

## ChatGPT への質問事項「エアバス A 3 5 0 - 9 4 1 型機の胴体外板の CFRP の成分」

### A350 胴体外板 CFRP の材料構成

#### 1. 炭素繊維 (Carbon Fiber)

主に PAN 系炭素繊維 を使用。代表的には 東レ T800 級、T700 級、あるいはそれと同等の米国 Hexcel 社製 IM7/IM10 グレード。高強度タイプと高弾性率タイプを部位に応じて使い分け

含有率：約 60～65 wt%

#### 2. 樹脂マトリックス (Matrix Resin)

エポキシ樹脂 (toughened epoxy resin) が主体。耐衝撃性・耐疲労性を高めるために 熱可塑性粒子やゴム粒子 をブレンドした「**靱性強化エポキシ**」。高 T<sub>g</sub> (ガラス転移温度) 仕様で、機体外板の**温度環境** (-55～+80°C程度) に耐える

含有率：約 35～40 wt%

#### 3. 添加剤・補助成分

難燃性添加剤 (FAR Part 25 防火基準適合)、硬化剤 (アミン系)・触媒、ナノシリカやゴム改質材 (破壊靱性向上)

一部は **導電性添加材** (カーボンブラック、銅メッシュ、アルミメッシュ) を積層表面に入れて、**落雷対策** (lightning strike protection, LSP) を実現

### 製造方法

胴体外板は プリプレグ (炭素繊維にエポキシを含浸させたシート) を積層 → オートクレーブで硬化  
A350 の場合、1 ピースバレル方式ではなく、大面積パネル (約 8m 長) を積層 → 接合 して胴体を形成  
外板表面には **銅メッシュやアルミメッシュ** を一体化させて**落雷対策**

#### まとめ

A350-941 胴体外板の CFRP の典型的な成分：炭素繊維 (PAN 系、T800/IM7 クラス) / 約 60～65%、  
エポキシ樹脂 (靱性強化型) / 約 35～40%  
添加剤 (難燃・靱性改質・導電性) / 数%

### 炭素繊維そのものの耐火性

炭素繊維は、有機ポリアクリロニトリル (PAN) などを高温で炭化 (約 1,000–1,500°C) して作られた材料です。純粋な炭素 (C) なので、非常に高い耐熱性 を持ちます。

### 特性

空气中：約 350–400°C 以上で徐々に酸化が始まり、強度が低下。600°C以上では酸化が進み、繊維が失われる。

不活性雰囲気（窒素・アルゴンなど）：2,000℃以上でも構造を保持できる（融点は存在せず、昇華点は約 3,600℃）。

つまり「燃えない」が、「酸素があると酸化して消失」する。

### CFRP（炭素繊維+樹脂）の耐火性

CFRP は炭素繊維そのものは燃えにくいですが、樹脂（エポキシ）は燃焼・分解するのが弱点。

航空機用では 難燃化エポキシ樹脂 を使い、酸素指数（LOI）が高い配合になっている。

\* 限界酸素指数（げんかいさんそしすう、*Limiting oxygen index*、*LOI*）とは、重合体の燃焼に必要な酸素の最小濃度をパーセンテージで表したものである。

酸素と窒素の混合物を燃焼中の試料に通し、臨界レベルに達するまで酸素濃度を下げることにより測定される。様々なプラスチックの LOI 値は、ISO 4589 や ASTM D2863 などの標準化された試験により決定される。また、LOI 値は、サンプルの周辺温度にも依存する。周囲の温度が上昇するにつれて燃焼に必要な酸素割合は減少する。プラスチックやケーブルの材料は、実際の火災状況下での酸素要求量を評価するために、周囲温度と高温の両方で LOI 値を試験する。大気中の酸素濃度よりも LOI が大きい材料は、難燃材料と呼ばれる

CFRP が火に曝されると、まず樹脂が 200～300℃で熱分解 し可燃ガスが出る。400℃付近で樹脂はほぼ失われ、炭素繊維が露出。その後酸化雰囲気なら繊維も徐々に消失

### 航空機での対策

防火基準（[FAR Part 25 Appendix F](#) など）に従い、CFRP は難燃性・自己消火性を備える必要がある。A350 のような機体では樹脂に難燃剤を添加、外層に銅やアルミメッシュ（落雷・耐火兼用）、耐火バリア（チタンシートや特殊塗装）を併用

### まとめ

炭素繊維自体は「燃えない」が、空気中では 400℃超で酸化して強度が落ちる。不活性ガス中では 2000℃以上の耐熱性を持つ。CFRP の耐火性は主に「樹脂」がボトルネック。航空機用途では難燃エポキシ+メッシュ+耐火バリアで補強している。

### ChatGPT への質問事項「CFRP パネルとしての耐火性能（どれくらい火に耐えるか、航空機基準）」

#### 航空機基準における耐火性能

民間旅客機では 米国 FAR Part 25（CS-25: 欧州 EASA 版）が主要規準です。

CFRP パネルもこれに従い試験されています。

#### 主な基準

Interior（客室内装品）：FAR 25.853

60 秒／12 秒 垂直燃焼試験

燃焼後、自己消火性（自己消火時間 15 秒以内）

残炎・残じん（炭化片の落下）なし

熱放出率（Heat Release Rate）や煙密度（Smoke Density）も規制

Fuselage/Skin（構造材）：FAR 25.856

火炎曝露試験：1,100°C級の火炎を 15 分間あてて、内側への貫通を防ぐこと

特に胴体外板（CFRP パネル）は“Fire Penetration Resistance”が要求される

Fuel tank area / Firewall ：FAR 25.867 / 25.1191

エンジン区画や燃料タンク付近の隔壁は、2,000° F（約 1,093°C）で 15 分間耐火 が必要

CFRP 単体では不足するため、チタン合金シートや耐火塗装 を併用

### CFRP パネルの実際の耐火性能

CFRP 単体：樹脂は 250～350°Cで分解開始、繊維だけ残る。500～600°Cで樹脂はほぼ消失、炭素繊維が骨格を維持。400°C以上の酸素雰囲気ですぐに酸化し、数分～十数分で強度低下

航空機用 CFRP パネル（A350 など）：樹脂は難燃化＋高 T<sub>g</sub>（ガラス転移温度 180～200°C級）仕様、表層に 銅/アルミメッシュ（落雷対策＋火炎拡散防止）、燃料区画や耐火隔壁では チタン箔（0.2～0.5mm）を CFRP と積層 し、FAR 基準（1,100°C × 15 分）をクリア

### まとめ

CFRP パネル（航空機グレード）は、直接火炎（1,100°C程度）に 15 分曝されても貫通しない ことが要求され、A350 のような機体はこれを満たしている。CFRP 単体は 400°C超で強度が急落するが、航空機用では 難燃エポキシ＋金属層（銅/アルミ/チタン）＋耐火塗装 で補強している。よって、実運用では「火に強い CFRP」というより「防火処理された複合パネル」として機体に使われている。

ChatGPT への質問事項「A350 胴体パネルが実際にどのくらいの時間・温度に耐えるかの試験結果」

結論から言うと、A350 胴体（CFRP）パネルそのものの「温度 × 時間」の実測グラフや社内試験レポートは公開されていません。ただし、型式証明（FAA/EASA）で満たすべき耐火試験の数値要件と、Airbus が公表している対外資料から、実運用で達している水準は次のように整理できます。

要点（公開情報で確認できる“数値”）

外部火炎の貫通遅延（機体下半分）

旅客機は胴体内の断熱材（インシュレーション）に対して「火炎貫通抵抗試験」（FAR/CS-25.856(b)）が義務。油バーナーの高強度火炎 約 1,900° F ± 100° F（約 1,038° C）に 4 分間曝して、火炎が貫通しないこと、さらに背面の熱流が 2.0 BTU/ft<sup>2</sup>-s（2.27 W/cm<sup>2</sup>）を超えないことが合格条件です。

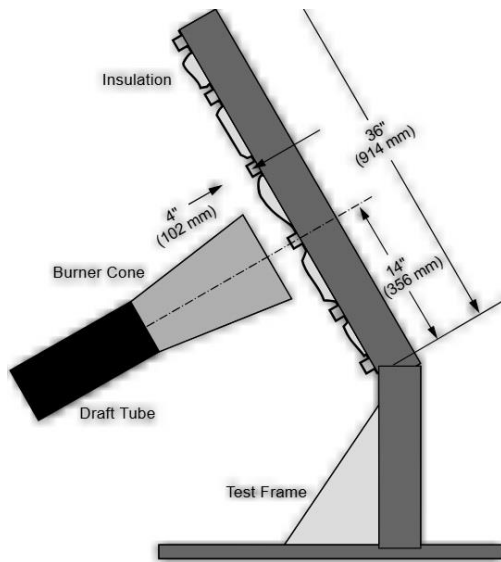


Figure 2 -- Burnthrough Test Apparatus

※この試験は「胴体外板+断熱材」の“系”全体の貫通遅延性能を担保する設計思想で、A350 も同要件で認証を受けています。

### エンジン区画/防火壁などの“防火”要件

「Fireproof」要求は 2,000° F (約 1,093° C) で 15 分に耐えること (代表基準)。部位によっては「Fire-resistant : 2,000° F で 5 分」などの基準も適用されます。

### A350 固有の公開情報 (定性的)

CFRP 胴体の火炎挙動: Airbus の消防向け資料では、CFRP 構造は炎の伝ぱが起きず、アルミ構造より貫通抵抗が高いとしています (ただし数値の開示はなし)。

総合的な耐火性の位置づけ: 事故報道へのコメントでも、複合材の耐火性はアルミと同等レベルとの見解が示されています (個別データは非公開)。

### どう読み解くべきか

公開の“実データ”として確実に言えるのは、**A350 も含む最新旅客機は胴体下半分の断熱システムが 1,900° F の火炎に 4 分間曝されても室内への火炎貫通を許さない設計・認証になっていること**、エンジン区画などは 2,000° F で最大 15 分というより厳しい“防火 (fireproof)”要求を満たしていること、の 2 本柱です。

**胴体外板 (CFRP 単体) の温度-時間曲線はメーカー機密で公表なし。ただし系全体 (外板+銅/アルミメッシュ+断熱+内装) で、上記の規定試験を通過していることが認証の事実として確認できます。**

### FAR/CS-25.856(b) の試験条件 (装置、合否判定) を図付きで和訳要約

こちらは、FAR (CS) -25.856(b) に規定される「火炎貫通抵抗テスト (Burn-through Resistance Test)」の試験装置イメージです。燃焼炎を直接 CFRP パネル (あるいは断熱材付き胴体外装材) に当て、その耐火性能を評価します。

以下、試験条件および合否判定基準を図付きで和訳・要約します。

#### 試験条件 (装置・方法)

##### 1. 試験装置全体構成 (上図参照)

燃焼源: パークモデル DPL 3400 などの改造ガン型バーナー。

バーナー構成:

燃料: JP-8、Jet A 相当を使用し、流量は 0.378 L/min (±0.0126 L/min) (約 6.0 gal/hr)

噴霧ノズル: 80° 中空コーン型 (Monarch PL) を使用。

内部ステーターや燃料ノズル位置など、詳細な位置設定が必要 (ノズル先端からステーターまでの距離など)。

### 燃焼炎出口部構造：

バーナーのドラフトチューブ端に、 $305 \pm 3 \text{ mm}$  (約 12 in) 長さのコーン形延長部を設置。

コーン出口は  $152 \pm 3 \text{ mm} \times 280 \pm 3 \text{ mm}$  の開口面を持つ。

**試験チャンバー：** 空気の流動を一定に保つため、十分な容積 (例： $10 \times 10 \text{ ft} \approx 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ) と排気装置を備えた空間で実施。

## 2. 校正装置 (キャリブレーションリグ)

**熱流束計 (Calorimeter)：** Foil タイプの Gardon ゲージを使用。

**感度範囲：**  $0\text{--}22.7 \text{ W/cm}^2$  ( $0\text{--}20 \text{ Btu/ft}^2\cdot\text{s}$ )、精度  $\pm 3\%$  以内。計測面は燃焼炎の出口平面に 1 インチ下にオフセットする必要がある。

**熱電対群 (Thermocouple rake)：** K 型 (Chromel-Alumel) 熱電対  $\times 7$  本 (直径約  $3.2 \text{ mm}$ ) を鋼製角材に固定してアレイ構成。バーナー炎中心との位置関係も校正時に厳密に調整。

**校正手順：** バーナー／測定装置の位置関係 (熱流束計、熱電対、炎出口) を正確に調整。排気・空気流速 (空気速度計で測定) など調整・確認。

## 3. 試料取り付け

**試料：** 断熱材付き胴体パネル (実際の構成を反映させたもの)。

**取付フレーム：** 厚さ  $3.2 \text{ mm}$  の鋼材フレーム (中央部は  $6.4 \text{ mm}$ ) に取り付ける。取り付けストリンガーは膨張による歪みを避ける構造で固定。

**背面熱流計 (Backface calorimeter)：** フレームの背面に熱流束計 (Gardon) を 2 つ配置。

**測定範囲：**  $0\text{--}5.7 \text{ W/cm}^2$  ( $0\text{--}5 \text{ Btu/ft}^2\cdot\text{s}$ )、精度  $\pm 3\%$  以内。

## 合否判定基準 (パッシング条件)

**曝露時間：** 高強度炎 (バーナー炎) を 4 分間照射

### 結果判定：

火炎貫通 (Burn-through) しないこと。

背面の最大熱流束が規定値以下であること。

### まとめ

項目	内容
燃焼炎	バーナー炎 (JP-8 燃料、 $0.378 \text{ L/min}$ 、専用ノズル) を約 4 分間照射
試験環境	密閉チャンバー内、安定的な空気流制御、排気装置あり
測定装置	熱流束計 (Gardon)、熱電対アレイ、校正リグで精密配置
試料構成	CFRP パネル + 断熱材 + 取付フレーム、背面にも熱流束計設置
合否基準	火炎貫通なし & 背面熱流束 $\leq$ 規定値 (目安： $\approx 2.27 \text{ W/cm}^2$ )

このように、FAR/CS-25.856(b) の火炎貫通試験では、「一定の炎強度を一定時間当てて、中面への火炎貫通や過大な熱流蓄積が起こらないこと」が重要です。CFRP 主体の A350 の胴体パネルは、こうした認証試験をクリアして設計されています。