

水素濃度とセーフ・ギャップの関係についての研究

「防爆構造の電気設備の試験方法に関する研究（第3報）」

防爆課 鶴見平三郎
松田東栄

Study of the Safe Gaps with Hydrogen/Air mixtures

by H. Tsurumi
T. Matsuda

Experimental Safe Gaps with Hydrogen/Air Mixtures have been measured by 8 liter spherical stainless steel vessel with 1 inch flanges at atmospheric pressure and 0.5kg/cm² gauge pressure.

From the experiments, the following facts became evident.

- 1) Maximum Experimental Safe Gap (m. e. s. g.) is 0.22mm at atmospheric pressure.
- 2) Experimental Safe Gap is influenced by concentration and pressure.
- 3) Hydrogen concentration from 18 percent to 51 percent belongs to Explosion Grade No 3.
- 4) Experimental Safe Gap is correlative to quenching distance.

1. まえがき

水素は、爆発等級3に属するガスであり、防爆機器を設計する場合においては、その接合面のギャップは、爆発試験を実施し点火波及しない最大ギャップの50%以下にするようにされている。したがって水素-空気系ガスの最大実験的セーフ・ギャップを測定することが必要であり、各国とも独自の装置を用いて実験的に測定がなされている。

防爆電気機器の試験方法によれば、爆発引火試験に用いる試験ガスは、機器の対象ガスより一級上の爆発等級にランクされるガスを使用してその安全性を確認することになっている。

これがためには、爆発等級3に属するガスの濃度とセーフ・ギャップとの関連を解明するための研究が必要である。

水素についても最大実験的セーフ・ギャップ (m. e. s. g.) については① Smith および Blackwell によって再測定がなされているが、その濃度別のセーフ・ギャップについての解明までには至っていない状況である。

このため当所においては、さきに「② 防爆構造の電気設備の試験方法に関する研究（第2報）」（以下前報という。）によって水素の濃度別のセーフ・ギャップについて報告したところであるが、この実験がVDEに定める内

容積5ℓの円筒状の容器を用いたものであり、しかも1測定点の実験回数は3回にすぎなかったのでさらに精密な研究が要望されていた。今回の実験では、現在BSなどで用いられている燃焼学的にみて最も妥当である形状の球状容器を用い、実験回数を1測定点10回乃至15回行なうとともに、ギャップの増加率を2/100mmに減少し、ギャップの奥行についてはBSと比較する意味において25.4mmを用いた。このような方法により水素-空気系混合ガスの濃度別セーフ・ギャップを再測定し、前報を全面的に再検討し、もって水素を試験ガスとして用いる場合その濃度と爆発等級との関連を明確にした。

2. 実験装置

2.1 概要

実験装置は、球状の標準容器、バンド状の外部ガス室、マンメータ、ガス混合装置、機械計測装置および排気装置よりなっており、その主要部分の外観図をしめすと図-1のとおりである。

図-2は、外部ガス室を標準容器のフランジの部分に装着し、組立てた状態を示している。

実験フローシートについては、前報の場合と同じであるが、密閉容器およびVDEの標準容器の代りに、今回設計製作した球状の標準容器およびバンド状の外部ガス室を用い、さらにマンメータを取り付けたものである。

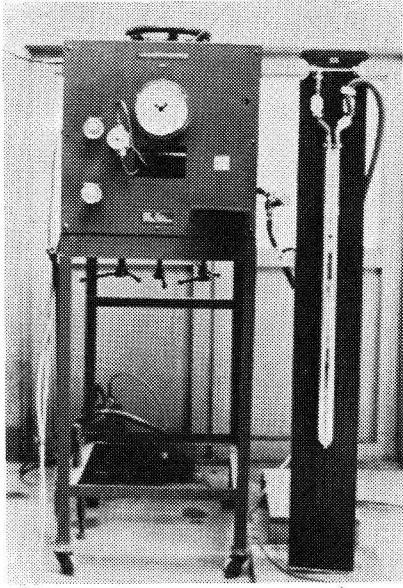


Fig. 1. Experimental apparatus.

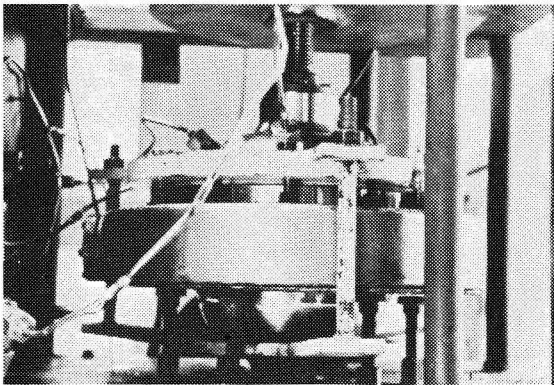


Fig. 2. Standard vessel and external gas chamber.

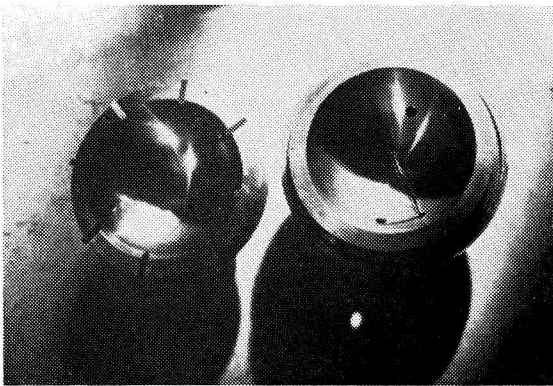


Fig. 3. Spherical vessel.

2.2 標準容器

標準容器は、図-3に示すような二つに分割可能な球状容器とし、外部引火側ガス室については、バンド状の容器を用いた。

容器は、すべて SUS 27 を用い、最高使用圧力 20kg/cm² の圧力容器として設計した。

バンド状の外部ガス室の外径は、498mmφであり標準容器のフランジの外縁との距離は、99.6mmである。

③ Woodhead, Jones および Blackwell の報告によれば、ギャップ外面の障害物による水素-空気系混合物のセーフ・ギャップに対し影響を及ぼす距離は 1 1/2" であり、したがってこの装置は外部ガス室壁による発火に及ぼす影響はないものとする。

標準容器の内容積は B S 229 と同様に 8ℓであり、フランジの奥行は 1" (25.4mm) であり、フランジ面の表面アラサは▽▽▽である。

2.3 ガス混合装置その他

水素-空気系混合ガスは、精密圧力計を用い分圧法によって調整し、内容積64ℓの高圧ガス混合容器内に混合貯蔵することによって一測定点におけるガス濃度の相違から来る誤差をさけた。

機械計測装置は、ストレインゲージ (固有振動数 45,000%, 120Ωゲージ) からなるピックアップを標準容器および外部ガス室に装着し、ストレインメータで圧力を計測する装置からなっている。

記録は、ブリッジ回路の出力をガルバを用いPOP方式により行なった。

3. 実験方法

3.1 ガス濃度

標準容器内および外部バンド状容器内の水素ガス濃度は、同一の濃度のものを用いた。

ガス濃度のチェックは、標準容器内より混合ガスを採取して干渉計を用いて測定した。干渉計の精度は、±0.5%である。

3.2 ギャップ

図-4に示すように二つに分離した標準容器下部のフランジ面にスキマ板をおき、上下の半球状の標準容器をしめつけ、シクネス・ゲージを用いて止まり側と通り側を測定することによってギャップの寸法を決めた。シクネス・ゲージの精度は±5/1000mmである。

3.3 発火の確認

標準容器の中央に点火プラグをつけ、ネオントランスを用い標準容器の内部ガスに点火し、火炎を3次元に伝ばさせた。外部バンド状容器内のガスの発火状況は、図-5に示すようにストレインゲージにより応答された

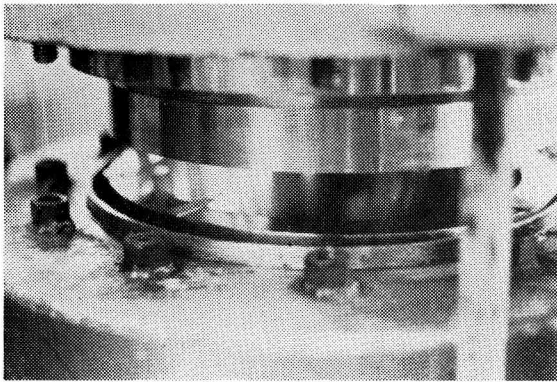


Fig. 4. Standard vessel and thickness plates.

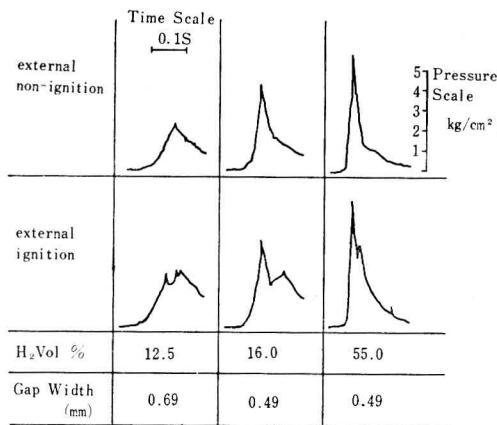


Fig. 5. Explosion pressure-time records in the inner vessel for external ignitions and non-ignitions at atmospheric pressure.

圧力変動によって計測するとともに、必要がある場合には、外部バンド状容器に取り付けた点火プラグにより逆着火し、外部ガス室中のガスの燃焼状態により再度確認した。

4. 実験結果および考察

水素-空気系混合ガスの濃度別の実験的セーフ・ギャップ、最大爆発圧力、最大爆発圧力への到達時間および最大昇圧速度の測定を行なった。混合ガスの初圧は常圧および 0.5kg/cm² ゲージ圧で行ない、測定濃度範囲は常圧の場合は、9.0%から66.0%であり、0.5kg/cm² ゲージ圧の場合には、9.5%から、67.5%の範囲内で行なった。温度は室温において測定し、19°C~33°Cの温度範囲内であった。

4.1 実験的セーフ・ギャップ

常圧および 0.5kg/cm² ゲージ圧下の水素の濃度別のセーフ・ギャップの限界曲線をしめすと図-6および図-7にそれぞれしめすとおりである。

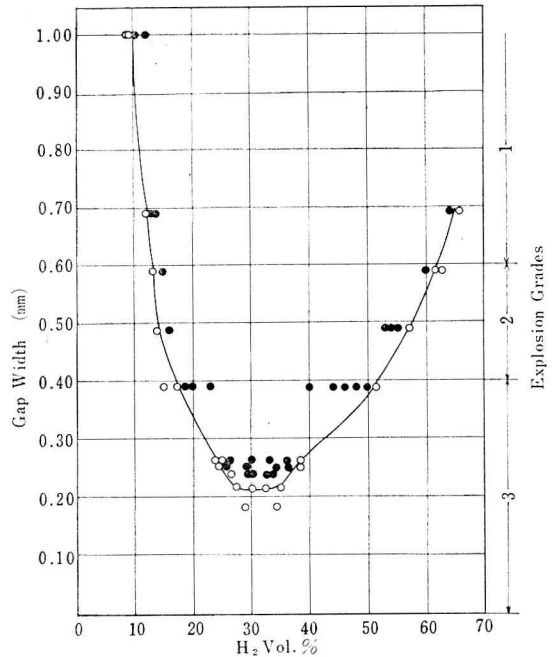


Fig. 6. Experimental Safe Gaps for Hydrogen/Air Mixtures at atmospheric pressure. Vessel Volume, 8ℓ. Gap Length, 25.4mm ● Ignition ○ Non-ignition

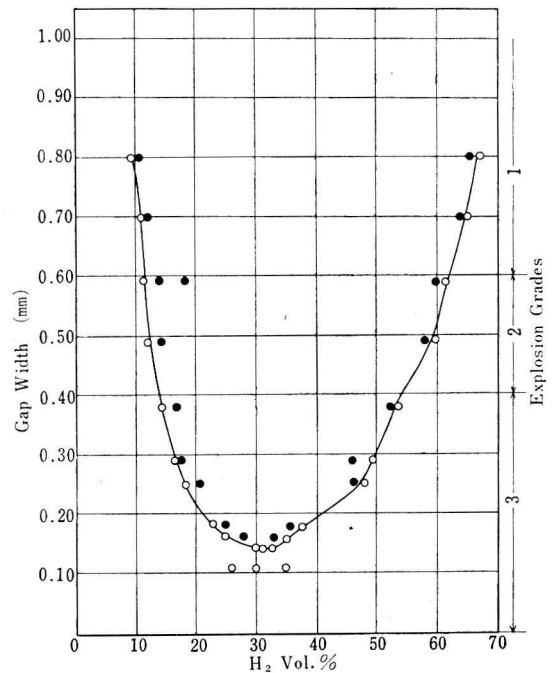


Fig. 7. Experimental Safe Gaps for Hydrogen/Air Mixtures at 0.5kg/cm² G. pressure. Vessel Volume, 8ℓ. Gap Length, 25.4mm ● Ignition ○ Non-ignition

m. e. s. g. は水素-空気系の量論的混合物の濃度のみられ、常圧下の実験では0.22mmであり、0.5kg/cm²ゲージ圧下における実験では、m. e. s. g. は0.14mmであり、常圧下のm. e. s. g. に比して36%減の低下をしめしている。

常圧下のセーフ・ギャップについて表-1によりその実験結果をみると、ギャップ0.24mmにおいて26.6% (15N), 29.0% (6 I, 9 N), 30.0% (13 I, 2 N), 32.5% (4 I, 11N), 33.5% (3 I, 12N), である。

Table 1. Result of 15 explosion tests through flange gaps of various widths with various gas concentrations at atmospheric pressure.

Gap Width mm	Hydrogen Vol. % (I=Ignition, N=Non-ignition)				
0.18	29.0(15N)	34.0~35.0(15N)			
0.22	27.5(15N)	30.0(15N)	32.5(15N)	35.0(15N)	
0.24	26.6(15N)	29.0(6 I, 9 N)	30.0(13 I, 2 N)	32.5(4 I, 11 N)	33.5(3 I, 12 N)
0.25	24.0(15N)	25.0(8 I, 7 N)	25.5(1 I, 14 N)	29.0(14 I, 1 N)	34.5(2 I, 13 N)
	36.5(1 I, 14 N)	38.5(15N)			
0.26	24.0(15N)	25.0(15N)	26.5(5 I, 10 N)	30.0(13 I, 7 N)	33.0(8 I, 7 N)
	36.0(3 I, 12 N)	38.5(15N)			
0.39	15.0(15N)	17.0(15N)	19.0(15 I)	20.0(15 I)	23.0(15 I)
	40.0(15 I)	44.0(15 I)	46.0(15 I)	48.0(15 I)	50.0(6 I, 9 N)
	52.0(15N)				
0.49	14.0(15N)	16.0(7 I, 8 N)	53.0(15 I)	54.0(15 I)	55.0(5 I, 10 N)
	57.0(15N)				
0.59	13.0(15N)	15.0(9 I, 6 N)	60.0(8 I, 7 N)	62.0(15N)	63.0(15N)
0.69	12.0(15N)	12.5(4 I, 11N)	13.5(15 I)	64.0(10 I, 5N)	66.0(15N)
1.00	9.0(15N)	9.5(15N)	10.0(4 I, 11N)	11.8(8 I, 7N)	

つぎに0.22mmのギャップにおいては、27.5% (15 N), 30.0% (15N), 32.5% (15N), 35.0% (15N)の実験値をしめしており、m. e. s. g. は0.22mであることがわかった。

この実験におけるギャップ・インクリメントは2/100mmであるので真の限界点は0.22mm以上0.24mm未満の間にあるといえる。

0.5kg/cm²ゲージ圧に加圧下のセーフ・ギャップについて表-2によりその実験結果をみると、ギャップ0.16mmにおいて25.0% (10N), 28.0% (3 I, 7N), 33.0% (10 I), 35.0% (10N)である。

つぎに0.14mmのギャップにおいては、30.0% (10 N), 31.0% (10N), 33.0% (10N)である。

ギャップのインクリメントは、常圧における場合と同様に2/100mmであるから、真の限界点は0.14mm以上0.16mm未満の間にある。

実験回数は、常圧の場合については15回、0.5kg/cm²

ゲージ圧の場合においては、10回実施したものである。

限界点の判定については、15回あるいは10回の連続実験で1回でも外部ガスが燃焼した場合には不安全側とし、同様の回数の連続実験で外部ガスの燃焼が1回でもみられなかった最も大きなギャップをもってその濃度における限界点と決定した。

なお、水素-空気系混合ガスのm. e. s. g. と単に称した場合は、安全上の考慮から各濃度別のセーフ・ギャップの限界点のうちの最低値をいう。ただし、m. e. s. g. をしめず濃度においては、外部ガスの燃焼が1回でもみられなかった最も大きな実験的に測定されたギャップである。

4.2 水素濃度と爆発等級

水素濃度と爆発等級との関係については、点火波及を生ずるギャップの値0.6mmをこえるガスを爆発等級1とし、同じく0.4mmをこえ0.6mm以下のガスを爆発等級2とし、同様に0.4mm以下のガスを爆発等級3と

Table 2. Result of 10 explosion tests through flange gaps of various widths with various gas concentrations at 0.5kg/cm² gauge pressure.

Gap Width mm	Hydrogen Vol. % (I=Ignition, N=Non-ignition)				
0.11	26.0(10N)	30.0(10N)	35.0(10N)		
0.14	30.0(10N)	31.0(10N)	33.0(10N)		
0.16	25.0(10N)	28.0(3 I, 7N)	33.0(10 I)	35.0(10N)	
0.18	23.0(10N)	25.0(4 I, 6N)	35.5(3 I, 7N)	37.5(10N)	
0.25	18.5(10N)	20.5(2 I, 8N)	46.0~46.3 (1 I, 9N)	48.0(10N)	
0.29	16.5(10N)	17.6(6 I, 4N)	46.0(4 I, 6N)	50.0(10N)	
0.38	14.0(10N)	17.2(10 I)	52.5(8 I, 2N)	54.0(10N)	
0.49	12.0(10N)	14.5(5 I, 5N)	58.0(2 I, 8N)	60.0(10N)	
0.59	11.5(10N)	14.3(4 I, 6N)	18.5(10 I)	60.0(2 I, 8N)	62.0(10N)
0.70	11.0(10N)	12.5(2 I, 8N)	64.5(1 I, 9N)	65.5(10N)	
0.80	9.5(10N)	10.5(1 I, 9N)	66.0(1 I, 9N)	67.5(10N)	

すると、以下のとおりである。

常圧下の実験では爆発等級3と爆発等級2との境界濃度（爆発等級3の範囲に属するガスで最も爆発等級2に近い濃度）については、0.39mmのギャップにおいて17.0%（15N）、19.0%（15I）であり、この範囲におけるセーフ・ギャップの限界曲線は、燃料が増加すると減少の傾向がみられるから、下限境界濃度は、約18%である。これと同様に上限境界濃度については、50.0%（6I, 9N）、52.0%（15N）であるから約51%である。

つぎに爆発等級2と爆発等級1との境界濃度（爆発等級2の範囲に属するガスで最も爆発等級1に近い濃度）については、0.59mmのギャップを装着した状態のときの実験結果から判定すると、13.0%（15N）、15.0%（9I, 6N）および60.0%（8I, 7N）、62.0%（15N）63.0%（15N）から考えて、下限境界濃度および上限境界濃度は、それぞれ約14%および61%である。

加圧下の場合の水素濃度と爆発等級との関係については、爆発等級3と爆発等級2との境界濃度は、ギャップ0.38mm（14.0%、10N）、ギャップ0.29mm（16.5%、10N：17.6%、6I, 4N）およびギャップ0.38mm（52.5%、8I, 2N：54.0%、10N）によって下限境界濃度および上限境界濃度は、それぞれ約16%および53%であると考えられる。またこの状態における爆発等級2と爆発等級1の境界濃度については、ギャップ0.59mm（11.5%、10N：14.3%、4I, 6N）およびギャップ0.59mm（60.0%、2I, 8N：62.0%、10N）であり、これから下限境界

濃度および上限境界濃度は約12%および61%と考えられる。

4.3 m.e.s.g. と昇圧速度

常圧下における水素-空気系混合ガスの爆発圧力は、NFPAに示めされている10ℓの容器を用いた文献値と実験誤差範囲内において一致をみ、量論的濃度より多少濃い濃度である32%乃至35%の範囲に圧力のピークがみられた。

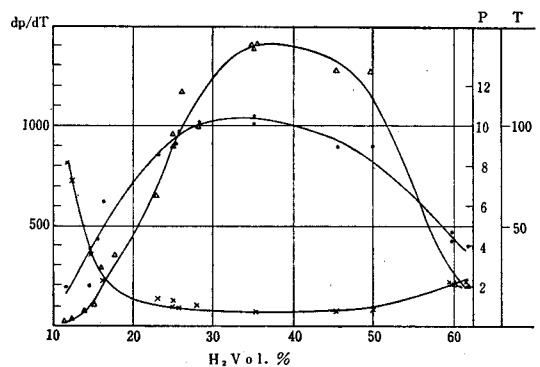


Fig. 8. Plot of P, T and dP/dT against gas concentrations, obtained in the inner vessel with various gaps at 0.5kg/cm² G. pressure.

P : Explosion pressure, kg/cm² G.
T : Pressure rise time, millis.
dP/dT : Max. rate of pressure rise, kg/cm² s. G.

0.5kg/cm² ゲージ圧の状態における水素濃度と最大昇圧速度の関係については、図-8および表-3に示すとおりであり、最大爆発圧力および最大昇圧速度は、水

素濃度35%の点に存在し、m. e. s. g. がみられる濃度よりずれている。

Table 3. Explosion pressure and time at various gaps for Hydrogen/Air mixtures (0.5kg/cm² G. initial pressure)

H ₂ Vol. %	Gap Width mm	Explosion pressure kg/cm ² G.	Pressure rise time millis.	Max. rate of rise kg/cm ² s. G.
11.5	0.59	1.8	80.0	0.02 × 10 ³
12.0	0.49	1.9	65.0	0.03 "
14.3	0.59	2.8	30.0	0.08 "
14.5	0.49	3.9	36.0	0.11 "
15.5	0.38	4.2	38.0	0.11 "
16.5	0.29	6.1	22.0	0.28 "
17.6	0.29	6.8	20.0	0.34 "
23.0	0.18	8.5	13.0	0.65 "
25.0	0.16	9.0	10.0	0.90 "
25.0	0.18	9.5	10.0	0.95 "
26.0	0.11	9.8	8.3	1.18 "
28.0	0.16	10.2	10.0	1.02 "
35.0	0.11	10.5	7.5	1.40 "
35.0	0.16	10.1	7.0	1.44 "
35.5	0.18	10.0	7.0	1.43 "
46.0	0.29	9.0	7.0	1.29 "
50.0	0.29	9.0	7.0	1.29 "
60.0	0.49	4.7	24.0	0.20 "
60.0	0.59	4.1	20.0	0.21 "
62.0	0.59	4.0	20.0	0.20 "

4.4 比開口断面積および比開口容積

実験に用いたスキマ板の数は幅10mmのもの8枚を用い、この数は、ギャップの寸数にかかわらず一定である。

したがって、内容積に対する比開口断面積 (S.O.A.) および比開口容積 (S.O.V.) は、ギャップの寸数に対して直線関係になり、この関係をしめすと図-9のとおりである。

常圧の場合のm. e. s. g.であるギャップ0.22mmのときにおけるS.O.A.は0.019mm²/ccであり、S.O.V.は0.544mm³/ccであった。

4.5 セーフギャップと消炎距離 (Quenching Distance) に対する依存性

水素-空気系混合ガスに対するLewis and Elbeによりしめされた消炎距離とセーフ・ギャップとの相関関係をみてみると、図-10のとおりであり、下部限界線と上部限界線との交点にm. e. s. g.をしめす点が求められ完全な相関をしめた。ただし図-10は、常圧下におけるものである。

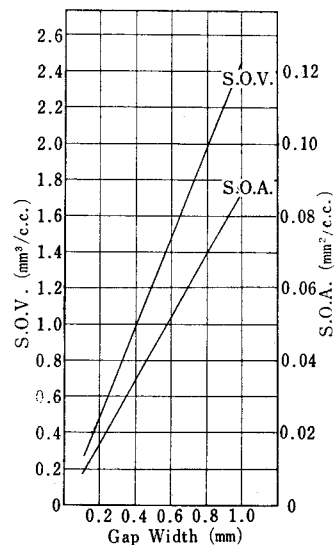


Fig. 9. Correlation of Specific Open Volume and Specific Open Area with Gap Width.

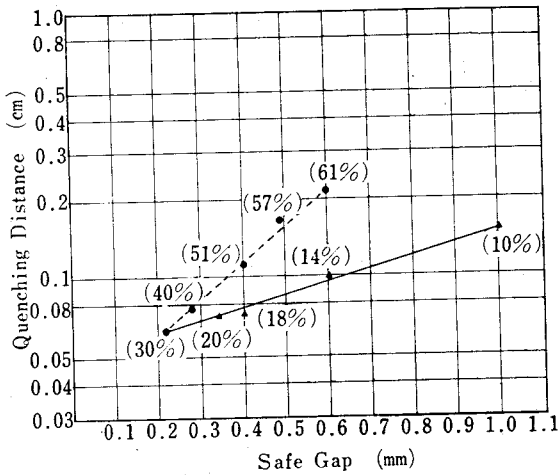


Fig. 10. Relationships between Quenching Distances and Safe Gaps for Hydrogen/Air mixtures at atmospheric pressure.
 ---- for upper critical line
 — for lower critical line

5. 結 語

5.1 実験的セーフ・ギャップ

m. e. s. g. は量論的混合物の濃度においてみられ、常圧下の実験では、0.22mmであり、初圧を0.5kg/cm² ゲージ圧とした場合は、0.14mmであった。

したがって0.5kg/cm² ゲージ圧に加圧した状態では、常圧下のm. e. s. g. に比して36%減の低下をみ、セーフ・ギャップの圧力に対する強い依存性をしめた。

m. e. s. g. は、最大昇圧速度をしめす濃度の点よりも水素の濃度が低い点にみられ、この現象は、⑤鶴見によるアセチレン-空気系混合ガスのセーフ・ギャップに関する研究においても同様な傾向が観察された。

S. O. A. およびS. O. V. に対するセーフ・ギャップの依存性については、有意の連関はこの研究ではみられなかった。

5.2 水素濃度と爆発等級

水素濃度と爆発等級との関係については、常圧下の実験では、爆発等級3と爆発等級2との境界濃度は、約18%および51%であり、爆発等級2と爆発等級1との境界濃度は、約14%および61%である。

爆発等級に及ぼす圧力の影響については、圧力によって拡大の傾向がみられ、初圧を0.5kg/cm² ゲージ圧とした場合、爆発等級3は、上限境界濃度および下限境界濃度においてそれぞれ2%の拡大をみ、爆発等級2においては、下限境界濃度が2%拡大した。

5.3 セーフ・ギャップと消炎距離

実験結果にしめすように、水素-空気系混合ガスについては、濃度別の消炎距離とセーフ・ギャップは有意の関連をしめた。今後その他のガスについても、この消炎距離との関係について研究を実施する予定である。

5.4 他のデータとの比較

常圧下の条件下における m. e. s. g. については、⑤ Smith および Blackwell によって報告された 0.011" に対してやや低目の値をしめたが、これは、同氏らの実験が most easily ignited mixture (24%) と most incendive mixture (32%) の組み合わせを用いた測定であり、この実験とは測定方法が異なる。

前報におけるデータに比して m. e. s. g. を含めて各濃度別の実験的セーフ・ギャップは、大幅な低下をみた。この理由としては、前報がVDEによる5ℓの標準容器によるものであり、測定回数が3回の極めて少数回であ

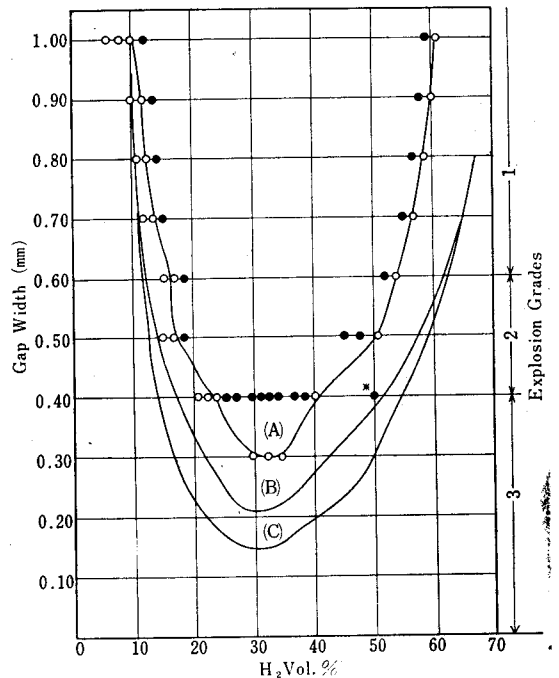


Fig. 11. Experimental Safe Gaps for Hydrogen/Air Mixtures.

(A) at atmospheric pressure (* at 1.0 kg/cm² G.) from the previous report.

● Ignition ○ Non-ignition

(B) at atmospheric pressure from this report.

(C) at 0.5kg/cm² G. from this report.

ったこととギャップ・インクリメントが0.1mmであったことによる。フランジの奥行については、VDEによる5φ容器は、25mmであり、今回の測定に用いた標準容器のフランジの奥行は、BSにならい25.4mmである。

セーフ・ギャップの測定方法の比較は、非代数值 n/k であらわされる。

n : 測定回数

k : ギャップ・インクリメント

これにより前報と比較してみると、前報は $n/k = 3/0.10$ であり、この報告における $n/k = 15/0.02$ あるいは $10/0.02$ である。

5.5 防爆電気機器試験法に対する影響

日本における防爆電気機器試験法においては、爆発引火試験の試験ガスとして水素-空気系混合ガスを使用している。

この報告によって水素濃度に対する爆発等級が拡大をみ、図-11にしめすとおり従来前報によって爆発等級2と考えられた濃度範囲の一部が爆発等級3の範囲に入り、したがって水素-空気系混合ガスを引火試験用ガスとして使用する場合には、昇圧速度の問題を別に考えるとしても、さらに検討を加え改訂することが必要である。

なお、この改訂に際しては、試験実施技術上の問題と

あわせて慎重に検討を加えることが肝要である。

付 記

日本化学会第7回防災化学研究発表会(1967)において、この研究の一部を発表した。

主要参考文献

Literature cited

- ① P. B. Smith and J. R. Blackwell : Re-Determination with Hydrogen/Air Mixtures of Maximum Safe Gap for One-Inch Flanges, ERA, D/T 117, (1959)
- ② 労働省産業安全研究所報：水素濃度と火炎逸走限界の関係について, 3, 11, (1961)
- ③ D. W. Woodhead, D. H. Jones and J. R. Blackwell : Environmental Effects on the Maximum Safe Gap for 1 inch Flanges with Hydrogen/Air Mixtures, ERA, D/T 129, (1961)
- ④ B. Lewis and G. Elbe : Combustion, Flames and Explosions of Gases, 335~339, (1961)
- ⑤ 労働省産業安全研究所報告：アセチレン-空気系混合ガスを対象とする容器のフランジに関するセーフ・ギャップについての研究(第一報), 3, 14, (1964)
- ⑥ P. B. Smith and J. R. Blackwell : ibid.