軍需機器の EMC — MIL-STD-461G の概要 Part 2: 主なサセプティビリティ要求 (CS101, CS109, CS114, CS115, CS116, CS118, RS101, RS103)

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2020年8月25日

目 次

1	共通	事項	2
	1.1	要求の調整.....................	2
	1.2	許容差	2
	1.3	シールド・エンクロージャ	2
	1.4	グランド・プレーン	4
	1.5	LISN	4
	1.6	EUT の設置と動作	4
	1.0	1.6.1 EUT の設置	4
		1.6.2 ケーブルとその引き回し	4
		163 EUT の動作	7
	17	試験システムの校正や確認	7
	1.8	周波数福引	8
	1.0	変調	8
	1.10	サセプティビリティの閾値の同定	8
	1.10		0
2	\mathbf{CS}	101 (伝導サセプティビリティ、電源線)	8
	2.1	電力制限に対する設定の同定	9
	2.2	試験	9
	2.3	テータの提示	11
	2.4	補足	11
3	CS	109 (伝導サセプティビリティ、構造電流)	12
	3.1	試験	12
	3.2	データの提示	13
4	CSI	114 (伝導サセプティビリティ、バルク・ケーブル 、	10
	注八		13
	4.1		13
	4.2	快祉	14
	4.3		14
	4.4	アーダの提示	15
5	\mathbf{CS}	115 (伝導サセプティビリティ、バルク・ケーブル	
	注入	、インパルス励起)	15
	5.1	波形の確認と妨害レベルの設定	16
	5.2	試験	17
	5.3	データの提示.................	17
6	CS	116(伝道サセプティビリティ 減春正弦波トラン	
U	<u></u> じ5. ジт	い b f f = (L c f f c f f c f f c f c f c f c f c f	17
	61	波形の確認と抗害レベルの設定	17
	6.2		10
	6.2	データの提示	10
	0.5) ヘジルルハ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	19
7	\mathbf{CS}	l18 (伝導サセプティビリティ、人体静電気放電)	19
	7.1	ESD 試験器の検証	20
	7.2	試験	21

8	\mathbf{RS}	101 (放射サセプティビリティ、磁界)	21
	8.1	使用するコイル	22
		8.1.1 12 cm 放射ループでの試験	22
		8.1.2 ヘルムホルツ・コイルでの試験	23
	8.2	インテグリティ・チェック	23
		8.2.1 12 cm 放射ループ	23
		8.2.2 ヘルムホルツ・コイル	23
	8.3	試験	24
		8.3.1 12 cm 放射ループ	24
		8.3.2 ヘルムホルツ・コイル	24
	8.4	補足	25
9	BS 1	103 (放射サセプティビリティ、雷界)	25
-	9.1	試験	26
	9.2	データの提示	27
	9.3	補足	27
	0.0	931 高調波の制限	27
		932 変調に対する電界センサの補正	27
		933 その他	29
	9.4	代替試験法 — リバブレーション・チャンバ	29
10	参考	資料	30

MIL-STD-461 は軍需関連のサブシステムや機器 の EMC 評価に関する要求を定める規格として米国 国防総省 (DoD) が発行しているもので、主に軍関 係機関への納入に際しての基準の1つとして用いら れている。

この規格は、独立して、あるいは他のサブシステ ムやシステムの一部として用いられるサブシステム や機器への適用が意図されたもので、機器ラックよ りも大きくないエンクロージャ、エンクロージャ間 の個別の配線である電気的相互接続、また主電源か らの電源入力を持つアイテムに最も良く適している。 この規格はエンクロージャに組み込まれるモジュー ルのようなアイテムに直接適用すべきではない。ま た、この規格は車両、船舶、航空機、その他のプラッ トホームそのものやシステム全体への適用も意図さ れていない。

本稿の執筆の時点でのこの規格の最新版は 2015 年 に発行された MIL-STD-461G^[1] で、これには 表1 に示すような試験項目が含まれている。実際の評価 で適用する試験項目や限度などは調達機関からの指 定などがあればそれに従うことになるだろうが、基 本的には機器の使用環境など (陸軍、海軍、空軍の いずれの管轄の、どのようなプラットホームでの使 用が意図されているか) や機器の性質から判断する ことができる (表 2)。

本稿では、MIL-STD-461G のこれらの試験法の うち、表1で太字で示した試験法について、その概 要を述べる。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、正確な情報は規格そのもの^[1]や関連する公式 な文書を参照されたい。

1 共通事項

1.1 要求の調整

この規格は一般的な試験方法を定めるが、技術的 な分析などに基づいて、その適用が適当でない、あ るいは要求を調整すべきと考えられることがあるか も知れない。

そのような場合、その特定の場合に適用する要求 があらかじめ調達文書などで指定されている場合を 除き、適用する要求を事前に文書化して調達機関の 承認を得ることが必要となるだろう。

1.2 許容差

特に規定されない場合、以下の許容差が適用さ れる:

長さ:	$\pm 5~\%$
周波数:	$\pm 2~\%$
振幅 (レシーバ):	$\pm 2 \text{ dB}$
振幅 (測定系):	$\pm 3 \text{ dB}$
時間:	$\pm 5~\%$
抵抗:	$\pm 5~\%$
静電容量:	$\pm 20~\%$

1.3 シールド・エンクロージャ

多くの試験は、エミッション試験では放送などの 外部からの電磁界が試験に悪影響を与えないように、 サセプティビリティ試験 (イミュニティ試験) では試 験で発生させられる妨害が周囲に悪影響を与えない ように、適切な遮蔽を与えるシールド・エンクロー ジャ (シールド・ルーム) 内で行なうことが必要と なる。

通常、このようなシールド・エンクロージャへの 電源の引き込みは、ケーブルを介しての妨害の侵入 や漏洩を防ぐため、必要な周波数範囲で充分な減衰 を与える貫通フィルタを通して行なわれる。

周辺機器などを EUT が置かれるシールド・エン クロージャの外に置く場合、ケーブルを介しての妨 害の侵入や漏洩を低減するため、周辺機器を置く場 所もシールド・エンクロージャとする、電源と同様 にシールド・エンクロージャを出る箇所で適切なフィ ルタに通す、などの対応が必要となるだろう。



CE101	伝導エミッション、音声周波電流、電源線	$30 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$
CE102	伝導エミッション、無線周波電圧、電源線	10 kHz \sim 10 MHz
CE106	伝導エミッション、アンテナ・ポート	10 kHz \sim 40 GHz
CS101	伝導サセプティビリティ、電源線	$30 \text{ Hz} \sim 150 \text{ kHz}$
CS103	伝導サセプティビリティ、アンテナ・ポート、相互変調	$15 \text{ Hz} \sim 10 \text{ GHz}$
CS104	伝導サセプティビリティ、アンテナ・ポート、不要信号の排除	$30 \text{ Hz} \sim 20 \text{ GHz}$
CS105	伝導サセプティビリティ、アンテナ・ポート、混変調	$30 \text{ Hz} \sim 20 \text{ GHz}$
CS109	伝導サセプティビリティ、構造電流	$60 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$
CS114	伝導サセプティビリティ、バルク・ケーブル注入	10 kHz \sim 200 MHz
CS115	伝導サセプティビリティ、バルク・ケーブル注入、インパルス励起	
CS116	伝導サセプティビリティ、減衰正弦波トランジェント、ケーブル及び電源リード	
CS117	伝導サセプティビリティ、雷誘導トランジェント、ケーブル及び電源リード	
CS118	伝導サセプティビリティ、人体静電気放電	
RE101	放射エミッション、磁界	$30 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$
RE102	放射エミッション、電界	$10 \text{ kHz} \sim 18 \text{ GHz}$
RE103	放射エミッション、アンテナ、スプリアス及び高調波出力	10 kHz \sim 40 GHz
RS101	放射サセプティビリティ、磁界	$30 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$
RS103	放射サセプティビリティ、電界	$2 \text{ MHz} \sim 40 \text{ GHz}$
RS105	放射サセプティビリティ、過渡電磁界	

表 1: 試験法の一覧



以下のプラットホームや設備に設 置される、あるいはそれらから発 射される機器やサブシステム	CE101	CE102	CE106	CS101	CS103	CS104	CS105	CS109	CS114	CS115	CS116	CS117	CS118	RE101	RE102	RE103	RS101	RS103	RS105
水上船	Α	Α	L	Α	S	L	S	L	Α	S	Α	L	S	Α	Α	L	L	Α	L
潜水艦	Α	Α	L	Α	S	L	\mathbf{S}	L	Α	S	L	\mathbf{S}	\mathbf{S}	Α	\mathbf{A}	L	L	Α	L
駐機整備区域を含む、航空機 (陸軍)	Α	Α	L	Α	S	S	\mathbf{S}	-	Α	Α	A	L	Α	Α	\mathbf{A}	L	Α	Α	L
航空機 (海軍)	L	Α	L	Α	S	S	\mathbf{S}	-	Α	A	A	L	\mathbf{A}	L	\mathbf{A}	L	L	Α	L
航空機 (空軍)	-	Α	L	Α	S	S	\mathbf{S}	-	Α	Α	Α	L	\mathbf{A}	-	\mathbf{A}	L	-	Α	-
打ち上げ機を含む、宇宙システム	-	Α	L	Α	S	S	\mathbf{S}	-	Α	Α	Α	L	-	-	\mathbf{A}	L	-	Α	-
地上 (陸軍)	-	Α	L	Α	S	S	\mathbf{S}	-	Α	Α	A	S	\mathbf{A}	-	\mathbf{A}	L	L	Α	-
地上 (海軍)	-	Α	L	Α	S	S	\mathbf{S}	-	Α	A	A	S	\mathbf{A}	-	\mathbf{A}	L	L	Α	L
地上 (空軍)	-	Α	L	Α	S	S	\mathbf{S}	-	Α	Α	Α	-	\mathbf{A}	-	\mathbf{A}	L	-	Α	-

図 1: 各試験の周波数範囲

A: 適用、L: 規格のそれぞれの章での規定に従う、S: 調達機関が調達文書で規定

表 2: 各試験の適用

電界放射エミッション測定や放射サセプティビリ ティ試験では、エンクロージャ内での反射の試験への 影響を抑えるため、単なるシールド・エンクロージャ ではなく、80~250 MHz で 6 dB 以上、250 MHz 以上で 10 dB 以上の吸収率の電波吸収体を壁と天 井に取り付けた電波暗室を用いる。



この電波吸収体は、少なくとも、試験セットアッ プの背面とアンテナの背面の壁、またセットアップ の 50 cm 以上手前までの側面の壁と天井を覆い、 セットアップやアンテナから 30 cm 以上離れるよ うにする (図 2)。

試験時、電波暗室内には、他の帯域の試験のため のアンテナを含めて、その試験で必要なもの以外を 置いていてはならない。

1.4 グランド・プレーン

実際の設置で金属面に設置されることがある、あ るいは取り付け状況が不明な機器の試験では、テー ブル上に金属のグランド・プレーンが必要となる (図 6)。

この金属のグランド・プレーンは以下の条件を満 たすようにする:

- 短辺 76 cm 以上、面積 2.25 m² 以上、表面抵 抗率 0.1 mΩ/□ 以下のものとする;
- 少なくとも1m毎に、長さ:幅が5:1以下の金属のストラップでシールド・エンクロージャに接続する;
- グランド・プレーンとシールド・エンクロージャのあいだの抵抗は 2.5 mΩ 以下となるようにする。

実際の設置で導電性の複合材^{†1}上に設置される機 器の試験では金属のグランド・プレーンの代わりに 典型的な表面抵抗率のグランド・プレーンを用いる。

1.5 LISN

AC と DC のいずれの電源も、電源インピーダン スの安定化のために 50 μ H + 5 Ω / 50 Ω LISN ^{†2} (図 4) を介して給電する。

特定の状況では 5 μ H / 50 Ω LISN の使用が許容 されるかも知れないが、調達機関の承認が必要であ る。^{†3} LISN のインピーダンスは信号出力ポートを 50 Ω で終端して電源入力ポートを開放とした状態で 10 kHz~10 MHz の周波数範囲について規定され、 基準値の ±20 % の範囲になければならない (図 5)。

LISN のインピーダンスのプロットは試験報告書 にも記載する。

1.6 EUT の設置と動作

1.6.1 EUT の設置

EUT は実際の使用時の設置の方法に応じて以下 のように設置して試験する:

- 実際の設置で金属面に設置される場合や取り付け状況が不明な場合、高さ 80~90 cm の非導電性のテーブルの上のグランド・プレーン (§1.4)の上に (図 6);
- 実際の設置で導電性の複合材^{†1}上に設置される場合、前項と同様に、だが金属のグランド・プレーンの代わりに典型的な表面抵抗率のグランド・プレーンの上に;
- 実際の設置で導電性の面が存在しない場合、高 さ 80~90 cm の非導電性のテーブルの上に (図7);
- 自立型の場合、床面のグランド・プレーンの上に(図8)。

機器の筐体と取付台のあいだの、またグランド・ プレーンへの接続には設計に含まれている手段のみ を用いる。この接続は設置図や機器の仕様に従って 確認し、確認の手順と結果は試験報告書に記載する。 実際の設置で防振架台が用いられるならば EUT

実际の設置で防振朱百が用いられるならは EU1 はそれに取り付けた状態で設置する。

RE102 や RS103 などの放射での試験では、EUT は最もエミッションが高くなる、あるいは放射妨害 の影響を最も良く受ける面をアンテナに向ける。^{†4}

1.6.2 ケーブルとその引き回し

リードは実際の設置の際と同様にケーブル (ハー ネス) としてまとめる。ケーブルは実際の設置を代

^{†1} CFRP (炭素繊維強化プラスチック) のような。

 $^{^{\}dagger 2}$ LISN = line impedance stabilization network

 $^{^{\}dagger 3}$ 例えば電源が 400 Hz 100 A の場合、50 $\mu \rm H$ のインダクタ のリアクタンスは約 0.13 Ω となり、これは 100 A では約 13 V の電圧降下を生じるため、50 $\mu \rm H$ + 5 Ω / 50 Ω LISN の使用 は難しそうである。

^{†4} アンテナに向ける面の決定のために予備試験を行なうか、 あるいはそれぞれの面をアンテナに向けての試験を行なうこと が必要となるかも知れない。





図 2: 電波暗室の概観



図 3: 実際の電波暗室の例



図 4: LISN (50 µH + 5 Ω / 50 Ω) の回路

表するものでなければならず、シールド線は設置要 求でそのように指定されている場合にのみ使用でき る。電源入力線はシールドされていてはならない。 ケーブルやリードは、構造、例えば対撚り、シール ド、シールドの終端などが正しいことを設置要求に 対して確認する。



図 5: LISN (50 μ H + 5 Ω / 50 Ω) のインピーダンス

相互接続ケーブルは実際のプラットホームへの設 置の際と同じ長さとし、それが10mよりも長い場 合は少なくとも10m、ケーブル長が規定されてい ない場合は所定の方法で配置できる長さとする。

電源線や相互接続ケーブルは、少なくとも 2 m を テーブルの前縁と平行に、またグランド・プレーンが ある場合はその面から 5 cm の高さに引く。この区 間でのケーブル (ハーネス)の外面間の距離は 2 cm とし、グランド・プレーンがある場合は最も手前の ケーブルはグランド・プレーンの前縁から 10 cm の 距離に平行に引く (図 6)。

ケーブルが高い位置から出ている場合や自立型機





図 7: 基本的なセットアップ (グランド・プレーンなし)





図 8: 自立型機器の基本的なセットアップ

器の場合、ケーブルをテーブルの上の高さまで引き 下ろすか引き上げて上記のように引く(図8)。

電源入力線は、中性線や帰路導体を含めて、テー ブルの前縁と平行に 2 m 引いた後、最短で LISN (§1.5) に接続する。

電源導体が相互接続ケーブル (シールド・ケーブ ルであっても) の一部となっている場合、電源導体 は他のリードから分けて LISN まで引く。

EUT と LISN のあいだの電源線はできる限り短 くし、大型の EUT でそれよりも長いものが必要と なる場合を除いて 2.5 m 以下とする。背の高い機器 の上端近くや自立型機器の床面近くから電源線が出 ている場合、テーブルの上の高さまで引き下ろすか 引き上げるだけで 0.5 m 以上必要となるかも知れ ず、テーブルの上に 2 m 引くためには 2.5 m 以上 の長さが必要となりそうであるが、このような場合 は所定の方法で引き回すために必要な最小限の長さ とする。

相互接続ケーブルの余長はセットアップの後ろ側に 互いに 2 cm の間隔を開けてジグザグに引く (図 6)。

1.6.3 EUT の動作

エミッション測定では最大のエミッションを発生 する動作モードで、サセプティビリティ試験では最 も敏感な動作モードで動作させる。複数の動作モー ドがある場合、全ての回路を評価できるだけの数 のモードで試験する。モードの選択の根拠は文書化 する。

無線受信機のような同調可能な RF 機器は、それ ぞれの同調周波数帯について周波数帯の中程、及び 周波数帯かチャネルの範囲の端から ±5 % 以内の 周波数の少なくとも3つの周波数に同調させて試験 する。

(本項までは Part 1 と共通)

1.7 試験システムの校正や確認

多くの試験では試験システムの校正や試験前の確 認などの方法も規定されており、そのような規定が ある場合、この規格への全面的な適合のためにはそ の校正や確認などを規定された方法に従って行なう ことも必要となる。



試験時の試験システムの構成 (同軸ケーブルなど を含む) は校正や確認が行なわれたものと同一と する。

1.8 周波数掃引

サセプティビリティ試験で周波数掃引が必要とな る場合、表3を超えないレートでの周波数掃引を行 なう。この掃引率や掃引ステップは最大値であり、 試験では EUT の動作や妨害に対する応答などを考 慮して必要に応じて小さくする。

ステップ掃引の場合の各周波数の妨害を印加する 時間 (ドウェル・タイム) は、3 秒と EUT の応答時 間のいずれか長い方以上の時間とする。^{†5}

1.9 変調

CS114 (§4) と RS103 (§9) では、変調周波数 1 kHz、デューティ・サイクル 50 %、オン/オフ比 40 dB 以上のパルス変調を用いる (図 9)。



1.10 サセプティビリティの閾値の同定

規定のレベルでの試験でサセプティビリティが見 られた場合、サセプティビリティの閾値を以下のよ うに同定する:

 EUT が回復するまで印加する妨害のレベルを 低下させる;

- ステップ幅を半分に減らしながら手で妨害の周 波数を変え、不合格となった周波数範囲内の最 小の閾値を同定する;
- 3. 妨害のレベルをさらに 6 dB 下げる;
- サセプティビリティが再び確認されるまで妨害のレベルを緩やかに増加させ、この時のレベルをサセプティビリティの閾値とする;
- そのレベル、発生周波数範囲、最大のサセプ ティビリティの周波数とレベル、及びその他の 試験パラメータを記録する。

CS101 (伝導サセプティビリティ、電源線)

CS101 は、電源電圧波形の歪みやリップル (図 12 ~図14 のような)、また電源に重畳したその他の 比較的低い周波数の妨害の影響を評価するもので、 EUT の AC や DC の電源入力線に、電源が DC の 場合は 30 Hz から 150 kHz、電源が AC の場合は 電源周波数の 2 倍から 150 kHz の周波数範囲の妨 害をノーマル・モードで印加する。

AC 電源については、入力電流が 30 A 以下の 場合、あるいは試験対象のシステムに動作周波数が 150 kHz 以下で動作感度が 1 μ V よりも高い部分が ある場合にこの試験の対象となる。

電圧の制限レベル (試験レベル) は EUT の電源 入力での妨害電圧の大きさで規定され、これに加え て電力の制限が適用される (図 10)。



図 10: CS101 — 電圧と電力の制限レベル (試験レベル)

¹⁵ 例えば 30 MHz~18 GHz のステップでの掃引を最大のス テップ幅で行なうと約 1860 ステップとなり、ドウェル・タイム が 3 秒であれば 1 回の周波数掃引に 1.5 時間強 (各ステップで の妨害のレベルの合わせ込みやバンド毎のアンテナの交換など のため、実際の試験時間はこれよりも長くなる)を要する計算と なる。だが、例えば EUT の動作周期が長い、あるいは応答が遅 いためにドウェル・タイムを 10 秒とする必要があれば、1 回の 周波数掃引に 5 時間以上が必要となる。従って、試験時の動作 条件の選択などでは、EUT のサセプティビリティを短いドウェ ル・タイムで適切に評価できるようにすることを考慮すること が望ましい。

周波数範囲	アナログ掃引	ステップ掃引				
	最大掃引率	最大ステップ				
$30 \text{ Hz} \sim 1 \text{ MHz}$	$0.0333 \ f_0 \ / \ { m sec}$	$0.05 f_0$				
$1~\mathrm{MHz}{\sim}30~\mathrm{MHz}$	$0.00667 f_0 / \sec$	$0.01 f_0$				
30 MHz ${\sim}1~\mathrm{GHz}$	$0.00333 f_0 / \sec$	$0.005 f_0$				
$1~\mathrm{GHz}{\sim}40~\mathrm{GHz}$	$0.00167 \ f_0 \ / \ { m sec}$	$0.0025 \ f_0$				

表 3: サセプティビリティ試験での掃引



青: 60 Hz, 115 V rms, 紫: 1.2 kHz, 136 dBµV (約 18 Vp-p), 緑 = 青 + 紫
 図 13: CS101 ─ 妨害を重畳した交流電圧波形の例 (2)



この電圧の制限レベルは、図11 に図示するよう に、実際のプラットホームの電源で予期される妨害 (歪み)のレベルよりもやや高く設定されている。^{†6}



図 11: CS101 の電圧の制限レベル (試験レベル) と航空 機の電源品質要求 (MIL-STD-704F) の比較



青: 60 Hz, 115 V rms, 業: 180 Hz (3 次高調波), 136 dBµV (約 18 Vp-p), 縁 = 青 + 業
 図 12: CS101 ─ 妨害を重畳した交流電圧波形の例 (1)

2.1 電力制限に対する設定の同定

図15 のように妨害源に 0.5 Ω の抵抗を接続し、 それぞれの周波数について、出力 (抵抗で消費され る電力) が規定された電力制限 (図10) と等しくな

青: 60 Hz, 115 V rms, 紫: 100 kHz, 110 dBµV (約 0.9 Vp-p), 緑 = 青 + 紫
 図 14: CS101 ─ 妨害を重畳した交流電圧波形の例 (3)

るようにした時の信号発生器の設定^{†7}を記録し、ま た波形が正弦波であることを確認する。^{†8}

2.2 試験

EUT は、§1.6 で述べたように、また 図6~図8 で図示したようにセットアップし、図16~図17 の ように EUT の電源線に結合用変圧器を介して妨害

^{†6} また、直接の比較はできないが、CE101^[15] のエミッション限度は電源品質を許容範囲内に維持することを目的に設定されている。

¹⁷ 制御パラメータとして信号発生器の設定ではなく電力増幅 器の出力の電圧などが用いられることもあるが、それぞれに利 点と欠点がある。^[13]

^{†8} この規格では電力増幅器や結合用変圧器に対する具体的な 要求は示されていない。ISO 11452-10^{[3][8]} もこれと似た試験 を定めており、その規格では出力インピーダンス 2 Ω 以下の電 力増幅器と変圧比 2:1 の結合用変圧器の使用が定められている。



図 15: CS101 — 電力制限に対する設定の同定のための 構成

を注入できるようにして動作させ、以下のように試 験を行なう:

- EUT の電源入力に現れる妨害電圧が制限レベル (試験レベル; 図10) に達するまで、あるいは信号発生器の設定が事前に §2.1で求めた電力制限に対応するレベルに達する^{†9}まで信号発生器の出力の振幅を増加させる。
- 2. EUT の電源入力に現れる妨害電圧が該当する 制限レベル (図 21) を下回らない、もしくは信 号発生器の設定が §2.1で同定された値を下回ら ない状態を維持しながら周波数掃引 (§1.8) を 行なう。
- 3. サセプティビリティが見られた場合、その閾値 を同定する (§1.10)。
- 4. 全ての電源導体 (帰路導体や中性線は含まない) に対してこの試験を行なう。

状況によっては、EUT の電源入力のインピーダ ンスと比較して電源側のインピーダンスが高く、妨 害電圧の相当の部分が EUT 側ではなく電源側に現 われて EUT 側に妨害が印加されにくい状況となり (図 19)、EUT に適切に妨害を印加できていない状 態で電力制限に達するかも知れない。

従って、EUT の電源入力の妨害電圧が低い状態 で電力制限に達した場合は電源側 (10 μF の両端) に顕著な電圧が現われていないかどうかを確認し、



図 16: CS101 — 試験時の構成の例 (直流、単相 2 線)



図 17: CS101 — 試験時の構成の例 (3 相 4 線)



図 18: CS101 — 試験時の構成の例 (3 相 3 線)

もしそうなっていれば状況に応じて適切な対応を行 なうことが必要となるだろう。^{†10†11}

^{†9} これは、典型的には EUT の電源入力のコンデンサの影響 で EUT の電源入力のインピーダンスが低くなっている時に生 じる。EUT の電源入力のインピーダンスが 0.5 Ω を下回ると 電力の制限レベルに相当する皮相電力を EUT の電源入力に注 入しても電源入力に現れる電圧は電圧の制限レベルよりも低く なり、コンデンサが 1000 μF であれば 400 Hz 弱以上でこの状 態となる。

^{†10} MIL-STD-461G の本文中にはこれについての記載はない が、そのようにすべきことが §A.5.7 で述べられている。

^{†11} 電源側のインピーダンスは全周波数範囲で EUT の電源入



EUT の電源入力が容量性 (1000 μ F) と仮定した場合の 簡単なシミュレーションで、ここでは電源のインピーダンスは ゼロと仮定したが、それでも 500 Hz で LISN の 50 μ H × 2 のリアクタンスだけで 0.3 Ω に達し、一方 1000 μ F のリアク タンスは 0.3 Ω まで低下するため、それよりも高い周波数では EUT 側に現れる電圧 (V_{EUT}) よりも電源側 (V_{source}) に現れ る電圧の方が大きくなっている。5 kHz で V_{EUT} がディップし ているが、これは LISN の 50 μ H と 10 μ F の並列共振の影響 である。

実際の挙動はより複雑で、電源側と EUT 側のインピーダンス、 また電力増幅器と結合用変圧器の特性などの影響も受け、その 予測は簡単ではない。

図 19: CS101 — 電源側と EUT 側に現れる電圧の例

2.3 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- それぞれのリードについての試験が行なわれた 周波数と振幅のグラフか表;
- それぞれのリードで同定されたサセプティビリ ティの閾値と関係する周波数のデータ;
- それぞれのリードについて規格のサセプティビ リティ評価に関する該当する要求に従っている 旨の表明。

2.4 補足

結合用変圧器は方向性を持たず、電力増幅器から出力された妨害信号を試験対象のリードに結合させるのと同様、試験対象のリード上の電流を電力増幅器側に結合させる。

従って、電力増幅器はそれに耐え、またその状 態で正常に機能するものである必要がある。^{†12}

必要な場合、図20のように、EUT と同じ電 流が流れるように調整した擬似負荷を用いて EUT の定常的な基本波電流による結合を相殺 させることができるが、その効果は EUT と疑 似負荷の電流の大きさや電流波形の相違によっ て制約される。

さらに、EUT の電源の投入時に突入電流に伴 う著しく高い電流が結合用変圧器の一次側に生 じる可能性もある。これに伴う電力増幅器の損 傷の防止のため、電源投入時には電力増幅器を 切り離して結合用変圧器の一次側を抵抗でシャ ントしておき、電源投入後に電力増幅器を接続 して抵抗を切り離すことが必要となるかも知れ ない。



図 20: CS101 — EUT の電源電流からの電力増幅器の 保護

- 印加された妨害電流は電源側にも流れるので、 安定化電源を用いる場合は特に、電源への影響 にも注意が必要となるかも知れない。^{†13}
- 電圧の測定に用いる測定器(図16~図18で「オシロスコープかレシーバ」となっているもの)は、差動プローブなどを介して接続するか、あるいは入力自身がフローティングとなっている 測定器を用いることが必要となる。^{†14}

力のインピーダンスよりも充分に低いことが望ましい。DC 電 源では 10 μF の代わりにより大きな容量 (例えば 10000 μF で も)のコンデンサを接続してインピーダンスを下げられるかも知 れないが、AC 電源ではそのような大容量のコンデンサを接続す ることはできず、状況に応じて、電源フィルタや LISN をバイ パスする、電源を電源系統の電源インピーダンスの低いポイン トから取るようにする、などの対応が必要となるかも知れない。

^{†12} 充分な出力容量を持つ 4 象限バイポーラ・アンプはこの用 途で使用できるであろう。

^{†13} 電流が電源に逆流する状態となることがあるが、安定化電 源の多くはこのような状態で正常に動作するようには設計され ておらず、異常動作や損傷を生じる可能性もある。直流電源の場 合、電源として二次電池を用いることでこの問題に対処できる かも知れない。

^{†14} MIL-STD-461G ではオシロスコープの電源に絶縁変圧器

レシーバやスペクトラム・アナライザを接続す る場合には、通常、絶縁、信号レベルの調整、整 合を与えるトランスジューサが必要となる。^{†15}

- EUT の電源入力には印加された妨害によるもの以外の交流電圧(電源周波数やその高調波、EUT が発生するその他の周波数など)も現れることがあり、妨害電圧のレベルを正しく測定するのは簡単ではないかも知れない。^[12]
- EUT の電源入力のインピーダンスが高い場合 に著しい過剰試験となることが受け入れられる のであれば、EUT の電源入力に現れる妨害電 圧のレベルを気にせずに、単純に電力制限に対 応する設定 (§2.1) で周波数掃引を行なうこと もできるかも知れない。

但し、この場合も、電源側のインピーダンスの 影響で EUT 側に妨害が印加されにくい状況と なっていないかどうかを確認し、もしそうなっ ていれば適切な対応を行なうことは必要となる だろう。

CS109 (伝導サセプティビリティ、構造電流)

CS109 はプラットホームの構造を流れる電流が それに取り付けられた機器のエンクロージャを通過 する状況を想定したもので、機器のエンクロージャ に 60 Hz~100 kHz の電流を流した時の影響を評価 する。

多くの機器はそのような妨害の影響を受けそうに なく、100 kHz 以下の動作周波数と1 μV よりも高 い動作感度を持つ携帯型以外の機器がこの試験の対 象となる。

制限レベル (試験レベル) は全ての用途で共通で、 図 21 のようになる。



3.1 試験

- EUT は接地端子1点のみで接地された状態と する:
 - AC 電源の場合は絶縁変圧器を介して電源に接続する;
 - 電源ケーブルの保護接地リードは切り離す;
 - EUT と試験機器を非導電性の面に置く。

EUT を §1.6 で述べたように、また図 6~図 8 で図示したようにセットアップする必要はない。

- 2. 妨害の印加は以下の箇所に行なう:
 - ラックに搭載されない機器 取付面の 対角
 - ラックに搭載される機器 全ての面の 対角
 - 甲板に置かれる機器 全ての面の対角
 - 隔壁に取り付けられる機器 背面の対角
 - ケーブル EUT で終端されるケーブル 外装と試験セットアップの1点接地のあ いだ (ケーブル・シールドやコンジットも 同様)
- 妨害を印加する箇所に 図 22 のように接続し、 電流プローブで測定された電流が該当する制限 レベル (図 21) を下回らない状態を維持しなが ら周波数掃引 (§1.8) を行なう。

を入れる(保護接地線も切り離す)ことでオシロスコープをフ ローティングとする方法が示されているが、これはオシロスコー プの導電性の部分(BNCコネクタの外部導体やGND 端子など、 通常は接地電位にある筈の箇所)に触れただけで感電する危険を 生じさせる、安全規則にも抵触するかも知れない危険な方法で あり、この方法を不用意に用いないことを推奨する。

 $^{^{\}dagger 15}$ 例えば、Pearson Electronics 社の "Powerline Ripple Detector" のような。 $^{[12]}$



- 4. サセプティビリティが見られた場合、その閾値 を同定する (§1.10)。
- 5. 試験対象となるそれぞれの面の対角についてこ の試験を行なう。



3.2 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- 動作モード、サセプティブルな周波数、電流閾 値レベル、電流制限レベル(試験レベル)、サセ プティブルな試験ポイントの表;
- それぞれの試験ポイントを示す図。

4 CS114 (伝導サセプティビリテ ィ、バルク・ケーブル注入)

CS114 は相互接続ケーブルや電源ケーブルに結 合した 10 kHz~200 MHz の妨害の影響を評価する もので、ケーブルを持つ全ての機器に適用される。

これは主に機器やそのケーブルが電磁界に曝され た時の影響の評価を意図したものであるが、低い周 波数では電磁界の照射による試験は困難で、また実 際の使用時はこの周波数帯の妨害は主としてケーブ ルに結合する傾向がある^{†16}ため、この試験のような ケーブルへの妨害の注入による試験が有効な手段と なる。 制限レベル (試験レベル) は図 23 のようにカー ブ #1~#5 が規定されているが、それぞれの機器 に適用すべき制限レベルは機器の用途に応じて周 波数範囲毎にカーブ #1~#5 から MIL-STD-461G Table VI で示されているように選択され、

- 航空、宇宙 図 24
- 船舶、潜水艦 図 25
- 陸上 図 26

のようになる。

船舶や潜水艦に設置される機器の電源ケーブルに 対しては、ソリッド・ステートの発電システムが発 生することがある妨害の模擬のため、これに加えて 4 kHz~1 MHz で 77 dBµA のコモン・モードでの 試験が適用される。



4.1 校正

図 27 のような構成で、それぞれの周波数につい て、レシーバ A で測定された電流が制限レベル (試 験レベル) になる時にレシーバ B で測定された進行 波電力を記録する。^{†17}

注入プローブは挿入損失が MIL-STD-461G Figure CS114-2 の規定を満たすものを使用する。

^{†16} 10 kHz では波長 $\lambda = 30$ km、30 MHz でも $\lambda = 10$ m で、多くの機器はこの周波数帯の電磁波の波長に対してかなり 小さく、それ自身はそのような周波数の電磁波の影響を受けに くい。

^{†17}「レシーバ」となっているが、レシーバやスペクトラム・ アナライザは振幅測定の不確かさが大きく(§1.2 で示したよう にこの規格ではレシーバ単体で ±2 dB、測定系では ±3 dB が 許容され、CISPR 16-1-1 や ANSI C63.2 の要求も ±2 dB と なっている)、また周波数分析は不要であるのでテスト・レシー バやスペクトラム・アナライザを使う必然性はなさそうであり、 パワー・メータを用いることを考えても良いかも知れない。







4.2 検証

図 28のような構成で、最小のドゥエル・タイム、 表3 で示したステップ・サイズの 2 倍のステップで 周波数掃引を行ないながら注入プローブに §4.1で求 めた進行波電力を注入し、モニタ・プローブを介し て測定された電流が制限レベルの ±3 dB の範囲に あることを確認する。

この確認を無変調で行なうか変調 (§1.9) をかけ て行なうかは任意である。^{†18†19}



4.3 試験

試験は、EUT に接続される線の束に対して、次のように行なう (図 29):

- EUT のそれぞれのコネクタに接続されるそれ ぞれの線の束を一括で試験する;
- 電源線は、電源導体全て(帰路導体を含む)の
 一括での試験に加えて、帰路導体と接地線を除
 外しても試験する;
- その線の束に相互接続線と電源線の双方が含まれる場合、その線の束全体の一括での試験に加

^{†18} 勿論、変調をかけてこれを行なう場合、使用するレシーバ やその設定はその測定に適したものである必要がある。

^{†19} ここでは変調の確認は要求されていないが、変調が正しい

ことの確認は試験手順の一部として別途要求されている (§4.3)。



えて、電源導体全て (帰路導体を含む)を一括 で試験し、またそれから帰路導体と接地線を除 外しても試験する;

安全クリティカルな理由でケーブルが冗長化されている場合、それらへの印加を同時に行なう。^{†20}





図 29: CS114 & CS115 — 電源線を含む線の束の試験

試験対象となるそれぞれの線の束に対する試験は 次のように行なう:

- 1. EUT は、§1.6 で述べたように、また 図 6~図 8 で図示したようにセットアップし、動作させる。
- 図 30 に示すように、妨害の注入を行なう線の 束の EUT から 5 cm の位置 (コネクタのバッ クシェルの長さが 5 cm 以上ある場合などはそ のできる限り近く) にモニタ・プローブを、モ ニタ・プローブから 5 cm の位置に注入プロー ブを取り付ける。
- 3. 信号発生器を 10 kHz に設定し、変調周波数 1 kHz、デューティー・サイクル 50 % のパルス

変調 (§1.9) をかけ、出力の変調周波数、波形、 及び深さが正しいことを確認する。

- 注入プローブに印加する進行波電力^{†21}をあらか じめ校正治具上で求められた値 (§4.1)、あるい は実際にモニタ・プローブで測定された電流が
 - カーブ #5 115 dBµA (562 mA)
 - カーブ #4 103 dBµA (141 mA)
 - カーブ #3 − 95 dBµA (56.2 mA)
 - カーブ #2 − 89 dBµA (28.2 mA)
 - カーブ #1 − 83 dBµA (14.1 mA)

に達するような値^{†22}のいずれか低い方以上に 維持しながら周波数掃引 (§1.8) を行なう。

5. サセプティビリティが見られた場合、その閾値 を同定する (§1.10)。

4.4 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- 校正レベルを得るために必要な進行波電力の周 波数に対するプロット;
- 掃引した周波数範囲の表とサセプティビリティ 評価の要求に対する適合の宣言、またサセプ ティビリティの閾値と対応する周波数。
- 5 CS115 (伝導サセプティビリテ ィ、バルク・ケーブル注入、イ ンパルス励起)

CS115 は相互接続ケーブルや電源ケーブルにイ ンパルス性の妨害を結合させてサセプティビリティ を評価するもので、航空機、宇宙関係、また地上シ ステムで使用される機器に、そして調達機関が指定 したその他の機器に適用される。

この試験は、スイッチの開閉やその他の事象によっ て発生することがある立ち上がり/立ち下がりの早 いトランジェントの影響の評価を意図したものであ り、妨害の印加の方法は CS114 (§4) と似ているが、 印加される妨害は 図 31 のような矩形波となる。

^{†20} MIL-STD-461G では単に simultaneous multi-cable injection techniques を用いるように述べられているだけでその 詳細は述べられていないが、これは、それらのケーブルを束に して一括でクランプして試験する (この場合、それぞれのケーブ ルに印加される妨害は低くなる)のではなく、それぞれのケーブ ルに別の注入プローブを用いて同時に印加を行なうことを意味 していると思われる。

^{†21} 試験時にはパルス変調をかけるが、変調をかけたままでピーク・パワーを測定すれば良い。これは電流も同様。
^{†22} 図 23 で示したそれぞれのカーブでの最大の電流 + 6 dB。



図 30: CS114 — 試験セットアップの例



5.1 波形の確認と妨害レベルの設定

波形の確認と印加する妨害のレベルの設定は以下 のように行なう:

- 図 33 のような構成で、所定の形状 (図 31)の パルスを発生させられるようにパルス発生器を 設定する。
- オシロスコープで観測された電流が所定の値 (図 31) と等しくなるようにパルス発生器を調 整する。
- 立ち上がり時間、立ち下がり時間、パルス幅、 繰り返し周波数 (図31) を確認する。

4. パルス発生器の設定を記録する。

注入プローブの低域での特性の制限のため、注入 プローブの出力で観測される電流波形が図 31 のよ うな矩形波とならずに図 32のように著しくドループ したものとなるかも知れない。このような波形は許 容されるが、立ち上がり/立ち下がり時間は 2 ns 以 下に保たれていなければならない。



ここで使用する終端器やアッテネータには、過渡 的なものではあるがピーク電流 5 A、ピーク電圧



250 V、ピーク電力 1.25 kW のパルスが印加される ので、それに見合ったものを、またアッテネータは 適切な減衰率のものを使用する必要がある。



図 33: CS115 — 妨害レベルの設定のための構成の例

5.2 試験

試験は、EUT に接続される線の束に対して、次のように行なう (図 29):

- EUT のそれぞれのコネクタに接続されるそれ ぞれの線の束を一括で試験する;
- 電源線は、電源導体全て(帰路導体を含む)の
 一括での試験に加えて、帰路導体と接地線を除
 外しても試験する;
- その線の束に相互接続線と電源線の双方が含まれる場合、その線の束全体の一括での試験に加えて、電源導体全て(帰路導体を含む)を一括で試験し、またそれから帰路導体と接地線を除外しても試験する。

試験対象となるそれぞれの線の束に対する試験は 次のように行なう:

- 1. EUT は、§1.6 で述べたように、また 図 6~図 8 で図示したようにセットアップし、動作させる。
- 図 34 に示すように、妨害の注入を行なう線の 束の EUT から 5 cm の位置 (コネクタのバッ クシェルの長さが 5 cm 以上ある場合などはそ のできる限り近く) にモニタ・プローブを、モ ニタ・プローブから 5 cm の位置に注入プロー ブを取り付ける。
- 3. §5.1 で同定されたパルスを、要求で定められた 時間 (通常は1分間) 印加する。

- 4. サセプティビリティが見られた場合、その閾値 を同定する (§1.10)。
- 5. モニタ・プローブとオシロスコープで観測され たピーク電流を記録する。

5.3 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- サセプティビリティ評価の要求に対する適合の 宣言とそれぞれのコネクタに注入された電流レベルを示す表;
- サセプティビリティの閾値;
- 注入された電流波形。
- CS116 (伝導サセプティビリテ ィ、減衰正弦波トランジェント、 ケーブル及び電源リード)

CS116 は CS115 (§5) と同様にケーブルに結合し た過渡妨害の影響を模擬するものであるが、妨害と して、10 kHz, 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz, 30 MHz, 100 MHz の、またその機器の設置で他の周波数が 重要であることがわかっている場合はその周波数 (例えばプラットホームの共振周波数)の減衰振動波 (図 35) が用いられる。

このような減衰振動波は、典型的には電力の開閉 や雷などから生じるパルスによってケーブルでの共 振が励起された時に生じる。

潜水艦で使用される機器については、この試験は 耐圧殻から出るケーブルに対してのみ適用される。

6.1 波形の確認と妨害レベルの設定

波形の確認と印加する妨害のレベルの設定は、そ れぞれの周波数 (10 kHz, 100 kHz, 1 MHz, ...) に ついて、以下のように行なう:

 図 37 のような構成で、所定の形状のパルスを 発生させられるように減衰振動波発生器を設定 する。





図 34: CS115 — 試験セットアップの例



図 35: CS116 — 減衰振動波 (1 MHz)

- オシロスコープで観測されたピーク電流が要求 (図 36) と等しくなるように減衰振動波発生器 を調整する。
- 3. 減衰振動波発生器の設定を記録する。
- 4. 波形の以下のパラメータが要求に合致すること を確認し、記録する:
 - 繰り返し周波数;



・観測された波形の最初の半サイクル^{†23}の ピーク I_P 、50 % に最も近いピーク I_N 、 I_N が何個目のサイクルに対するものか (I_p を 1 個目として、N = 2, 3, 4, 5, ...) から、

$$Q = \frac{\pi(N-1)}{\ln(I_P/I_N)}$$

^{†23} 波形が半サイクルの途中、例えばピーク付近から始まる場 合、その次の半サイクルのピーク。



によって求めた制動係数 Q。^{†24}

図 35 では正弦波のゼロ・クロスから開始される ような波形を示しているが、波形の開始の位相角や 立ち上がり時間の規定はなく、波形は正弦波のピー ク近傍から開始された立ち上がりの早いものであっ ても良い。

過渡的なものではあるが、終端器やアッテネータ にはピーク電流 10 A、ピーク電圧 500 V、ピーク 電力 5 kW のパルスが印加されるので、それに見 合ったものを、またアッテネータは適切な減衰率の ものを使用する必要がある。



校正治具 図 37: CS116 — 妨害レベルの設定のための構成の例

6.2 試験

試験は、EUT に接続される線の束に対して、次のように行なう:

- EUT のそれぞれのコネクタに接続されるそれ ぞれの線の束を一括で試験する;
- さらに、ハイ側のそれぞれの電源線を個別で試 験する (帰路導体や中性線を個別で試験する必 要はない)。

試験対象となるそれぞれの線の束に対する試験は 次のように行なう:

- 1. EUT は、§1.6 で述べたように、また 図 6~図 8 で図示したようにセットアップし、動作させる。
- 図 38 に示すように、妨害の注入を行なう線の 束の EUT から 5 cm の位置 (コネクタのバッ クシェルの長さが 5 cm 以上ある場合などはそ のできる限り近く) にモニタ・プローブを、モ

ニタ・プローブから 5 cm の位置に注入プロー ブを取り付ける。

 それぞれの試験周波数について、減衰振動波発 生器を §6.1 で同定した所定のパルスを発生さ せるための設定とし、パルスを 1~2 秒周期で 5 分間印加する。

必要な場合、モニタ・プローブで測定されたピー ク電流を所望の値に合わせるように印加する妨 害のレベルを下げる、あるいはモニタ・プロー ブで電流を確認しながらピーク電流が所望の値 に達するまで妨害のレベルを緩やかに上げる。 オシロスコープで観測されたピーク電流を記録 する。

4. サセプティビリティが確認された場合、その閾値を同定する (§1.10)。

6.3 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- それぞれのケーブルやリードに対して行なわれ
 た試験の周波数と振幅の一覧;
- それぞれのケーブルやリードについて同定され たサセプティビリティの閾値とその周波数;
- それぞれのリードについて規格のサセプティビ リティ評価に関する該当する要求に従っている 旨の表明;
- §6.1 で得られた波形と Q の値、また試験で注入された波形。

7 CS118 (伝導サセプティビリティ、人体静電気放電)

CS118 は人体からの静電気放電の影響を評価す るもので、マン・マシン・インターフェースを持つ サブシステムや機器に適用される。これは兵器には 適用されない。^{†25}

 $^{^{\}dagger 24}$ これは制動係数 (係数が大きくなると制動が大きくなる) で はなく Q 値 (quality factor; Q) である。

 $^{^{\}dagger 25}$ MIL-STD-464C^[2] §5.8.3 で兵器サブシステムは 500 pF / 500 Ω での 25 kV の試験で意図しない発射や不発を生じては ならないと述べられている。その他のサブシステムや機器に対す る接触放電 8 kV、気中放電 15 kV の要求は MIL-STD-464C §5.8.4 の要求と整合している。





図 38: CS116 — 試験セットアップの例

試験は IEC 61000-4-2^{[5][9]} や ISO 10605^{[4][10]} で 用いられるものと同様の 150 pF / 330 Ω の ESD 試験器を用いて行なう。

7.1 ESD 試験器の検証

試験前に、少なくとも、図 40 で示すように 2 Ω の ESD 電流ターゲット^{†26}と 1 GHz 以上の帯域幅のオ シロスコープ^{†27}を用いて接触放電電流波形の図 41 で図示した各パラメータ (立ち上がり時間、ピーク 電流、30 ns と 60 ns での電流)を測定して記録し、 それら全てが規定を満足することを確認する。^{†28}

少なくとも校正では、上記の接触放電電流のパラ メータの確認に加えて、気中放電モードでの各電圧 設定での電極電圧が±10%の範囲内にあることの静 電電圧計での測定による確認も必要である (図 42)。 この電極電圧の確認は試験前にも行なうことが望ま しい。^{†29}



^{- &}lt;sup>128</sup> 図 41 で示したパラメータの規定は IEC 61000-4-2^{[5][9]} の 規定と整合している。

^{†26} IEC 61000-4-2^[5] には ESD 電流ターゲットの詳細やその 検証、変換インピーダンスの測定などに関する情報が含まれて いるので、これも参考にすると良いだろう。

⁺²⁷ MIL-STD-461G ではオシロスコープは 1 GHz 以上の帯域 幅のものが要求されているが、帯域幅 1 GHz ではそれ自身の立ち 上がり時間が 0.35 ns となり、実際の立ち上がり時間が 0.55 ns のパルスがそのオシロスコープでは立ち上がり時間 0.65 ns と 測定される可能性がある。IEC 61000-4-2^[5] ではオシロスコー プは 2 GHz 以上の帯域幅のものが要求されており、この場合は そのオシロスコープで立ち上がり時間 0.65 ns と測定されたパ ルスの実際の立ち上がり時間は 0.63 ns 程度と推定され、パル スの支告上がり時間への影響が有意に低減されるため、2 GHz 以上の帯域幅のオシロスコープの場合のサンプリング・レートの規定 もないが、0.8±25 % の立ち上がり時間の測定、また放電電流 波形の鏡いビークの測定を考えると、20 GSa/s 程度以上のサ ンプリング・レートが望ましいかも知れない。

^{†29} MIL-STD-461G では電極電圧の確認と放電電流波形の検 証が校正手続きとして述べられており、その確認を試験前に行 なって結果を記録しなければならない旨が後者についてのみ書 かれている。



図 40: CS118 — 接触放電電流波形の測定







7.2 試験

試験は次のように行なう:

- 1. EUT は、§1.6 で述べたように、また 図 6~図 8 で図示したようにセットアップし、動作させる。
- 2. ESD は通常の使用でオペレータや設置作業者 がアクセスできる箇所に印加する。

印加箇所の検討には、スイッチ、ノブ、ボタン、 表示 LED、継ぎ目、グリル、コネクタのシェ ル、その他のアクセス可能な領域を含める。最 低限、それぞれの面を含める。

- 接触放電を適用可能な箇所は ±8 kV の接触放 電で、接触放電を適用できない箇所は ±2, ±4, ±8, 及び ±15 kV の気中放電で試験する。
- 接触放電では尖った電極を用い、電極の先端を 印加箇所に接触させた状態で放電スイッチを閉 じる。

気中放電では先端の丸い電極を用い、EUT から離れた位置で放電スイッチを閉じた後に 0.3 m/s よりも遅い速度^{†30}で印加箇所に電極 を近付ける。

5. 選択されたそれぞれの印加箇所にプラスで5回、 マイナスで5回の印加を行なう。

放電と放電のあいだに、1 MΩ の抵抗かイオナ イザ^{†31}を用いて、あるいは単に電荷が消散す るのに必要な時間だけ待つことで、印加箇所に 残った電荷を除去する。

8 RS101 (放射サセプティビリテ ィ、磁界)

RS101 は 30 Hz~100 kHz の磁界に対するサセ プティビリティの評価を行なうもので、

- 陸軍や海軍の地雷除去や地雷探知の機能を持つ 車両で使用される機器
- 海軍の船舶や潜水艦で使用される、100 kHz 以下の動作周波数と1µVよりも高い動作感度を 持つ機器
- 海軍の航空機で使用される、対潜戦 (ASW) 用 航空機に設置される機器、及び電磁力カタパル トで発射される航空機の外部の機器

に適用される。

この試験は、例えば近傍の他の機器が発生する磁 界の影響の評価を意図しているが、多くの機器はそ のような磁界に対して敏感ではないため、主に、磁 界に敏感となりそうな、あるいは強い磁界を発生す



^{†30} IEC 61000-4-2:2008 では電極が EUT に当たるまででき る限り早く近付けるように、ISO 10605:2008 では 0.1~0.5 m/s という値が示されているものの実際上は放電が発生するか電極 が EUT に当たるまでできる限り早く近付けるように述べられ ており、この規定はそれらとは相違している。

^{†31} イオナイザの効果は除電したい箇所にどれだけのイオンが 到達するかに依存し、イオナイザの能力、配置、試験対象品の構 造などによっては除電に相当の時間を要する場合もある。





図 43: CS118 — 試験セットアップ

るかも知れない機器やシステムの近くで使用される 機器がこの試験の対象となっている。

8.1 使用するコイル

8.1.1 12 cm 放射ループでの試験

磁界の発生には、AWG 20 の銅線を巻いた、直径 12 cm、巻き数 20 の放射ループを用いる。

このループが発生する磁界の強度の分布は図 44 の ようになり、ループの軸上、ループの面から 5 cm の距離での磁束密度は $9.5 \times 10^7 \text{ pT/A}$ より求めら れる。^{†32}

インテグリティ・チェック (§8.2.1) では 7-41 の リッツ線を巻いた、直径 4 cm、巻き数 51 の静電遮

^{†32} 半径 r、巻数 N のコイルの軸上、コイルの中心から距離 z における磁束密度は

$$B_z = \frac{\mu_0 N r^2 I}{2(r^2 + z^2)^{3/2}}$$

となり、この試験で使用する 12 cm ループの軸上 5 cm で の磁束密度は r = 0.06 m、N = 20、z = 0.05 m として $B_z = 94.95 \dots \mu$ T/A となるが、この試験に関しては規格で 9.5×10^7 pT/A という係数が示されているので、単純にその値 を使用すれば良いだろう。



X 軸が放射ループの中心軸、R 軸が放射ループの半径方 向で、X = 0 m, R = 0 m が放射ループの中心、X = 0 m, R = 0.06 m が放射ループの巻線の位置となる。この図での磁 界の強さを示す値は X = 0.05 m, R = 0 m での値を 1 とした 時の相対値で、5 以上の値は 5 として図示している。

図 44: 12 cm 放射ループの磁界分布^[14]

蔽されたループ・センサを用い、その補正係数は製 造業者のデータを使用する。^{†33}

⁺³³ 面積 S (m²)、巻数 N のループを周波数 f (Hz) の H (A/m) の磁界中に置いた時にループに生じる開放回路電圧 は $U_0 = 2\pi f N S \mu_0 H$ より求められるが、その出力を 50 Ω 系 で測定した時の電圧は高い周波数で低下し、これは開放回路電 圧のように単純に求めることはできない。

8.1.2 ヘルムホルツ・コイルでの試験

ヘルムホルツ・コイルは同じ寸法の2つのコイル を平行にしたもので、図45に示すような、非常に均 一性の高い磁界を発生させることができる。

ヘルムホルツ・コイルの寸法の規定はないが、EUT の大きさに応じて、次の条件を満たすようにする:

- コイルの間隔 EUT とコイルの面のあいだの距離が 5 cm 以上となる;
- コイルの半径 r r ≤ コイルの間隔 ≤ 1.5r。

ヘルムホルツ・コイルの軸上の磁束密度は、磁束 密度 B_z (T)、真空の透磁率 μ_0 (H/m)、各コイル の巻き数 N、電流 I (A)、コイル半径 r (m)、コイ ル間隔 d (m)、軸上の位置 z (m) として、

$$B_{z} = \frac{\mu_{0}NIr^{2}}{2} \left(\frac{1}{(z^{2}+r^{2})^{3/2}} + \frac{1}{((d-z)^{2}+r^{2})^{3/2}}\right)$$

より、またコイル間隔 *d* がコイル半径 *r* と等しい ヘルムホルツ・コイルの中心位置での磁束密度は、

$$B_z = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 NI}{r} \simeq \frac{8.99 \times 10^{-7} NI}{r}$$

より求められる。



図 45: ヘルムホルツ・コイルの磁界強度の分布 [14]

インテグリティ・チェック (§8.2.2) では RE101^[15] で用いるものと同じ 13.3 cm ループ・センサを用 い、その補正係数は製造業者のデータを使用する。 ^{†33}

8.2 インテグリティ・チェック

8.2.1 12 cm 放射ループ

 1. 放射ループの軸上 5 cm の距離に、放射ループ と平行にループ・センサを置く(図 46)。

- 1 kHz で 110 dBpT を発生させられるだけの 電流を放射ループに流す。 放射ループのコイル係数は 9.5 × 10⁷ pT/A で、これは 159.6 dB(pT/A) であるので、 110 dBpT を発生させるために必要な電流は -49.6 dBA、すなわち 3.3 mA となる。
- ループ・センサの出力をレシーバで測定し、ルー プ・センサの補正係数を考慮して予期される値 の±3 dB 以内にあることを確認する。



図 46: RS101 — 12 cm 放射ループの確認のための構成 の例

8.2.2 ヘルムホルツ・コイル

- ヘルムホルツ・コイルの2つのコイルの間隔を、 EUT がヘルムホルツ・コイルの半径よりも小 さい場合は半径と等しく、半径よりも大きい場 合はコイルと EUT のあいだの間隔が少なくと も 5 cm となるようにする。
- ヘルムホルツ・コイルの2つのコイルの間隔が 半径と等しい場合は2つのコイルの中間に、間 隔が半径よりも広い場合はいずれかのコイルの 中心に13.3 cm ループ・センサ (RE101^[15] と 同様のもの)を置く (図 47)。
- 3.1 kHz で 110 dBpT を発生させられるだけの 電流をヘルムホルツ・コイルに流す。

ループ・センサの出力をレシーバで測定し、ループ・センサの補正係数を考慮して予期される値の±3 dB 以内にあることを確認する。



 それぞれの周波数で、制限レベル (図 49) を発 生させられる電流を放射ループに印加した状態 で、EUT の面やコネクタから 5 cm の距離を 維持しながら放射ループを動かし、サセプティ ビリティが見られないことを確認する (図 48)。



図 48: RS101 — 試験セットアップ

図 47: RS101 — ヘルムホルツ・コイルの確認のための 構成の例 (コイルの間隔と半径が等しい場合)

8.3 試験

8.3.1 12 cm 放射ループ

試験は次のように行なう:

- 放射ループを EUT の面やコネクタから 5 cm の距離に、その面が EUT の表面やコネクタの 軸と平行となるように置く。
- 制限レベル (図 49) よりも少なくとも 10 dB 高 い磁界を発生させられる、だが 15 A を超えな い電流を放射ループに印加しながら周波数掃引 を行なう。
- サセプティビリティが見られた場合、サセプティ ビリティが高い周波数をオクターブ当たり3つ 以上選択する。
- ループを EUT の各面のそれぞれの 30×30 cm の領域、またそれぞれのコネクタに合わせてこ の作業を繰り返す。^{†34}
- 5. 一連の作業で得られたデータからオクターブ当 たり3つの周波数を選択する。



図 49: RS101 — 制限レベル、及び 12 cm 放射ループで その磁界を発生させるために必要な電流

8.3.2 ヘルムホルツ・コイル

試験は次のように行なう:

- ヘルムホルツ・コイル内に EUT をその面がコ イルの面と平行となるように置く。
- 制限レベル (図49) よりも少なくとも 6 dB 高 い磁界を発生させられる電流をヘルムホルツ・ コイルに印加しながら周波数掃引を行なう。
- サセプティビリティが見られた場合、サセプティ ビリティが高い周波数をオクターブ当たり3つ 以上選択する。

^{†34} 図 44 で示したようにこの放射ループからの磁界の広がり は限られているので、ループを置く位置の選択ではその影響も 考慮すべきかも知れない。



- EUT のそれぞれの面全体をループ内に入れる ようにコイルに対する EUT の位置を変えなが らこの作業を繰り返す。
- 5. 一連の作業で得られたデータからオクターブ当 たり3つの周波数を選択する。
- 選択されたそれぞれの周波数で、制限レベル (図 49) を発生させられる電流をヘルムホルツ・ コイルに印加した状態で、コイルを動かしてサ セプティビリティが見られないことを確認する。

8.4 補足

• 12 cm 放射ループの磁界の強さは放射ループの 正面 50 mm の位置 (EUT の表面に相当する 位置) で規定されるが、図44 に示したように この放射ループが発生する磁界の拡がりはかな り限られており、磁界を遮るものがない場合で も EUT 表面から 20 mm の位置で –3 dB 以 下に、30 mm の位置では –6 dB 以下に低下 することが予期される (図44)。従って、規格 上はこの試験法は大きな EUT にも適用できる ものの、磁界の影響を受けやすい部分が大きな EUT の内側にある場合、放射ループをどの位 置に置いてもその部分をあまり磁界に曝せない 可能性がある。

実際の使用状況においても、近傍の機器からの 磁界は12 cm 放射ループからの磁界と同様に 距離に応じて急激に減衰することが期待できそ うではあるが、大きな機器の内側に磁界に敏感 な部分があるような場合は特に、この方法でそ の機器を適切に評価できるかどうかを検討した 方が良いかも知れない。

- ヘルムホルツ・コイルは広い領域で均一性の 高い磁界を発生させられるが(図45)、大きな EUTの試験のためにはそれに応じた大きさの ヘルムホルツ・コイルが必要となり、また大き なコイルは高い周波数での使用が難しいものと なる。
- 機器からの磁界のエミッションは RE101^[15] で カバーされ、図 50 に示すように、RS101 の制 限レベル (試験レベル) は機器から 7 cm の位置 で適用される RE101 の制限レベル (エミッショ ン限度) よりも高く設定されているので、その

条件のもとで RS101 に適合する機器と RE101 に適合する機器は両立することが期待できる。



図 50: RS101 制限レベル (試験レベル) と RE101 エミッ ション限度の対比

ISO 11452-8^[8] でもこれと似た試験法が述べられており、RS101 と ISO 11452-8 で示されている試験レベルの比較を図 51に示す。



図 51: RS101 と ISO 11452-8 の試験レベルの比較

9 RS103 (放射サセプティビリティ、電界)

RS103 は無線送信機やレーダーなどから放射され るような高周波の電磁界の影響を評価するもので、 2 MHz~40 GHz の周波数帯がカバーされる。

但し、30 MHz~18 GHz は無条件で適用される が、30 MHz 以下や 18 GHz 以上の適用は、

- 2~30 MHz 陸軍、海軍、調達機関が指定したその他の場合
- 18~40 GHz 調達機関が指定した場合

についてのみ必要となる。^{†35}

試験は、30 MHz 以下は垂直偏波で、30 MHz 以 上は垂直偏波と水平偏波の双方で行なう。







9.1 試験

試験は次のように行なう:

- EUT は、§1.3 で述べたような電波暗室に、§1.6 で述べたように、また 図6~図8 で図示したようにセットアップする。
- 送信アンテナはセットアップのアンテナ側の面から1m以上の距離^{†36}に置き、アンテナの位置は周波数とセットアップに応じて以下のように決定する:
 - 2~200 MHz

セットアップの幅が 3 m 以下であればそ の幅の中心で、さもなくばセットアップの 幅を W (m)、 $N \in W/3$ を整数に切り上 げたものとして W/N の間隔の複数の位 置で試験する (図 58)。

• 200 MHz 以上

1 GHz 以下では、EUT のエンクロージャ 全面と EUT に接続されたケーブルの最初 の 35 cm を 3 dB ビーム幅に入れるよう に、また 1 GHz 以上では、EUT のエン クロージャ全面と EUT に接続されたケー ブルの最初の 7 cm を 3 dB ビーム幅に 入れるように、必要に応じて複数の位置 で試験する。^{†37}

^{†35} 30 MHz では波長 $\lambda = 10 \text{ m}, \lambda/4 = 2.5 \text{ m}$ であるので、 30 MHz 程度以上では 2~2.5 m のケーブルが照射された電磁界 と良く結合するようになることが期待されるものの、それよりも 低い周波数では放射での試験の有用性が低下することが予期され る。この規格では、ケーブルに結合する 10 kHz~200 MHz の 妨害の影響はいずれにしても CS114 (§4) で評価され、従って、 30~200 MHz、あるいは 2~200 MHz は RS103 と CS114 で 重複して評価されることになる。

^{†36}高い周波数では送信アンテナのビーム幅が小さくなるため、 照射範囲を広くするため、距離を大きくすることを考える価値 があるかも知れない。勿論、距離を大きくすればより大きな電 力が必要となるので、これはトレードオフとなるだろう。 ^{†37}例えば ETS-Lindgren 3115 や Schwarzbeck

 電界センサは、セットアップのアンテナ側の面 に合わせて、送信アンテナの正面、1 GHz 以 下ではグランド・プレーンから 30 cm 以上の 高さ、1 GHz 以上では EUT が照射される範 囲に対応する高さに置く。EUT の角や縁の直 近には置かない。^{†38}

送信アンテナのビーム内に複数の電界センサを 置いてその平均値を制御に用いても良い。

アンテナを垂直偏波とし、電界センサで得られた電界強度が所定の値(図52~図54)となるようにしながら周波数掃引(§1.8)を行なう。

印加する妨害は変調周波数 1 kHz、デューティー・サイクル 50 % のパルス変調 (§1.9) をかける。

電界強度の調整を変調をかけた状態で行なうた めには、その状態で電界強度を直接測定できる のでない限り、変調の影響に対する補正が必要 となる。この補正係数の決定の方法は §9.3.2を 参照。

- 5. サセプティビリティが見られた場合、その閾値 を同定する (§1.10)。
- 6. 30 MHz 以上について、アンテナを水平として 同様に試験を行なう。

9.2 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- 試験された周波数範囲と電界強度のグラフか表;
- センサ出力の読みを変調波形の等価ピーク値に 換算するために必要な補正係数 (§9.3.2);
- サセプティビリティの閾値のグラフか表;
- 実際の機器のセットアップと各部の長さを示す
 図か写真。

9.3 補足

9.3.1 高調波の制限

電界の強さの測定に用いられる電界センサは通常 は周波数選択性を持たず、それが示す値は測定した い周波数以外の成分の影響も含んだものとなる。

この規格ではその具体的な方法や基準は示されて いないものの電界センサが高調波ではなく基本周波 数での値を示すことを確かとすることが要求されて おり、通常、アンテナから放射される電磁界の高調 波成分を充分に低く保つことが必要となる。例えば、 単一の高調波が支配的と仮定できる場合、その高調 波成分を基本周波数成分の –6 dB 以下に保てばそ の高調波の電界の測定値への影響を1 dB 以下とで きそうである。

アンテナから放射される電磁界の高調波成分を抑 えるためには電力増幅器の出力の高調波成分を抑え れば良いが、アンテナのゲインは基本周波数よりも 高調波の周波数で高くなることがあり、電力増幅器 の出力での高調波はそれを考慮してさらに低く抑え ることが必要となるかも知れない。^{†39}

9.3.2 変調に対する電界センサの補正

試験では電磁界は変調 (§1.9) されるが、電界センサはそのような電磁界の電界強度を直接測定できるとは限らない。

そのような変調された電磁界に対する電界センサ の補正係数は典型的には次のようにして求めること ができる:

- 1. 無変調で電界を発生させる;
- フル・スケール近くの読みを得られるように電 界を調整し、センサの読みを記録する;^{†41}
- 電界を変調し、電界のピーク値が同一であることを例えば受信アンテナと尖頭値検波のレシーバを用いて確認する;

BBHA 9120 D は 18 GHz まで使用可能であり、15 GHz 程 度以下では 3 dB ビーム幅は 30 ° 程度で、これは距離 1 m で 約 50 cm に相当する。だが、それよりも高い周波数範囲では 3 dB ビーム幅は 7 ° 程度まで小さくなるかも知れず、これは 距離 1 m で約 12 cm に相当する。このような小さいビーム幅 で EUT のエンクロージャ全面とケーブル 7 cm、及び電界プ ローブを 3 dB ビーム幅に入れることは難しく、ビーム幅の広 いアンテナを使用することが、あるいは試験距離を 1 m よりも 長くすることが必要となりそうである。

^{†38} 特に高い周波数では規格の規定に従うことは困難となるか も知れず、そのような場合は調達機関との事前の調整が必要と なるかも知れない。

 $^{^{\}dagger 39}$ 例えば 30 MHz からの対応が謳われているバイコニカル アンテナは 90 MHz では 30 MHz におけるよりも 14 dB 程 度高いゲインを持つかも知れず、この場合、アンテナの出力で 3 次高調波を -6 dBc 以下としたいのであれば電力増幅器の出力 では -20 dBc^{$\dagger 40$} 以下とすることが必要となりそうである。

⁺⁴⁰ IEC 61000-4-3^{[6][9]} は電力増幅器の高調波やスプリアスが -20 dBc 以下であることを求めている。また、EMC 試験用の 電力増幅器は -20 dBc 以下の高調波歪みが仕様で謳われてい ることがある。

^{†41} センサの読みが変動するようであれば、読みが安定するように設定を調整することも必要となる。







図 56: RS103 — 試験セットアップの例 (≥ 200 MHz)





図 57: RS103 — 試験セットアップの例 (≥ 200 MHz, 自立型機器)



N は X/3 を整数に切り上げたもので、例えば X = 4 m で あれば N = $\lceil 4/3 \rceil$ = 2、X/N = 2 m、X = 5 m であれば N = $\lceil 5/3 \rceil$ = 2、X/N = 2.5 m となる。

図 58: RS103 — アンテナの水平方向の位置 (f < 200 MHz)

- 4. センサの読みを記録する;
- 5. 補正係数の同定のため、無変調時と変調時のセンサの読みの比率を求める;
- 一貫性の確認のため、この作業をいくつかの周 波数で繰り返す。

9.3.3 その他

 30 MHz 以下の電界の発生にはしばしば E-field generator などと呼ばれるものが用いられるが、
 距離 1 m 以上で 200 V/m を発生させること は難しいかも知れず^{†42}、適切な他の手段を、必要に応じて調達機関の承認の上で用いることが必要となるかも知れない。

MIL-STD-461G §5.21 は距離 1 m 以上での アンテナでの照射とリバブレーション・チャン バーのみに言及しているが、MIL-STD-461G §A.5.21 には「アンテナ、ロング・ワイヤ、TEM セル、リバブレーション・チャンバーなどの任 意の電界発生デバイスを使用できる」とある。

アンテナが恒久的に取り付けられた受信機については、意図された受信帯域内での性能の低下が許容される。受信機は帯域内での曝露の後では性能要求に適合しなければならない。

9.4 代替試験法 — リバブレーション・ チャンバ

200 MHz~40 GHz については、§9.1 で述べた伝 統的な試験法の代わりにリバブレーション・チャン バを用いた試験も可能である。

この試験法は、伝統的な送信アンテナからの電磁 界の照射による試験と同様、送信アンテナから電磁

 $^{^{\}dagger 42}$ 例えば AR ATE10K30MA はエレメント間に 2~30 MHz で 200 V/m を発生させるために必要な電力は 200 W 程度であるが、距離 1 m では 3 kW でも 50 V/m 強しか得られそうにない。



界を放射して EUT とケーブルをその電磁界に曝 すものである。だが、この試験で用いられるシール ド・チャンバーは電波吸収体を持たず、その逆に意図 的に反射を起こすように作られている。このような チャンバー内の電磁界は反射に伴って著しく不均一 なものとなるが、この試験で用いられるリバブレー ション・チャンバーでは、送信アンテナから放射され た直接波が EUT に当たらないようにし、またチャ ンバー内に取り付けられたチューナー (可動の金属 板で、スターラー、パドルなどとも呼ばれる)を試 験中に回転させてチャンバー内の反射の状態を段階 的に変化させることで、全体としては概ね均一な特 性が得られるようにしている。これにより、EUT と ハーネスを主としてアンテナからの直接波に曝すよ うに意図された伝統的な試験法と異なり、この試験 法では EUT やケーブルが様々な方向からの様々な 偏波の電磁界に曝されるようにもなる。また、チャ ンバーが共振に伴うゲインを与えるため、比較的小 さい電力で広い範囲で高い電界強度を得ることも可 能となる。

電界強度の校正は電界プローブか受信アンテナを 用いて行ない、電界の均一性の確認は IEC 61000-4-21^[7] によって行なうことができる。チャンバーの応 答がパルス変調に追従できるだけ早いかどうかは、 IEC 61000-4-21 と同様、チャンバーの *Q* から求め ることができる。

試験に際しては、EUT とケーブルをワーキング・ ボリューム内に他の試験と同様の形で配置する。試 験時には、それぞれの周波数について、所定のス テップでチューナーの角度を変え、それぞれの位置 にあらかじめ定めたドウェル・タイムのあいだ留め て EUT への影響を観測する。チューナーの角度の 変更は、最低で 12~50 ステップ (周波数によって異 なる) で行なうように述べられており、1回の周波数 掃引に要する時間は長くなることが予期される。一 方、先に述べたように EUT やケーブル全体が様々 な方向からの様々な偏波の電磁界に曝されるため、 一般に EUT の向きやアンテナの偏波を変えての試 験を考えることは不要で、またセットアップの所定 の範囲全体をアンテナの3dBビーム幅に入れるた めに位置を変えて試験を繰り返す必要もない。この ため、この試験法は、送信アンテナのビーム幅が小 さくなる傾向があり、また照射範囲が広くなるよう にビーム幅の大きいアンテナを用いたり試験距離を 長くしたりした場合には特に高い電界強度を得るこ

とが難しくなりやすい高い周波数の試験で特に魅力 的なものとなるかも知れない。

10 参考資料

- MIL-STD-461G, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, Department of Defense, 2015
- [2] MIL-STD-464C, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems, Department of Defense, 2010
- [3] ISO 11452-10:2009, Road vehicles Component test methods for electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy – immunity to conducted disturbances in the extended audio frequency range
- [4] ISO 10605:2008, Road vehicles Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge
- [5] IEC 61000-4-2:2008, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test
- [6] IEC 61000-4-3:2006, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
- [7] IEC 61000-4-21:2011, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods
- [8] ISO 11452 シリーズの概要, 株式会社 e・オータ マ 佐藤, 2016,

https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html

[9] IEC 61000-4 シリーズ イミュニティ試験規格の 概要,株式会社 e・オータマ 佐藤, 2018,

https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html

[10] ESD 試験規格 ISO 10605 ed. 2 の概要, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2016,

```
https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html
```

[11] Investigation of Undesired Ripple Voltage Across Power Source Side and Solutions in Military Low-Frequency Immunity Tests, Soydan Cakir et al., IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine (Volume: 8, Issue: 3), 2019,

https://doi.org/10.1109/MEMC.2019.8878239

[12] Fifty-Year Old EMI Testing Problems Solved!, Ken Javor, 2012,

https://incompliancemag.com/article /fifty-year-old-emi-testing-problems-solved/





図 59: RS103 — リバブレーション・チャンバーの概観

- [13] MIL-STD-461 CS101 Test Method Review, Steve Ferguson, 2019, https://interferencetechnology.com /mil-std-461-cs101-test-method-review/
- [14] https://t-sato.in.coocan.jp/compliance.html
- [15] 軍需機器の EMC MIL-STD-461G の概要 Part 1: 主なエミッション要求 (CE101, CE102, RE101, RE102), 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2020,

https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html

© 2020 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。