

—システムと施設の EMC—

Part 5: 雷とサージ防護

Eur Ing Keith Armstrong*, C.Eng MIEE MIEEE

翻訳: 佐藤智典**

これは、電気装置や機器の設計者も関心を持つであろう、システム・インテグレータや設置業者のための EMC テクニックに関する隔月の 6 個の論文のシリーズの 5 番目のものである。このシリーズで示されている素材は、主に私と Elmac Services の Tim Williams の共著の新しい本「EMC for Systems and Installations」[1]に基づいている。このシリーズは主に技術的な点を対象とする。[1]には含まれているものの、EMC の管理や法律の論点 (例えば EMC 指令への適合) はカバーしない。このシリーズは「クックブック」スタイルを用いており、説明したテクニックの背後にある理由を掘り下げはしない。より詳しく知りたい場合には、この論文の最後に示した参考文献を読みたい。

これらの 6 個の論文でカバーするトピックは：

- 0. このシリーズの概要 — システムと施設の EMC に対する商業的な必要性
- 1. 接地？ どの接地？ (俗に「アース」や「グラウンド」と呼ばれているものと EMC との関係)
- 2. 施設のための EMC テクニック
- 3. 制御盤などの組み立てのための EMC テクニック
- 4. 施設におけるフィルタリングとシールドイング
- 5. 雷とサージ防護
- 6. CE + CE CE! その代わりに行なうこと

これらの EMC テクニックは大半の地上系のシステムや施設に適用されるが、このシリーズの最初の論文で既に述べたように、乗物を含む特殊なある種のシステムや施設はいくつかの異なった、あるいは追加のテクニックを用いるかも知れない。このシリーズのテクニックのいくつかは、規定された、あるいは伝統的なプラクティスと矛盾するかも知れないが、これら全ては、執筆の時点において、十分に証明された、国際的に標準化された現代的なベスト・

プラクティスであり、プロの技術者はその仕事に常に最良の知識とプラクティスを適用する明白な (職業的な、倫理的な、そして法的な) 義務を持つ。

安全性は常に至上であり、EMC の達成を助けることを意図したいかなるテクニックによっても損なわれてはならないことを忘れないこと。これは、EMC の決定に際して資格のある安全性専門家の関与を必要とするかも知れない。

EMC 指令に適合することは、多数の安全規制 (機械指令のような) によって要求されているような機能的安全性の達成のための充分な EMC 作業ではないことに注意すること。電子デバイスの誤動作が機能的安全性リスクを増加させ得る場合 (例えば全てのロボットや、ある種の機械やプロセス制御) には EMC は安全性の論点として分類しなければならず、単に EMC 指令や対応する整合 EMC 規格に適合することは充分ではないかも知れない。このトピックはこの論文のシリーズでは特にカバーされないが、EMC と機能的安全性に関する IEE Professional Guidance の出版から遅れ過ぎることなくこのジャーナルがレポートすることが期待される。

第 5 部の目次

- 5.1 EMC と雷の経済学
- 5.2 雷は電子機器にどのように影響し得るか
- 5.3 基本的な雷防護システム (LPS) の概要
 - 5.3.1 LPS の基本構造
 - 5.3.2 側方放電の防止
 - 5.3.3 外部ケーブルや金属配管の LPS への接続
 - 5.3.4 どの程度の雷撃電流が外部ケーブルを流れるか？
- 5.3 電子機器の保護のための追加手段
 - 5.4.1 LPS 構造の改善
 - 5.4.2 建築物内での改善

* Cherry Clough Consultants, Associate of EMC-UK

** URL: <http://member.nifty.ne.jp/tsato/>

- 5.4.3 ゾーン分離とサージ防護デバイスの定格
 - 5.4.4 SPD の選択と設置
- 5.5 雷以外のサージからの保護
 - 5.5.1 核電磁パルス (NEMP)、及び EMP
 - 5.5.2 他の外部 / 内部サージ
- 5.6 参考文献

5.1 EMC と雷の経済学

大半の雷防護規格、例えば IEC 61024-1 [3] や BS 6651:1991 [4] の本体などは、人間の安全と建築物の損傷防止を対象としており、電子機器の適切な保護を与えない。電子機器の使用、特にクリティカルな領域におけるそれが急激に増加しているため、建築物内の電子機器の保護が徐々に重要となっている。また、現代的な電子機器はシリコンの「チップ」内の益々小さくなる物理的寸法と動作電圧に依存しており、これはそれらをさらにサージに傷付けられやすくしている。

落雷による電子機器の損傷によるアメリカの経済に対する経済的損失は年間数千億ドルに達するものと見積もられている。[5] は、コンピュータのダウンタイムによる損失は、小売業の 6 億 US ドル / 時間程度、クレジット・カード認証サービスの 3 億 US ドル / 時間程度から、ATM サービスの 15,000 US ドル / 時間程度のばらつきがあると主張している調査を引用している。

電子機器の故障による損失は食品加工業や製造業においても非常に高いものとなる可能性があり、UK では £250,000 / 日も知られていないことではない。連続的な処理においては、小さな「グリッチ」でさえも莫大な経済的損失を引き起こし得る。娯楽産業においては、短時間の故障が撮影や上演の全体を駄目にすることがあり、繰り返すことのできないライブのイベントにおいては特に高価なものとなる。Texaco 精錬所を襲い、その年の UK の GNP に著しい影響を及ぼした雷雨の余波については、[6]、[7]、そして [26] を読みたい。大半の技術者はコストを低く抑えようと試みるが、あなたが関係する全ての電子設備を落雷に耐えるようにするためのコストは、そのような一度の事故よりも遥かに安いものとなり得る。

5.2 雷は電子機器にどのように影響し得るか

1 回の典型的な「雷撃」は 1 秒以上続くことがあり、それぞれが 2kA から 200kA (ストロークの 1% が 200kA を超える) の「アーク・チャンネル」電流を持つ、時には 10 回を超える、多くの「ストローク」(放電) から成っている。

- 接地電位上昇：土壌は相当の抵抗を持っているため、雷撃は普段は同一の「接地」電位にある領域のあいだに大きな電位差を生じさせ得る。[8] は、スター接地とケーブル遮蔽の一端での接続という「伝統的」なプラクティス (このシリーズでは推奨していない) が、この種類の損傷をさらに起こりやすくすることを示している。
- 磁気誘導：100m 程度以内の雷撃からの磁気結合によって、いかなる導体にも非常に大きなサージ電圧が誘導され得る。
- 電流注入：屋外の機器やケーブルへの直撃雷はしばしばそれに接続されている屋内の機器を損傷させ、また共有されているケーブルの経路や端子ボックスでの側方放電によって無関係な機器の損傷をも引き起こし得る。
- 電荷注入：雷撃に先立って、最終的な落雷点から 100m 程度の範囲にわたって 500kV/m に達する電界が発生することがある。これは、損傷を与える電流を導体やデバイスに注入し得る。
- 雷電磁パルス (lightning electromagnetic pulse; LEMP)：この「遠方フィールド」効果は、遠方での対地放電と同様、雲間放電によっても引き起こされ得る。
- 落雷に伴う激しいエネルギーによる、熱的、及び機械的な影響 (例えば大気中の衝撃波)：主に建築物の構造やその避雷用導体に影響する。
- 単一の雷撃内でのストロークの多さや間隔：これは誤り訂正やシステム・ソフトウェアのリカバリーのために重要である。

この論文は、[3] や [4] で示されている、雷撃を横取りして大地に導くタイプの雷防護システム (lightning protection system; LPS) に焦点を当てる。勿論その局所的な妨害は LPS が全くなかった場合よりも遥かに小さい損害を与えるものであるものの、これは、ここで説明するテクニックが使われていない限り電子機器に損傷を与え、かつ / もしくはデータを乱す、局所的な激しい電磁妨害を発生させる。

雷雲によって被保護領域に誘起された電荷を金属針からの放電を用いて消散させることによってその領域への雷撃の発生を防止するという、雷撃防止システムも提案されている。これが主張されているように働いたならば、それは明らかに電子機器の保護のために素晴らしい利点となる。この新しいテクニックを賞賛している記事の例は [9] に見られる。もしあなたが次のプロジェクトでこの種の変ったテクニックを使うことを計画するのであれば、高額な建築物保険料に煩わされることとならないかどうかを確認しておくのは良い考えであろう。

5.3 基本的な雷防護システム (LPS) の概要

まず、[4] (UK の雷防護の実施規則) に基づいた典型的な商業や産業向けの建物内の人々とその建物を保護するための基本的な LPS の概要を見て、その後それを電子機器を保護するために改良する方法を見ることにしよう。LPS の設計は、常に、設計の全ての段階の前、途中、そして後に、全ての関係者—建築家；公益サービス事業者 (ガス、水道、電力、電話など)；その所有者の防火安全監督者；TV、ラジオ、保安、そして通信システムの設置者；そして施工業者を含む—と関係する、経験のある、責任を持った専門家によって行なわれるべきである。

人間の安全、そして建築物の保護のみを意図した典型的な LPS は、典型的には次のようなものを必要とする：

- 実際の雷の状況に基づいたリスク・アセスメント
- 気中終端ネットワークと引き下げ導体の設計
- 接地終端ネットワークと接地電極の設計
- 建築物内の金属構造や建築物に導入される金属配管の LPS への接続

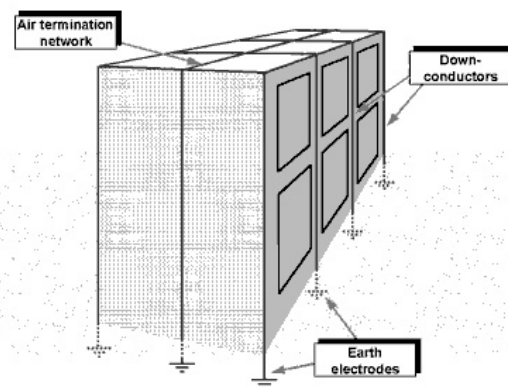
特別な建築物は特別な LPS 手段を必要とするかも知れない。

リスク・アセスメントは、isokeraunic (あるいは isoceraunic) マップと呼ばれる雷撃頻度マップに加え、以下のものに基づく：

- その建築物の、雷撃に関する「実効収集面積」
- その用途
- その工法
- その中身
- 何らかの損傷の波及効果
- 他の建築物からの分離の程度
- 地形

これらの全ては [4] を用いて容易に見付けられ、LPS が必須であると判断されるかどうかを決定できる。雷防護規格は予期される雷撃の特性 (例えば、最大雷撃電流 — これは熱帯では UK よりも遥かに高くなる) に関するガイダンスも与えている。

Figure 5A The basic LPS



5.3.1 LPS の基本構造

基本的な LPS は、Figure 5A に示すように、気中終端ネットワーク (air-termination network — 受電部)、引き下げ導体ネットワーク (down-conductor network)、そして接地終端ネットワーク (earth-termination network) から成る。気中終端ネットワークは実際の雷撃を横取りし、それを引き下げ導体を介して接地終端ネットワークに導き、それによってその建築物を保護する。単一の導体による LPS はもはや推奨されない—それは建築物の他の箇所への放電を生じる傾向があり、地面におけるその強い電位勾配は危険を生じ得る。

LPS は極度の気象的、電気的、電磁的、そして機械的なストレスに長期間耐えねばならず、特定の金属や金属の組み合わせのみが適当である。その建築物の金属部品 (鉄筋を含む「自然」コンポーネント) は、それらが所定の要求を満たす限り、しばしば LPS の一部として、あるいは LPS 全てとしてさえ用いることができる。外部 LPS からの銅の盗難の懸念は深刻なものであり、しばしば「自然」コンポーネントの使用が好まれる。

気中終端ネットワークは、屋根の上や壁の外側の導体のメッシュとすることができる。異なった種類の気中終端ネットワークは、アンテナ、レーダーや衛星通信の反射器、保安用カメラ、空調装置、貯水槽などの露出した機器の直撃雷からの保護のための、異なった形状の「保護ゾーン」を作る。より被害を受けやすい、可燃物や爆発物の保管庫のような建築物 (後で、同じものが電子機器の保護も助けることを見る) には、より近接したメッシュが必要となる。完全に溶接された金属のみから成る建築物は完全な気中終端ネットワークを与え、勿論これは電子機器の保護のためにも理想的である。

気中終端ネットワークからの雷撃電流を分担するために、建築物の周囲に等間隔で配置されたいくつかの引き下げ導体を設けるべきである。それらは接地電極への最短の経路を与えるためにまっすぐで垂直

なものであるべきであり、そうできない場合のためには特別な規則がある。

接地終端ネットワークは、保護される建築物の下の土壌や岩盤に雷撃電流を消散させる、接地電極のシステムである。いかなる土壌や岩盤も有限の導電性を持っており、[4] は 10Ω の総接地抵抗を達成するために接地電極の設計、施工、そして維持に際して何をすべきかを解説している。特殊な状況では、高い（あるいは低い）抵抗が許容される（あるいは必要となる）かも知れない。

10Ω の総接地抵抗を持つ LPS と 100kA の雷撃電流（極端なものではない）は、その建築物の 1MV の「アース・リフト」を引き起こし得る。明らかに、建築物内に良い CBN を持つこと、そして雷撃に際しての「歩幅電圧」を許容できるレベルに抑えるためにその周囲での電位勾配を制限するように接地電極を設計することが重要である。建物の中や近くの人々に対して雷雨に際して非常に小さい歩幅で歩くように警告する標識を掲げるのは良いことではない！

典型的な接地電極は、その建築物の境界から 1m 程度離れた、土壌中に垂直に打ち込まれた、それぞれの引き下げ導体の根本の棒状電極を含む。コンクリート基礎（特に基礎杭）中の補強材は極めて低い接地抵抗を達成することができ、これは構造体接地電極と呼ばれる。土壌中を引かれた導体は線状電極であるが、電位勾配を低減するために用いられている場合には電位緩和電極と呼ばれることもある。基礎線状電極は、建築物の基礎のために掘られた溝に、その据え付けや流し込みの前に置かれた線状電極である。環状接地電極は、建築物の周囲を所定の距離で取り巻き、（このシリーズの第 2 部 [11] で説明した内部の環状接続導体（bonding ring conductor; BRC）のように）その他の全ての電極を接続し、切れ目のない環を形成する。

5.3.2 側方放電の防止

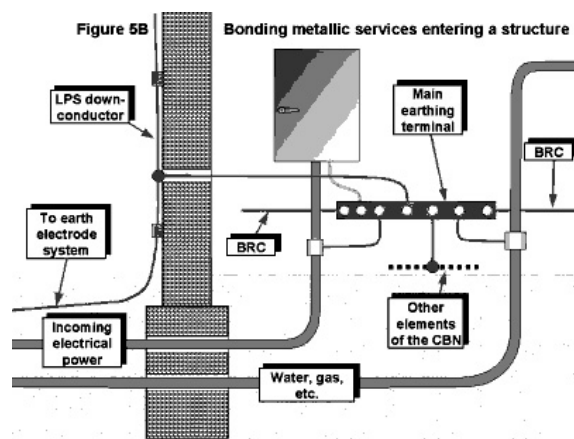
雷撃に際しての引き下げ導体中の電流の急激な変化（雷撃電流の 50% を運んでいる導体で $100\text{kA}/\text{m}\cdot\text{ms}$ に達する）は、その導体の不可避なインダクタンスによって、おそらくは高さ方向で $100\text{kV}/\text{m}$ に達する、非常に高い電圧上昇を生じ得る。これは、他の金属構造に、その建築物の構造（煉瓦、コンクリート、窓など）への直接のものであったとしてもしばしば美観上や構造上の損傷を引き起こし、また傷付けられなかった人を驚かす、「側方放電」を起こし得る。側方放電の防止には、ここで優先度の高いものから示す 3 つのテクニックを用いる：

- インダクタンスを低減して電位差を低減するために、引き下げ導体の数を増やし、LPS のメッシュ寸法を小さくする。

- 側方放電を起こすかも知れない全ての金属構造や導体（外部と内部双方の）と LPS を接続する。
- 側方放電を起こすかも知れないものと LPS のあいだに大きな空間距離（空気中では 2m 以上必要となるかも知れない）を確保することによって絶縁する。

LPS を内部金属構造に接続することは、通常は（このシリーズの第 2 部 [11] の Figure 2D で示したように）CBN への接続を意味する。これは雷撃電流が内部を流れられるようにするものの、雷撃電流は建築物の外縁の導体に集中する傾向があるので、それはしっかりとメッシュ接続された CBN を持っている建築物では問題とはならない。流れることとなる望まれない電流は、側方放電からの解放のための代価としては安いものである [12]。

5.3.3 外部ケーブルや金属配管の LPS への接続



建築物に出入りする全ての金属 — ケーブルの被覆、遮蔽、あるいは保護外装、もしくは電力、ガス、水道、雨、スチーム、圧縮空気、消火用配管、あるいはその他のいかなるサービスのための配管であれ — は、理想的にはそれが建築物に出入りする点のできる限り近くで主接地端子（main earthing terminal; MET）に直接接続すべきである。従って、その計画と設計は、全ての配管や外部ケーブルの単一の領域、望ましくは主接地端子から 2m 以内での導入を目指すべきである。

接地に接続することのできない、電力や信号の導体、そしてその他のいかなる金属も、主接地端子に接続されたサージ防護デバイス（surge protection device; SPD）を持つべきである。Figure 5B は一般的な接続原則を示しており、これは [4] の図に基づいている。

全ての金属のケーブルや配管は、理想的にはその全長が地下を通るべきである。架空のケーブルや配管

は極めて曝露されており、それら进行处理するための特別な規則がある。電話線も可能であれば地下に入れるべきであるが、大半の雷防護規格はその安全性は担当の電話事業者の責任であると言明することでこの議論を回避している。

5.3.4 どの程度の雷撃電流が外部ケーブルを流れるか？

雷撃電流の一部は LPS に接続された外部ケーブルや金属配管を流れ、そのレベルは接地電極システムの抵抗と比較したそれらの抵抗に依存するものと仮定できるかも知れない。[4] は予期される雷撃電流の (統計的な) 図を与えており、様々な抵抗が (計算や測定によって) わかりさえすれば、並列抵抗に基づいた単純な計算が雷撃電流がどのように分割されるかを示すであろう。

電流の分割をより正確に求めるためには、雷撃電流が通ることのできる代替経路の、コントロールすべきサージのサージ波形 (周波数スペクトラム) に対するサージ・インピーダンス (接地電極システムのサージ・インピーダンスを含む) の知識を必要とする。電流の分割を、(その建築物、電極、大地、ケーブルなどの十分な知識のもとに) シミュレーション・ソフトウェアを用いて、あるいはサージ・インピーダンスの適当な測定器を用いた現場での測定結果に基づいて計算することも可能である。しかし、雷サージのエネルギーの大半は 10kHz 以下の周波数範囲にあり、またおそらく大抵の地下構造やケーブルは少なくとも 10kHz までは抵抗性であると見做せるであろうことから、雷サージによる熱的影響のコントロールのためにはおそらくは抵抗による電流分割のみを適切な「工学的余裕」のもとに考慮すれば充分であろう。

個別の評価が行なわれていない場合には、[13] は LPS の全雷撃電流の 50% が接地終端ネットワークに入ると仮定することを示唆している— 残りはその建築物に出入りする金属のケーブルや配管に等しく分配される。遮蔽や保護外装を持つケーブルでは、その電流全てがその遮蔽や保護外装を流れると仮定できるかも知れない。遮蔽も保護外装も持たない導体の束は、雷撃電流の割り当て分をそれらの導体で均等に分配すると仮定できるかも知れない。地上でその建築物に入る電話ケーブルは、主雷撃アーク・チャンネル電流の 5% を運ぶと仮定できるかも知れない。[3] の付属資料は、ケーブル、遮蔽、あるいは保護外装のサージ電流処理容量を計算する方法を示している。

5.3 電子機器の保護のための追加手段

[4] の Appendix C は、IEC 61312-1、IEC 60364-4-443、IEEE C62.41、そして IEEE C62.64 のように、電子機器の保護を扱っている。基本的な LPS が既に存在していると仮定した上でのこれらの規格での共通のテクニックの概要は以下に示す。それはこのシリーズの以前のパートで解説した良い EMC プラクティス全てが、電子機器やデータを雷やその他のサージの影響から保護するために大きな価値を持つことを明らかにする。例えば：

- 機器とケーブルの領域やゾーン (それらのサージ耐力が与えられる保護に適合する場所) への分離
- 建築物の CBN の 3 次元 Mesh-BN やいくつもの Mesh-IBN への進化
- 両端でのケーブル遮蔽の局所接地への 360° 接続、及び / もしくは全てのケーブルの CBN に両端で接続された PEC の近くへの敷設
- 金属を使わない光ファイバーや、その他の電気的に絶縁された非金属のデータや信号の通信の使用
- 誘導ループを最小限とするために PEC に沿った共通の経路に沿ってケーブルを引き回しながらの、ケーブルのクラスへの分離とクラス間の分離の維持
- 建築物内における、機器 (あるいは機器のゾーン) 間のフィルタとシールド

我々にはどの程度の努力を費すかの見解が必要であるので、機器の要素のそれぞれの機能について以下の問いに答えるべきである：

- その機器の交換を必要とする破局的な故障が許容できるか？
- その機器が単に雷に無傷で生き延びることが必要か？
- 雷に際して、それが性能が低下してでも (そしてどの程度まで) 機能し続ける必要があるか？
- その機能が安全クリティカル (あるいはミッション・クリティカル) なものである、すなわちそれが雷に際しても完全に機能し続けなければならないか？

その機器の重要性、雷の脅威への耐性、そしてその施設とその場所がその機器を曝す雷の脅威とのあいだの調整が必要である。[4] の Appendix C は建築物内の電子機器に対する雷の曝露とリスクを求める方法 (これは [4] の本文で与えられているリスク・アセスメントよりも適切な手法である) を解説している。

5.4.1 LPS 構造の改善

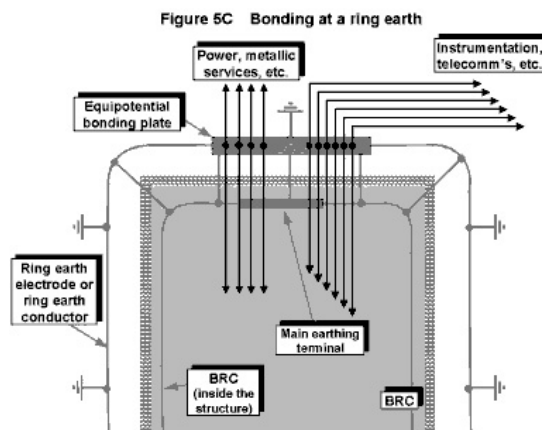
[4] の Appendix C、[13]、[14]、及び [15] は、いずれもインダクタンスを低減し、電流の分担を増やすために、引き下げ導体の数を増やすことを推奨している。それぞれの引き下げ導体はより少ない電流を運び、その建築物の内部により小さい磁界を発生するであろう。溶接された、もしくは結束された鉄筋を用いた鉄筋コンクリート構造（それらの鉄筋が窓や扉の金属の枠にも溶接された）は、非常に良く保護された建築物を作ることができる。環状接地電極や基礎線状電極もしばしば推奨される。

最も単純な建築物を除いては LPS がどの程度改善されるかを求めることは困難であり、[15] は体系的なアプローチを解説している。商用の LPS シミュレーション・ソフトウェアが入手できるが、いくつかの大学や雷の問題を専門とするコンサルティング企業はより強力なシミュレーション・ソフトウェアを持っており、LPS 設計シミュレーションを有料で行なうかも知れない。

完全に囲い込まれた金属の建築物（全ての継目が溶接された）は、理想的な LPS — 直撃雷に際して内部フィールドを全く発生しない「ファラデー・ケージ」— を作るであろう。電子機器が雷や類似の外部サージに完全に生き延びなければならず、あるいは性能の低下なく動作し続けなければならない場合には、そのような建築物が必要となるかも知れない。

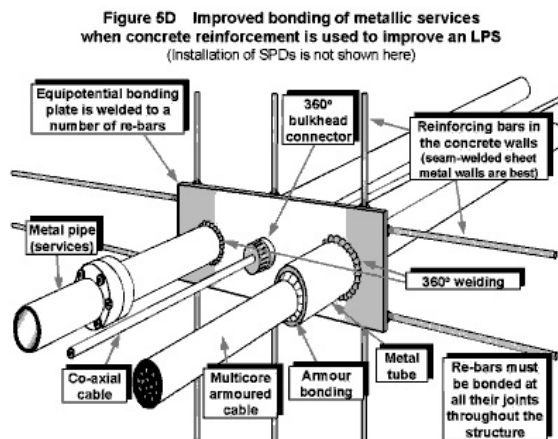
2つの建築物間を渡る電源や金属の信号ケーブルは、それらの一方が雷撃を受けた際に2つの建築物のあいだに発生し得る巨大な電位差により、非常に強いサージを注入することがある。それらは地絡によって引き起こされる雷以外のサージも注入し得る。それが接続する建築物内の電子機器と同様、ケーブル自身の保護を助けるために、[4] や [13] はそれらの建築物の接地システムを多数の並行する金属の経路で— 望ましくはメッシュで— 相互接続することを推奨している。それらの2つの建築物を渡る、ケーブルに関係する金属のコンジット、ダクト、溝、保護外装など、そしていかなる金属構造や金属の配管（ガス、水道など）も、その相互接続接地メッシュと両端の主接地端子とに接続すべきである。

外部の金属ケーブル（電源、電話、データなど）や金属のダクトやパイプを使ったサービス（水道、ガス、スチームなど）の接続は、それら全てを電源引き込み主開閉器の中性線から 2m 以内の地下の1つの小さい領域で建築物に導入することによって改善すべきである。その場所で、それらは単一の大きな等電位接続プレート— コンセプトとしてはこのシリーズの第4部 [16] の Figure 4E で示したフィルタ接続プレートと似ている— に接続されるべきで



ある。この意図は、外部サージがその建築物を通して流れることを防止するために、保護される建築物と世界の残りの部分とのあいだの「スター接続点」を作ることである。金属の何かを接地に直接接続できない場合には、それはその等電位接続プレートに取り付けられた SPD を通して接地に接続すべきである。

この等電位接続プレートは外部環状接地電極の途中に挿入されるべきであり、またそれに両端で接続されるべきである。それは、Figure 5C に示すように、その建築物の内部の環状接続導体（BRC）— [11] の 2.4 章を参照 — と、コンクリート補強材や基礎電極への追加の複数の接続も持つべきである。基礎線状電極や構造体接地電極は、環状接地電極の代わりに用いることができるかも知れない。



鉄筋コンクリート構造においては、垂直と水平の全ての鉄筋を相互接続し、それを非常に効果的な LPS の「自然コンポーネント」として用いることができる。それらの鉄筋が引き下げ導体と構造体接地電極のために必要な全てとなり得る。そのような建築物の「スター接続点」のための等電位接続プレートは、Figure 5D に示すように壁面の鉄筋に取り付けることができる。鉄筋によって作られるメッシュの開口寸法は雷の妨害に関連する周波数では無視できる ([16] の 4.5 章を参照) ので、この構造は

雷防護のための全てが金属でできた溶接された建築物の理想に近づく。

棒状電極 (あるいは帯状垂直電極) を用いる場合には、等電位接続プレートの近くに 1 つの棒状電極 (あるいは多数の帯状電極) を設け、それに直接接続すべきである。

古い建築物内の電子機器を保護する際に、引き込まれる / 引き出される全てのケーブルや配管をそれら全てが 1 つの小さい地下の領域で出入りするよう引き直すことは現実的ではないかも知れない。[1] では、しばしば追加の等電位接続プレートと 2 つ以上の環状導体の使用を伴う、様々なテクニックが推奨されている。

水道や下水、そして類似のプラスチックの配管は驚くほどの導電性を持つことがあり、それらが建築物の境界を横切る箇所への適当な長さ (1 ~ 2m 程度) の金属パイプの (その事業者の許可のもとでの) 挿入を考慮すべきである。それらは等電位接続プレートに接続すべきである。

5.4.2 建築物内での改善

[11] で示したような建築物内の CBN とケーブルの引き回しは、雷の影響からの機器の保護のためにも重要である。

建物内での「アース・リフト」の防止と同時に、3 ~ 4m (あるいはそれ以下) の間隔の Mesh-CBN は、その垂直な要素が対地放電に対する最大の保護を与え、雷撃誘導 (磁氣的、及び電氣的な) に対する有効な遮蔽を提供する。このメッシュの寸法を大きくせざるを得ない (搬入ベイやディスプレイ・ウィンドウなど) 場合には、起こり得る雷の影響に耐えるように「強化」されていない限り、敏感な電子機器はその領域の近くに設置すべきではない。

ケーブルは、避雷システムの導体、特にその垂直な部分の近くを走るべきではない。これが不可能であるならば、頑強な網組遮蔽、保護外装、あるいは閉鎖型コンジットを用い、それが 1MHz、あるいはそれ以上まで良い周波数応答を持つ並行接地導体 (PEC) [11] として動くように常に CBN にその両端を接続すべきである。保護されていない導体は、常に LPS のどの部分からも十分に—2m、あるいはそれ以上—離しておかなければならない。

ケーブルは常に CBN に沿って、それを PEC として用いて引き回すが、雷撃電流は建築物の上部や外面に集中する傾向があるので、それらの近くを走らせるのは避けること。より高度にメッシュ接続された CBN は雷撃電流が建築物の内側を流れることをさらに防止し、ケーブル経路の自由度を高める。しかし、導電性の切れ目がない、継目での良い高周波

接続 ([11] の Figure 2F と 2G を見よ) を持つ、両端で CBN に接続された完全に囲い込まれた金属のダクトやコンジットの中のケーブルは、通常はどこにでも問題なく引き回すことができる [14]。

[4] の Appendix C は雷に伴う様々な種類の信号ケーブルへの誘導電圧の計算の例を与えており、またそれがそのケーブル遮蔽、保護外装、あるいはトレーを PEC とするために両端で接地に接続することによっていかに低減されるかを示している。ケーブル遮蔽の両端での直接の接続が許容されない (「グラウンド・ループ」を避けるという誤った希望に過ぎないものではなく、良い技術的な理由のために) 場合には、特定の種類の LAN に関して ECMA 97 が規定しているように、その代わりに局所接地プレートに SPD を取り付けべきである。

勿論、ケーブル遮蔽の両端での接続は接地ループやサージ電流による遮蔽の過熱のリスクを生じさせる。大半の接地ループ電流は電源周波数のものであり、その解決策は [11] の 2.5 章で解説したようにケーブルの全長を低抵抗の PEC に近接して引くことである。[13] の Annex D は、雷サージ電流に耐えるであろうケーブル遮蔽の最小断面積を計算する便利な式を与えている。どのようなループの大きさをも最小限として誘導サージ電流を低減するために、機器の要素間の全てのケーブルは ([11] の 2.8 章で解説したように距離や遮蔽による適切な分離を維持しつつ) 同一の経路を辿るべきである。

電氣的導体は EMC や雷保護における負債であり、金属なしの光ファイバー、無線、マイクロ波、レーザー、あるいは赤外線通信が常に望ましい。しかし、そのようなリンクの端にある電子デバイスは敏感であり、十分に保護されなければならない。2 つの建築物を接続するためにそのようなテクニックを使う場合、20kA のピーク放電チャネル電流と 10Ω の接地抵抗に基づいた非常に単純な計算は 2MV がより適切であり得ることを示唆するものの、[4] はそれらが 100kV 以上の電氣的絶縁定格を持つべきであると勧告している。建築物内においては、メッシュ接続された CBN と SPD との組み合わせは、電氣的絶縁のために PCB に実装されたフォトカプラを損傷や側方放電を恐れずに用いるのに必要な程度にまでサージ電圧を低減させられる。

雷防護された建築物の中心の空間は通常は雷の影響を最も受けにくい場所であり、従ってここは最も敏感な機器の設置のために最適な場所である。機器の設置に際して避けるべき場所には、屋上、最上階 (特に高い建築物の)、そして外壁、外側の角、引き下げ導体、あるいは旗竿や煙突などの高い構造物の近くが含まれる。勿論、これはその LPS の品質に依存し、また完全に溶接された完全に金属性の建築物内では通常は機器の位置は何の懸念ともならない。

5.4.3 ゾーン分離とサージ防護デバイスの定格

この論文はここまでサージ防護デバイス (SPD) をついでとしてしか述べておらず、これは一部の読者を驚かせるかも知れない。しかし、SPD それ自身では雷の影響から保護することはできない— LPS と CBN の正しい設計と構築、そして慎重な機器の配置とケーブルの引き回しも必要である。実際、良くメッシュ接続された CBN とこれまでに説明したその他のテクニックなしでは、SPD を効果的に使用することは非常に困難で高価なものとなり得る。例えば、建物の内側のデータ・ケーブルに取り付けられた典型的な SPD は引き下げ導体からの側方放電に対する保護とはならず、また近接した引き下げ導体からの磁気誘導に対する保護としてさえ充分ではないであろう。

特別な防止策 (そのテクニックはこのシリーズの範囲を超える) が用いられるのでない限り、SPD は発火や爆発の危険のある箇所に取り付けべきではない。

建築物内でのゾーン分離については [16] (その Figure 4A を参照) でもう少し詳しく解説した。それは異なった過電圧曝露のゾーンを規定し、それらの保護と協調できるようにすることから、雷の妨害からの機器の保護のためにも強力なテクニックである。保護ゾーンと機器の協調の手法は通信産業で長年使われてきた [17]。しかし、少数の EMC 指令イミュニティ規格のみがサージ試験を含んでいるために、一般にはそれは困難であった。しかし、2001 年 6 月 1 日からは、EU 内で新たに供給されるほとんど全ての商業 / 軽工業向け機器はサージ試験を含む新しい EMC 規格への適合を宣言しなければならないであろう。それらは、AC 電源について、典型的なピーク値がそれぞれのラインからグラウンドで 2kV、それぞれのラインから他のラインで 1kV の、標準化された雷撃波形を用いる。ケーブルが 30m よりも長くなり得る場合には、グラウンドに対する、典型的には 1kV ピークのサージ試験も要求されるかも知れない。工業環境向け機器のための一般イミュニティ規格の変更は、2002 年 4 月 1 日以降に供給される製品が同様のサージ・レベルに適合することを要求するであろう。

雷サージによる AC 配電網内の過電圧は建築物内の配線を通るにつれて減衰することがわかっている。[4] の Appendix C と IEEE C62.41-1991 [18] の双方が、過電圧曝露カテゴリを異にする 3 つの異なったゾーンを規定している：

- カテゴリ C：最も苛酷

建築物外の電源導体；低圧受電配電盤 / スイッチギアの供給側；他の建築物や、トランス、ポンプ、屋外照明などの外部機器への主電源ケーブルのための配電盤 / スイッチギアの負荷側。

- カテゴリ B：建築物内の電源導体

受電配電盤の負荷側からコンセントの供給側やヒューズの付けられた分岐まで；壁面コンセントから給電されない機器の内部；カテゴリ C のケーブルから 20m 以内の分電盤；カテゴリ C のケーブルから 20m 以内のプラグ・イン機器やヒューズの付けられた分岐。

- カテゴリ A：最も穏和

カテゴリ C のケーブルから 20m、もしくはカテゴリ B から 10m 以遠のプラグ・イン機器への電源導体やヒューズの付けられた分岐。(カテゴリ A は小さい建築物には存在しないかも知れない。)

外部から建築物に入る全てのデータ / 信号ケーブル (例えば電話線) は、SPD が取り付けられている点まではカテゴリ C と見做される。テレコム・ラインのサージは、配電網におけるようにそれを減衰させるよりもサージのエネルギーを長時間に分散させる傾向があるので、テレコム・ラインのための SPD は通常は AC 電源のものとは異なったサージ波形で試験される。

[4] の Appendix C は、機器に対する雷のリスクが高い、中程度、あるいは低いかを判定するリスク・アセスメント手法を含んでいる。その後で、上の 3 つのカテゴリのそれぞれとリスク・レベルのそれぞれについて、必要とされる SPD の定格をリストしている。それらを Table 1 に示しておく。

Table 1		
主電源用 SPD の試験のためのサージ波形の振幅		
システムの 曝露	ピーク電圧 (kV)	ピーク電流 (kA)
カテゴリ A		
低	2	0.1667
中	4	0.3333
高	6	0.5
カテゴリ B		
低	2	1
中	4	2
高	6	3
カテゴリ C		
低	6	3
中	10	5
高	20	10

(テレコム・ラインはカテゴリ C であるが、その SPD は異なった波形と異なったピーク値で試験される。)

SPD を流れる電流がその接続ケーブル、端子、そしてヒューズも流れ、それらはそれに依拠して選ぶべきであることを忘れないこと。

[13] は、[3] からの保護カテゴリ I~IV とその「雷保護ゾーン (lightning protection zones; LPZ)」の概念を用いた、ドイツでより支持されているゾーン分離アプローチを解説している。LPZ は接地接続構造と追加のシールドとによって作られ、それぞれがそれ自身の境界 BRC ([11] の Figure 2H、及び [16] の Figure 4A を参照) を持つ。[11] や [16] で解説したように、LPZ の境界を横切る全てのケーブル、金属構造、そして金属の配管は、BRC に接続するか、あるいは SPD、及び/もしくはフィルタを取り付けるべきである。

[4] や [18] と異なり、[13] はゾーン内の機器の保護の確認のために使いやすいサージ電圧/電流規格を与えていない。その定格をその建築物やゾーンに必要な保護の理解に基づいて状況に応じて決定することは、そのシステムを設計している雷の専門家にまかされる。

機器の雷保護のリスク・アセスメント、ゾーン分離、そして SPD / 機器のサージ定格の選択のもう1つの異なったアプローチが、IEC 60364-4-443:1999 [19] で用いられている。[19] は、SPD について、ピークの電流やエネルギーではなくピーク過電圧定格を勧告しているのみである (しかし、主電源のサージ・インピーダンスは大抵は 2Ω と考えることができ、従ってそれらは計算できる)。[19] でのゾーン分離と電圧定格は、IEC 60664-1:1992 [20]、そして製品群安全規格 EN 61010-1:1993 [21] の Table J1 にあるものと同一である。

2001 年 6 月からの新しい EMC イミュニティ規格で要求されるであろうサージ試験レベル、[19] や [20] の過電圧保護規定、そして [4]、[13]、及び [18] のような雷防護規格で想定されている曝露とのあいだに整合性がないのは大いに残念である。2001 年 6 月からの EMC 指令の新しいサージ・イミュニティ規格に適合する機器はどこで使っても信頼できるであろうと期待することはできない—依然として、所定の建築物内でのゾーンやリスク・カテゴリに従った評価と、必要に応じて低い曝露のゾーンへの移動、あるいは追加の SPD の取り付けやその他の保護手段を必要とするであろう。

5.4.4 SPD の選択と設置

SPD は、その建築物の等電位接続プレートや主接地端子、内部ゾーン境界、そして時には機器の要素自身に設置されるかも知れない。SPD によって抑制されるべきピーク電圧や電流は上で議論した。しかし、保護される機器と SPD との協調は、適切

な種類の SPD を選択し、それをピーク通過電圧 (let-through voltage) がその機器が耐えるレベルを超えないように設置することを必要とする。

SPD は、その端子間電圧がトリガー・レベルを超えるまで高抵抗を与える (そして低い漏洩電流を持つ)。その後、その抵抗は急激に低下し、その端子間電圧をクランプする (ツェナー・ダイオードのように) か、あるいはスイッチングしてそれをトリガー・レベル以下にまで低下させる (後者の特性は「crowbar」、もしくは「foldback」と呼ばれる)。

SPD の基本的な種類は 4 つある：

- ガス避雷管 (gas discharge tube; GDT)：本質的にはスパーク・ギャップそのものであり、低速だが非常に高電力。
- 金属酸化バリスタ (metal-oxide varistor; MOV)：バルク半導体で、GDT よりも高速だがそれほど頑丈ではない。
- アバランシェ・ダイオード：ツェナーに似た半導体デバイスで、非常に高速だがあまり高電力ではない。
- SCR：サイリスタやトライアックのような半導体デバイスで、低速だが高電流を扱える。

Figure 5E Example V/t curves for the four main types of SPD (ignoring effects of wiring or earth bonding inductance)

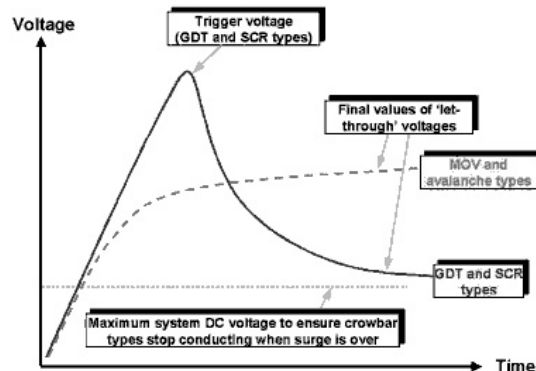
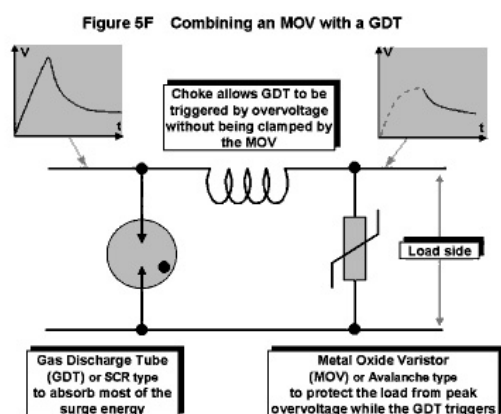


Figure 5E は、これらの 4 種類の SPD が典型的なサージ試験波形の波頭に曝された際の電圧波形を示す。

GDT や SCR の速度の低さは、それらがダメージを引き起こし得る電圧を一時的に通過させ得ることを意味する。その「折り返し (foldback)」型の特性は、それが直流電源に接続されるのであれば、それが一度トリガされた後で永久に導通したままとならないように慎重な設計を必要とする。ある種のサージ防護ユニットは、望ましい総合性能を達成するために異なった種類の SPD の組み合わせを用いているが、(例えば) 低電力 MOV と高電力 GDT を単純に並列にすると GDT のトリガが妨げられる

可能性があり、従ってそのようなユニットは通常は Figure 5F に示すように折り返し型デバイスとクランプ型デバイスのあいだにインダクタを挿入し、クランプ型デバイスをその保護された側に置くようにしている。電圧降下が許容できる場合には、このインダクタの代わりに抵抗を用いることもできる。MOV 型のもは信頼できないと見做されていたが、最新の規格に適合するものは非常に頑丈なようであり、いくつかの非常に高エネルギー耐量の MOV 製品も入手可能である。



SPD の定格は、それがコントロールしようとするサージのピークの電流、電圧、そしてエネルギーに応じたものとするのが非常に重要であり、さもなくばその寿命が極めて短くなる可能性がある。また、SPD の爆発は人間に対して非常に危険であり、火災の危険を生ずることもある。正しい定格のものが用いられている場合であっても、全ての SPD はそれが為さなければならないストレスの多い仕事のために故障を生じやすく、従って SPD を取り付けただならば定期的に検査や試験を行ない、劣化や故障がわかったならば交換すべきである。これは非常に面倒な仕事であるので、今は多数の SPD 製造業者が性能の劣化や故障の接近、あるいはデバイスの故障を警告するインジケータを備えたサージ防護ユニットを供給している。

AC 電源で用いるための SPD は通常はワイヤ接続スタイルで提供されているが、それは RJ11 (例えば電話) や BNC (例えば無線アンテナ) などの標準コネクタを用いた信号やデータのラインには適当ではなく、製造業者はそれらの専用のコネクタを付けたパッケージの一連の SPD を用意している。全ての種類の SPD (GDT を除く) は相当大的な静電容量を持っており、これはその用途を低速な信号やデータに限定する。高速のデータや RF では、サージのエネルギーの大半を除去するために GDT を用い、その初期通過電圧には機器の回路設計で対処することができる。SPD の作動中にはデータや信号は失われることに注意が必要であり、従って通常は頑強なエラー訂正通信プロトコルが必要となる。

それが正しく設置されなかった場合には、SPD の実際の通過電圧はデータ・シートの値とは無関係なものとなり得る。リード長は短くしなければならず、その接地は保護されるものの保護導体に対するものでなければならない(分離された「SPD 接地」は災厄へのレシビである)。実際の機器に取り付けられていない SPD については、その SPD や関係する CBN は雷の周波数 (例えば 1MHz まで) において低インピーダンスを持たねばならず、従って環状電極や類似のテクニックの使用が必要となる。

SPD の現実の通過電圧は、それ自身の端子電圧と、そのインダクタンス (束ねられていないワイヤについては、通常は 1mH/m として計算できる) による接続リードでの過渡的な電圧降下との合計である。雷に関係するサージについては、双方の SPD 接続の全長は 1m 以内であるべきである。例えば、[22] のテスト・レポートは、6kV 3kA 試験において、ある SPD が正しく設置された (リード長は 250mm 以内で、一緒に束ねられている) 際に 630V の通過電圧を持っていたが、束ねられた 2m のリードでは 1,200V を通過させ、そして束ねられていない 2m のリードでは 2,300V を通過させたことを示している。[4]、[13]、及び [3] の 3 つの雷防護規格のいずれにおいても SPD の設置についてはあまり触れられていないが、SPD の設置の詳細に関する情報は [5]、[12]、そして *Furse electronic systems protection handbook* [22] から得られる。Furse 社と同様、他の SPD 製造業者の大半も彼らの製品をどのように設置するのが最良であるかについての無料のブックレットを用意しているであろう。

SPD 保護は建築物間での「アース・リフト」によっても損なわれ得るが、先に解説した手法においては等電位接続プレートや主接地端子に置かれた SPD によってこれに対処できる筈である。しかし、SPD を機器の要素に適用する場合、その機器のシャーシが Mesh-CNB に直接接続されていない限り、その保護接続導体のインダクタンスによって SPD サージ電流がその機器自身に著しい「アース・リフト」を引き起こし得る。機器がアース・リフトの影響を受ける場合、その信号やデータの相互接続、そしてそれが接続される機器の全てが過電圧のリスクに曝される。

従って、相互接続された機器が Mesh-CNB を用いて正しく設置されていない場合にはそれが信号やデータのポートの損傷を引き起こし得ることから、SPD を標準的な予防手段として AC 電源入力に追加するのは良い考えではない。低インピーダンスの CBN や設置の品質が保証できない場合には、SPD は全ての金属相互接続に必要となるかも知れない—光ファイバのような電氣的絶縁テクニックを遙かに費用効果の良いものとする。SPD による機器のアー

ス・リフトについては、[24] の 3.14.7 章や [8] でやや詳しく述べられている。

どのような SPD も突発的に故障し、大抵は金属酸化物バリスタ (故障モードが漏洩電流の増加であり、最終的には短絡となる) が用いられているので、AC や DC の電源で使用する際にはヒューズを通さなければならない。ヒューズは、SPD が故障した際にワイヤを過熱から保護しながら、多数の SPD の動作による電流サージに耐えるものを選定しなければならない。

SPD と直列に取り付けられたヒューズは、その SPD を破壊した —あるいはその SPD のヒューズを飛ばした— サージがその機器に損傷を与え得るようにする。たとえその機器がその後も動作し続けたとしても、それはもはや保護されていないこととなる。

保護された機器にも給電する共通の給電ラインに取り付けられたヒューズは、それが開いた際に機器の電源を止める。普通は、SPD の作動による何回ものサージに耐えながら機器を過電流から保護するようにヒューズを選ぶことが可能である。これが最も普通の設計手法であるものの、ある種のクリティカルな用途では許容できるとは考えられないかも知れない。

用途によっては、信号線で用いられている SPD の過熱からの保護 —例えば「電源交差」(電源導体と信号導体との短絡) に際しての— のためにもヒューズが必要となるかも知れない。用途によっては、過電圧が取り除かれた時、ヒューズの交換や修理技術者による処置なしにシステムが損傷を受けることなく機能を回復するように、伝統的なヒューズの代わりに PTC (正温度特性サーミスタ —しばしば「自己回復ヒューズ」と呼ばれる) を使用することもできる。

5.5 雷以外のサージからの保護

5.5.1 核電磁パルス (NEMP)、及び EMP

NEMP (nuclear electromagnetic pulse) や EMP は、いずれも表面的には雷に似てはいるものの 1000 倍から 10000 倍高速であり、従って気中終端や引き下げ導体の密なネットワーク、あるいは内部接続ネットワークの 3m のメッシュ寸法でさえも、大した保護を与えないであろう。NEMP は —電子デバイスの観点では— 核爆弾の主な影響 (熱と爆風の半径外で) であり、数百マイル以内の電子機器に損傷を与え得る。NEMP はこの論文の範囲からは外れるが、これに関する情報やガイダンスは軍 / 市民防衛出版物やパブリック・ドメインの教科書としてすぐに入手できる。

小さな破壊力の EMP 「爆弾」はそれほどの困難なく作れそうなので [25]、データ・セキュリティ、テロ、そして犯罪を考える時、EMP の懸念は増加している。これについてのより詳しい情報は、[16] の電子戦の章 (4.6 章) を参照されたい。

5.5.2 他の外部 / 内部サージ

外部発生サージは引き込まれた高圧 / 中圧電源において特にありふれており、これは大きな誘導性負荷のスイッチングや、高圧 / 中圧スイッチギアや広域配電網内での負荷の切り外しによって引き起こされる。外部の雷以外のサージ源は、建築物外の電話やデータ・ライン —大抵は自動車が電柱を倒した時や掘削機が地下のケーブル・コンジットを傷つけた時の主電源ケーブルへの短絡 (時に「電源交差 (power cross)」と呼ばれる) による— も含む。

高圧や中圧の地絡による非常に大きな電流は異なった建物を接続する信号やデータのケーブルに損傷を与え (あるいは蒸発させ)、かつ / もしくはそれらが相互接続している機器に損傷を与え得る。光ファイバ・ケーブルでさえも、その構造に金属が含まれているならば、その金属が建築物に入る前に十分に遠くで除かれていない限りはこれに耐えられないかも知れない。

内部サージは、オン / オフ制御の大きな DC や AC のモータがオフされる際の蓄積エネルギーの放出、ヒューズの開放 (ピーク電圧は典型的には供給電圧のピークの 2 倍となる)、そして地絡によって引き起こされ得る。より極端な例では、MRI スキャナや線形加速器の超電導磁石は、そのフィールドが破れた際に 1MJ 程度のサージ・エネルギーを供給し得る。

内部発生サージは、[11] で解説したように、高電力機器と敏感な機器、そしてそれらのケーブルや電源を分離し、良い低インピーダンス Mesh-BN (あるいはいくつかの Mesh-IBN) を設けることによって最も良く管理できる。しかし、保護ゾーン内で発生したサージについては、そのゾーン内の他の機器がそれに曝されるのを止めることは困難なものとなることがあり、SPD やフィルタリングのテクニックが必要となるかも知れない。

著しい雷以外のサージが存在する場合、[3] や [4] のような雷防護規格で示唆された曝露レベルを上げる —これは 1 つ、あるいはそれ以上の雷防護手段の改良を必要とする— ことが必要となるかも知れない。

5.6 参考文献

- 1 "EMC for Systems and Installations", Tim Williams and Keith Armstrong, Newnes, 2000, ISBN 0 7506 4167 3.
- 2 "IEE Guide on EMC and Functional Safety", IEE Publications September 2000
<http://www.iee.org.uk/PAB/EMC/core.htm>
 から、Word、もしくは PDF フォーマットで無料でダウンロード可能 (「Core」ドキュメントと9個の「Industry Annexes」として)
- 3 "Protection of structures against lightning – Part 1: General Principles", DD ENV 61024-1:1995, ISBN 0 580 24306 0 (available from BSI).
- 4 "Protection of structures against lightning", BS 6651:1999 from the British Standards Institution (BSI).
- 5 "Surge protection for the broadband co-axial plant – one piece of the puzzle", C.S.Blichasz ERA の "Lightning Protection 98: buildings structures, and electronic equipment" カンファレンス (Solihull, 6-7 May 1998) で発表された。
 ERA Technology Ltd, Leatherhead, UK, phone: 44 (0)1372 367 000, fax: 44 (0)1372 367 099, email: info@era.co.uk, web: <http://www.era.co.uk>
- 6 "IEE Computing and Control Engineering Journal", April 1998, pages 57 – 60.
- 7 "The explosions and fires at Texaco Refinery, Milford Haven, 24th July 1994", HSE Books, May 1997.
- 8 "Bonding the screens of cables at both ends", Keith Armstrong, ERA conference "Earthing 2000" Solihull July 2000, pp: 2.3.1 – 2.3.12, ERA Technology Ltd, Leatherhead, UK, email: info@era.co.uk, web: <http://www.era.co.uk>
- 9 "A bolt of danger", Jerome Kerr, Wireless Design and Development European Edition, 9.2000, pp 28-29.
 (このタイプの雷防護システムに関する情報は、Lightning Eliminators & Consultants, Inc. の Technical Library にも)
- 10 "EMC for Systems and Installations – Part 1 Earth? What earth?", Keith Armstrong, UK EMC Journal Jan 2000, pp 15-21.
<http://www.compliance-club.com> のアーカイブから入手可能。
- 11 "EMC for Systems and Installations – Part 2 EMC Techniques for Installations", Keith Armstrong, UK EMC Journal Apr 2000, pp 8-17.
<http://www.compliance-club.com> のアーカイブから入手可能。
- 12 "Surge protection devices – Installation issues", Ian Braithwaite, IEE colloquium on Surges, Transients, and EMC (Savoy Place, London, on 18th February 1998) で発表
 IEE colloquium digest reference number 1998/197 に収録
- 13 "Protection against lightning electromagnetic impulse – Part 1: General principles", IEC 61312-1: 1995
- 14 "Bonding configurations and earthing within a telecommunications building", ITU Recommendation K.27 (1996).
 ITU ドキュメントは若干の料金で <http://www.itu.int/publications/bookstore.html> からダウンロード可能
- 15 "Systematic approach for the analysis of the electromagnetic environment within a building during lightning strike", A.Orlandi, C.Mazzetti, Z.Flisowski, and M.Yamarkin, IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility, November 1998, Volume 40 Number 4, ISSN 0018-9375, Part II (special issue on Lightning), pp 521 to 535.
- 16 "EMC for Systems and Installations – Part 4 Filtering and shielding", Keith Armstrong, UK EMC Journal August 2000, pp 17-26.
<http://www.compliance-club.com> のアーカイブから入手可能。
- 17 "Risk assessment of damages to telecommunication sites due to lightning discharges", ITU Recommendation K.39 (1996).
- 18 "IEEE Recommended practice on surge voltages in low-voltage AC power circuits", IEEE C62.41-1991 (recognised as an American National Standard).
- 19 "Electrical installations of buildings – Part 4: protection for safety – Chapter 44 Protection against overvoltages – Section 443 Protection against overvoltages of atmospheric origin or due to switching", IEC 60364-4-443 Edition 2.1 1999.
- 20 "Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests", IEC 60664-1:1992

- 21 "Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use – Part 1: General requirements", EN 61010-1:1993 +A1 + Corr.1.
- 22 "Electronic systems protection handbook", W.J.Furse & Co. Ltd, publication ref: ES-PHB1, phone 0115 986 3471, fax 0115 986 0538
- 23 "Lightning Protection 98: buildings structures, and electronic equipment conference", Solihull, 6-7 May 1998, ERA Technology Ltd, Leatherhead, UK, phone: +44 (0)1372 367 000, fax: +44 (0)1372 367 099, email: info@era.co.uk, web: <http://www.era.co.uk>
- 24 "Design techniques for EMC – Part 3: Filters and surge protection devices", Keith Armstrong, UK EMC Journal, June 1999, pp 9-16.
<http://www.compliance-club.com> のアーカイブから入手可能。
- 25 "Just a normal town...", New Scientist, July 1st 2000, pp 20-24
- 26 "Banana Skins (No. 17)", The UK EMC Journal, June 1998, page 6
<http://www.compliance-club.com> のアーカイブから入手可能。

Copyright (C) 2000 Nutwood UK Ltd.

これは、Keith Armstrong 氏が EMC+Compliance Journal 上で発表した文書を、その許諾を得て T. Sato が翻訳したものです。この翻訳については、原著者らはいかなる責任も持ちません。これについての意見、質問などは VEF00200@nifty.ne.jp (T.Sato) 宛にお送り下さい。

Last update: 2001-01-08