

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-87, 1987.
UDC 628.5 : 614.825 : 621.316.9 : 626.02

水中電路用漏電遮断器の電撃死防止効果*

山野英記**, 本山建雄**, 田中隆二**

Protection Effects of DC Leakage Operated Circuit Breaker and High Resistance Grounding against Electric Shock Hazard Underwater

by Eiki YAMANO, Tatsuo MOTOYAMA and Ryuji TANAKA

Abstract ; Working in the sea or other waters and the use of electricity in such areas are increasing in recent years. These situations may lead divers to hazards of underwater electric shock. This paper reports on an investigation of the effect of a protection method for such hazards.

As a shock-hazard protection method, a circuit breaker which is fitted on an a. c. supply grounded midpoint by high resistance and operated by d. c. leakage signal is suggested, and the effect of the method for protection against electric shock underwater is investigated by inference and experiment. The greater part of the investigation is applicable to other types of earth-leakage circuit breaker, because it is a common defect of circuit breakers that electric shock during operating time is not prevented.

From the results of investigation, it is concluded that the suggested method protects a person from instant death due to electric shock underwater in the majority of cases and greatly contributes towards the safety of underwater use of electricity.

The results of investigation are summarized as follows :

- (1) It was inferred that the instant death from electric shock due to single line ground fault underwater can be prevented by the d. c. leakage operated circuit breaker and the high resistance grounding.
- (2) The instant death due to fault of both lines underwater is also prevented in the cases that ;
 - i) the time interval between faults is beyond the operating time of breaker,
 - ii) the progress of fault (i. e. decrease of insulating resistance) is slow,
 - iii) the fault locations are inside of conducting screen (e. g. metal casing, etc.),
 - iv) a person is not located in hazardous domain around a fault area.
- (3) When a person is located in hazardous domain produced by a fault of both lines, death from electric shock may occur in a certain range of frequency according to the conditions. In the experiment with rabbits, a serious effect which may lead to instant death occurred twice in 52 shocks by artificial fault underwater.
- (4) Rabbits were instantly killed by shocks in the experiment without protection of circuit breaker.

* 第20回安全工学研究発表会(1987)において発表。

** 電気研究部 Electrical Safety Research Division

When a local protection method such as a double insulation or a conducting screen fails, the supply system may remain in undetected hazardous state. Therefore, it should be considered to protect by a method whose effect covers whole line, such as an earth-leakage circuit breaker, in addition to local protections.

Keywords : Industrial Safety, Electric Shock, Diving Work, Protective Device, Underwater work, Safety device, Offshore Engineering, Circuit Breaker.

1. はしがき

海洋開発やサルベージなどに伴う潜水作業においても、陸上の作業と同様に電気使用の必要性は高いものと考えられ、また実際に種々の目的に電気を使用されている。しかし、水中において安全に電気を使用する技術はまだ十分に確立されていないのが現状と言えよう。

先般、我々は、水中における電撃災害の防止のため、水中の低圧電路に適用し、対地抵抗の減少を直流で検出する方式の漏電遮断器を開発した¹⁾。しかし、漏電遮断器は、作動するのにある程度の時間を要するので、この間に流れる電流で電撃が生じ、悪い場合には電撃死が起こるかもしれない。したがって、このような装置がどの程度まで有効なのか、その限界を明らかにしておくことは重要である。

本研究では、開発した直流動作型漏電遮断器の電撃死防止の効果について検討したが、そのとき、漏電遮断器は中性点高抵抗接地方式の電路（線間電圧 100 V）に設置されるものとした。すなわち、ここで検討する電撃死防止効果は、漏電遮断器単独のものではなく、高抵抗接地と組み合わせて一つの地路保護方式（またはシステム）としたときの効果である。

また、作動するまでの間に短い電撃が起こる可能性のあることは、漏電遮断器に共通の問題であり、本研究の結果は、試作器固有の条件が入る一部の議論を除き、他のタイプ（従来型、または新しい型）の漏電遮断器にも同様に適用できる一般的なものである。

2. 水中電撃の危険性を評価するための回路モデル

2.1 回路モデル

開発した直流検出型の漏電遮断器は、水中の電気系統として中性点高抵抗接地方式の低圧電路を想定している。この電路は、地絡故障が生じたときの漏電経路を加えると Fig. 1 のような等価回路で表わすことがで

きる。ただし、Fig. 1 は単相交流の場合である。

Fig. 1 において、節点 COM は接地極（または共通極）を表わす。 R_1 は接地用の抵抗、 Z_L は負荷インピーダンス、また、 C_A 、 C_B はそれぞれ線路 A、B の対地分布キャパシタンスである。 R_A 、 R_B 、及び R_C は、線路 A、B と接地極 COM との間の漏電経路を Y 型結線の等価回路で表したものである。

Fig. 1 には、外部に漏電することのない線間の分布キャパシタンスや絶縁抵抗は特に示されていない（ Z_L に含まれていると考えてもよい）。健全な線路の対地絶縁抵抗は電路の全体にわたって分布しているものであるが、地絡故障の生じた場合については、 R_A 、 R_B は故障箇所に集中しているとみなすことができる。

Fig. 1 の接地法は電源変圧器 2 次側の中点を接地抵抗 $R_g = R_1/2$ で接地するのと等価であり、後述の実験でもこの結線で接地した。 R_g の値は、1 線地絡電流が十分小さくなるように設定する必要がある。また、接地極と水との間の抵抗は小さくしなければならない。

分布キャパシタンスの値については、例えば同軸型の単心ケーブルを考えると、その心線と外部導体との間のキャパシタンスは、心線直径 14 mm（断面積 150

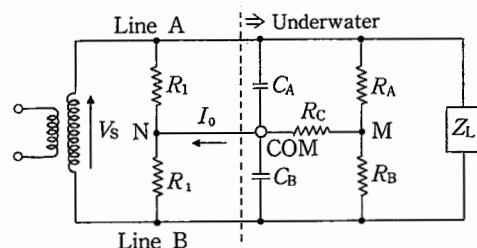


Fig. 1 A circuit model of power line and leak path underwater.

水中の電路と漏電経路のモデル

COM : Common pole (Grounding electrode),
 V_s : AC source voltage,
 R_1 : Resistance for grounding midpoint,
 C_A , C_B : Stray capacitances against ground,
 R_A , R_B , R_C : Leak path

mm²), 絶縁物の厚さ 1 mm, 絶縁物の比誘電率 $\epsilon_s = 10$ とおいて, 実用計算式あるいは同軸円筒モデルの解に従って計算すると, 1000 m 当たり 3~4 μF となる。実際には, 絶縁物はもっと厚く, また複心になると対地キャパシタンスは減少することから, ほとんどの場合, C_A, C_B はこれより小さいと考えられる。

2.2 漏電経路に関する考察

Fig. 1 において, R_A, R_B, R_C で構成される漏電経路は, Δ 型結線の等価回路で表わすこともできる (Fig. 3 参照)。しかし, 線間橋路を無視できるような場合は, Y型モデルのほうが物理的な状況に近いように思われる。

故障箇所に, 電路を覆う金属製のケーシングや外装 (導体スクリーンと総称する) のない場合は, 上の漏電経路は Fig. 2 (a) のようになり, $R_A = R_{AI} + R_{AW}$, $R_B = R_{BI} + R_{BW}$ と表される。ここで, R_{AI}, R_{BI} は絶縁物の抵抗であり, 故障の程度によって減少する。 R_{AW}, R_{BW} 及び R_C は二つの故障箇所と接地極との間の水の抵抗を Y 型結線の等価回路で表わしたものである。点線で示した R_{br} は内部の線間橋路抵抗であるが, ここを流れる電流は人体に作用することがないとして省略する。

Fig. 2 (a) において, 絶縁抵抗 R_{AI}, R_{BI} がともに十分に大きい場合 (電路が健全な場合) は, $R_A = R_{AI}$, $R_B = R_{BI}$ (または R_A, R_B ともに無限大), $R_C = 0$ と置くことができる。絶縁抵抗の一方でも (例えば R_{AI} が) 減少すれば, 地絡側の水の抵抗 R_{AW} と R_C は必ずしも無視できなくなる。 R_{AI}, R_{BI} が十分に小さい場合 (絶縁物が脱落し充電部分が水中に露出したような場合) には, $R_A = R_{AW}$, $R_B = R_{BW}$ となる。

Fig. 2 (b) の回路は導体スクリーンのある場合の漏電経路であり, 回路の節点 S が導体スクリーンに対応している (前述(a)の回路の節点 M には具体的に対応する物

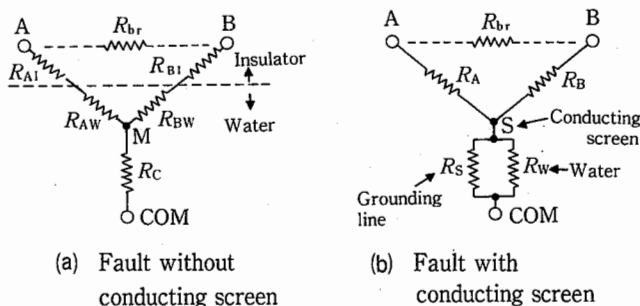


Fig. 2 Leak path model of underwater ground fault
漏電経路の説明図

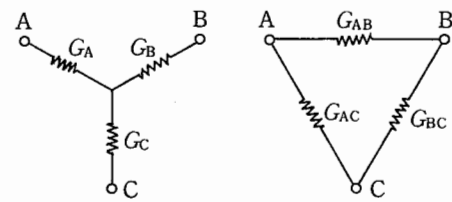


Fig. 3 Equivalent circuits of leak path in
Y-type and Δ -type models.
($G_A = 1/R_A$, $G_{AB} = 1/R_{AB}$, etc.)
漏電経路の Y 型及び Δ 型モデル

はない)。導体スクリーンから接地極までは, 水を通る経路 R_W と導体スクリーン・接地線を通る経路 R_S とがあり, これらの並列抵抗 $R_W \parallel R_S$ が Fig. 1 の R_C に対応する。導体スクリーンの外側にさらに絶縁物がある場合には, 抵抗 R_W にその抵抗を含める。

導体スクリーンがあると水との接触面積が増大することもある。特に海水中で, 水の抵抗 R_W はあまり大きくない値となる。このため, 接地線等に大した欠陥のない場合でも, R_S は必ずしも無視 (短絡) できない。接地線等に故障の起こり得ることを考えればなおさらである。

水中電撃の危険を生ずる電流は, 故障箇所からいったん外部に流出する電流であり, Fig. 2 (a) では R_A, R_B を流れる電流が, (b) では R_W を流れる電流がこれに当たる。

漏電の種類には, 以上のほかに, 線間の抵抗 (Fig. 1 の $R_A + R_B$) に比べて接地極に至る抵抗 (おもに R_C) が大きく, かつ線間の電流のほうが人体に作用するような場合も考えられる。この場合には, 電撃の危険があるにもかかわらず, 漏電遮断器による漏電検出ができない事態も起こり得る。

この一つの場合は, 故障箇所と接地極との間をさえるように, 抵抗の比較的大きいカバーのようなもの (仮に絶縁カバーと呼ぶ) が存在し, 人体 (またはその一部) もこの絶縁カバーより電路側にある場合である。このときの漏電経路は, 例えば, Fig. 2 (a) の A, B 間に, 省略した橋路抵抗 R_{br} を接続したような回路モデルで表すこともできる。ただしこの場合, R_{br} を流れる電流 I_{br} は, カバー内の媒質 (水や人体) を流れる線間の電流であり, R_{AI}, R_{BI} は絶縁カバーの抵抗となる。

もう一つの場合は, 絶縁カバーのような障壁は無いが, 水中に露出した 2 個の充電部分が接近し, 線間の抵抗が対地抵抗より小さくなってしまふ場合である。

2.3 回路モデル内の電圧・電流

Fig. 1 の回路モデルにおいて、電源電圧を V_s 、線路 A, B の対地電圧をそれぞれ V_A , V_B 、接点 M の対地電圧を V_M と置き、抵抗 R を逆数のコンダクタンス G ($=1/R$)、リアクタンスを逆数のサセプタンス B ($=\omega C$) で表記すると次の方程式が得られる。

$$V_A - V_B = V_s$$

$$G_1(V_A + V_B) + jB_A V_A + jB_B V_B + G_C V_M = 0$$

$$G_A(V_A - V_M) + G_B(V_B - V_M) - G_C V_M = 0$$

これから、 V_A , V_B , V_M を解くと次のようになる。ただし、式中の G_{AB} , G_{AC} , G_{BC} は、Fig. 3 のように、 G_A , G_B , G_C で構成される Y 型結線の等価回路を Δ 型に変換したときのコンダクタンスである（このほうが見通しのよい解となる）。

$$V_A = \frac{G_{BC} + G_1 + jB_B}{G_{AC} + G_{BC} + 2G_1 + j(B_A + B_B)} \cdot V_s \quad (1)$$

$$V_B = -\frac{G_{AC} + G_1 + jB_A}{G_{AC} + G_{BC} + 2G_1 + j(B_A + B_B)} \cdot V_s \quad (2)$$

$$V_M = \frac{G_{AC}(G_1 + jB_B) - G_{BC}(G_1 + jB_A)}{G_{AC} + G_{BC} + 2G_1 + j(B_A + B_B)} \cdot \frac{V_s}{G_C} \quad (3)$$

ただし、式(3)中の G_C は、 $G_C = 1/R_C = (G_{AB}G_{AC} + G_{AB}G_{BC} + G_{AC}G_{BC})/G_{AB}$ で与えられる。

またこれから、例えば G_A , G_B , G_C を流れる電流 I_A , I_B , I_C は

$$I_A = G_A(V_A - V_M)$$

$$I_B = G_B(V_B - V_M)$$

$$I_C = G_C V_M$$

のようにして求めることができる。接地抵抗を通り電源に帰還する電流（残余電流、または零相電流とも呼ばれる） I_0 は、次のようになる。

$$I_0 = \frac{G_{AC} - G_{BC} + j(B_A - B_B)}{G_{AC} + G_{BC} + 2G_1 + j(B_A + B_B)} \cdot G_1 V_s \quad (4)$$

2.4 直流動作型漏電遮断器

試作した水中電路用漏電遮断器¹⁾は、電路と接地極との間に直流電圧を加えておき、電路の絶縁が悪くなったときに流れる直流電流を検出して電源を遮断するのである。この装置の検出部（直流電圧の印加も行なう）は接地用の抵抗と接地極との間（Fig. 1 の N と COM との間）に挿入、設置する。

直流動作型漏電遮断器は、零相電流を検出する型に

比較し、①地絡検出に対する線路の分布キャパシタンスの影響が小さいこと、②2線（または3線）地絡時の検出範囲が拡大することなどの特長をもっている。

2線地絡においては、 G_{AC} , G_{BC} が増加（ R_{AC} , R_{BC} が減少）し漏電が生じて、式(4)の零相電流 I_0 は、対地アドミタンスの平衡により小さくなる場合がある。このとき、零相電流検出型では故障の検出感度が低下するが、直流動作型の感度は低下しない。

しかし、先に述べた類型、すなわち線間の抵抗（ $R_A + R_B$ ）が小さく対地抵抗（おもに R_C ）が大きい場合（ Δ 型モデルでは G_{AB} が大きく G_{AC} , G_{BC} が小さい場合）は、接地極を通る電流は、交・直いずれも小さくなり、どちらの型の漏電遮断器でも故障の検出は困難となる。

その一つ、絶縁カバーのある場合の例としては、塗装などのため接地極表面の抵抗が大きい場合、抵抗の大きい潜水服の内側で漏電が生じるような場合などがある。このような場合には、対地抵抗を小さくする工夫、あるいは別の対策が必要であり、そのままでは本稿の地絡保護方式（高抵抗接地と直流動作型漏電遮断器）による対応は不可能である。

線間電流の割に対地（直流）電流の小さい状況は、水中に露出した2個の充電部分の寸法・配置によっても生じることがある。これについては、無限媒質中に球電極があるとしたモデルを用い、検出する範囲を2線並列の対地抵抗 $R_x = 1/(G_{AC} + G_{BC})$ が $20 \text{ k}\Omega$ 以下の範囲として、検討を行なった¹⁾。例えば、海水（導電率 $\kappa = 2 \sim 8 \text{ S/m}$ ）中で、検出できない球半径 r_0 は最大 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 、電界が可随限界（ 2.5 V/m ）を超える領域の半径は、大きめに見積もって、 9 mm となる。また、 $\kappa = 5 \text{ mS/m}$ （水道水は 0°C で約 7 mS/m ）の水の中では、それぞれ半径 0.8 mm , 180 mm となる。

これによれば、海水の場合、検出されないことは少なく、あってもその危険性はほとんど問題にならないように思われる。水道水の場合も、致命的な影響は少ないと考えられるが、明らかではない。

一般に、対地抵抗が大きい場合の2線漏電は、負荷電流の増加としか見えないので、原理的に検出困難で、漏電遮断器の保護範囲から除外されるのが通常である。（1線地絡で検出できない場合は、故障電流は小さく、上のような問題は生じない。）

3. 地絡故障の形態と電撃死防止効果

Fig. 1 において、電源電圧 $V_s = 100 \text{ V}$ 、周波数 60 Hz 、接地抵抗 $R_g = 20 \text{ k}\Omega$ ($R_1 = 1/G_1 = 40 \text{ k}\Omega$) とし、 C_A ,

Table 1 Estimation of protection effect against death due to electric shock underwater
高抵抗接地と漏電遮断器による地絡保護の電撃死防止効果の推定

Type of ground fault	Single line fault	Both lines fault				
Time interval between faults	↓	Long* ¹	Short			
Progress of fault	↓	↓	Slow	Rapid		
Fault locations to conducting screen	↓	↓	↓	Inside	Outside	
Human's location to hazardous domain* ²	↓	↓	↓	↓	Out	In
Effect of protection	○	○	○	○	○	?

* 1 Interval > Operating time of breaker.

* 2 Hazardous domain : Domain in which the intensity of electric field is beyond 10 V/m (10 s in duration).

C_B は最大でも $3\mu\text{F}$ と仮定する。また漏電遮断器による 2 線並列の対地抵抗の検出感度は $20\text{ k}\Omega$ (これ以下で検出される) とする。また、漏電遮断器の作動しない場合については前章で考察したので除外する。

このとき、地絡故障を条件によって分類し、高抵抗接地と漏電遮断器を組み合わせた地絡保護システムの、各場合における電撃死 (即死) の防止効果を推測すると、Table 1 のようになる。

まず、1 線地絡の場合、線路 A の完全地絡を仮定しコンダクタンス $G_A = G_C = \infty$ ($R_A + R_C = 0$) と置くと、故障箇所からの流出電流 I_A の上限が得られ、

$$I_A = (G_B + G_1) V_s + j B_B V_s \quad (5)$$

となる。 G_B が小さければ、第 1 項は 2.5 mA 程度となり、十分に許容される。第 2 項は、 $B_B = \omega C_B$ において $C_B = 3\mu\text{F}$ とすると 113 mA となる。

この値はかなり大きい、後述の実験から分かるように、短時間で遮断されるならば、少なくとも海水中では致命的影響は起こらないと考えられる。水道水の場合も、①この電流の全部が人体に作用するわけではないこと、② G_A , G_C (および C_A , C_B) はもっと小さい値となること、③この電流は、陸上の電撃の (上肢一下肢または胸—左上肢間通電のときの) 心室細動の不発生限界より小さいこと²⁾³⁾などから、電撃死の起こる可能性は極めて小さいと考えられる。

2 線地絡の場合、各線の故障発生にはある程度時間差のあるのが普通と考えられるが、この時間差が漏電

遮断器の動作時間より大きい場合は 1 線地絡と同じ条件になる。また、故障の進行 (絶縁抵抗の減少) が緩やかな場合も、危険になる前に遮断器が作動する。

故障箇所が電気機器の金属製器体等 (導体スクリーン) の内側の場合は、器体外の電流は 1 線地絡の場合と同様に接地抵抗と分布キャパシタンスによって制限され、また、Fig. 2 (b) のように、スクリーンが接地されている場合は、水中の電流はさらに小さくなる。

Fig. 2 (a) のように、導体スクリーンのない場合でも、人間が漏電によって生じる電撃危険領域の外に位置する場合は、電撃死は防止される。

以前の実験において、均一電界で持続時間が 10 s 以下のとき、水中の電界が 10 V/m 以下であればウサギに致命的な影響は生じないとの目安が得られた⁴⁾。したがって、一応、電界が 10 V/m 以上となる領域を遮断器が作動する場合の電撃危険領域とすることができ。ただし、陸上の心室細動電流は、持続時間が 10 s から 100 ms に減少すると、 10 倍以上に増加するとされているので²⁾³⁾、上のしきい電界はさらに高く設定することも可能と考えられる。

2 個の球電極 (半径 a , b) が無限に広い水中にあるときの電撃危険領域は、電極間電圧 V_s 、しきい電界 E_t で、 $1 \leq a/b \leq 10$ の場合、だいたい各電極の中心から半径 $r_t = \{bV_s/E_t\}^{1/2}$ の領域に入る大きさとなる (b の代わりに大きいほうの半径 a を代入すれば完全に入る)。ただし、各電極の電位はその対地抵抗に応じて変化する。ここで目安に使用した r_t は、電位 V_s の 1 個の

球電極があるときに電界が E_t となる球面の半径であり、例えば $b=1\text{ cm}$, $E_t=10\text{ V/m}$ のとき, $r_t=32\text{ cm}$ となる。

2線地絡で、人間が電撃危険領域内に位置する場合は、致命的な影響の生じる可能性がある。しかし、水中においては、即死を起こす電撃の限界が知られていないこと、電流は電撃のあまりよい尺度にならないこと⁵⁾などのため、それがどの程度の可能性なのかははっきりしない。以下において、この場合に関し実験的な点検を行なう。

4. 実験方法

2線地絡時の電撃危険領域内に生体が位置するような場合の、想定したシステムの電撃死防止効果について、実験的な点検を行なう。

4.1 実験回路

Fig. 4 に実験方法の概要を示す。図の試験回路は Fig. 1 の回路モデルに対応しているが、漏電経路を除く線路や負荷は水槽の外に設定されている。水中の電極 A, B が漏電箇所を模擬する電極である。実験では、地絡スイッチ (MC: 電磁接触器) を投入して2線地絡 (ウサギにとっては電撃) を起こし、試作した漏電遮断器が作動した後のウサギの状態を観察する。

Fig. 4 において、電源電圧は AC 50 Hz, 100 V, 接地抵抗は $20\text{ k}\Omega$ (片側の抵抗はいずれも $40\text{ k}\Omega$) とし、線路の分布キャパシタンス $C_A=C_B=3\text{ }\mu\text{F}$ と置いた。また、B 線側には漏電経路の途中に抵抗 R_{B1} を入れ、これ

を変えて実験を行なった。A 線側は $R_{A1}=0$ で一定である。漏電遮断器の検出部において電路-接地極間に印加する直流電圧は 10 V に、対地漏れ抵抗の検出感度は $20\text{ k}\Omega$ (これ以下で検出される) に設定した。電源の最大定格電流は 200 A である。

水中の電極 A はウサギの胸骨の上部 (首の下) に取り付け、電極 B はウサギの臀部 (尾の付け根の上側) に取り付けた。電極 A は直径 30 mm , 電極 B は直径 50 mm の銅の円盤である。また、水中の接地極は面積約 4700 cm^2 の銅板、キャパシタンスにつながる水中の電極は面積約 700 cm^2 の長方形の銅板とした。地絡スイッチは、実験の安全を計るため、投入後 3 s で OFF になるように設定されている。

ウサギに対する電撃の持続時間 (漏電遮断器の動作時間) は約 $60\sim 70\text{ ms}$ とあまり大きくないので、受攻期の影響で、即死の原因となる心室細動が起こりにくくなる可能性もある²⁾。このため、同じ条件下の通電試験 (模擬漏電) を 50 回以上行なうこととした。通電は 5 分以上の間隔をおいて行なう。また、比較のため漏電遮断器のない場合についても実験した。

通電のときには、電極 A から流出する故障電流 I_A の波形をデジタルオシロスコープとプロッタによって記録し、その値と持続時間を測定した。電流波形の記録は、多くの場合、変流器 (CT) を介して行なったが、 $R_{B1}=100\text{ }\Omega$ の場合には、より直接的に、 $2\text{ }\Omega$ の抵抗を挿入してその両端電圧から電流を観測することができた。

4.2 水槽及びウサギ

水槽及びウサギのセットの方法は、電極の配置を除き、既に発表した実験と同じである⁴⁾。

水槽はアクリル壁の直方体の容器で、内側の幅 97 cm , 接地極の銅板から対向する壁までの長さ 175 cm である。水槽の水は、 3.5% の塩水 (ほぼ海水の濃度に相当) と水道水との二つの場合がある。水深はウサギを入れたとき約 49 cm で、水温は 30°C に設定した。

ウサギは、実験前にバリカンで胴体及び体肢の毛を刈っておく。これに潜水ヘルメットをかぶせ、台に固定して水中に入れた。ウサギの位置は水槽の中央で水深の半分の深さになるようにした。また、ウサギには心電図検出用の電極と呼吸ピックアップを取り付け、ポリグラフで心電図と呼吸を観測、記録した。

5. 実験結果と検討

Table 2 に実験条件及び結果の概要を示す。実験は、

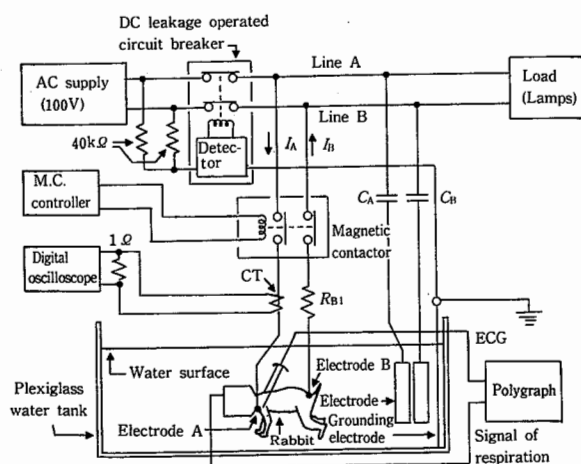


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup for the tests of protection.

実験方法の概要

Table 2 Experiment on protection against electric shock by d. c. leakage operated circuit breaker

電撃死の防止効果に関する実験の摘要 (設定条件と結果)

Type of ground fault	Both lines fault underwater				
Kind of water	3.5 % salt water			Tap water	
Leakage Resistance to electrode R_{BI} (Ω)	100	10	0	10	0
Number of rabbits	3	2	5	2	4
Weight (kg)	3.50	2.69	3.19	3.47	3.02
Conductivity of water (S/m)	5.87	5.83	6.03	0.025	0.021
(Range)	(5.6–6.0)		(5.9–6.1)	(0.024–0.026)	(0.016–0.026)
Temperature of water ($^{\circ}\text{C}$)	30.0	30*1	30.5	30.3	30.2
Number of tests	3	2	6	2	4
Number of shocks	64	50	52	10	51
Fault current I_A (A)	0.895	8.40	34.6	0.133	0.108
(s. d.)	(0.016)	(0.11)	(2.5)	(0.010)	(0.013)
Shock duration (ms)	69.2	72.8	61.8	71.1	72.2
(s. d.)	(8.4)	(4.0)	(10.0)	(9.2)	(13.5)
Number of instant death	0	0	(2*2)	(1*2)	0

* 1 Estimated value. Others are shown in average.

* 2 Extremely slow heart beat and respiration were observed, not killed.

五つの条件に分けられるが、水道水・10 Ω の条件は、故障電流にあまり差が無いので、水道水・0 Ω の場合と同一条件とみなすこともできる。

5.1 故障電流 I_A

電極Aから流出する故障電流 I_A は、塩水の場合、地絡抵抗 R_{BI} の値によって、約 0.9~35 A と大きく変化した。水道水の場合は、電極 A—B 間の水中の経路の抵抗が大きいので、 $R_{BI}=0$ でも 10 Ω でも大きい変化はない。

故障電流 I_A は、実験条件では、その大部分が電極 B を経て B 線に戻ると考えてよい。電極 B 以外に流れる電流 I_c と I_A との比 $|I_c/I_A|$ は、塩水・100 Ω のときに最大となるが、その値は Fig. 1 のモデルから約 10% 以下と推定される。また、水道水・10 Ω の場合に C_A 、 C_B を除去してみたが、これによる I_A の変化は認められなかった。

故障電流の振幅は時間とともに多少変動したことが多い(おもに増加が起こったが一部では減少した)。このため故障電流の値は、初期の 2 個と末期の 2 個の振

幅の平均を $\sqrt{2}$ で割って実効値に換算した値で代表させてある。時間による振幅の増加は、水道水の実験の最初の電撃に顕著に現われることが多かった。

5.2 電撃死の防止効果

5.2.1 通電のウサギへの影響(漏電遮断器のある場合)

塩水・100 Ω の条件では、3 匹のウサギについてそれぞれ 11 回、33 回、20 回の通電試験を行なったが、電撃による即死は 1 度も起こらなかった。また本条件では、通電時のウサギの反応(筋収縮のため体肢や胴体がピクンと動く)は小さく、見ていても分からないことが多かった。

塩水・10 Ω の条件でも、2 匹のウサギにそれぞれ 20 及び 30 回の通電試験を行なったが、電撃による即死は起こらなかった。

塩水・0 Ω の場合と水道水の場合には、それぞれ 2 回と 1 回、電撃後の心拍数・呼吸数がともに大きく減少し、かつある程度持続するという重篤な影響が観察された。以前の実験では、このような状態から、呼吸は停止し心電図は心室細動の波形に移行して死亡した例

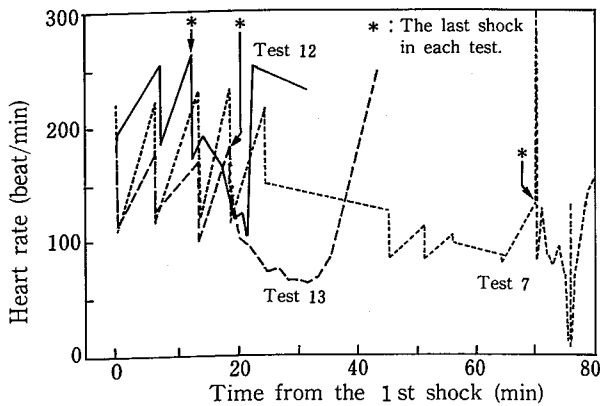


Fig. 5 Change of heart rate in the tests that caused serious effect (Both of slow heart beat and slow respiration).
心拍数の時間的推移 (「瀕死で重篤な影響あり」の場合)

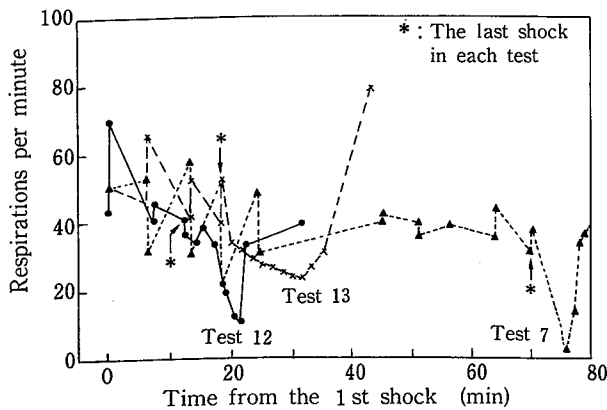


Fig. 6 Change of respiratory rate in the tests that caused serious effect (Both of heart beat and slow respiration).
呼吸数の時間的推移 (「瀕死で重篤な影響あり」の場合)

があったが、今回は、そのままで結果は確認していない。「このまま放置すれば死亡する」と思われたので、ウサギと固定台を水中より引き上げたところ症状は急速に回復した。しかし、いずれの結果にしても、即死の可能性は無視できないものと推測される。ただし、その頻度はあまり大きくない。

あわや即死という結果の生じた実験の心拍数と呼吸数の時間的推移をそれぞれ Fig. 5 及び Fig. 6 に示す。図では、大体において、急峻な変化の前後が電撃の前後に対応している。

図の実験12では、経過時間12分に最後の電撃（3回目）が加えられたが、その後心拍数・呼吸数ともに回

復せず逆に減少を続けた。このため、21分にはこのままでは死亡と判断し、それから50s以内に水中より引き上げた。実験13では、18分に4回目の電撃が加えられた後両指標の減少が続き、35分に水中より引き上げられた。実験7は、水道水・ 10Ω の場合であるが、経過時間70分に10回目の電撃が加えられ、77分に水中より引き上げられた。

全実験での、通電前の心拍数及び呼吸数の平均は、それぞれ207回/min、52.4回/minである。

Fig. 7, Fig. 8 は、即死の危険の生じなかった実験における心拍数、呼吸数の時間的推移を示したものであり、実線は塩水・ 0Ω の場合、点線は水道水・ 0Ω の場合を示す。電撃後心拍数がいったん大きく減少する傾向が、水道水の場合に特に顕著に見られる。しかし、電撃の繰り返しが約10回程度（60分前後）になると、この変化は著しく減少してしまった。比較的に平穏な

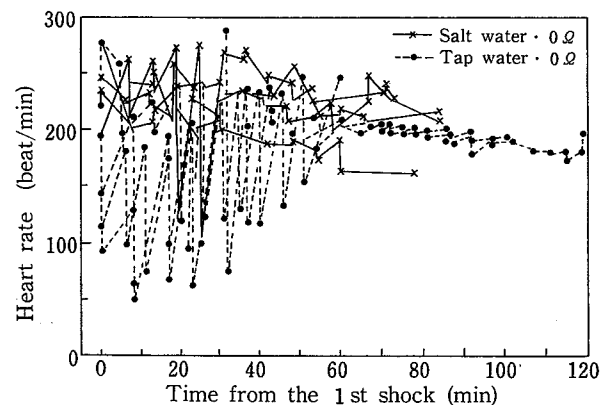


Fig. 7 Change of heart rate in the tests that did not cause instant death.
心拍数の時間的推移 (「即死無し」の場合)

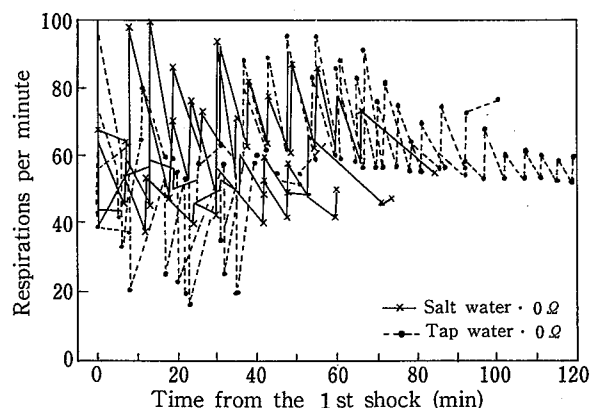


Fig. 8 Change of respiratory rate in the tests that did not cause instant death.
呼吸数の時間的推移 (「即死無し」の場合)

電撃直前の心拍数も時間とともにやや減少する傾向が見られる。

通電試験においては、一般に、ウサギは瞬時的なけいれんを起こし、ビクンと下肢や胴体が動いたり、ピョンと下肢が伸びたりするのが観察された。また、少数であるが、電撃後数sの間呼吸が停止したこともあった。

心電図の観測では、心室細動波形の無いこと、及びR波の存在とその周期に注意したが、電撃直後の心電図には、筋電信号が混入するなどして、R波のあることが確認できなかったことも多い。全体的に、心室細動波形は観測されなかったが、その他の異常波形は時々発生した。

5.2.2 以前の報告との比較・考察

以前に行った実験によれば、陸上で、通電部位が上肢一下肢、持続時間が100msのときのウサギの心室細動電流は、平均770mAとなり、また心室細動の発生確率が0.5%となる電流（不発生の限界）の推定値は240mAとなった^{2),6)}。しかし、今回の実験7（水道水）では、故障電流が上の約半分の120mAであわや即死という結果（徐脈と呼吸数減少の併発・持続）が生じている。

このような結果の生じた理由は明らかではないが、今回は、陸上の場合に比べ通電部位や環境の点でより厳しい条件にあり、その影響の大きいことが推測される。ウサギでは潜水させるだけで呼吸数が20%程度も減少してしまうほどである⁴⁾。

既に報告したように、水中電撃の強さを測る尺度と

しては、電流または電流密度よりも、水中の電界のほうがより適切である⁵⁾。Table 3 に示した平均電界は、推定した電極間電圧を電極間距離で割った値で、電界の非常に大まかな目安であるが、ウサギに重篤な影響の生じた塩水・0Ω及び水道水の場合に特に大きい値となっており、ウサギに対する影響との相関が明白に現われている。

5.2.3 漏電遮断器の無い場合の通電結果

Table 4 の右の欄に、(○ s shock) と記入されている6匹のウサギについては、漏電遮断器作動の条件下で試験を終え即死の無いことを確認した後に、遮断器無し（不作動）の条件下で水中電撃実験を行なった。ウサギや電極の配置・印加電圧等の試験条件は作動の場合と同じで、ただ電撃の持続時間だけが異なる。持続時間は、1, 3, 及び7.2sの場合があるが、実際にはもっと長くなることが多いと思われる。

試験の結果は、実験16のウサギ11F-1を除き、すべて1回目の電撃で心室細動が発生し即死した。11F-1は、2回目の電撃で心室細動が発生し即死した。1回目では心室細動は発生しなかったが、心拍・呼吸の異常が見られた（おもに重篤な徐脈・徐呼吸とリズムの不安定）。しかし、心拍・呼吸は、電撃後130sくらいから150sくらいには安定し、即死の可能性もほとんどなくなった。1回目の10分後に2回目の電撃を加えた。

この条件の結果と対比すれば、漏電遮断器が電撃死の防止に大きい効果を有することは明らかである。

5.2.4 実験後のウサギの経過

漏電遮断器が作動し即死は防止されても、実験終了

Table 3 Comparison of mean intensity of electric field between electrodes with the protection effect in the experiment.

実験の各条件における電極間の平均電界と防止効果

Kind of water	3.5 % salt water			Tap water	
Leakage Resistance R_{BI} (Ω)	100	10	0	10	0
Voltage between electrodes V_{AB} (V)*1	10.5	16.0	100	98.7	100
Mean intensity of electric field E_m (V/m)*2	33	50	310	306	310
Observed protection effect	○	○	△	△	

* 1 Estimated from $V_{AB}=100 - R_{BI} I_A$

* 2 $E_m = V_{AB}/d$, $d = 0.323$ m (Average distance between electrodes)

Table 4 The post-experimental courses on animals
実験後のウサギの経過

Experimental conditions	Test No. & date	Rabbit No.	Number of shocks	Aftereffect*1	Survived period
Salt water 10 Ω	1 2/17	1M-1	20	—	(3 s shock*2)
	2 3/10	2M-1	30	Observed	1 day
Salt water 100 Ω	3 3/18	3M-1	11	Not observed	Survived
	4 4/10	4M-1	33	Not observed	Survived
	5 4/14	5M-1	20	Not observed	Survived
Salt water 0 Ω	12 6/ 1	9M-1	3	Observed	Survived
	13 6/ 4	6M-3	4	Observed	4 days
	14 6/ 8	9M-2	10	—	(3 s shock*2)
	15 8/18	10F-1	12	—	(3 s shock*2)
	16 8/24	11F-1	12	—	(1 s shock*2)
	17 8/31	12F-1	11	—	(1 s shock*2)
Tap water 10 Ω	6 4/17	3M-2	0	—	(7.2 s shock*2)
	7 4/21	4M-2	10	Observed	4 days
Tap water 0 Ω	8 4/24	5M-2	24	Observed	The day of test
	9 5/14	7M-1	10	Observed	4 days
	10 5/19	6M-2	2	Not observed	Survived
	11 5/22	8M-1	15	Observed	The day of test

* 1 Paralysis of hind half-length or hind legs.

* 2 Instant death from electric shock after the test, on the condition of no protection.

後のウサギの経過はあまりよくなかった。Table 4 に、各実験における通電の度数と、その後のウサギの経過の要点を示す。

塩水・100 Ω の場合には、33 回も通電を行なったウサギもあったが、下半身まひの後遺症もなく、また、ある程度の時間を経ての死亡（遷延死）もなかった。

その他の場合には、下半身（あるいは下肢）のまひが残ったことが多い。また、しばしば、実験後の大腿内側に固定台による擦り傷が認められた。実験の範囲では、下半身まひの生じたウサギはある程度の時間を経て死亡（遷延死）する結果となった。

また、Table 4 から、通電試験の回数が少ないほど、生存の確認された日数の多いことが見てとれる。例えば、通電が 2 回の実験 10（水道水・0 Ω ）では、下半身のまひもなく、これによる遷延死も起こらなかった。通電 3 回の実験 12（塩水・0 Ω ）では、下半身のまひはあったが、長く生存し、通電 10 回（水道水・10 及び 0 Ω ）では 4 日生存した。

したがって、電撃を繰り返し加えたことがこのような影響を生じたものと考えられるが、実際には、繰り返して電撃を受けることは非常にまれなことと考えら

れる。

6. むすび

潜水作業における電撃災害の一つの防止方法として、中性点高抵抗接地方式の電路に直流検出型の漏電遮断器を設置した地絡保護システムを考え、その電撃死の防止効果について検討した。動作時間内に短い電撃の起こることは漏電遮断器に共通の問題であり、検討結果の多くは、他の型式の漏電遮断器についてもほとんど同様に成り立つものである。

検討によればこのシステムは、水中における地絡故障の多くの場合に電撃死を防止することができ、水中における電気使用の安全性を大きく向上させるものである。しかし、これだけで、どんな場合でも電撃死が防止できるというわけではない。

検討の結果を整理すると以下ようになる。

- 1) 水中の 1 線地絡による電撃死は、想定した地絡保護システムによって防止できると推定される。
- 2) 同様に、2 線（または 3 線）地絡の場合でも、
 - (1) 各線の地絡故障の発生に時間差のある場合
 - (2) 故障の進行（絶縁抵抗の減少）が緩慢な場合

(3) 故障が金属製器体等（導体スクリーン）の内側で生じた場合

(4) 人間が故障箇所の周囲に出来る電撃危険領域の外に位置する場合

などにおいては、電撃死を防止できると推定される。

3) 2線地絡が起こり、かつ人間が故障箇所の周辺の電撃危険領域内に居る場合には、条件に応じてある程度の頻度で電撃死の起こることがある。実験の範囲では、塩水中のウサギで52回中2回、即死につながるもののある重篤な異常が発生した。

4) 上の条件において、漏電遮断器が無い場合は、ウサギは即死した。

高抵抗接地と漏電遮断器のような種類の電撃防止対策は、その効果が局所的でなく全体に及び、電路のどこで地絡が生じてもこれに対処できるという特長がある。このため、絶縁の劣化が知られないまま放置されるようなこともない。二重絶縁などの局所的な対策に欠陥の生じたとき等を考えると、この種の防止対策はぜひ必要と考えられる。

(昭和63年4月9日受理)

参考文献

- 1) 本山建雄, 山野英記: “対地抵抗監視による水中漏電の検出”, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-86, 147-158, (1986)
- 2) 山野英記: “電撃危険とその影響の発生限界”, 静電気学会誌, 9, (6), 376-383, (1985)
- 3) IEC: “Effects of Current Passing through the Human Body”, IEC Publication 479-1, (1984)
- 4) 山野英記, 本山建雄: “水中のウサギが窒息を起こす電撃の強さ—水及び生体配置による発生限界の変化—”, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-85, 131-139, (1985)
- 5) 山野英記, 本山建雄, 田島泰幸: “水中において下肢強直を起こす電撃の強さと許容限界”, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-30-1, (1981)
- 6) 山野英記: “動物を用いた感電危険の解明”, 全国産業安全衛生大会産業安全研究発表集 '80, pp. 84-85, 中央労働災害防止協会 (1980)