

高気圧における He-Air および He-O₂ 混合気体の絶縁破壊特性*

— β 線および紫外線照射時の
インパルス絶縁破壊特性—

保 莉 和 雄** 菅 原 宣 義**

金 子 良 松*** 田 頭 博 昭***

(昭和62年9月30日受理)

Breakdown Characteristics in Gas Mixtures of pressurized He-Air and He-O₂

—Impulse breakdown with β ray and UV ray irradiations—

by Kazuo HOKARI, Noriyoshi SUGAWARA, Yoshimatsu KANEKO
and Hiroaki TAGASHIRA

The impulse breakdown voltage for a quasi-uniform electric field irradiated with a β ray of about 2.5 mCi of Sr⁹⁰ was measured under pressures from 5 to 50 kg/cm² in a gas mixture of He-O₂. This gas mixture is used in the sea bottom habitat as artificial air. The β ray source at 8 cm from the electrode axis irradiated a gap of 1 mm. The impulse ratio under these conditions increased with increasing pressure and became saturated at about 20 kg/cm². Under conditions of the β ray irradiation at 2 cm from the electrode axis, the impulse ratio was nearly constant with increasing pressure at each of the gaps from 0.5 to 2.0 mm, while this ratio decreased suddenly with an increase of the gap length at constant pressure.

1. ま え が き

近年、エネルギー危機や200カイリ漁業水域の設定等の国際環境を背景に世界各国で海洋および大陸棚の開発が進められており、英国の北海油田開発はその代表例と言える。わが国は世界第6位の200カイリ水域面積を有しており、今後この有効利用が望まれる。大陸棚は、比較的開発しやすい、水深200mより浅いなだらかな海底で、多くの鉱物資源と生物資源の大半が存在すると言われており、わが国では、陸地面積(38万km²)を越える44万km²にたっす

* 昭和62年4月電気学会全国大会及び、昭和62年10月電気関係学会北海道支部大会にて一部発表。

** 北見工業大学電気工学科

*** 北海道大学工学部電気工学科

る¹⁾。この様な水域での資源の探査、開発には、大深度の潜水作業が必要となる。潜水時には水深と同圧力の気体を呼吸しなければならない。約 40 m の水深を越える大深度の潜水では窒素酔いや、酸素中毒が問題となってくるため、加圧空気は用いることが出来ない。従って、これらの障害を少なくするために、酸素分圧を、一定(約 0.3 kg/cm²)に保った He-O₂ または He-Air 高気圧混合気体が呼吸気として用いられている。また、通常の潜水法では、潜水病を防止するために、作業深度から海面に浮上するまでに減圧時間(体内にとけ込んだガスを排出する時間)を必要とするが、深度が大となるにつれ、この減圧時間も長くなり、作業時間の数倍以上になるため作業効率が著しく低下する。これを防止するために飽和潜水法が用いられる。この方法は、体内にとけ込むガスの量が約 2 日間で飽和するため、2 日以上 of 潜水に対しては減圧時間が一定となるという原理に基づいている。従って、長期間、海中に滞在するほど作業効率が良くなる。このため潜水作業員は、海底に設置された海中作業基地等内の作業深度と同圧力の環境内で長期間滞在することとなる。これらの施設内では上述の高気圧混合気体が環境気体として用いられる。この様な施設内のエネルギー源としてはクリーンエネルギーである電気が用いられている。今後、施設の大型化等による消費電力の増大のため、送電電圧の高電圧化や、高電圧を使用している医療機器及び民生機器(レントゲン装置、テレビ等)の使用が予想される。しかし、この様な雰囲気中の絶縁破壊特性はあまり知られていないようである。これらの施設は、通常的生活空間から隔絶された閉鎖環境であるため、部分放電や絶縁破壊による有毒ガスや異臭の発生、エネルギー供給の停止等は時として大事故につながるため、安全に関しては十分な考慮が払われなければならない。

本研究は、これらの施設内で用いられる電気設備の安全に関する基礎的データの収集を目的としている。現在、He-O₂ および He-Air 高気圧混合気体中で平等電界下の絶縁破壊特性について実験を進めており、これまでに、DC, AC 絶縁破壊特性について報告してきた^{2) 4)}。本報告では、He-O₂ 高気圧混合気体中で、ギャップ長 1 mm についてインパルス電圧を印加した時の照射条件を変え、その照射効果について検討した。その結果、最も照射効果の大きい条件は、 β 線照射、照射距離 $L=2$ cm の場合であった。この条件下でギャップ長を 0.5~2.0 mm、圧力を 5~50 kg/cm² まで変えた時の、50% 絶縁破壊電圧及び衝撃比と圧力の関係について報告する。

2. 実験装置、方法

実験装置の概要を図 1 に示す。圧力容器は耐圧 150 kg/cm² のステンレス製で容積は約 3 リットルである。電極はステンレス製で 18 mm ϕ × 30 mm の半球棒電極を用い、準平等電界配置とした。ギャップ長は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm とし、マイクロメータにより設定した。各ギャップ長毎に圧力を変えて実験を行い、電極はギャップ長を変える毎に 1500 番の耐水ペーパーと、ピカールで鏡面に仕上げ、アセトンで洗浄した。使用した He, O₂ の純度は 99.99% であ

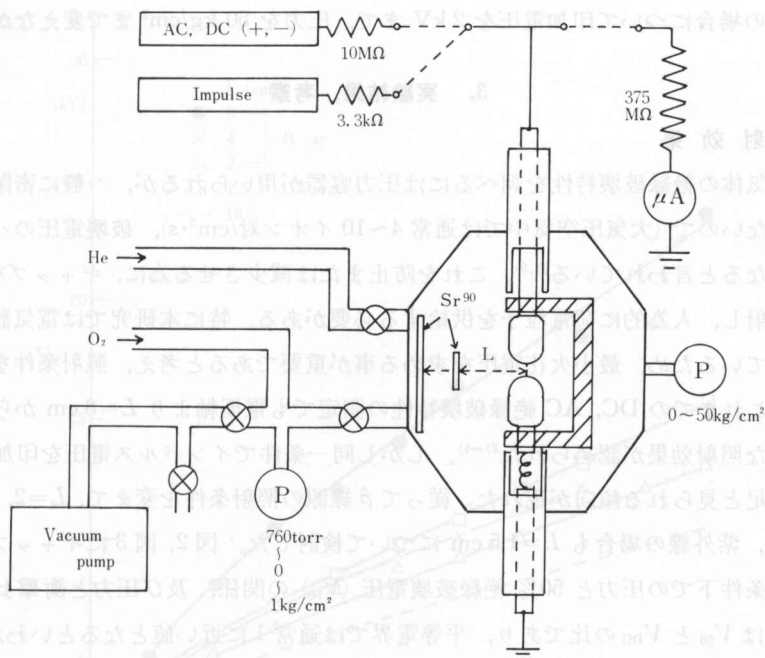


図 1 装 置 図

る。試験雰囲気は、容器内を 0.3 torr 以下までロータリーポンプで排気し、大気圧まで He を導入した後、O₂ を 0.3 kg/cm² まで入れ、それから所定の圧力まで He で加圧し、He-O₂ 高気圧混合気体とした。加圧後、容器内に取り付けた小型ファンで約 5 分間かくはんし、ガスを混合させた。圧力範囲は水深 50 m から約 500 m に相当する、5~50 kg/cm² (絶対圧力) までとした。

DC 絶縁破壊電圧は上昇法により求めた。まず、測定に先立ち、10 数回の予備放電を行い、電極のコンディショニング⁵⁾を行うとともに放電電圧を推定し、その値の 80% 付近から電圧をゆっくり上昇し絶縁破壊電圧を測定した。放電後、1 分間の休止期間を置き、同様にして測定した 3 回の結果の平均をとり DC 絶縁破壊電圧 (V_{DC}) とした。衝撃電圧の場合は、印加電圧波形は標準波形に近い正極性の $1 \times 35 \mu\text{sec}$ で約 20~30 回の予備放電で放電範囲を推定した後、40 回の昇降法により、50% 絶縁破壊電圧 (V_{50}) を推定した。電圧印加時間間隔は 1 分間とした。放電電流による電極の損傷を防ぐ目的で、DC 電圧の場合は 10 M Ω 、衝撃電圧では 3.3 k Ω の電流制限抵抗を高電圧電極に直列に挿入した。この V_{50} 及び V_{DC} より衝撃比を求めた。照射は紫外線の場合は 4 W の殺菌灯を用い、電極軸より照射距離 $L =$ 約 1.5 cm に点灯し、平板状の β 線源 (約 2×8 cm) は約 2.5 mCi の Sr⁹⁰ で、これを電極軸より $L = 2, 4, 8$ cm の位置に置いて、照射を行った。 $L = 2, 4$ cm については線源の長手方向が電極軸と直角となるように置き照射効率が良くなるようにした。各照射条件下で、暗流の測定を行った。この測定は直流安定化電源 (池上製 HD 2.5 K-M) とエレクトロメータ (武田理研製 TR 8401) を使い、ギャッ

プ長 1 mm の場合について印加電圧を 2 kV まで、圧力を 50 kg/cm² まで変えながら行った。

3. 実験結果、考察

3.1 照射効果

高気圧気体の絶縁破壊特性を調べるには圧力容器が用いられるが、一般に密閉容器中の荷電粒子は少ないので(大気圧空気中では通常 4~10 イオン対/cm³·s)、破壊電圧のバラツキや遅れが大きくなると言われている^{5),6)}。これを防止または減少させる為に、ギャップを紫外線、放射線等で照射し、人為的に荷電粒子を供給する必要がある。特に本研究では電気設備の安全性を目的としているため、最小火花電圧を求める事が重要であると考え、照射条件を種々変えて検討した。これまでの DC, AC 絶縁破壊特性の測定でも電極軸より $L=8$ cm からの β 線照射による顕著な照射効果が認められた^{2)~4)}。しかし同一条件でインパルス電圧を印加すると、初期電子の不足と見られる傾向が現れた。従って β 線源の照射条件を変えて、 $L=2, 4$ cm について、さらに、紫外線の場合も $L=1.5$ cm について検討した。図 2, 図 3 にギャップ長 1 mm の時の各照射条件下での圧力と 50% 絶縁破壊電圧 (V_{50}) の関係、及び圧力と衝撃比の関係を示す。衝撃比は V_{50} と V_{DC} の比であり、平等電界では通常 1 に近い値となるといわれる⁷⁾。本実験中、 V_{50} の測定に先だって V_{DC} を測定をしたが、 V_{DC} の値は照射条件によって変化しなかった。 β 線照射、 $L=8$ cm の場合、図 2 に見られるように V_{50} は V_{DC} よりもかなり高く、特性曲線の傾きは急になる。図 3 に見られる様に、衝撃比は、圧力 $P=20$ kg/cm² までは急増し、以後圧力の増加に対して飽和する傾向が見られた。衝撃比がこの様な特性を示す原因として初期電子の不足が考えられる。 β 線は透過力が弱く、物質に対する吸収の様子は次の様に指数関数で表される⁸⁾。

$$N = N_0 e^{-\mu l}$$

ここで N_0 : 物質透過前の β 線粒子の数

N : 物質透過後の β 線粒子の数

l : mg/cm² で現された物質の厚さ

μ : 質量吸収計数

すなわち、ギャップ中への β 線の入射粒子の数は圧力の増加とともに指数関数的に減少する。従って、 $P=20$ kg/cm² 付近までは、 β 線照射によって供給される初期電子が減少するので、 V_{50} が増加したと考えられる。 $P=20$ kg/cm² 付近からの飽和傾向については、電界放出が考えられる。一般に、電極表面での電界が 10^6 V/cm 程度に達すると電極の金属表面からトンネル効果により電子放出が起こると言われる。実際には、電極表面の汚損や凹凸等による電界の集中のため 1 桁から 2 桁小さい値でも起こり得るとされる⁷⁾。本実験においても、この付近からは印加電界が 10^5 V/cm を越えることと、実験後の電極の表面には溶融した様な放電痕が認められることから、陰極表面の放電痕の微小突起からの電界放出により初期電子が供給され

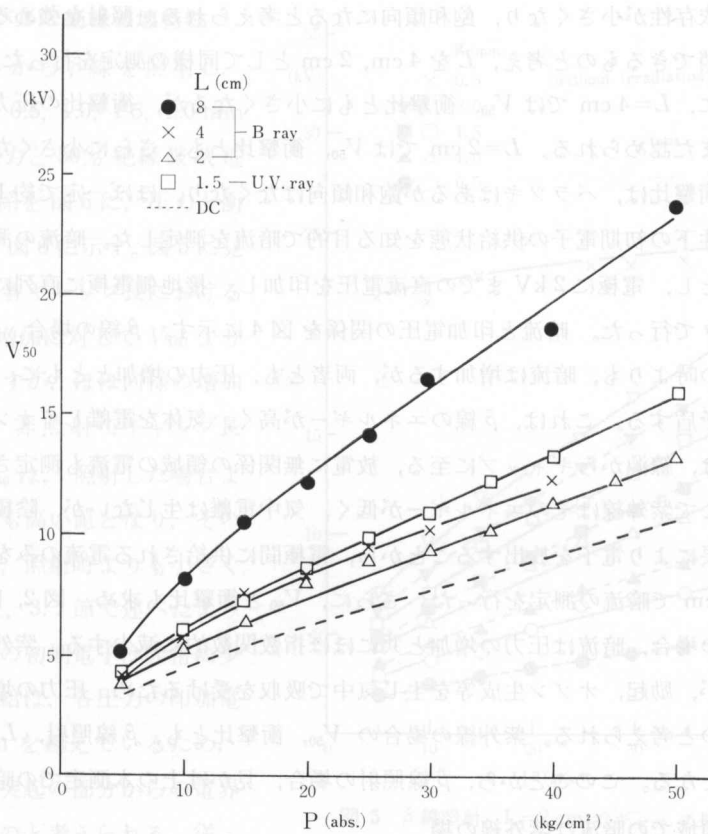


図 2 ギャップ長 1 mm で照射条件を変えた時の圧力と 50% 絶縁破壊電圧の関係

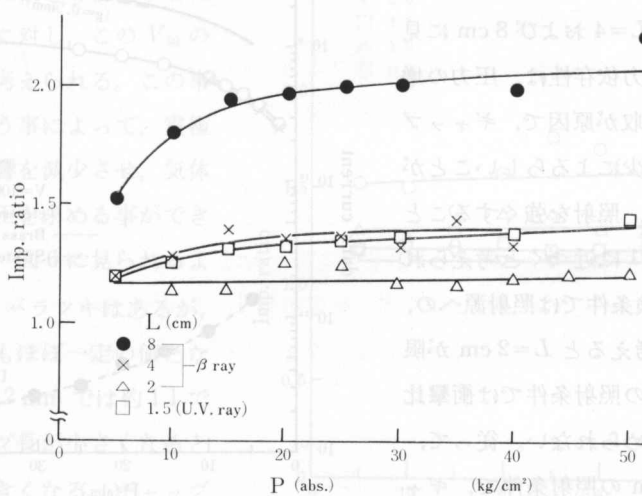


図 3 ギャップ長 1 mm で照射条件を変えた時の圧力と衝撃比の関係

るため、圧力依存性が小さくなり、飽和傾向になると考えられる。照射を強めることで初期電子の不足を解消できるものと考え、 L を 4 cm, 2 cm として同様の測定を行った。図 2, 図 3 に見られるように、 $L=4$ cm では V_{50} , 衝撃比ともに小さくなるが、衝撃比の圧力の増加に対する飽和傾向はまだ認められる。 $L=2$ cm では V_{50} , 衝撃比とも、さらに小さくなり、圧力の増加に対して、衝撃比は、バラツキはあるが飽和傾向はなくなり、ほぼ一定で約 1.2 となる。これらの照射条件下の初期電子の供給状態を知る目的で暗流を測定した。暗流の測定は、ギャップ長を 1 mm とし、電極に 2 kV までの直流電圧を印加し、接地側電極に直列に接続されたエレクトロメータで行った。暗流と印加電圧の関係を図 4 に示す。 β 線の場合、 $L=2$ cm の方が、 $L=4$ cm の時よりも、暗流は増加するが、両者とも、圧力の増加とともに、暗流は増加し、前述の考察と矛盾する。これは、 β 線のエネルギーが高く、気体を電離しイオン対を生成するが、本測定では、線源からギャップに至る、放電に無関係の領域の電流も測定されるためと考えられる。そこで紫外線はそのエネルギーが低く、気中電離は生じないが、陰極表面に入射した時、光電効果により電子を放出することから、電極間に供給される電流のみを測定できると考え、 $L=1.5$ cm で暗流の測定を行った。さらに、 V_{50} と衝撃比も求め、図 2, 図 3, 図 4 に示した。紫外線の場合、暗流は圧力の増加と共にほぼ指数関数的に減少する。紫外線は、気中電離は生じないが、励起、オゾン生成等を生じ気中で吸収を受けるため、圧力の増加と共に暗流は減少するものと考えられる。紫外線の場合の V_{50} , 衝撃比とも、 β 線照射、 $L=4$ cm の時とほぼ同様の値となる。このことから、 β 線照射の場合、見かけ上の本測定での暗流は増加しているが、放電領域での暗流は紫外線の場合と同様に、圧力の増加と共に減少していると考えられる。以上のことから、図 3 の β 線照射、 $L=4$ および 8 cm に見られた衝撃比の圧力依存性は、圧力の増加による β 線の吸収が原因で、ギャップ中の初期電子の減少によるらしいことが分かった。さらに、照射を強くすることで、衝撃比はより 1 に近づくと考えられる。しかし、本実験条件では照射源への、放電の危険性を考えると $L=2$ cm が限界であり、又、この照射条件では衝撃比の圧力依存性が認められない。従って、 β 線照射、 $L=2$ cm の照射条件で、ギャップ長を変え、インパルス絶縁破壊特性を求めた。

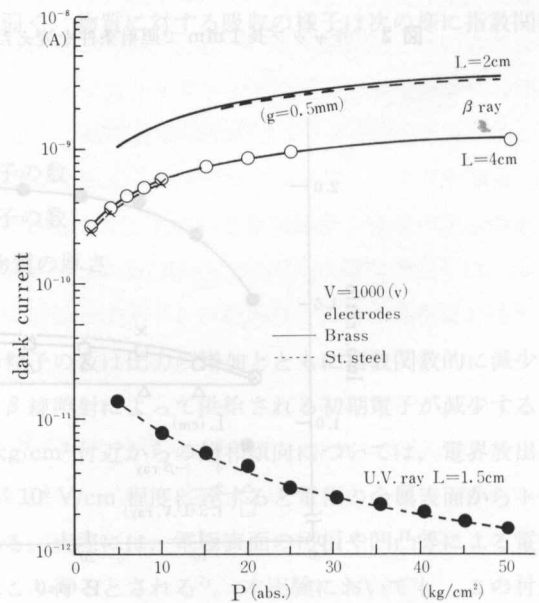


図 4 ギャップ 1 mm 長で照射条件を変えた時の圧力と暗流の関係

3.2 インパルス絶縁破壊特性

$L=2\text{ cm}$ から β 線を照射し、ギャップ長を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm とした時の圧力と 50% 絶縁破壊電圧 (V_{50}) の関係を図 5 に、圧力と衝撃比の関係を図 6 に示す。図 5 に見られるように各ギャップ長における V_{50} は圧力の増加に対して V_{DC} よりも高い値を示すが、ほぼ同様の増加傾向を示す。非照射でギャップ長 0.5 mm の V_{50} は、照射した場合よりも 3 倍以上も高い値となり、その曲線の傾きは、照射時よりも小さくなる。これは、3.1 節で述べたように、非照射時の初期電子は非常に少なく、その供給は、各圧力の印加電界が 10^5 V/cm を越えているため、放電痕の微小突起の部分からの電界放出によるものと考えられる。従って、この V_{50} は気体の絶縁耐圧よりも電極表面状態に大きく依存するため、圧力の増加に対し、この V_{50} の変化が小さいと考えられる。このことから、照射を行う事によって、電極の表面状態の影響を減少させ、気体の本来の絶縁耐圧を求める事ができると考えられる。図 6 に見られるように、衝撃比は、バラツキはあるが、各ギャップ長ともほぼ一定の値となり、ギャップ長 2 mm では約 1.1 であるが、ギャップ長が小さくなるとともに急激に大きくなる。ギャップ 0.5 mm 長の衝撃比は約 1.5 とかなり大きい。実験条件を検討した結

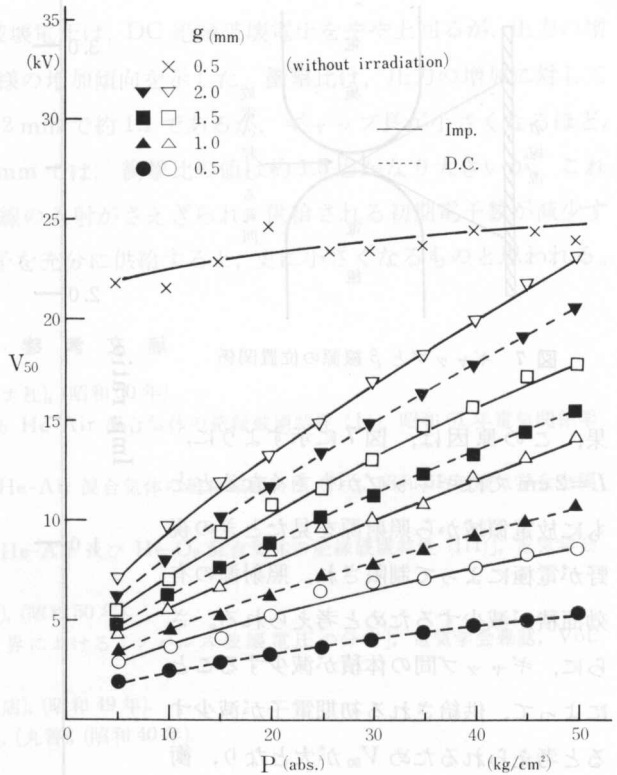


図 5 β 線照射, $L=2\text{ cm}$ でギャップ長を変えた時の圧力と 50% 絶縁破壊電圧の関係

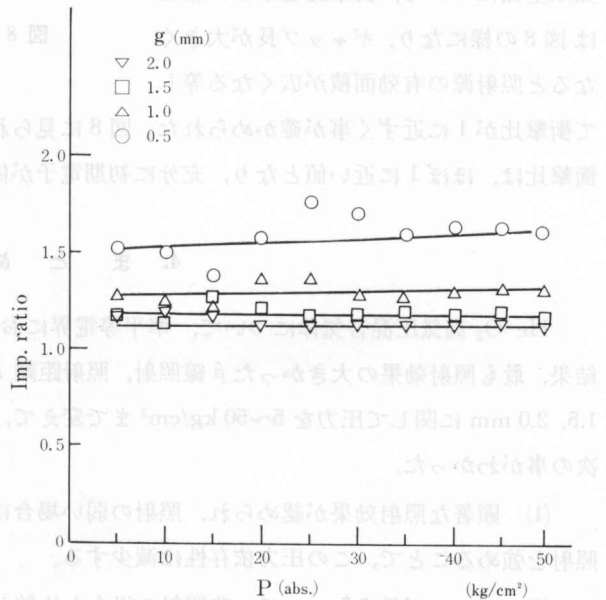


図 6 β 線照射, $L=2\text{ cm}$ でギャップ長を変えた時の圧力と衝撃比の関係

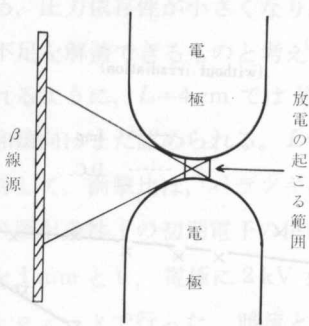


図7 ギャップとβ線源の位置関係

果、この原因は、図7に示すように、 $L=2\text{ cm}$ ではギャップが小さくなるとともに放電領域から照射源を見たときの視野が電極によって制限され、照射源の有効面積が減少するためと考えられる。さらに、ギャップ間の体積が減少することによって、供給される初期電子が減少すると考えられるため V_{50} が大となり、衝撃比が大きくなるものと考えられる。大気圧空気について、衝撃比を求めた結果は図8の様になり、ギャップ長が大きくなると照射源の有効面積が広がる等して衝撃比が1に近づく事が確かめられた。図8に見られるようにギャップ長1.5 mm以上では、衝撃比は、ほぼ1に近い値となり、十分に初期電子が供給されているものと思われる。

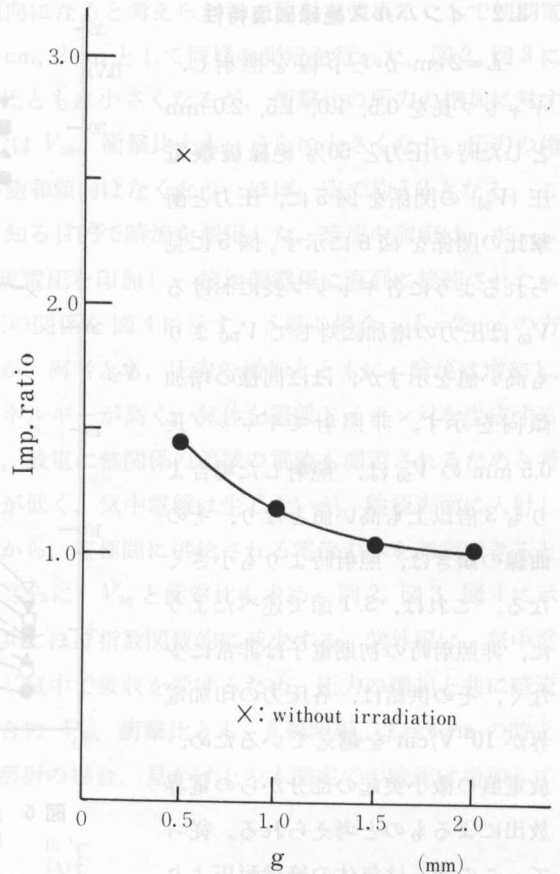


図8 大気圧空气中でβ線照射、 $L=2\text{ cm}$ の時のギャップ長と衝撃比の関係

4. ま と め

He-O₂ 高気圧混合気体について、準平等電界における、ギャップの照射条件を検討した結果、最も照射効果の大きかったβ線照射、照射距離 $L=2\text{ cm}$ の場合で、ギャップ長0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm に関して圧力を5~50 kg/cm² まで変えて、インパルス絶縁破壊特性を調べた結果、次の事がわかった。

(1) 顕著な照射効果が認められ、照射の弱い場合には、衝撃比の圧力依存性が現れるが、照射を強めることで、この圧力依存性は減少する。

(2) ギャップ長0.5 mm で、非照射の場合と比較した結果、照射することにより、電極の表面状態等が50%絶縁破壊電圧に影響を及ぼす事を少なくし、気体本来の絶縁耐力を求めるこ

とが出来る事が分かった。

(3) 各ギャップ長とも 50% 絶縁破壊電圧は、DC 絶縁破壊電圧をやや上回るが、圧力の増加に対して、DC 電圧の場合とほぼ同様の増加傾向を示した。衝撃比は、圧力の増加に対しては、ほぼ一定の値となり、ギャップ長 2 mm で約 1.1 であるが、ギャップ長が小さくなるほど、その値は大きくなる。ギャップ長 0.5 mm では、衝撃比の値は約 1.5 とかなり大きい。これは電極肩部によりギャップ空間への β 線の入射がさえぎられ、供給される初期電子数が減少するためと考えられる。従って、初期電子を十分に供給すると、更に小さくなるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 例えば「海洋工学ハンドブック」,(コロナ社),(昭和 50 年).
- 2) 保苺・金子・田頭他:「高気圧における He-Air 混合気体の絶縁破壊特性 (I)」,昭和 61 年電気関係学会北海道支部大会, No. 214.
- 3) 保苺・金子・田頭:「高気圧における He-Air 混合気体の絶縁破壊特性 (II)」,昭和 61 年電気学会全国大会, No. 170.
- 4) 保苺・金子・田頭:「高気圧における He-Air 及び He-O₂ 混合気体の絶縁破壊特性 (III)」,電気学会放電研究会, ED-86-67.
- 5) 例えば「放電ハンドブック」,(オーム社),(昭和 50 年).
- 6) 野口・堀井:「密閉タンク中の平等電界におけるインパルス破壊電圧の分布」,電気学会雑誌, Vol. 188-11, No. 962, pp. 2142 (1968).
- 7) 田頭・坂本:「新高電圧工学」,(朝倉書店),(昭和 49 年).
- 8) 伊沢・江藤・熊取他:「放射線の防護」,(丸善),(昭和 40 年).

1. Introduction

Electric power demand is increasing and the load factor worsens. Big and inflexible power stations are being built, a typical example being a large power station. This means that the thermal stations are required to provide only wide control of the output power but also proper daily start stop operation considering the whole system. Optimum scheduling becomes important for the electric power system.

The schedule must be practical. This paper reports a speedy scheduling method for optimum operation considering constraints of both power supply probability and environmental pollution by the thermal stations. The proposed method can make a start stop schedule for each thermal station and its output at any time so that both constraints are satisfied most economically.

From a scheduling position power supply is considered possible only when all capacities in the system are satisfied. The output power of every thermal station must be controlled to satisfy the capacities strictly economically¹⁾, and this introduces huge calculations²⁾. The proposed method approximately controls the output power of two thermal stations so as to make an operation schedule rapidly.

¹⁾ Presented at I. E. E. J. Power Engineering Symposium (July 1967).

²⁾ Department of Electrical Engineering, Kitami Institute of Technology.