

IEC 61000-4-6 の概要 — 無線周波伝導妨害イミュニティ試験の方法

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2024 年 9 月 24 日

目次

1	概要	1
1.1	背景	1
1.2	試験の原理	2
2	使用機器	3
2.1	試験発生器	3
2.1.1	信号発生器	3
2.1.2	電力増幅器	3
2.1.3	アッテネータ	3
2.1.4	フィルタ	3
2.2	方向性結合器、パワーメータ	3
2.3	注入デバイス	3
2.3.1	CDN (結合/減結合回路網)	3
2.3.2	EM クランプ	5
2.3.3	電流注入クランプ	5
2.3.4	直接注入デバイス	6
2.4	減結合回路網	6
2.5	減結合クランプ	6
3	試験	7
3.1	試験レベル	7
3.2	注入方法の選択	7
3.3	試験セットアップ	7
3.3.1	CDN での試験	7
3.3.2	EM クランプや電流注入クランプでの試験	10
3.3.3	直接注入での試験	11
3.3.4	ポートの終端の優先順位	12
4	検証と校正	12
4.1	CDN の EUT ポートのインピーダンスの確認	12
4.2	150 Ω — 50 Ω アダプタの挿入損失の確認	12
4.3	電流注入クランプによる伝送損失の増加の確認	13
4.4	EM クランプの特性の同定	13
4.5	減結合クランプの特性の同定	14
4.6	試験発生器の設定 (試験レベルの設定)	14
5	補足	16
5.1	複数の周波数の同時印加	16
5.2	注入クランプの AE 側の影響	17
5.2.1	AE 側のケーブル長の影響	17
5.2.2	AE 側が開放の場合	17
6	参考資料	18

1 概要

IEC 61000-4-6 は無線周波電磁界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。

このような妨害は広い周波数範囲の、また様々なスペクトラムのものとなるが、この規格は 150 kHz ~ 80 MHz の周波数範囲^{†1}の狭帯域妨害によるイミュニティ試験をカバーする。

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 61000-4-6:2023^[1] 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^[1]を参照していただきたい。

1.1 背景

無線での放送や通信などのために様々な周波数の無線周波電磁界 (電磁波) が用いられている。このような無線周波電磁界が他の電子機器の動作に影響して誤動作や性能の低下のような好ましくない影響を引き起こす場合があることから、電子機器のそのような無線周波電磁界に対するイミュニティの評価の方法が必要とされている。

無線周波電磁界に対するイミュニティの評価の方法の 1 つは、例えば IEC 61000-4-3^{[2][3]} で述べられているような、機器とケーブルを実際に無線周波電磁界に曝すものとなる。

これは素直な方法であるが、周波数が低くなると、

^{†1} 規格によってはこの規格の試験法がより広い周波数範囲で適用されることもある。例えば CISPR 14-2:2015 は 150 kHz ~ 230 MHz、また IEC 61326-3-2:2008 (IEC 61326-3-2:2017 では 10 ~ 150 kHz は IEC 61000-4-16 による試験に切り替えられた) は 10 kHz ~ 80 MHz についての試験を含む。

- 機器の大きさが波長に対して小さくなるような周波数では、周波数の低下に伴って電磁界が機器そのものに直接結合して影響を与えにくくなり、ケーブルへの結合を介した影響が支配的となる傾向が強まることから、イミュニティ試験でケーブルに妨害を結合させることの重要性が益々高まりそうで、
- だが、無線周波電磁界をケーブルに有効に結合させるためにはその波長の $1/4$ ($\lambda/4$) 程度以上の長さのケーブルを電磁界に曝すことが必要となりそうだが、例えば 1 MHz では $\lambda/4$ は 75 m、150 kHz では $\lambda/4$ は 500 m であって試験でそのような長いケーブルを敷設して電磁界に曝すことは実際的ではなく、また
- そのような周波数では遠方からの電磁波を模擬する放射を発生させることは容易ではなく^{†2}、またイミュニティ試験で必要となる強度の無線周波電磁界を広い範囲に照射することも容易ではない

ことから、その代わりとなる実際的な方法が望まれる。

十分に低い周波数においては多くの場合は電磁界の機器への影響はケーブルを介したものが支配的となると仮定され、それが実際に無線周波電磁界に曝すことによる試験の完全な代替となるとは限らないものの、多くの場合はケーブルに無線周波妨害を注入することでその影響を模擬できそうである。このため、この種の方法が低い周波数範囲の無線周波電磁界に対するイミュニティ試験の方法として広く用いられている。

この規格、IEC 61000-4-6 はケーブルに無線周波妨害を注入する方法でのイミュニティ試験について定めた規格の1つで、機器とケーブルを無線周波電磁界に曝す IEC 61000-4-3^{[2][3]} のような方法と組み合わせ用いられる。IEC 61000-4-3 のような試験法との切り替えをどの周波数で行なうかにはある程度の自由度があるが、これらの規格では 80 MHz

^{†2} 低い周波数の電磁波を効率的に発生させるためには物理的に大きいアンテナが必要となり、また遠方からの電磁波の模擬のためには距離を大きく取ることが必要となる。低い周波数で高い電界を発生させることができる“E-field generator”などと呼ばれるデバイスが用いられることもあるが、これはその名前の通り電界のみを発生する。TEM セルやストリップラインは低い周波数から使用できるが、機器とケーブル全体への照射のためには大きなものが必要となり、使用可能な周波数範囲の上限はその大きさに応じて低下する。

($\lambda/4$ は 1 m 弱となる) が通常の境界として選択されている。

また、150 kHz よりも低い周波数の妨害に対するイミュニティ試験は IEC 61000-4-16 で扱われている。

1.2 試験の原理

ケーブルが接続された機器が無線周波電磁界に曝された時、機器に接続されたケーブル・システムが共振状態の受信アンテナ ($\lambda/4$ や $\lambda/2$ のダイポールや折り返しダイポール) として振る舞って無線周波電磁界を拾い上げるものと仮定され、この規格での試験ではこれが 150 Ω のコモン・モード・インピーダンスで代表される。

これを模擬するため、それぞれの試験でいずれか1つのケーブルが試験対象として選択され、150 Ω のコモン・モード・インピーダンスの妨害源^{†3}から無線周波妨害が注入される。この際、その機器に他にケーブルを接続できる場合、その1つを妨害の出口として選択して150 Ω のコモン・モード・インピーダンスで終端しておく。これによってEUTを通過するように妨害電流が流れるようにし、EUT内の各部を無線周波の電流と電圧に、そしてそれに伴う無線周波電磁界に曝すことによってイミュニティの評価を行なう(図1)。

機器とケーブルが実際に無線周波電磁界に曝された時は機器への直接の結合も生じるだろうが、この試験法ではこれは直接模擬されない。また、実際の状況ではその全てのケーブルに様々なレベルと様々な位相の妨害を同時に受ける(そして、勿論、一度に単一の周波数の妨害のみを受けるわけではなく、様々な妨害源からの様々な周波数の妨害を同時に受ける)ことになるだろうが、この試験法では妨害は単一のケーブルのみに注入される。従ってこの試験法での実際の状況の模擬はかなり限定的なものとなりそうである。

^{†3} この150 Ω のコモン・モード・インピーダンスは、CDNでの注入の場合は試験発生器の50 Ω の出力インピーダンスとCDNが与える追加の100 Ω のインピーダンスで、クランプでの注入の場合はクランプの反対側に接続されたAEの150 Ω の終端によって実現される(図14、図18)。

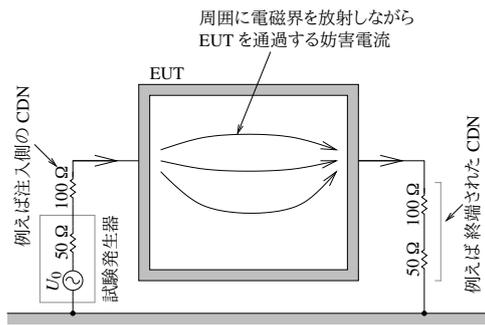


図 1: 試験の原理

2 使用機器

2.1 試験発生器

試験発生器は注入デバイスに注入すべき所望の妨害を発生できる出力インピーダンス $50\ \Omega$ のもので、典型的には以下の要素から構成される。

2.1.1 信号発生器

試験周波数範囲（通常は $150\ \text{kHz} \sim 80\ \text{MHz}$ ）の、試験で必要となる変調が掛けられた信号を発生させられる信号発生器を用いる。

変調は、通常は図 2 のような変調周波数 $1\ \text{kHz} \pm 0.1\ \text{kHz}$ 、変調度 $(80^{+5}_{-20})\%$ の振幅変調が用いられる。^{†4}

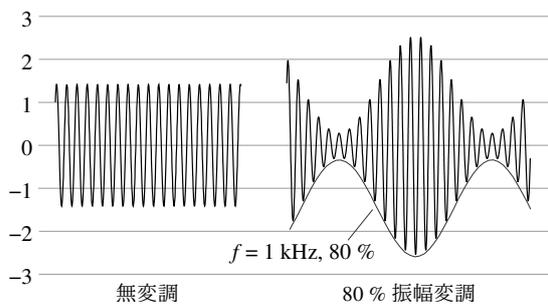


図 2: 振幅変調

2.1.2 電力増幅器

信号発生器で発生した信号は電力増幅器で所望のレベルまで増幅される。

この電力増幅器は、変調 (§2.1.1)、またアッテネータ (§2.1.3) の影響を考慮して所望の試験レベルの発

^{†4} IEC 61000-4-3:2020^{[2][3]} では $(80 \pm 10)\%$ となっている。

生のために必要となる出力で飽和しない、またスプリアスがキャリアよりも $15\ \text{dB}$ 以上低くなるようなものを用いる。

2.1.3 アッテネータ

出力の VSWR の改善のため、電力増幅器の出力に $6\ \text{dB}$ 以上の減衰率の適切な定格のアッテネータを挿入する。

2.1.4 フィルタ

必要な場合、スプリアスの低減のために出力に適切なフィルタを入れても良い。

2.2 方向性結合器、パワーメータ

この規格では試験発生器から注入デバイスに送られる進行波電力が妨害レベルの制御のための制御パラメータとして示されている。^{†5}

この進行波電力は試験発生器の出力に方向性結合器とパワーメータを接続して、あるいはそれに相当する手段で管理することができるだろう。

2.3 注入デバイス

2.3.1 CDN（結合/減結合回路網）

CDN（結合/減結合回路網）は AE（補助機器）側の減結合のための減結合回路網と EUT 側に妨害を注入するための結合回路網から成るもので、接続対象のケーブルに応じて次のようなタイプのものが用いられる：

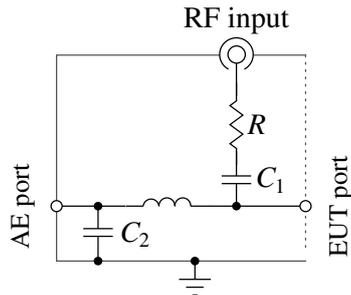
- CDN-Mn — 電源線用 (図 3, 図 4)

例えば：

- CDN-M1 — PE
- CDN-M2 — L+N
- CDN-M3 — L+N+PE, L1+L2+L3^{†6}

^{†5} IEC 61000-4-6:2013 には試験機器の安定性を保証できるならば RF 発生器出力をレベル設定のデータを再現するように設定することもできる旨の記載があったが、この記載は削除されている。

^{†6} 図 4 で示したものはラインの 1 つが PE 専用となっている。L1+L2+L3 での使用のためには 3 ライン全てが電源導体として設計された (C_1 が接続され、所定の電圧/電流定格や耐電圧が確保された) ものが必要となる。



$R = 100 \Omega$, $C_1 = 22 \text{ nF}$ (typ.), $C_2 = 47 \text{ nF}$ (typ.)

図 3: CDN の原理 — CDN-M1

- CDN-M4 — L1+L2+L3+PE
- CDN-M5 — L1+L2+L3+N+PE

● CDN- S_n — シールド線用 (図 5)

例えば :

- CDN-S1 — 同軸ケーブル
- CDN-S8 (RJ45) — STP Ethernet
- CDN-S9 (USB) — USB 3.x

● CDN- T_n — 非シールド平衡線用 (図 6, 図 7)

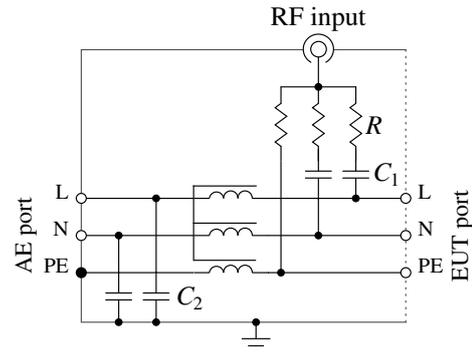
例えば :

- CDN-T2 — 電話線
- CDN-T4 — 10Base-T, 100-Base-TX
- CDN-T8 — 1000Base-T

● CDN- AF_n — 非シールド不平衡線用 (図 8, 図 9)

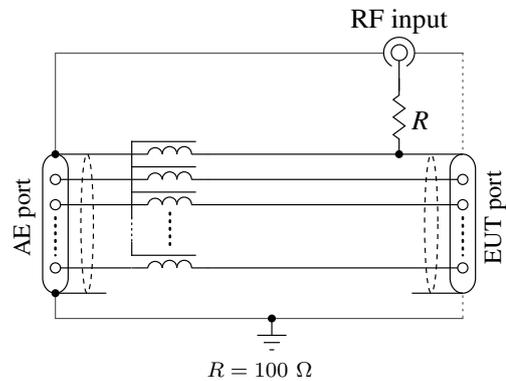
いずれの CDN を EUT ポートから見た共通モードインピーダンスも、AE ポートの状態と無関係に、RF 入力ポートを 50Ω で終端した時は 150Ω 前後 (図 11)、RF 入力ポートを開放のままとした時は高くなるようになっており、

- RF 入力ポートに出力インピーダンス 50Ω の試験発生器から高周波電力を入力してそのケーブルへの妨害の印加を行なう
- RF 入力ポートを 50Ω の同軸終端器で終端してそのケーブルの 150Ω での終端を行なう
- RF 入力ポートを開放のままとしてそのケーブルを減結合する



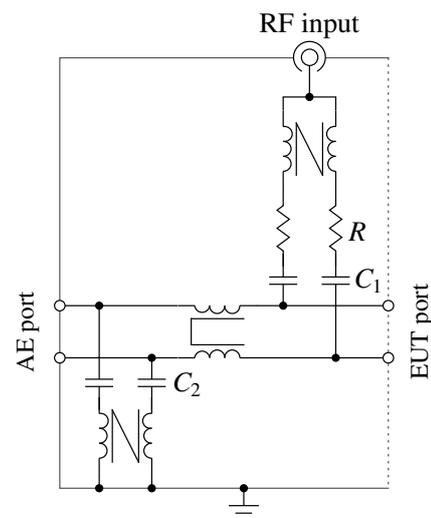
R : n をライン数として、 $R = 100 \Omega \times n$
(CDN M3 の場合は 300Ω)
 $C_1 = 10 \text{ nF}$ (typ.), $C_2 = 47 \text{ nF}$ (typ.)

図 4: CDN の原理 — CDN- M_n



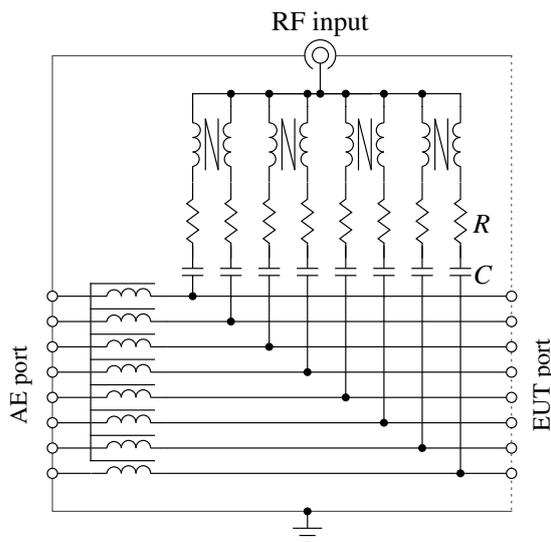
$R = 100 \Omega$

図 5: CDN の原理 — CDN- S_n



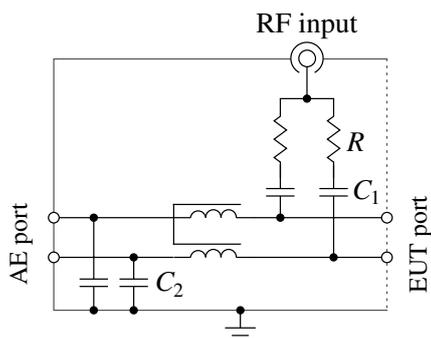
$R = 200 \Omega$, $C_1 = 10 \text{ nF}$ (typ.), $C_2 = 47 \text{ nF}$ (typ.)

図 6: CDN の原理 — CDN-T2



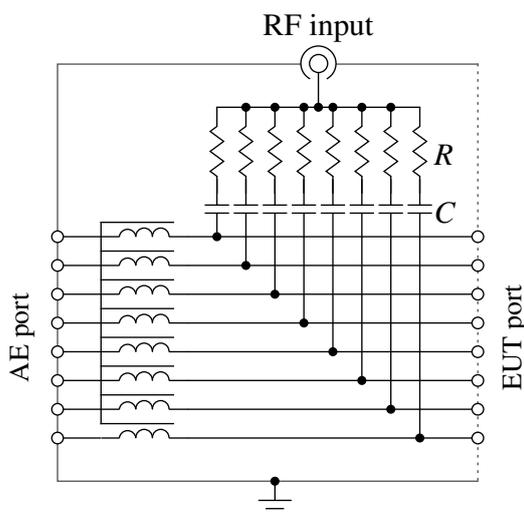
$$R = 800 \Omega, C = 2.2 \text{ nF (typ.)}$$

図 7: CDN の原理 — CDN-T8



$$R = 200 \Omega, C_1 = 10 \text{ nF (typ.)}, C_2 = 47 \text{ nF (typ.)}$$

図 8: CDN の原理 — CDN-AF2



$$R = 800 \Omega, C = 2.20 \text{ nF (typ.)}$$

図 9: CDN の原理 — CDN-AF8

ために用いられる。

CDN-Mn、CDN-Tn、CDN-AFn は試験対象のポートのライン数に合ったものが必要であり、ライン数が多いポートのためのもの (R の値が異なる) をライン数が少ないポートのために用いることはできない。

CDN の各ラインの電圧/電流定格、周波数範囲 (典型的には下限は 150 kHz か 10 kHz、上限は 80 MHz か 230 MHz)、最大試験電圧 (変調による増加分の考慮も必要) などは個別に規定されているので、用途に合ったものを正しく使用する必要がある。

2.3.2 EM クランプ

EM クランプ (図 10) はクランプ内に設けられた電極 (半円筒状の薄板) と印加対象のケーブルとのあいだの容量性結合 (静電結合) と電流注入クランプ (§2.3.3) と同様の誘導性結合 (磁気結合) の双方によって妨害の注入を行なうもので、印加対象のケーブルの外側から取り付けて非侵襲で妨害を注入することができる。

EM クランプは電流注入クランプ (§2.3.3) と異なり 10 MHz 程度以上の高い周波数範囲である程度方向性を持ち、AE 側の状態の試験への影響が、また注入された妨害の AE 側への影響が若干低減されるという特徴を持つ (§5.2)。

規格では EM クランプの特性は規定されていないが、特性の同定の方法 (§4.4) やその典型的なカーブが Annex A (*EM and decoupling clamps*) で示されている。^{†7}

2.3.3 電流注入クランプ

電流注入クランプ (図 12)^{†8†9} は印加対象のケーブルを二次巻線としたトランスとして働き誘導性結合によって非侵襲で妨害の印加を行なうもので、印加

^{†7} また、例という扱いにはなっているが、Figure A.1 (*Example: Construction details of the EM clamp*) では各部の寸法や部材の指定などを含む詳細な構造も示されており、市販の EM クランプはいずれもこれに準じたものとなっていると思われる。

^{†8} 電流クランプ、電流注入プローブ、BCI プローブなどと呼ばれることもある。

^{†9} 一次巻線の巻き数によって二次巻線側から見たインピーダンスが変わる (例えば 1:1 ならば 50 Ω 、5:1 ならば 2 Ω) が、この巻き数も規定されていない。

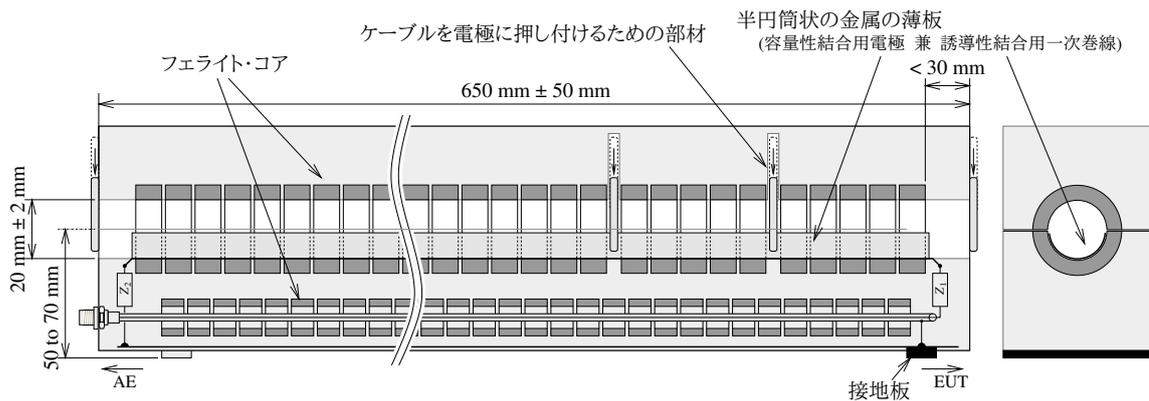


図 10: EM クランプの原理

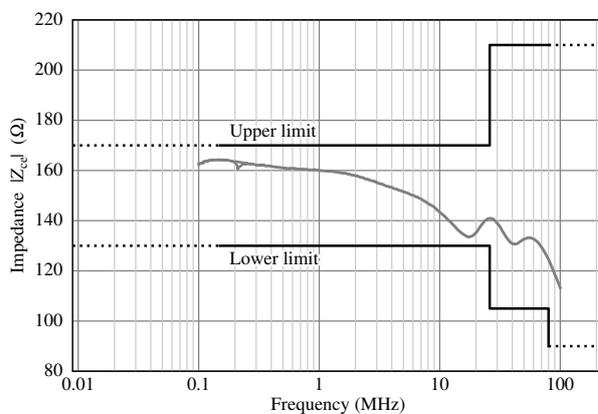


図 11: CDN の EUT ポートのインピーダンスの許容範囲と実測例

対象のケーブルの外側から取り付けて非侵襲で妨害を注入することができる。

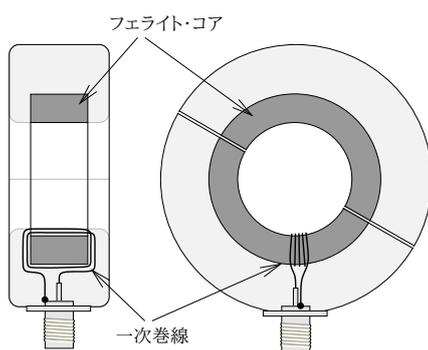


図 12: 電流注入クランプの原理

EM クランプよりも小型で、また形状の自由度が高くより太いケーブルにも対応できる。だが、EM クランプと異なり全く方向性を持たず、AE にも EUT と同様に妨害が注入されることが、また EM クランプと比較して AE 側の状態の EUT への妨害の注入

への影響がより強くなることが予期される (§5.2)。

2.3.4 直接注入デバイス

直接注入デバイスは 100Ω の低インダクタンスの抵抗^{†10}で、直接注入での試験 (§3.3.3) に際して試験発生器と試験対象のケーブルのシールドや外部導体とのあいだに接続される。

2.4 減結合回路網

減結合回路網は試験周波数範囲で必要な減結合を与えることが意図されたもので、以下のものを使用できる：

- 24 MHz 以下で 260Ω 以上、24 MHz 以上で 150Ω 以上のリアクタンスを持つ、例えばフェライト・コアを用いた $280 \mu\text{H}$ 以上のインダクタ；
- RF 入力ポートを開放のままとした CDN (§2.3.1)；
- CDN を使用できない場合、減結合クランプ (§2.5)。

2.5 減結合クランプ

減結合クランプ (図 13) は少なくとも $1 \sim 80 \text{ MHz}$ で 5 dB よりも大きい減結合 (§4.5) を与えるフェライト・チューブで、CDN などを使用できない場合に減結合のために用いられる。

^{†10} 規格では直接注入デバイスの具体的な構造や特性は述べられていないが、CDN (§2.3.1) や $150 \Omega - 50 \Omega$ アダプタを使用できるかも知れない。

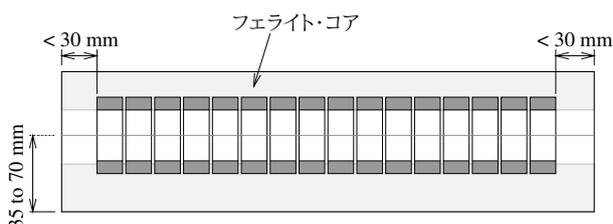


図 13: 減結合クランプの原理

3 試験

3.1 試験レベル

この規格では表 1 に示す試験レベルが規定されている:

レベル	電圧レベル (e.m.f.)
	U_0 (V)
1	1
2	3
3	10
X	特殊

表 1: 試験レベル

この試験レベルは試験発生器の起電力 (e.m.f.) で規定されており、理想的な状況では、図 1 に示したように、その起電力を 150Ω の注入インピーダンス (通常は試験発生器 (§2.1) の出力インピーダンスの 50Ω と注入側の CDN (§2.3.1) の 100Ω で与えられる) を介し、 150Ω (通常は EUT のいずれかのケーブルに接続された終端された CDN で与えられる) で終端された EUT に印加する形となる。

通常、1 kHz 80 % の振幅変調が適用された妨害を用い (§2.1.1)、1 % を超えない周波数ステップで周波数掃引して試験を行なう。

3.2 注入方法の選択

注入方法の選択のルールは規格の Figure 20 で示されており、次のようになる:

1. CDN を適用可能ならば、CDN (§3.3.1);
使用する CDN は試験されるポート内のワイヤの数に合わせて選択する。
2. CDN が適用可能でない (例えば CDN の減衰が EUT の意図された動作に悪影響を与える、

もしくはそのポートに対応した CDN が市場にない) ならば、

- (a) シールド・ケーブル^{†11}の場合、
 - i. EM クランプを適用可能ならば、EM クランプ (§3.3.2)
 - ii. さもなくば、直接注入 (§3.3.3) か電流注入クランプ (§3.3.2)
- (b) 非シールド・ケーブルの場合、EM クランプか電流注入クランプ

ここでは非シールド・ケーブルに対しては EM クランプと電流注入クランプが同格となっているが、簡単には次のような優先順位と考えるも良さそうである:^{†12}

1. CDN
2. EM クランプ
3. 電流注入クランプ、あるいはシールド・ケーブルの場合は直接注入

機器に接続される複数のケーブルが機器から 10 m 以上にわたってケーブル・トレイやコンジットの中に近接して引かれる場合、それらは単一のケーブルとして扱う。そのケーブルの束が太すぎる場合、その種類や機能 (例えば信号、電源、シールド線など) によって分け、またそれぞれの中で少なくとも 1 つのケーブルを個別に試験すべきである。

3.3 試験セットアップ

3.3.1 CDN での試験

EUT への妨害の印加を CDN を用いて行なう場合の試験セットアップのイメージを図 15 に示す。

EUT は壁やその他の金属の物体から 0.5 m 以上離してグラウンド・プレーンの上の (0.1 ± 0.05) m の絶縁材の上に、また EUT から外に出るケーブルはグラウンド・プレーンから 30 mm 以上の高さに引く。EUT と CDN などによる減結合なしに接続された

^{†11} 同軸ケーブルを含む。以下同様。

^{†12} 電流注入クランプよりも EM クランプの方が妨害の注入を安定して行なえるものと期待でき (§5.2)、EM クランプを使用できる時に電流注入クランプを使用する必要はなさそうに思われる。

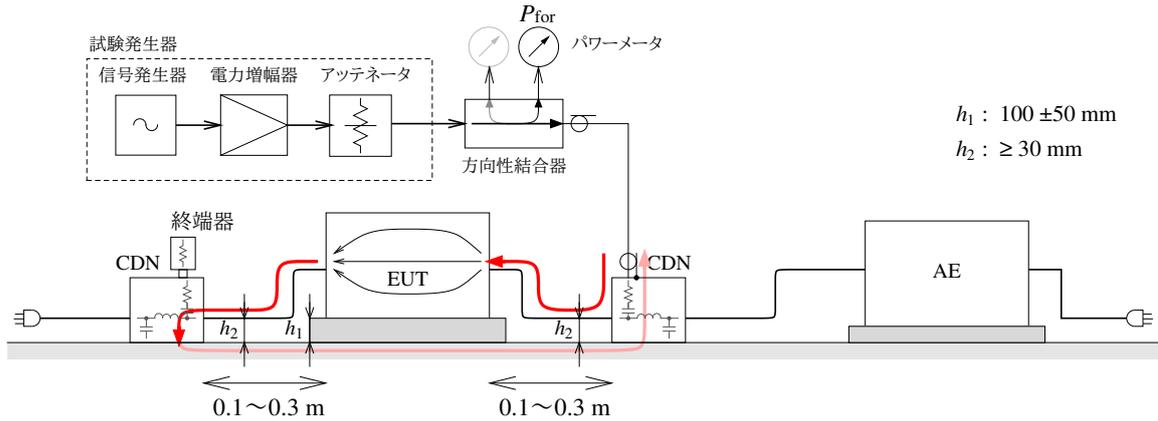


図 14: CDN での試験の原理

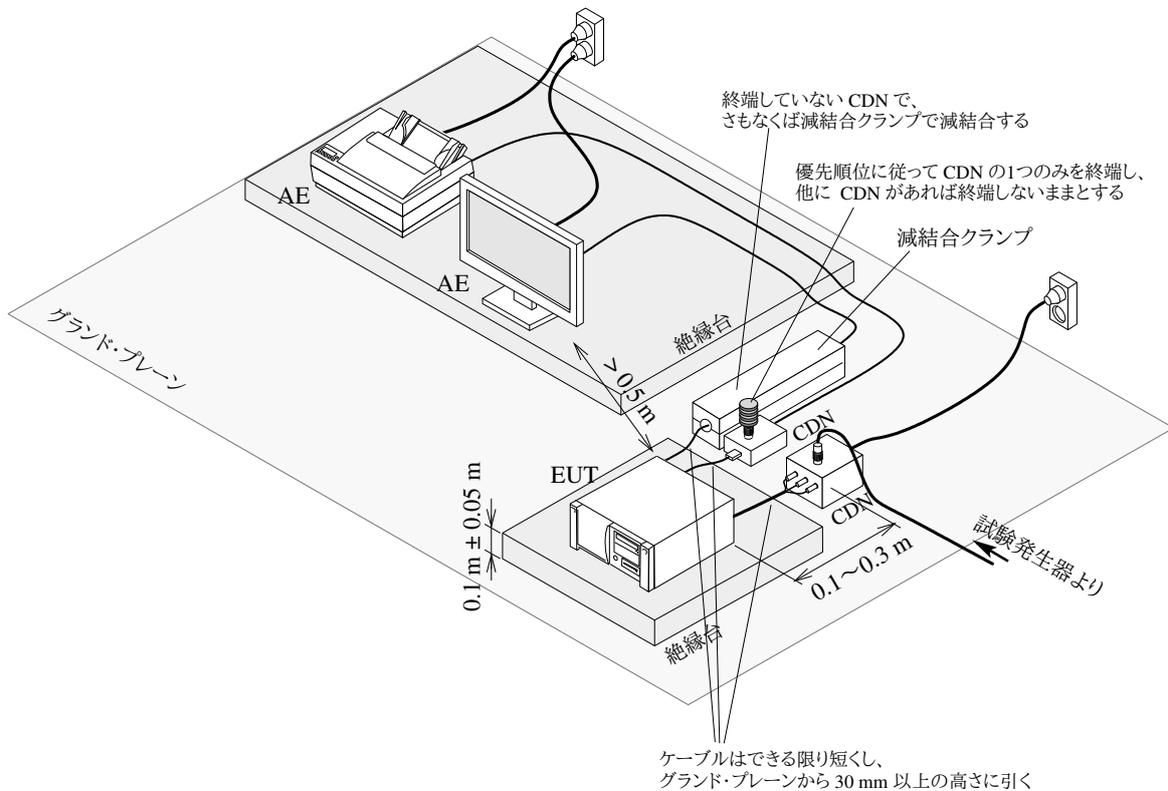


図 15: 試験セットアップの例 — CDN での印加

補助機器 (AE) も (0.1 ± 0.05) m の高さに置くが、減結合された AE については高さの規定はない。^{†13}

この配置は、卓上機器、床置き機器、組み込み用の機器などで共通である。

妨害の注入のための CDN は EUT から水平距離で $0.1 \sim 0.3$ m の距離に取り付ける。^{†14} EUT と CDN のあいだのケーブルはできる限り短いものと

^{†13} そのようにしたい場合、全ての AE やそのケーブルを (0.1 ± 0.05) m の絶縁材の上に置くようにしても良いかも知れない。

^{†14} 0.3 m という長さは 80 MHz における $\lambda/10$ 弱に相当する。

し、これを束ねたり丸めたりしてはならない。

EUT と CDN のあいだのケーブルは 0.3 m 未満とすることが望ましく^{†15}、このケーブルを短くできない場合、ケーブル長 2 m まではケーブルを真っ直ぐに引けるようにセットアップを上げ、 2 m を超

^{†15} ケーブルが高い位置から出ている場合は EUT と CDN のあいだのケーブルの長さはこれよりもかなり長くなるが、これはやむを得ない。規格の Annex F (*Test setup for large EUTs* (informative)) では持ち上げられたグラウンド・プレーンを用いた試験の方法が示されており、この方法を用いることで長いケーブルの使用による試験への悪影響を低減できる可能性があるものの、これは要求となっているわけではない。

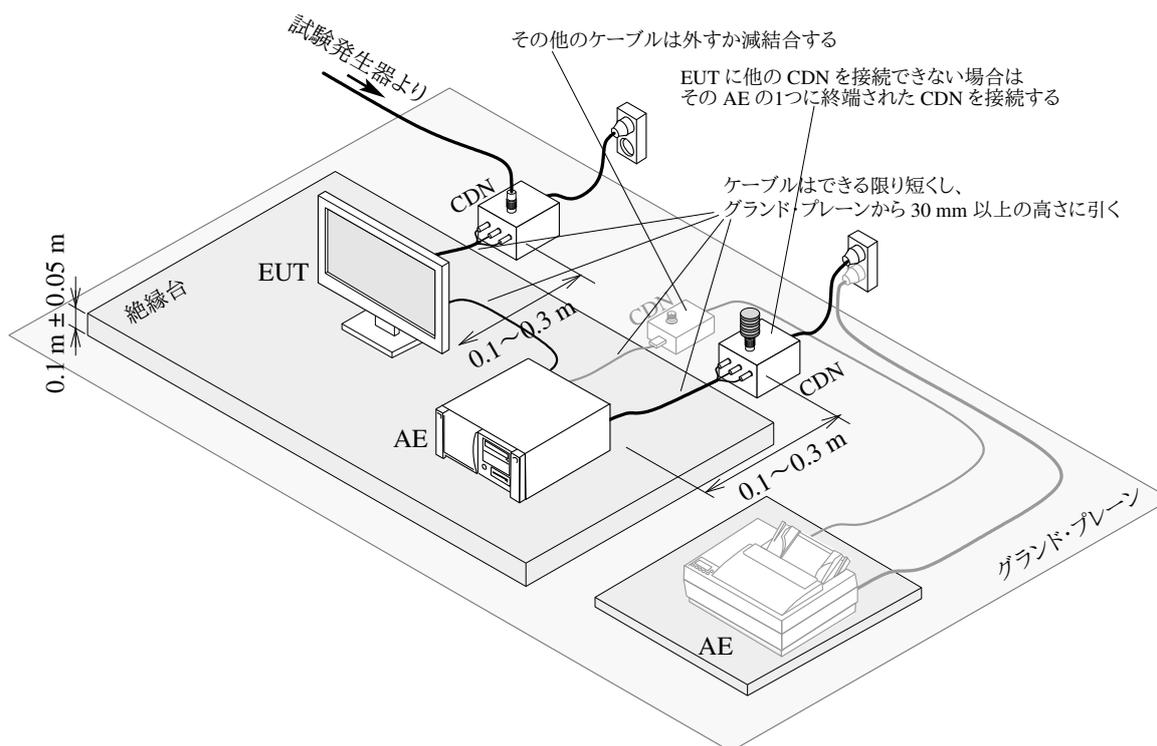


図 16: 試験セットアップの例 — CDN での印加 (EUT に他に CDN を接続できない場合)

える場合は可能であれば余長は蛇行させる。ケーブルの余長はグラウンド・プレーンから 30 mm 以上の高さに置き、これを束ねたり丸めたりしてはならない。推奨される最大長の 0.3 m を超える場合、その逸脱は試験報告書に明記する。

PE (保護接地) の他に接地端子がある場合、それが意図された設置からの著しい逸脱とならない限り、それらを一括で接続して CDN-M1 を通してグラウンド・プレーンに接続する。

試験に際してポートを動作させて機能や性能を確認するために、あるいはその他の目的で AE を接続する必要がある場合、AE は原則として CDN か減結合デバイスを介して接続する。同種のポートが複数ある場合、試験するポートの数は限定しても良いが、それぞれの物理的なタイプのポートの少なくとも 1 つを試験する。

EUT に妨害の注入に用いるもの以外に CDN を接続できるポートがある場合、その中から優先順位 (§3.3.4) に従って選択したポート 1 つに終端した CDN を取り付ける。その他のポートのケーブルは機能上不要であれば取り外すか、RF ポートを終端していない CDN を取り付けて減結合する。^{†16}

^{†16} こうすることによって、注入された妨害が、EUT を通過

EUT に妨害の注入に用いるもの以外にポートがあるが、それに CDN を取り付けることができない場合、代わりに EUT と直接接続されるいずれか 1 つの AE^{†17} の優先順位 (§3.3.4) に従って選択したポート 1 つに終端した CDN を取り付け、その他のケーブルは取り外すか RF ポートを終端していない CDN を取り付けて減結合する (図 16)。EUT やこの AE にその他に CDN を接続できないケーブルがある場合、CDN の代わりに減結合クランプ (§2.5) を取り付けて減結合することができる。

EUT に妨害の注入に用いるもの以外にポートがない場合、無理に CDN を接続するなどせずそのまま試験する。

EUT にキーボードや手持ち型のアクセサリが付いている場合、手の影響を模擬するため、キーボードの上に金属箔を置くか手持ち型のアクセサリの手で持つ部分に金属箔を巻き (「擬似手 (artificial-hand)」と呼ばれる)、220 pF + 510 Ω の RC ネット

する、両側が 150 Ω で終端された単一のループに流れるようにする。この原則はクランプによる注入の場合も同様である。

^{†17} この AE は EUT のインピーダンスをより良く制御できるであろうものを優先的に選択すべきであろう。例えば、EUT と短いシールド線で接続できる、§3.3.4 での優先度の高い CDN で終端できるものがあれば、それが好ましい候補となるかも知れない。

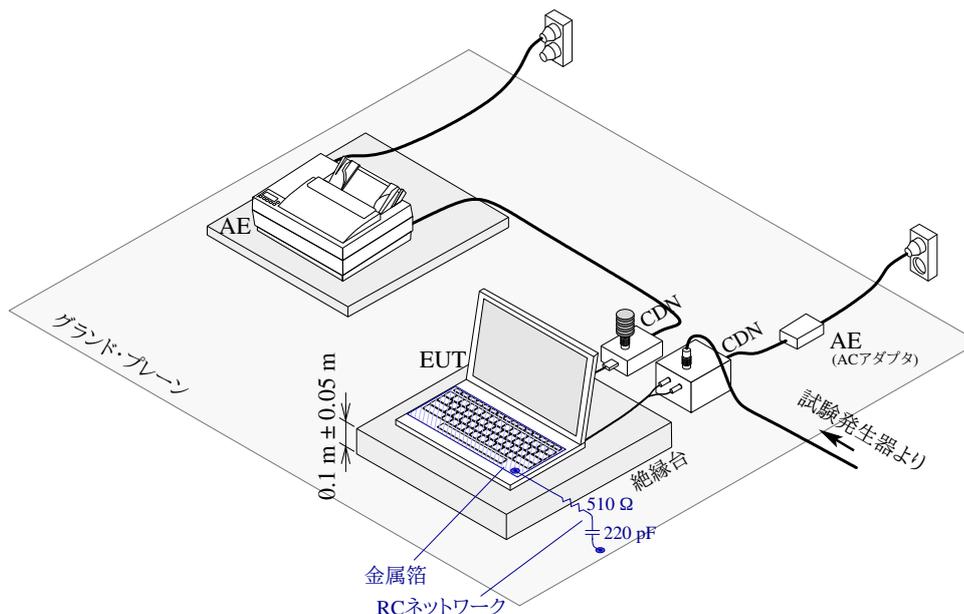


図 17: 疑似手の適用の例

トワークを介してグラウンド・プレーンに接続する(図 17)。AE に付いているキーボードや手持ち型のアクセサリについてはこの適用は不要である。

EUT が複数のユニットから成る場合、望ましくはそれぞれのユニットを EUT として(他のユニットを AE として扱い)別々に試験する。だが、それらが常に 0.4 m 以下の短いケーブルで接続される場合はそれらを単一の EUT とみなして試験しても良く、この場合はそれらのあいだの短いケーブルは試験の対象としない。^{†18†19}この場合、それらのユニットは互いにできる限り近付けて、それらのあいだのケーブルを含めてグラウンド・プレーンの上の(0.1 ± 0.05) m の絶縁材の上に配置する。

3.3.2 EM クランプや電流注入クランプでの試験

EUT への妨害の印加を注入クランプ、すなわち EM クランプ (§2.3.2) や電流注入クランプ (§2.3.3) で行なう場合の試験セットアップのイメージを図 19 に示す。

この場合も基本的なセットアップは CDN での試験の場合 (§3.3.1) と同様である。

^{†18} IEC 61000-4-6:2013 では 1 m 以下となっていた上限が 0.4 m に短縮された。この条件に該当するケースは相当に稀と思われる。

^{†19} この規格の試験法を参照した規格で、より長いケーブル、例えばその最大長がより長い上限(典型的には 3 m)以下の機器間のケーブルについてこの試験が不要と規定されることもあるかも知れない。

妨害の印加のための注入クランプは CDN の場合と同様に EUT から水平距離で 0.1~0.3 m の距離に取り付け、EUT と注入クランプのあいだのケーブルをできる限り短くする。注入クランプと AE のあいだのケーブルも不必要に長くしないことが望ましく、これも束ねたり巻いたりせずにグラウンド・プレーンから 30 mm 以上の高さに置く。^{†20}注入クランプ内のケーブルは、EM クランプの場合は容量性結合を最大化するために半円筒状の電極に密着させるように引き、電流注入クランプの場合は通常は容量性結合を最小化するために開口の中心付近に引く。

必要な場合、注入クランプと EUT のあいだに電流測定プローブを取り付けて注入された電流の監視を行なうことができる。

注入クランプが取り付けられたケーブルに接続された AE のコモン・モード・インピーダンスは EUT のインピーダンスと同等以下、望ましくは 150 Ω に近いインピーダンスであるべきで、このため、EUT と同様にその AE のポートの中から優先順位 (§3.3.4) に従って選択したポート 1 つに終端した CDN を取り付け、その他のケーブルは取り外すか RF ポート

^{†20} IEC 61000-4-6:2013 では注入クランプと AE のあいだのケーブルを可能であれば 0.3 m 以下とするように述べられていた。この版ではこの長さへの言及は削除されているが、配置の都合(長くなると束ねたり巻いたりせずに引くことが難しくなる)、また試験への影響の点 (§5.2) からこのケーブルはできる限り短くすべきであろうし、試験に際しては適度な長さのケーブルを用意すべきであろう。EM クランプの長さは 0.6~0.7 m 程度であり、EM クランプを取り付けるためには床面を 1 m 強だけ這わせられる程度の長さのケーブルがあれば良い。

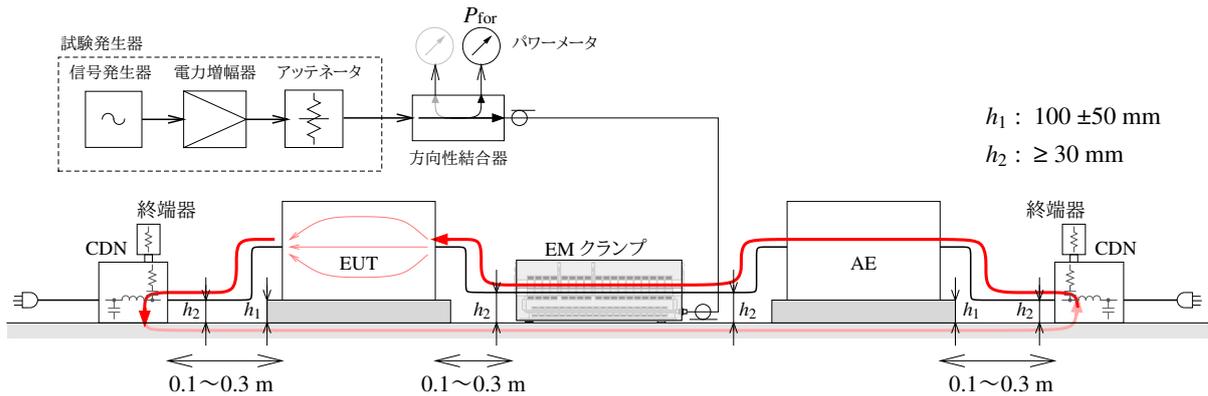


図 18: EM クランプでの試験の原理

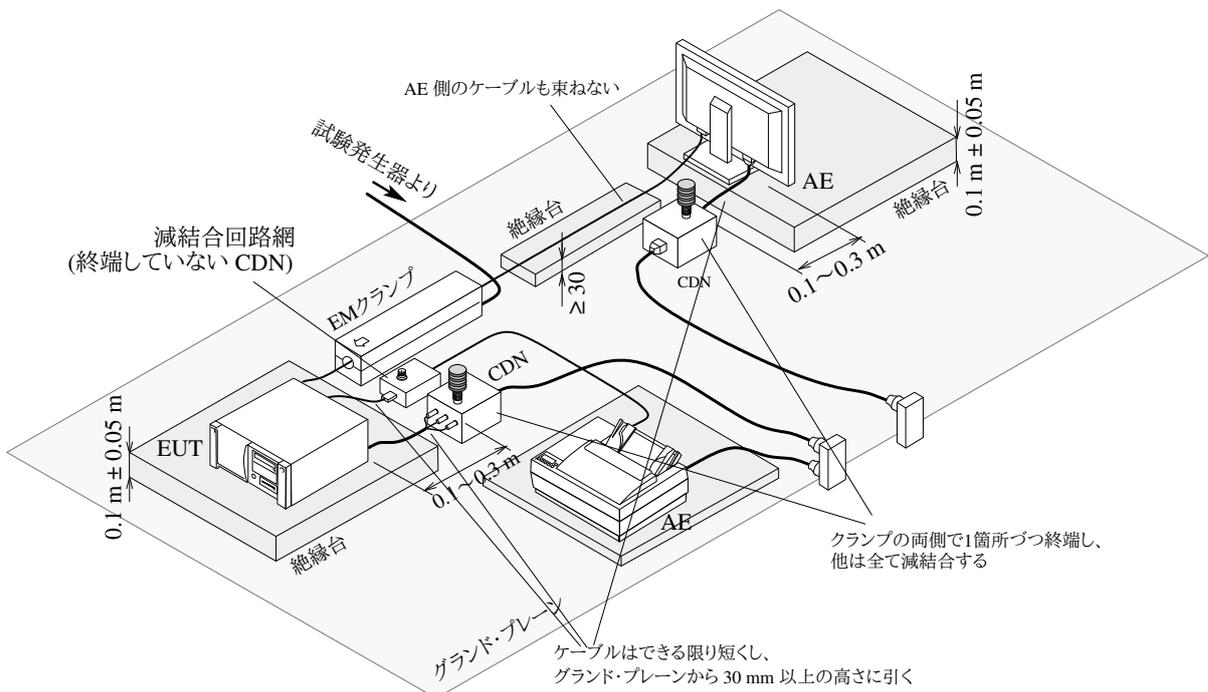


図 19: 試験セットアップの例 — EM クランプでの印加

を終端していない CDN を取り付けて (CDN を使用できない場合は減結合クランプ (§2.5) を取り付けて) 減結合する。

その AE に CDN を接続することができず、AE の改造や通常の設置方法からの著しい逸脱なしでは AE のインピーダンスを下げるできない場合^{†21}、インピーダンスを下げるために特別な接続を追加する必要はない。^{†22}この場合、試験は実際の使

^{†21} 例えばこの試験でその AE として用いようとした周辺機器には他にポートがなく、CDN を接続することができないが、EUT のそのポートには電源ポートを持つ周辺機器も接続される場合があるとす。このような場合は電源ポートを持つ周辺機器を使用すれば逸脱なしに AE のインピーダンスを下げるができるであろう。

^{†22} IEC 61000-4-6:2013 では必要であれば AE の回路とグラウンド・プレーンのあいだに CDN-M1 か 150 Ω の抵抗を接続

用を代表するセットアップで実施する (§5.2)。

3.3.3 直接注入での試験

直接注入 (図 20) は試験発生器から直接注入デバイス (§2.3.4) を介して試験対象のケーブルのシールド

するなどしてそのインピーダンスを下げて 150 Ω に近付けることが求められていた。この版ではその要求はなくなっているが、AE 側のインピーダンスが高い状態で注入クランプでの試験を行なった場合、特に低い周波数で EUT 側に妨害が著しく入りにくくなるであろうことに留意すべきであろう (§5.2)。また、対象のケーブルがシールド・ケーブルの場合、直接注入 (§3.3.3) であればその状況でも EUT への妨害の注入を意図したように行なえる筈であるので、注入方法の選択の規則 (§3.2) では EM クランプでの試験が優先となっているものの、直接注入の適用を考慮すると良いかも知れない。

ドに接続して妨害信号を直接注入するもので、シールド・ケーブルに対してのみ使用可能である。

この方法での試験のセットアップのイメージを図 21 に示す。

この場合も基本的なセットアップは CDN での試験の場合 (§3.3.1) と同様である。

注入箇所と AE のあいだは減結合クランプ (§2.5) で減結合する。シールドを AE 側で接地することが意図されている場合、その接続が典型的な使い方から著しく異ならせるのでない限り、減結合と再現性の向上のために減結合クランプの AE 側で接地すべきである。

直接注入デバイスは試験対象のケーブルの被覆を剥いてシールドに接続する。金属箔シールド^{†23}の場合、シールドを損なわずに良好な接続を行なうためには工夫が必要となるかも知れない。

3.3.4 ポートの終端の優先順位

試験に際して終端するポート (RF 入力ポートに 50 Ω 終端器を取り付ける CDN) は以下の優先順位で選択する:

1. 接地端子の CDN-M1
2. 接地線を含む主電源ポートの CDN-Mn
3. 印加対象ケーブルに最も近いシールド・ケーブルの CDN-Sn
4. 接地線を含まない主電源ポートの CDN-Mn
5. 印加対象ケーブルに最も近いポートのその他の CDN

その他のポートはケーブルを外すか、あるいはそのポートに接続された CDN の RF 入力ポートを開放のまま (50 Ω 終端器を取り付けない) として減結合する。

これと別に、規格の Annex I (*Port-to-port injection* (informative)) では、この終端を妨害の注入を行なうポートと同種のポートで行ない、同種のポート間 (例えば Ethernet スイッチのポート間のような) への妨害の印加を行なう方法に言及されている。

^{†23} 多くは蒸着などによって金属の皮膜が付けられた薄いフィルムが用いられており、これは破れやすく、また金属の皮膜が内側となるように巻かれていて注入デバイスを導電面に接続することが難しいかも知れない。

4 検証と校正

4.1 CDN の EUT ポートのインピーダンスの確認

CDN の RF 入力ポートを 50 Ω で終端し、AE ポートを開放した状態、及びグラウンド・プレーンに短絡した状態で EUT ポート (CDN-Sn の場合はシールド、その他の場合は EUT ポートの全ての導体を一括接続したもの) とグラウンド・プレーンのあいだのコモン・モード・インピーダンスの大きさ^{†24}を測定し、図 11 の範囲内にあるかどうかを確認する。

この測定は、図 22 に示すように、CDN の EUT ポートの高さに合わせた 0.03~0.10 m の高さに端子が付けられた、その高さが 0.03 m の場合は 0.1 m × 0.1 m、その他の場合は 0.15 m × 0.15 m のインピーダンス基準面を持つ測定治具を CDN の EUT 側の面から 0.03 m 以下の距離に置いて適切なアダプタを介して CDN の EUT ポートに接続し、そのセットアップよりも全周で 0.2 m 以上大きいグラウンド・プレーン上で行なう。

減結合特性そのものの要求はないが、AE ポートを開放した状態、及びグラウンド・プレーンに短絡した状態でのこの測定の結果の違いが小さいならば相応の減結合が達成されている筈である。^{†25}

4.2 150 Ω — 50 Ω アダプタの挿入損失の確認

150 Ω — 50 Ω アダプタ 2 つを背中合わせに接続してそのセットアップよりも全周で 0.2 m 以上大きいグラウンド・プレーン上に置き、50 Ω 系で測定した挿入損失が全周波数範囲で (9.5 ± 0.5) dB の範囲内にあるかどうかを確認する (図 23)。

150 Ω — 50 Ω アダプタは 100 Ω の低インダクタンスの抵抗を CDN のインピーダンスの測定に用いられる測定治具 (図 22) と同様の金属板に取り付けたものである。

^{†24} 実際には、規格の §6.3.1 で述べられているように、CDN の EUT ポートのコモン・モード・インピーダンスではなくインピーダンス基準面に設けられたコネクタに現れるインピーダンスを測定する形となる。CDN の EUT ポートのコモン・モード・インピーダンスを測定しようとした場合、アダプタの影響の考慮が必要となるだろう。^[4]

^{†25} AE ポートを開放とした時と短絡した時の測定結果の変化、あるいは過去の測定結果との相違が大きい場合、それはその CDN の減結合が良くない、おそらくは劣化を生じたことを示しているかも知れない。

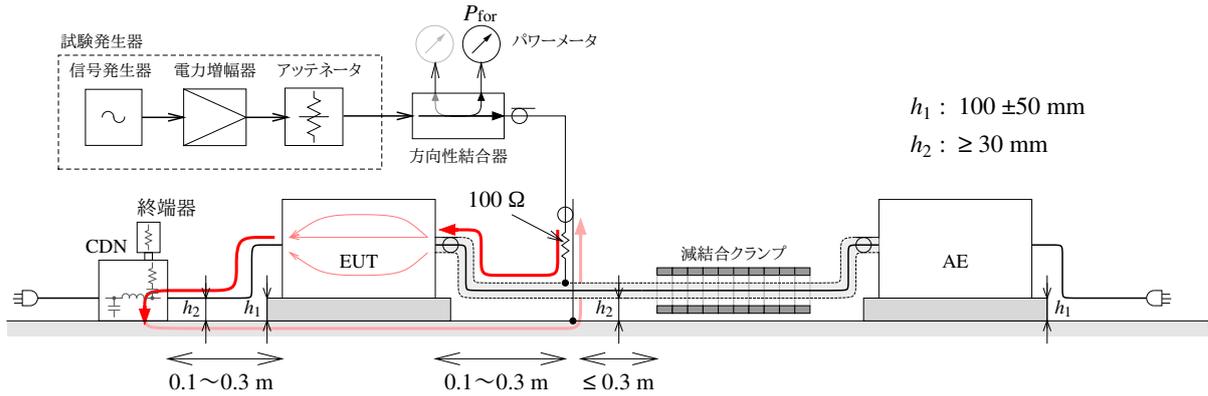


図 20: 直接注入での試験の原理

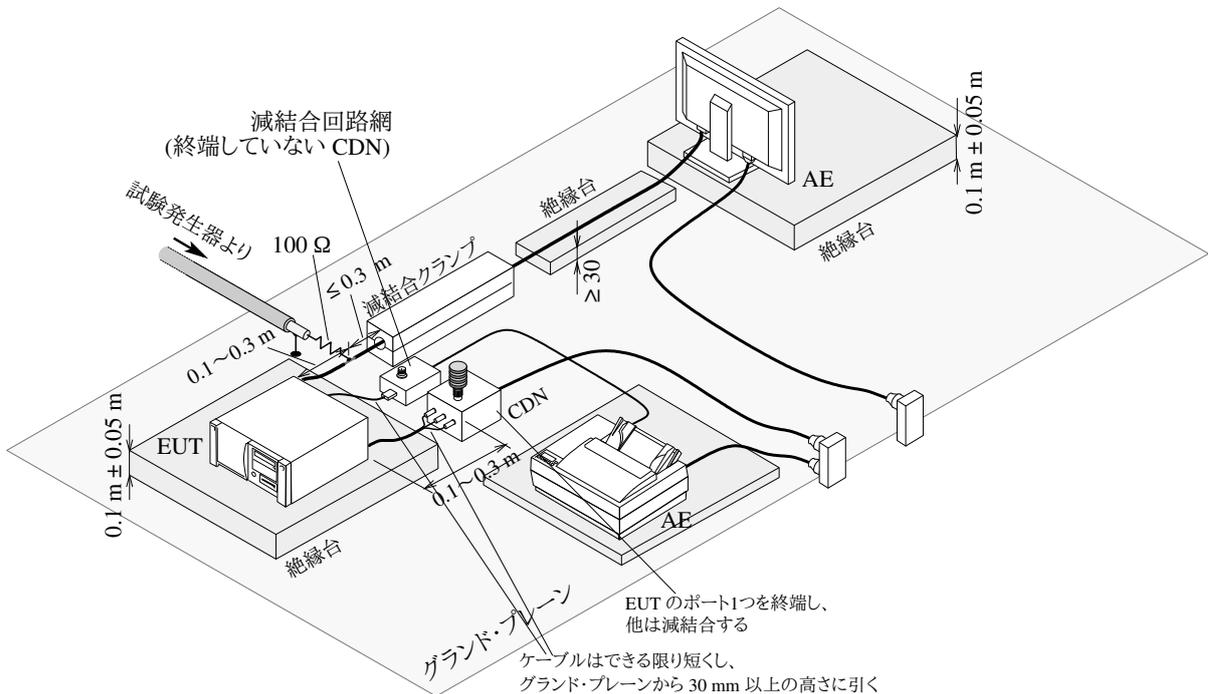


図 21: 試験セットアップの例 — 直接注入での印加

4.3 電流注入クランプによる伝送損失の増加の確認

150 Ω の電流注入クランプ試験治具を通した損失を、治具に電流注入クランプを取り付けない状態で、そして終端した電流注入クランプを取り付けた状態で測定し、損失の増加分を測定する (図 24)。

電流注入クランプによる伝送損失の増加は 1.6 dB を超えてはならない。

電流注入クランプ試験治具は 150 Ω — 50 Ω アダプタ (§4.2) 2つを適当な間隔を開けて背中合わせに接続したものであるが、専用の治具が用いられることが多い。

4.4 EM クランプの特性の同定

入力インピーダンス (EUT ポートから見たインピーダンス)、及び減結合係数 (EUT ポートと AE ポートのあいだの減結合の程度) は、規格の Annex A (*EM and decoupling clamps*) で述べられているように、次のようにして同定することができる:

1. RF 入力ポートを 50 Ω で終端した EM クランプを、クランプ試験治具の金属のロッドが EM クランプの開口の中心を通るように、またインピーダンス基準面からクランプ基準点 (コアの端) までの距離 (L_A , L_B) が $30 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ と

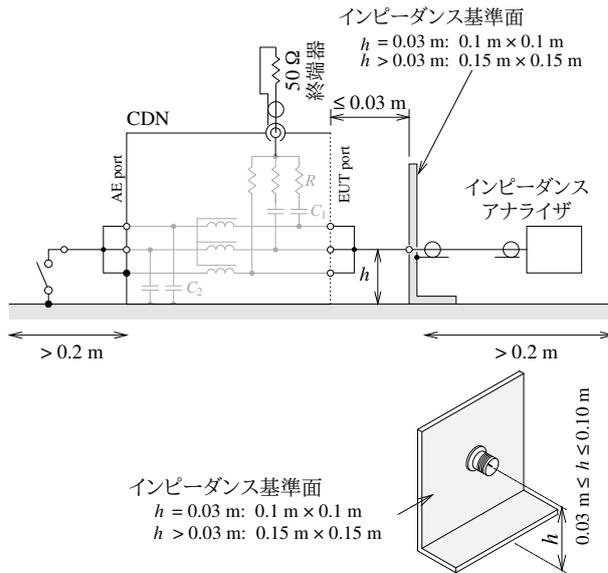


図 22: CDN のインピーダンスの測定

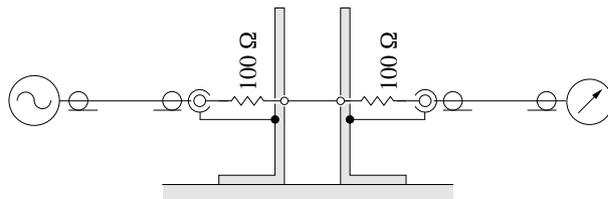


図 23: 150 Ω — 50 Ω アダプタの挿入損失の測定

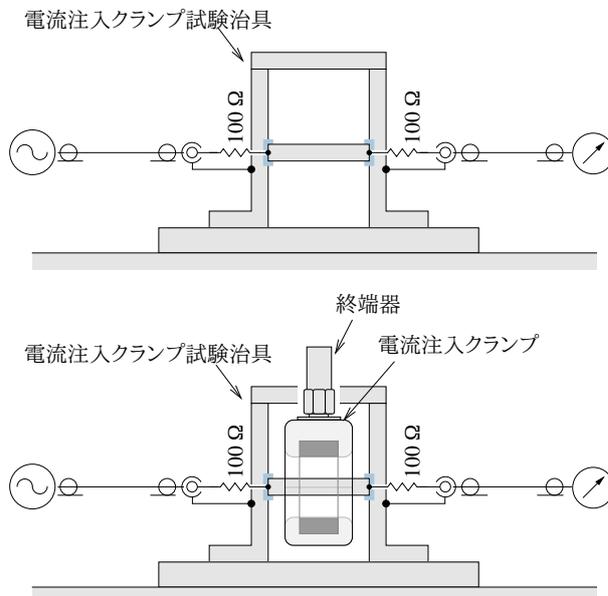


図 24: 電流注入クランプによる伝送損失の増加の確認

なるように、所定のクランプ試験治具に取り付け、そのセットアップよりも全周で 0.2 m 以上

大きいグラウンド・プレーン上に置く (図 25)。

- ベクタ・ネットワーク・アナライザ (VNA) を測定用同軸ケーブルの先で TOSM 校正 (フル 2 ポート校正) し、50 Ω 系で S パラメータを測定できるようにする。
- VNA の校正面とクランプ基準点のあいだの長さは VNA のオフセット機能などで補正する。
- 測定用同軸ケーブルをクランプ試験治具に接続し、S パラメータ (S_{11} , S_{12} , S_{21} , 及び S_{22}) を測定する。
- ABCD 変換を行ない ABCD パラメータを算出する。
- その ABCD パラメータ、及びクランプ試験治具のジオメトリから算出した特性インピーダンスの値を用い、クランプ試験治具の特性インピーダンスにおける S パラメータを算出する。
- 入力インピーダンス、及び減結合係数をその S パラメータから算出する。

また、結合係数 (RF 入力ポートから EUT ポートのあいだの減衰量) の測定は 150 Ω — 50 Ω アダプタを用いて行なう。

4.5 減結合クランプの特性の同定

減結合クランプの減結合係数の測定は EM クランプの場合 (§4.4) と同様に行ない、少なくとも 1~80 MHz で 5 dB よりも大きいかどうかを確認する。

4.6 試験発生器の設定 (試験レベルの設定)

試験発生器の設定 (試験レベルの設定) のためのセットアップのイメージを図 26、図 27、図 28 に示す。注入デバイスの EUT ポートに 150 Ω — 50 Ω アダプタを介してパワーメータなどの測定器を接続する。注入デバイスの AE ポートは 150 Ω で、例えば 150 Ω — 50 Ω アダプタに 50 Ω 終端器を取り付けたもので終端する。注入デバイスの RF 入力ポートには試験発生器の出力を接続する。

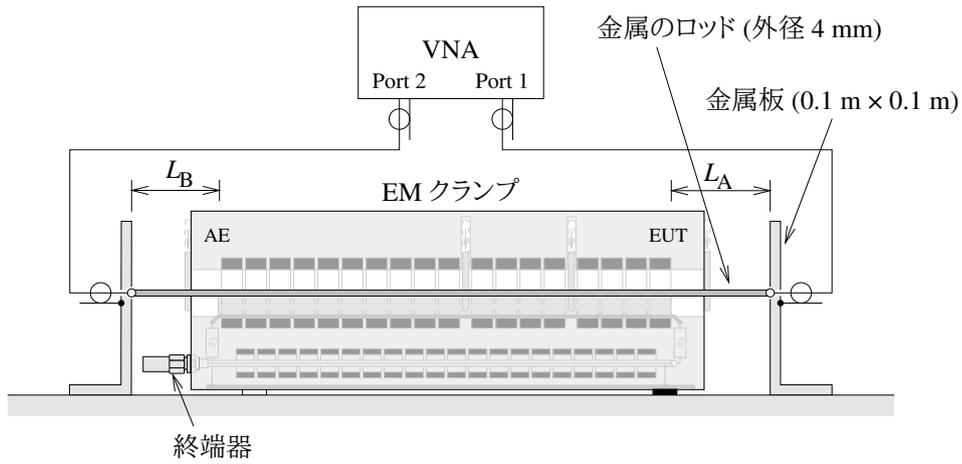


図 25: EM クランプの S パラメータの測定

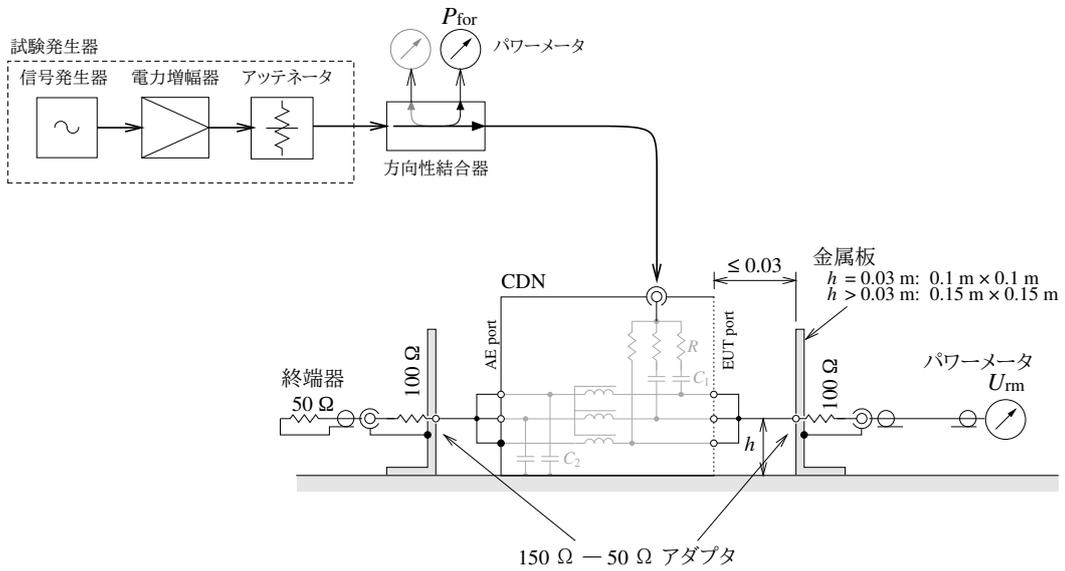


図 26: 試験レベルの設定のセットアップの例 — CDN

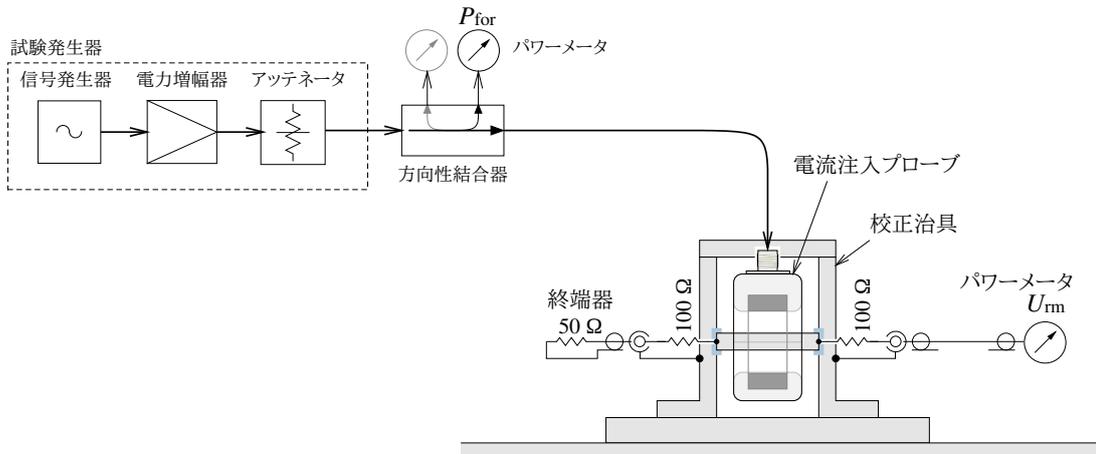


図 27: 試験レベルの設定のセットアップの例 — 電流注入クランプ

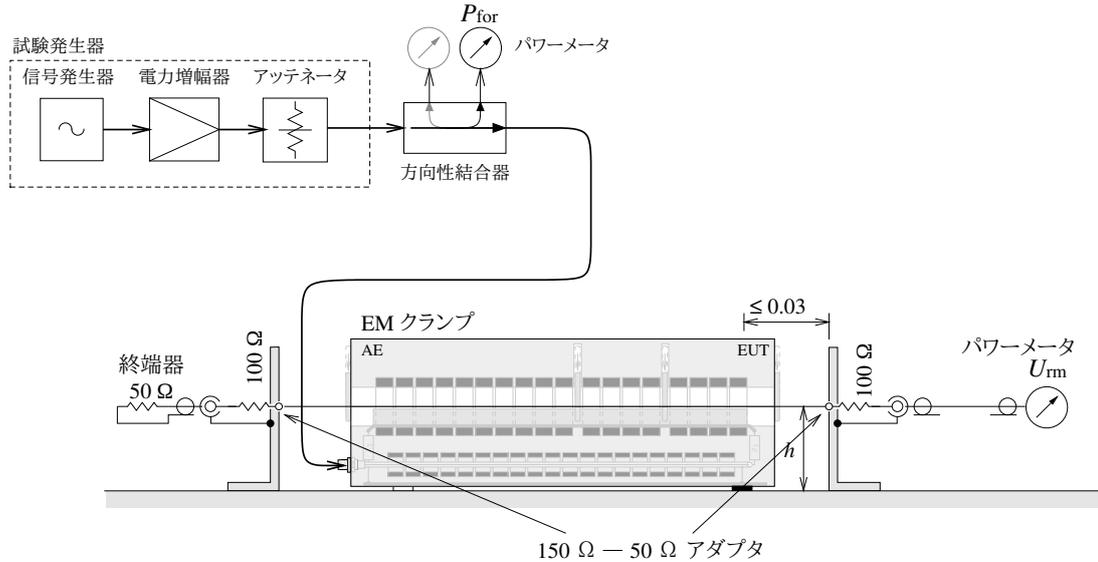


図 28: 試験レベルの設定のセットアップの例 — EM クランプ

1. 試験レベル (e.m.f.) を U_0 として、無変調の進行波電力を結合デバイスに印加し、150 Ω — 50 Ω アダプタの出力ポートで得られる電圧 U_{mr} が $U_0 - 15.6 \text{ dB} \pm 1.5 \text{ dB}$ となるようにする。^{†26}

注入クランプのレベル設定では AE 側の 150 Ω の終端

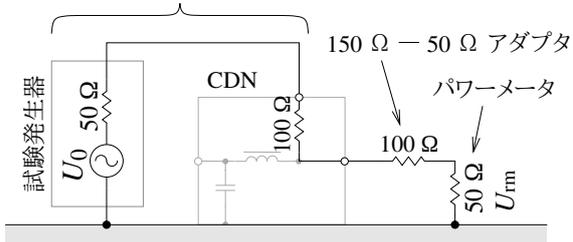


図 29: レベル設定の原理

電力増幅器の出力における進行波電力のレベル P_{for} と 150 Ω — 50 Ω アダプタの出力ポートにおける電圧 U_{mr} を記録する。

2. 周波数を前の周波数から最大 1 % 上げる。
3. 次の周波数が最大周波数 (例えば 80 MHz) を超えるまで上記のステップを繰り返す。その最大周波数も測定に含める。

また、試験で必要となる変調された信号 (図 2) でも増幅器が飽和しないことを、例えば次のような手続きによって確認する:

^{†26} -15.6 dB は $1/6$ ($= 50 \Omega / (50 \Omega + 100 \Omega + 100 \Omega + 50 \Omega)$)。図 29 参照。

1. レベル設定手続きで必要となった、使用された全ての結合デバイスの中で最大の進行波電力 $P_{for \max}$ を、それぞれの周波数ステップについて同定する。

2. それぞれの周波数について、

- (a) 電力増幅器の出力を $P_{for \max}$ に設定する;
- (b) 信号発生器の出力の設定を 5.1 dB 上げる;^{†27}
- (c) その時の進行波電力 $P_{for \max, inc}$ を記録する;
- (d) $P_{for \max, inc} - P_{for \max}$ が 3.1 ~ 7.1 dB ($5.1 \pm 2 \text{ dB}$) の範囲内であればその試験システムはその試験レベルでの試験に使用できる。さもなければ増幅器は非線型であり、試験に適さない。

その代わりに、この飽和検証手続きをそれぞれの注入デバイスのレベル設定手続きに含めても良い。

5 補足

5.1 複数の周波数の同時印加

その合成信号で直線性の要求を満足できる限り、試験時間の節約のために複数の周波数を同時に印加しても良い。これについての説明はこの規格の

^{†27} 5.1 dB は 1.8 に相当する。

Annex H (Testing with multiple signals (informative)) にある。

5.2 注入クランプの AE 側の影響

5.2.1 AE 側のケーブル長の影響

AE 側を 50Ω で終端した時に EUT 側に注入される妨害を簡単なモデルでシミュレートしたものを図 30 に示すが、AE 側の開放端までの距離 $L_{AE} = 0.3 \text{ m}$ ($L_{AE} = 0.08\lambda_{80 \text{ MHz}}$) の時は高い周波数で注入レベルの若干の低下が予測されているだけであるのに対して、 $L_{AE} = 3 \text{ m}$ ($L_{AE} = 0.8\lambda_{80 \text{ MHz}}$) や $L_{AE} = 10 \text{ m}$ ($L_{AE} = 2.7\lambda_{80 \text{ MHz}}$) とした時は高い周波数で注入レベルの相当の変動の発生が予測されている。

但し、この推測はケーブルの特性インピーダンス $Z_{\text{cable}} = 200 \Omega$ 、AE 側の終端のインピーダンス $Z_{AE} = 50 \Omega$ という条件で行なったもので、 Z_{AE} が 150Ω に近ければレベル変動の幅はこれよりも小さくなることが予想される。また、EM クランプは 10 MHz 程度以上ではある程度の方向性を持つことから、EM クランプを用いた場合のレベル変動はこれよりもかなり小さいものとなることが予想される。

しかしながら、このような問題の防止の観点からも注入クランプと AE のあいだのケーブル長を短く保つことが好ましいと考えられ、そのような要求がないとしても、注入クランプと AE のあいだのケーブルはできる限り短く、可能であれば 0.3 m 以下に保つことが望ましそうに思われる。

5.2.2 AE 側が開放の場合

クランプでの注入 (§3.3.2) に際して、その AE 側に接続される AE に CDN を接続することができず、AE の改造や通常の設置方法からの著しい逸脱なしでは AE のインピーダンスを下げるできない場合、IEC 61000-4-6:2023 ではインピーダンスを下げるための特別な処置 (IEC 61000-4-6:2013 で言及されていたような、その AE への CDN-M1 か 150Ω の抵抗の接続のような) を行なわずにそのまま試験することができる。

だが、これは試験の結果に大きな影響を与える可能性があるため、適切な考慮を行なうことが望ましい。

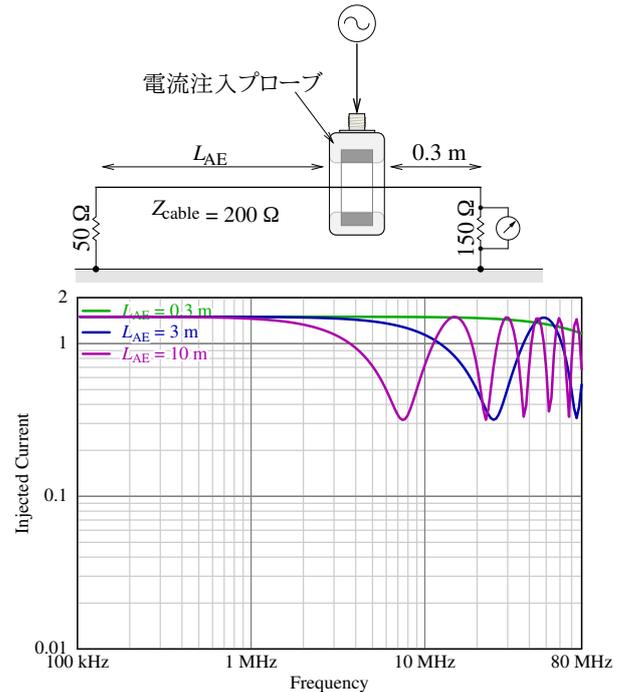


図 30: 電流注入クランプの AE 側のケーブル長の影響 (シミュレーション)

電流注入クランプの AE 側を開放として妨害の注入を行なった場合、特に低い周波数で EUT 側への妨害が著しく入りにくくなるが、その挙動は AE 側の開放端までの長さによって変化する。

これを簡単なモデルでシミュレートしたものを図 31 に示すが、AE 側の開放端までの距離 $L_{AE} = 0.3 \text{ m}$ の時は 10 MHz でも目標値の $1/10$ しか入らないのに対して、 $L_{AE} = 3 \text{ m}$ では 10 MHz で、 $L_{AE} = 10 \text{ m}$ では 3 MHz で目標値に達している。

ケーブルが長い時、高い周波数 ($L_{AE} = 3 \text{ m}$ では $\lambda/2 = 3 \text{ m}$ となる $f = 50 \text{ MHz}$ あたり) で激しいディップの発生が予測されているが、これは電流注入クランプから開放端を見たインピーダンスが再び高くなって電流の注入を妨げるためである。

EM クランプは 10 MHz 程度以上で方向性を持ち、AE 側のインピーダンスの妨害の注入への影響が低減されることから、妨害の注入に電流注入クランプではなく EM クランプを用いれば高い周波数範囲でのディップが緩和されることが期待できる。この実測の結果を図 32 に示すが、高い周波数でのディップが大幅に緩和されるとともに、低い周波数での妨害の注入も幾分改善されているのが見える。

従って、AE 側が高インピーダンスのまま注入クランプでの試験を行なう必要がある場合、その影

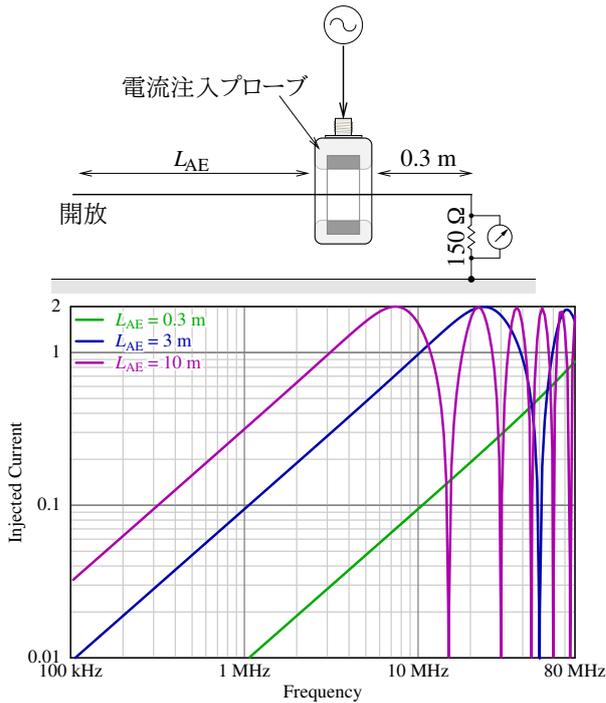


図 31: 電流注入クランプの AE 側を開放とした場合の影響 (シミュレーション)

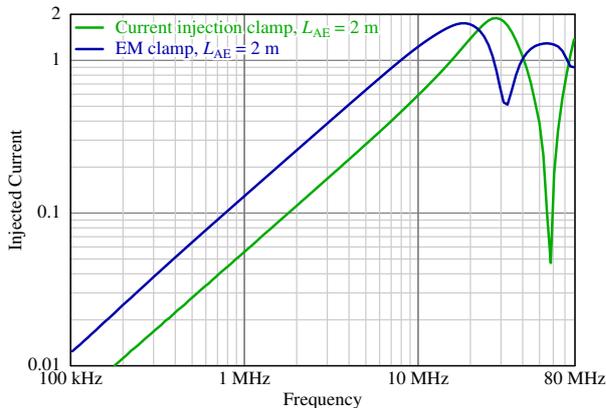


図 32: AE 側開放での電流注入クランプと EM クランプでの比較 (実測)

響で EUT 側に妨害が注入されにくくなることが予期されるものの、注入に EM クランプを用い、AE 側のケーブルを十分に長くすればこれを相当に緩和できそうである。

6 参考資料

[1] IEC 61000-4-6:2023, *Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-6: Testing and measurement techniques — Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields*

[2] IEC 61000-4-3:2020, *Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-3: Testing and measurement techniques — Radiated, radio-frequency electromagnetic field immunity test*

[3] IEC 61000-4-3 の概要 — 無線周波放射電磁界に対するイミュニティ試験の方法, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2024,

<https://www.emc-ohatama.jp/emc/reference.html>

[4] *VNA Measurement of Common-Mode Impedance of Coupling/Decoupling Networks in Conductive Immunity Testing*, Rolf H. Judaschke and Uwe Karsten, IEEE, 2018, DOI: 10.1109/TEM.2017.2783950