

# IEC 61000-4-5 の概要 — サージ試験の方法

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2024 年 9 月 11 日

## 目次

1	概要	1
1.1	背景	1
2	試験機器	3
2.1	コンビネーション・ウェーブ・ジェネレータ (CWG)	3
2.1.1	CWG の基本的な特性	3
2.1.2	出力波形のパラメータ	4
2.2	電源線用 CDN	4
2.3	相互接続線用 CDN	5
2.4	屋外対称通信線用 CDN	7
3	校正	8
3.1	使用機器	8
3.2	CWG の校正	8
3.3	電源線用 CDN の校正	9
3.4	非対称相互接続線用 CDN の校正	9
3.5	対称相互接続線用 CDN の校正	9
3.6	屋外対称通信線用 CDN の校正	10
4	試験	11
4.1	共通事項	11
4.2	電源ポートへの印加	11
4.3	非シールド相互接続ポートへの印加	12
4.4	非シールド屋外対称通信ポートへの印加	12
4.5	シールド線への印加	12
5	補足	13
5.1	ケーブルの余長の処理	13
5.2	サージ防護デバイスの影響	13
5.3	試験レベルの例 — IEC 61000-6-2:2016	13
5.4	雷インパルスとの比較	14
5.5	関連規格	15
6	参考資料	15

## 1 概要

IEC 61000-4-5 は電源系統上での開閉や雷の影響に伴って電源線やその他の長いケーブル上に生じるようなサージ<sup>†1</sup>に対するイミュニティの評価のための試験法を定めた規格の1つで、電子機器の評価のために広く用いられている。

本稿では、この規格の本稿の執筆の時点での最新版である IEC 61000-4-5:2014<sup>[1]</sup> について解説する。なお、本稿は規格の内容全てをカバーするものではなく、また正確であるとも限らないので、規格についての正確な情報は規格そのもの<sup>[1]</sup>を参照していただきたい。

### 1.1 背景

電源線やその他の長いケーブル上には、この規格の §4 で述べられているように、例えば次のような事象に伴うサージ、すなわち過渡的な過電圧や過電流が発生することがある：

- 電源系統のスイッチングに伴う過渡現象 (開閉サージ)
  - 例えばコンデンサ・バンク<sup>†2</sup>の開閉のような、主電源系での開閉に伴う妨害
  - 配電系統上での開閉動作 (図2)<sup>†3</sup>や負荷変動

<sup>†1</sup> この試験は「雷サージ」試験と呼ばれることもあるが、この規格ではそのような表現は用いられていない。§1.1で触れるようにこの規格は雷以外に起因するサージもカバーすることが意図されており、その一方、直接的な雷撃によって生じるような激しいサージ (§5.4) はカバーされていないので、その表現は誤解を招きやすいかも知れない。

<sup>†2</sup> 伝統的には負荷の多くが誘導性で電流の位相が遅れて力率が低下することから、力率の改善のために電源系統にコンデンサ (図1) を接続することがある。このようなコンデンサは電源系統の負荷状況に応じて通電状態のまま接続されたり切り離されたりし、その際に顕著なサージが発生することがある。

<sup>†3</sup> 高圧気中開閉装置の動作のビデオは例えば <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=9GeXkussHfw> にある。



図 1: 高圧電力系のコンデンサ・バンクの例

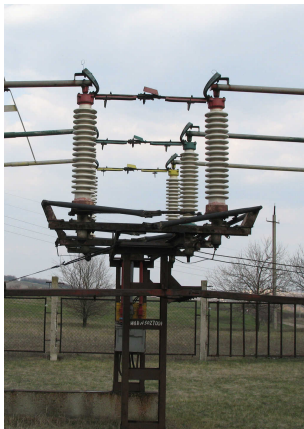


Photo by Buryka, licensed under CC BY-SA 3.0

図 2: 高圧開閉装置の例

- 例えばトランジスタやサイリスタのようなスイッチング素子に関する共振回路
  - 例えば地絡や接地系へのアーク放電故障のような、電源系の様々な障害やその回復
- 雷に関連する過渡現象<sup>†4</sup>

- 接地回路を通して流れることで、あるいは外部回路のインピーダンスを通して流れることで電圧を発生する高電流を注入する、外部回路への直撃雷<sup>†5</sup>
- 建物の外部や内部の導体に電圧や電流を誘導させる間接雷、すなわち雲のあいだ

<sup>†4</sup> 雷やそれに伴うサージ、またそれに対する保護については [2][3]などを参照。

<sup>†5</sup> 高い位置を架空で敷設される送電線では直撃雷を受ける可能性も高くなるが、通常、電源導体への直撃雷の可能性は架空地線によって低減されている。架空地線による遮蔽の失敗により、あるいはフラッシュオーバーや逆フラッシュオーバーの発生によって高圧電力線に雷電圧が侵入する可能性は残るだろうが、低圧系へのサージの伝播は限定的なものとなることが予想される。

や雲の内部での、あるいは近傍の物体への雷撃



Photo by ThaliaTraianou, licensed under CC BY-SA 4.0

図 3: 雲間放電の例

- 設備の接地系の共通接地経路に結合する、近傍の対地放電からの雷大地電流

特にそれが屋外を引かれる場合、機器に接続される低圧電力線や通信線が直撃雷を受ける可能性もあるが、一般にはそのような事象の発生確率は低く、またそのような雷撃に伴って発生するサージは非常に激しく、<sup>†6</sup> 一般の電子/電気機器をそのようなサージに耐えるようにすることは実際的とは言い難い。

このため、この規格では直接的な雷撃によって生じる過電圧や過電流の影響ではなく、開閉サージや雷からの誘導に伴う事象の影響が評価の中心となる。<sup>†7</sup>

この規格はこのような事象の模擬を意図したもので、この事象を模擬するサージを試験発生器で発生させて試験対象のケーブルに注入することによって試験を行なう。この試験では、通常、交流電源線と、電話線などの長い、かつ/もしくは屋外を引かれるケーブルが対象となる。

<sup>†6</sup> 直撃雷の影響の評価には、例えば 200 kA のインパルス電流 (§5.4) が用いられる。

<sup>†7</sup> 現代的な雷保護<sup>†8</sup> が行なわれた建屋内で使用される一般的な機器はこの試験法を参照した一般/製品群/製品 EMC 規格への適合だけで雷の影響に対する妥当なイミュニティを達成できるかも知れない。だが、例えば少なくとも一部のユニットが屋外に設置される、あるいは通信ケーブルなどの相互接続線が屋外に引かれる道路照明灯などの屋外照明、監視カメラ、空調機のようなものは雷の影響 (被雷システムの設計/施工が適切に行なわれていない場合は機器の外殻への直撃雷の可能性などを含めて) に曝されやすくなり、雷からの妥当な水準の保護のために追加の考慮が必要となることが予想される。また、高い可用性が求められるシステムについても、雷の影響 (一時的な機能喪失や損傷など) を受ける可能性の低減のために追加の考慮が必要となることが予想される。

<sup>†8</sup> 現代的な雷保護は雷撃による火災や建屋の損傷のような直接的な被害の防止 (外部雷保護) のみでなく施設内の電気設備の保護 (内部雷保護) も対象としている。勿論、施設の内部雷保護が施設内の機器の保護のために充分なものであるとは限らず、また全ての施設でそのような内部雷保護が行なわれているわけでもない。施設や機器によっては追加での保護が必要となるかも知れない。

このようなサージの波形や大きさは多様で、振動性のもとなることや複数のサージが連続的に発生する<sup>†9</sup>こともあるが、この規格では数 kV、数 kA までの単方向の、単発的なサージが用いられる。<sup>†10</sup>

## 2 試験機器

### 2.1 コンビネーション・ウェーブ・ジェネレータ (CWG)

この規格では、一部の例外 (下記) を除き、1.2/50  $\mu\text{s}$  — 8/20  $\mu\text{s}$  と称される、開放回路電圧波形の波頭長 (front time) が 1.2  $\mu\text{s}$  で持続時間 (duration) が 50  $\mu\text{s}$ 、短絡回路電流波形の波頭長が 8  $\mu\text{s}$  で持続時間が 20  $\mu\text{s}$  の単方向のパルス (図 4)<sup>†11</sup> を発生する試験発生器が用いられる。

この発生器の実効出力インピーダンス (開放回路電圧のピーク値と短絡回路電流のピーク値の比) は 2  $\Omega$  であり、例えば試験レベルが 4 kV の場合の短絡回路電流のピーク値は 2 kA  $\pm 10\%$  となる。

開放回路電圧波形と短絡回路電流波形のいずれも、ピーク値の 30% を超えないアンダーシュートが許容される。

電話線のような屋外に引かれる対称通信線の試験では、10/700  $\mu\text{s}$  — 5/320  $\mu\text{s}$  と称される、開放回路電圧波形の波頭長が 10  $\mu\text{s}$  で持続時間が 700  $\mu\text{s}$ 、短絡回路電流波形の波頭長が 5  $\mu\text{s}$  で持続時間が 320  $\mu\text{s}$  のパルス (図 5) を発生する試験発生器が用いられる。

この発生器の実効出力インピーダンスは 40  $\Omega$  で、例えば試験レベルが 2 kV の場合の短絡回路電流のピーク値は 50 A  $\pm 10\%$  となる。

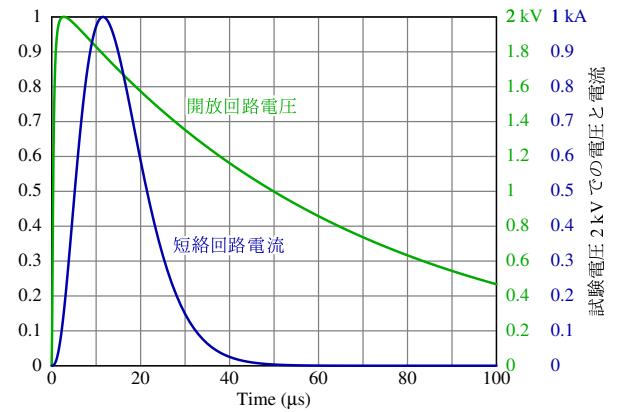


図 4: 1.2/50  $\mu\text{s}$  — 8/20  $\mu\text{s}$  試験波形

この CWG を屋外対称通信線用 CDN (§2.4) と組み合わせて用いる場合、出力の 40  $\Omega$  は 15  $\Omega$  で置き換えられる。

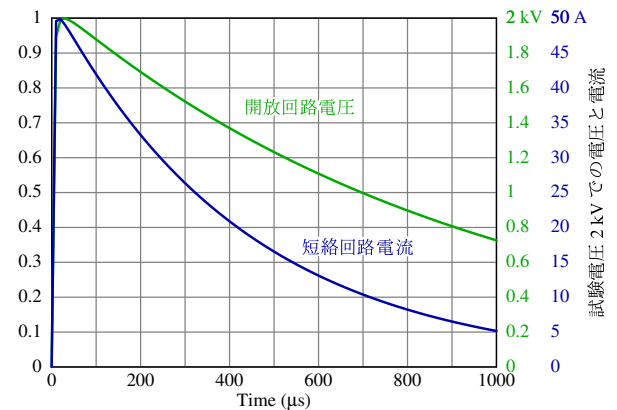


図 5: 10/700  $\mu\text{s}$  — 5/320  $\mu\text{s}$  試験波形

これらの試験発生器は開放回路電圧波形と短絡回路電流波形の要求を同時に満足する (同じ設定のまま、出力を開放とした時は開放回路電圧波形の、短絡した時は短絡回路電流波形の要求を満足する) もので、コンビネーション・ウェーブ・ジェネレータ (CWG) と呼ばれる。<sup>†12</sup>

電源のライン間への印加などへの対応のため、CWG の出力はフローティングとなっている。

#### 2.1.1 CWG の基本的な特性

1.2/50  $\mu\text{s}$  — 8/20  $\mu\text{s}$  の試験発生器 (CWG) に対する要求事項はこの規格の §6.2.2 で、また

<sup>†12</sup> これにより、電圧サージと電流サージの双方で試験する、あるいは試験対象の特性によってそれらを使い分けることなしに試験を行なえるようになっている。

<sup>†9</sup> 雷撃は複数の放電を伴うことが多く、放電電流は小さいものの長時間持続する放電を伴うこともある。例えば DO-160G §22<sup>[4]</sup>, MIL-STD-461G CS117<sup>[6]</sup> は、振動性のあるサージ波形、多重ストローク、また多重パーストを含む様々な形の雷誘導トランジェントに対する評価を含む。

<sup>†10</sup> 振動性のサージに対するイミュニティの評価は IEC 61000-4-12 (§5.5) で扱われている。また、雷撃やそれに伴うサージに対する評価は、雷保護デバイスのように雷撃やそれに伴うサージを扱う能力が重要なものに対する規格、ある種の電力設備のように雷撃の影響に曝されることが予期されるものに対する規格、また航空機 (飛行中にしばしば雷撃を受けることが想定され、それでも安全に飛行を継続できることが求められる) のように雷撃の影響への非常に高い耐性が求められるものに対する規格<sup>[5]</sup> などで見られる (§5.4)。

<sup>†11</sup> 規格の Annex E で示されているような二重指数波形としてモデル化される。

10/700  $\mu\text{s}$  — 5/320  $\mu\text{s}$  の試験発生器に対する要求事項はこの規格の Annex A で規定されている (表 1, §2.1.2)。

極性	正、負
位相角	AC 電源電圧の位相角を基準として 0~360° の範囲で、 $\pm 10^\circ$ の許容幅で設定可能なこと (1.2/50 $\mu\text{s}$ — 8/20 $\mu\text{s}$ の CWG のみ)
繰り返し速度	1 回/分以上
開放回路ピーク電圧	0.5 kV から必要な試験レベルまでで調整可能なこと (表 2 も参照)
サージ電圧波形	図 6
出力電圧設定許容差	$\pm 10\%$
短絡回路ピーク電流	ピーク電圧設定に依存
サージ電流波形	図 7
短絡回路電流許容差	$\pm 10\%$

表 1: 試験発生器 (CWG) の基本的な特性

レベル	開放回路試験電圧 (kV)	
	ライン間	ライン — 接地間
1	—	0.5
2	0.5	1
3	1	2
4	2	4
X	特殊	特殊

表 2: 試験レベル

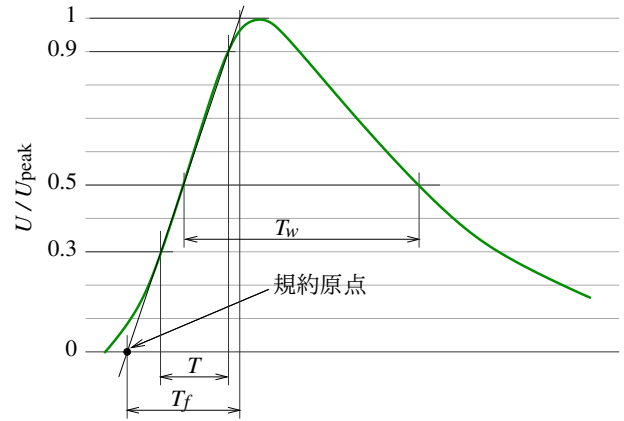
### 2.1.2 出力波形のパラメータ

CWG の出力での開放回路電圧波形のパラメータを図 6 に、また短絡回路電流波形のパラメータを図 7 に示す。

開放回路電圧波形の波頭長 (front time)  $T_f$  は 30 % から 90 % までの時間  $T$  の 1.67 倍<sup>†13</sup>、持続時間 (duration)  $T_d$  はパルス幅  $T_w$  と等しいものと定義されている。<sup>†14</sup>

<sup>†13</sup>  $1/(0.9 - 0.3) \approx 1.67$  であり、従ってこれは電圧波形が 30 % を横切るポイントと 90 % を横切るポイントを結んだ直線が 0 % のラインと交わる点 (規約原点) と 100 % のラインと交わる点のあいだの時間となる IEC 61000-4-5:2005 における波頭長の値と一致する (図 6)。

<sup>†14</sup> IEC 61000-4-5:2005 ではパルスの長さを示すパラメータと



波形	波頭長 $T_f$	持続時間 $T_d$
1.2/50 $\mu\text{s}$ (8/20 $\mu\text{s}$ )	$T_f = 1.67 \times T$ $= 1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$	$T_d = T_w$ $= 50 \mu\text{s} \pm 20\%$
10/700 $\mu\text{s}$ (5/320 $\mu\text{s}$ )	$T_f = 1.67 \times T$ $= 10 \mu\text{s} \pm 30\%$	$T_d = T_w$ $= 700 \mu\text{s} \pm 20\%$

図 6: 開放回路電圧波形のパラメータ

短絡回路電流波形の波頭長  $T_f$  は 10 % から 90 % までの時間  $T_r$  の 1.25 倍<sup>†15</sup>、持続時間  $T_d$  は 8/20  $\mu\text{s}$  のパルスではパルス幅  $T_w$  の 1.18 倍<sup>†16</sup>、5/320  $\mu\text{s}$  のパルスではパルス幅  $T_w$  と等しいものと定義されている。<sup>†14</sup>

## 2.2 電源線用 CDN

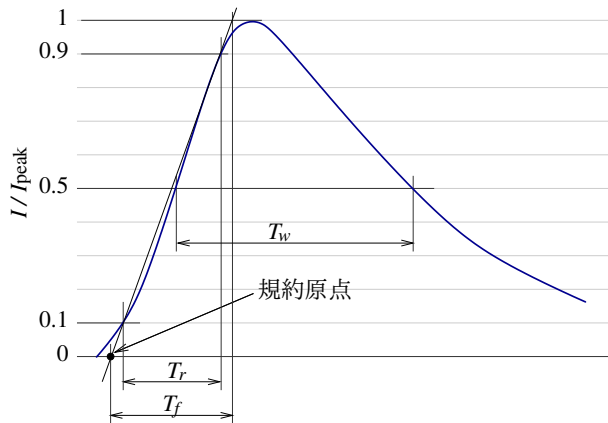
電源線用 CDN (結合/減結合回路網) は CWG (§2.1) が発生したサージを試験対象の電源導体に注入するための結合回路網とサージの電源入力側への伝播を防ぐ減結合回路網から成り、その原理を図 8 ~ 図 10 に、またその波形のパラメータの規定を表 3 に示す。

して規約原点から電圧波形が 50 % を横切って低下するまでの時間である波尾長 (time to half-value) が用いられていたが、この版ではこれはパルス幅  $T_w$  から求められる持続時間 (duration)  $T_d$  に置き換えられた。8/20  $\mu\text{s}$ <sup>†16</sup> 以外の、 $T_f \ll T_w$  となる波形ではこの規格ではそれらの波形については単純に持続時間  $T_d = T_w$  と規定されている。この持続時間の値は IEC 61000-4-5:2005 までで用いられていた波尾長に近い値となるだろうが、それらが一致するというわけではない。

<sup>†15</sup>  $1/(0.9 - 0.1) = 1.25$  であり、従ってこれは電流波形が 10 % を横切るポイントと 90 % を横切るポイントを結んだ直線が 0 % のラインと交わる点 (規約原点) と 100 % のラインと交わる点のあいだの時間となる IEC 61000-4-5:2005 における波頭長の値と一致する (図 7)。

<sup>†16</sup> 規格には 1.18 という係数は経験的なデータから導かれたとあり、この持続時間が波形のどの部分の時間なのかは示されていないが、この係数はモデル化された電流波形 (図 4) での波尾長のパルス幅に対する比率と概ね一致する。従って、この持続時間の値は IEC 61000-4-5:2005 までで用いられていた波尾長に近い値となるだろうが、それらが一致するというわけではない。





波形	波頭長 $T_f$	持続時間 $T_d$
1.2/50 $\mu\text{s}$ (8/20 $\mu\text{s}$ )	$T_f = 1.25 \times T_r$ $= 8 \mu\text{s} \pm 20 \%$	$T_d = 1.18 \times T_w$ $= 20 \mu\text{s} \pm 20 \%$
10/700 $\mu\text{s}$ (5/320 $\mu\text{s}$ )	$T_f = 1.25 \times T_r$ $= 5 \mu\text{s} \pm 20 \%$	$T_d = T_w$ $= 320 \mu\text{s} \pm 20 \%$

図 7: 短絡回路電流波形のパラメータ

この CDN は 1.2/50  $\mu\text{s}$  — 8/20  $\mu\text{s}$  の CWG (§2.1) と共に用いられ、ライン間への印加は 18  $\mu\text{F}$  のコンデンサを介して (CWG の出力に適切な 18  $\mu\text{F}$  のコンデンサが入っている場合は追加のコンデンサや抵抗なしで)、従って CWG と同様に 2  $\Omega$  のインピーダンスで行なわれ、CDN の EUT ポートでの電圧波形や電流波形は CWG の出力と同様のものとなる。ライン — 接地間への印加は 9  $\mu\text{F}$  のコンデンサ (CWG の出力に適切な 18  $\mu\text{F}$  のコンデンサが入っている場合は 18  $\mu\text{F}$  のコンデンサ) と 10  $\Omega$  の抵抗を直列としたものを介して行なわれ、出力インピーダンスが 2  $\Omega$  ではなく 12  $\Omega$  となることから短絡回路電流波形のピーク値が小さくなり、また短絡回路電流波形の波高値や持続時間も CWG の出力やライン間への印加の場合とは大きく異なるものとなる。

CDN の電流定格<sup>†17</sup>が大きい場合、出力波形のパラメータの一部についてより大きな偏差が許容される (表 3)。

### 2.3 相互接続線用 CDN

非シールド非対称相互接続線用の CDN の原理と波形のパラメータの規定を図 11、表 4 に、また非シールド対称相互接続線用の CDN の原理と波形の

<sup>†17</sup> 試験では EUT の電流定格に対する要求を満たす CDN が必要となる (§4.2) ので、これは試験での使用が想定される EUT の電流定格と読み替えても良いかも知れない。

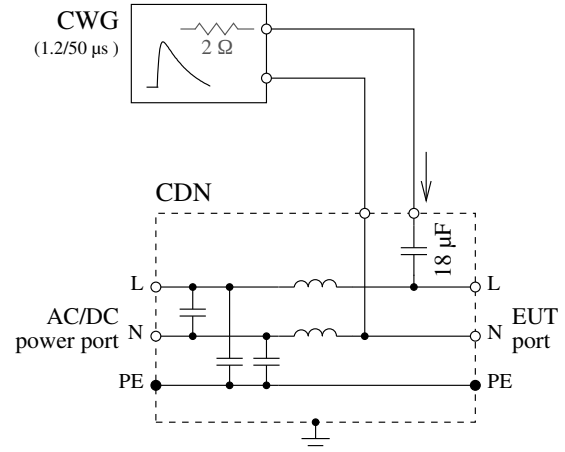


図 8: 電源用 CDN の原理 (单相電源用; ライン間への注入)

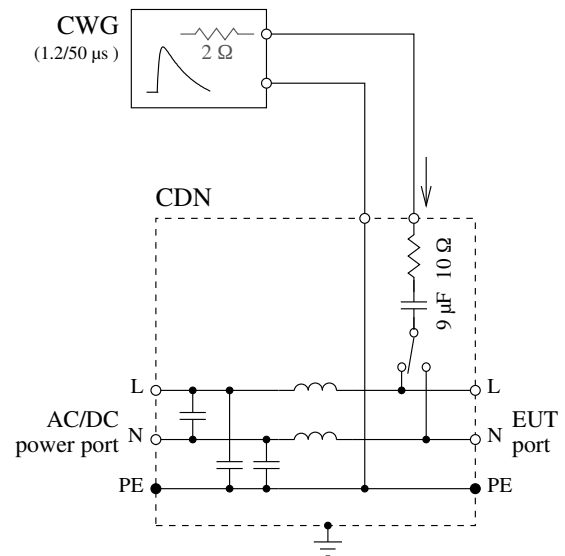


図 9: 電源用 CDN の原理 (单相電源用; ライン — 接地間への注入)

パラメータの規定を図 12、図 13、表 5 に示す。これらの CDN は、1.2/50  $\mu\text{s}$  — 8/20  $\mu\text{s}$  の CWG (§2.1) と組み合わせて、非シールド相互接続線にサージを注入するために用いられる。

非シールド非対称相互接続線用の CDN (図 11) は試験対象の非対称相互接続線のそれぞれのラインと接地のあいだに、また任意のラインとラインのあいだに、40  $\Omega$  の抵抗と結合デバイス (CD) を介してサージを印加するものとなる。

一方、非シールド対称相互接続線用の CDN (図 12) は印加対象のケーブルにコモン・モードで (すなわち全てのラインに一括で) サージを印加するものとなる。その結合抵抗  $R_c$  はそれらの並列抵抗が 40  $\Omega$  となるように選択され、ライン数を  $n$  とすると

電圧波形						
電流定格	18 $\mu\text{F}$ (ライン間)			9 $\mu\text{F}$ + 10 $\Omega$ (ライン—接地間)		
	ピーク電圧 $V_{oc}$	波頭長 $T_f = 1.67 \times T$	持続時間 $T_d = T_w$	ピーク電圧 $V_{oc}$	波頭長 $T_f = 1.67 \times T$	持続時間 $T_d = T_w$
< 16 A	設定 $\pm 10\%$	1.2 $\mu\text{s} \pm 30\%$	50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-10}$	設定 $^{+10}_{-10}\%$	1.2 $\mu\text{s} \pm 30\%$	50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-25}$
16 A $\leq$ , < 32 A			50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-15}$	設定 $^{+10}_{-10}\%$		50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-30}$
32 A $\leq$ , < 63 A			50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-20}$	設定 $^{+10}_{-15}\%$		50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-35}$
63 A $\leq$ , < 125 A			50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-25}$	設定 $^{+10}_{-20}\%$		50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-40}$
125 A $\leq$ , < 200 A			50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-30}$	設定 $^{+10}_{-25}\%$		50 $\mu\text{s}$ $^{+10}_{-45}$
電流波形						
電流定格	18 $\mu\text{F}$ (ライン間)			9 $\mu\text{F}$ + 10 $\Omega$ (ライン—接地間)		
	ピーク電流 $I_{sc}$	波頭長 $T_f = 1.25 \times T_r$	持続時間 $T_d = 1.18 \times T_w$	ピーク電流 $I_{sc}$	波頭長 $T_f = 1.25 \times T_r$	持続時間 $T_d = 1.04 \times T_w$
全て	$V_{oc}/2 \Omega \pm 10\%$	8 $\mu\text{s} \pm 20\%$	20 $\mu\text{s} \pm 20\%$	$V_{oc}/12 \Omega \pm 10\%$	2.5 $\mu\text{s} \pm 30\%$	25 $\mu\text{s} \pm 30\%$

表 3: 電源線用 CDN の出力波形の規定

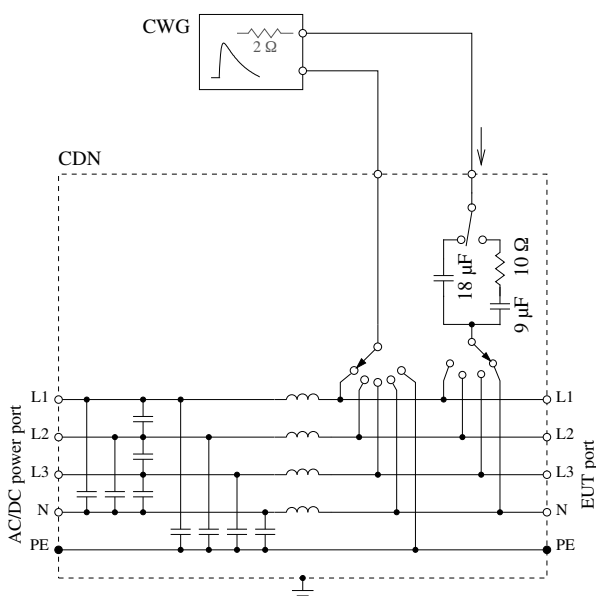


図 10: 電源用 CDN の原理 (3 相 4 線電源用; ライン間、及びライン — 接地間への注入)

40  $\Omega \times n$ , 例えば 4 ラインの場合は 40  $\Omega \times 4 = 160 \Omega$  となる。<sup>†18</sup>

結合デバイス (CD) は印加対象のラインの絶縁を維持しながらサージを結合させる役割を持ち、その要求を満たす任意のデバイスを使用できる。

主な結合デバイスの基本的な特徴や注意事項は:

- コンデンサ

- 通常、0.5  $\mu\text{F}$  のコンデンサが使用される
- 静電容量が大きいことから印加対象の回

路や信号への影響が大きく、一般に高速な信号には適さない<sup>†19</sup>

- 電源線用 CDN などと比較して静電容量が小さく、これがサージ波形に影響することがあり、非対称相互接続線用 CDN (表 4) については結合デバイスとしてコンデンサを用いた場合と GDT (ガス放電管) を用いた場合とで波形の規定が異なっている
- 低い試験レベルでの使用の制限はない

- GDT (ガス放電管)<sup>†20</sup>

- 静電容量や漏れ電流は非常に小さく、印加対象のライン上の信号への影響は小さい
- そのデバイスの放電開始電圧は印加対象のライン上の最大電圧よりも高い必要がある
- そのデバイスのインパルス放電開始電圧は試験レベルよりもかなり低いべきで、その場合も印加される波形への影響に注意した方が良いかも知れない
- 電源などに使用する場合、その条件で続流 (サージの印加の後にも電流が流れ続ける現象) を生じないことの確認も必要となるかも知れない

- クランピング・デバイス (ダイオードやバリスタ)

<sup>†19</sup> 図 13 はコンデンサを用いているが、ノーマル・モード・チョークを用いてコンデンサの信号への影響を抑えることで高速信号に対応している。

<sup>†20</sup> ガス・アレスタ、あるいは単にアレスタとも呼ばれる。

<sup>†18</sup> IEC 61000-4-5:2005 では最大 250  $\Omega$  となっていた。

- そのデバイスの静電容量や漏れ電流が印加対象のライン上の信号に悪影響を与えることもある
- そのデバイスのクランプ電圧は印加対象のライン上の最大電圧よりも高い必要がある
- そのデバイスのクランプ電圧は試験レベルよりもかなり低いべきで、その場合も印加される波形はクランプ電圧の分だけ低下するであろうことに注意すべきかも知れない

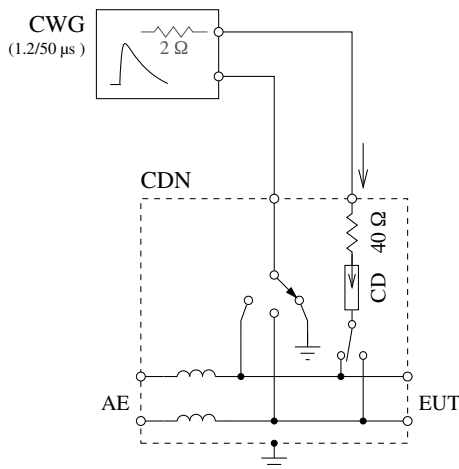


図 11: 非対称相互接続線用 CDN の原理

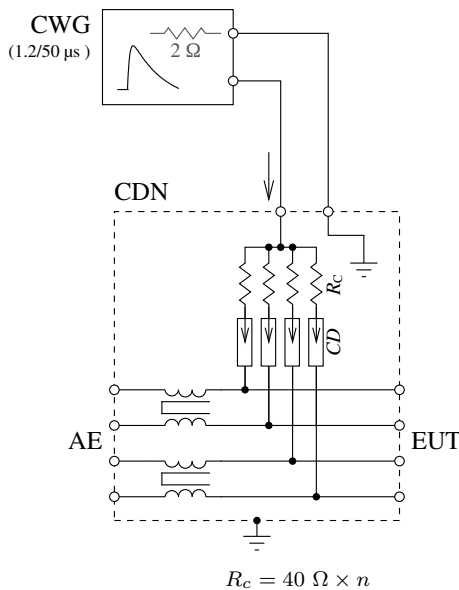


図 12: 対称相互接続線用 CDN の原理

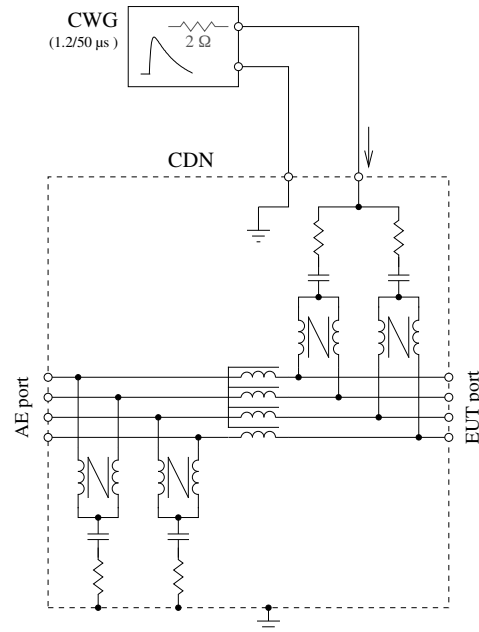


図 13: 高速対称相互接続線用 CDN の原理

## 2.4 屋外対称通信線用 CDN

電話線のような非シールド屋外対称通信線用のための CDN の原理を図 14 に、またその波形のパラメータの規定を表 6 に示す。この CDN は  $10/700 \mu\text{s} - 5/320 \mu\text{s}$  の CWG (§2.1) と共に用いられ、CWG の出力の  $15 \Omega$  の抵抗と CDN の各ラインの  $25 \Omega$  の抵抗と適切な結合デバイスを通じて印加対象のケーブルにコモン・モードでサージを印加するものとなる。

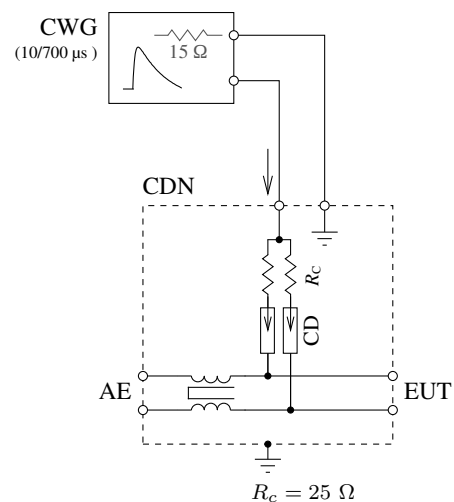


図 14: 屋外対称通信線用 CDN の原理

結合	CWG 出力電圧	開放回路電圧波形			短絡回路電流波形		
		ピーク電圧 ±10 %	波頭長 $T_f = 1.67 \times T$ ±30 %	持続時間 $T_d = T_w$ ±30 %	ピーク電流 ±20 %	波頭長 $T_f = 1.25 \times T_r$ ±30 %	持続時間 $T_d = 1.18 \times T_w$ ±30 %
ライン — 接地間							
CD = 0.5 $\mu$ F, R = 40 $\Omega$	4 kV	4 kV	1.2 $\mu$ s	38 $\mu$ s	87 A	1.3 $\mu$ s	13 $\mu$ s
CD = GDT, R = 40 $\Omega$	4 kV	4 kV	1.2 $\mu$ s	42 $\mu$ s	95 A	1.5 $\mu$ s	48 $\mu$ s
ライン間							
CD = 0.5 $\mu$ F, R = 40 $\Omega$	4 kV	4 kV	1.2 $\mu$ s	42 $\mu$ s	87 A	1.3 $\mu$ s	13 $\mu$ s
CD = GDT, R = 40 $\Omega$	4 kV	4 kV	1.2 $\mu$ s	47 $\mu$ s	95 A	1.5 $\mu$ s	48 $\mu$ s

表 4: 非対称相互接続線用 CDN の出力波形の規定 (Table 8 より)

結合	CWG 出力電圧	開放回路電圧波形			短絡回路電流波形		
		ピーク電圧 ±10 %	波頭長 $T_f = 1.67 \times T$ ±30 %	持続時間 $T_d = T_w$ ±30 %	ピーク電流 ±20 %	波頭長 $T_f = 1.25 \times T_r$ ±30 %	持続時間 $T_d = 1.18 \times T_w$ ±30 %
CD = 任意, R = 40 $\Omega$	2 kV	2 kV	1.2 $\mu$ s	45 $\mu$ s	48 A	1.5 $\mu$ s	45 $\mu$ s

表 5: 対称相互接続線用 CDN の出力波形の規定 (Table 10 より)

結合	CWG 出力電圧	開放回路電圧波形			短絡回路電流波形		
		ピーク電圧 ±10 %	波頭長 $T_f = 1.67 \times T$ ±30 %	持続時間 $T_d = T_w$ ±30 %	ピーク電流 ±20 %	波頭長 $T_f = 1.25 \times T_r$ ±30 %	持続時間 $T_d = 1.18 \times T_w$ ±30 %
1 対, 27.5 $\Omega$ <sup>†</sup>	4 kV	4 kV	8 $\mu$ s	250 $\mu$ s	145 A	3.2 $\mu$ s	250 $\mu$ s

<sup>†</sup> 15  $\Omega$  + 25  $\Omega$  / 2 = 27.5  $\Omega$

表 6: 屋外対称通信線用 CDN の出力波形の規定 (Table A.4 より)

### 3 校正

校正は、以下のいずれか、あるいは双方について行なう：

- CWG 単体；
- CWG と CDN の組み合わせ。

CWG の出力と CDN の出力の双方で同時に波形の要求を満足する必要はなく、試験で EUT に妨害を印加する位置で要求を満たせば良い。

#### 3.1 使用機器

CWG や CDN の校正では、測定するサージ電圧やサージ電流に対応した、またその測定の目的に見合った周波数特性を持つ以下の機器を用いる：

- オシロスコープ
- 高圧差動プローブ

入力インピーダンスが 10 k $\Omega$  以上であること

- 電流プローブ、もしくは電流シャント

測定対象のポイントから見たインピーダンスが 0.1  $\Omega$  以下となること；

電流プローブ（電流トランス）の場合、下側のカットオフが 100 Hz (10/700  $\mu$ s — 5/320  $\mu$ s) のサージの測定の場合は 10 Hz) よりも低いこと。

#### 3.2 CWG の校正

- CWG はこの規格で規定された要求事項 (§2.1) を満足すること
- CWG の出力経路に 18  $\mu$ F の出力コンデンサが内蔵されていない場合、この測定は 18  $\mu$ F のコンデンサを外付けして行なう
- 位相角の確認は CDN の出力で、いずれか一方の極性で、0°、90°、180°、及び 270° の位相角について行なう



### 3.3 電源線用 CDN の校正

- 電源線用 CDN (§2.2) の EUT ポートで測定された開放回路電圧波形や短絡回路電流波形はこの規格の Table 4、5、6 の規定 (表3) を満足すること<sup>†21</sup>
- CDN の電源入力ポートで測定された残留電圧 (電源の入力側へのサージの漏洩) が最大試験電圧の 15 %、あるいは定格ピーク電圧の 2 倍を超えないこと
- CDN の EUT ポートのサージを印加していないラインと接地とのあいだで測定された不要電圧 (他のポートへのサージの漏洩) が最大試験電圧の 15 % を超えないこと
- アンダーシュートの制限はない
- この測定の結果はその特定の CWG との組み合わせに対してのみ有効となる

- この測定の結果はその特定の CWG との組み合わせに対してのみ有効となる

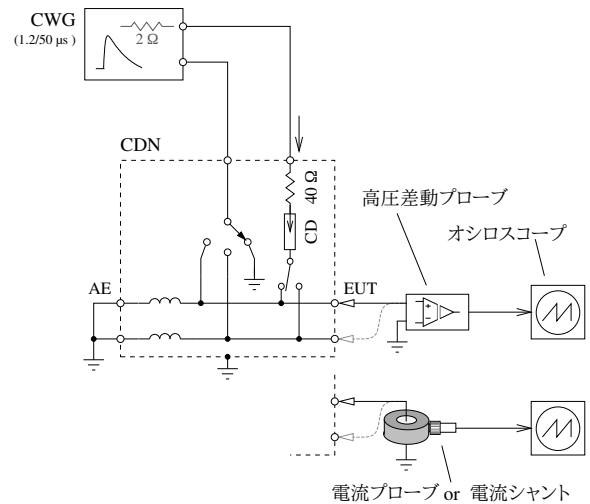


図 15: 非対称相互接続線用 CDN の校正 — EUT 側のサージ電圧/サージ電流の測定 (ライン-PE)

### 3.4 非対称相互接続線用 CDN の校正

- この規格の Table 7 (表7) で示された項目を測定する。  
この測定は、実際に試験で用いる構成で行なうべきである。
- 非対称相互接続線用 CDN (§2.3) の EUT ポートで測定された開放回路電圧波形や短絡回路電流波形はこの規格の Table 8 の規定 (表4) を満足すること。
- AE (補助機器) ポートの残留電圧 (サージの漏洩) も測定/記録すべきであるが、これに対する限度は規定されていない。

この情報は、その CDN が与える減結合が試験で使用する AE の保護のために充分かどうか (追加の保護が必要かどうか) を判断するために用いることができる。

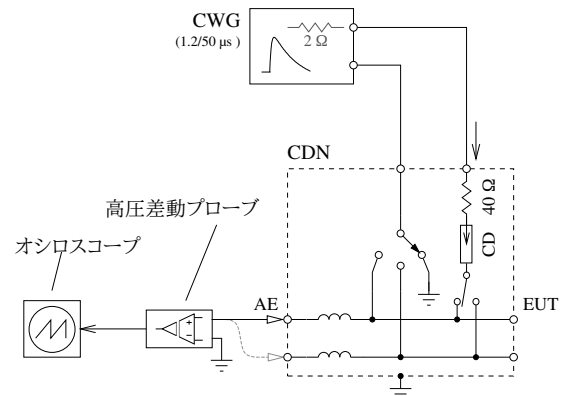


図 16: 非対称相互接続線用 CDN の校正 — AE 側の残留電圧の測定 (ライン-PE)

### 3.5 対称相互接続線用 CDN の校正

- この規格の Table 9 (表8) で示された項目を測定する。  
この測定は、実際に試験で用いる構成で行なうべきである。
- 対称相互接続線用 CDN (§2.3) の EUT ポートで測定された開放回路電圧波形や短絡回路電流波形はこの規格の Table 10 の規定 (表5) を満足すること。

<sup>†21</sup> 規格の Table 4 には、その値が理想的な試験発生器でのもので、発生器のパラメータが許容範囲に近い場合、その発生器と CDN の組み合わせは許容範囲を超える値を生じるかも知れない旨が記載されている。これは実際の発生器と CDN を組み合わせて測定した時の波形がこの範囲に入らなくても良いように読めるかも知れないが、規格の §6.3.2 には開放回路条件と短絡回路条件での波形の検証が必要である旨、またその結果が特定の発生器と CDN の組み合わせに対してのみ有効である旨が明記されている。

	結合	測定	AE 側	EUT 側
EUT 側 サージ電圧	単一のライン— PE	単一のライン; ピーク電圧、波頭長、持続時間	全ライン PEに短絡	開放
EUT 側 サージ電流	単一のライン— PE	単一のライン; ピーク電流、波頭長、持続時間	全ライン PEに短絡	短絡
EUT 側 サージ電圧	単一のライン— ライン	単一のライン; ピーク電圧、波頭長、持続時間	全ライン PEに短絡	開放
EUT 側 サージ電流	単一のライン— ライン	単一のライン; ピーク電流、波頭長、持続時間	全ライン PEに短絡	短絡
AE 側 残留電圧	単一のライン— PE	各ライン—PE; ピーク電圧	開放	開放

表 7: 非対称相互接続線用 CDN の校正プロセスの要約 (Table 7 より)

	結合	測定	AE 側	EUT 側
EUT 側 サージ電圧	コモン・モード; 全ライン—PE	全ライン—括接続; ピーク電圧、波頭長、持続時間	全ライン PEに短絡	開放; 全ライン— 括接続
EUT 側 サージ電流	コモン・モード; 全ライン—PE	全ライン—括接続; ピーク電流、波頭長、持続時間	全ライン PEに短絡	全ライン PEに接続
AE 側 残留電圧	コモン・モード; 全ライン—PE	全ライン—括接続; ピーク電圧	開放	開放

表 8: 対称相互接続線用 CDN の校正プロセスの要約 (Table 9 より)

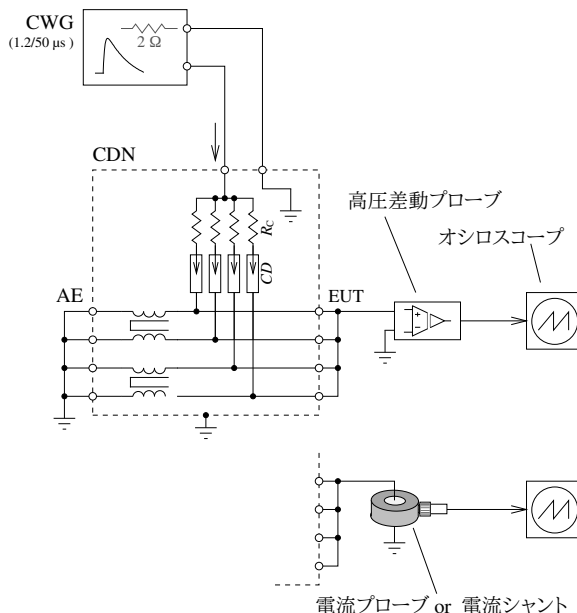


図 17: 対称相互接続線用 CDN の校正 — EUT 側のサージ電圧/サージ電流の測定 (ライン—PE)

### 3.6 屋外対称通信線用 CDN の校正

- この規格の Table A.3 (表9) で示された項目を測定する。  
この測定は、実際に試験で用いる構成で行なうべきである。
- 校正はペア毎に行なう。
- EUT ポートの開放回路電圧波形と短絡回路電流波形のピーク値、波頭長、及び持続時間はこの規格の Table A.4 の規定 (表6) を満足すること。
- AE ポートの残留電圧 (サージの漏洩) も測定/記録すべきであるが、これに対する限度は規定されていない。
- この測定の結果はその特定の CWG との組み合わせに対してのみ有効となる

	結合	測定	AE 側	EUT 側
EUT 側 サージ電圧	コモン・モード; 1 対—PE	対となるラインを一括接続; ピーク電圧、波頭長、持続時間	全ライン PE に短絡	開放; 対となるラ インを一括 接続
EUT 側 サージ電流	コモン・モード; 1 対—PE	対となるラインを一括接続; ピーク電流、波頭長、持続時間	全ライン PE に短絡	対となるラ イン双方を PE に接続
AE 側 残留電圧	コモン・モード; 1 対—PE	対となるラインを一括接続; ピーク電圧	開放	開放

表 9: 屋外対称通信線用 CDN の校正プロセスの要約 (Table A.3 より)

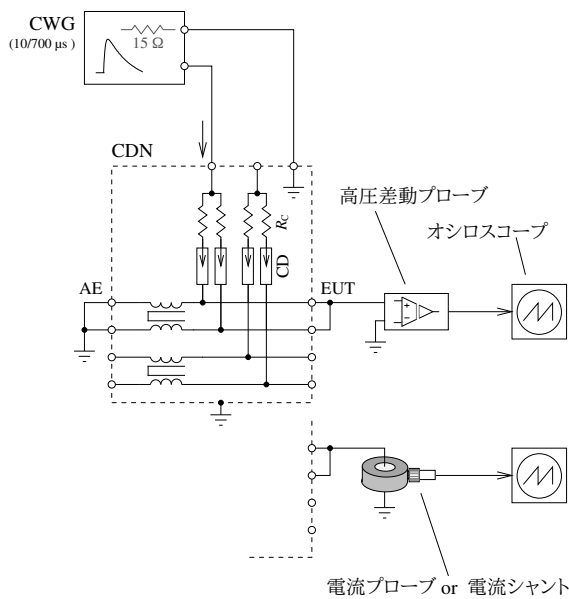


図 18: 屋外対称通信線用 CDN の校正 — EUT 側のサージ電圧/サージ電流の測定 (ライン-PE)

## 4 試験

### 4.1 共通事項

- 試験に先立ち、試験システムが正常に機能していること (少なくとも CDN の出力にサージが出ることを確認すべき)。
- 規定された試験レベルまでの全ての試験レベル (表 2) で、例えば試験レベルが 2 kV であれば 0.5 kV、1 kV、及び 2 kV で試験する。<sup>†22</sup>
- それぞれの条件について正、負それぞれ 5 回づつの印加を行なう。

<sup>†22</sup> IEC 61000-4-5:2005 では、二次保護の試験では最悪条件の一次保護の降伏電圧 (レットスルー・レベル) のすぐ下で試験することも求められている (§5.2)。

- インパルスの印加の間隔は 1 分以下とする。  
より短い間隔での試験を行なっても良いが、短い間隔での試験で不合格となり、1 分毎での試験で合格となる場合、1 分毎での試験を優先する。<sup>†23</sup>
- CDN と EUT のあいだのケーブルの長さは 2 m 以下とする。
- シールド線の試験に際してはグラウンド・プレーンが必要となることを除き、試験時の EUT や周辺機器の配置に関する規定 (例えばグラウンド・プレーンに関する要求や機器を置く高さの規定のような) はない。  
試験は、例えば IEC 61000-4-4 と同様のセットアップで行なうことができる。

### 4.2 電源ポートへの印加

- 1.2/50 μs — 8/20 μs の CWG (§2.1) と EUT の電流定格に対する要求に適合する電源線用 (§2.2) を用い、ライン間には 18 μF を介して、ライン — 接地間には 9 μF + 10 Ω を介して印加する。

<sup>†23</sup> 例えばサージ保護のためにバリスタが入れられている場合、サージを印加するとバリスタはサージを吸収して熱くなる。通常、バリスタの大きさは単発的なサージに伴う温度上昇が許容範囲内となるように設計されるであろうが、サージを短い間隔で印加すると温度が異常に上昇して単発的なサージでは生じない筈の焼損に至ることがある。最大の試験レベルは 1 分毎に、低い試験レベルはより短い間隔で印加する<sup>†24</sup> ような中間的な対応を行なうこともできるかも知れない。

<sup>†24</sup> 最大の試験レベルで 1 分毎の印加に耐えるのであれば、その 1/2 の試験レベルでは 30 秒毎、1/4 の試験レベルでは 15 秒毎の印加には十分に耐えられると思われる。

- 二重絶縁の機器については、製品群/製品規格で他の規定がない限り、ライン-接地間のサージの印加は不要となる。<sup>†25</sup>
- 交流電源の場合は電源波形の 0°、90°、180°、及び 270° に同期させて、それぞれの条件について正、負それぞれ 5 回づつの印加を行なう。  
例えば N が接地されている場合の N と PE のあいだのように電圧が印加されていない箇所の試験では位相角の同期は不要で、任意のタイミングで正、負それぞれ 5 回づつの印加を行えば良い。

#### 4.3 非シールド相互接続ポートへの印加

- 屋外対称通信線以外の非シールド相互接続ポートは 1.2/50  $\mu\text{s}$  — 8/20  $\mu\text{s}$  の CWG (§2.1) と適切な相互接続線用 CDN (§2.3) を用いて試験する。

使用する結合デバイス (CD) は試験対象のポート上の信号や電源を考慮して適切なものを選択する。

- 非シールド対称相互接続ポートには対称相互接続線用 CDN (図 12, 図 13, 表 5) を用いてコモン・モードで、すなわちそのポートの全ての導体と接地のあいだに一括で印加する。

非シールド非対称相互接続ポートには非対称相互接続線用 CDN (図 11, 表 4) を用いてそれぞれのライン-接地間やライン-ライン間に印加する。但し、製品群/製品規格でライン-ライン間の試験が規定されていることは稀である。

<sup>†25</sup> だが、その機器が二重絶縁であっても、実際の使用に際してその金属の筐体が接地されることがある、機能接地がある、それに接続された周辺機器が接地に接続されることがあるなど、その機器をライン-接地間のサージに影響されやすくする要因があるかも知れない。例えば商用電源と電話回線 (古典的なメタルの加入者線) に接続される家庭用の電話機やその他の通信機器は商用電源と電話回線のあいだに生じるサージによる被害を受けやすく、しばしばバイパス・アレスタによる保護が行なわれている。規格の規定は別として、想定される使用状況、またその影響を考慮し、必要であれば規格上は不要となるとしてもそれを試験で確認することも考えると良いかも知れない。IEC 61000-4-5:2005 では二重絶縁機器は接地がある機器と同様に、だが接地接続を追加接続せずに試験するように、そして他に生じ得る接地への経路がない場合にはライン-接地間の試験は不要と規定されている。

#### 4.4 非シールド屋外対称通信ポートへの印加

- 電話線などの非シールド屋外対称通信ポートは 10/700  $\mu\text{s}$  — 5/320  $\mu\text{s}$  の CWG (§2.1) と屋外対称通信線用 CDN (§2.4) を用いて試験する。
- サージはコモン・モードで、すなわちそのポートの全ての導体と接地のあいだに一括で印加する。
- 常に指定された一次保護デバイス<sup>†26</sup>とともに用いることが意図されたポートは一次保護デバイスとともに試験する。

#### 4.5 シールド線への印加

- この試験法は両端が接地されたシールド線のみ適用され、シールドが接地されない、あるいは片端のみで接地される場合はシールドされていない相互接続線 (§4.3) と同様に試験する。

- 試験対象のポートとその先のデバイスまでのあいだのケーブルの長さは、20 m (推奨)、もしくは製造業者が実際の設置で使用される組み立て済みのケーブルを用意している場合はその 10 m よりも長い最短のものとする。このケーブルの余長は非誘導的に束ねるかバイファラ巻きとし (§5.1)、絶縁台の上に置く。

製造業者がケーブルの最大長を 10 m 以下と規定している場合、そのケーブルの試験は不要である。<sup>†27</sup>

- EUT やそれと接続されたその他の機器は適切な絶縁台で床面から絶縁する。
- EUT、またその試験対象ポート以外の全ての接続 (それらのポートに接続された機器) を適切な絶縁変圧器か減結合回路網で接地から分離し、試験対象ポートに接続されたケーブルの末端 (そのポートに接続された機器) は接地する。

<sup>†26</sup> 外付けの避雷器 (アレスタ) など。電話線 (加入者線) の場合、建屋への引き込み部の近くで保安器に通される管である。

<sup>†27</sup> この試験法を参照している規格でこれと異なる規定 (例えば、シールドの有無に関わらず、信号線は 30 m を超える、あるいは建屋から出る場合にのみこの試験の対象となるような) があるかも知れない。

接地から分離された機器に保護接地がある場合、保護接地は接地しない。<sup>†28</sup>

- EUT が金属の筐体を持つ場合、その筐体と接地のあいだにサージを印加する (図 19)。<sup>†29†30†31</sup> 試験対象のポートに接続されたケーブルの末端は接地されているので、これによってそのケーブルを通して EUT にサージが注入されることになる。

EUT の筐体が金属でない場合、サージはシールドの EUT 側の端とのあいだに印加する。<sup>†32</sup>

## 5 補足

### 5.1 ケーブルの余長の処理

シールド線への印加 (§4.5) に際しては長いケーブルを使用するため、余長の適切な処理が必要となる。

規格ではケーブルは非誘導的に束ねるかバイファラ巻きとするように述べられている。その具体的な方法は述べられていないが、インダクタンスを抑えるためにはケーブルを流れる電流が発生する磁界が相殺されるようにすれば良く、このためにはケーブルの逆方向となる部分を互いに密着させてそれらが発生する磁界が相殺されるように、またケーブルがループを作る場合はそのループからの磁界が逆方向のループで相殺されるようにすれば良い。

ケーブルを束ねる場合、簡単には、例えばケーブルを中央付近で半分に折り返した上で、そのペアを保ったままで必要な長さに折り返して束ねるようにすれば良いかも知れない (図 20)。<sup>†33</sup>

平面でのバイファラ巻きの例は図 21 のようなもので、ケーブルを折り返した上で螺旋状に巻いて作ることができる。

### 5.2 サージ防護デバイスの影響

バリスタのようなサージ防護デバイスはサージ波形を規定された電圧でクリップするような応答を示す。

これに対して、GDT (ガス放電管) に代表されるようなスイッチング・タイプのサージ防護デバイスは、印加された電圧が降伏電圧 (放電開始電圧) を超えると急速に導通し、電圧を非常に低く抑えるような応答を示す (図 22)。

このタイプのサージ防護デバイスは降伏電圧よりも低いサージに対しては保護を与えず、このため降伏電圧を超えるサージよりも降伏電圧よりもやや低いサージの方が後続の回路への影響が大きくなることがある。

従って、そのようなサージ防護デバイスが用いられている場合、IEC 61000-4-5:2005 で言及されているように、降伏電圧よりも僅かに低い電圧のサージでの評価を行なう価値があるかも知れない。

### 5.3 試験レベルの例 — IEC 61000-6-2:2016

- 信号/制御ポート: ライン—接地:  $\pm 1$  kV  
30 m よりも長い、あるいは建屋の外に出るラインに接続されるポートのみに適用。
- 入出力 DC 電源ポート: ライン—接地:  $\pm 1$  kV、  
ライン—ライン:  $\pm 0.5$  kV  
30 m よりも長い、あるいは建屋の外に出るラインに接続されるポートのみに適用; 電池や再充電のためには機器から切り離さなければなら

<sup>†28</sup> 絶縁変圧器を用いずに保護接地を切り離す場合、感電の危険を生じないように注意すべきであろう。

<sup>†29</sup> 規格では概ねこのように述べられているが、実際には、例えば EUT が金属の筐体を持つがその筐体がケーブルのシールドや接地に接続されていない場合のように、サージを筐体に印加したのでは実際にサージを受けた時の影響を模擬できず、適切に試験を行なうためには実際にサージを受けた時の影響を想定して印加方法を工夫することが必要となるかも知れない。ケーブルのシールドと金属の筐体が接続されているとしても筐体のどの位置にサージ発生器を接続するかによって試験の結果が有意に変わる可能性も考えられるが、ケーブルのシールドが EUT や周辺機器の保護接地と低インピーダンスで接続されているならば EUT と周辺機器の保護接地端子のあいだにサージを印加するのが簡単で、また実際にサージを受けた時のサージ電流の経路を良く模擬できそうである。

<sup>†30</sup> この試験法では筐体にサージが直接現れる可能性があることに注意。

<sup>†31</sup> その筐体は試験対称のケーブルのシールドを通して接地されている筈ではあるものの、この試験では EUT の筐体とグラウンド・プレーンのあいだにサージを印加することになるため、安全上の適切な配慮が必要となりそうである。

<sup>†32</sup> 実際の使用状況においてサージが EUT と周辺機器の接地のあいだに生じることが予期されるかも知れず、その状況は EUT の保護接地端子にサージを印加することでより良く模擬できるかも知れない。

<sup>†33</sup> この方法では 2 回目以降の折り返しは管理されておらず、その束ねは最良のものとはならないだろう。だが、少なくともその束ねは逆方向となる部分が入り混じった、また折り返しによって生じるループも様々な方向を向いたものが入り混じったものとなり、簡単な作業で比較的低インピーダンスの束ねを得ることはできそうである。



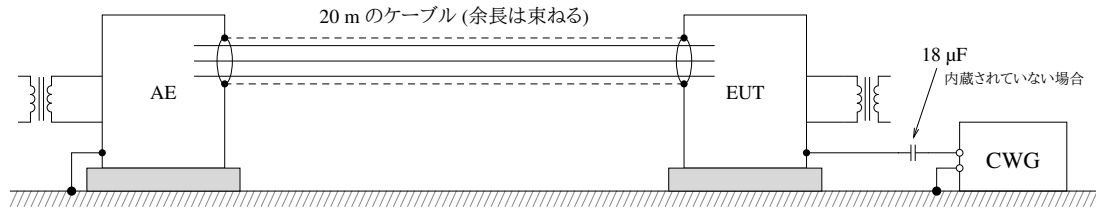


図 19: シールド線へのサージの印加

- (1) ケーブルを半分に折り返し、
- (2) そのペアを保ったままで適当な長さで折り返し、
- (3) 束ねる

図 20: 簡単な束ね方の例

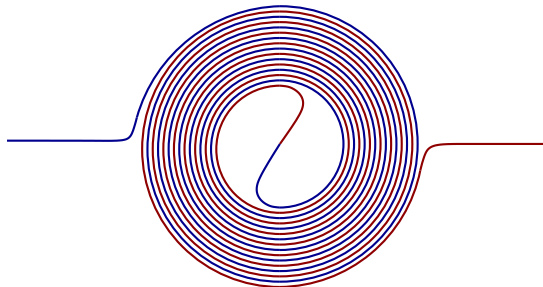


図 21: バイファラ巻きの例

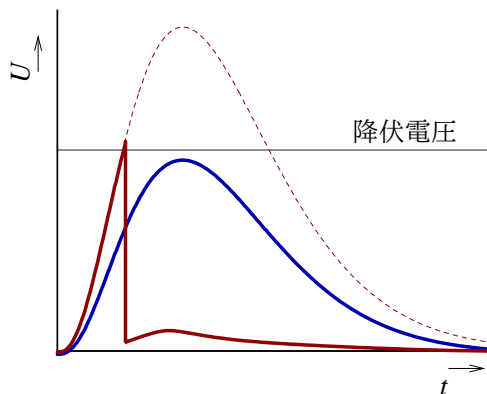


図 22: GDT の応答のイメージ

ない二次電池への接続が意図された入力ポートには適用しない。

市販の試験機器 (例えば CDN) が存在しない電源電圧の場合は試験は不要。

AC/DC 電源アダプタとともに用いることが意図された DC 入力ポートを持つ機器は製造業者が規定した AC/DC 電源アダプタの入力で試験

し、それが規定されていない場合はこの試験レベルで DC 電源ポートで試験する。

- 入出力 AC 電源ポート: ライン—接地:  $\pm 2$  kV、  
ライン—ライン:  $\pm 1$  kV

## 5.4 雷インパルスとの比較

雷撃に伴う電流の模擬には、しばしば 200 kA に達するような振幅の 10/350  $\mu$ s のインパルス電流が用いられる (図 23)。

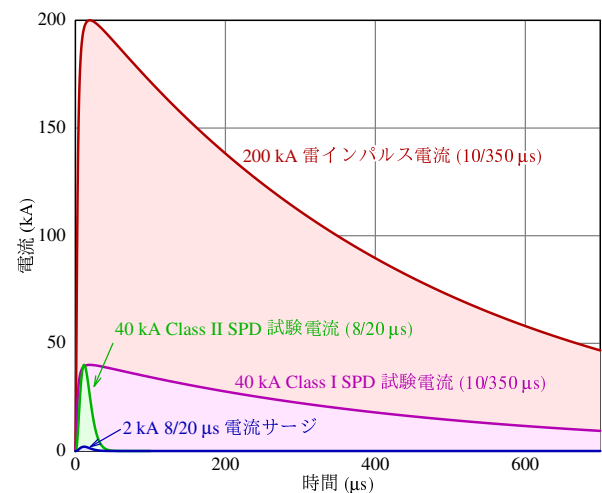


図 23: 雷インパルス電流との比較

また、雷撃に伴う過電圧への耐性の評価では、しばしば 100 kV から 1 MV のオーダーの振幅のインパルス電圧が用いられる。

このような電圧と電流を同時に発生させることは困難であり、目的に応じてインパルス電圧とインパルス電流が使い分けられている。このような高レベルのインパルス電流やインパルス電圧での試験のためにはかなり大型の試験設備、例えば図 24 のようなものが必要となる。



(Photo by Darkking3, licensed under CC BY 3.0)

図 24: 高電圧インパルス試験システムの例 — 手前のタワーが発生器、奥のタワーが高圧分圧器

## 5.5 関連規格

- IEC 61000-4-12 — リング・ウェーブ  
電源系統上での開閉や雷の影響などによって生じることがある振動性の過電圧の影響を模擬する。
- IEC 61000-4-18 — 減衰振動波  
中圧や高圧の開閉装置の開閉に伴って生じるような激しい振動波形のバーストの影響を模擬する。
- IEC 61000-4-9 — インパルス磁界  
電源系統上での開閉や雷の影響などによって生じることがある単方向のパルス性の磁界の影響を模擬するもので、IEC 61000-4-5 と同様の  $8/20 \mu\text{s}$  の波形が用いられる。
- IEC 61000-4-10 — 減衰振動波磁界  
中圧や高圧の開閉装置の開閉に伴って生じるような減衰振動波に伴う磁界の影響を模擬するもので、IEC 61000-4-18 と同様の減衰振動波が用いられる。
- DO-160G §22<sup>[4]</sup>, MIL-STD-461G CS117<sup>[6]</sup> — 雷誘導トランジェント

雷からの誘導によってケーブル上に生じるような過渡妨害の影響を模擬するもので、振動性の波形、多重ストローク、多重バーストを含む多様な波形が用いられる。

- DO-160G §23.4.1<sup>[5]</sup> — 高圧着雷試験  
直撃雷の影響を模擬するもので、100 kV から 1 MV のオーダーの振幅のインパルス電圧が用いられる。
- DO-160G §23.4.2<sup>[5]</sup> — 高電流物理損傷試験  
雷撃に伴う電流の影響を模擬するもので、最大で 200 kA に達するような振幅のインパルス電流が用いられる。

## 6 参考資料

- [1] IEC 61000-4-5:2014, *Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-5: Testing and measurement techniques — Surge immunity test*
- [2] 雷保護と接地マニュアル: IT 社会のアキレス腱, ピーター ハッセ, ヨハネス ウィジンガー, 加藤 幸二郎 訳, 2003, ISBN: 4501110902
- [3] 最新の雷サージ防護システム設計 (JIS 使い方シリーズ), 黒沢 秀行, 木島 均 他, 2006, ISBN: 4542303977
- [4] 航空用機器の EMC — RTCA DO-160G の概要 — Part 3: 雷誘導トランジェント・サセプティビリティ、及び静電気放電, 株式会社 e・オータマ, 佐藤, 2020,  
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [5] 航空用機器の EMC — RTCA DO-160G の概要 — Part 4: 雷の直接的な影響, 株式会社 e・オータマ, 佐藤, 2020,  
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [6] 軍需機器の EMC — MIL-STD-461G の概要 — Part 3: 雷誘導トランジェント、及び過渡電磁界へのサセプティビリティ (CS117, RS105), 株式会社 e・オータマ, 佐藤, 2021,  
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>

© 2024 e-OHTAMA, LTD.

All rights reserved.

免責条項 — 当社ならびに著者は、この文書の情報に関して細心の注意を払っておりますが、その正確性、有用性、完全性、その利用に起因する損害等に関し、一切の責任を負いません。