



Boeing

Mike Sinnett Electrical System and Batteries Full Video | Runtime: 29:33

マイク・シネット：私は、エンジニアリング担当バイス・プレジデント兼 787 プログラムのチーフ・プロジェクト・エンジニアのマイク・シネットです。航空機の電力系とはどういうものか、また 787 が他の機種とどう違うのか、ご質問を多く頂戴します。また、電力系の中でバッテリーが果たす役割についても同様です。

まず、電力系とは何かというお話です。電力システムは、発電を行い、電力を配給するシステムです。航空機には、操縦系統、アビオニクス、空調、機内エンターテインメントシステムなど、電力を必要とするシステムが沢山あります。航空機のこれらのシステムすべてが電力を利用します。航空機にはバッテリーが搭載してありますが、これはごく小さな電力しか供給できませんので、飛行中は発電することが必要となります。そして、その電力を機内の各システムに安全に配給しなければなりません。

電力系の観点から見た場合、弊社航空機には必ず多くのバックアップシステムがあり、冗長性が沢山作り込まれています。

地上では、地上車両からの電力を利用することもできます。航空機がゲートに駐機している時は、APU の電源を使うか、エンジンが作動していればそこから電力を得るか、地上車両または空港の電源に接続します。これは、弊社のあらゆる機種に共通していることです。

最近 787 が、より電氣的な構造を採り入れていることに対し、「より電氣的」と言われています。民間航空機のほとんどは様々な方法で動力を得て、機内で様々な用途に使います。707 の時代から、弊社の民間航空機はエンジンを利用して発電しています。また、エンジンに搭載されているポンプを使って油圧動力も生成します。発電もして機体中に電力を分配します。



その電力で油圧システムを駆動する場合もあるのでややこしくなります。つまり油圧システムは、エンジン直結の油圧ポンプか、電気で駆動される油圧ポンプのどちらかで作動します。

さらにエンジンには、空気圧系という高圧のブリードエア・システムがあります。これはエンジンからの高圧の圧縮空気を機内の様々な用途に利用するものです。機種によっては、空気圧系が前縁スラットを駆動する場合があります。空調システムも駆動します。また、翼の防氷装置の一部も駆動します。

航空機の空気圧系については、最新の高バイパス比エンジンでは、エンジンから空気圧エネルギーを得るのは効率が悪くなるという事実があります。そして、燃料消費が増加します。

従って、従来の航空機で空気圧により作動していたシステムは、787ではすべて電力により作動します。787がより電氣的になったということは、それを意味します。つまり、翼の防氷も、油圧で賄っていた大きな負荷需要も、空調も、客室の与圧もすべて油圧・空気圧に代わり電力で賄うということで、その結果、全体として燃料効率が約2%改善します。

より電氣的になったことの利点について一部お話ししましたが、それ以外にも、システムの性能に関する利点もあります。例えば、電力の制御や切替能力が改善され、負荷のバランス維持や管理がしやすくなります。また、従来機よりも無駄を省きます。

さらに、空圧システムが不要となるので、そのための様々なメンテナンス作業が無くなります。その上、空圧システムに必要な、高温・高圧空気用のダクト系の重量を軽減することができます。

メンテナンス・コストの削減も可能で、信頼性、空気抵抗、騒音もそれぞれ改善されます。これには沢山の利点が伴います。



これは、従来の航空機における電気システムの概略図です。ご覧の通り、発電機は2つのエンジンにそれぞれに1台ずつ、さらに航空機の後部にあるAPUに1台あります。そして、弊社のシステムでは通常、これらの大型発電機から給電線が前部電気室につながれます。そこから、機体各部のシステムに電力を配給します。

これは787の概略図です。ご覧の通り、発電機は各エンジンとAPUにそれぞれ2台ずつついています。従来機種では3台の発電機から電力を得ていたところ、787では主電源として6台の発電機を利用しています。

もうひとつ分かることは、電力を前部電気室まで持って行かず後部電気室に給電していることです。こうすることで、太いゲージの給電線の全長が従来機種よりも短くなりました。

そして、配電もより細かくしました。機体各部には小型の配電器が17個あり、そこから各システムに配給します。つまり、航空機全体を考えた場合、配線が短くてすみます。また、このことで機体各部のシステムに対する制御能力が高まります。787が採用するシステムの利点のひとつは、配線が少なくてすむということです。

例えば、787の配線の長さ、従来の767-300ERと比較すると、787は70マイル、767は90マイルとなります。航空機で20マイル分の配線を取り除くことができると、製造とメンテナンスのコストはもちろん、重量が減るので運航コストも大きく節約できることとなります。

発電には、可変周波数のスタート発電機を使います。各エンジンに可変数のスタート発電機が2台あります。エンジン始動時に利用するのでスタート発電機と呼ばれています。エンジンは、発電機からの動力で始動し、点火してからは発電機を作動させて電力を生み出します。つまり、発電機は、エンジンを起動すること、そして電気を生成する発電機としての二役を担っています。

各エンジンに発電機が2台ずつついているので、主発電機が4台ということになります。



これはギアボックスに直結した簡単な発電方式です。そして、すでに申し上げました通り、250 KVA、つまり約4分の1メガワットの発電量です。この電力は電圧235ボルト、可変周波数のもので、それを機内で必要に応じて変換します。

APUは1機につき1台あり、そこに発電機が2台ついています。この発電機の発電量は225 KVAで、APUレベルで2分の1メガワット近くの電力が得られます。航空機全体では1.5メガワット弱の発電量ということになります。一度にそれほどの電力を使うことはあり得ません。実際にはそれよりもはるかに低い消費量となります。この発電量のほとんどは冗長性を確保するためです。発電機が5台まで機能停止しても、安全に飛行し、着陸することができます。このように、かなりの冗長性が作り込まれていることがお分かりだと思います。

では、他の電源についてお話いたします。すでに地上の電源については説明いたしました。航空機に接続できる地上の外部電源は3つあります。これも交流115ボルトです。メインバッテリーとAPUバッテリーも地上で電力を供給します。

飛行中は6台の主発電機以外に、このメインバッテリーとAPUバッテリーの2台がバックアップ電源となり、更にすべての電源が失われた場合は機体外にラムエア・タービンが展開され、外部気流により回転し、電力と油圧を発生させます。

すべての民間航空機は、このラムエア・タービンだけの動力で操縦できなければなりません。

次に、電力の分配です。すでに触れた通り、ほとんどのシステムは後部電気室から17個の小型配電器を通して電気が供給されます。繰り返しますが、ここで配線の重量を大幅に低減できています。

次に、飛行中にフライトクルーが利用できる監視・故障検出機能についてお話いたします。これは電気システムのディスプレイです。フライトクルーはこれを見て、電力系のその時の状態が一目でわかります。緑の部分が沢山ありますが、それは良好な状



態を表しています。そしてこの場合はエンジンの主発電機 2 台が 4 個の主要バスに電力を供給しており、前部の外部電源が接続されているのがわかります。

フライトクルーは、これを一目見ただけで電気系の状態を把握することができます。

フライトクルーが知るべき情報をすぐに知らせるためのクルー警告装置もあります。これは必要に応じ、緊急度に合わせて警告を発します。

このように安全性は多く組み込まれていますが、各機種によって採用する電力システムは若干異なります。私たちはこれまでの航空機プログラムの運航経験から多くを学び、それを次に反映させます。これはすべて、ごく基本的なボーイング社の不変の設計理念に基づいているのです。その設計理念とは、ごく簡単に「万が一問題が発生した際の安全性を備えた機体設計」です。各システムや機能には十分な冗長性が確保されており、仮に重要なシステムが機能停止してもそれが何であれ必ず冗長なシステムが取って代わるように設計されています。

航空機上の各システムは分散して配置されており、ひとつのシステムが損傷を受ける事態が発生しても、そのシステムの他の部分は安全に機能し続けられるようになっています。同様に、機能的分離も行われています。例えば、操縦系統は油圧を動力としています。操縦系統を駆動する油圧系は 3 つありますが、万が一油圧が 3 系統とも失われた場合でも、スポイラー 2 対と水平尾翼を電力で駆動できます。これは、航空機レベルでの機能的冗長性の良い例です。

また、万が一、主システムが故障した場合に、作動して助けてくれるスタンバイシステムがあります。例えば、油圧ポンプか主発電機のどちらかが故障したら、ラムエア・タービンが作動し、油圧と電力を提供します。そして、ひとつの故障が広がって他の故障を引き起こさないようにする保護システムもあります。これらはすべて、ボーイング社の基本的な設計理念です。そして多くの場合、FAA の規制よりも厳しいものです。



さて、787の運航実績はどうでしょう。

このグラフは、4つの最新の航空機プログラムについて、運航上の信頼性を表したものです。各機種について、就航から15ヶ月間の運航上の信頼性を表しています。定時運航信頼性は、定時から15分以内にゲートを離れた実績です。遅延理由は、機体の故障によるもので、

クルーの遅刻や清掃スタッフによる遅れは計算に入れません。出発予定時刻から15分以内に出発できなかつたら、信頼性の数値が低下しますが、ここに示す数値はすべて95パーセント以上です。このグラフから、787は777と同レベルであるということが分かります。777は、新機種導入のケースでは常にベストと考えられている機種です。そして、747-8とも同程度です。

これより信頼性を高くすることは可能でしょうか？もちろんです。私たちはいつでも航空機の信頼性向上に努めていますし、安全な航空機をより安全にする努力を続けています。それは、私たちの仕事の一部です。

さて、バッテリーについて、また航空機バッテリーの役割について、多くの疑問が上がっています。そこで、バッテリーについて少しお話しいたします。バッテリーはエネルギーを貯蔵し、電力を供給します。

メインバッテリーとAPUバッテリーの役割は、エンジンとAPUが稼働しておらず、地上電源にもつながっていない状態の時に、短時間だけ電力を供給することです。ここで、エネルギーと動力についてお話しします。

動力はエネルギーの消費率であり、仕事率でもあります。そして、エネルギーはバッテリーに入っている分量のことです。動力はそのエネルギーの消費率を表します。787のバッテリーは相当量のエネルギーを蓄えています。しかし、それよりも重要なことは、電力を必要とするシステムに、必要とする量を迅速に供給しなければならないということです。

バッテリーは、基本的にはその内部で起こる化学反応により機能します。この化学反応は、一方の電極から他方の電極への電子の流れを推進します。回路が閉じると、その電子が回路へと流れます。そして、回路を流れる電子が行える仕事量はバッテリー自体の起電力に依存します。正負の端子を負荷に接続すると、バッテリー内の化学反応が回路中の電子の流れを推進します。その電子が負荷の中を流れるとき、電子の電位が負荷における仕事を可能にします。

787のバッテリーですが、大きなバッテリーがふたつあります。ひとつは前部電気室にあるメインバッテリーで、もうひとつは後部電気室にある APU バッテリーです。

787のバッテリーの役割を、実際よりも大きく思われている人が多いようです。「バッテリーはエンジンを動かしているのか？」という質問を受けたことがあります。バッテリーでエンジンは駆動していません。「バッテリーでエンジンをスタートしているのか？」いいえ。エンジンの起動にもバッテリーは使っていません。バッテリー、それもメインバッテリーは、冷え切った真っ暗な航空機を始動するときに使います。メンテナンスのスタッフは機内に入り、バッテリースイッチを押します。数分後、アビオニクスの一部、全部ではありませんが APU を安全に起動するのに必要な最低限の一部が通電します。APU が起動したら、2 台の APU 発電機が作動し、地上で航空機が必要な電力をすべて供給します。

あるいは、操縦室に入りバッテリースイッチを押し、外部電源をつなげることもできます。しかしメインバッテリーが役割を果たすのは、バッテリースイッチのボタンを押してから、外部電源をつなげたり APU を起動するまでのほんの数分間だけです。

飛行中にその他のすべての電源が機能停止した場合、ラムエア・タービンが起動し、スタンドバイ・バスに電力を供給し始めるまで、バッテリーはある程度電力を供給します。メインバッテリーは、ラムエア・タービンが起動し運転状態に達するまでの 5 秒間、電気を供給します。また、飛行中にメインバッテリーが機能しなくなった場合でも、安全に飛行し着陸できることが実証されています。

APU バッテリーは APU の起動に使われます。航空機に全く電力が通っていない状態、すなわちエンジンが停止しており、航空機が地上の電源にも接続していない状態では、APU バッテリーは APU を起動させるために発電機を作動します。さらに APU バッテリーは、APU の吸気口を開きます。また、APU の燃料ユニットや、APU 制御装置に電力を送ります。APU 作動中は、燃料ユニットに APU が自ら電力を供給するので、APU バッテリーは APU 制御装置にしか電力を供給しません。

飛行中に APU バッテリーの機能が停止しても、APU が安全に停止するだけです。実際、APU バッテリーが機能していない状態で航空機を商用運航することは許可されています。APU バッテリーは APU を稼働させるときにのみ必要なもので、飛行にかかわる重大な機能は果たしません。

こちらが 787 型のバッテリーの分解図です。バッテリーの構造がいかに複雑であるかがわかります。バッテリーは 8 つのセルで構成されています。各セルは 4 ボルトなので、バッテリー全体で 32 ボルトです。

このバッテリーは自動車のバッテリーより少し大きめの箱の中に設置されています。8 つのセルがすべてこの箱の中に設置されています。また、他にもバッテリー監視ユニットという装置が中に設置されており、バッテリーを保護しています。

例えば、バッテリーは設計上ある一定量のエネルギー貯蓄しか想定されていないので、過充電したら問題が発生しかねません。バッテリーを過充電するということは、バッテリー容量以上のエネルギーを送り込むということです。

バッテリー監視ユニットは、セルのいずれかが安全レベルを超えていたら充電をさせません。そのバッテリー監視ユニットが機能停止したり誤動作した場合には、同じ回路を監視しているユニットがもう 1 つあります。このユニットは、バッテリーが充電中、ある特定の電圧に達したら、充電を止めるために、充電器を操作します。これが第 2 のバッテリー監視ユニットの役割です。

さらに、2つのユニットを監視している第3のユニットがあります。バッテリーの充電中、セルの1つでも特定の充電レベルを超えたら、このユニットはそれを検出し、バッテリー内の接続面を離します。バッテリー回路は開かれ、充電することも使うこともできません。バッテリーの外側にはバッテリー充電器があります。バッテリーが充電を必要としている場合、充電器はバッテリーの総合電圧を見て、もし規定レベルに達していたら充電をさせずに、バッテリーの充電を防ぎます。同じ充電器にはもう1つの回路が存在してこの過程をモニターしており、出力回路が電力を遮断していない場合は、充電器への供給電力を遮断します。

ご覧のように、バッテリーが過充電とならないよう、何重もの保護が施されています。電圧が低すぎたり、充電時に電流が大きすぎたり、充電時の温度が低すぎる場合も同様です。このような好ましくない状況からバッテリーを保護するために、いくつかの保護機能が様々なレベルで組み込まれています。

従来の航空機はニッケルカドミウム電池、NiCadを主に使用していました。航空宇宙産業で伝統的に使われてきたNiCadから離れ、787ではリチウムイオン電池を使用しました。

リチウムイオンのほうが重量が軽いということも確かにありますが、それは設計時に決定的要因ではありませんでした。リチウムイオン電池は極めて短時間に大量のエネルギーを放出する能力を持っており、これが設計上の決め手でした。そしてこの性質は、航空機における2つの機能のために必要でした。

1つ目の機能はAPUの起動です。そして2つ目は、機内の他のすべての電源が絶たれた場合のブレーキの作動です。787は電気ブレーキシステムを搭載しており、電力を使って航空機を停止させます。離陸中断の際にも、その他の電源を一切使わず、バッテリーの電力のみで航空機を停止させねばなりません。メインバッテリーを使ったブレーキ、そしてAPUバッテリーでのAPU起動。この2つの機能のために、787の電源にはリチウムイオン電池が最適だという判断に至りました。



その上、先ほども申しましたが、従来の電池より軽量です。帯電特性も優れており、均等、良質、かつ高速な充電が得られます。そして、例えば浅い放電を繰り返すことによる劣化の心配もありません。また、NiCad バッテリーより長時間格納可能です。保存状態も寿命にわたって優れています。

航空宇宙産業では、787 以前にもリチウムイオン電池が何度も応用されています。リチウムイオン電池は旅客機には見られませんが、航空宇宙産業においては多くの使用例があります。787 の開発に際し、自社内も含めた使用経験者から、リチウムイオンの技術を旅客機に応用する安全な方法を学びました。

こちらに例が 2 つありますが、マーズ・ローバーがその 1 つです。もう 1 つは通信衛星のボーイング 702 です。

では 787 と 777 のバッテリーを比べてみましょう。ご覧のように、787 のバッテリーは 8 セルで 32 ボルトです。777 のバッテリーは 20 セルで 24 ボルトです。重量は 787 のバッテリーの 29 kg に比べ、777 は 49 kg もあります。787 は 150 アンペアの電流を出力できますが、777 の仕様はそこまで必要としていません。こうした設計上の特性を考慮し、787 にリチウムイオン技術を使用することに決めました。

新技術ではありますが、先ほどお話しました基本的な設計理念に変わりはありません。ひとつの故障が惨事を起こしてはならない。私たちは故障が起きない設計をしていますが、故障は起きるものと想定します。これはどのレベルでも同じです。そしてそうすることが、ひとつの故障が航空機全体を危険に晒すことのないようにするという理念の実現につながります。

このバッテリーは多くのテストを重ねてきました。バッテリーだけでも 5,000 時間を超えるテストを実験室で行いました。また、バッテリーを含むシステムの統合試験が 25,000 時間、さらにバッテリーを搭載した実機の地上試験と飛行試験は 10,000 時間を超えています。

この1月までは、バッテリーの問題は発生しませんでした。が、1月には、APUバッテリーとメインバッテリーの問題がわずか8日間の間に2件も発生してしまいました。バッテリーの保護に関しては、私たちは十分に考慮してまいりましたが、これらの問題で、多大なご迷惑をおかけしており、お詫びの言葉もありません。現在、問題の原因究明に向けて、調査機関である米国のNTSBと日本のJTSBに全面的に協力しております。

調査にかかわる情報は調査機関により制限されているので、詳細はお話できません。しかし、調査機関や規制当局と緊密に連携し、状況の把握と原因の究明に向けて努めております。

それでは質疑に入りたいと思います。

質問： 御社のバッテリーと、ノートパソコンや電気自動車など他の業界で使われるバッテリーとの類似点や相違点について教えてくださいませんか？

マイク・シネット： 本題であるリチウムイオン電池に限定させていただきます。6年ほど前に、消費者向けリチウムイオン産業からは沢山のことを学びました。簡単な例を2つ上げますと、当時の消費材製造産業では使われないこともあったクリーンルーム技術を、弊社ではセルの製造に使用しました。つまり、弊社のセル製造は、当時の消費者製品産業より厳格な環境下で行われていましたし、今でも消費者製品産業よりも様々な面で厳格なものです。

また、形状に特別注意を払ってきました。最終的にその形状が余計な負担をかけること、つまり装置内に収めるための縮小・圧縮が、望ましくない結果や予期せぬ損害につながることを防ぐよう細心の注意を払っています。以上、消費材製造産業から学んだ教訓のうちの2つでした。

ディーン： マイクさん、各バッテリーが最終組立に到達する前に供給者が実施しなければならない検査について話していただけますか？



マイク・シネット：ではまず、このバッテリーが航空機への搭載を許されるまでに経てきた試練について、少しお話ししたいと思います。例えばバッテリーセルに釘で穴を開け、爆発や発火が起きないことを確認したり、セルを潰したり、オープンに入れて高温に熱するなど、厳格な試験を行なっています。

これらの作業は、バッテリーが航空機への搭載を許される前に行われる 5,000 時間の試験に含まれています。製造直後、各セルは 1 ヶ月間近く試験を受けます。各セルは、AC インピーダンス、直流抵抗、開回路電圧の経時変化などの測定を含んだ、少なくとも 8 つの主要な試験を受けます。

充放電サイクルの開始時に開回路電圧を測ります。そして 1 週間後、同じセルの開回路電圧をもう一度測ります。さらに 1 週間後、同じセルの開回路電圧をもう一度測ります。5 時間放電した場合にも測定します。

各セルに対し高充電・放電サイクルを何度か繰り返し、今度はセルを 8 つ入れたバッテリー全体でも同様のサイクルを繰り返し、正常に動作しているかを確認します。そして、バッテリーはこの一連の試験をってからやっと、組み立てのためにボーイングに発送されたり、スペアとしてお客様に出荷されます。

デイビッド：マイクさん、ボーイング社はそもそも、バッテリーに関しては FAA より特別条件で予め許可を得ていたと聞きましたが、この特別条件とは何なのか、何を意味するのか説明していただけますか？

マイク・シネット：特別条件とは、現在の規則では対応しきれない新しい技術に適用される条件です。リチウムイオン電池の場合は、規制当局は技術を一度確認し、現在の規則がその技術に対し不十分であると判断したので、特別条件を立案しました。それは現在の連邦航空法に加え、新技術を本来の目的通りに安全に使用できるよう、その技術に対応する追加条件を課したということです。

787 に関しては、大型リチウムイオン電池の使用における特別条件が課せられました。その内容は、要はバッテリーが安全でなければならないということでした。その



「安全」とは様々な条件によって定義されています。充放電中、バッテリーが機能停止になっても、危険なほどの高温になったり、爆発や発火があってはならないなどです。

特別条件には他にも、セルが電解質を排出しても、それが集積して危険量に達し更なる損害をもたらすことがないことという規定があります。つまり、バッテリーの問題で他のシステムに引き起こしたトラブルが、元のバッテリーの問題よりも大きくならないようにするという事です。

以上が特別条件の一部として私たちに課せられた規則です。

質問：ボーイング社は787で新技術を積極的に取り入れすぎたのではないかと
いう声が上がっています。従来の技術を選ぶこともできたわけですが、今回は技術革新
に重点を置きすぎたということはありませんか？

マイク・シネット：大変興味深い質問です。技術革新に重点を置いたというわけ
ではないと思います。何事も、あくまで航空機の観点からの価値に重点を置いて検討
しています。ある技術を使うことを前提に、「じゃあどうやって航空機に応用できるだ
ろう？」というやり方はしません。航空機から見たニーズがあってはじめて、その技術
を検討しようということになるのです。ですから787で採択された技術や装置…いや、
787に限らず、ボーイング社の航空機に搭載されている技術のすべては、ニーズに合っ
たから採用されているのです。

私たちの技術との向き合い方は、まず航空機にどのようなニーズがあるのかを見極め、
このニーズを満たすことができる技術にはどのようなものがあるのだろうか？と考えるこ
とです。

私たちは今回の問題の対応にあたって、重視していることがふたつあります。ま
ずは安全です。これは私たちにとって絶対的な最優先項目であり、安全性が私たちの納
得のいくレベルであることを確認できない限り、航空機を送り出すことはありません。

また、このような問題が起きると、弊社に支障をきたすことはもちろんですが、
お客様や、乗客の皆様におかけするご迷惑は甚大なものであると重く受け止めておりま
BOEINGは Boeing Management Company の商標です。 13 項 (全 14 項)
Copyright © 2013 Boeing. 無断複写・複製・転載を禁じます。



す。このような問題が発生してしまいましたことを心より深くお詫び申し上げます。
787が安全な状態で運航を再開できるよう、現在、全社をあげて原因究明に取り組んで
おります。