



RF・マイクロ波アプリケーションの 電波吸収体に関する 考慮事項 トップ10

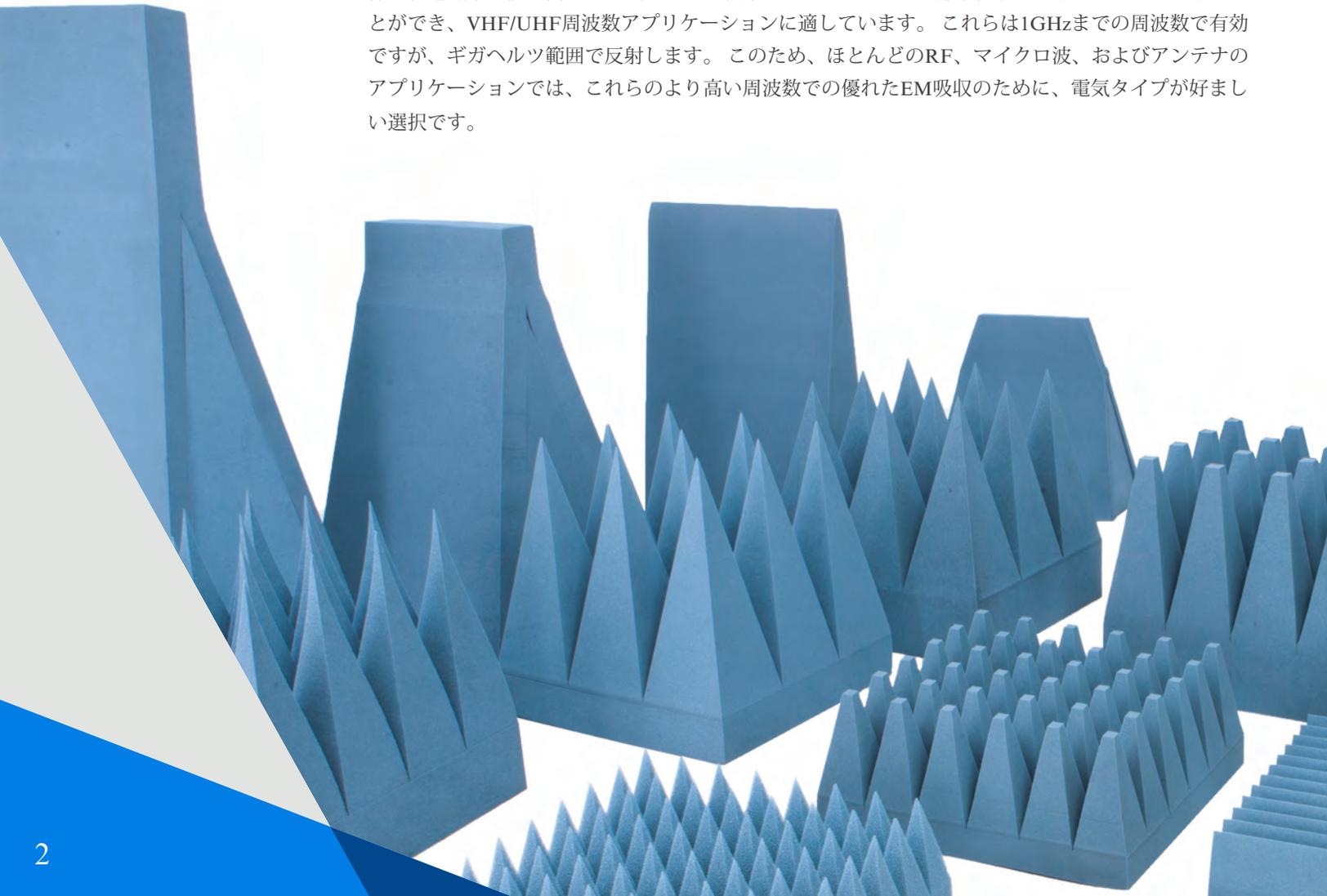
RF・マイクロ波アプリケーションの電波吸収体に関する考慮事項トップ10

以下は、試験および測定アプリケーションのためにRF・マイクロ波電波吸収体を選定する際に考慮すべき最も重要な事項のトップ10リストです。

このリソースは、電波吸収体の選定でよくある間違いを回避するのに役立つだけでなく、電波吸収体がどのように「機能する」かについても説明します。結果的に、時間を浪費することなく、特定のアプリケーションに最適な吸収体を選択し、最良の測定結果を得ることが可能となります。さらに、電波吸収体は単なる「フォーム」ではないことを理解できます。この迅速で簡潔なガイドでは、いくつか例を挙げ、標準規格、試験対象デバイスの影響、チャンバースペースの制約、そして電波吸収体性能に対する設置環境の影響など、電波吸収体の選定に関する多くの考慮事項について解説します。

1. 電波吸収体がどのように機能するかを理解し、利用可能なさまざまなタイプの電波吸収体の設計に着目してください。

電波吸収体は、進行する電磁波（EM）からの反射を抑制し、入射する電磁エネルギーを「吸収」するように設計されています。これは、吸収体の内部の電磁エネルギーを放散し、それを熱に変えることによって行われます。吸収体は、電気的損失特性または磁氣的損失特性のいずれかを持っている材料でできています。電気タイプは、損失のある誘電体（複素誘電率）でできています。磁性タイプは、損失の多いフェライト材料（透磁率が複雑）でできています。フェライトまたは磁気吸収体は、透磁率の値が高いため（たとえば、厚さ5～6 mmのタイル形状）、かなりコンパクトにすることができ、VHF/UHF周波数アプリケーションに適しています。これらは1GHzまでの周波数で有効ですが、ギガヘルツ範囲で反射します。このため、ほとんどのRF、マイクロ波、およびアンテナのアプリケーションでは、これらのより高い周波数での優れたEM吸収のために、電気タイプが好ましい選択です。





2. 吸収体の性能に対するピラミッド形状の影響を理解してください。

吸収体は、広い周波数範囲をカバーするように設計されています。広帯域吸収体は、衝突波のインピーダンスの「突然の」変化を回避することによって機能し、EM波を徐々に終端して吸収します。波動インピーダンスは、電界（E）と磁界（H）のトランスバース成分の比率です。波のインピーダンスは、通過する材料によって決まります。これは下式によって導かれます。

$$\eta = \sqrt{\frac{E}{H}}$$

素材の中は、

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

ここで、 η は波動インピーダンス、 μ は透磁率、 ϵ は誘電率です。

自由空間で、 $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega$ 電気吸収体は誘電体でできており、磁気特性は無視できるため、吸収体では次のようになります。

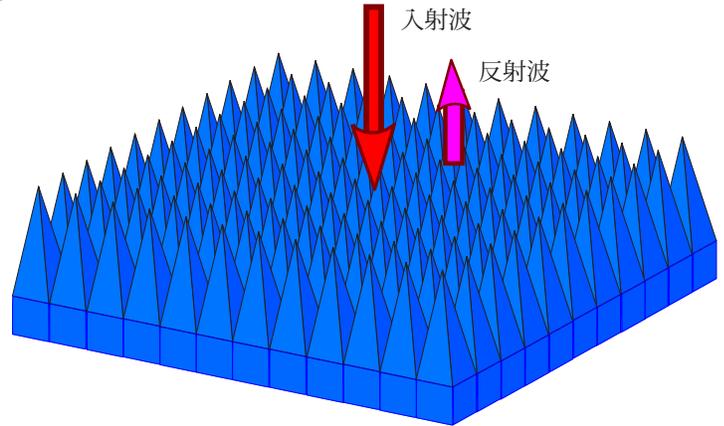
$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

ここで、 ϵ_r は比誘電率（自由空間に対する相対）です。

吸収体は通常ピラミッド型です。これは、ピラミッドの周期（エリア内のピラミッドの数）に比べて波長が長い場合、波が個々のピラミッドを区別できないためです。代わりに、誘電体と周囲の空気が混合した平均的な材料を「認識」します。波がピラミッド型吸収体に衝突すると、吸収体の長さに沿って平均波動インピーダンスが徐々に変化するのを「認識」します。したがって、反射が最小限に抑えられます。同時に、吸収体材料の損失特性のために、電気エネルギーは熱損失に変換されます（オームの法則による）。

3. RF性能のために吸収体がどのように指定されているかに注意してください。

反射率は、RFパフォーマンスの主な性能指数です。反射率は、吸収体が導電性の地面の上に直接置かれたときの平面波の入射波に対する反射波の比率として定義されます。通常、dB値として表されます。吸収体は反射グランドプレーン上で測定されるため、反射損失には吸収体の往復を通過する波が含まれます。したがって、（吸収体を介した）アースなしの伝送損失は、反射損失の約半分になります。吸収体は、入射EM波がそれらに直接衝突する場合（つまり、入射角 0° または法線角度）に最も効果的に機能します。吸収体は通常、法線入射角での周波数の関数としての反射率として指定されます。入射角が大きくなると反射率が低下することを理解することが重要です。入射波の入射角が大きい領域で吸収体を使用すると、入射角度の仕様が楽観的になりすぎる可能性があることに注意してください。



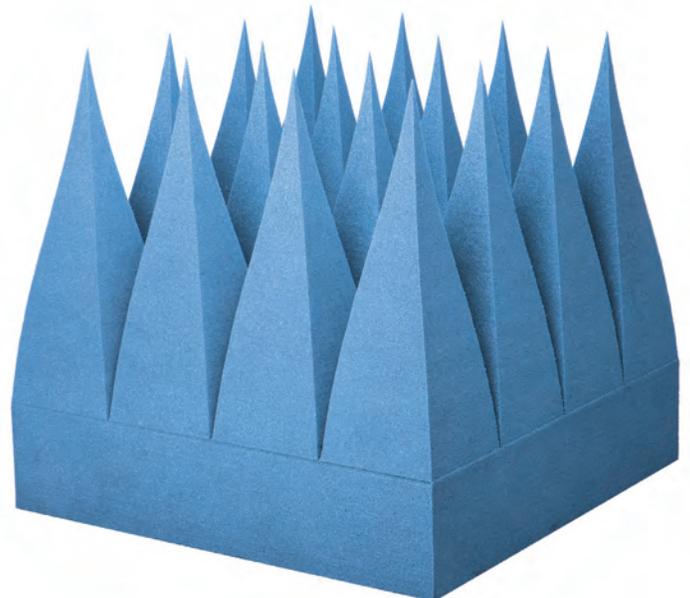
4. アプリケーションに適した長さや形状の吸収体を選定してください。

ピラミッド型吸収体の長さは、最低周波数でどれだけ良好に機能できるかを決定します。一般に、通常の吸収(垂直入射)の場合：

- 20 dBの反射率レベルを達成するには、ピラミッド型吸収体の長さが約0.4波長 (0.4λ) 以上である必要があります。
- 30 dBの反射率の場合、長さは約0.8 λ 以上である必要があります。
- 40 dBの反射率の場合、長さは約1.5 λ 以上である必要があります。

ここで、 λ はメートル単位の自由空間波長であり、 $\lambda = 300 / f$ から計算できます。ここで、 f は MHz単位の周波数です。高度な数値シミュレーションと正確な材料特性制御を使用して、特定の長さに対して最適化された反射率を実現できます。最適化された吸収体設計の一例は、曲線状の吸収体になります。

曲線形状では、一般的なピラミッドの1.5 λ と比較して、1 λ 未満の長さで40dBの反射率レベルが達成されます。スペースに制約のあるアプリケーションでは、曲線吸収体が最適です。





5. 一般的に利用可能な吸収体の長さを知ってください。

電波吸収体の一般的な長さは、3インチ、5インチ、8インチ、12インチ、18インチ、24インチ、36インチ、48インチ、そして72インチです。ETS-Lindgren吸収体の場合、吸収体の長さはモデル番号で識別されています。EHP-24PCLは、24インチのピラミッド型吸収体です。各吸収体底面は、24"x24"の領域をカバーするピラミッドのアレイで構成されています。短い吸収体は、より多くのピラミッドで構成されています。たとえば、1つのEHP-3PCLは12 x 12(144個)のピラミッドで構成され、1つのEHP-24PCLは3x3(9個)のピラミッドで構成されます。これら標準長の吸収体を購入するほうが安価であり、短納期となります。以下に、さまざまな吸収体の長さの典型的な反射率を示します。

Maximum Reflections at Normal Incidence

MODEL NUMBER	80 MHz	120 MHz	200 MHz	300 MHz	500 MHz	L-BAND 1 to 2 GHz	S-BAND 2 to 4 GHz	C-BAND 4 to 8 GHz	X-BAND 8 to 12 GHz	KU-BAND 12 to 18 GHz	K-BAND 18 to 40 GHz
EHP-3PCL								-30 dB	-40 dB	-45 dB	-45 dB
EHP-5PCL							-30 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB
EHP-8PCL						-30 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB
EHP-12PCL						-35 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB
EHP-18PCL					-30 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB
EHP-24PCL			-20 dB	-30 dB	-35 dB	-40 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB
EHP-36PCL	-11 dB	-13 dB	-25 dB	-30 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB
EHP-48PCL	-15 dB	-20 dB	-30 dB	-35 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB
EHP-72PCL	-20 dB	-30 dB	-40 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB
EMC-24PCL	-6 dB	-6 dB	-7 dB	-30 dB	-35 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-45 dB

6. 吸収体の耐電力能力を事前に決定してください。

高品質のポリウレタンベースの吸収体は、恒久的な損傷なしに最大90度の温度を安全に処理できます。経験則として、ポリウレタン吸収体は、追加の強制気流なしで、室温で 0.5 W/in^2 の連続波 (CW) 入射フィールドの最大電力に耐えるように指定されています。これは、 540 V/m の電界 (平面波/遠方界条件) に相当します。より高い出力処理アプリケーションでは、より多孔質のフォームベースの吸収体 (網状フォーム基板を使用) が利用可能です。このタイプの「フィルター付きフォーム」吸収体は、通常、無響室の通気孔に配置されます。ろ過されたフォーム吸収体は、熱をより効率的に放散し、強制空気なしで最大 1 W/in^2 の電力を処理でき、強制空気を吸収装置に通ずとはるかに高い電力を処理できます。

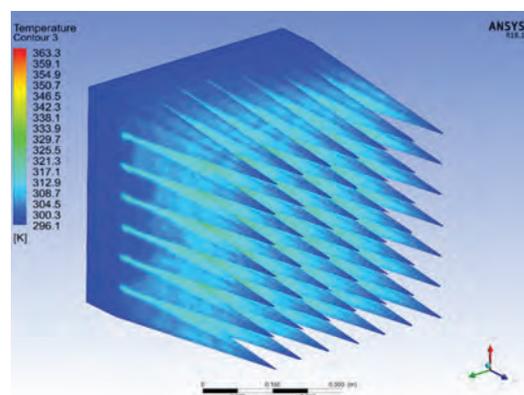
さらに高出力のアプリケーションには、フェノールベースの材料で作られたハニカム基板を備えた高出力吸収体が推奨されます。ハニカムの壁には損失のあるフィルムがコーティングされており、入射電磁波を効果的に吸収します。中空のハニカム連結構造により、フェノールベースの材料が高温に耐えながら、空気を引き込むことができます。利点は、ポリウレタン材料で作られた従来の吸収体よりもはるかに高い電力密度で電磁エネルギーフラックスを吸収体に負荷できることです。高品質の高出力吸収体は、損傷することなく250度に達することができ、強制空気なしで 2 W/in^2 を処理できます。強制気流により、この吸収体ははるかに高い電磁場電力密度に耐えることができます。高出力テストシステムが設計目標を達成し、特定のニーズに合わせて安全に動作できるようにするには、RFと機械工学の両方に関する追加の専門知識が必要です。

一般的な経験則として、上記の説明は、吸収体の電力処理機能に関するガイドラインを提供します。さまざまな電力レベルでの吸収体の熱プロファイルは、RF周波数、近距離または遠距離場の状態、周囲温度、および気流に依存する複雑なトピックです。人員の安全と無響室への投資、およびテスト対象の機器の保護が重要であるため、吸収体メーカーがANSYS®HFSS (High Frequency Structure Simulator; for electromagnetics) とANSYS Icepak (熱シミュレーション用) などのマルチフィジックスシミュレーションツールを使用して広範な電力処理研究を実施できることを確認してください。これらのシミュレーションは測定結果によって検証されており、より具体的な設計ニーズを満たし、安全なテスト環境を確保するための貴重なツールになります。

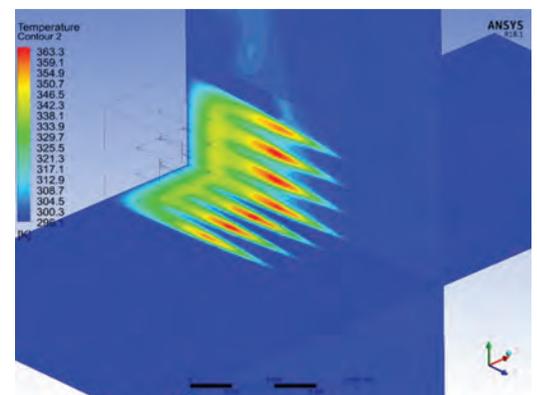
吸収体の可燃性評価については、吸収体に燃焼制限/難燃性があり、以下に示す米国政府および商業用の可燃性仕様を満たしていることをサプライヤーに確認してください。結果が独立した試験所によって検証されていることを確認してください。

- **NRL Report 8093 (Tests 1, 2, and 3)**
- **MIT Lincoln Laboratory Specification MS-8-21 (Tests I, II, and III)**
- **Raytheon Drawing No. 2693066 (latest revision)**
- **UL 94-5VA and UL 94-5VB**
- **UL 94 HBF**
- **DIN 4102 Class B-2**

詳細については、2013年10月6日~11日、オハイオ州コンバスで開催されたアンテナ測定技術協会の2013年年次シンポジウムでZhongChenが発表した論文「Kuバンドのポリウレタンベースの吸収体の表面および内部温度と入射フィールド測定」を参照してください。www.amta.org



平面波照射時の吸収体の表面と内部温度





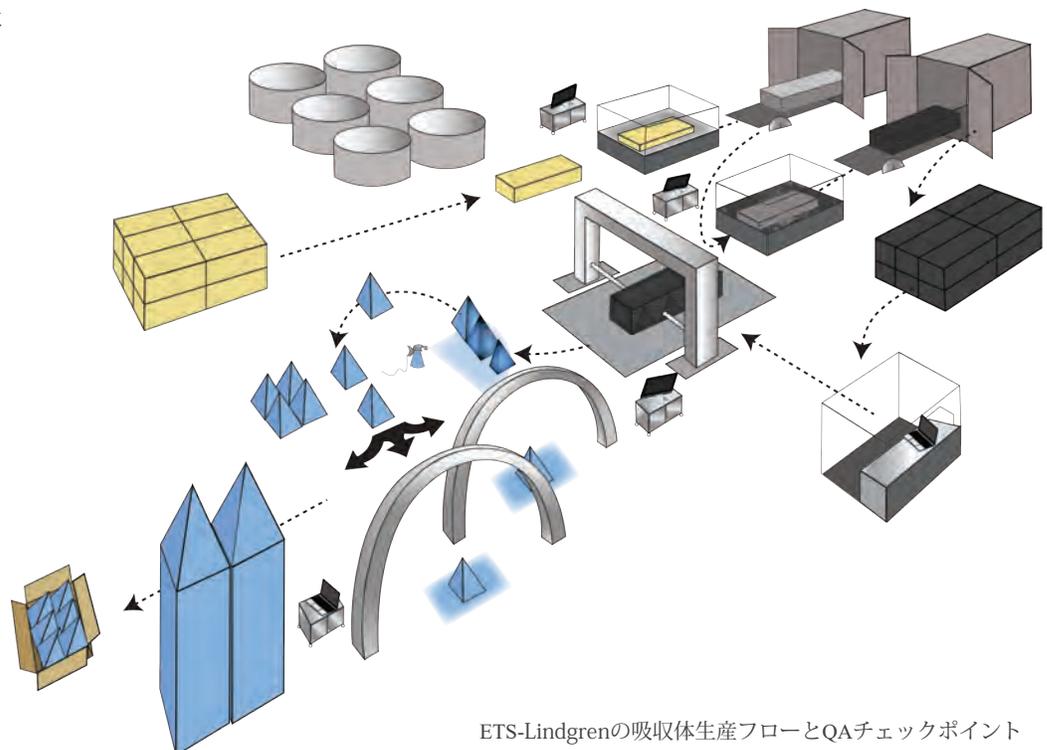
7. 製造プロセスと、これが吸収体の品質にどのように影響するかを理解してください。

高品質の製造プロセスは、ポリウレタンフォームの均質なブロックから始まるコンピューター制御です。ブロックには、損失のある薬剤の独自の溶液が含浸され、高温で乾燥されます。次にブロックに難燃剤をもう一度含浸させ、再度乾燥させます。この2段階のプロセスにより、両方の薬剤が均一に分散され、フォーム全体にカーボンが恒久的に結合します。利点は、チャンバー内の繊細な電子機器を汚染する可能性のある炭素粒子を放出しない吸収体であることです。事実、高品質の吸収体は、クラス100,000のクリーンルーム環境で使用できます。

含浸後、高品質の製造プロセスで、 $\pm 3 \text{ mm}$ (.12インチ)の公差を維持するコンピューター制御の鋸を使用してフォームが成形されます。含浸プロセス後に乾燥したフォームを最終的な形状に切断することで、収縮や反りを防ぎます。

利点は、均一な幾何学的位置合わせで電波暗室に設置できる吸収体であり、後方散乱を低減し、測定精度を向上させます。

最後に、吸収体の製造元がRF・マイクロ波吸収体の製造のために現在のISO9001認定品質システムを導入していることを確認することをお勧めします。



ETS-Lindgrenの吸収体生産フローとQAチェックポイント

8. 非吸湿性の「防水」吸収体を利用してください。

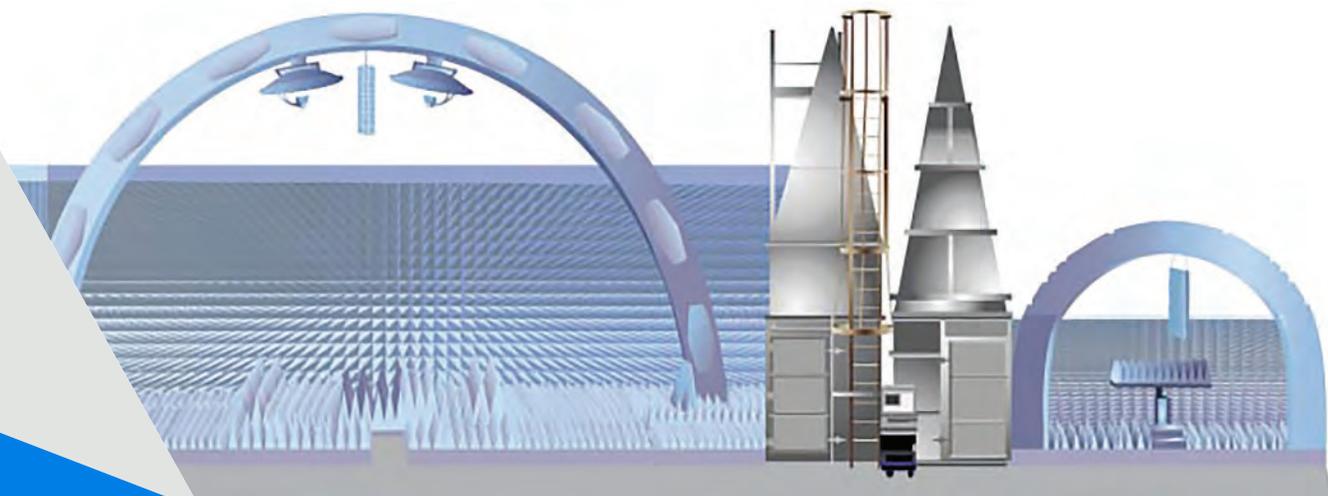
周囲の湿度レベルに関係なく、安定した吸収体の電気的特性（誘電率）を維持することが不可欠です。そうしないと、RF反射率が変動します。水分は電気伝導率（誘電率の虚数部）に大きな影響を与えることが知られています。従来のポリウレタン吸収体は、吸湿性の火塩を使用して燃焼を制限し、難燃性を高めますが、これらの塩は空気中の水分を引き付けます。つまり、吸湿性、つまり空気から水分を吸収します。

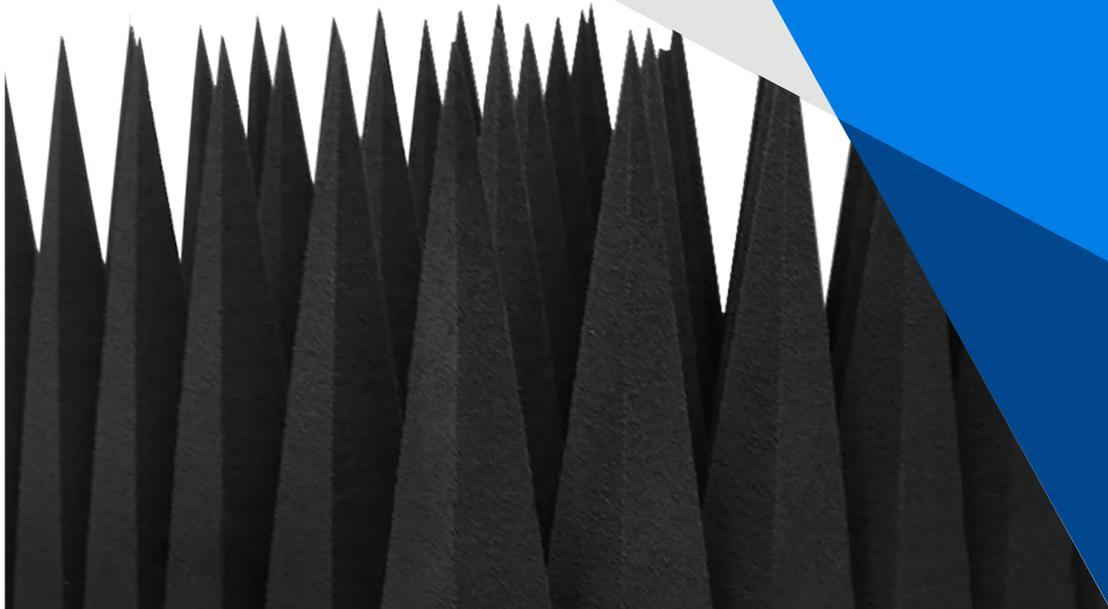
主に製造プロセス中に非吸湿性難燃剤を使用しているため、非吸湿性で水を吸収しない最新のポリウレタン吸収体を利用可能です。独立気泡構造のポリスチレン吸収体には、非常に非吸湿性であるという追加の利点があります。これらの2種類の吸収体（最新のポリウレタンとポリスチレン）を使用した結果、安定した吸収体の電気的特性が得られます。したがって、吸収体は長期間にわたってより良い性能を発揮します。

研究によると、非吸湿性吸収体は、95%相対湿度（RH）の極端な湿度に240時間さらされた場合、平均2.3%の質量増加を示し、極端な乾燥状態（20%RH）に同じく240時間さらされた場合、平均0.69%の質量減少を示しました。対照的に、同じ条件下でテストされた従来の吸収体は、95%RHで平均質量が59.6%増加し、20%RHで質量が7.1%減少しました。

9. 吸収体のRF性能検証テストを確認してください。

以下に示すように、吸収体はTEMデバイス（周波数1 GHz以下の場合）またはNRLアーチ（1 GHz以上）のいずれかで測定されます。どちらの方法もIEEE規格1128で指定されています。TEMデバイスは基本的に、一端が電氣的に短絡された同軸ケーブルです。同軸ケーブルの外側と内側の両方の導体は、正方形の断面を持っています。吸収体がある場合とない場合の測定された反射（S11）の違いが反射率です。TEMセルが電氣的に大きくなると、高次モードでTEM波が歪む可能性があるため、低周波数範囲に制限されます。NRLアーチ法は、受信アンテナが鏡面反射角に配置されているときに、送信アンテナが吸収体を照射するバイスタティック測定です。反射率は、反射率を完全電気導体（PEC）プレートと比較することによって測定されます。アンテナ距離（アーチ半径）と吸収体のサンプルサイズは低周波数で非常に大きくなる可能性があるため、高周波数範囲に最適です。これを念頭に置いて、出荷前にパフォーマンスの反射率を検証するために、どのように吸収体をテストするかをサプライヤに依頼してください。吸収体のすべてのピースがテストされていますか、それともバッチごとに1つのピースがサンプルテストされていますか？吸収体の各部分はシリアル化されていますか？これらはあなたの投資を保護するために尋ねるべき重要な質問です。



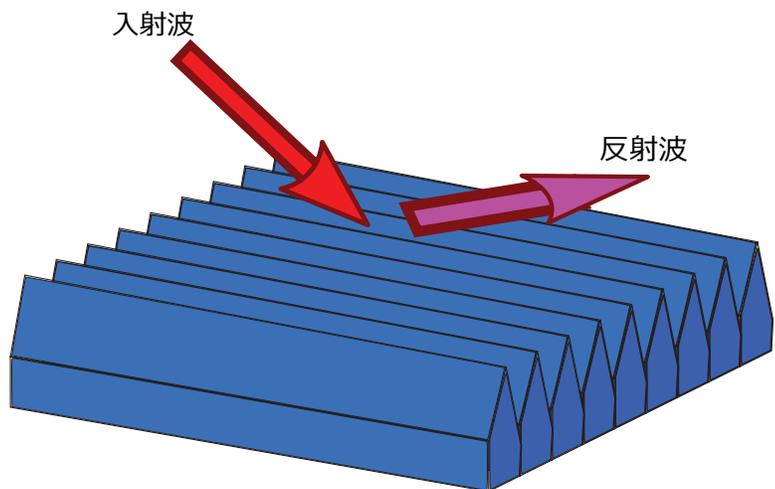
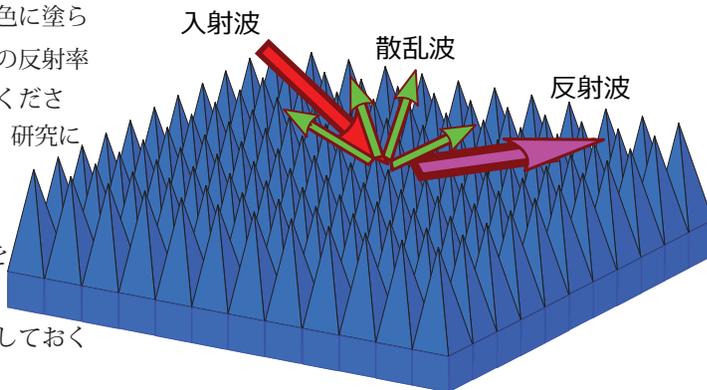


10. 吸収体の形状、コーティング、塗装の影響を考慮してください。

EM波は、吸収体の先端とエッジから散乱する可能性があり、鏡面方向だけでなく他の方向にも散乱フィールドを作成します。目的のテストゾーン（クワイエットゾーン、またはQZ）は、近くの吸収体からの散乱場の影響を受ける可能性があります。このため、散乱を減らすために、QZの近くでくさび形の吸収体がよく使用されます。

吸収体は元来黒く、美的理由から通常は明るい色に塗られています。ミリ波周波数では、塗料が吸収体の反射率に悪影響を与える可能性があることに注意してください。場合によっては5~10dBの影響があります。研究によると、影響を軽減するには、先端だけを未塗装（黒い先端）のままにしておくだけでは不十分であることがわかっています。40 GHzを超えるアプリケーションの場合、最高のパフォーマンスを得るには、吸収体を未塗装のままにしておく必要があります。

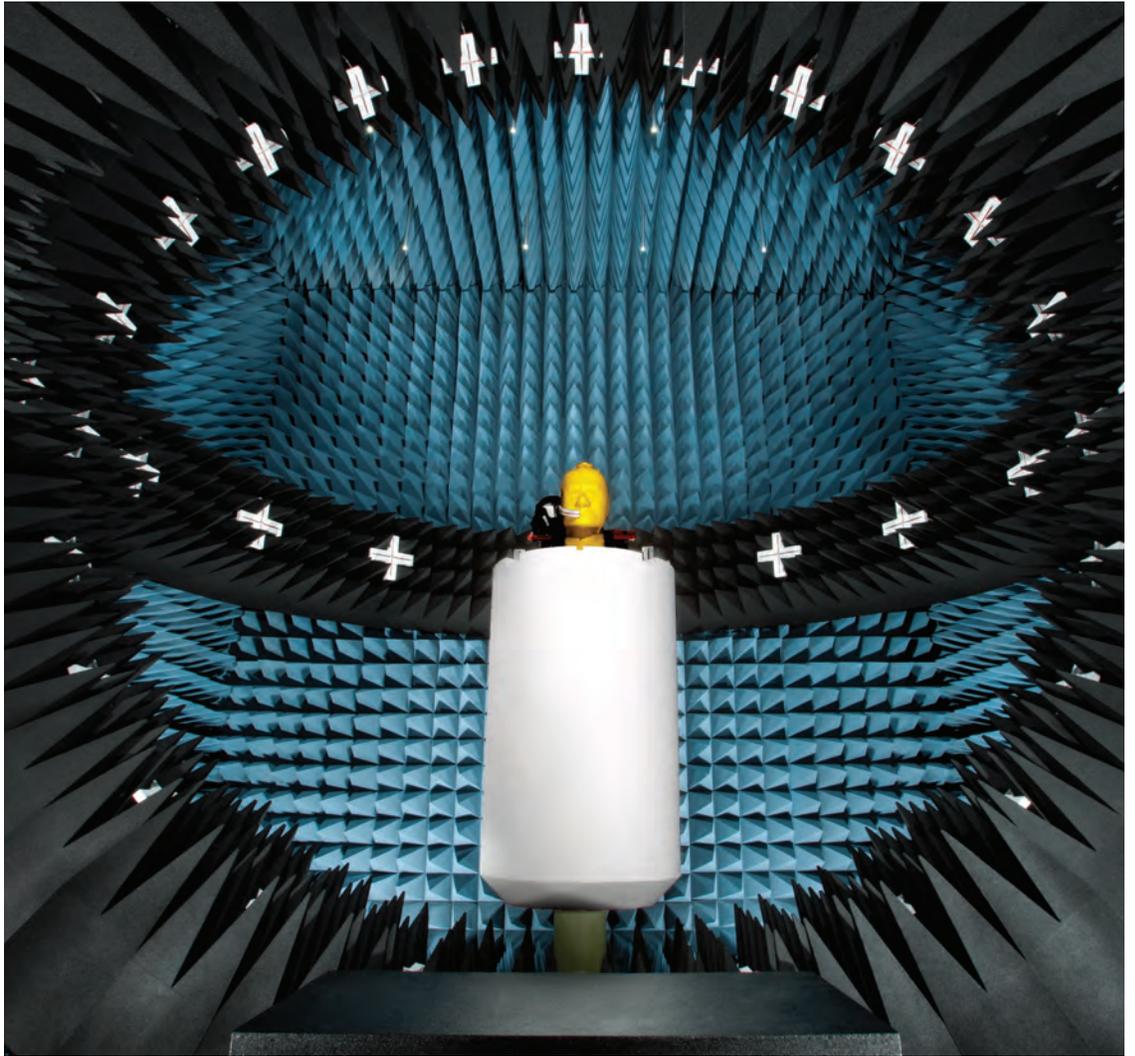
耐久性を高めるためにラバーコーティングを施した吸収体も利用できます。この特別な吸収体処理は、電波暗室の出入り口や内壁など人の出入りの多いエリア、または床面吸収体敷設が必要なテストに最適です。ラバーコーティングには、吸収体の先端が破損する可能性を最小限に抑えるという追加の利点があります。吸収体は、自由空間インピーダンスから背面の終端インピーダンスに徐々に移行するように設計されています。吸収体の先端が壊れていると、インピーダンスの遷移とマッチングに影響します。壊れた先端の大きさや破片の数によって、効果は大きく異なります。このリスクは、吸収体のラバーコーティングによって軽減されます。



Absorber Selector

MODEL NUMBER	FREQUENCY RANGE MINIMUM	FREQUENCY RANGE MAXIMUM	ABSORBER FOOTPRINT	PYRAMIDS PER ABSORBER	BASE HEIGHT	OVERALL HEIGHT	PYRAMID HEIGHT	WEIGHT
EHP-3PCL	4 GHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	256	1.90 cm (0.75 in)	8.25 cm (3.25 in)	6.4 cm (2.52 in)	1 kg (2.20 lb)
EHP-5PCL	2 GHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	144	2.50 cm (0.98 in)	12.7 cm (5.00 in)	6.4 cm (2.52 in)	1.6 kg (3.53 lb)
EHP-8PCL	1 GHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	64	5.10 cm (2.01 in)	21.6 cm (8.50 in)	16.5 cm (6.50 in)	2.8 kg (6.17 lb)
EHP-12PCL	1 GHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	36	5.7 cm (2.24 in)	31.1 cm (12.24 in)	25.4 cm (10.00 in)	4.6 kg (10.14 lb)
EHP-18PCL	500 MHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	16	5.7 cm (2.24 in)	46.4 cm (18.27 in)	40.6 cm (15.98 in)	4.6 kg (10.14 lb)
EHP-24PCL	200 MHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	9	10.2 cm (4.02 in)	61.0 cm (24.02 in)	50.8 cm (20.00 in)	6.1 kg (13.45 lb)
EHP-36PCL	80 MHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	4	15.2 cm (5.98 in)	91.4 cm (35.98 in)	76.2 cm (30.00 in)	9.5 kg (20.94 lb)
EHP-48PCL	80 MHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	4	20.3 cm (7.99 in)	121.9 cm (47.99 in)	101.6 cm (40.00 in)	11.3 kg (24.91 lb)
EHP-72PCL	80 MHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	1	30.5 cm (12.01 in)	182.9 cm (72.01 in)	152.4 cm (60.00 in)	15.9 kg (35.05 lb)
EMC-24PCL	80 MHz	40 GHz	61.0 cm x 61.0 cm (24.0 in x 24.0 in)	9	15.24 cm (6.0 in)	61 cm (24.0 in)	45.72 cm (18.0 in)	4.3 kg (9.50 lb)

80 MHz	120 MHz	200 MHz	300 MHz	500 MHz	L-BAND 1 to 2 GHz	S-BAND 2 to 4 GHz	C-BAND 4 to 8 GHz	X-BAND 8 to 12 GHz	KU-BAND 12 to 18 GHz	K-BAND 18 to 40 GHz	MODEL NUMBER
							-30 dB	-40 dB	-45 dB	-45 dB	EHP-3PCL
						-30 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	EHP-5PCL
					-30 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	EHP-8PCL
					-35 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	EHP-12PCL
				-30 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	EHP-18PCL
		-20 dB	-30 dB	-35 dB	-40 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	EHP-24PCL
-11 dB	-13 dB	-25 dB	-30 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	EHP-36PCL
-15 dB	-20 dB	-30 dB	-35 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	EHP-48PCL
-20 dB	-30 dB	-40 dB	-40 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	EHP-72PCL
-6 dB	-6 dB	-7 dB	-30 dB	-35 dB	-45 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-50 dB	-45 dB	EMC-24PCL



ETS-Lindgrenが5Gおよびミリ波（Wバンド）アプリケーション用の電波吸収体を提供していることをご存知ですか？ RF、マイクロ波、Wバンドアプリケーション用の電波吸収体の選定について支援が必要な場合は、ETS-Lindgrenがお手伝いします。お近くのETS-Lindgrenの担当者に連絡するか、当社のWebサイト www.ets-lindgren.com にアクセスしてください。