

富士山測候所の雷対策調査と対策の提案

安本勝¹、佐々木一哉¹、土器屋由紀子²

1. 東京大学、2. NPO 法人富士山測候所を活用する会

1. はじめに

富士山測候所(以下、測候所)の落雷頻度は高く、庁舎外に設備する機器は雷対策が必要である。「東アジア越境オキシダント監視システム構築に関する研究」の一環として測候所の電源供給安定性を確保するため、その構成要素として太陽電池及び風力発電を検討している。当初、この太陽電池及び風力発電を導入する場合の雷対策を検討し提案する予定であった。しかし、そのみの雷対策だけでは十分な対策ができないため、測候所全体の雷対策も視野に入れて考えることになった。

調査は、落雷対策を念頭に置き電気設備関連を中心に実施した。8月17-18日には測候所の現地調査も行った。調査方法は、現場測定(接続状態、電源電圧、および接地線電流)・視察、電気設備図面調査、電気設備状態の聞き取り、過去の落雷被害の状況調査等で行った。その内容と本来あるべき理想的な接地・電源設備構成とを比較し、問題点を明らかにするようにした。

本報告は、その結果明らかになった測候所が抱える雷対策上の問題を明らかにし、それを解決するための現実的な対策を提案する。

2. 雷対策・電気関連設備の調査

2-1 理想的な接地・電気設備と現実の問題

もし測候所が理想的なファラディゲージになっていれば、被雷しても影響ない。電気導体で閉じた構造を持つ飛行機や自動車は、被雷しても中にいる人には安全であることによる理由である。電気導体の抵抗率が $0\Omega/\text{cm}$ でないため、完全なファラディゲージではないが、それでも電気導体で包み閉じた構造にすることで内部機器のトラブル抑制も含め大きな効果が得られる。

一方、仮に測候所を電気導体で覆うことができたとしても、測候所の運用を考えると外部と出入りする電源や観測機器類のケーブル類がある。これがファラディゲージ構成を破ることになる場合がある。外部とケーブルの出入りがある場合、外部観測機器とケーブルも含め電気導体で閉じた空間にしなければならない。このことが一般的に理解されていないことに加えて、導入個所でこの状態を確保し難くなっているため、ファラディゲージ構成の実現を難しくしている。

別の要因として、測候所内電源供給のための高圧電源を引き込み個所がある。変圧器で三相6600Vを三相200Vに変換しているが、コモンモード間での静電的なサージ移行電圧、またノルマルモードでの電磁的な結合によるサージ電圧の移行があり、ファラディゲージの破れになる。

また、観測機器等に用いるケーブル接地線は、閉じた構造にして接続されていたとしても十分な電流容量が無い場合は、落雷電流による電圧降下のため、サージ電圧は内部に侵入することになる。

2-2 富士山頂の雷の特徴

雷対策には富士山頂での落雷の特徴を反映させた対策が必要である。100kA以上の雷電流の累積頻度は10%以下である。測候所でも十kA台の波高電流を考慮する必要がある。雷電流の立上時間は $\sim 10\mu\text{s}$ 、立下時間は数十 $\mu\text{s}\sim 10\text{ms}$ になると推測される。雷雲が山頂より高いとしても平地に比較し距離が近く、落雷電流の特徴は持続性のある雷雲が低い北陸地方の冬季雷の特徴に近いものと考えられるからである。帯電した雷雲中にある場合はさらに長い持続性のある放電現象になると考えられる。

2-3 接地状態と落雷電流路

測候所の接地は、①建物基礎、②引下線、及び③山麓からの接地で構成される。

①測候所は岩盤と永久凍土の上にあり、建物基礎の接地インピーダンスは小さくならず、大きい値を示すと予想される。

②電気導線は基礎鉄骨から $80\text{mm}^2\times 300\text{m}\times 2$ 本、 $80\text{mm}^2\times 400\text{m}\times 1$ 本の計3本が引き下げられている

が、岩盤上のため接地抵抗は小さくはできないと予想される。但し大地との静電容量的な結合は増加はするので速い成分に対するインピーダンス低減効果はあるものと予想される。一方、測候所の実効的被雷面積を大きくすることになり落雷頻度を高める結果になっている可能性も高い。

③山麓からの接地線は、山麓と配線の途中途中で接地が行われており、全体としては小さな接地抵抗になっている。

前二者の接地抵抗は大きく、測候所の接地抵抗は山麓からの接地の抵抗で決まっていると考えるとよい。こうした条件では、落雷電流の大半が山麓からの接地線を通り山麓側に流れる。このときの測候所の被雷電流の主な流路は、被雷個所から測候所内接地系統を通り山麓側の接地接続箇所につながる。

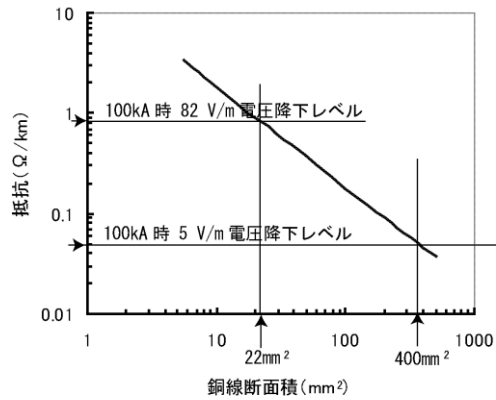


図1 ケーブルの銅線断面積による抵抗

2-4 ファラディゲージの破れ

雷のとき、測候所内においても髪の毛が逆立つ、また2号庁舎分電盤と水洗台部分との間に放電が見られたということであるが、いずれもファラディゲージの破れがあり、庁舎内に雷電位が侵入していることを示している。原因には以下の点があげられる。

(1) 雷が侵入しやすい線配線による接地構成 測候所各庁舎を横断する主接地線が山麓接地線までの被雷電流路を構成している。主接地線は22mm²の銅線である。十分小さなインピーダンスでないため、落雷電流による電圧降下が大きく、図1から 100kA の場合で 82V/m の電位差を作ることになる。またファラディゲージ構成でなく、接地系統は線配線が基本で、内部の方がインピーダンスが小さくなる構成であるため、雷が内部に侵入しやすくなっている。屋根等の金属製覆い、また基礎鉄骨とも電気的接続は十分ではない。

(2) 観測機器等のケーブル導入部 観測機器等のケーブルがそのまま測候所内に導入されている。ファラディゲージの破れであり、被雷したときそのケーブルを通して測候所内に雷電位を侵入させることになる。

(3) 部材間の接続状態 部材間の接続状態をテスターにより測定し、その結果を表1にまとめた。

接続状態は、導通測定ができる範囲に限られるため、金属露出部分がある箇所間の測定に限られた。被測定対象物の表面が導電性であることを確認した後、被測定対象物間の導通をテスターで確認した。

○ダクト避雷針の避雷導線はダクトに接続されている。また、観測塔避雷針の避雷導線は観測塔鉄骨に接続されている。

○測候所の断熱材は厚く電気的絶縁

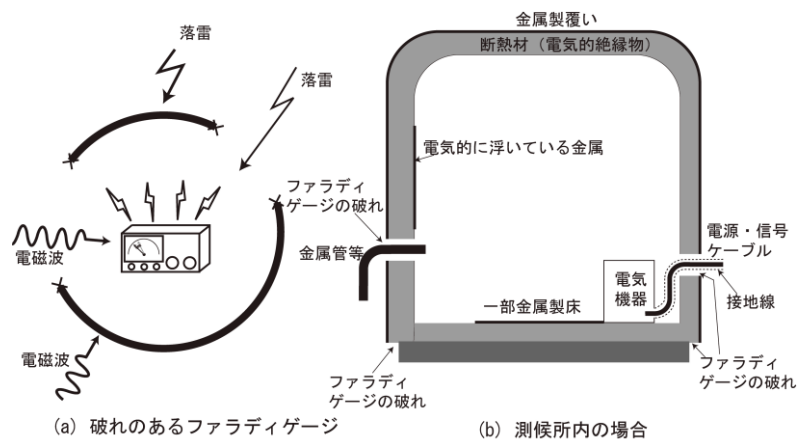


図2 富士山測候所のファラディゲージ構成が破れている状態

表1 富士山測候所各部材間導通状態の確認(2009年8月17日測定)

場所	被測定部材		抵抗値
	一方の部材	もう一方の部材	
外部	GPS下部金属カバー	鉄柵	1MΩ
	GPS下部金属カバー	観測塔鉄製階段	1.28MΩ
	観測塔鉄製階段	2号庁舎屋根カバー	0Ω
	日射塔	2号庁舎屋根固定ロープ	0Ω
庁舎内	庁舎内ケーブルラック	庁舎内ダクト	0Ω
	2号庁舎北側階段	庁舎内ケーブルラック	絶縁状態
	3号庁舎南側階段	庁舎内ケーブルラック	絶縁状態
	金属製扉	庁舎内ケーブルラック	絶縁状態
2号庁舎1F	食堂・居間分電盤	庁舎内ケーブルラック	0Ω

性のものである。庁舎間の扉や階段等導電性部材はその断熱材に固定されており、電氣的接続が取られていないため、金属製の扉や階段にアースと電氣的に導通が無いものがある。

○GPS 脇の鉄柵は接地は取られていない。他にある鉄柵も積極的に接地は取られていない。

以上の問題を図2に示した。

2-5 電源と配線の状態

○変電室で三相 6600V を 200V に変換している。使用変圧器は、耐雷変圧器やシールド変圧器ではなく、B 種接地が必要な一般的な変圧器である。そのため、一次と二次間でサージ電圧の静電的および電磁的移行が生じる。一次側高電圧には避雷器が設けられている。

○三相高圧引き込みケーブルは各線毎に銅テープで遮蔽されており、いずれも端末で接地が取られている。

○測候所の電位を決めている山麓からの接地線と A、B、D の各種接地が変電室で一緒に接続されている。電源電位はこの接地点電位になる。

○三相高圧ケーブルと接地線は山麓から対になって配線され測候所内に一緒に引き込まれている。

○大型自家発電は、その排気ガスが大気観測に支障があるため使用していない。

○単相 100V は、三相負荷バランスが得やすいスコット変圧器を用いて低圧三相 200V から得ている。三相変圧器低圧側は、高圧側との混触時の危険防止のため、B 種接地されている。低圧三相から単相に変換するスコット変圧器 2 次側 2 出力共片端は、B 種接地は不用であるにも関わらず接地されている。これは、漏電遮断器の作動を確保するためのものと考えられる。三相、単相いずれの低圧電源も、電位は B 種接地が接続されている接地電位になる。

○落雷が予測されるとき、山麓からの高圧電源を遮断し、必要最小限電源のみポータブルエンジン発電機に切り換えている。この間の大気化学観測データは使用していない。

○GPS 観測機器は、太陽光発電制御機器の設置場所近くに置き、太陽光発電から電源を得ている。接地は設置場所で行われているものと考えられる。

○配線は基本的にラック上に配線している。

○不要配線がある。測候所を出入りする電気配線、配管類がある。

2-6 落雷対策上の問題点と過去の落雷被害

鉄骨構造物建物の場合、避雷針の被雷導線は一般的に建物鉄骨に接続される。測候所でも鉄骨に接続されているが、一般の建築物と違い鉄骨基礎部の抵抗は大きく、雷電流は建物に沿って山麓からの接地線接続個所に向かって流れる。そのため、接地経路に沿って電圧降下による電位勾配を生じる。等電位が確保できない状態になる。

測候所外の観測機器のケーブルをそのまま内部に導入しているため、接地系統接地電位は導入個所ではなく観測制御機器の設置場所接地点で決まる。ファラディゲージの構成を破っており、被雷したとき外部電位を測候所内に導入することになる。

過去には下記の落雷被害があった。

(1)ブレーカを焼損させた事例 接地系統抵抗が十分小さくないため、雷電流が接地系統に流れることによって電圧降下が生じ、電源系統にもサージ電流が流れ込んでブレーカを焼損させたものと考えられる。

(2)ダクトに被雷しパソコンを破損させた事例(図3) 電源電位は、変電室の B 種接地により山麓からの接地線電位に固定されている。一方、

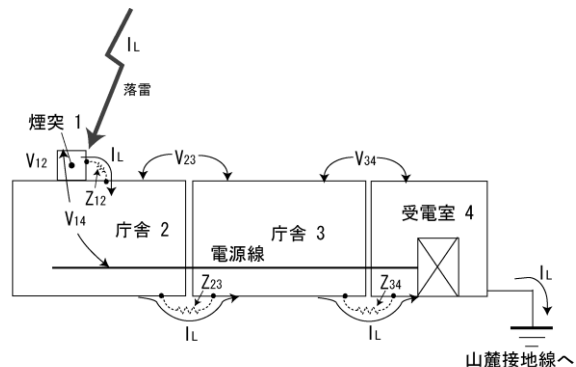


図3 ダクト被雷時トラブルの推測原因

電源線の電位が受電室電位で決まる (B種接地)。一方、各庁舎の接続インピーダンスが大きく、そこに雷電流が流れ、大きな電圧降下が生じる。このことが原因で電気機器使用電源と電気機器使用接地 (庁舎筐体) 間に過大電圧 $V_{14}(=V_{12}+V_{23}+V_{34})$ が現れた。



写真1 GPSの被雷個所

接地点電位は、山麓からの接地線電位に雷電流が流れる接地線インピーダンスの電圧降下を加えたものになる。電源と接地間に電位差が生じたこと、もしくは、電圧降下が生じている接地線間に電位差が生じたことが、破損の原因と推測される。

(3)GPSの被雷(写真1) 避雷時は下部の金属製覆い頂部にあるプラスチック製カバーの固定ボルトが金属製になっており、そこに被雷しケーブルを焼損させた。避雷針の保護下になく誘導電荷を集中しやすくなっていたことが原因と推測される。この対策としては、すでにプラスチック製ボルトに変更されている。このとき下部の金属製覆いは浮かし、GPS センサーとも切り離され絶縁状態にされたものと考えられる。

(4)風速計の被雷 風速計が被雷し破損した。避雷針の保護下になかったため、対策として避雷針を設け、避雷導線はダクトに接続した。

3. 対策方法

3-1 等電位主幹接地によるファラディゲージの構成確保

導入する設備、観測機器に対して雷対策を実施する場合、現状のままだと測候所にファラディゲージの破れがあるため、個々に完結した雷対策をしなければならない。この場合、満足する雷対策の実現は難しくなる場合が一般的である。例えば、導入機器を測候所内機器と独立に使用する場合は、機器ごとに単独にファラディゲージ構成を満足すればよい。しかし、関係させなければならない場合が一般的であり、相互の連携を難しくする。問題を増やし、解決を一層複雑にすることになる。現状のままでは、庁舎外に雷対策を考えた観測機器を設置し難い状態であり、適切な対応ができずトラブルの発生が続く。庁舎接地系統に沿って落雷電流による大きな電位差が生じる。また、外部ケーブルからの雷侵入による感電事故、内部機器の焼損も起こりうる。

対策は理想的なファラディゲージを実現することであり、以下の点を考慮することが必要である。

- (1)ファラディゲージに近くなる。
- (2)等電位性を高める。
- (3)ケーブルへの被雷対策は、パルス状電流だけでなく、持続性電流も考慮した対策が必要である。
- (4)落雷電流の大半は山麓からの接地線を通して山麓側に流れる。

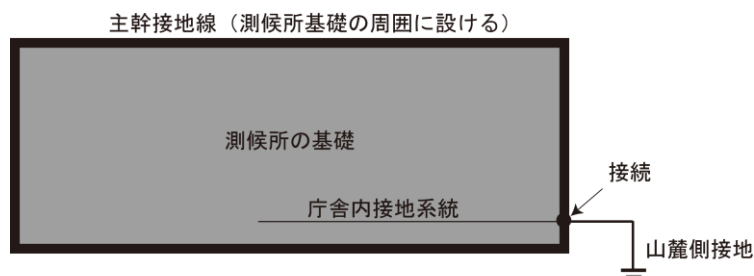


図4 等電位性確保のための主幹接地線

理想的なファラディゲージに近付けるには、等電位性を高くする主幹接地線を測候所基礎周囲に確保し、その主幹接地線に金属製の屋根・壁と鉄骨基礎と多点個所で接続し、ファラディゲージの構成に近くなるべきである。

- ①図4示すように、主幹接地線を測候所建物基礎周囲を囲むように基礎に固定する。
- ②主幹接地線は、十分低インピーダンスにする。銅を用いる場合、100kA の雷電流に対して5V/m 以下にするため(図1より)、400mm² 以上のものを使用する。これは、ケーブルの引出引込個所は一個所ではなく複数個所になるので、主幹接地線を低インピーダンスにすることで一点接地を近似するためである。

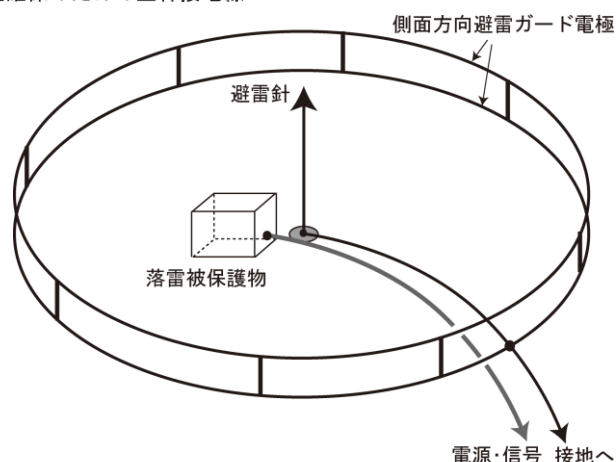


図5 ガード電極による避雷

- 避雷針は上方向からの雷の避雷用である。
- 避雷針とガード電極により斜めからの落雷も防止できる。
- ガード電極形状は被保護物に合わせて決める。
- 落雷被保護物の電源・信号ケーブルも被雷時対策を行う。

③山麓からの接地は受電室導入個所で主幹接地線に接続する。

④落雷の誘導を目的にする避雷針等の落雷電流を、主幹接地線に流すことがないように、避雷導線を山麓からの接地線に直接接続する。

3-2 外部観測機器の落雷対策強化

外部に設ける観測機器は、避雷針、および金属製の測候所屋根や塔の保護下に入るように設ける。また、岩盤上を移動する雷に対しては、観測機器の周囲に図5のようなガード電極を設けることで侵入を防止できるので観測機器を保護できる。GPS の場合、脇にある鉄柵をガード電極に流用できる。

万一、観測機器が被雷した場合を考え、雷電流を流せる十分な容量の接地線を、ケーブルと並列に設ける。またケーブルには、サージ電流を抑制するため、高

透磁率トロイダルコアを用いた図6の柔構造的な接地構成を用いることが必要である。

ケーブル内電源・信号線に侵入する場合も考え、避雷器を設けることも必要である。

測候所外に観測機器があり、測候所引出・引込ケーブルがある場合、この測候所引出・引込口でフェラディゲージの破れが生じないように、ケーブル接地線と測候所接地主幹とを電氣的に十分インピーダンスが小さくなるように接続しなければならない。電気機器筐体のコネクタのように閉じた構造が基本であり、主幹接地線にコネクタを設けることで対策しやすくなる。

3-3 測候所内電位差の対策

落雷電流が流れる接地系統に沿って電圧降下があり、電位差を生じる。この影響を小さくするため、電源・信号系統には接地系統の電位差を吸収する機能を設ける。

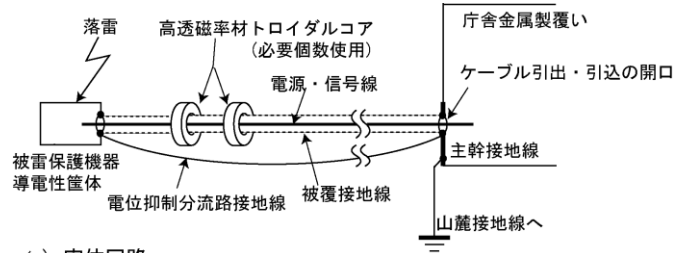
- (1) 電源系統は使用場所を代表する各庁舎毎にノイズカットトランスを入れる。
- (2) 各庁舎をまたがる信号系統は、信号授受に光ケーブルや変圧器を用いて吸収する方法がある。また図6に示す柔構造的な構成を適用する。
- (3) 各庁舎毎に使用場所を代表する接地電位を確保できる接地極を設ける。

3-4 変電室変圧器への対策

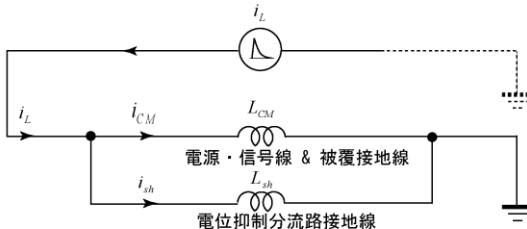
現状の変圧器は一次と二次間のサージ電圧の静電的移行と電磁的移行がある。エネルギー伝達だけではなく無用なサージ電圧も伝達することになる。このサージ電圧対策は、できれば耐雷変圧器を導入する方法、あるいはシールド変圧器を導入して一次側と二次側に避雷器を設ける方法がある。この対策で相互のサージ電圧の移行を抑制できる。一次と二次間をシールドすることでコモンモード成分の静電的移行は完全に防止できる。電磁的結合による移行は線間に現れるノルマルモード成分になる。この対策には一次と二次いずれにも避雷器を設ける対策が必要になる。

サージ電圧は、測候所から山麓側に移行するものと、逆に山麓側から測候所に移行するものについて対策を考える必要がある。

測候所での接地構成への対策が十分であれば被雷電流は山麓からの接地線に流れることになり、測候所接地系統から電源系統に移行するサージ電圧は無視できるものになると考えている。しかし、測候所の被雷電流が流れる山麓からの接地線にインピーダンスがあるため、山麓からの接地線接地点の電位が上昇し避雷器や静電的移行により高電圧電源に侵入することが考えられる。この場合でも、接地線が付随していることと高圧電源の各線が遮蔽した構造であり、その同相化効果を考えると、移行量は小さいと



(a) 実体回路



(b) 等価回路

$$\text{分流により抑制された被覆接地線電流} \quad i_{CM} = i_L \frac{L_{sh}}{L_{sh} + L_{CM}}$$

$$\text{電位抑制分流路接地線電圧降下相殺電圧} \quad e_{CM} = L_{CM} \frac{di_{CM}}{dt}$$

図6 外部観測機器ケーブルへの柔構造的な接地構成の適用方法

推測している。

一方、一次側からのサージ電圧は、山麓側で被雷し侵入してくる。この高圧電源線への雷侵入は、ケーブル部分が遮蔽構造であることと接地線を付随して埋設されていることより少なく、山麓の架空線部分によるものが多いと考えている。現状は、山頂での雷の襲来を予測し高圧遮断器を開放しているが、山麓側の予測まで考えると対応できない。一次と二次いずれにも避雷器を設けることで過大電圧の侵入を防止することが必要である。

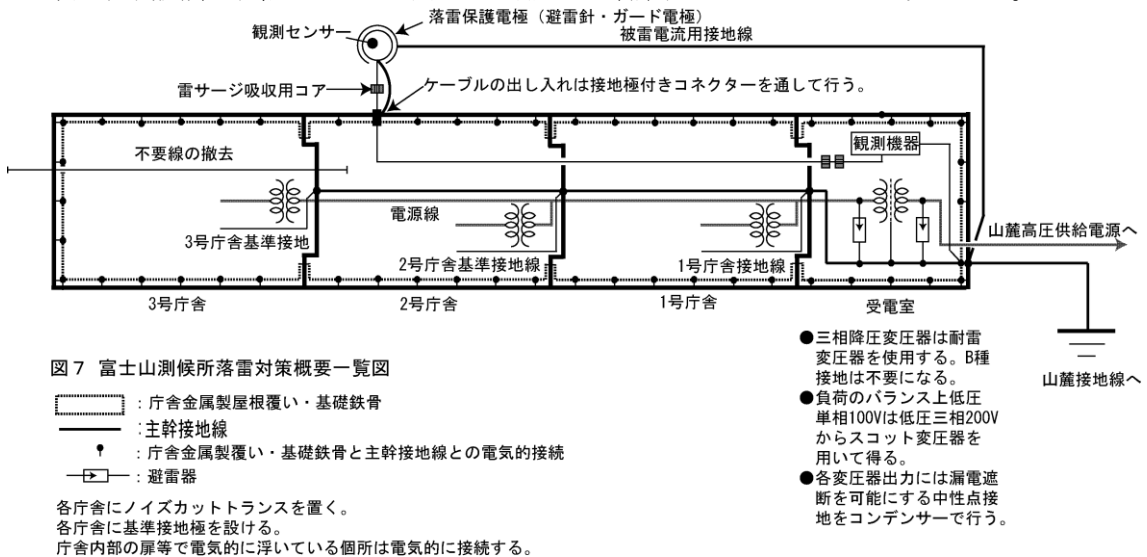
4. まとめ

対策の概要は、図7にまとめることができる。対策を実施することで以下の対策効果が得られる。

- (1) 測候所が被雷しても内部では影響を受けない。
- (2) 外部観測機器は落雷から保護できる。
- (3) 万一外部観測機器が被雷してもダメージを受け難い。
- (4) より安全な使用を可能にする。またノイズトラブルも生じにくくなる。

提案する雷対策方法は、風力・太陽光発電設備設置にも適用できるものであり、また導入しやすい構成になる。

富士山測候所の落雷頻度は高いが、本提案の対策をすることでトラブルは著しく小さくでき、高位置にある富士山測候所の特徴を生かした研究への活用が一層期待されるものになると考えている。



謝辞

この研究の一部は新技術振興渡辺記念会からの委託研究「富士山頂における東アジア越境オキシダント監視システム構築に関する研究」によっている。

資料や情報提供等で調査にご協力頂いた石森啓之・東京管区気象台技術専門官、大胡田智寿・NPO法人「富士山測候所を活用する会」・電気主任技術者、岩崎洋および越生正文・山頂班長、小志度前孝史・関電工静岡支店電力技術部公務チーム所長および濱田宗孝・関電工静岡支店電力技術部公務チームリーダの各位、また、現地調査を進めるにあたりお世話になった、青戸省二御殿場班長、山頂班の方々の各位に感謝する。

参考文献

- (1) 北川信一郎、河崎善一郎、三浦和彦、道本光一郎(1996)大気電気学、東海大学出版会
- (2) 石井勝 監修、音羽電機工業(株)創業 60周年記念出版委員会 (2006)よくわかる雷対策の基本と技術、日刊建設通信新聞社

*連絡先: 安本勝(Yasumoto MASARU)、yasumoto@n.t.u-tokyo.ac.jp