

# 災害調査報告書

## 竹林伐採作業において発生した 感電災害



**JNIOSH**

独立行政法人

労働安全衛生総合研究所

## 1. はじめに

竹林伐採作業中に発生した死亡事故について、感電災害の可能性の観点から検討した調査結果を報告する。

### 1. 1 災害の概要

#### 1. 1. 1～1. 1. 3 略

#### 1. 1. 4 発生概要

竹林伐採作業（作業員 2 名で送電線に支障となる竹林の伐採を行うもの）において、被災者は鋸で青竹（高さ 15.6 メートル）を伐採する作業をしていたが、被災者が気を失って倒れているのを同僚作業者が発見し、病院に救急搬送されたが、13 時 00 分に死亡が確認された。当初、死因は不明であったが、司法解剖結果から感電死の疑いが強まり、再調査を実施している。

なお被災者が伐採しようとしていた青竹に近接して上空には送電線（154,000 V）が張られていた。

#### 1. 1. 5 協力の内容

被災者が伐採しようとしていた青竹の高さは 15.6m であり、送電線の地上高は地上から 16 メートル程度と低い場所もあることから、青竹と送電線との接触等により被災者が感電死した可能性について検討する。

#### 1. 1. 6 略

## 2. 調査の項目と経過

### 2. 1 調査項目

被災者は、鋸で青竹（高さ 15.6 メートル）を伐採する作業をしていたが、上空の送電線（154,000 V）は、地上から 16 メートル程度の場所もあり、青竹の接触等により感電死した可能性について検討する。

### 2. 2 調査の経過

#### 2. 2. 1 現場調査

災害発生現場において送電線の高さ測定、青竹との接触可能性等について、現場調査を行った。写真 1～3 には送電線と青竹を模擬している絶縁棒との状況を示す。絶縁棒が送電線と極めて接近していることが確認できた。



154kV 送電線

青竹の状況  
(絶縁棒で  
模擬)

写真1 送電線と青竹(模擬)の状況



青竹の状況(絶縁棒  
で模擬)

写真2 被災者が伐採しようとしていた青竹(絶縁棒で模擬)の状況





写真3 被災者が伐採しようとしていた青竹（絶縁棒で模擬）と作業場所の状況

まず、写真2、3のように被災者が被災時に作業を行っていた場所に青竹に見立てた長さ15.6mの絶縁棒を鉛直に立てて、その上部にある送電線との距離を目視によって測定した。目測による観測では50cm程度の間隔と見積もられた。



写真4 送電線と絶縁棒との離隔の状況

また、災害調査時に竹林の土壌の状況を見聞した結果、写真5のように湿った状況にあった。関係者の話によると、前日に雨が降ったとのことであった。竹林の土壌は雨で濡れた状態であったと推定される。



写真 5 災害調査時に撮影した竹林の土壌の状況

### 2. 2. 2 送電線の回路など

送電線の回路は Y 結線であって、中性点接地方式を用いた抵抗接地であった。使用されていたアルミニウム製送電線（直径：18.2mm）は、被覆のない 3 層の撚り線によって構成されていた。抵抗接地の抵抗は 445Ω が 3 箇所、890Ω が 2 箇所、907Ω が 1 箇所と抵抗が分散して配置されている。基本的な送電線の回路を図 1 に示す。線間電圧は 154kV であり、相電圧は  $154[\text{kV}]/\sqrt{3}=88.9\text{kV}$ 、対地電圧は 88.9kV である。

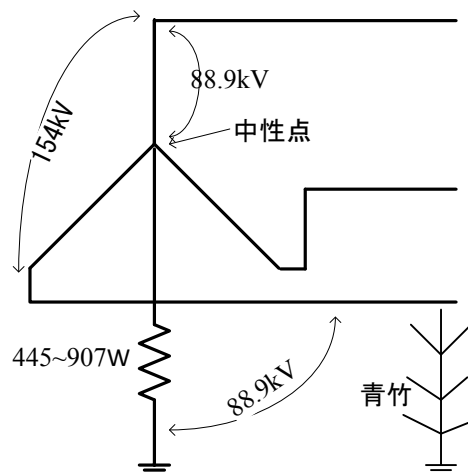


図 1 送電系統の簡易な回路図

送電線が正常な場合には中性点は 0V である。もし、送電線が断線などで地面に接触して地絡が発生すると、中性点の電圧は上昇して最大 88.9kV になる。今回の災害発生時においては、中性点が 8,000V 以上となったといった状況は、地絡の監視装置には記録されていなかったことが報告されている。青竹の抵抗（2.2.4 で後述）はメガオームオーダーと推定されることから、抵抗接地の接地抵抗に比較して青竹の抵抗は 100 倍以上大きいこととなる。仮に青竹と送電線とが放電や接触によって導通しても（2.2.3 で後述）、中性点の電圧は高々数百 V の上昇と見積もられることから、今回は地絡を検出する監視装置には記録が残らなかったものと推定される。

### 2. 2. 3 送電線と青竹での放電の可能性

災害発生時における送電線と青竹間の最小の距離については、現在、関係機関で検討が進められている段階であるが、高電圧工学の観点から送電線と青竹間での放電の可能性について検

討する。

金属の板が平行に置かれている間に電圧が印加されているときに、これらの間に発生する平等電場において絶縁破壊を起こす電界強度は、空気中においては  $30\text{kV/cm}$  となる。今回の災害発生現場での送電線の対地電圧は約  $89\text{kV}$  であることから、平等電場では絶縁破壊するための距離は約  $3\text{cm}$  以下となる。

ただし今回の災害発生現場で送電線と青竹との間で仮に放電が発生する場合には、不平等電場における火花放電現象となる。

直径  $18.2\text{mm}$  の送電線路が裸電線で、青竹を接地された金属導体と仮定する。高電圧工学（高電圧工学，河村達男ほか著，電気学会，p.34）によると，針対平板電極のような不平等電場で火花放電が発生する電界強度は『約  $5\text{kV/cm}$ 』といわれている。また不平等電場の場合では， $5\text{kV/cm}$  以下の電界強度でも火花放電が起こる可能性があるといわれている。仮に裸電線の送電線路と接地金属導体のポール間の電界が不平等電場であり，火花放電が起こる電界強度が  $5\text{kV/cm}$  とする。送電線路の対地電圧の実効値が  $88.9\text{kV}$ ，ピーク値（ $=88.9\text{kV} \times \sqrt{2}$ ）が  $125.7\text{kV}$  であることから，ピーク値に対しては  $125.7\text{kV}/5\text{kV}=25.1\text{cm}$  となり，送電線路とポール間の距離が約  $25\text{cm}$  以内であれば火花放電が発生する可能性はあると考えられる。

なお，災害調査の日における送電線の高さは災害発生が発生したときの送電線の地上からの高さよりも  $15\text{cm}$  高い。これはアルミニウム線の線膨張率が要因である。この因子も考慮して，災害発生時における送電線と青竹との最小の離隔距離を今後推定することとなる。

#### 2. 2. 4 青竹の抵抗と感電危険性

災害発生時の送電線には交流  $50\text{Hz}$  の商用周波数が使用されていたが，周波数が低いことから直流に対する青竹の抵抗を測定しても， $50\text{Hz}$  との差異は無視できる。そのため，本件での青竹の測定にあたっては直流電源を用いた。

災害発生現場で伐採して数日が経過した青竹を当所で測定した結果を表 1 に示す。

測定は，気温  $17.4$  度，湿度  $43.0\%$  の条件下で，直流高電圧電源を使用した。測定のために青竹（写真 6）の両端に幅  $5\text{cm}$  の銅テープを巻き付けて，これらの間に直流電圧を印加し，電圧印加後 1 分前後における電流を測定した。このときの銅テープ間の距離は約  $80\text{cm}$  であった。

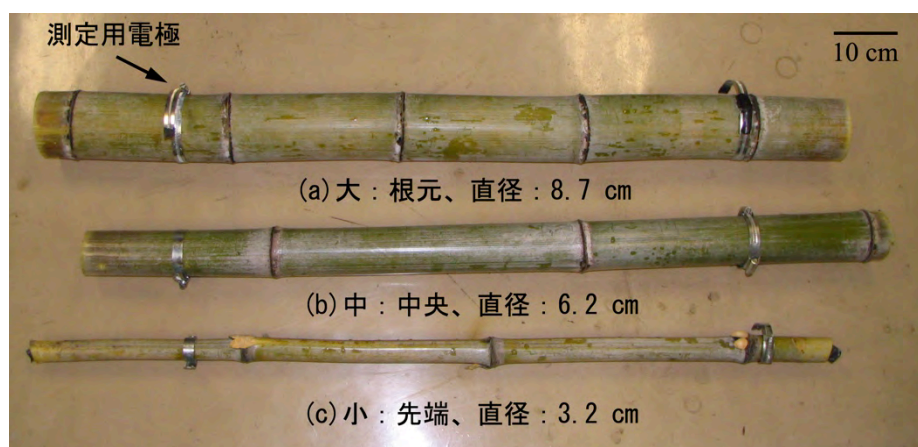


写真 6 抵抗測定に用いた青竹

表 1 青竹の抵抗



## (1)根本部分

| 印加<br>電圧<br>(kV) | 電流<br>(mA) | 0.8m分の抵<br>抗 (MΩ) | 15.6m分<br>の抵抗 (M<br>Ω) | 88.9kV での流れ<br>る電流 (mA) |
|------------------|------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.5              | 1.5        | 0.3               | 6.5                    | 13.7                    |
| 1.0              | 2.8        | 0.4               | 7.0                    | 12.8                    |
| 1.5              | 7.0        | 0.2               | 4.2                    | 21.3                    |

## (2)中央部分

| 印加<br>電圧<br>(kV) | 電流<br>(mA) | 0.8m分の抵<br>抗 (MΩ) | 15.6m分<br>の抵抗 (M<br>Ω) | 88.9kV での流れ<br>る電流 (mA) |
|------------------|------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.5              | 1.0        | 0.5               | 9.8                    | 9.1                     |
| 1.0              | 3.9        | 0.3               | 5.0                    | 17.8                    |
| 1.5              | 6.5        | 0.2               | 4.5                    | 19.8                    |

## (3)先端部分

| 印加<br>電圧<br>(kV) | 電流<br>(mA) | 0.8m分の抵<br>抗 (MΩ) | 15.6m分<br>の抵抗 (M<br>Ω) | 88.9kV での流れ<br>る電流 (mA) |
|------------------|------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.5              | 0.2        | 2.8               | 54.2                   | 1.6                     |
| 1.0              | 0.3        | 3.1               | 60.9                   | 1.5                     |
| 2.0              | 1.3        | 1.5               | 30.0                   | 3.0                     |
| 3.0              | 2.1        | 1.4               | 27.9                   | 3.2                     |
| 4.0              | 3.3        | 1.2               | 24.0                   | 3.7                     |
| 5.0              | 4.5        | 1.1               | 21.8                   | 4.1                     |
| 6.0              | 6.8        | 0.9               | 17.2                   | 5.2                     |

表1のように、青竹に流れる電流は印加電圧に依存し、印加電圧が高くなると流れる電流も大きくなる傾向が示されている。流れる電流は印加時間にも依存しており、時間の経過と共に徐々に増大する傾向が見られた。青竹の先端部分は根本や中央部分より細いために、先端部分の抵抗値は、根本及び中央部分に比較して大きかった。

同様の測定を、12月21日に次の条件下で再度を行った。見かけの抵抗測定 ( $R$ ) は、写真7のように青竹を絶縁支持台 (PTFE) の上に載せ、高電圧電源 (写真8, TREK Model: PM-04015) を使用し、電極に直流電圧 1kV を印加して、流れる電流  $I$  を測定したものである ( $R = V/I$ )。抵抗測定値は、一般に電圧印加時間に依存することから、ここでは、便宜上、電圧印加1分経過後 (1分値) の電流値を採用して抵抗値とした。測定環境は気温  $21 \pm 3$  度、湿度  $45 \pm 5$  %である。



写真7 抵抗測定時の青竹の設置状況



写真8 高電圧電源

抵抗測定結果と推定値をまとめて、表2に示す。

表2 青竹各部における見かけの抵抗、推定抵抗、通電電流値

| 青竹   | 0.7m分の測定抵抗(M $\Omega$ ) | 実青竹(15.6m)の推定抵抗(M $\Omega$ ) | 88.9kV*での流れる電流(mA) |
|------|-------------------------|------------------------------|--------------------|
| 根元部分 | 0.524                   | 8.2                          | 10.9               |
| 中央部分 | 0.943                   | 14.7                         | 6.0                |
| 先端部分 | 4.545                   | 70.9                         | 1.3                |

\*: 実効値

表2の青竹の抵抗値は表1に比較して大きくなっている。その一因としては、青竹を採取してから測定までの期間が、表1では数日、表2では約3週間が経過しており、その間に青竹の水分が蒸発したことが考えられる。

以上の測定結果から、今回の青竹の推定抵抗値は最小で4.2M $\Omega$ 、最大で70.9M $\Omega$ であった。人体が青竹に触ると、そのときの簡易な電気回路は図2と考えられる。青竹の抵抗が最小の抵抗値である4.2M $\Omega$ のとき被災者が地面から1mの高さの部分の青竹を握ったとする。仮に送電線と青竹で放電が発生したとして、放電路の抵抗は青竹の抵抗に比較して小さいことから、送電線と青竹との間の放電や接触による抵抗を無視すると、印加電圧88.9kVと青竹の抵抗3.9M $\Omega$ (14.6m分の抵抗=4.2[M $\Omega$ ]・14.6[m]/15.6[m])を用いて、人体電流は約22mAとなる。この値は、離脱電流(約



10mA，図 3 参照）を超えており，自力では充電部分から手を引き離すことができない電流である。ただし，死亡に至る心室細動を引き起こすレベルではない。

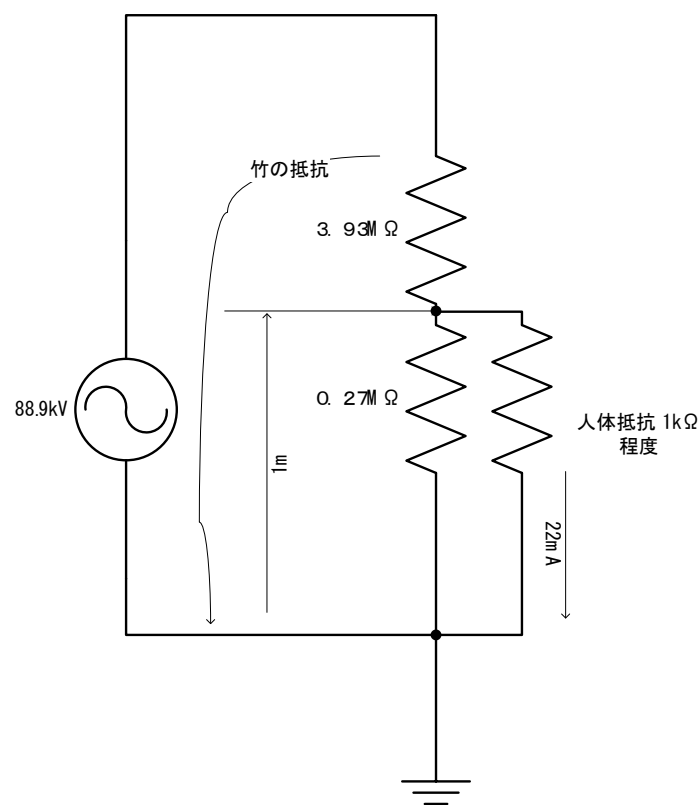


図 2 感電時の簡易な等価回路

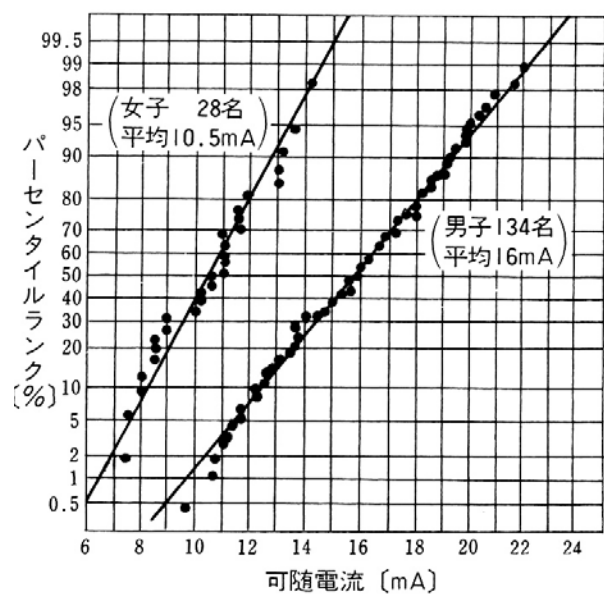


図 3 交流（60Hz）による離脱電流（可随電流）

青竹の皮が一部付いているほどに若いことから（写真 9），青竹は水分を多く含んでいたと考えられる。仮に 88.9kV が 15.6m の青竹に印加されるとすると，1m あたりに印加される電圧は約 5.7kV となる。青竹の抵抗が印加電圧の上昇と共に低下する傾向であった今回の実験結果を考慮すると，実験的に抵抗を測定したときの印加電圧である 1kV 程度より高い電圧を印加すれば，青竹の抵抗は表 1，2 の値より下がると推定される。



写真9 被災者が伐採しようとしていた青竹

よって、災害発生時に、青竹と送電線とが導通したと仮定した場合には、被災者に心室細動を引き起こすレベルである 40mA 以上（図4 参照）の人体電流が流れた可能性はあったものと推定される。

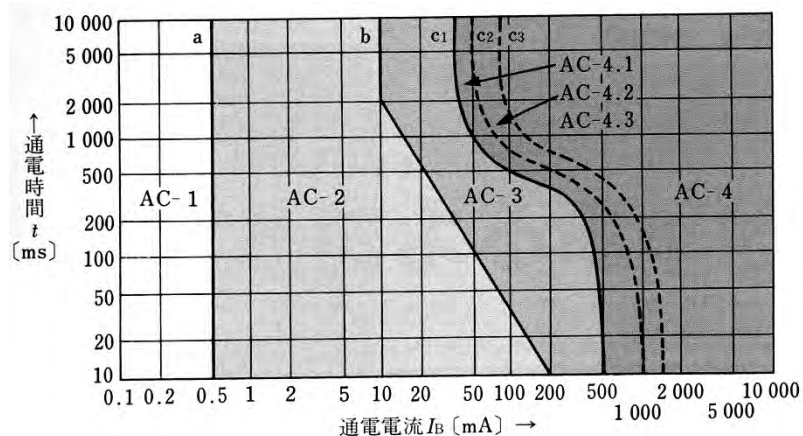


図4 人体への通电時間，通电電流が人体に及ぼす影響（15Hz から 100Hz）

（注：AC-4-1, 4-2, 4-3 はそれぞれ心室細動の確率が約 5%まで増大，約 50%まで増大，50%を超えて増大の領域を表す。出典：国際電気標準会議 IEC 60479-1）

## 2. 2. 5 災害発生の機序の推定

以上の結果を踏まえると、災害発生の機序としては次の可能性が推定される。

災害発生日に被災者と同僚の2名で送電線に接近している竹林の伐採作業を開始した。送電線のほぼ真下に位置して斜面に生えていた青竹が送電線に接触する可能性があったことから、被災者はその青竹の伐採を柄がプラスチック製のノコギリで切断を行っていた。当該青竹を右手でつかんでいたときに、送電線と当該青竹の先端との距離が約 25cm 以下となって、火花放電の発生、あるいは接触が発生した。火花放電等に伴って青竹に電流が流れると共に、青竹の抵抗に比較して抵抗の小さい人体に殆どの電流が流れたと推定される。

このときの送電線と大地間の抵抗は、人体及び送電線と青竹との間の抵抗が青竹の抵抗に比較して小さいため、青竹の抵抗によって決定される。仮に青竹の抵抗が  $1\text{M}\Omega$ （実験用に提供された青竹の当研究所による抵抗測定の結果からは考えられるオーダ）とすると、人体には  $90\text{mA}$  程度の電流が流れた可能性がある。なお作業者は地下足袋に革手袋であって、感電災害防止を目的とした保護具を着用していなかったため、人体部分での抵抗は  $1\text{k}\Omega$  としている。

人体に流れた電流を  $90\text{mA}$ 、流れた時間を  $1$  秒とし、その電流の感電危険性を図 4 に基づいて判断すると、心室細動の発生する可能性は約  $50\%$  までと考えられる。

従って、送電線との青竹との間で火花放電や接触が発生して青竹から人体に電流が流れて感電死亡したと推定することは可能と考えられる。

なお、被災者の右手には電撃に伴うと考えられるヤケドの痕が見られることから、 $154\text{kV}$  の送電線から青竹への放電やこれらの接触による感電災害である可能性は高いものと判断される。感電時に被災者へ電流が流入した箇所は右手の親指・人差し指と推定されるが、電流の流出の箇所については明確でない。被災者の地下足袋全体が地面と接触して、電流が足全体から流出したため、電流密度が小さいことが要因と考えられる。

## 2. 2. 6 静電誘導電流の計算と感電危険性

静電誘導によって流れる電流を検討した。検討した電流は実際に想定される電流に比較して過大な電流が人体に流れるモデルである。すなわち、送電線と青竹とが平行に長さ  $l=15\text{m}$  にわたって  $d=50\text{cm}$  の間隔で平行に配置されているとし、これらの直径を  $2d=40\text{mm}$  とした。

これらの間での静電容量  $C$  は、式(1)で与えられる。

$$C = \pi \epsilon_0 / \ln[(d-a)/a] \times l = 3.14 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 15 / \ln[(0.5-0.02)/0.02] \approx 1.3122 \times 10^{-10} [\text{F}] \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$

よって、リアクタンス  $X_c$  は

$$X_c = 1 / (2 \times 50 \times 1.3 \times 10^{-10}) \approx 24\text{M}\Omega \quad (2)$$

よって、静電誘導による電流  $i_c$  は、青竹の抵抗を無視すると、式(3)となる。

$$i_c = 89000 / (24 \times 10^6) = 3.7\text{mA} \quad (3)$$

$3.7\text{mA}$  は、死亡に至ることがなく、自分の意思で充電部より手を引き離すことができるレベルの電流である。この電流は実際の送電線と青竹との間の静電容量を過大に見積もっており、実際には  $3.7\text{mA}$  に比較して小さな誘導電流と推定される。

以上のことから、単に静電誘導現象によって青竹に流れた電流が感電死亡を至らしめる可能性は無いと判断される。

## 2. 2. 7 今後の検討課題

2. 2. 6 の項で感電災害が発生する可能性を推定したが、この可能性を裏付けるため、以下の項目について今後検討する必要がある。

- (1) 送電線と災害に関与した青竹との最小の離隔距離の確認（含む接触の可能性）
- (2) 青竹の抵抗について、災害に関与したと同様の印加電圧にて測定するか、青竹全体の抵抗が推定可能な長さの青竹を用いて測定
- (3) 青竹に印加された電圧の確認

## 2. 2. 8 同種災害防止対策

青竹はメグオーダ程度の抵抗であって、金属ほどの導電性はないものの、絶縁性は高くない。仮に青竹の抵抗を  $1\text{M}\Omega$ 、送電線の対地電圧を  $88.9\text{kV}$  とし、送電線と青竹との間で絶縁破壊が起こって火花放電が発生すると、対地電圧  $88.9\text{kV}$  と  $1\text{M}\Omega$  とから、 $90\text{mA}$

程度の電流が青竹に流れる。この電流が人体に流れると心室細動を引き起こす可能性がある。

周知のように、クレーン作業で送配電線に接近あるいは接触しての感電災害は良く知られているところであるが、本件災害は、クレーンを用いた活線近接作業と同様に次の対策が必要と考えられる。

(1) 送配電線類に対して安全な離隔距離を保つこと。

電路の電圧が 154kV であれば、4m の離隔距離とする（基発第 759 号，昭和 50 年 12 月 17 日）。

離隔距離が確保できない場合には、停電作業とする（安衛則第 339 条）。停電作業が困難であれば、接近限界距離（154kV であれば 1.4m）を保った上で特別高圧用の活線作業用器具を使用する（安衛則第 344 条第 1 項第 1 号），あるいは特別高圧用の活性作業装置を使用すること（安衛則第 344 条第 1 項第 2 号）。対地電圧が 88.9kV の特別高圧であることから、活線作業用器具は電力会社、電気工事会社において設計製作を必要とする特殊なものになると想定される。例えば、耐圧が 90kV 以上の碍子をベースとして、それに作業用のノコギリや竹を一時的に把持するためのジグを備えたようなものが考えられる。

(2) 作業指揮をとることができる監視責任者を配置すること。

(3) 事前に電力会社等送配電線類の所有者と作業の日程，方法，防護措置，監視の方法，送配電線類の所有者の立会い等について，十分打ち合わせするように努めること。

(4) 関係作業員に対し，感電危険性と作業標準を周知徹底させること