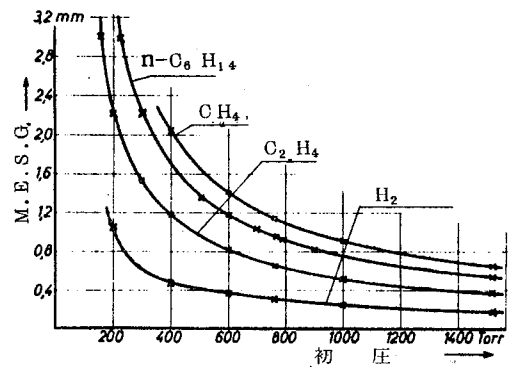


図 2-5-5 M.E.S.G. に及ぼす初圧の影響
測定容器の内容積 0.02ℓ

とおりとなり、大気圧の微小な変動に対する補正値が得られ、この表は安全工学の立場から、極めて有用であると考えられる。

2.6 可燃性ガスまたは蒸気の温度とセーフ・ギャップ

セーフ・ギャップと温度の相関については、測定容器の内部にみだされたガスおよび蒸気の温度、測定容器を囲ぎょうするその温度すなわち雰囲気温度、あるいは内部のガスおよび蒸気の燃焼にともなう燃焼生成物の温度の影響に分類される。

K. H. Grobleben¹⁾は、CH₄ - 空気系の混合ガスを用いて、測定容器内で燃焼させた場合の燃焼生成物の温度、エンタルピなどを測定して図 2-6-1 のような結果を発表している。CH₄ - 空気系混合ガスのセーフ・ギャップは、普通 8.7% CH₄ の空気系の混合ガスの濃度で測定されるから、燃焼生成物の温度およびエンタルピが最大値をしめす濃度よりもうすい濃度の点においてあらわれていることは、注目に値しよう。

測定容器内部のガスまたは蒸気そのものを予熱する

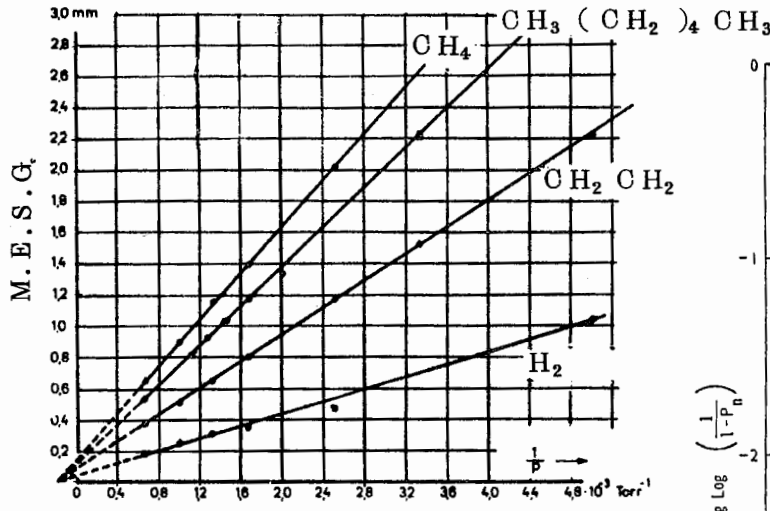


図 2-5-6 M. E. S. G. に及ぼす初圧の影響
測定容器の内容積 0.02ℓ

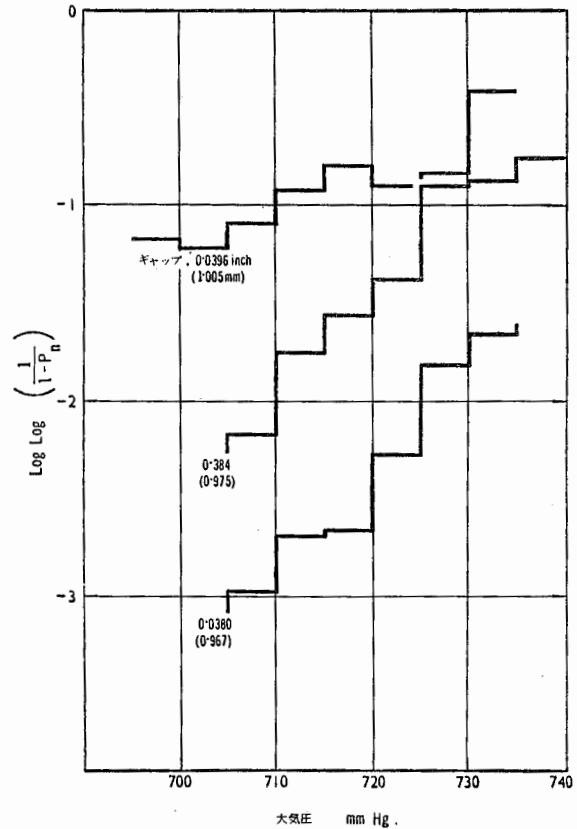


図 2-5-8 点火確率に対する大気圧の影響

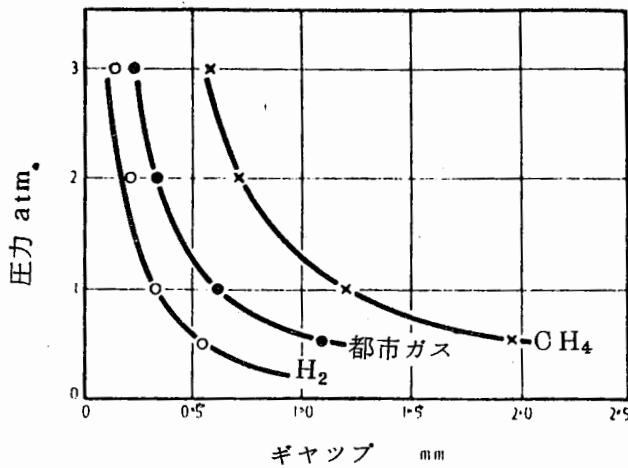


図 2-5-7 Grobleben の実験結果より算定した
ギャップに対する圧力の影響

ことによつて着火し、温度の影響を実験または算定した研究者としては、H. Phillips²⁾およびK. Naber³⁾の両氏があげられるが、後者の研究は、均一に容器を予熱するという実験技術上の制約から内容積 15 cc の測定容器を用いたものである。両者の結果からみて温度の上昇に伴いセーフ・ギャップは減少しその関係は、リニヤーの関係にあることをしめしている。

このことは、異常環境下において防爆電気機器を使用する場合における重要な安全工学的考察であり、前者の報文を図 2-6-2 に、後者の報文よりの抜すいを図 2-6-3 および図 2-6-4 に掲載した。

2.7 雰囲気湿度とセーフ・ギャップ

雰囲気湿度によつてセーフ・ギャップが影響されることは、想像に難くないところである。しかし CO

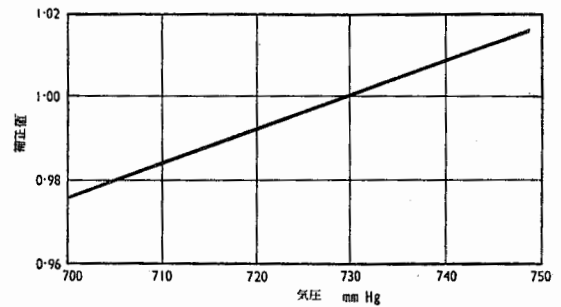


図 2-5-9 ギャップの寸度に対する大気圧の補正值

のように空気中の湿度によつて爆発限界が広くなるという一般の可燃性ガスまたは蒸気の物性と異なる特異な挙動をしめすものもあり、湿度のセーフ・ギャップに及ぼす影響は、多くの学者にとって興味深い研究対象の一つとなっている。

しかしこの種の研究は、如何に均質な湿度を維持するか、実験技術的にもテクニックが要求され、R. Torry¹⁾は、図 2-7-1 にしめすような実験装置を用いて、この研究を行なった。報文には、この研究が、外部容器の湿度と内部容器の湿度を相互に変えることにより、この組み合わせで行なわれたため膨大なデータが

しめされているが、これを一つの表にまとめたものは表2-7-1のとおりであり、内外のガスの湿度が高い場合のセーフ・ギャップは、内外のガスが乾燥している場合よりもかなり大きな値をしめしていることがうかがわれる。この関係は、縦軸を点火抑制率としての無次元な値に対してプロットしてみるとさらに明快なものになろう。これを図2-7-2にしめす。使用したガスはCH₄-空気系混合ガスである。

これに対してK.Nabert²⁾は、同じCH₄-空気系混合ガスを用い、実験装置の温度を調節することによって、その温度における飽和蒸気圧の変化に応じて湿

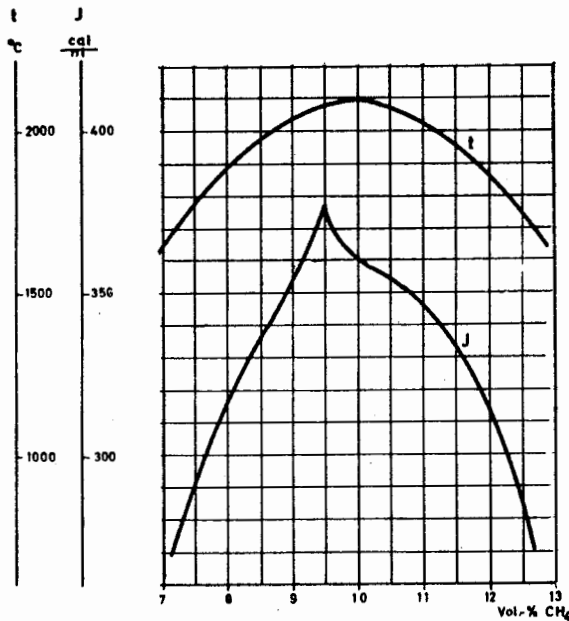


図 2-6-1 CH₄/空気濃度別、燃焼生成物の温度およびエンタルピ

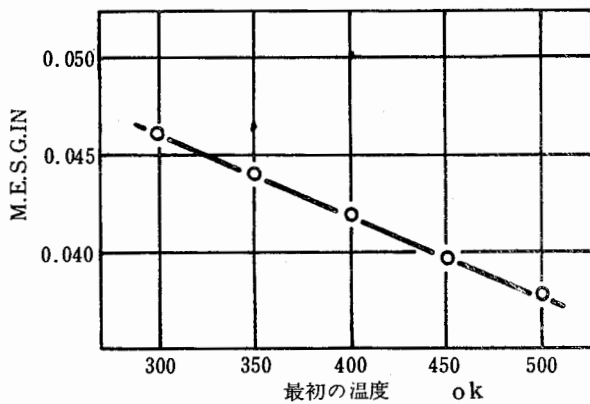


図 2-6-2 M.E.S.G.INに対する温度の影響の推算 (CH₄/空気混合ガスを使用)

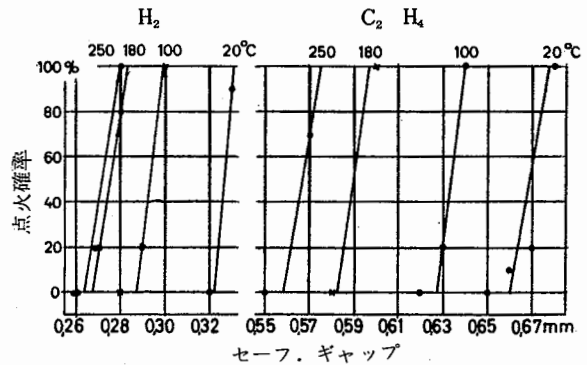


図 2-6-3 セーフ・ギャップに対する温度の影響

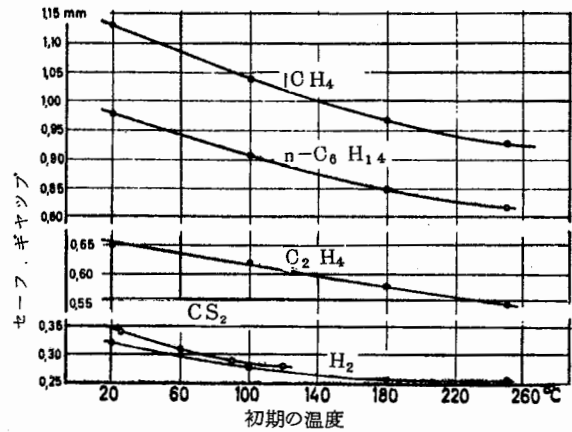


図 2-6-4 セーフ・ギャップに対する温度の影響

度を変化させることにより、これのセーフ・ギャップの寸度に及ぼす影響を測定した。この結果は、図2-7-3にしめすとおりであり、温度が+25℃から-25℃に変動するにつれて、セーフ・ギャップは、約0.2mmの変化をしめし、耐圧防爆電気機器を各種の湿度の条件下で使用する場合、その温度における飽和蒸気圧という一つの観点から、極めて実用性に富む注目すべきデータである。

H. Phillips³⁾は、これらの実験データをふまえ、エントレイメント・レート (Entrainment Rate) を基礎とする理論式から、湿度の効果について図2-7-4にしめすような直線を得ている。なおエントレイメント・レートに関する理論については、別の資料に譲りこの資料ではふれないこととする。同氏が推定したデータはCH₄-空気系混合ガスについてである。

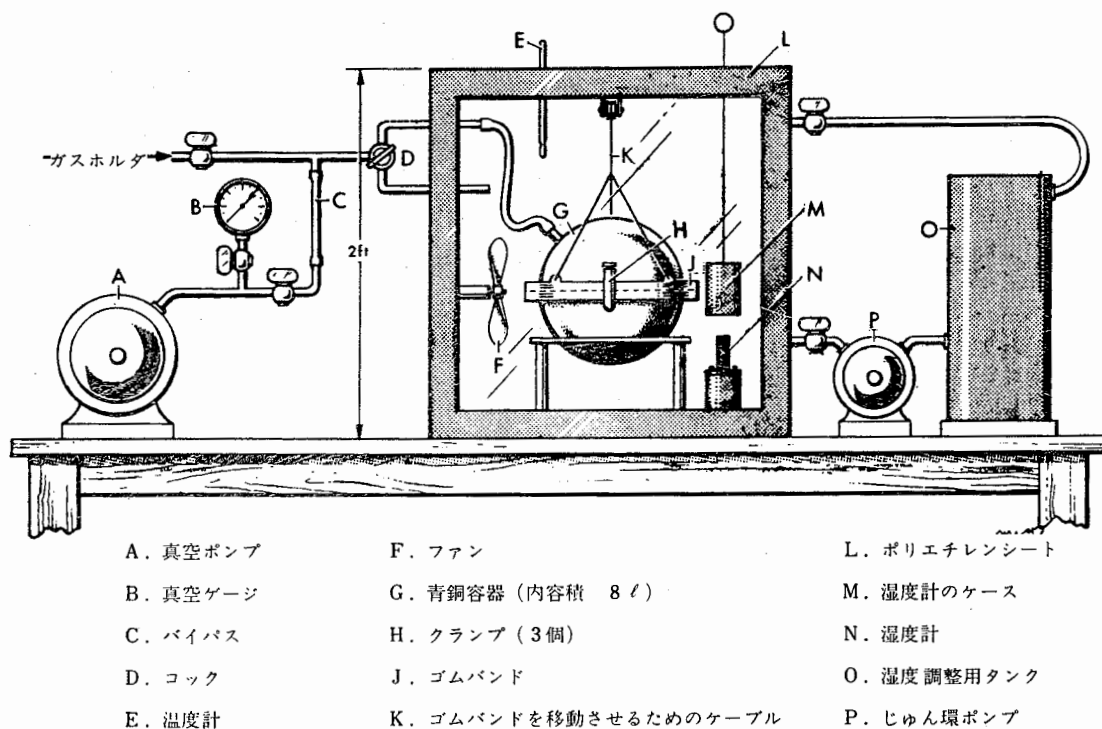


図 2-7-1 実験装置のモデル図

表2-7-1 湿度に対するセーフ・ギャップの変化

湿度*		CH ₄ %		点 火 確 率 % (実験回数は 20 回)							M.E.S.G.	S.M.S.G.
内部 容器の ガス	外部 容器の ガス	内部 容器の ガス	外部 容器の ガス	ギャップの寸度 in							in	in
				0.050	0.049	0.048	0.047	0.046	0.045	0.044		
Wet	Wet	9.0	8.5	100	70	15	0	-	-	-	0.047	0.041
Wet	Lab	9.0	8.5	100	75	10	0	-	-	-	0.047	0.041
Wet	Dry	8.5	7.5	100	80	70	5	0	-	-	0.046	0.039
Lab	Lab	8.5	7.5	-	-	100	5	0	-	-	0.046	0.039
Dry	Wet	8.5	8.5	-	100	75	55	0	-	-	0.046	0.038
Dry	Lab	8.5	8.5	-	-	100	35	15	0	-	0.045	0.038
Dry	Dry	8.5	8.5	-	-	-	100	10	15	0	0.044	0.037

Wet=> 16 mg水蒸気/ℓ Lab=7-9 mg/ℓ Dry=<1 mg水蒸気/ℓ

2.8 可燃性ガスおよび蒸気の濃度とセーフ・ギャップ

セーフ・ギャップは可燃性ガスおよび蒸気の濃度に対して極めて高い依存性を有していることは、安全工

学上からみても、例えば耐圧防爆構造電気機器の試験ガス濃度の選定などの実用的観点からみても、無視することはできない。

これらの性質についての研究は、主としてドイツ語圏の各国における研究者によって行なわれ、多数の報

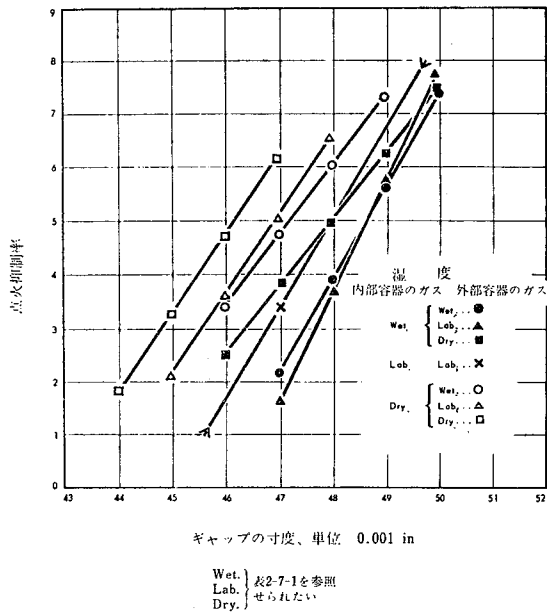


図 2-7-2 点火抑制回路曲線

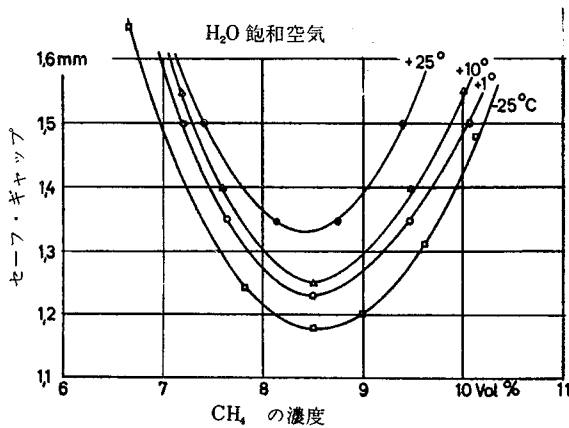


図 2-7-3 CH₄ の濃度別、湿度別の M.E.S.G. (測定装置の内部容積 15 cc)

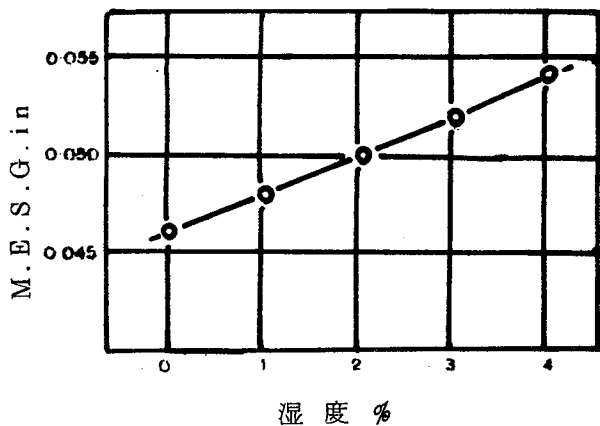


図 2-7-4 M.E.S.G. に対する湿度の影響の推定

文がみられるが、この資料ではそのうち二三の例を掲げることにした。なお H₂ - 空気系ガスといったようなインセンティブなガスは、この依存性は、実験条件によって支配されるところが多く、各国のデータに相当な相違があることを付記したい。

西独の研究者である K.H. Grobleben¹⁾ は、図 2-8-1 のような CH₄ - 空気系混合ガスのセーフ・ギャップの濃度依存性を解明しているが、M.E.S.G. は化学当量濃度および最大上昇圧力濃度のいずれにも無関係である点においてみられている。

その他、C₂H₄ - 空気系混合ガスの最大昇圧速度などを濃度別に求めたチェコの L. Urbancová²⁾ など、多数の論文がみとめられるが、K. Nabert³⁾ は、これらの実験結果をふまえて、図 2-8-2 のように 1, 2 の物質についての、セーフ・ギャップの濃度依存性を取りまとめており、極めて有益な報文といえよう。

セーフ・ギャップ

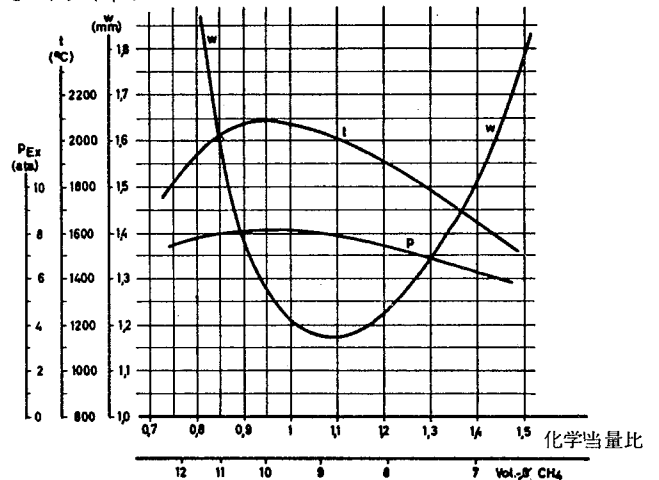


図 2-8-1 セーフ・ギャップ、温度、最大圧力の CH₄ - 空気系 Vol% および化学当量比に対する依存性

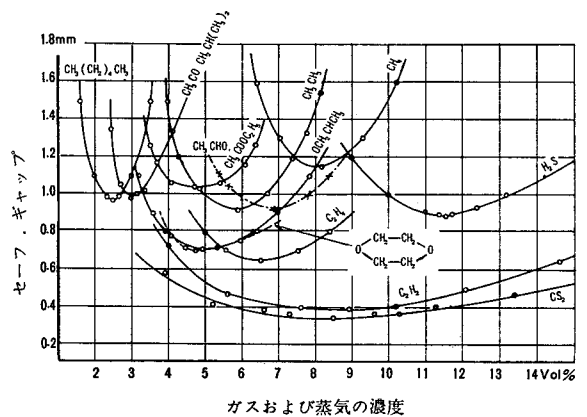


図 2-8-2 ガスおよび蒸気の濃度の関数としての M.E.S.G.

2.9 ガスおよび蒸気の乱れとセーフ・ギャップ

ガスおよび蒸気が静止している場合とガスおよび蒸気の流れが乱れている場合とでは、セーフ・ギャップの値が違ふだろうか、これらのことは、耐圧防爆構造の電気機器を使用する場合に大いに考慮されなければならぬことである。したがって主に実用的な見地から、セーフ・ギャップの寸度に対するガスおよび蒸気の流れの乱れ (Turbulent) の影響が研究されてきた。

P. B. Smith¹⁾はこの見地から実験を進め、用いた実験装置は内容積 8 l の球形容器であり、内部のガスは、9.0% CH₄-空気系混合ガス、外部のガスは、8.5% のそれを使用した。

ガスの流れを乱す方法は、直径 8 in の 3 枚の翼をつけたファンを 850 r.p.m. で回すことによつて行なつた。

その研究結果をしめすと表 2-9-1 のとおりでありガスをしょう乱した場合の方が、同じギャップの寸度であつてもその点火確率が小である。

同氏の実験は、何ら空気力学的な定量的観察がなされていないので、この種の研究は、さらに将来に持ちこされている。

表 2-9-1 ガスの乱れのセーフ・ギャップ及ぼす影響

ギャップの寸度 in	点 火 確 率	
	静止の場合	乱した場合
0.046	0	0
0.047	0.05	0
0.048	0.15	0
0.049	0.70	0.05
0.050	0.70	0.35
0.051	0.95	0.15
0.052		0.40

2.10 ギャップから燃焼生成物の噴出、フランジの温度および雰囲気ガスのギャップを通じての容器内部への拡散

この項においては、容器内外の燃焼生成ガスあるいは雰囲気ガスの相互拡散を論ずることとするが、容器内部から外部に拡散する際のガスの熱損失は、セーフ

・ギャップの効果を論ずる上に無視できないので、フランジの温度なる款をこの項に加えることとした。

2.10.1 ギャップからの燃焼生成物の噴出

セーフ・ギャップによる消炎機構を解くためには、ギャップより噴出する炎の挙動が問題にならう。

この問題の解決にまず取り組んだのは、T. J. A. Brown¹⁾であり、同氏は、内容積 8 l の内部容器を用い、ギャップより噴出する状況を観察するとともにその一部について写真撮影に成功している。使用したガスは、3% の C₅H₁₂-空気系の混合ガスであり、その結果についてかかげるとつぎの表 2-10-1 のとおりである。10 mils 以下の場合における黄色の炎は、一応温度のひくいフレームと考えられており、30 mils の場合における Bright blue の炎は、40 mils の場合と同じであるが、この個所についての説明は、同氏は行なっていない。この時の M.E.S.G. は、35 mils である。

表 2-10-1 ギャップの寸度別噴出炎の色

ギャップ 1/1000 in	観 察 の 結 果
40	Bright Blue
30	Bright Blue
20	Reddish Blue
10	Yellowish Blue
10	Yellowish Blue
7	Reddish Blue
7	Yellowish Blue
4	炎が見えない
4	炎が見えない
0	炎が見えない
0	炎が見えない

2.10.2 フランジの温度

フランジから噴出する燃焼生成物の炎の色を肉眼で判定することは、個人差があることは否めない。前項に掲げた T. J. A. Brown の論文においても 3 名の観測者によつてそれぞれ違つた結果を報告したと付記されている。

したがって多くの研究者によつて、フランジ入口のガスの温度と出口のガスの温度を測定する試みがなされたが、実験に使用する熱電対の応答速度あるいは熱電対自身の熱損失などの諸点から、必ずしも正確にガスの温度を把握していない。これらのことから、E. D. DaintyとG. K. Brown¹⁾の両氏は、8.5%のCH₄-空気系の混合ガスを用いて、一定の実験条件を設定することによつて、理論値と実験値の比較を行なった。同氏らのフランジによる温度低下の理論式はつぎのとおりである。

$$\Delta t = 0.0163 (t_i - t_f) (T_i)^{\frac{1}{4}} \left[\frac{L}{g^2 P_i} \right]^{\frac{1}{2}}$$

- t_i : 燃焼生成ガスの温度
- t_f : フランジの表面温度
- L : ギャップの長さ
- g : セーフ・ギャップの寸度
- P_i : 爆発圧力

上記の基本となる状態方程式をもとにして、同氏は、セーフ・ギャップの長さに応じて温度降下を計算している。これを図にしてしめすと図2-10-1のとおりである。

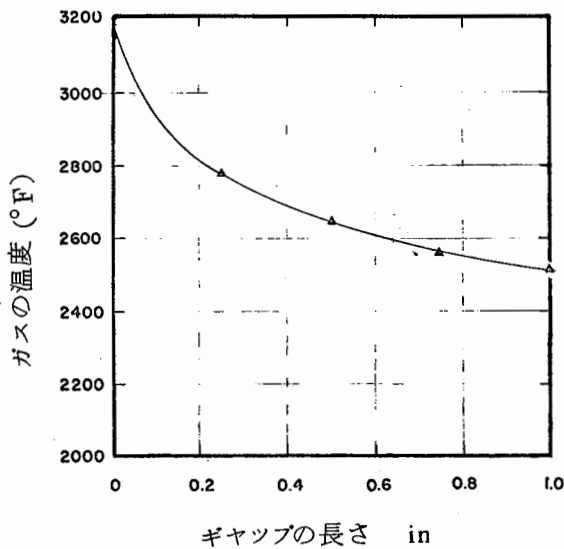


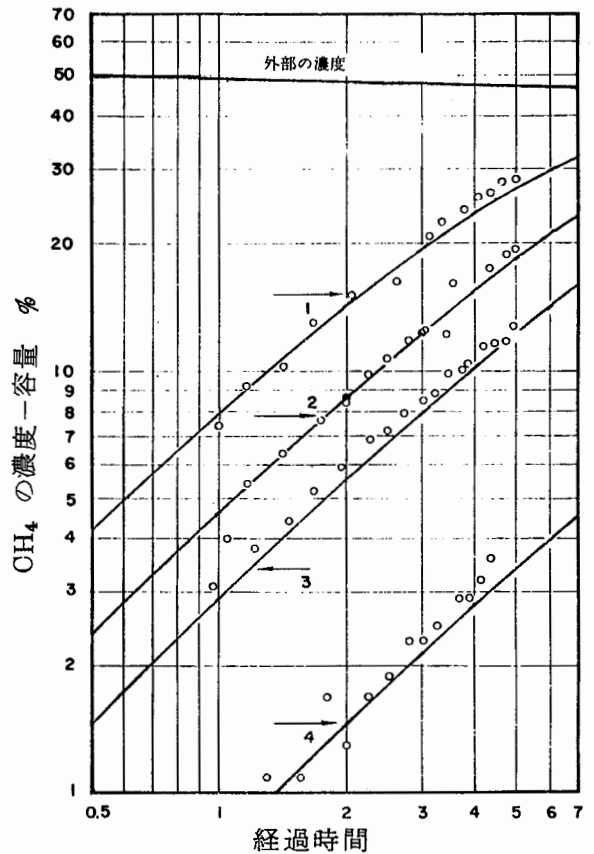
図 2-10-1 セーフ・ギャップの出口のガスの温度の理論値

2.10.3 外部ガスのギャップを通じての容器内部への拡散

前々項においては、容器内部の燃焼生成物の外部への噴出について論じたが、この項においては、外部ガ

スのギャップを通じての容器内部への自然拡散を論じてみよう。このことは、耐圧防爆構造の容器の安全性を試験する等の場合に、容器の容積が非常に小さく、還流による強制拡散が不可能な時において大いに参考になるものがあるし、試験とか検定とかという立場を離れて広い安全工学という観点に立つても、その実用的意義が深いものといえよう。

E. D. DaintyとG. K. Brown¹⁾は、円筒状の小型容器を用いて、CH₄ 50% - 空気系の混合ガスの拡散状態を、ギャップをパラメータとして測定した。この結果をしめすと図2-10-2のとおりである。また同氏らはS. Silver²⁾を加えてギャップをほぼ一定とし、容積をパラメータとしてH₂ 44% - 空気系の混合ガスの自然拡散の状態を研究し、実験式を導出した。実験結果については、図2-10-3にしめすとおりである。これらの結果をふまえ、E. D. DaintyとG. K.



区分	ギャップ	ギャップの長さ	円周
	i n.	i n.	
1	0.020	0.5	18.2
2	0.011	0.5	18.2
3	0.0068	0.5	18.2
4	0.0018	0.5	18.2

図 2-10-2 円筒状容器(内容積508in³)内におけるCH₄の拡散

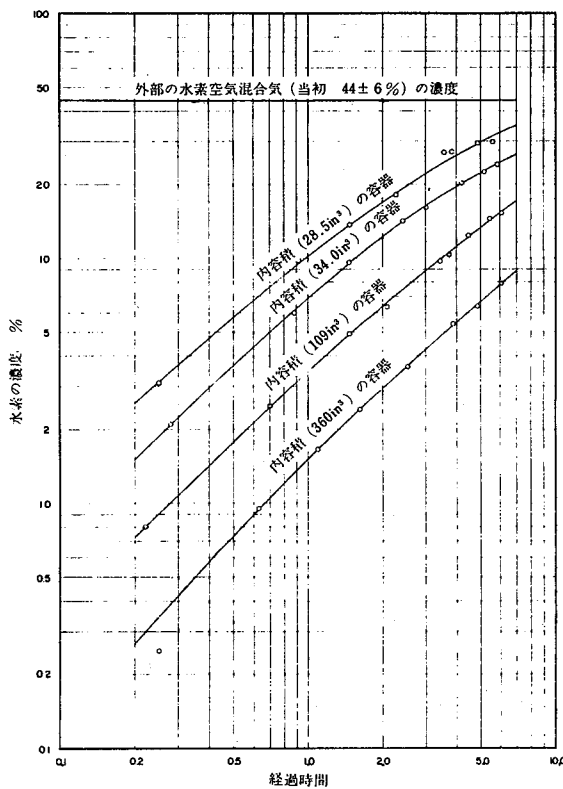


図 2-10-3 ギャップからの水素空気混合気の拡散

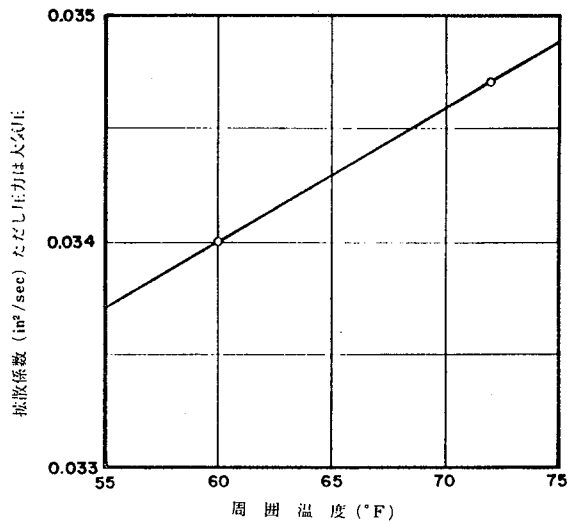


図 2-10-4 CH₄ 空気系混合気の拡散係数の温度による依存性

Brown³⁾は、図2-10-4にしめす拡散係数の温度依存性を算出したが、実用的価値が少くないと思われる。

2.11 最も危険な分類に属するガスおよび蒸気のセーフ・ギャップ

セーフ・ギャップはプロセスの定数であるから、どんな容器を用いてセーフ・ギャップを測定したかによ

ってその分類が異なり、VDE¹⁾においては、H₂、C₂H₂、CS₂が最も危険な分類に属するそれであり、ソ連のПИБЭ²⁾では、測定条件は、かなり異なっているがこれにさらにH₂Sを加えている。

2.11.1 水素-空気系混合ガスのセーフ・ギャップ

P. B. Smithと J. B. Blackwellは、ギャップの長さ1 in. 8 lの球状の測定容器を用いMost incendi-ve mixtureとしては、32%のH₂-空気系混合ガスを使用し、Most easily ignited mixtureとしては、24%のH₂-空気系混合ガスを使用することによつてM. E. S. G.の値を測定し、0.011 inであつた。その他の測定条件としては、測定回数は40回であり、ギャップ・インクリメントは、0.001 inである。その後同氏等は、H₂-空気系混合ガスのセーフ・ギャップについて再度測定¹⁾を行ない、表2-11-1のような結果をえた。測定容器は、前回の実験と同様であり8 lの容器と1 inのフランジを用いた。

D. H. Jonesと N. L. Heathcote²⁾は、H₂-空気系混合ガスのセーフ・ギャップを測定したが、この目的は主にギャップ外方の障害物の影響をみたものであり、一例をあげればギャップの外方に絶縁テープを装着した場合には前記のM. E. S. G.の数値は、0.011 inから0.002 inに減じていることは注目に値しよう。この詳細は、2.4項による。

D. W. Woodhead, D. H. Jones and J. B. Blackwell³⁾は、スキマ板の形状を各種変えH₂-空気系混合ガスのM. E. S. G.を測定した。この結果は表2-4-7にしめすとおりであり、ある種のスキマ板の形状の場合には、P. B. Smithと J. B. Blackwellによつて測定されたM. E. S. G.よりも低い値を記録した。この形状の詳細については、前記の表によつて頂きたい。

D. H. Jones and G. Taylor⁴⁾は、観点を変え85 : 15 H₂-CH₄-空気系混合ガスのM. E. S. G.を測定し、ギャップの外側にリングまたは絶縁テープを装着することにより障害物の影響についても併せて測定したが、後段については、2.4項によられたい。混合ガスのM. E. S. G.の値は、0.027 in.であり、測定容器は内容積8 lの容器を用い、スキマ板の設置方法などは図2-11-1を、測定結果については表2-11-2のとおりである。

表 2-11-1 H₂ のセーフ・ギャップ (外部混合ガス 12-40% H₂ - 空気系混合ガスおよび内部混合ガス 24-40% H₂ - 空気系混合ガス)

外部混合ガス 12-40% H ₂	ギャップ寸度 in			
	0.013	0.012	0.011	0.010
(1) 内部混合ガス 24% H ₂				
外部 { 16		10N		
20		10N		
24		10N		
(2) 内部混合ガス 28% H ₂				
外部 { 12		10N		
16	2I 8N	3I 7N		
20	8I 2N	10N		
24	10I	10N		
28	6I 4N	10N		
32	5I 5N	10N		
(3) 内部混合ガス 32% H ₂				
外部 { 12		10N		10N
16	8I 2N	10N	10N	10N
20	9I 1N	10N	10N	10N
24	10I	10N	10N	10N
28	9I 1N	10N	10N	10N
32	10I	10N		
36	1I 9N	10N		
40	10N			
(4) 内部混合ガス 36% H ₂				
外部 { 16		3I 7N		
20	10I		10N	
24	9I 1N			
28	8I 2N			
(5) 内部混合ガス 40% H ₂				
外部 24		10N		

I : 外部混合ガス発火
N : 外部混合ガス非発火

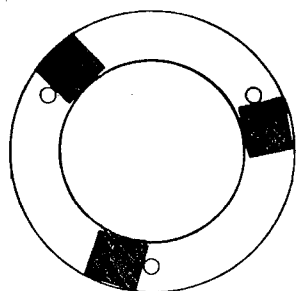


図 2-11-1 1 in. スキマ板の配置図

G.K. Brown, E.D. Dainty and S. Silver は、H₂ - 空気系混合ガスのセーフ・ギャップについて最少点火電流 (以下 M. I. C. という。) との相関、C₅H₁₂ - 空気系混合ガスに等価な H₂ - 空気系混合ガス濃度、容積の依存性、平坦なフランジよりの爆発の伝ば、ボルトによって緊縛されたフランジ間よりの爆発の伝ば、フランジ間にスキマ板を挿入した場合の爆発の伝ば、平坦なフランジをもつ容器中への H₂ - 空気系混合ガスの拡散およびネジ結合の各種の重要な条件下において研究を実施している。本項ではこのうち C₅H₁₂ - 空気系混合ガスと等価な H₂ - 空気系混合ガス濃度という章より抜萃をこころみ、他のデータについては、それぞれの項において記載しているのでこれを参照せられたい。この実験は、特殊の容器を用いて行なったものであり、C₅H₁₂ - 空気系混合ガスのセーフ・ギャップが 0.040 in であることから、これに等価な H₂ - 空気系混合ガスの濃度を求めたものであり、表 2-11-3 を見て頂きたい。同氏らは、H₂ - 空気系混合ガスのセーフ・ギャップに及ぼす H₂ - 空気系混合ガスの爆発圧力の影響を重視し、H₂ - 空気系混合ガス濃

表 2-11-2 (85:15 = H₂:CH₄) 20% - 空気系混合ガスの M.E.S.G. (側面点火)

ギャップ in	実験結果
スキマ板	
(i) 1 in. 正方形, 3枚	
0.019	40I
0.018	10I 10N
0.017	40N
(ii) 1 in. 円板, 9枚	
0.017	20N

表 2-11-3 C₅H₁₂ - 空気系混合ガスのセーフ・ギャップに等価な H₂ - 空気系混合ガスの濃度
ギャップの長さ 1 in
ギャップの寸度 0.0395 in

区分	H ₂ ガス濃度		爆発の伝ば		実験回数
	点火前	%	否	有	
1	9.95 ± 0.2		5	0	5
2	10.35 ± 0.2		4	-	5
			-	1	
3	11.08 ± 0.2		0	5	5

度別のピーク 圧力, 最大圧力到達時間を容器内の点火位置別に研究しているが, これについては, 図 2-11-2 による。

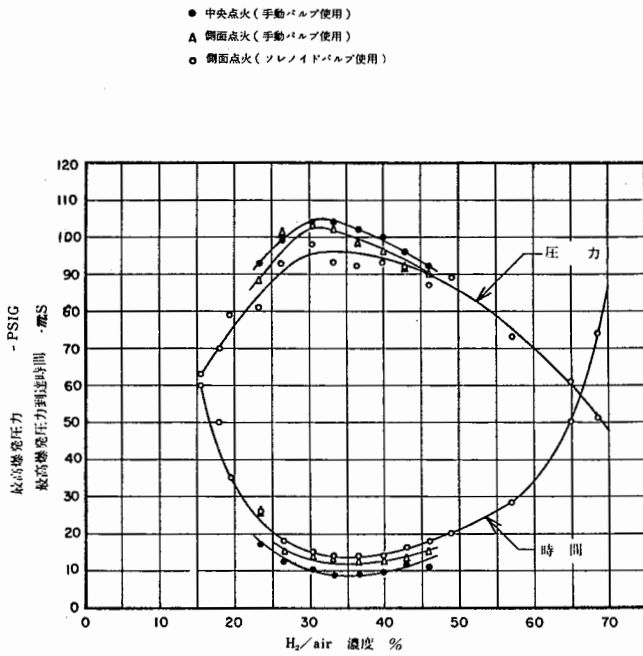


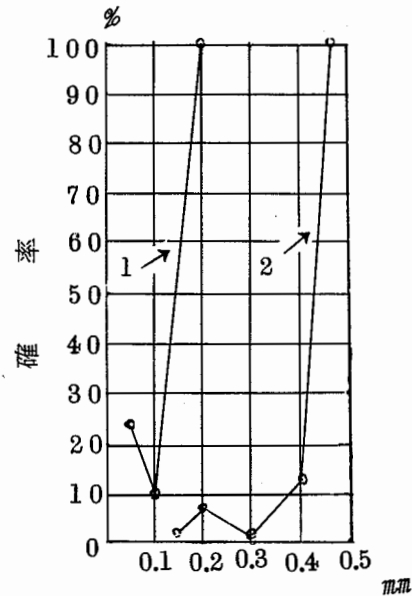
図 2-11-2 H₂/air 濃度別の最高爆発圧力および最高爆発圧力到達時間

2.11.2 アセチレン-空気系混合ガスのセーフ・ギャップ

C₂H₂-空気系混合ガスのセーフ・ギャップは, 各国の研究者にとって注目のまとなっている。

A. G. Ikhnov¹⁾は, カーボン・ホーメーションとセーフ・ギャップとの関連についてとらえ, 図 2-11-3 のような実験結果を発表しており, この実験結果に しめすところによれば, C₂H₂-空気系混合ガスのセーフ・ギャップについては, 見掛けの値が見出される。さらにこの図から, C₂H₂-空気系混合ガスの場合には, 直線状のギャップよりもラビリンスのそれの方がより大きな値をしめすことが理解されよう。測定容器は, 球状容器である。

A. G. Ikhnov の論文において測定容器の外部においてカーボン・ホーメーションにより着火する機構が, 重要な点であるが, これについて H. A. Бойков, A. Г. И хно, Л. Б. Резник²⁾は, 図 2-11-4 に しめす写真を撮影している。



- (1) C₂H₂-空気系混合ガス, 直線状
ギャップ $l=100$ mm
- (2) C₂H₂-空気系混合ガス, ラビリ
ンスギャップ $l=25$ mm

図 2-11-3 外部ガスの爆発の確率曲線

2.11.3 二硫化炭素-空気系混合ガスのセーフ・ギャップ

CS₂ については, N. Irving Sax¹⁾によって激しい毒性が指摘されている。このような事情も関連してこれについての実験報告はほとんど見られない。

しかし, B. S. 229²⁾において M. E. S. G. は 0.008 in. であり, Most incendive mixture および Most easily ignited mixture は, それぞれ 10% および 7.5% であると報告されている。

H. Ф. Шевченко, Г. Н. Манянин, С. С. Гескин³⁾は, 実際のモータについて, セーフ・ギャップ (зазор) について実験を行ない, 0.2 mm から 0.35 mm までの範囲のデータを報告している。この測定に使用した CS₂ の濃度は 7.0~7.8% である。なおこの報文では, CS₂, H₂ および C₂H₂-各空気系混合ガスのセーフ・ギャップを測定しており, これをしめすと表 2-11-4 のとおりであるが, この表にしめすデータは, 普遍的なセーフ・ギャップをしめすものではなく, この論文に用いられたモータについての特定のセーフ・ギャップをしめすものである。

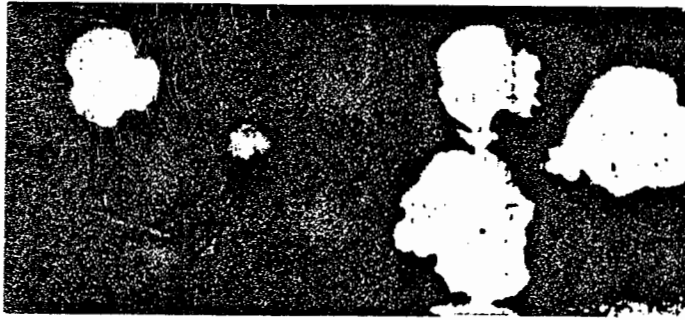


図 2-11-4 C₂H₂ 燃焼後のカーボン・ホーメーションの写真

表 2-11-4 モーターについての H₂, CS₂, C₂H₂ の M. E. S. G.

濃 度	セーフ・ギャップ mm									
	測 定 個 所									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
30-32% H ₂	0.2	0.3	0.35	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	-	-
30-32% H ₂	0.2	0.3	0.35	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	-	-
7-7.8% CS ₂	0.2	0.3	0.35	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	-	-
7-7.8% CS ₂	0.2	0.3	0.35	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	-	-
12.5% C ₂ H ₂	0.15	0.12	0.3	0.17	0.12	0.3	0.15	0.12	-	-
30-32% H ₂	0.3	0.2	0.3	0.45	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3
30-32% H ₂	0.3	0.2	0.3	0.45	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3
12.5% C ₂ H ₂	0.15	0.1	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2

2.12 セーフ・ギャップ実験値の統計的処理

セーフ・ギャップの実験値を求める場合には、可能な限りギャップ・インクリメントを微小な条件下において、1測定点あたり連続 20 回の繰返し実験によって通常求めるべきであると H. Phillips と S. K. Shaw¹⁾ は見解を述べている。したがって同氏らは各ギャップ・インクリメント毎の 20 回のデータを基にして、統計的セーフ・ギャップを算定しており、その点火確率は、通常 10⁶ 回に対して 1 回である。

Bruce²⁾ は、各種ガスおよび蒸気に対する実験値から正規積分曲線を作成して、統計的最大セーフ・ギャップを算定した。その標準例をその論文から引用すると図 2-12-1 のとおりである。

標準分布曲線は、次式であらわされる。

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$

さらに Bruce³⁾ は、この理論の実証をこころみ、

5000 例の実験データについて累積曲線が無次元で取りまとめた結果、図 2-12-2 のとおりとなり、フランジの長さに関係なくこの曲線にのることをしめた。ついで C₅H₁₂ - 空気系混合ガスのセーフ・ギャップを一例として取りあげての累積曲線は、図 2-12-3 にしめすところによる。

H. Phillips と S. K. Shaw⁴⁾ は Weibull の分布関数 (Weibull distribution function) を用い CH₄ - 空気系混合ガスについて実験を行ない統計的セーフ・ギャップを求めている。すなわち $\log\left(\frac{1}{1-P_n}\right)^{0.25}$ と δ との相関関係を求め、これにより確率 1/1000 をしめすギャップの寸度を求めたものであり、この関係を図 2-12-4 にしめし、これを一覧表にすれば、表 2-12-1 のとおりである。ただし δ は、確率 0 の寸度をあらわす。

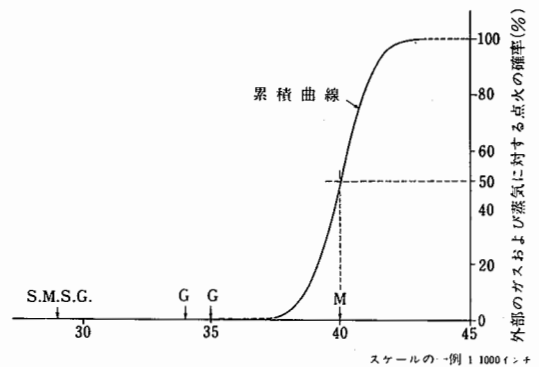


図 2-12-1 正規分布の累積曲線による S. M. S. G. の推定

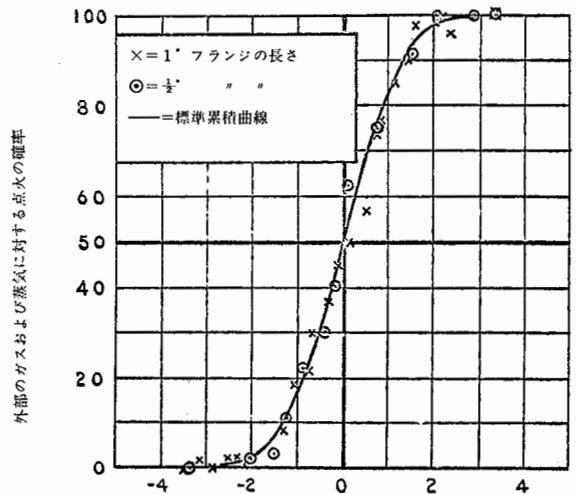


図 2-12-2 無次元の累積曲線

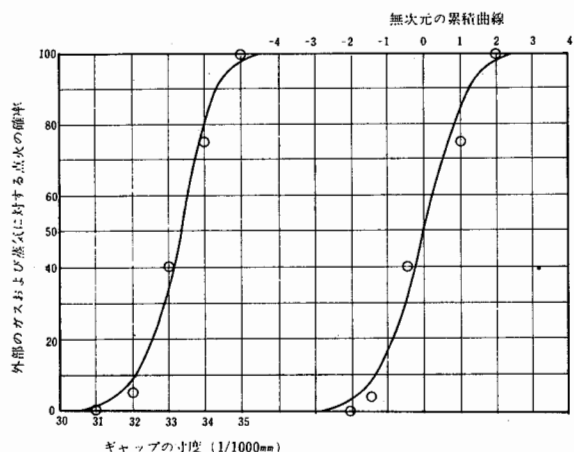


図 2-12-3 C₅H₁₂ の累積曲線
(フランジの長さ1/2)

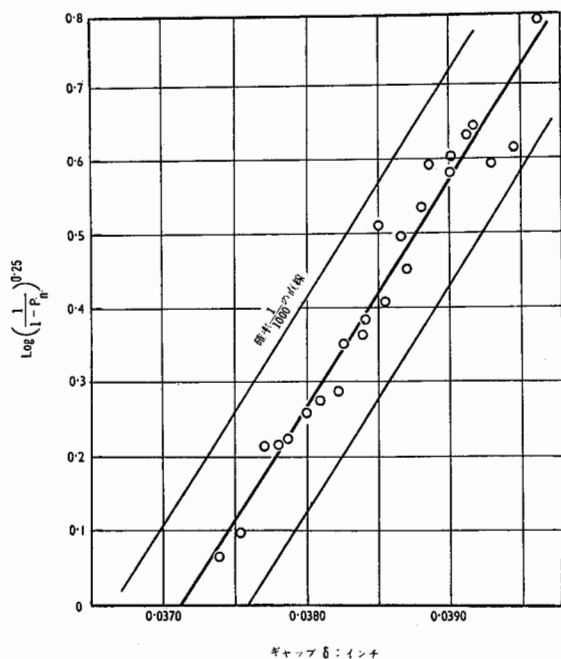


図 2-12-4 ウェイブル・プロットと δ の相関関係

表 2-12-1 ウェイブル分布による CH₄ のセーフ・ギャップ

0.5 (確率)	0.0396 in	1.005 mm
0.05 (")	0.0378 in	0.959 mm
0 (")	0.0371 in	0.942 mm
0.001以下 (")	0.0366 in	0.929 mm

3. セーフ・ギャップと他の安全工学定数との相関

対象となる可燃性ガスおよび蒸気の物質が同じであるならば、当然その物質に関する安全工学定数間には相互に関連があつて然るべきであろう。このような観点から多くの学者によつて、この問題に対するアプローチが試みられた。ここに紹介するのは、現在までのその全容であるが、将来さらに多くの安全工学定数間には、その相関がみとめられよう。

またこの相関は、実用工学的にもはなはだ意義が深いものである。なんとなれば、セーフ・ギャップの実用値は、実験的的最大セーフ・ギャップという述語で定義されるように、多数の実験の結果から求められるものであり、この値が測定がより容易な他の安全工学定数より求めることができるならば、便宜が多いといわなければならない。

3.1 最小点火電流とセーフ・ギャップとの相関

最小点火電流 (Minimum igniting Current) と M. E. S. G. との相関関係についての研究は、イギリスにおいて B. S. 1259 (1958) と B. S. 229 (1957) における可燃性ガスおよび蒸気の種類表を相関づけるために、古くから行なわれてきており、最近に至るまで多数の論文がみられる。

すなわちイギリスの C. Slack¹⁾ および D. W. Woodhead²⁾ の論文ならびにアメリカにおける危険物質委員会³⁾ のそれであるが、これらの内容は、同一であるので、ここでは、C. Slack と D. W. Woodhead の両氏からなる報文からその相関図表を抜すいと図 3-1-1 および図 3-1-2 のとおりである。M. I. C. の値は、イギリスでは、電源電圧が 24V、回路インダクタンスが 0.095H の場合の電流値である。前掲の図でわかるようにアンモニアについては、かなり飛び離れた相関をしめしているもののその他のガスおよび蒸気については、図 3-1-2 にみられる如く、十分な相関関係が認められよう。

なお図 3-1-2 については、多数の報文が出されており、例えば IEC⁴⁾ の報告にも引用されている。

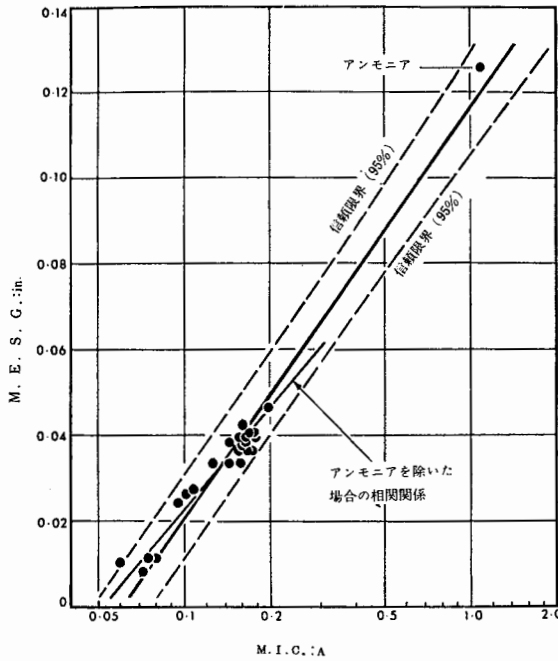


図 3-1-1 M.E.S.G.とM.I.C.の相関関係(その1)

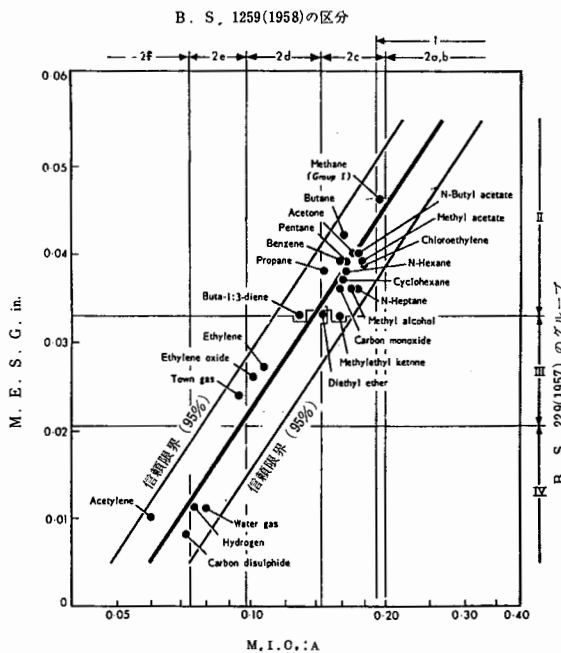


図 3-1-2 M.E.S.G.とM.I.C.との相関関係(その2)

3.2 消炎距離および消炎直径とセーフ・ギャップとの相関

消炎距離または消炎直径の定義については、この本ではふれないこととするが、それぞれ燃焼学のテキスト

トを参照して頂きたい。本項では、この両者とM.E.S.G.の相関についてみることにする。

H. Phillips¹⁾によれば、各可燃性ガスまたは蒸気別の消炎距離とM.E.S.G.は、表3-2-1のとおりであり、これからうかがえる如く、M.E.S.G.は消炎距離よりも小さい値を示しているが、両者について明確な相関を規定していない。

これに反して消炎直径とM.E.S.G.の相関については、J.R.Grove²⁾の研究によると、[消炎直径(in) - 0.027]の値とM.E.S.G.は直線関係にあることがわかった。前項で述べたようにM.E.S.G.は、M.I.C.とリニヤーの関係にあるから、したがって消炎直径もまたM.I.C.と直線関係にある。これらの関係を表3-2-2、図3-2-1および図3-2-2においてしめすこととする。

表3-2-1 消炎距離とM.E.S.G.との関係

燃 料	消炎距離 in	M.E.S.G. in
Hydrogen	0.023	0.011
Carbon disulphide	0.021	0.008
Ethylene oxide	0.043	0.026
Diethyl ether	0.072	0.033
Butadiene	0.048	0.033
Cyclohexane	0.116	0.037
Benzene	0.075	0.039
Pentane	0.079	0.039
Butane	0.085	0.042
Propane	0.068	0.038

3.3 UFL/LFLおよびLFL・ΔHとセーフ・ギャップとの相関

ここでUFLまたはLFLは、それぞれ爆発上限界濃度および爆発下限界濃度といい、UFL/LFLはその比であり、この数値が大きい程、その危険度は大きいと多数の安全工学者によって定義されている安全工学定数である。またΔHは燃焼熱であり、LFL・ΔHは、爆発下限界濃度と燃焼熱との積ということができエンタルピと関係をもつ安全工学定数であるといえる。

これらの二つの定数とセーフ・ギャップの相関については、アメリカにおいて主として研究が行なわれ、S.G.Woinsky¹⁾およびCommittee on Hazardous materials²⁾の論文と相関を知るために引用したNatio-

表3-2-2 消炎直径 M.E.S.G. および M.I.C.の実験値

燃 料	消炎直径 in	MESG in	M.I.C. A
1 Ammonia	0.869	0.125	1.07
2 25% Methane 75% Nitrogen	0.259	0.031	
3 2-Chloropropane	0.171	0.052	
4 Methane	0.139	0.046	0.195
5 Xylene	0.122 (39°C)	0.042	
6 iso-octane	0.117	0.041	
7 Ethyl acetate	0.123	0.041	
8 Ethanol	0.117	0.040	
9 Amyl acetate	0.116 (48°C)	0.039	
10 Vinyl chloride	0.107	0.038	0.180
11 iso-butanol	0.114 (40°C)	0.038	
12 n-butanol	0.106 (45°C)	0.037	
13 Methanol	0.106	0.036	0.167
14 Butadiene	0.084	0.033	0.129
15 Ethyl ether	0.103	0.033	0.145
16 Ethylene	0.069	0.028	0.108
17 Ethylene oxide	0.064	0.026	0.101
18 Water gas	0.0375	0.011	0.080
19 Hydrogen	0.0354	0.011	0.075
20 Acetylene	0.0335	0.010	0.060
21 Ethyl chloride	0.127	-	0.20
22 Acetic acid	0.22 (61°C)	-	0.39

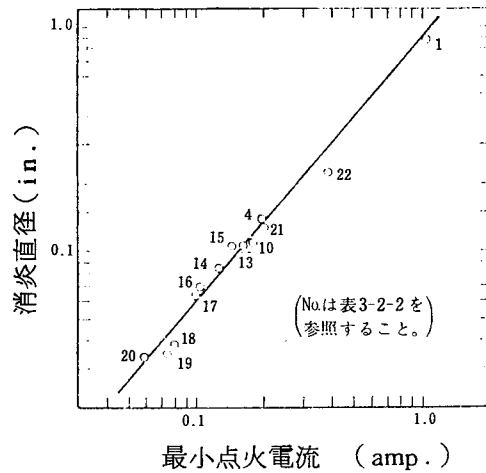


図 3-2-2 M.I.C. 対消炎直径の相関関係

nal Electrical Code (米, 以下 NEC という) Table 500-2(c), Chemicals by Groups³⁾の報文があるが, 前者の論文と後者の論文とは相違が認められるので, 多数の物質との相関関係を取扱っている後者の報文を本資料では引用することとした。

後者の報文を本資料では引用することとした。

セーフ・ギャップの研究は, 歴史的にみる場合, ヨーロッパ大陸において発足したものと見えるので, これをテーマとした報文は大陸型のものが多く, この資料では, 主として大陸諸国の論文を引用してあるが, この項においては, 前記の NEC および UL におけるセーフ・ギャップの実験値を紹介することとした。

図 3-3-1, 図 3-3-2 および 図 3-3-3 にそれぞれ B.S.229 のセーフ・ギャップのデータ, UL のデータおよび N.E.C.500 のガス分類案に対する UFL/LFL の関係をしめしているが, 個々の物質については, かなり異なっているものの傾向として UFL/LFL が大きい値をしめしているもの程, M.E.S.G. は小であるといえよう。特に図 3-3-2 においては, 文献値がない UL のセーフ・ギャップのデータの全容がわかり興味ある表といえよう。

図 3-3-4 には LFL・4H に対する NEC500 のガス分類案をプロットしたものであり, NEC におけるガス分類の理論的根拠を与えるものとして重視されている。

4. 各種のガスおよび蒸気に関する実験的 最大セーフ・ギャップの数値

実験的
最大セーフ・ギャップの数値表としてまとめ

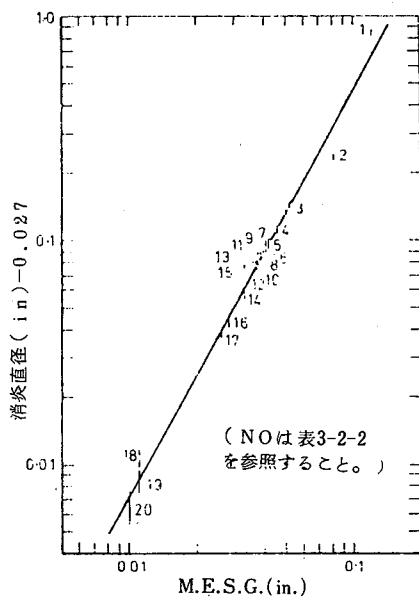


図 3-2-1 M.E.S.G. 対消炎直径-0.027の相関関係

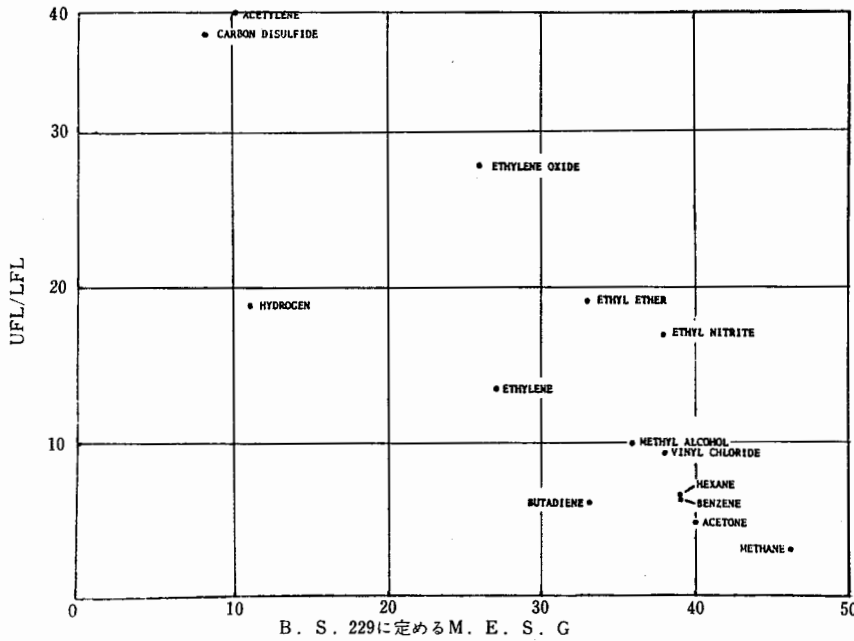


図 3-3-1 UFL/LFLに対するB. S. 229に定めるM. E. S. G.との関係

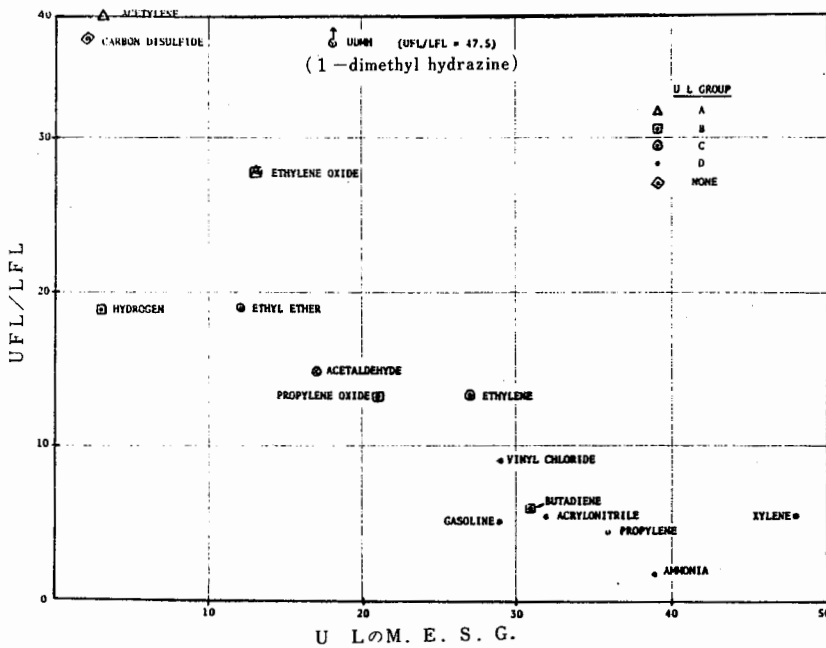


図 3-3-2 UFL/LFLとULのM. E. S. G.との関係

4.1 空気と単一成分のガスまたは蒸気の混合物に関する実験的最大のセーフ・ギャップの値

今まで述べてきた多数のM. E. S. G.の値を集大成することの必要を認め、IECでは、M. E. S. G.について各種の文書^{1)~6)}を出してきた。そのうち最も最新のデータ表を前記の文献⁵⁾から集録すると表4-1-1のとおりであるが、S. M. S. G.については、この文献では取りあげていない。このことは、S. M. S. G.の算定方法にまだ研究討議すべき余地があるからといえよう。

すでに述べたように、危険場所の可燃性ガスおよび蒸気は、多数のガスまたは蒸気の混合物の場合が多い。したがって表4-1-2に多成分系混合ガスのM. E. S. G.をかかげる。これはH. Phillips⁷⁾の文献より引用したものである。

また混合ガスのうち都市ガスのM. E. S. G.については、多数の研究がなされており、D. H. Jones および D. W. Woodhead⁸⁾の論文あるいは T. J. A. Brown および N. Simson⁹⁾の報文が著明であり、ここでは後者について使用都市ガス

ったものとしては、B. S. 229の付表A¹⁾あるいは西独の Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe²⁾がみられるが、後者については、実験的最大のセーフ・ギャップの生の測定値ではなくVDE³⁾による爆発等級の分類値でしめされている。生の数値の一部については、同じく西独の Handbuch der Raum Explosionen⁴⁾に発表されている。

の成分とM. E. S. G.の測定結果を表4-1-3にかかげることとするが、セーフ・ギャップは、成分ガス及び蒸気に依存性を有しているから、一般に都市ガスと称してもその成分が変化すれば、M. E. S. G.の値は当然変わってくる。したがって多くの研究者によって Re-determination (再決定)と称する報告がなされていることに留意する必要がある。

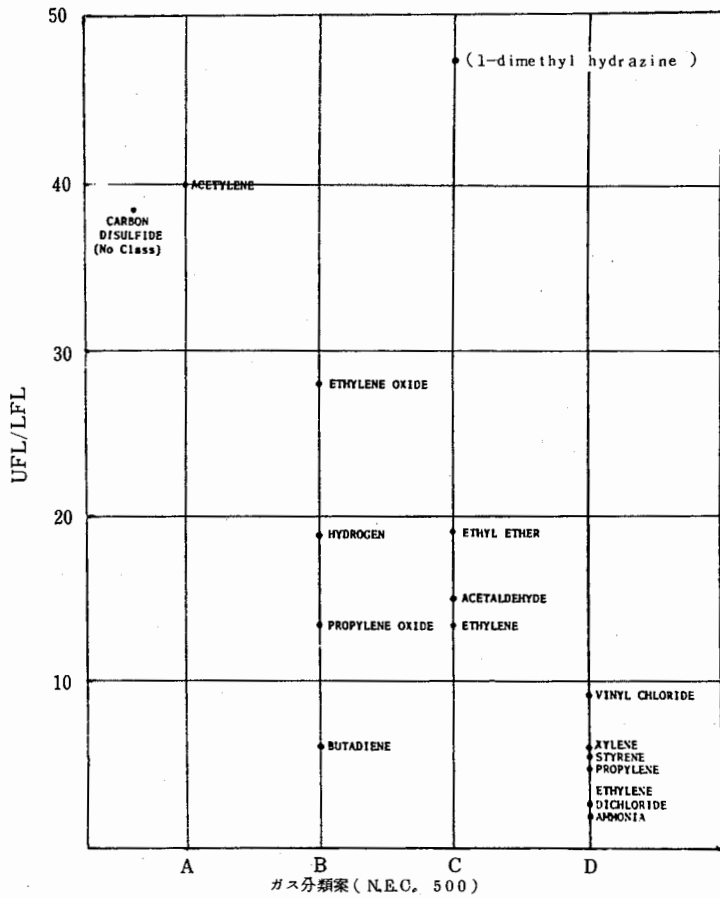


図 3-3-3 UFL/LFLに対するガス分類案(N.E.C 500)との関係

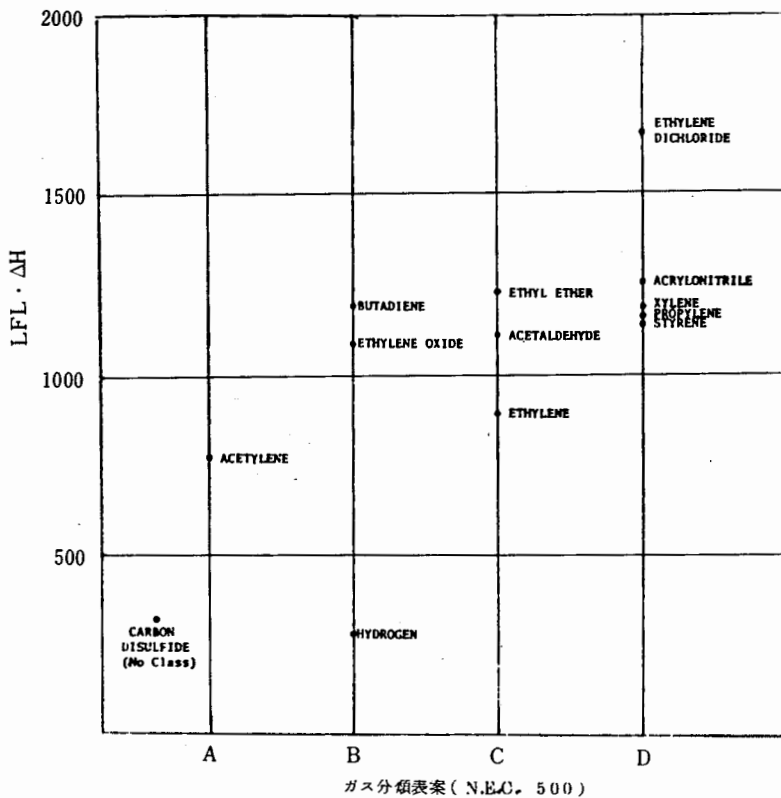


図 3-3-4 LFL · ΔHに対するガス分類案(N.E.C 500)との関係

表 4-1-1 可燃性ガスおよび蒸気のM.E.S.G.

可燃性ガスまたは蒸気		可燃性ガスまたは蒸気の濃度容積%	M.E.S.G.	(点火確率100%の寸度)-(点火確率0%の寸度) mm
Carbon monoxide	CO	40.8	0.94	0.03
Methane	CH ₄	8.2	1.14	0.11
Propane	C ₃ H ₈	4.2	0.92	0.03
Butane	C ₄ H ₁₀	3.2	0.98	0.02
Pentane	C ₅ H ₁₂	2.55	0.93	0.02
Hexane	C ₆ H ₁₄	2.5	0.93	0.02
Heptane	C ₇ H ₁₆	2.3	0.91	0.02
iso-Octane	C ₈ H ₁₈	2.0	1.04	0.04
n-Octane	C ₈ H ₁₈	1.94	0.94	0.02
Decane	C ₁₀ H ₂₂	120/105(mg/L)	1.02	
Cyclohexanone	C ₆ H ₈ O	3.0	0.95	0.03
Acetone	C ₃ H ₆ O	5.9/4.5	1.02	
Methylethyl-Ketone	C ₄ H ₈ O	4.8	0.92	0.02
Methyl acetate	C ₃ H ₆ O ₂	208/152(mg/L)	0.99	
Ethyl acetate	C ₄ H ₈ O ₂	4.7	0.99	0.04
n-Propyl acetate	C ₅ H ₁₀ O ₂	135 (mg/L)	1.04	
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	90 (mg/L)	0.94	
n-Butyl acetate	C ₆ H ₁₂ O ₂	130 (mg/L)	1.02	
Amyl acetate	C ₇ H ₁₄ O ₂	110 (mg/L)	0.99	
Vinylchloride	C ₂ H ₃ Cl	7.3	0.99	0.04
Methylalcohol	CH ₃ OH	11.0	0.92	0.03
Ethylalcohol	C ₂ H ₅ OH	6.5	0.89	0.02
Vinylidene chloride	C ₂ H ₂ Cl ₂	10.5	3.91	0.08
Benzotrifluoride	C ₆ H ₅ CF ₃	19.3 °C	1.40	0.05
iso-Butylalcohol	C ₄ H ₁₀ O	105/125(mg/L)	0.96	
n-Butylalcohol	C ₄ H ₁₀ O	115/125(mg/L)	0.94	
Amylalcohol	C ₅ H ₁₁ OH	100/100(mg/L)	0.99	
Ethylnitrite	C ₂ H ₅ ONO	270/270(mg/L)	0.96	
Ammonia	NH ₃	24.5/17.0	3.17	
Butadiene 1, 3	C ₄ H ₆	3.9	0.79	0.02
Ethylene	C ₂ H ₄	6.5	0.65	0.02
Diethylether	C ₄ H ₁₀ O	3.47	0.87	0.01
Ethylene oxide	C ₂ H ₄ O	~ 8	0.59	0.02
Acetylene	C ₂ H ₂	8.5	0.37	0.01
Hydrogen	H ₂	27	0.29	0.01
Carbon disulphide	CS ₂	8.5	0.34	0.02
Dioxane	C ₄ H ₈ O ₂	4.75	0.70	0.02
iso-Pentane	C ₅ H ₁₂	2.45	0.98	0.02
n-Butyl-chloride	C ₄ H ₉ Cl	3.9	1.06	0.04
Di-n-Butylether	C ₈ H ₁₈	2.6	0.86	0.02
Dimethylether	C ₂ H ₆ O	7.0	0.84	0.06

4.2 二三の規定におけるセーフ・ギャップ

米および仏の研究機関におけるセーフ・ギャップの値についての発表された論文は、ほとんど見受けられないので、これら各国における研究内容は、関心の的となっている。

前者については、S.G. Woinsky¹⁾あるいはH. CarhartおよびD.L. Katz²⁾がそれぞれ別の報文でULのデータとNEC³⁾データとの相関関係を論及しており、この内容をかかげると図4-2-1のとおりである。図4-2-2はやはり同氏の報文でありB.S. 229との関係を論じたものであるが、プロットした物質名については記述がなされていない。

ついで仏におけるデータであるがこれと各国のデータとの関係については、P.B. Smith⁴⁾によって簡単に報告されているにすぎないので、仏の構造規格より抜すいし紹介すると、表4-2-1のとおりであるが、ここにしめすものは、一定の安全係数を乗じた所謂耐圧防爆構造の電気機器を設計する際の許容ギャップをしめすものである。

表 4-1-1 (続)

可燃性ガスまたは蒸気		可燃性ガスまたは蒸気の濃度容積%	M.E.S.G. mm	(点火確率100%の寸度)-(点火確率0%の寸度) mm
Propylene	C ₃ H ₆	4.8	0.91	0.02
Acetonitril	C ₂ H ₃ N	7.2	1.50	0.05
Di-i-propylether	C ₆ H ₁₄ O	2.6	0.94	0.06
1,2-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	9.5	1.80	0.05
Propylene oxide	C ₃ H ₆ O	4.55	0.70	0.03
Ethane	C ₂ H ₆ o	5.9	0.91	0.02
Methyl-isobutyl-ketone	C ₆ H ₁₂ O	3.0	0.98	0.03
Acrylonitrile	CH ₂ =CHCN	7.1	0.87	0.02
Methyl acrylate	C ₄ H ₆ O ₂	5.6	0.85	0.02
Glycolicacid-butylester	C ₆ H ₁₂ O ₃	4.2	0.88	0.02
Pentanedione 2.4	C ₅ H ₈ O ₂	3.3	0.95	0.15
Acetic acid ethyl ester	C ₆ H ₁₀ O ₃	2.4	± 0.05	0.05
Hexanol	C ₆ H ₁₃ OH	3.0	0.94	0.06
iso-Propyl-alcohol	C ₃ H ₂ OH	5.1	0.99	0.02
Ethylacrylate	C ₅ H ₈ O ₂	4.3	0.86	0.04
Hydrocyanic acid	HCN	18.4	0.80	0.02
Vinyl acetate	C ₄ H ₆ O ₂	4.75	0.94	0.02

表 4-1-2 混合ガスのM.E.S.G.

成分ガス volume %						M.E.S.G.
H ₂	CO	CH ₄	N ₂	C ₂ H ₄	C ₄ H ₁₀	
53	47	-	-	-	-	0.011
85	-	15	-	-	-	0.016
57	33	-	10	-	-	0.013
57	22	11	10	-	-	0.014
57	11	22	10	-	-	0.018
57	-	33	10	-	-	0.026
-	-	50	50	-	-	-
-	-	25	75	-	-	0.081
10	-	90	-	-	-	-
20	-	-	-	-	80	-
40	-	-	-	60	-	-

表 4-1-3 都市ガスのM.E.S.G.

測定に使用した都市ガス-空気の濃度および測定結果	
測定容器の内部ガスの濃度	18.5 %
測定容器の外部ガスの濃度	17.0 %
M.E.S.G. (ギャップの長さ1 in)	0.024 in
S.M.S.G.	0.018 in

成分ガス	都市ガスの各成分の濃度
H ₂	57.2
CH ₄	23.7
N ₂	7.8
CO	6.7
CO ₂	1.8
O ₂	0.1
C ₆ H ₆	0.6
C ₂ H ₄	2.1

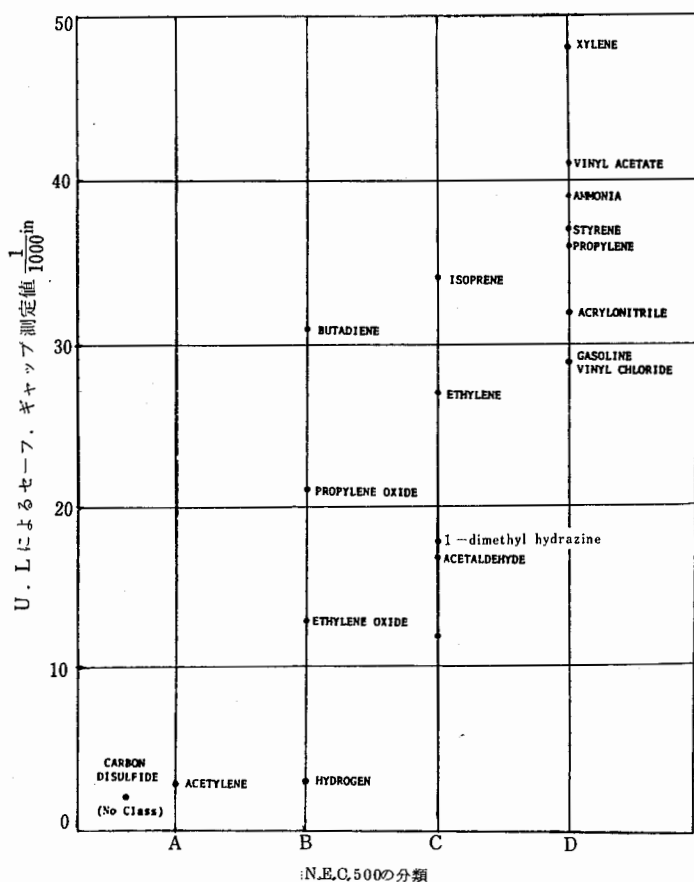


図 4-2-1 ULにおけるセーフ・ギャップ測定値とN.E.C. 500 の分類との関係

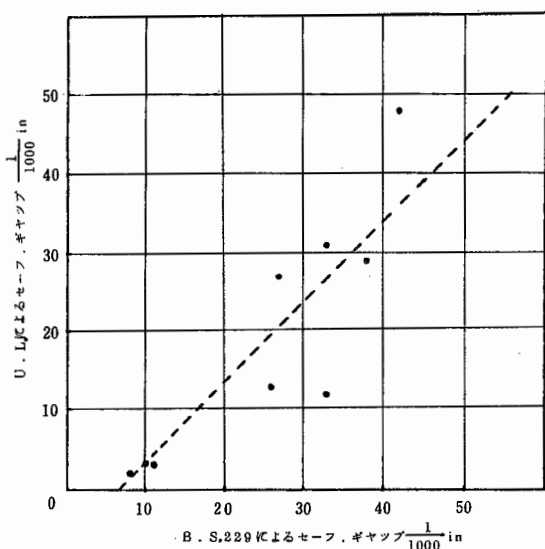


図 4-2-2 B.S. 229およびULにおけるセーフ・ギャップ測定値の関係

5. 歴史的にみたセーフ・ギャップについての研究¹⁾

セーフ・ギャップの研究が、どういう歴史的な経過をたどって発展したとののであるかを、警見することは今までに詳述したセーフ・ギャップの各項目ごとの内容をさらによく理解する上に必要であると考えられる。したがって文献にしめすところによりその主要点を列記することとするが、これらの研究のうち現在では否定されているものもあることに注意する必要がある。

耐圧構造の容器を通過する炎の伝ばに関する最初の研究としては、Beyling (1906) のそれがあげられる。この研究は、円筒状容器に各種のギャップを取り付け、CH₄-空気系混合ガスの爆発に対する研究を行なったものであった。実験の結果、あるギャップの値の場合には、火炎が爆発性混合ガスの中に噴出するにもかかわらず外側の爆発性混合ガスが爆発しなかった。この事実から電気機器を爆発性混合ガスの雰囲気中で使用する場合にも、溶接によってその容器を完全密閉にする必要がなくなった。

SathamおよびWheeler (1924)は中央部に平坦なフランジをつけた内容積1ℓから16

表 4-2-1 フランスにおける許容ギャップ

ギャップの寸度 mm	ギャップの長さ mm					
	6	10	15	25	40	
可燃性ガス および蒸気 の分類	I	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5
	II		0.2	0.25	0.3	0.4
	III		0.1	0.15	0.2	0.25

注 可燃性ガスおよび蒸気の種類 I CH₄, IIIはCH₂CH₂, (CH₂)₂OおよびC₂H₅OC₂H₅その他 NにはC₂H₂, CS₂, H₂, プルーガスおよび水性ガスが属するが、セーフ・ギャップの値は定めていない。これ以外のガスおよび蒸気はすべてIIに属する。

Matériel électrique à enveloppe antidéflagrante
Règles de construction - conditions D'essais,
1959

れの範囲の球状容器と、 CH_4 -空気系混合ガスを用いて、容器の容積、点火源の位置、フランジの長さ、ギャップの寸度、発生爆発圧力などが、外部の CH_4 -空気系混合ガスの点火に如何に影響するかを研究した。

Isley および Gleim (1920) は、防爆型コイル・カッタの設計についてつぎのように言明した。火炎が機器のギャップを通過して大気中に放散する際、フランジのギャップが小さいとフランジに沿って火炎が冷却され、膨脹するから機器のフランジにギャップがあっても危険性がない。

Rainford および Wheeler (1927) はリング型火炎防止器による火炎の抑制についても、前記と同じように火炎の冷却と膨脹の二因子に左右されるとし、どちらの影響がより大きい特殊の条件下で実験を行なった。

Beyling (1906) は、一定条件下において孔またはギャップから噴出した可視炎が外部のガスを点火しないことがあることを始めて観察した。

Grice および Wheeler (1926) は、多孔板の消炎機構について研究し、火炎が孔を通過して1フィートの長さに達しても、周囲の CH_4 -空気系混合ガスに着火するに至らない場合があった。この事実は、1922年以降のイギリスにおける耐圧防爆機器の公式の試験結果にもみられ、可視炎が外部に噴出して周囲のガスに着火しなかったという成績書がみられている。

Grimshaw および Payman (1931) は、鉾山用爆薬を容器の内部で爆発させ、その火炎がフランジ・ギャップから噴出したが、容器外部の CH_4 -空気系の混合ガスに着火しなかった状況について写真撮影に成功した。そしてこの現象がフランジの材質の冷却作用によるものであるとすれば、本質的には材質の熱伝導率および熱容量に支配されるべきであると論じた。

Staples (1945) は、前記の見解と異なり、熱に対する特性が異なる二つの材料すなわち、ベークライトと青銅の M. E. S. G. の数値に有意な相違が認められないことをしめしたが、しかし同氏は、他の実験では、ホット・フランジの手法を用い、セーフ・ギャップの温度による依存性を解明した。

James (1950) も同じくホット・フランジ法を用い、Staples の後段の実験を裏書きした。

前出の Statham および Wheeler は、この時代に早くも前記の問題と関連してセーフ・ギャップとギャップの長さとの相関についての実験を行なった。

Lewis と von Elbe (1951) は、細管や平行板の間を火炎が伝ばできる条件について実験し、伝ばが不可能な限界を消炎距離と定義し、その実験値と理論値がほぼ一致をみた。同氏らは、この消炎現象は、チェン・キャリアの消滅であるとし、この現象は、他の研究者例えば Holm (1932) などによっても観測された。

Jost (1946) は、器壁に沿って混合ガス層ができてこのデッド・レイヤー (dead layer) が、化学反応を抑制し、消炎に至るものであるとした。

Ellis (1935) は、ある条件下においては、ギャップより突出した高温の燃焼生成ガスによっても、外部の未燃混合ガスを発火せしめる可能性があることを示唆し、この現象は前出の Lewis と von Elbe によって定義された消炎可能なギャップにおいてさえも観察された。

この現象を解明するためにフランジを通過してふき出した火炎や燃焼生成物の温度を知る必要があった。この観点から多数の研究者によって実験がなされ、たとえば Coward および Wheeler (1934) によると 10% の CH_4 -空気系混合ガスの火炎温度は、 1700°C であり、Guénault および Staples (前出) によれば、9% の同じ混合ガスの火炎温度は、 1875°C であつた。

Statham および Wheeler (1924) は、8ℓの球状容器を用い、フランジ・ギャップを 0.032 in にし 10% の CH_4 -空気系混合ガスを用いた場合、中心点火で圧力上昇値は $25 \text{ lb/in}^2 \text{ abs}$ であつた。一方火炎温度は、 25 lb/in^2 より 15 lb/in^2 まで膨脹することによって冷され、最初の 1857°C から 1570°C に低下した。点火をギャップの近傍で行なうと、容器の内外の圧力差が無視できる程小さいから最初の段階では火炎はほとんど冷却されない。したがってフランジ外部の混合ガスが発火するか否かは、外部の混合ガスの発火点との関連において究明しなければならないことを明らかにした。よってセーフ・ギャップの研究と併行して多数の研究者によって発火点の測定に関する研究が実施されたが、ここにその数例を掲げる。

Naylor および Wheeler (1925) によれば、容積 81 CC の容器を予熱しておき試料ガスを急速に注入した場合における CH_4 -空気系混合ガスの発火点、 705°C であり、予熱温度が高くなれば発火遅れが小さくなることを見出した。

Taffanel および Le Floch (1913) の実験結果によれば、容積 275 CC および 15 CC の容器を用いて測定

した同上の混合ガスの発火点は、それぞれ 686℃および 738℃であった。

Coward (1934)は、同上の混合ガスについて流通法により発火点を求め、ガスの温度が 730℃の場合における発火遅れは、約 0.5 sec であった。この発火遅れの現象をふまえてギャップによる消炎機構は、それを通過して噴出する火炎や燃焼生成ガスの断熱膨張による冷却だけでは、論ぜられないことを指摘した。

Walls および Wheeler (1926)は、火炎を瞬間的に近づけることによって CH_4 - 空気系の混合ガスの発火のイニシエーションについて研究したところ、発火遅れは火炎の性質に依存性があることを発見した。

Rintoul および White (1926)は、 CH_4 - 空気系混合ガスの発火遅れを測定し、水素炎の温度が 1770℃の場合に約 2 msec であることが判明した。

これらの火炎の性質に関する研究から、ギャップを通過した燃焼生成ガスあるいは火炎によって外部ガスが発火するか否かは、発火遅れと冷却速度の相互関係つきつめれば、ギャップを通過し噴出した火炎および燃焼生成物の状態、すなわち乱れによることを見出した。

Lewis (1950)は、燃焼波中をガスの小質量が通過する際、その小質量は、最初熱伝導によって熱をうるが、引続き熱伝導によって熱を冷たい部分にうばわれる。したがってこの小質量の熱収支が点火しうるか否かを決定し、これは、乱れの影響を多分にうける。フランジのギャップから突出したジェットが最初の高速を失うと、形がくずれしかもそれがもっているエネルギーを消費するので、ジェット内にまき込んだ混合ガスの温度を発火点まで高めることが不可能であるとした。

Wheeler (1919)は、密閉容器中のガスをファンを速度を制御することによって攪乱の強弱を変え、ガスの乱れのセーフ・ギャップに及ぼす影響を測定した。

以上に述べた内容が歴史的にみたセーフ・ギャップの研究概要であるが、これによって了解されるとおりセーフ・ギャップの研究は、実用工学的な面だけではなくて燃焼学あるいは爆発現象論の立場から取り上げられている。

そしてここに提起された問題点が、その後の多くの研究をひき出し、今日においてもそのうちの大多数は、まだ解決していない。

6. あとがき

理論面を除いたセーフ・ギャップに関する研究の全容についてふれたが、防爆電気機器の設計という実用工学的な立場を取るにしても燃焼理論という基礎工学的面を取るにしても、セーフ・ギャップは、どんなパラメータによって支配されているかということが最も重要であると考えられる。

そしてこれらの研究内容は、耐圧防爆構造以外の火炎防止器などの構造あるいは消炎理論の解明などに広く利用しうるものがある。

なお、まえがきにも記載した趣旨からこの資料は、諸外国におけるセーフ・ギャップの研究について述べたものであるが、わが国における研究資料については当所研究報告を始めすでに関係者各位は、お読みになっているものと考えられる。なお当所においても逐次セーフ・ギャップの測定装置を整備し、各種の可燃性ガスおよび蒸気のセーフ・ギャップの数値の把握に努めたいので、今後大いに活用されることを併せて希望している。

在外研究のため滞在したイギリス、西ドイツの両国立研究所および討議あるいは調査のため参上した各機関名を、下記に列記して関係者各位の御協力に対し厚く感謝の意を表す。

英国国立鉱山保安研究所 (Safety in Mines Research Establishment), 西独国立物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), アメリカ内務省鉱山保安局研究所 (Department of the Interior, Bureau of Mines), カナダ国立爆発環境研究所 (Explosive Atmospheres Laboratory), 英国国立消防研究所 (Joint Fire Research Organization), 英国電機研究協会 (Electrical Research Association), 英国ガス協会 (The Gas Council), 英国規格協会 (British Standard Institution), ベルギー爆発科学技術研究所 (Centre de Recherches Scientifiques et Techniques pour L. Industrie Des Produits Explosifs), オランダ安全研究所 (Veiligheidsinstituut), フランス国立石炭研究所 (Centre D'Etudes et Recherches des Charbonnages), 西独国立材料試験研究所 (Bundesanstalt für Materialprüfung), 西独ドルトムント試験炭坑 (Berggewerkschaftliche Versuchsstrecke), スイス I E C 本部

(Central Office of the International Electro-technical Commission), ポーランド・バルバラ試験炭坑 (Kopalnia Doswiadczalna Barbara) およびソ連鉱山保安研究所 (ドネネック, Маг Н.И.И.) (順不同)

最後に、この冊子の作成にあたり種々御助言を賜わった当所秋山所長、上月前所長ならびに研究所各位および本書の印刷および文献の蒐集に多大の御協力をえた(社)産業安全研究協会武内事務局長、(財)電気科学技術奨励会北島事務局長ならびに筆者に在外研究の動機を与えて下さった科学技術庁酒井前資源調査所長および関係係官の各位に対し深甚な謝意を表す。

また、英国関係の文献については、著作権が留保されているが、この引用を本書に対してお許しいただいた在日英国大使館の関係者に対し感謝する。

(昭和49年4月15日受付)

(無断転載を禁ずる)

7. 参考文献一覧

ここに記載した参考文献は、すべてアルハベット順に配列されており、末尾のカッコ内にしめした数字、例えば(2・11・2・1)とは、2・11・2項の1において引用したことを表わしている。

A.G. Ikhno, Vzryvonepronitsaenost' zashchitnykh obolochek elektrooborudovaniya pri obrazovanii v nikh raskalennykh tverdykh chastits ugleroda, 1965: (2・11・2・1)

A.M. Kotlyarskii, K voprosu o temperature produktov sgoraniya, vykhodyashchikh cherez dopustimye zazory vzryvonepronitoaemykh chelochek, 1938: (2・1・2・6)

Appendix to IEC Publication 79-1 Method of test for Ascertainment of maximum experimental safe gap, 1969: (2・1・1・3), (4・1・3)

Appendix to IEC Publication 79-1 Method of test for Ascertainment of maximum experimental safe gap, 1972: (4・1・4)

C.E.R. Bruce, Plameproof Electrical Apparatus-Re-Assessment of Values of Statistical Maximum Safe Gap on the Basis of the Integral

Curve of a Normal Distribution, Supplement to Reference, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1953: (2・12・2), (2・12・3)

C.E.R. Bruce, Effect of Size and Shape of Enclosure on the Maximum Experimental Safe Gap, The Electrical Research Association, 1954: (2・3・1・9)

Committee on Hazardous Materials, Fire Hazard Classification of Chemical Vapors relative to Explosion-Proof Electrical Equipment, 1970: (3・1・3), (3・3・2)

C. Slack, Correlation of the Ignitabilities of Gases and Vapours by a Break-Spark and at a Flange Gap, The Electrical Research Association, 1965: (3・1・1)

C. Slack and D.W. Woodhead, Correlation of Ignitabilities of Gases and Vapours by a Break-Spark and at a Flange Gap, Proc. IEE, 1966: (3・1・2)

Determination of maximum experimental and statistical maximum safe gap, IEC, 1966: (4・1・1)

D.H. Jones and D.W. Woodhead, Maximum safe flange gaps with gas mixtures related to town gas, The Electrical Research Association, 1969: (2・3・1・14), (2・3・1・15), (4・1・8)

D.H. Jones and G. Tayler, Environmental Effects on the Maximum Safe Gap for 1 inch Flanges with Mixtures with Air of (1) 85:15-Hydrogen/Methane, (2) Ethylene, and (3) Pentane. The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1961: (2・4・1・3), (2・11・1・4)

D.H. Jones and H.L. Heathcote, Maximum Safe Gaps with Hydrogen/Air Mixtures in Various Flanged Vessels, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1962: (2・2・1・2),

(2.4.1.2), (2.11.1.2)

D.H. Jones, New Cylindrical Test Vessels of Variable Volume and Flange Breadth, The Electrical Research Association, 1969:

(2.1.1.5)

D. Müller-Hillebrand, Elektrotechn, 1958: (2.1.2.8)

Draft-Appendix to IEC Publication 79-1-Method of test for ascertainment of maximum experiment safe gap, 1972: (2.1.1.4), (4.1.5)

D.W. Woodhead, D.H. Jones and J.B. Blackwell, Environmental Effects on the Maximum Safe Gap for 1 inch Flanges with Hydrogen / Air Mixtures, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1961:

(2.4.1.1), (2.4.2.2), (2.11.1.3)

E.D. Dainty and G.K. Brown, An Investigation of Gas Explosion Transmission Through Short Cylindrical Channels of Varying Length and Diameter, International Conference of Director of Safety in Mines Research, 1965: (2.1.1.8), (2.3.1.18) (2.3.1.19)

E.D. Dainty and G.K. Brown, Diffusion of External Methane Atmospheres through Gaps of Various Size and Widths into Enclosures of Different Volumes and the Effect of Greased Joints, International Conference of Mine-Safety Research Establishments, 1967: (2.10.3.1), (2.10.3.3)

E.D. Dainty and G.K. Brown, Explosion Gas Temperatures at the Entrance to Flanges of Enclosures Containing 8.5 Percent Methane-Air Mixtures, International Conference of Safety in Mines Research, 1969: (2.2.3.2), (2.3.1.10)

E.D. Dainty and G.K. Brown, Heat Absorption from the Explosion Products of 8.5 percent Methane Mixtures into Flanges of Flameproof

Enclosure, International Conference of Safety in Mines Research, 1971: (2.1.1.9), (2.10.2.1)

E.D. Dainty, G.K. Brown and A. D'Aoust, The variation of stoichiometric Hydrogen-Air Safe Gaps due to variations in the shape of three small rectangular enclosures of constant volume, Canadian Explosive Atmospheres Laboratory, 1968:

(2.1.1.12), (2.3.1.1)

Flameproof Enclosure of Electrical Apparatus, British Standards Institution, B.S. 229, 1963: (2.1.2.3)

Flameproof Enclosure of Electrical Apparatus, British Standards Institution, B.S. 229, 1957: (2.11.3.2), (4.1)

G.K. Brown, E.D. Dainty and S. Silver, Laboratory Investigations of Hydrogen Explosion Phenomena Relating to Electric Apparatus, Department of Mines and Technical Surveys, 1966: (2.1.1.10), (2.2.1.3), (2.2.2.1), (2.1.0.3.2), (2.11.1.5)

Н.А. Бойков, А.Г. Ихно, Л.Б. Резник, РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОРЕНИЯ АИЕТИЛЕНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ЧЕРЕЗ УЗКИЕ ОТВЕРСТИЯ И ШЕЛИ, 1969: (2.11.2.2)

Handbuch Der Raumexplosionen, Verlag Chemie, GMBH, 105, 1965: (4.4)

H. Carhart and D.L. Katz, Fire hazard classification of chemical vapors relative to explosion-proof electrical equipment, Committee on Hazardous Materials National Research Council, National Academy of Science, 1970: (4.2.2)

H. Phillips, A Reaction-Rate Theory for Flameproof Enclosures, Symposium on Flameproofing, Intrinsic Safety and other Safeguards in Electrical Instrument Practice, 1962: (2.6.2), (2.7.3)

H. Phillips, Estimation of the

maximum experimental safe gap for a fuel by various methods, Safety in Mines Research Establishment, 1969: (2.5.2.2), (4.1.7)

H. Phillips, The Use of a Thermal Model of Ignition to Explain Aspects of Flameproof Enclosure, Combustion and Flame, 1973: (2.5.2.1)

H.G. Riddlestone, Electrical Equipment for Use in Flammable Atmospheres, The Effect of Explosions on Gasketed Joints, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1960: (2.4.2.1)

H.G. Riddlestone, Explosion-Proof Electrical Equipment for Aircraft, Safe Gaps for 1/4 in. and 1/8 in. Flanges, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1961: (2.3.1.12)

H.G. Riddlestone, Safe Gaps for Enclosures of Small Volume, The Electrical Research Association, 1965: (2.3.1.2), (2.3.1.11)

H. Phillips, On the Transmission of an Explosion through a Gap Smaller than the Quenching Distance, Combust. Flame, 1963: (3.2.1)

H. Phillips and S.K. Shaw, A Statistical Evaluation of the Safe Gap, International Conference of Mine-Safety Research Establishments, SMRE, 1971: (2.1.1.7), (2.5.2.3), (2.12.1), (2.12.4)

H. Robinson and H.L. Williams, Flanged Joints, one inch and one half-inch in Radial Breadth, in Atmospheres of Pentane Vapour and Air, The Electrical Research Association, 1954: (2.3.1.5)

Н. Ф. ШЕВЧЕНКО, Г. Н. МАНЯНИН, С. С. ГЕСКИН. Исследование взрывозащитных соединений и разработка взрывонепроницаемых электродвигателей для воздушных сред водорода сероуглерода и ацетилена, безопасность труда в промышленности,

1967: (2.11.3.3)

I.C.F. Stathan and R.V. Wheeler, Flame-Proof Electrical Apparatus for Use in Coal Mines, Safety in Mines Research Board, 1924: (2.1.2.1), (2.2.3.1), (2.3.1.4)

IEC, Canadian contribution concerning recommendations for flameproof enclosures in connection with the hazards of hydrogen and acetylene, 1966: (2.1.1.11), (2.2.1.4)

IEC, Determination of maximum experimental and statistical maximum safe gap, 1966: (2.2.1.10)

IEC, German proposal for a test apparatus for the ascertainment of experimental maximum safe gap, 1966: (2.1.1.6), (2.2.1.6)

IEC, Technical Committee No. 31, Electrical Apparatus for Explosive Atmospheres, 1965: (3.1.4)

IEC, Technical Committee No. 31, Electrical Apparatus for Explosive Atmospheres, 1966: (2.2.1.5)

J. Pilarski and J. Ciok, Essais, de l'influence des facteurs extérieurs sur l'interstice limite dans les appareils antidéflagrants destinés aux mines grisouteuses, Mezinárodní konference, 1968: (2.1.2.7)

J.R. Grove, The Measurement of Quenching Diameters and their Relation to the Flameproof Grouping of Gases and Vapours, I. Chem. E. Symposium Series, 1968: (3.2.2)

K. Nabert, The Significance of a Standard Apparatus for Testing Safe Gaps for the Safety of Electrical Equipment in respect of Explosion hazard, 1967: (2.1.1.1), (2.1.2.4), (2.2.1.7), (2.2.1.9), (2.2.1.11), (2.2.1.12), (2.2.2.2), (2.2.2.3), (2.2.3.3), (2.3.1.3), (2.3.1.13), (2.4.1.4), (2.5.1.2), (2.6.3), (2.7.2), (2.8.3)

K. Nabert und G. Schön, Sicher-

heitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe, 2. erweiterte Auflage, 1963: (4.2)

K.H. Grobleben, Der Ausströmungsvorgang als Ursache der Ausserzündung bei der druckfesten Kapselung, 1967: (2.1.1.2), (2.5.1.1), (2.6.1), (2.8.1)

Ludmila Urbancová, Bestimmung der Grenzspaltweite für die Zündung von Äthylen-Luft-Gemisch, 1965: (2.8.2)

Matériel électrique à enveloppe antidéflagrante Réglés de construction-conditions Déssair, 1959: (4.2.5)

N. Irving Sax, Dangerous Properties of Industrial Materials, Second Edition, 1963: (2.11.3.1)

National Electrical Code, Chapter 5, Special Occupancies 500, Hazardous Location, National Fire Codes, 5, 70-289, 1972-1973: (3.3.3), (4.2.3)

ПРАВИЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ, 1963: (2.1.2.5), (2.11.2)

P.B. Smith, The role of Flanges in conferring protection on flameproof electrical enclosures, Safety in Mines Research Establishment, 1953: (2.2.1.1), (2.3.1.16), (2.3.1.17), (2.9.1), (4.2.4)

P.B. Smith and D.A. Badel, Improved Apparatus for Determination of Maximum Safe Gap of Relief Flanges, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1960: (2.1.2.2)

P.B. Smith and J.R. Blackwell, Re-Determination with Hydrogen/Air Mixtures of Maximum Safe Gap for One-Inch Flanges, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1959: (2.11.1.1)

Proposed Appendix C to the Revision of Publication 79, Recommen-

dations for the construction of flameproof enclosures of electrical apparatus, IEC, 1966: (4.1.2)

Recommendations for the group classification of gases and vapours according to their maximum experimental safe gaps and minimum igniting currents, IEC, 1972: (4.1.6)

R. Torry, Flameproof Enclosures for Mining Electrical Equipment, Influence of Atmospheric Moisture on Maximum Safe Gaps, 1962: (2.7.1)

S.G. Woinsky, Predicting Flammable Material Classifications for the Selection of Electrical Equipment, Confidential Report, Tsurumi received in 1972: (3.3.1), (4.2.1)

T.J.A. Brown, Maximum Experimental Safe Gaps. A Note on the Emission of Flame through Flange Gaps. The Electrical Research Association, 1954: (2.10.1.1)

T.J.A. Brown and N. Simson, Flanged Joints, One Inch and One-Half-Inch in Radial Breadth, in Mixtures of the Vapour of Methyl Ethyl Ketone and Air, The Electrical Research Association, 1953: (2.3.1.8)

T.J.A. Brown and N. Simson, Flange Joints, One Inch in Radial Breadth, in Mixtures of Standard Town's Gas and Air, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1954: (4.1.9)

T.J.A. Brown and N. Simpson, Flanged Joints, One Half-Inch in Radial Breadth in Mixtures of Ethylene Oxide and Air, The Electrical Research Association, 1954: (2.3.1.6)

T.J.A. Brown and N. Simpson, Flanged Joints, One Inch in Radial Breadth in Mixture of Acetone Vapour and Air, The Electrical Research Association, 1956: (2.3.1.7)

Vorschriften für die Errichtung
elektrischer Anlagen in explosions-
gefährdeten Betriebsstätten, Ver-
band Deutsche Electrotechniker 1960:
(2.11.1), (4.3)

W. Bevan Whitney, Flameproof
Enclosure of Electrical Apparatus
Electrical Review 1966: (2.2.1.8),
(5.1) 以 上

産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-74-1

昭和50年 3 月 31日

発行 労働省産業安全研究所

〒108 東京都港区芝5丁目35番1号
電話 (03) 453-8441(代)

印刷所 有限会社 豊光美術
