# 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

I. Watsuud

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/cm<sup>2</sup> 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。したがって水素一空気系ガス 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 -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<sup>①</sup> 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「<sup>®</sup>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一空気系 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, マノメータ,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 ー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,さらにマノ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にしめ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/ cm<sup>2</sup> 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、498mm¢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。 ③Woodhead, 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一空気系混合物の セーフ・ギャップに対し影響を及ぼす距離は1½%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考える。

標準容器の内容積は B S 229 と同様に 8 ℓ 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

水素一空気系混合ガスは,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

図ー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、シックネス・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 ックネス・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にしめ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

水素一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/cm<sup>2</sup> 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/cm<sup>2</sup> 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/cm<sup>2</sup> 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一6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 Hydrogon/ Air Mixtures at atmospheric pressure. Vessl 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

— 13 **—** 

m.e.s.g. は水素一空気系の量論的混合物の濃度にみ られ,常圧下の実験では0.22mmであり,0.5kg/cm<sup>2</sup>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。

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(6I, 9N)	30.0(13 I, 2N)	32.5( 4 I, 11N)	33.5(3I, 12N)
0.25	24.0(15N)	25.0(8I, 7N)	25.5( 1I, 14N)	29.0(14 I, 1N)	34.5(2I, 13N)
	36.5(1I, 14N)	38.5(15N)			
0.26	24.0(15N)	25.0(15N)	26.5(5I,10N)	30.0(13 I, 7N)	33.0(8I, 7N)
	36.0(3I, 12N)	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(6I, 9N)
	52.0(15N)				
0.49	14.0(15N)	16.0(7I, 8N)	53.0(15 I)	54.0(15 I)	55.0( 5I, 10N)
	57.0(15N)				
0.59	13.0(15N)	15.0(9I, 6N)	60.0(8I, 7N)	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( 4I, 11N)	11.8(8I, 7N)	

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

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 2/100 mm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/cm<sup>2</sup> 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0.16 mmにおいて25.0% (10N), 28.0% (3I,7N), 33.0% (10I), 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/cm<sup>2</sup>

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,水素一空気系混合ガスの 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.をしめす濃度においては,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

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(31, 7N)	33.0(10 I )	35.0(10N)			
0.18	23.0(10N)	25.0(4I, 6N)	35.5(3I, 7N)	37.5(10N)			
0.25	18.5(10N)	20.5(2I, 8N)	46.0~46.3 (1I, 9N)	48.0(10N)			
0.29	16.5(10N)	17.6(6I, 4N)	46.0(4I, 6N)	50.0(10N)			
0.38	14.0(10N)	17.2(10I)	52.5(81, 2N)	54.0(10N)			
0.49	12.0(10N)	14.5(5I, 5N)	58.0(21, 8N)	60.0(10N)			
0.59	11.5(10N)	14.3(4I, 6N)	18.5(10I)	60.0(2I, 8N)	62.0(10N)		
0.70	11.0(10N)	12.5(2I, 8N)	64.5(1I, 9N)	65.5(10N)			
0.80	9.5(10N)	10.5(11, 9N)	66.0(11, 9N)	67.5(10N)			

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

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% (6 I, 9 N)、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%(9 I、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一空気系混合ガスの爆発圧力は, NFPAにしめされている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/cm<sup>2</sup>
G. pressure.
P : Explosion pressure, kg/cm<sup>2</sup> G.

- T : Pressure rise time, millis.
- dP/dT: Max. rate of pressure rise,

kg/cm<sup>2</sup> s. G.

- 15 -

0.5kg/cm<sup>2</sup> 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にしめす 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/ cm<sup>2</sup> G initial pressure)

H2 Vol. %	Gap Width mm	Explosion pressure kg/cm <sup>2</sup> G.	Pressure rise time millis.	Max. rate of rise kg/cm <sup>2</sup> s. G.
11.5	0.59	1.8	80.0	$0.02 \times 10^{3}$
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,ギャップの寸度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 度に対して直線関係になり、この関係をしめすと図一9 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 0.019mm<sup>2</sup>/cc であり, S. O.Vは0.544mm<sup>3</sup>/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

水素一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、図一10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した。ただし図一10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.

- 16 -





---- 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/cm<sup>2</sup> ゲージ圧とした場合は,0.14mmであった。

したがって0.5kg/cm<sup>2</sup> 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した。

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 よるアセチレン一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/cm<sup>2</sup> 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,水素一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 関連をしめした。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したが,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/cm<sup>2</sup> G.) from the previous report.

• Ignition O Non-ignition

- (B) at atmospheric pressure from this repert.
- (C) at 0.5kg/cm<sup>2</sup> G. from this report.

- 17 -

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5ℓ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,非代数値 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一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、したがって水素一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 Saf Gap for One-Inch Flanges, ERA, D/T 117, (1959)
- 労働省産業安全研究所報:水素濃度と火炎洗走限界 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)
- (1) 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:アセチレンー空気系混 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.