

航空重大インシデント調査報告書

- I 全日本空輸株式会社所属
ボーイング式737-800型 JA57AN
オーバーラン
- II エアーニッポン株式会社所属
ボーイング式737-700型 JA16AN
異常姿勢からの急降下
- III 全日本空輸株式会社所属
ボーイング式787-8型 JA804A
非常脱出スライド使用による非常脱出

平成26年 9 月 25 日

本報告書の調査は、本件航空重大インシデントに関し、運輸安全委員会設置法及び国際民間航空条約第13附属書に従い、運輸安全委員会により、航空事故等の防止に寄与することを目的として行われたものであり、本事案の責任を問うために行われたものではない。

運輸安全委員会
委員長 後藤 昇 弘

《参 考》

本報告書本文中に用いる分析の結果を表す用語の取扱いについて

本報告書の本文中「3 分 析」に用いる分析の結果を表す用語は、次のとおりとする。

- ① 断定できる場合
・・・「認められる」
- ② 断定できないが、ほぼ間違いない場合
・・・「推定される」
- ③ 可能性が高い場合
・・・「考えられる」
- ④ 可能性がある場合
・・・「可能性が考えられる」
・・・「可能性があると考えられる」

Ⅲ 全日本空輸株式会社所属
ボーイング式787-8型 JA804A
非常脱出スライド使用による非常脱出

航空重大インシデント調査報告書

所 属 全日本空輸株式会社
型 式 ボーイング式787-8型
登録記号 JA804A
インシデント種類 非常脱出スライド使用による非常脱出
発生日時 平成25年1月16日 08時49分
発生場所 高松空港

平成26年9月19日

運輸安全委員会（航空部会）議決

委員長 後藤昇弘（部会長）
委員 遠藤信介
委員 石川敏行
委員 田村貞雄
委員 首藤由紀
委員 田中敬司

要 旨

<概要>

全日本空輸株式会社所属ボーイング式787-8型JA804Aは、平成25年1月16日（水）、同社の定期692便として、東京国際空港に向けて山口宇部空港を08時11分に離陸した。08時27分ごろ、四国上空高度約32,000ftを上昇中、メインバッテリーの不具合を示す計器表示とともに、操縦室内で異臭が発生したため、目的地を高松空港に変更し、08時47分、高松空港に着陸した。

08時49分、同機は高松空港のT4誘導路上で非常脱出を開始した。

同機には、機長ほか乗務員7名、乗客129名の計137名が搭乗しており、そのうち乗客4名が脱出中に軽傷を負った。

同機のメインバッテリーが損傷したが、火災は発生しなかった。

なお、平成25年1月7日（米国東部標準時）に米国マサチューセッツ州ボストン市内のローガン国際空港においてAPUバッテリーによる類似発熱事案が発生し、平成26年1月14日、成田国際空港でメインバッテリーによる類似発熱事案が発生した。

<原因>

本重大インシデントは、同機が離陸上昇中メインバッテリーが熱暴走を起こしたため、高松空港に緊急着陸して誘導路上で非常脱出を行ったものである。

メインバッテリーの熱暴走は、6番セルがセル内部の発熱現象でベントしたことにより熱伝播の起点となって発生したものと推定される。発熱により膨張したセルケースとブレースバーが接触してアース線を介して接地短絡したことによりバッテリーボックス内に大電流が流れてアーク放電が発生したことが熱伝播を助長して熱暴走に至り、バッテリーの損傷を拡大させたものと推定される。

6番セル内部の発熱現象は、内部短絡によるものと考えられるが、その発生機序を最終的に特定することはできなかった。

本重大インシデントにおいては、1つのセルの内部短絡による発熱現象が他のセルに伝播してバッテリーの損傷を拡大させることとなったが、熱伝播に至ったことについては、同型バッテリーの開発時の試験において航空機への装備状態が適切に模擬されず、内部短絡の影響が過小評価されたことが関与したものと考えられる。

<安全勧告>

1 米国連邦航空局が講ずべき措置

本重大インシデント調査において実施した内部短絡（釘刺し）試験では、バッテリーを機体に搭載した状態を模擬し、バッテリーボックスにアース線を接続した試験で熱暴走が発生したが、アース線を接続しなかった試験では熱暴走が発生しなかった。

この試験結果並びにその他の試験結果及び解析から、本重大インシデントにおいてメインバッテリーが熱暴走を起こしたのは、6番セルが熱伝播の起点となり、6番セルとブレースバーが接触してアース線を介して接地短絡したことによりバッテリーボックス内に大電流が流れてアーク放電が発生したことが熱伝播を助長して熱暴走に至り、バッテリーの損傷を拡大させたものと推定される。

開発時に行われたエンジニアリング試験では熱伝播が発生しなかったが、これはバッテリーボックスにアース線が接続されていなかったためと推定される。このことから、機体搭載時の状態を模擬していない試験を根拠に、安全性の評価に内部短絡試験を含めなかったことは、適切ではなかったものと推定される。

航空機搭載用リチウムイオンバッテリー（LIB）に適用される現行の基準におい

ては、試験の環境条件として、温度、湿度、加速度等の要件はあるものの、周囲の航空機システムとのインターフェイスに関わる電氣的環境については必ずしも十分には規定されていないおそれがある。なお、当委員会に提出された安全性解析書のF T Aにおいては、熱伝播のリスクは評価されていない。

また、型式証明においては、煙を伴うベントの発生確率は $10^{-7}/\text{hr}$ （1,000万飛行時間に1回）未満であるものと想定されていたが、現実には、787の累計飛行時間が約25万時間の時点で、発熱現象が3回発生しており、結果的に、その想定を大きく上回る発生率となっている。型式証明におけるセルの故障率の推定は、類似型式L I Bの実績から算出されたものであるが、その算出手法は適切ではなかった可能性が考えられる。

さらに、セルのベントが発生した場合には設計時に想定されていなかったコンタクターの開放が発生するものと推定され、全電源喪失時のリスクを再評価する必要性を検討すべきである。

運輸安全委員会は、上記のような本重大インシデント調査の結果を踏まえ、米国連邦航空局が、次の措置を講ずるよう勧告する。

- (1) 航空機装備品の試験が実運用を適切に模擬した環境で行われるよう航空機製造者及び装備品製造者を指導すること。
- (2) L I B試験において電氣的環境が適切に模擬されるように、技術基準を見直し、必要があれば技術基準の改正を行うこと。
- (3) 同型式機の型式証明（T C）時のL I Bの故障率の想定について見直しを行い、その結果を踏まえ、必要があればL I Bの安全性評価の見直しを行うこと。
- (4) 同型式機のT Cにおいて、セル間の熱伝播リスクが適切に評価されているか見直しを行うこと。
- (5) 同型式機のセルがベントした後に発生するコンタクターの動作が、運航に与える影響を検討し、その結果を踏まえ、必要な措置を講じること。

2 同機的设计・製造者であるボーイング社に対して指導すべき措置

本調査においては、内部短絡の発生機序を最終的に特定することはできなかったが、これまでに発生した類似事案に本重大インシデントを加えた類似3事案全てが1月の寒冷期に発生していること、及び低温環境はリチウム金属の析出を助長すると言われていることから、地上係留中の低温環境が内部短絡に関与した可能性が考えられる。また、本重大インシデントの原因への関与が疑われる製造工程に起因する事象が報告されている。さらに、本重大インシデントの調査において、バッテリーの充電制御に関して、設計時に想定されていないバッテリー用充電器（B C U）の動作及びコンタ

クターの動作確認が確認された。

これらを踏まえ、米国連邦航空局はボーイング社に対し、以下の措置を講じるよう指導すること。

- (1) エレメントの不均一な成形及び他の製造工程に起因する事象との関連の可能性も踏まえ、内部短絡の発生機序について更に調査を継続すること。また、その結果を踏まえ、さらなるLIBの品質と信頼性の向上を図るとともに、温度等のLIBの運用条件についても見直しを行うこと。
- (2) 設計時には想定されていないBCUの動作及びコンタクターの動作確認について改善を図ること。

本報告書で用いた主な略語は、次のとおりである。

| | |
|-------|--|
| AD | : Airworthiness Directive |
| ANA | : All Nippon Airways |
| AOM | : Airplane Operations Manual |
| APU | : Auxiliary Power Unit |
| BCU | : Battery Charger Unit |
| BDM | : Battery Diode Module |
| BMU | : Battery Monitoring Unit |
| BPCU | : Bus Power Control Unit |
| CC | : Constant Current |
| CFR | : Code of Federal Regulations |
| CP | : Chief Purser |
| CRN | : Current Return Network |
| CV | : Constant Voltage |
| DME | : Distance Measuring Equipment |
| EAFR | : Enhanced Airborne Flight Recorder |
| EICAS | : Engine Indicating and Crew Alerting System |
| FAA | : Federal Aviation Administration |
| FCE | : Flight Control Electronics |
| FHA | : Functional Hazard Assessment |
| FL | : Flight Level |
| FMEA | : Failure Modes and Effects Analysis |
| FTA | : Fault Tree Analysis |
| GCU | : Generator Control Unit |
| HBB | : Hot Battery Bus |
| HECS | : Hall Effect Current Sensor |
| ILS | : Instrument Landing System |
| IP | : Issue Paper |
| JAXA | : Japan Aerospace Exploration Agency |
| JST | : Japan Standard Time |
| LGA | : Landing Gear Actuation |
| LIB | : Lithium Ion Battery |
| MAC | : Mean Aerodynamic Chord |

| | |
|------|--|
| MCA | : Multi Channel Access |
| MLG | : Main Landing Gear |
| MOPS | : Minimum Operational Performance Standard |
| NLG | : Nose Landing Gear |
| OCV | : Open Circuit Voltage |
| ODA | : Organization Designation Authorization |
| PF | : Pilot Flying |
| PM | : Pilot Monitoring |
| PWM | : Pulse Width Modulation |
| RNAV | : Area Navigation |
| RIPS | : Recorder Independent Power Supply |
| RTCA | : Radio Technical Commission for Aeronautics |
| SC | : Special Condition |
| SEI | : Solid Electrolyte Interface |
| SOC | : State Of Charge |
| TC | : Type Certification |
| TIG | : Tungsten Inert Gas |
| TSO | : Technical Standard Order |
| TWR | : Tower |
| VOR | : VHF Omnidirectional Ranging |

单位换算表

| | |
|------|--------------|
| 1 kt | : 1.852 km/h |
| 1 nm | : 1.852 m |
| 1 ft | : 0.3048 m |
| 1 lb | : 0.4536 kg |

目 次

| | | |
|---------|------------------------------|----|
| 1 | 航空重大インシデント調査の経過 | 1 |
| 1.1 | 航空重大インシデントの概要 | 1 |
| 1.2 | 航空重大インシデント調査の概要 | 1 |
| 1.2.1 | 調査組織 | 1 |
| 1.2.2 | 関係国の代表、顧問 | 1 |
| 1.2.3 | 調査の実施時期 | 2 |
| 1.2.4 | 原因関係者からの意見聴取 | 2 |
| 1.2.5 | 関係国への意見照会 | 2 |
| 2 | 事実情報 | 2 |
| 2.1 | 飛行の経過 | 2 |
| 2.1.1 | フライトレコーダーの記録及び管制交信記録による飛行の経過 | 3 |
| 2.1.2 | 操縦士等の口述 | 7 |
| 2.2 | 人の負傷 | 10 |
| 2.3 | 航空機の損壊に関する情報 | 10 |
| 2.3.1 | 損壊の程度 | 10 |
| 2.3.2 | 損壊の状況 | 10 |
| 2.4 | 航空機乗組員に関する情報 | 10 |
| 2.5 | 航空機に関する情報 | 11 |
| 2.5.1 | 航空機 | 11 |
| 2.5.2 | 重量及び重心位置 | 11 |
| 2.6 | ボーイング式787-8型機 | 12 |
| 2.6.1 | 概要 | 12 |
| 2.6.2 | 前方電気室冷却システム | 13 |
| 2.6.3 | 電源系統 | 14 |
| 2.6.4 | DC/スタンバイ・パワー・システム | 14 |
| 2.6.5 | 同型バッテリー | 15 |
| 2.6.5.1 | 同型バッテリー | 15 |
| 2.6.5.2 | セル | 16 |
| 2.6.5.3 | BMU | 17 |
| 2.6.5.4 | コンタクター及びHECS | 18 |
| 2.6.5.5 | アース線 | 18 |
| 2.6.5.6 | ブレースバー | 18 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.6.6 | BCU | 18 |
| 2.6.7 | BDM | 19 |
| 2.7 | LIB | 19 |
| 2.7.1 | LIBの原理 | 19 |
| 2.7.2 | LIBの故障モード | 20 |
| 2.7.3 | ソフトショート | 21 |
| 2.7.4 | リチウム金属の析出 | 21 |
| 2.8 | 本重大インシデント現場及び機材の損壊状況に関する情報 | 22 |
| 2.8.1 | 本重大インシデント現場の状況 | 22 |
| 2.8.2 | 損壊の状況 | 22 |
| 2.8.3 | 損壊の細部状況 | 22 |
| 2.9 | フライトレコーダーに関する情報 | 26 |
| 2.10 | 救難及び消防に関する情報 | 26 |
| 2.11 | 試験及び研究 | 27 |
| 2.11.1 | 航法灯が点灯していた理由及びメインバッテリー電圧値の検証 | 27 |
| 2.11.2 | 同型機の同型バッテリーの検証 | 27 |
| 2.11.3 | セルバランシング試験 | 28 |
| 2.11.4 | 同機を使用した実機検証 | 30 |
| 2.11.5 | バッテリー熱伝播再現試験（角田試験） | 32 |
| 2.11.6 | 本重大インシデント後にB社が行った試験及び解析 | 35 |
| 2.11.6.1 | バッテリー—BCU接続試験 | 35 |
| 2.11.6.2 | セルケース浸水試験 | 36 |
| 2.11.6.3 | セルケース接地短絡試験 | 36 |
| 2.11.6.4 | バッテリーベント（セルケース短絡）試験 | 37 |
| 2.11.6.5 | バッテリーベント（ヒーター）試験 | 37 |
| 2.11.6.6 | アース線への大電流負荷試験 | 38 |
| 2.11.6.7 | 本重大インシデントでの熱伝播シナリオ | 38 |
| 2.11.6.8 | 事象発生後にB社が作成した因果関係図（Cause Effect Diagram） | 40 |
| 2.11.6.9 | B社の外部委託調査報告書 | 40 |
| 2.11.7 | ボストン事案の調査においてNTSBが行った試験 | 42 |
| 2.11.7.1 | APUスタート模擬試験 | 42 |
| 2.11.7.2 | セルの分解試験 | 43 |
| 2.11.8 | 本重大インシデント後にG社が行った試験 | 43 |
| 2.11.8.1 | リチウム金属の析出検証試験 | 43 |
| 2.12 | 型式証明 | 43 |

| | | |
|----------|-------------------------|----|
| 2.12.1 | 米国における型式証明 | 43 |
| 2.12.2 | 787のTC | 44 |
| 2.12.3 | TCにおけるFAAの権限の委任 | 44 |
| 2.12.4 | 特別要件 | 44 |
| 2.12.5 | B社の証明計画 | 49 |
| 2.12.6 | 安全性評価 | 49 |
| 2.12.6.1 | システム安全性評価の基準 | 49 |
| 2.12.6.2 | 同型バッテリーの安全性評価 | 50 |
| 2.12.6.3 | 同型バッテリーの故障モード解析 | 51 |
| 2.12.6.4 | 同型バッテリーの故障率の推定 | 52 |
| 2.12.7 | 同型バッテリー開発時の試験 | 52 |
| 2.12.7.1 | 内部短絡（釘刺し）試験 | 52 |
| 2.12.7.2 | 温度試験（低温及び温度変動） | 53 |
| 2.12.7.3 | 外部短絡試験 | 53 |
| 2.12.7.4 | 過充電試験 | 54 |
| 2.12.8 | LIBシステムに対する最低運用性能基準 | 54 |
| 2.13 | その他必要な事項 | 55 |
| 2.13.1 | 同型バッテリーの製造 | 55 |
| 2.13.1.1 | セルの製造 | 55 |
| 2.13.1.2 | 同型バッテリーの組立て | 57 |
| 2.13.1.3 | 異物混入対策 | 57 |
| 2.13.2 | 787の同型バッテリー事案 | 58 |
| 2.13.3 | 緊急着陸に関する非常操作手順 | 59 |
| 2.13.4 | 非常脱出手順 | 60 |
| 2.13.5 | 本重大インシデント発生前の同機の夜間係留地 | 61 |
| 3 | 分析 | 61 |
| 3.1 | 乗務員の資格等 | 61 |
| 3.2 | 航空機の耐空証明等 | 61 |
| 3.3 | 気象との関連 | 61 |
| 3.4 | 事象発生から着陸まで | 61 |
| 3.5 | 非常脱出 | 62 |
| 3.6 | フライトレコーダーのメインバッテリー電圧の記録 | 62 |
| 3.7 | 角田試験結果等の分析 | 63 |
| 3.7.1 | 内部短絡発生時のセルの挙動 | 63 |
| 3.7.2 | ベント発生時のコンタクター誤作動 | 63 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.7.3 | ベント後のセルケースとバッテリーボックスの短絡 | 64 |
| 3.7.4 | アーク放電の発生 | 64 |
| 3.7.5 | アース線の溶断 | 65 |
| 3.7.6 | 角田試験の形態2と形態3の相違 | 65 |
| 3.8 | メインバッテリー損壊の経過に関する分析 | 66 |
| 3.8.1 | ベントの順序 | 66 |
| 3.8.2 | コンタクターの開閉 | 67 |
| 3.8.3 | メインバッテリー損壊の経過 | 67 |
| 3.8.3.1 | 3番セルと6番セルの溶着シナリオ | 70 |
| 3.9 | バッテリーの充電制御 | 70 |
| 3.9.1 | 充電電流の振動 | 70 |
| 3.9.2 | 放電時における過渡現象による瞬間的な高電圧 | 70 |
| 3.9.3 | 充電時における瞬間的な電圧上昇 | 71 |
| 3.10 | 発熱現象の原因 | 71 |
| 3.11 | 内部短絡の原因に関する分析 | 72 |
| 3.11.1 | セル内部への金属片の混入 | 72 |
| 3.11.2 | セル内部のセパレーターの損傷 | 73 |
| 3.11.3 | セル内部のリチウム金属の析出 | 74 |
| 3.11.4 | 内部短絡の原因分析のまとめ | 75 |
| 3.12 | T C | 76 |
| 3.12.1 | 適用基準への適合状況 | 76 |
| 3.12.1.1 | 適合性見解書 | 76 |
| 3.12.1.2 | 特別要件 25-359-SC | 76 |
| 3.12.1.3 | セルの故障率 | 76 |
| 3.12.2 | T C 審査における内部短絡（試験）の取扱い | 77 |
| 3.12.3 | 現在のL I Bの耐空性審査基準 (T S O - 1 7 9 a / R T C A D O - 3 1 1) | 78 |
| 4 | 結 論 | 79 |
| 4.1 | 分析の要約 | 79 |
| 4.2 | 原因 | 83 |
| 5 | 再発防止策 | 84 |
| 5.1 | B社により講じられ、F A Aにより承認された再発防止策 | 84 |
| 5.1.1 | B社の施した対策 | 84 |
| 5.1.2 | 上記対策の有効性 | 84 |
| 5.2 | F A A及び航空局の対応 | 85 |

| | | |
|-------|-------------------------------|----|
| 5.2.1 | F A Aの対応 | 85 |
| 5.2.2 | 航空局の対応 | 85 |
| 6 | 安全勧告 | 85 |
| 6.1 | 米国連邦航空局が講ずべき措置 | 85 |
| 6.2 | 同機的设计・製造者であるボーイング社に対して指導すべき措置 | 87 |

本文中の図

| | | |
|-------------|------------------------------|----|
| 図2.6.1 | バッテリー搭載位置 | 12 |
| 図2.6.2 | 前方電気室冷却システム概要 | 13 |
| 図2.6.4 | メインバッテリー接続図 | 14 |
| 図2.6.5.1-1 | バッテリー構成品 | 15 |
| 図2.6.5.1-2 | セルケースの電位 | 15 |
| 図2.6.5.2-1 | セル外観 | 16 |
| 図2.6.5.2-2 | エレメント | 16 |
| 図2.6.5.3 | コンタクターの動作確認 | 17 |
| 図2.6.6 | 定電流一定電圧 (C C - C V) 充電方式 | 19 |
| 図2.7.1 | L I Bの原理 | 19 |
| 図2.8.3 | バッテリー損傷 | 25 |
| 図2.11.1 | 航法灯点灯時の回路 | 27 |
| 図2.11.3-1 | セルバランシング試験 | 29 |
| 図2.11.3-2 | 短い周期の充放電 | 29 |
| 図2.11.3-3 | セル電圧インバランス検知 | 30 |
| 図2.11.4-1 | 実機検証測定点 | 30 |
| 図2.11.4-2 | 瞬間的な電圧上昇 | 31 |
| 図2.11.4-3 | 瞬間的な電圧降下 | 32 |
| 図2.11.5 | 試験設定 (角田試験) | 33 |
| 図2.11.6.1-1 | 充電電流の振動 | 35 |
| 図2.11.6.1-2 | 過渡現象による高電圧 | 36 |
| 図2.11.6.3 | セルベント時の電圧変化 | 37 |
| 図2.11.6.5 | バッテリー電圧の変化 (試験1回目) | 37 |
| 図2.11.6.7 | 本重大インシデントでのメインバッテリー電圧変化 | 38 |
| 図2.11.6.8 | 因果関係図の一部 | 40 |
| 図2.13.1.2 | 同型バッテリー組立て | 57 |
| 図3.8.3-1 | 本重大インシデントでのメインバッテリー電圧変化 (分析) | 68 |
| 図3.8.3-2 | 短絡時の回路 | 68 |

本文中の写真

| | | |
|-----------------|-----------------------|----|
| 写真2. 7. 4 | リチウム・デンドライトの様子 | 21 |
| 写真2. 8. 3-1 | アウトフロー・バルブ付近の状況 | 22 |
| 写真2. 8. 3-2 | J 3 ケーブルコネクタ | 23 |
| 写真2. 8. 3-3 | CT スキャン画像 | 23 |
| 写真2. 11. 1 | A P U バッテリーからの漏れ電圧 | 27 |
| 写真2. 11. 2 | 分解したセルの負極（上段）及び正極（下段） | 28 |
| 写真2. 11. 5 | 6 番セル及びブレースバー（角田試験） | 34 |
| 写真2. 11. 6. 9-1 | 特徴的な損傷 | 41 |
| 写真2. 11. 6. 9-2 | セパレーター上で発見された銅金属粒 | 41 |
| 写真2. 11. 6. 9-3 | エレメントの間隙 | 42 |
| 写真2. 11. 7. 2 | 析出した樹枝状構造物 | 43 |
| 写真2. 12. 7. 1 | 開発時の内部短絡（釘刺し）試験 | 52 |
| 写真2. 12. 7. 3 | J 3 ケーブルコネクタの損傷 | 54 |
| 写真2. 13. 2-1 | 負極のしわ（成田事案） | 59 |
| 写真2. 13. 2-2 | 発見された金属片（成田事案） | 59 |

本文中の表

| | | |
|----------------|----------------------------------|----|
| 表2. 11. 5 | 試験形態（角田試験） | 32 |
| 表2. 12. 6. 1-1 | 大型航空機のシステム設計における故障状態の重大度と許容確率の関係 | 50 |
| 表2. 12. 6. 1-2 | 故障状態の定性的確率表現の説明 | 50 |
| 表2. 12. 6. 2 | 安全性評価で定められた危険事象 | 51 |

巻末資料

| | | |
|--------|--|----|
| 付図 1 | 推定飛行経路図 | 88 |
| 付図 2 | フライトレコーダーの記録 | 89 |
| 付図 3 | バッテリー電圧の変化 | 90 |
| 付図 4 | 同機の夜間係留地における最低外気温（2012/12/1～2013/1/15） | 91 |
| 写真 I | 機外の状況 | 92 |
| 写真 II | メインバッテリーの状況 | 92 |
| 写真 III | メインバッテリー上面の状況 | 93 |
| 写真 IV | メインバッテリー内部の状況 | 93 |
| 写真 V | 各セルの外観 | 94 |

| | | |
|---------|------------------------|-----|
| 写真Ⅵ | 3番セルの状況 | 95 |
| 写真Ⅶ | 4番セル内部の状況 | 96 |
| 写真Ⅷ | 5番セルの状況 | 96 |
| 写真Ⅸ | 6番セルの状況 | 97 |
| 写真Ⅹ | 安全弁の状況 | 98 |
| 写真Ⅺ | アース線の状況 | 99 |
| 別添1 | 高松空港における空港消防機関等の対応状況 | 100 |
| 別添2 | 角田宇宙センターでの熱伝播試験 | 102 |
| 付図2-1 | 試験設定 | 103 |
| 付図2-2 | 温度センサーの配置 | 104 |
| 付図2-3 | 試験結果 | 105 |
| 写真2-I | 試験後の状況(形態2) | 106 |
| 写真2-II | 6番セル及びブレースバーの状況(形態1、2) | 107 |
| 写真2-III | 形態2と3の熱損傷の比較 | 107 |
| 付図2-4 | 集電体等損傷状況 | 108 |
| 付図2-5 | バッテリー電圧変化(形態2) | 109 |
| 付図2-6 | セル等温度変化(形態2) | 109 |
| 付図2-7 | セル電圧低下の詳細状況(形態2) | 110 |
| 付図2-8-1 | セル電圧・アース線電流変化(形態2) | 111 |
| 付図2-8-2 | セル電圧・アース線電流変化(形態2) | 112 |
| 別添3 | 仏国からの意見 | 113 |

1 航空重大インシデント調査の経過

1.1 航空重大インシデントの概要

全日本空輸株式会社所属ボーイング式787-8型JA804Aは、平成25年1月16日（水）、同社の定期692便として、東京国際空港に向けて山口宇部空港を08時11分に離陸した。08時27分ごろ、四国上空高度約32,000ftを上昇中、メインバッテリーの不具合を示す計器表示とともに、操縦室内で異臭が発生したため、目的地を高松空港に変更し、08時47分、高松空港に着陸した。

08時49分、同機は高松空港のT4誘導路上で非常脱出を開始した。

同機には、機長ほか乗務員7名、乗客129名の計137名が搭乗しており、そのうち乗客4名が脱出中に軽傷を負った。

同機のメインバッテリーが損傷したが、火災は発生しなかった。

1.2 航空重大インシデント調査の概要

本件は、航空法施行規則第166条の4第4号に規定された「非常脱出スライドを使用して非常脱出を行った事態」に該当し、航空重大インシデントとして取り扱われることとなったものである。

1.2.1 調査組織

- (1) 運輸安全委員会は、平成25年1月16日、本重大インシデントの調査を担当する主管調査官ほか、4名の航空事故調査官を指名した。また、平成25年1月28日、2名の航空事故調査官を追加指名した。
- (2) 本重大インシデントに関し、次の専門的事項の調査のため、専門委員が任命された。

リチウムイオン・バッテリーに関する調査

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構（JAXA）

研究開発本部 電源グループ

内藤 均

（平成25年2月6日任命）

1.2.2 関係国の代表、顧問

本調査には、重大インシデント機の設計・製造国である米国の代表及び電力変換サブシステムの設計・製造国である仏国の代表が参加した。

1.2.3 調査の実施時期

| | |
|-----------------|-------------------------|
| 平成25年 1月16日～19日 | 現場調査 |
| 同年 1月22日及び23日 | バッテリー調査 |
| 同年 1月24日～3月5日 | バッテリー調査 |
| 同年 1月26日及び27日 | BMU調査 |
| 同年 2月2日～6日 | BCU及びBPCU調査 |
| 同年 2月16日及び17日 | バッテリーーBCU接続試験 |
| 同年 3月11日及び12日 | 調整会議 |
| 同年 3月18日及び19日 | 機体調査 |
| 同年 4月8日 | 機体調査 |
| 同年 4月21日～27日 | 米国国家運輸安全委員会公聴会、 調整会議 |
| 同年 5月14日～17日 | バッテリー調査 |
| 同年 5月29日～31日 | バッテリー調査 |
| 同年 6月2日～8日 | 調整会議 |
| 同年 6月11日～13日 | バッテリー調査 |
| 同年 6月18日及び19日 | バッテリー調査 |
| 同年 6月20日 | 機体調査 |
| 同年 6月20日 | BMU調査 |
| 同年 6月24日～9月17日 | バッテリー試験 |
| 同年11月1日～28日 | セル熱伝播試験 |

1.2.4 原因関係者からの意見聴取

原因関係者から意見聴取を行った。

1.2.5 関係国への意見照会

関係国に対し、意見照会を行った。

2 事実情報

2.1 飛行の経過

全日本空輸株式会社（以下「同社」という。）所属ボーイング式787-8型JA804A（以下「同機」という。）は、平成25年1月16日、同社の定期692便

として、東京国際空港へ向けて山口宇部空港を08時11分に離陸した。上昇中、08時27分ごろ、FIATO（ウェイポイント、今治市）付近上空高度約32,000ftにおいて、計器にメインバッテリーの不具合が表示され、機長及び副操縦士が異臭を感じたため、同機は目的地を高松空港に変更し、08時47分に着陸した。その後、08時49分、T4誘導路上で非常脱出を行った。

同機の飛行計画の概要は、次のとおりであった。

飛行方式：計器飛行方式、出発地：山口宇部空港、

移動開始時刻：08時00分、巡航速度：493kt、

巡航高度：FL（フライトレベル）410、

経路：FIATO（ウェイポイント）～Y61（RNAV経路）～

KTE（香川VOR/DME）～Y33（RNAV経路）～

SHOOT（ウェイポイント）～（以下略）、

目的地：東京国際空港、所要時間：1時間04分、代替空港：成田国際空港、

持久時間で表された燃料搭載量：2時間39分

本重大インシデント発生当時、同機の操縦室には、機長がPF（主として操縦業務を担当する操縦士）として左操縦席に、副操縦士がPM（主として操縦以外の業務を担当する操縦士）として右操縦席に着座していた。

本重大インシデントに至るまでの同機の飛行の経過は、フライトレコーダー（2.9に後述）の記録、管制交信記録及び乗務員の口述によれば、概略次のとおりであった。

2.1.1 フライトレコーダーの記録及び管制交信記録による飛行の経過

- | | |
|-----------|--|
| 08時10分49秒 | 同機は、山口宇部空港の滑走路07から離陸した。 |
| 同 17分22秒 | 福岡航空交通管制部（以下「福岡管制部」という。）は同機に、FL410への上昇及び香川VOR/DMEへの直行を指示し、同機は復唱した。 |
| 同 26分31秒 | 同機は、FIATO付近上空高度約32,000ftを、毎分1,500ftで上昇中であった。 |
| 同 26分43秒 | メインバッテリー電圧の記録値が31Vから低下し始めた。 |
| 同 26分44秒 | メインバッテリーの不具合が検知された。 |
| 同 26分51秒 | メインバッテリー電圧の記録値が11Vまで低下し、安定した。 |

| | |
|-----------------|---|
| 08時26分54秒 | 副操縦士が、非常灯点灯を示すEICAS ^{*1} メッセージ(EMER LIGHTS ^{*2})に気付いた。 |
| 同 27分09秒 | 副操縦士は機長に、焦げくさい臭いがする旨を伝えた。 |
| 同 27分24秒 | 副操縦士が「ELEC MAIN バッテリー」と発声し、機長は最寄りの空港を探し始めた。 |
| 同 27分25秒 | メインバッテリー不具合の検知が、一旦解除された。 |
| 同 27分31秒 | 前方電気室の空調下流にあるセンサーが煙を感知し、同時にマスター・コーション(注意喚起)が点灯した。 |
| 同 27分43秒 | メインバッテリーの不具合が、再び検知された。以後、不具合の検知と解除が数回繰り返された。 |
| 同 27分44秒 | 機長は、高松空港に緊急着陸することを決断した。 |
| 同 27分52秒 | メインバッテリーの放電及びメインバッテリー・バス電圧の異常が検知された。 |
| 同 27分57秒 | 同機は、福岡管制部に、煙発生により緊急事態を宣言し、高松空港へのレーダー誘導及び低高度への緊急降下を要求した。 |
| 同 28分06秒 | 同機は高度約33,600ftに達した後、降下し始めた。 |
| 同 28分25秒～35分29秒 | メインバッテリー電圧の記録値が、11～26Vの間で変動した。 |
| 同 28分28秒 | 福岡管制部は同機にFL210への降下を指示し、同機は復唱した。 |
| 同 29分03秒 | 福岡管制部は同機に香川VOR/DME経由で高松空港に向かうことを許可し、同機は復唱した。 |
| 同 30分24秒 | 前方電気室内で再び煙が感知され、同時にマスター・コーションが発生した。 |
| 同 30分48秒 | 副操縦士は、客室乗務員に緊急着陸する旨を伝えた。 |
| 同 30分49秒 | 高度約23,000ftを降下中、同機の降下率が毎分約7,000ftとなった。 |
| 同 31分56秒 | 福岡管制部は同機に、関西デパーチャーとの通信設定 |

*1 「EICAS」とは、エンジン及び一部のシステムの作動状況を表示するとともに、それらの異常状態の発生を視覚的かつ聴覚的に操縦士に知らせる機能を統合したシステムのことをいう。

*2 「EMER LIGHTS」は、非常灯(Emergency Lights)を意味する。非常灯は、電源が全て失われたときに客室の照明を行う灯火で、客室全般、通路、客室ドア位置を照らす。電源は、Wireless Control Unit内にあるバッテリーである。ホット・バッテリー・バスの電源が消失することが点灯のトリガーになるよう設計されている。

- を指示した。
- 08時32分03秒 同機は、関西デパーチャーと通信設定して緊急事態を通報し、さらなる降下及び滑走路への誘導を要求した。関西デパーチャーは同機にFL150への降下を指示し、その後、レーダー誘導のため13,000ftへの降下を指示した。
- 同 33分40秒 関西デパーチャーは同機に、関西アプローチとの通信設定を指示した。
- 同 33分53秒 同機は、関西アプローチと通信設定して緊急事態を通報し、BRUTE (ウェイポイント) への誘導を要求した。関西アプローチは同機に9,000ftへの降下を指示した。
- 同 34分47秒 関西アプローチは同機に、左旋回でBRUTEに向かう許可を発出した。その後、関西レーダーとの通信設定を指示した。
- 同 35分23秒 同機は、関西レーダーと通信設定して緊急事態を通報し、高松空港の滑走路26への誘導及びさらなる降下を要求した。関西レーダーは、最終進入コースへの誘導を開始した。
- 同 36分59秒 副操縦士は、乗客に、高松空港に緊急着陸する旨のアナウンスを行った。
- 同 37分50秒 同機の状況に関する問合せに対し、同機は、薄い煙で状況は悪化しておらず電気火災のような臭いが充満していること、メインバッテリーが機能せず、計器に異常が出る可能性があることを伝え、できるだけ早い着陸を要求した。
- 同 40分50秒 関西レーダーは、同機に高松空港への視認進入を許可した。
- 同 42分13秒 気圧高度約2,800ftで補助動力装置(以下「APU」という。)が始動された。
- 同 42分17秒 同機は高松飛行場管制所(以下「高松タワー」という。)に、視認進入で滑走路26に緊急着陸を行いたい旨を要求した。高松タワーは同機に進入の継続を指示した。
- 同 43分17秒 高松タワーは、高松空港の滑走路26に進入中の他機に復行を指示した。
- 同 43分51秒 脚レバーがダウン位置になった。

| | | |
|-----------|--|---|
| | | メインバッテリー電圧の記録値が、11Vから一時的に3Vに低下し、再び11Vに戻った。 |
| 08時43分53秒 | | 高松タワーは同機に、滑走路26への着陸許可を發出し、風の情報（風向150°、風速4kt）を伝えた。 |
| 同 45分21秒 | | 前方電気室内で煙が感知され（3度目）、同時にマスター・コーションが発生した。 |
| 同 45分35秒 | | オートパイロットが手動操作で解除され、マスター・ワーニング（警報）が発生した。 |
| 同 46分56秒 | | 同機は、高松空港の滑走路26に着陸した。 |
| 同 47分06秒 | | 高松タワーは、クラッシュホンにより、同機が着陸したこと及び滑走路を閉鎖したことを伝えた。 |
| 同 47分14秒 | | 同機は高松タワーに、滑走路からT4誘導路に離脱して停止したい旨を要求し、高松タワーは了解した。 |
| 同 47分45秒 | | 副操縦士は高松タワーに、機体から煙が出ているか問い合わせた。 |
| 同 47分57秒 | | 高松タワーは、タワーからは見えないと回答した。 |
| 同 48分03秒 | | 同機は、滑走路からT4誘導路に入った。前方電気室内で煙が感知され（4度目）、同時にマスター・コーションが発生した。この煙感知状態は、フライトレコーダーの記録終了まで継続した。 |
| 同 48分07秒 | | 高松タワーは同機に、煙を視認した旨を通報し、停止を指示した。 |
| 同 48分24秒 | | 高松空港のT4誘導路上で、同機の駐機ブレーキがセットされた。 |
| 同 48分37秒 | | 機長は、非常脱出を行うことを決断し、乗客にアナウンスを行った。 |
| 同 48分40秒 | | 非常脱出の指示が出された。 |
| 同 49分00秒 | | 両エンジンの燃料供給が停止された。 |
| 同 49分09秒 | | 最初に第1エンジンの、続いて第2エンジンのファイア・スイッチが引かれた。 |

フライトレコーダーの記録によれば、山口宇部空港を離陸後、高松空港に着陸するまでの前方電気室の室温（センサー位置はダクト内であり室温そのものではない。）は、煙を感知した際に僅かな変動があったものの、おおむね25℃であった。

（付図1 推定飛行経路図、付図2 フライトレコーダーの記録 参照）

2.1.2 操縦士等の口述

(1) 操縦士（機長、副操縦士）

機長は07時に空港に到着し、通常の手順で飛行前の作業を開始した。整備部門から受け取った機体の記録類には不具合事項は記録されていなかった。

08時00分にプッシュバックし08時10分に離陸した。

高度30,000ft付近を上昇中に、最初に副操縦士が電気系統のショートのような臭いに気付き、機長も同時に何かが焦げる臭いに気付いた。直後に「EMER LIGHTS」というメッセージがEICASに表示された。副操縦士がSTATUS MESSAGEを開いてみると、複数のメッセージが出ていた。次に「MAIN BATTERY DISCHARGE」というメッセージが表示された。

しばらくすると「SMOKE EQUIP COOLING FORWARD」というメッセージが表示された。規定上、原因不明の火災や発煙の場合は、最寄りの空港に着陸することになっているので、機長は上昇率を減らし、チェックリストに基づく対応を行いながら着陸場所を探した。すぐ前方に高松空港があったので、機長は高松空港に緊急着陸することにした。管制機関とのやりとりの後レーダー誘導が始まり、しばらくして同機は高松空港へのILS26アプローチの許可を得た。高松空港の天候は良好で、降下中に十分空港が視認できる状況であった。5nmほど前方を同社の531便（東京から高松）が飛行していた。ビジュアルアプローチで531便の後に着陸することになっていたが、滑走路26のファイナルに会合したところで、高松空港の管制塔から531便に対して緊急着陸機のためゴーアラウンドするよう指示が出された。着陸に際して、機長は電気システムの不具合を示すEICASメッセージが多数表示されたことを踏まえ、アプローチ中に電子機器が使用できなくなる可能性を考慮してオートパイロットを早めに切った。また、副操縦士の提案により、通常は着陸後に行うAPUスタートを、電源確保をより確実にするため着陸前に実施した。進入着陸中の計器表示はいつもと変わらず、いつもと同じように減速することができた。

飛行中、目に見える煙はなかった。臭いは継続しており、極端に強まることはなかった。客室乗務員（CA）から機長への報告では客室の状況も同様であった。

機長は、着陸後はいつでも緊急脱出^{*3}できる態勢で準備をしていた。T4誘導路に停止し管制塔に煙が見えるか確認したところ、一度は否定されたが

*3 「緊急脱出」は、航空法施行規則に規定されている「非常脱出」の同社における呼称である。

「煙が出ている」という通報が来た。また、副操縦士側の窓からも白い煙が上がっているのが見えたので、機長は火災が発生していると判断し、緊急脱出をアナウンスした。

客室では、速やかに緊急脱出が開始された。両操縦士は緊急脱出のチェックリストを行った後、キャビンに移動した。機長はキャビン中央部、副操縦士はキャビンの前方で脱出の援助をした。機長は客室内に乗客がいないことを確認し、CAを脱出させ、最後に脱出した。

脱出直後は、かなりの量の煙が出ていたが、時間とともにその量は少なくなっていた。

(2) 客室乗務員

離陸後、08時17分ごろにベルト着用サインが消えて各CAは離席しサービスの準備を始めた。

08時25分ごろに機長からL1^{*4}担当のチーフ・パーサー（CP）のインターフォンに連絡が入り「焦げくさい臭いがしないか」と問合せがあった。CPは即答できなかつたので一旦インターフォンを切り、前方でサービスしていたR2担当のCAに確認した。R2担当のCAは「最前方のギャレーでは臭わなかったがサービスを終え前方に戻って来た時、機首側に向かって左側の列の1番や2番座席付近の通路でビニールが溶けたような焦げくさい臭いが少しした。食事を配っていたため味噌汁とかコーヒーの匂いでかき消されるくらいのかすかな感じであった」と答えた。

後方キャビンを担当していた4人のCAの認識は、「変な臭いがする」ということで一致していた。CPから機長に報告するよう指示を受けていたL2担当のCAは、「メイン・キャビンで異臭がする」と報告した。

08時37分に操縦室から「操縦室の計器が電気系統の機器の発煙を感知する表示を出したため、高松空港にダイバートする」と突然アナウンスがあった。

CPが08時39分に「ダイバートをして着陸した後にスライドを使って脱出する可能性があるのか、衝撃防止姿勢の準備をした方がいいか」を機長に質問したところ、「通常の着陸をするので今のところ必要はないが変更があればまた指示する」と回答を受けた。その内容をオールコールで全CAに周知し、通常の着陸の準備を進めるよう指示した。その直後に4チャイム（着陸のために機内の見回りをしても支障なし）の合図が鳴った。通常の着陸の

*4 「L1」とは、同機の左側最前方の客室ドアをいう。同機には客室ドアが左右合計で8個あり、左側は前からL1～L4、同様に右側はR1～R4と呼称される。非常脱出のため、それぞれのドアの開放を担当する客室乗務員が指名される。

安全性のチェックを全CAが始め、通常の着陸前のアナウンスをR4担当のCAが行った。同機は08時47分に着陸した。着陸後CPが「高松空港に着陸しました。ベルトサインが消えるまで着席のままお待ち下さい。この後の状況は分かり次第お知らせします」と日本語と英語で伝えた。

その直後に機体が停止し、その30秒後ぐらいに操縦室からの緊急脱出の合図（Evacuation Signal及び「脱出」というアナウンス）が入った。CPはR1ドアの外側に白いものが見えた気がしたので、外部確認後、緊急時のドア開放操作を始めた。

緊急脱出の合図を受けて客室内で最初に乗客脱出の指示を出したのはCPであった。CAの中には緊急脱出の合図が本当か決めかねていた者もいたが、CPが脱出するよう指示をしたのを聞いて緊急脱出を確認し、各ドア担当のCAはドア開放作業に入った。L4ドアは、近くに乗客がほとんどいなかったため、他のドアを使用した方が早いとの判断から使用されなかった。開放された7つのドアのスライドは正常に展開した。

乗客は落ち着いており、指示をするまでスライドを滑らなかった。1人が滑るとその後はそれに続いて滑って行った。中には怖がる人もいたが、その人たちは出口に座らせて押し出した。乗客の中にはカバン等の荷物を持ってくる者もあり、荷物を機内に残させようとしたが、指示を無視して荷物を持って脱出した者もいた。女性客でハイヒールを履いている人は裸足で滑らせた。スライドの下で援助してくれた男性もあり、脱出は混乱なく行われた。

CAはトイレの中及び客席に誰もいないことを確認し、所定の携行物品を携えて脱出した。

乗客は脱出するまでは冷静であったが、脱出後は機体の右側と左側に分散していて、写真撮影を始めていた。脱出後、乗客を機首側に集め、10名ずつのグループにし、確認ができたところから順番に座らせ、全員がいることを確認した。そして乗務員も全員いることを確認した。

機長は座っていた乗客に事態の説明をした。後方の乗客には声が届かなかったので、後方から同じ内容を再度説明した。英語の説明が必要か確認したが求める者はいなかった。

CAの1人は、「08時47分に着陸し、機長の乗客への状況説明は08時58分であった。乗客の点呼に時間が掛かったが、脱出にかかった時間は3～4分と思われる」と述べた。

本重大インシデントは、平成25年1月16日08時49分、高松空港T4誘導路で発生した。

(付図1 推定飛行経路図 参照)

2.2 人の負傷

脱出スライドを滑り降りて着地する際、乗客4名が軽傷を負った。

2.3 航空機の損壊に関する情報

2.3.1 損壊の程度

小破

2.3.2 損壊の状況

メインバッテリーが熱による損傷を受け、アース線が溶断した。

(写真Ⅱ メインバッテリーの状況、写真Ⅲ メインバッテリー上面の状況参照)

2.4 航空機乗組員に関する情報

(1) 機長 男性 53歳

| | |
|-----------------|-------------|
| 定期運送用操縦士技能証明書 | 平成9年3月12日 |
| 限定事項 ボーイング式787型 | 平成24年11月30日 |
| 第1種航空身体検査証明書 | |
| 有効期限 | 平成25年8月4日 |
| 総飛行時間 | 13,642時間46分 |
| 最近30日間の飛行時間 | 48時間22分 |
| 同型式機による飛行時間 | 55時間24分 |
| 最近30日間の飛行時間 | 48時間22分 |

(2) 副操縦士 男性 46歳

| | |
|-----------------|-------------|
| 定期運送用操縦士技能証明書 | 平成11年3月15日 |
| 限定事項 ボーイング式787型 | 平成23年8月31日 |
| 第1種航空身体検査証明書 | |
| 有効期限 | 平成25年8月5日 |
| 総飛行時間 | 10,946時間04分 |
| 最近30日間の飛行時間 | 23時間29分 |
| 同型式機による飛行時間 | 475時間55分 |
| 最近30日間の飛行時間 | 23時間29分 |

2.5 航空機に関する情報

2.5.1 航空機

(1) 型式等

| | |
|---------------------------------|--|
| 型 式 | ボーイング式 787-8 型 |
| 製 造 番 号 | 34486 |
| 製造年月日 | 平成23年12月 1 日 |
| 耐空証明書 | 第2012-004号 |
| 有効期限 | 平成24年1月16日から整備規程（全日本空輸株式会社）の適用を受けている期間 |
| 耐 空 類 別 | 飛行機 輸送T |
| 総飛行時間 | 2,150時間45分 |
| 定期点検（A02点検、平成24年10月29日実施）後の飛行時間 | 398時間40分 |

(2) 航空機履歴

同機は、同型式機の9番目の製造機で、2012年1月14日にJA804Aとして同社に納入された。

本重大インシデント発生時に搭載されていたメインバッテリー（製造番号270）は平成23年11月24日に製造され（出荷前検査合格日）、翌年2月3日に同社に納入され、同年10月16日まで予備部品としてメンテナンスを受けながら保管されたものであった。

同機の納入時に搭載されていたメインバッテリー（製造番号240）は、機体電源投入時、操縦室のディスプレイが一旦表示後消える不具合が確認されたため、総飛行時間1,694時間12分、総飛行回数1,300回で平成24年10月17日に取り卸された。これにより、メインバッテリー（製造番号270）が10月17日に同機に搭載され、本重大インシデント発生時のメインバッテリーの総飛行時間は456時間33分、総飛行回数は371回であった。

2.5.2 重量及び重心位置

本重大インシデント当時、同機の重量は303,600lb、重心位置は22.1%MACと推算され、いずれも許容範囲（最大着陸重量370,000lb、本重大インシデント当時の重量に対応する許容重心範囲6.0～36.9%MAC）内にあったものと推定される。

2.6 ボーイング式787-8型機

2.6.1 概要

ボーイング式787-8型機（以下「787」という。）は双発の大型旅客機である。開発は2004年4月に始まり、初飛行が2009年12月、型式証明を得たのが2011年8月、航空会社への納入開始は同年9月であった。機体の設計・製造会社であるボーイング社（以下「B社」という。）によれば、2013年1月16日時点の国内外での運航機数は50機であり、787全機の総飛行時間は約5万時間であった。

787の特徴は、燃費を向上させるため機体重量を軽減したことである。そのため複合材を多用し、油圧の使用を最小限にするとともにエンジンプリード・エアの使用を廃止し、代わりに電気を多用している。客室の気圧及び湿度は、機体胴体に複合材を使用しているため、在来機よりも高く設定されており、それぞれ約0.8気圧及び10～20%となっている。

従来のアルミニウム合金製胴体機は、機体胴体をアースとして使用できたが、複合材の胴体ではそれが不可能なため、787ではCurrent Return Network (CRN) という配線を設け、そこにアースをとるようにしている。

在来機はメインバッテリーやAPU始動用バッテリー（以下「APUバッテリー」という。）にニッカド・バッテリーを使用しているが、787は高容量で軽量なリチウムイオン・バッテリー（以下「LIB」という。）を使用している。787のメインバッテリー及びAPUバッテリーは、同型式のバッテリー（以下「同型バッテリー」という。）である。メインバッテリーは前方電気室内に、APUバッテリーは後方電気室に搭載されている。

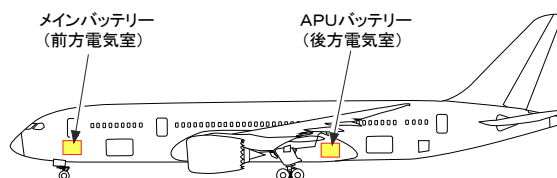


図 2.6.1 バッテリー搭載位置

また、787は、それぞれ設計及び容量が異なるLIBを、FCE、フライトレコーダー用独立電源 (RIPS) 及び緊急灯火用電源として使用している。

B社が電力変換サブシステムのサプライヤーとしてタレス・エビオニクス・システム社（以下「T社」という。）を選定したのは2004年5月であった。LIBを使用することが決定されたのは2004年9月であった。T社が同型バッテリーのサプライヤーとして株式会社ジーエス・ユアサテクノロジー（以下「G社」という。）及び同型バッテリー用充電器（以下「BCU」という。）のサプライヤーとしてセキュラプレーン・テクノロジー社（以下「S社」という。）を選定したのは2005年1月であった。B社はこれらの選定に同意した。

本重大インシデント発生時の同型バッテリーは開発段階から数えると3代目（初代量産型）のものであった。開発段階の初代同型バッテリーが製造され、詳細設計

審査が終了したのは2005年11月であった。2006年にS社において、同型バッテリーとBCU間の制御信号ケーブルが繋がれていない状態で充電を行ったため過充電となり火災に至る事案が発生した。これにより、コンタクター及びBCUが接続されていない状態での過充電検知機能を追加する設計変更が行われ、開発段階における2代目の同型バッテリーが誕生した。

しかし、2009年、ユーティリー・エアロスペースシステムズ（以下「U社」という。）のAirplane Power Systems Integration Facility（APSI F）での電気サブシステムの地上試験中にバッテリー内のセル1個がベント（2.6.5.2に後述）する事案が発生した。この事案では、セルがベントし、煙の発生とともに損傷したバッテリーから電解液が漏れた。調査の結果、過放電状態のバッテリーに対して繰り返し行われた充電（BCUからではなくHot Battery Bus（HBB）側から逆流する形で数百Aの電流が流れたこと）によるものであることが判明した。この事案発生後、HBB側からの逆流による充電を防止するためBattery Diode Module（BDM）を挿入するという電気回路の変更が行われた。バッテリーには、電解液の漏えいを防止するためのシーリングの追加、Battery Monitoring Unit（BMU）にBDMの監視を行う回路の追加及び過放電後の再充電を防止するためのラッチ回路の追加が行われた。以上のような設計変更を経て、3代目の同型バッテリーが誕生した。

2.6.2 前方電気室冷却システム

前方電気室の冷却は、前方電気室冷却システムで行われる。

機体前方の機内の空気は、吸引用ファンにより前方電気室各パネルに導かれてパネル内の素子を冷却後、前方電気室内に入る。排気用ファンは電気室等のダクトから空気を吸引する。この空気は、前方アウトフロー・バルブを通して機外に排出されるものと前方貨物室に入るものに分かれる。

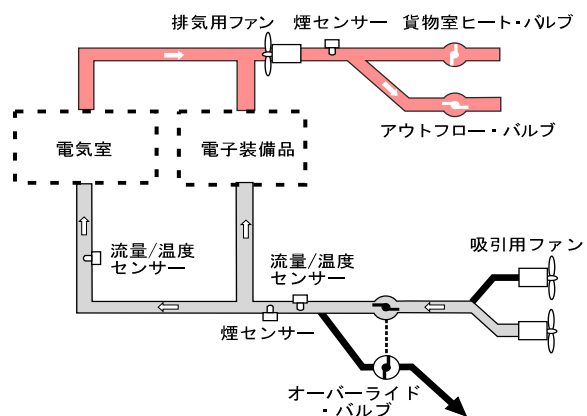


図 2.6.2 前方電気室冷却システム概要

機体前方の機内で吸引された空気は前方電気室に入るまでに1箇所の煙センサーを通過する。電気室から排出された空気は排気用ファン下流にあるもう1箇所の煙センサーを通過する。

飛行中、前方電気室で煙が検知された場合、通常は閉じている機外へのオーバーライド・バルブが開き、一部はそこからベンチュリ効果により吸い出され、残りは排気ファンにより機外に排出される。

2.6.3 電源系統

Electrical Power Generation and Start System (EPGSS) は、電力を生成・制御・保護する 787 特有の電気コンポーネントで、APU 及びメインエンジンのスタート時に電力を供給する。EPGSS には、以下のコンポーネントが含まれる。

- ・ Variable Frequency Starter Generators (VFSG) 4機
- ・ APU Starter Generators (ASG) 2機
- ・ Generator Control Units (GCU) 6機

VFSG 4機が故障しメイン AC 電力が失われるという極めてまれな状況においては、ASG がバックアップ電力を供給する。もし、更に ASG が何らかの理由で故障した場合 (APU バッテリーが APU を起動できない場合を含む。)、10kVA ラムエア・タービン (RAT) 発電機/油圧ポンプが航空機に電力を供給する。電力を喪失した際のメインバッテリーの唯一の役割は、standby operation を支援することであり、これにはメインエンジンのイグナイターが含まれる。メインバッテリー及び APU バッテリーの充電容量は想定使用期間末期 (end-of-life) において 50Ah である。

通常の運航中に使用されるメインバッテリーの放電電流は、一時的に 100A 前後となることがあるが、運航中のその他の時間は数 A 程度である。

なお、APU バッテリーを使用した APU スタートでは、APU の始動に連続 2 回失敗した場合でも、5 分間のクーリングを行った後に、もう一度 APU スタートを行うことができる。各 APU スタートにおいて想定される APU バッテリーの放電電流は約 600A である。

2.6.4 DC/スタンバイ・パワー・システム

DC/スタンバイ・パワー・システムにおけるメインバッテリー及び APU バッテリーの関連構成部品は、メインバッテリー、メインバッテリー用 BCU、BDM、APU バッテリー、APU バッテリー用 BCU 及びその他のコンポーネントである。

J3 ケーブルは、メインバッテリー、HBB 及び BCU を接続している 32VDC ケーブルである。また、J1 ケーブルは、メインバッテリー及び BCU 間の制御信号ケーブルである。

図 2.6.4 は、メインバッテリーに接続され

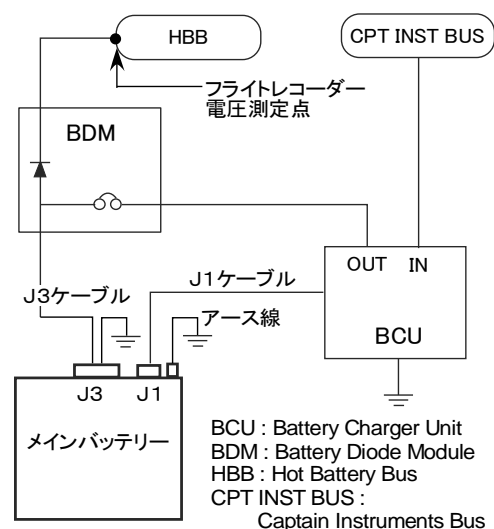


図 2.6.4 メインバッテリー接続図

ている装置を示したものであり、フライトレコーダーのメインバッテリー電圧の測定は、HBBで行われている。

2.6.5 同型バッテリー

2.6.5.1 同型バッテリー

(1) 同型バッテリーの仕様は以下のとおりである。

- ① 公称DC電圧： 29.6V
- ② 公称容量： 75Ah
- ③ 重量： 28.5kg
- ④ 運用温度範囲： -18℃~70℃

(2) 同型バッテリーは、電氣的に8つのセルがバスバー（金属板）を介して直列につながっており、4個ずつ2列に配列されている。セルケースは正極及び負極の中間的な電位を有している。各セル間は樹脂製のスペーサーで絶縁されている。このスペーサーの融点は、約250℃である。

セル以外の構成部品は、次のとおりである。（図2.6.5.1-1 参照）

- ① バッテリー・モニタリング・ユニット（BMU）
- ② コンタクター（遮断器）
- ③ ホール効果電流センサー（HECS）
- ④ ワイヤ・ハーネス（センサー）
- ⑤ バスバー
- ⑥ バッテリーケース（アルミニウム製）
- ⑦ ブレースバー
- ⑧ アース用スタッド（アース線接続部）

セル内部の電解液と金属製のセルケースが接触しているため、セルケースにも電位が生じており、その値は図2.6.5.1-2のようになる。

なお、同型バッテリー、セル等の側面の呼称は、J1コネクタのある面を前方としてS1とし、時計方向回りにS2、S3、S4とする。

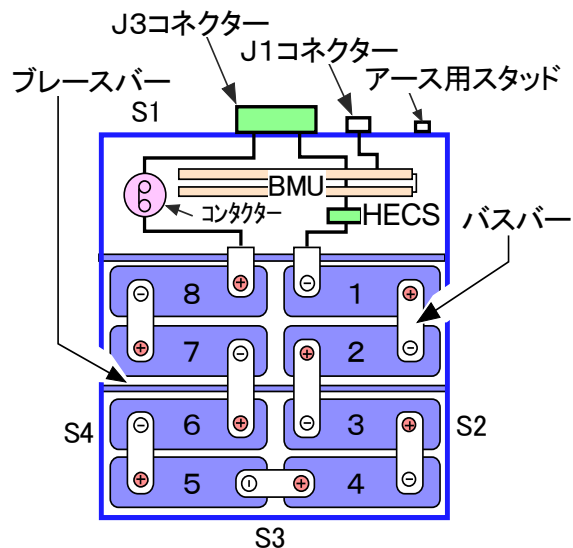


図 2.6.5.1-1 バッテリー構成部品

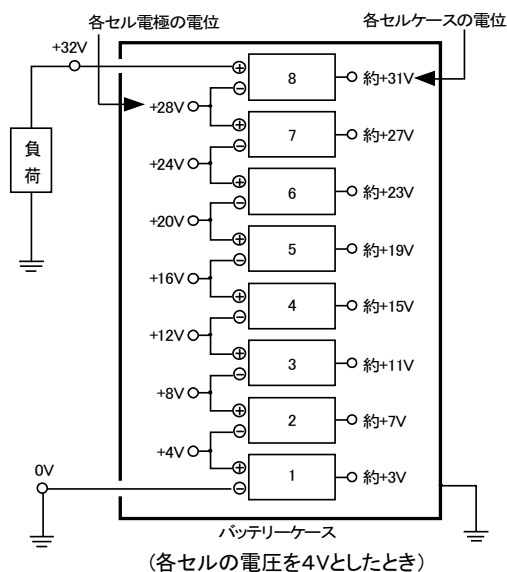


図 2.6.5.1-2 セルケースの電位

2.6.5.2 セル

セルケースはステンレス製で、上部カバーとケース部で構成されている。上部カバーとケース部の接合箇所は溶接されており、集電体と端子板間はガスケットにより気密を保つ設計となっている。セルケースには、内圧がある基準以上に上昇した際に圧力を開放するため、安全弁が取り付けられている（以下、内圧が高まって安全弁が破れることを「ベント」という。）。セルは、安全弁がバッテリーケース内で外側を向くように、安全弁が正極側にあるものと負極側にあるものの2種類あるが、安全弁の位置が違うだけで性能や他の形状は同じである。

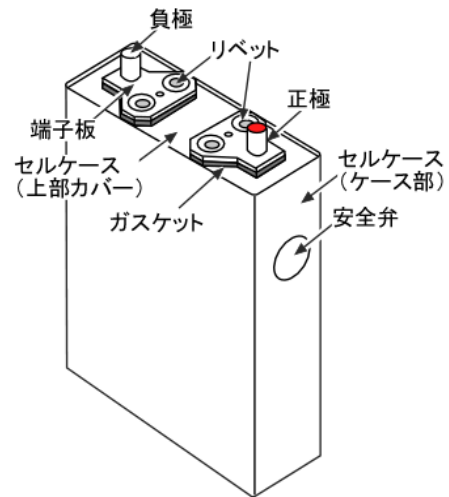


図 2.6.5.2-1 セル外観

セルケースの中には樹脂シートで覆われたエレメントが3個挿入されている。各エレメントは、外側からセパレーター、負極板、セパレーター、正極板を重ねてロール状にしたあと偏平にしたものである。正極はアルミ箔にコバルト酸リチウムを主成分とする正極活物質を塗布したもの、負極は銅箔に炭素系材料である負極活物質を塗布したものであり、セパレーターは多孔質のプラスチック・フィルムである。正極板のアルミ箔が出ている側にはアルミニウムの電極集電体が、負極板の銅箔が出ている側には銅の電極集電体取り付けられている。各エレメントの正極及び負極の電極集電体はエレメント上部で1つとなり、セルの各電極端子につながる端子板を接続するためにリベットが使用されている。このリベットは、対応する集電体と同じ材料で製造されている。各電極とバスバーを固定するボルトは^{しんちゆう}真 鋳製であり、電極集電体とセルケース外の電極端子板は、樹脂製のガスケットでセルケースと絶縁され、リベットで固定されている。

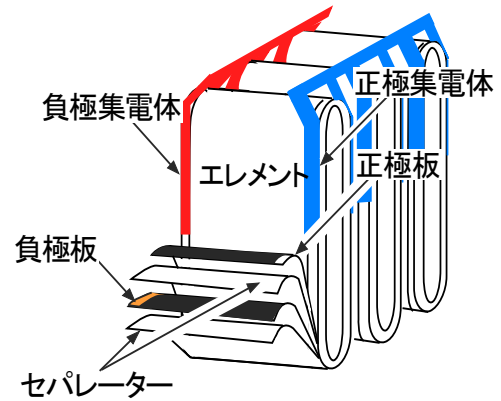


図 2.6.5.2-2 エレメント

各材料の融点は、以下のとおりである。

- ・ 銅 : 約 1,085℃
- ・ アルミニウム : 約 660℃
- ・ セパレーター : 約 130℃
- ・ 樹脂シート : 約 280℃

なお、エレメントの呼称は、セルのS 1 側のエレメントからS 3 側にE 1、E 2、E 3とする。

2.6.5.3 BMU

BMUは2枚のボード（メインBMU及びサブBMU）で構成されており、メインBMUにBMU 1及びBMU 2が、サブBMUにBMU 3及びBMU 4が実装されている。過充電及び過放電に対する保護機能は、多重化されている。

主な機能は以下のとおりである。

- (1) バッテリー状態信号のBCUへの伝達
- (2) 過充電・過放電に対する保護

過充電に対する検知及び保護機能並びに過放電の検知機能は、機体電源が入っていない状態又はバッテリーが保管されている状態であっても常に動作するように設計されている。

- (3) セル電圧のバランス維持

バッテリー総電圧が満充電に近いある値以上であり、かつ充電電流が低電流である時、バッテリーを構成する8つのセルのうち規定電圧値を超えたセルについて、BMUが規定電圧値未満のセルよりも充電電流を若干減少させて充電を継続し、各セルの電圧を均等化させる。

- (4) 過放電後の再充電に対するラッチ機能
- (5) セル電圧のインバランス検知

バッテリー総電圧が満充電に近いある値以上あるにもかかわらず規定電圧未満のセルが存在すると、BMUは充電を禁止する。

- (6) BMUの自己診断（Built In Test）及び不具合時の信号伝達

自己診断にはコンタクターの動作確認が含まれている。コンタクターの動作確認以外の自己診断は、BMUの起動直後に実施される。

コンタクターの動作確認は、BCU起動後に初めて以下の3条件を満たした約1秒後に完了するよう実施される。

- ①「BCUが充電モード」
- ②「バッテリー総電圧が満充電に近いある値以上」
- ③「充電電流が規定された低電流値未満」

BCUのINTERFACE CONTROL DOCUMENTには、充電電流値が高い時にコンタク

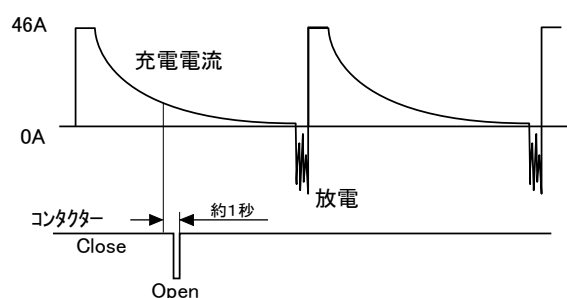


図 2.6.5.3 コンタクターの動作確認

ターの開閉を行うと高電圧の過渡現象が発生する可能性があるので、それを回避するために充電末期における低電流値で実施することが説明されている。

2.6.5.4 コンタクター及びHECS

コンタクターは、バッテリーが過充電の状態（セル電圧が4.55V以上又は総電圧が36.5V以上）になった時に、BCU及びHBBからバッテリーを切り離す設計となっている。コンタクターは通常は閉じており、異常時には、コンタクターを開くためのコイルドライブに電圧を印加することでコンタクターが開く機構となっている。

HECSは、電流に比例して発生する磁束を測定して電流値を検出し、BMU及びBCUに出力する。

2.6.5.5 アース線

バッテリーボックスは、内部の収納物とは絶縁されており、静電気防止のため機体のCRNにアース線で接続されている。

2.6.5.6 ブレースバー

ブレースバーはステンレス製で、バッテリーボックスの形状維持とセルの固定のため、バッテリーボックス内のS2とS4を結ぶように取り付けられている。取付位置は、2番と3番セルの間及び6番と7番セルの間である。また、セルを固定する樹脂枠がボルトによりブレースバーに固定されている。

2.6.6 BCU

メインバッテリー及びAPUバッテリーにつながるBCUは同じ規格のもので、バッテリーの充電を行う。BCUの能力は以下のとおりである。

- (1) 入力電圧：22.0～32.0V
- (2) 出力電圧／出力電流：16.0～32.2V／0.0～46.0A
- (3) 充電モード：定電流モード及び定電圧モード
- (4) 制御方式：PWM（パルス幅変調）制御スイッチング方式

充電方式は、LIBでは広く一般に採用されている定電流一定電圧（CC-CV）充電方式であり、バッテリーに向かう出力側の電圧と電流をセンサーで検出し、電流の流れる時間幅を制御して、出力電流及び出力電圧を調整するフィードバック制御を行っている。

定電流充電モードでは、充電電流を4.6Aに保ちながら、徐々に32.2Vまで電圧を上げ、充電電圧が32.2Vに到達した後は、定電圧充電モードに移行し、電圧を32.2Vを保つように充電電流を下げながら充電する方式である。

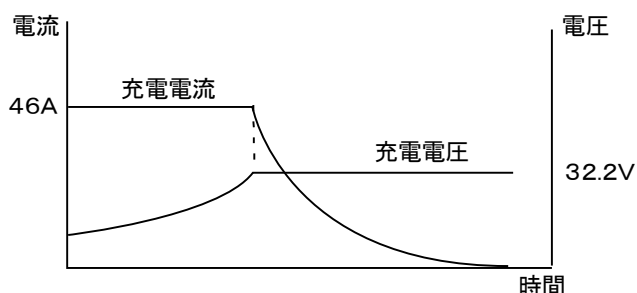


図 2.6.6 定電流一定電圧(CC-CV)充電方式

(5) 保護機能

BCUは、BMUからバッテリーの異常を検知した信号を受け取るとバッテリーの充電を停止する。

2.6.7 BDM

BDMは、メインバッテリーとHBBの間に配置されており、BCU以外から充電電流がメインバッテリーに流れ込まないように防護している。

なお、BDMで約1Vの電圧降下が発生する。

2.7 LIB

2.7.1 LIBの原理

LIBは、リチウムイオンが電解液を介して正極と負極との間を移動して充放電を行う2次電池である。

コバルト酸リチウムを主成分とする正極活物質を使用するLIBは、充放電を行うと正極及び負極の活物質が膨張及び収縮し、徐々に活物質内の構造が崩れてリチウムイオンが移動しにくくなったり、SEI^{*5}被膜の形成にリチウムイオンが消費されたりする。このため、LIBは長期間の使用に伴う充放電の繰り返しにより劣化し充電容量が低下する。

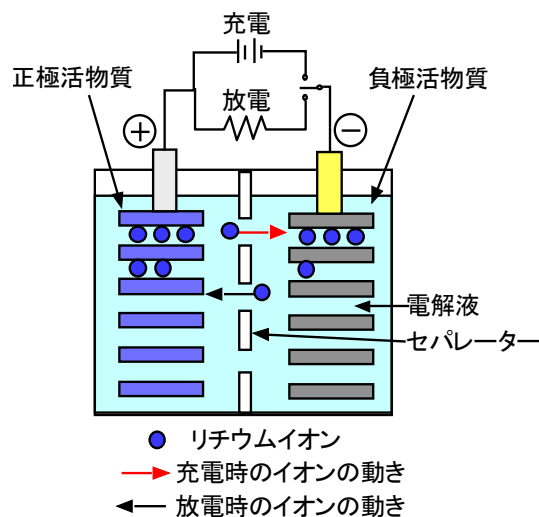


図 2.7.1 LIBの原理

*5 「SEI (固体電解質界面相)」とは、バッテリー (セル) の使用開始初期に、負極表面に生成される表面被膜であり、リチウムイオン伝導性があるが電子導電性がないため、充放電を阻害せず、負極表面での電解液の還元分解反応を抑制しているものである。

また、劣化に伴い電解液の分解による微少なガスの発生や活物質の膨らみが生じるため、ケースが膨れたり内圧が上昇することが知られている。

L I Bは用途や使用方法によって、活物質の成分やその比率、充電容量及び充電方法を総合的に考慮して設計される。

L I Bの特徴は以下のとおりである。

- ・単セル電圧とエネルギー密度が高く小型軽量化が可能
- ・短時間で充電が可能
- ・メモリー効果^{*6}が小さい

2.7.2 L I Bの故障モード

L I Bに発熱現象及びセルのベントが現れる主要な故障モードには、以下のものがある。

(1) 過充電

過充電は、SOC（充電率）100%を超えて充電を行うことで発生する。過充電になると、電圧はSOC 100%状態を示す電圧を超えて上昇するため、電圧を測定することで検知することが可能である。

(2) 過放電

過放電は、SOC 0%から更に放電を行うことで発生する。過放電になると負極集電体に使用されている銅の溶出が発生する。過放電は、各セルの電圧を測定することで検知することが可能である。

(3) 外部短絡

外部短絡は、バッテリーの外部での短絡である。外部短絡が発生すると、大電流が流れるためセルの内部抵抗による発熱（ジュール熱）が発生する。

(4) セルケースの短絡

同型バッテリーのセルは、金属製のセルケースが負極と正極のほぼ中間の電位を持っている。接地されているバッテリーボックスとセルケース又はセルケースと他のセルケースが短絡すると、セル内部の化学的性質が変わり、導電物質の析出（例：銅、リチウム等）が発生して、最終的にセルのベントが発生することがある。

(5) 内部短絡

内部短絡は、セルの内部での正負極間の短絡である。内部短絡が発生すると、セル内部の短絡点で大電流が発生することによる発熱現象によって電解

*6 「メモリー効果」とは、バッテリーを放電し切らない状態での再充電を繰り返した場合に、見かけ上、使用可能な容量が減少する現象のことである。

液の分解が発生する。

内部短絡の主な原因としては、以下のものがある。

- ・セル内部への金属片の混入
- ・セル内部のセパレーターの損傷
- ・セル内部のリチウム金属の析出

2.7.3 ソフトショート

ソフトショートとは、セル内の正極と負極の間に極低電流回路が形成され、正極板及び負極板間に僅かな電流が流れるため、セルの自己放電率が高くなることをいう。ソフトショート試験は、ある期間のOCV（開放電圧）を連続して測定し、自己放電率を確認することでソフトショートの検出を行う試験である。

2.7.4 リチウム金属の析出

L I Bでは、使用の経過とともに負極上にリチウム金属が析出することがある。

リチウム金属の析出の主な原因としては、過充電による負極でのリチウムイオン受入可能量の超過、経年劣化による負極活物質組織の不均一化による負極へのリチウムイオンの格納速度の低下、極板間距離の不均一による充電電流の集中及び低温環境下でのリチウムイオンの移動速度の低下が挙げられる。

L I Bが充電される過程においては、負極に挿入されるリチウムイオンの移動が、負極への格納速度を超過しない速度であることが理想的であり、その場合はリチウム金属の析出は発生しない。しかし、実環境では局所的な状態のバラつきや正負極間の状況により負極へのリチウムイオンの格納速度を充電速度が上回ることが起こり得る。この場合、負極へ入ることができないリチウムイオンがリチウム金属に還元され、負極表面に析出する。析出したリチウム金属は電析と呼ばれ、負極表面にメッキのように堆積する場合と樹木の枝が生えたような形になる場合がある。樹枝状結晶は一般にデンドライトと言われ、リチウム金属の樹枝状結晶をリチウム・デンドライト又は単にデンドライトと呼んでいる。同型バッテリーの負極材料はカーボンであるが、参考としてリチウム金属負極上でのリ

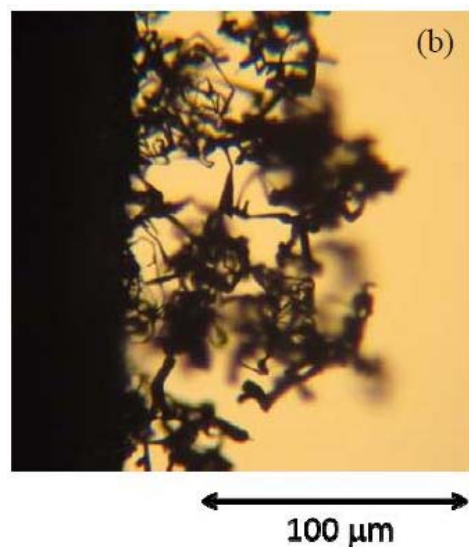


写真 2.7.4 リチウム・デンドライトの様子

チウム・デンドライトの様子を写真2.7.4*7に示す。なお、リチウム金属の融点は、約180℃である。

一般的に、劣化したLIBでは、金属リチウムの堆積及びデンドライトが散見されるが、リチウム金属が析出したセルが必ずしも内部短絡を起こすものではなく、適切な条件（セルの性能を超えない充電方法の制御が行われていること）で使用することで、内部短絡の発生率を極めて低くすることが可能とされている。

2.8 本重大インシデント現場及び機材の損壊状況に関する情報

2.8.1 本重大インシデント現場の状況

現場は、高松空港のT4誘導路上であった。乗客が退避した後、電気ブレーキを解除して同機は駐機場に牽引されたが、翼端灯及び尾灯が点灯したままであった。これらの灯火は、APUバッテリーのJ3ケーブルを外すと消灯した。

2.8.2 損壊の状況

メインバッテリーが熱により大きな損傷を受けた。

2.8.3 損壊の細部状況

前方電気室冷却システムの電気室より下流側のダクト等の構成部品並びにオーバーライド・バルブ及びアウトフロー・バルブ下流側の機体外板に黒緑色／黒色の物質（写真2.8.3-1 参照）が付着していた。メインバッテリー周辺にも、メインバッテリーから漏れ出した溶解物やすすのような堆積物の付着が見られたが、火炎による損傷は見られなかった。



写真 2.8.3-1 アウトフロー・バルブ付近の状況

*7 「リチウム・デンドライトの様子」は、電解液中に正極及び負極（リチウム金属）を浸した状態で、リチウム・デンドライトの形態的変移を研究している論文（Morphological Variation of Electrodeposited Li in Ionic Liquid, ECS Trans., 41(41) 3-10 (2012), Kei Nishikawa, Hitoshi Naito, Makoto Kawase and Tetsuo Nishida著）からの引用である。

バッテリーケースの蓋は約 2 cm 膨らみ、蓋の裏面全体に溶解物が付着していた。膨らんだ蓋板とバッテリーケースの隙間から溶解物が漏れ出し、バッテリーケース側面に付着するとともに一部はバッテリー下に設置されているトレイ上に堆積していた。

バッテリー内部では、黒い溶解物がバッテリー上面を覆い、各セルは熱による損傷を受けていた。バッテリーから BDM につながっている J 3 ケーブル、J 3 ケーブルコネクター（写真 2.8.3-2 参照）及び BCU につながっている J 1 ケーブルには損傷はなかった。バッテリーケースにはアーク放電による変色、穴等はなかった。しかしながら、バッテリーケースのアース線は溶断していた。

各セルの変形状況は写真 2.8.3-3 の CT スキャン画像のとおりであった。

(1) 1 番セル

セルの S 1、S 3 は膨らんでおり E 3 エレメントの正極集電体 2 本が溶断していた。各エレメントは熱による損傷を受け、セパレーター、正極板及び負極板には高温の影響が認められ、集電体である金属箔も損傷を受けていた。セルはベントしていた。

(2) 2 番セル

セルの S 1 はへこみ S 3 が膨らんでおり、E 3 エレメントの正極集電体 2 本が溶断していた。各エレメントは熱による損傷を受け、セパレーター、正極板及び負極板には高温の影響が認められ、集電体である金属箔も損傷を受けていた。

セルはベントしていた。

(3) 3 番セル

セルの S 1、S 3 がへこんでいた。負極集電体の肩部にはアーク痕があり、このアーク痕は、セルケースを通して集電体からブレースバーまで広がっていた。各エレメントは熱による損傷を受け、セパレーター、正極板及び負極

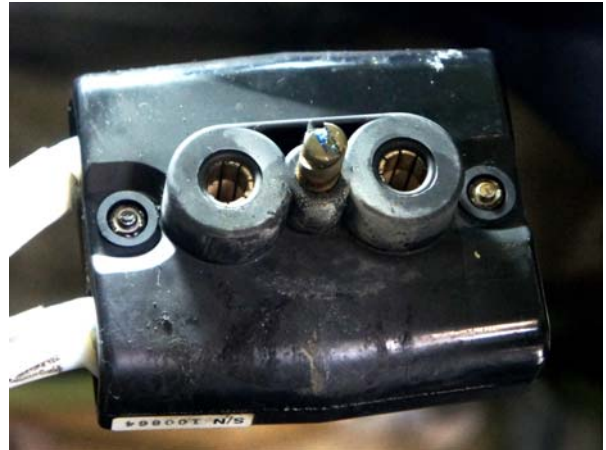


写真 2.8.3-2 J3 ケーブルコネクター

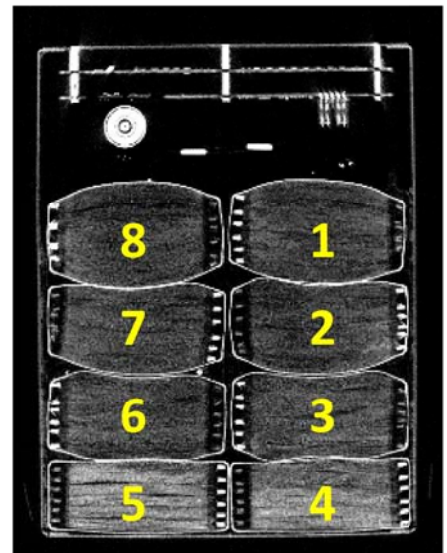


写真 2.8.3-3 CT スキャン画像

板には高温の影響が認められ、集電体である金属箔も損傷を受けていた。

正極集電体は6本全部が溶断しており、端子にはアーク放電の痕跡が確認された。3番セルの正極端子の回りには大きな穴が開いており、4番セルの負極に連結しているバスバーもこの穴の上に当たる部分が消失していた。バスバーを正極端子板に固定するボルトも消失していたが、ワッシャー及びナットは溶解せずに残っていた。ワッシャーのバスバー側にはアーク放電の痕跡が残っていた。

3番セルのS4は6番セルのS2に溶着していた。3番セル上面のS1とS4の角には穴が開いていた。

セルはベントしていた。

(4) 4番セル

セルのS1及びS3が少し膨らんでいた。正極集電体の溶断はなかった。各エレメントは熱による損傷を受け、セパレーターは溶けた状態であった。セルのS1、バスバーの直下に穴が開いていた。

セルはベントしていなかった。

(5) 5番セル

セルのS1及びS3が少し膨らんでいた。正極集電体の溶断はなかった。各エレメントは熱による損傷を受け、セパレーターは溶けた状態であった。

セルのS1には下から80mm、S2側の角から15mm位置に直径約1mmの穴が開いていた。走査電子顕微鏡による観察で、この穴は外側から内側に向かって開いたことが確認された。この穴の内側にあるE1エレメントでは、穴に対応する位置を中心とした半円状の変色が見られた。

セルはベントしていなかった。

(6) 6番セル

セルのS1、S3がへこんでいた。正極集電体は6本全部が溶断していた。各エレメントは熱による損傷を受け、セパレーター、正極板及び負極板に塗布されている活物質は熱の影響により損傷を受けていた。

6番セルのS2は3番セルのS4に溶着していた。S1上部とブレースバーの位置に相当する場所に横長の大きな穴が開き、ブレースバーの一部が溶着していた。

S3の5番セル穴の位置に対応する位置2箇所小さくぼみがあった。

セルはベントしていた。

(7) 7番セル

セルのS1はへこみ、S3が膨らんでおりE3エレメントの正極集電体2本が溶断していた。各エレメントは熱による損傷を受け、セパレーター、正

極板及び負極板に塗布されている活物質は熱の影響により損傷を受けていた。
セルはベントしていた。

(8) 8番セル

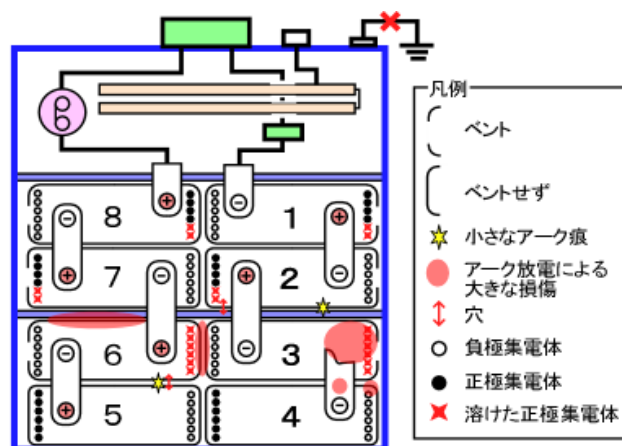
セルのS1、S3は膨らんでおりE3エレメントの正極集電体2本が溶断していた。各エレメントは熱による損傷を受け、セパレーター、正極板及び負極板に塗布されている活物質は熱の影響により損傷を受けていた。

セルはベントしていた。

(9) セル全体の損傷状況

セル全体の損傷状況をまとめると図2.8.3のようになる。正極集電体は4番及び5番セル以外は溶断していた。

また、全てのセルのエレメントが熱による影響を受けて損傷しており、発熱現象の起点の特定及び金属の析出等が確認できる状況ではなかった。



注 4番セル5番セル間のバスバー及び各エレメントは省略

図 2.8.3 バッテリー損傷

(10) バッテリー内のその他のコンポーネント

① BMU

2枚のボードはいずれも熱による損傷を受けていた。一部の素子は、熱でハンダが溶けたため位置がずれていた。そのため通電による試験は実施できなかった。

なお、使用されていたハンダの溶解温度は、約180℃である。

② コンタクター

外部は熱の影響を受けて黒く変色していた。内部の接触端子には、通常使用時でも発生し得るアーク痕跡以外の大電流による損傷はなかった。

③ HEC S

外部は熱の影響を受けて黒く変色し、ひび割れができていた。

④ セルの電極及びバスバーに取り付けられているワイヤー

ワイヤーの被覆は熱の影響で炭化し、一部は断線していた。

(11) その他のコンポーネント

① BCU

平成25年2月2日及び3日に米国アリゾナ州ツーソンにあるS社において、同機に搭載されていたメインバッテリー用BCU及びAPU

バッテリー用BCUに対し、通常は出荷前に行われる検査（出荷前検査）と同等の検査を実施した。その結果、異常は認められなかった。

② BPCU (Bus Power Control Unit) 及びGCU (Generator Control Unit)

平成25年2月5日及び6日にアリゾナ州フェニックスにあるU社において、同機に搭載されていたBPCU (left, right) 及びGCU (R1, R2) に対して出荷前検査と同等の検査並びに不揮発性メモリのダウンロード及び解析を実施した。その結果、異常は認められなかった。

(写真 I ~ XI 参照)

2.9 フライトレコーダーに関する情報

同機には飛行記録装置、操縦室用音声記録装置及びデータ・リンク記録装置の機能を持つ一体型レコーダー（EAFR）（米国コリンズ社製（パーツナンバー：182690-002））が、機体の前方及び後方に1台ずつ装備されている。同機のEAFRには、飛行データが約58時間記録され、操縦室の音声は2時間録音されており、いずれも本重大インシデント発生時の記録が残されていた。

787のEAFRには、メインバッテリーの電圧値が2秒ごとに、APUバッテリーの電圧値及び電流値が1秒ごとに記録されているが、メインバッテリーの電流値は含まれていないため、同機のメインバッテリーの電流値を得ることはできなかった。

EAFRの時刻校正は、管制交信記録にあるNTTの時報とEAFRに記録されたVHF送信キーイング信号とを対応させることにより行った。

2.10 救難及び消防に関する情報

高松空港の救急機関の消防車、救急車等の誘導路への展開は、同機の着陸前に完了していた。軽傷者4名のうち1名は空港ビルに徒歩で移動した後、市内の病院に搬送された。

火災が発生しなかったため、消火活動は行われなかった。同機が緊急事態を宣言し高松空港へ着陸したい旨の連絡を行った以降、消防車の撤収までの詳細な状況は、大阪航空局高松空港事務所の記録（別添1「高松空港における空港消防機関等の対応状況」）のとおりである。

2.1.1 試験及び研究

2.11.1 航法灯が点灯していた理由及びメインバッテリー電圧値の検証

同機が同社に引き渡された後、B社は Window Heat/Towing control panel内に本来あるべきでないカードがある可能性に気付いた。B社は、2012年9月10日、これを確認して2013年1月11日までに連絡するよう同社に要請していたが、この確認は行われず、本重大インシデント後に、同機にこの上記のカードが装備されていることが確認された。

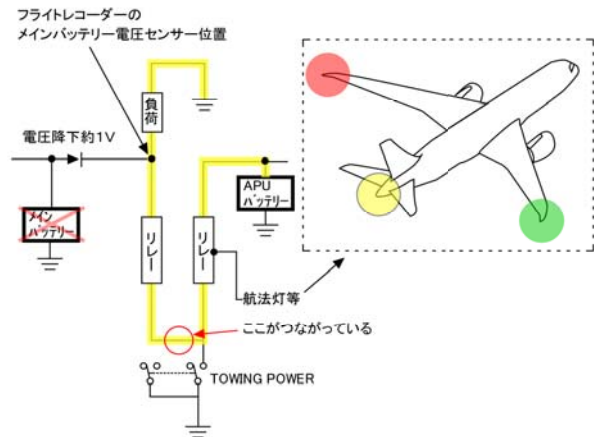


図 2.11.1 航法灯点灯時の回路

このカードが装備されていると、メインバッテリー及びAPUバッテリーの電圧が均衡しているときは電流は流れないが、メインバッテリーを取り外して（若しくはメインバッテリーの電圧が低下して）メインバッテリー側の電圧がAPUバッテリーの電圧を下回った場合、回路がつながっているためAPUバッテリー側からメインバッテリー側に電気が流れ、TOWING POWER SW がオフでも翼端灯及び尾部灯が点灯する。

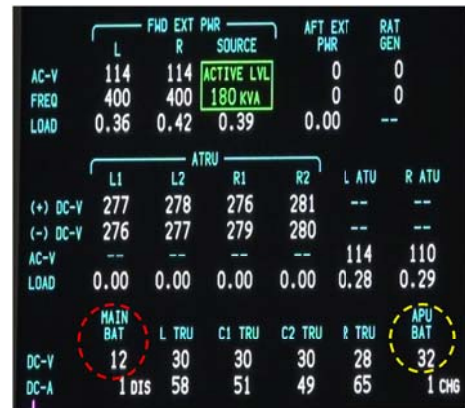


写真 2.11.1 APUバッテリーからの漏れ電圧

上記の現象を確認するため、このカードを同機に取り付けてメインバッテリーの配線を外したところ、翼端灯及び尾部灯が点灯した。操縦室のMFD (Multi Function Display) 画面でメインバッテリー電圧を確認したところ、12V (写真2.11.1 赤破線丸参照) であった。

2.11.2 同型機の同型バッテリーの検証

同型機に搭載されていた同型バッテリーで、整備上の理由により取り卸されたものを使用して、以下の検証を行った。

- (1) 同型機にAPUバッテリーとして搭載されていたが整備上の理由により取り卸された同型バッテリー（製造番号189）を使用してソフトショート試験を行った。このバッテリーを試験に使用したのは、2番セルのOCVが他のセルに比較して低かったため2番セルのソフトショートが疑われていたことによる。なお、2番セルとの比較のため、4番セル及び6番セルについても試験を行った。

- 定電流一定電圧放電によりセル電圧が2.7Vに低下するまで放電した後、自己放電の変化を14日間観察したが、セル電圧の低下は見られなかった。
- (2) 同型機にメインバッテリーとして搭載されていた同型バッテリー（製造番号269）は、2011年11月に製造され、翌年5月に同社に出荷された。その後は定期点検を受けながら保管され、同年10月に同型機に搭載されたが、翌月に「BATTERY FAIL」の表示が出て取り卸された。同社でセルのOCVを検査したところ、3番セルが3.73V、他のセルが3.98Vであった。

このバッテリーは、G社に返却されてから保管されていたが、保管後1年間に経過しており、OCVが0Vに低下していたためソフトショート試験は行うことができなかった。

正常なセルのOCVが1年間で0Vになることはないことから、内部に何らかの不具合がある可能性を考慮して、他のセルに比べOCVが低下していた3番セルの分解を行った。その結果、セパレーター上に黒い斑点状のショート痕が確認され、ソフトショートがあった可能性が高いと結論付けられた。



写真 2.11.2 分解したセルの負極(上段)及び正極(下段)

比較のため、他のセルの分解も行った結果、ショート痕は見付からなかった。

なお、分解されたセルの負極板に、正極板には見られないしわが認められた。
(写真2.11.2 参照)

2.11.3 セルバランシング試験

セルバランシング機能の動作を確認するため、同機に搭載されていたメインバッテリー用BCUと1番、3番、5番及び7番セルの電圧のみを低下させた同型のバッテリーを接続し、バランシング機能の試験を実施した。その結果、図2.11.3-1に示すように各セル電圧は、4.00～4.07Vの範囲内に収束することを確認した。

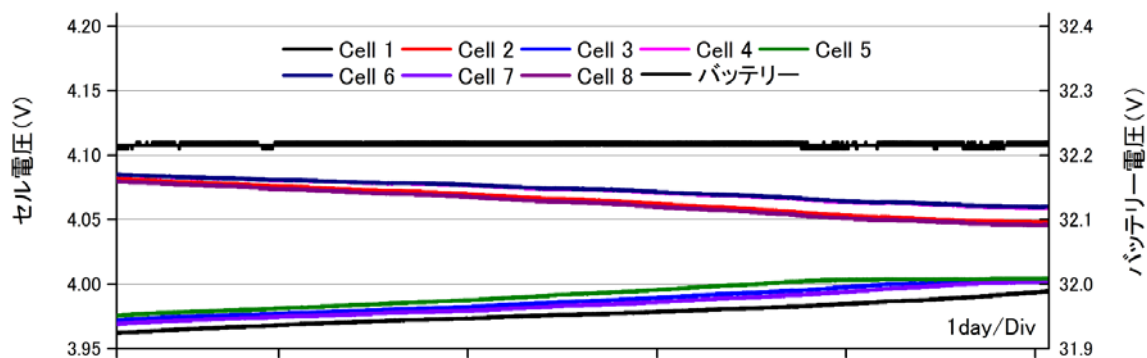


図 2.11.3-1 セルバランシング試験

なお、メインバッテリー用BCUを接続した試験、APUバッテリー用BCUを接続した試験の両方で、定電流（CC）充電から定電圧（CV）充電に移行し充電を継続する際の弱充電電流時において図2.11.3-2に示すような短い周期で充放電を繰り返す現象が確認された。

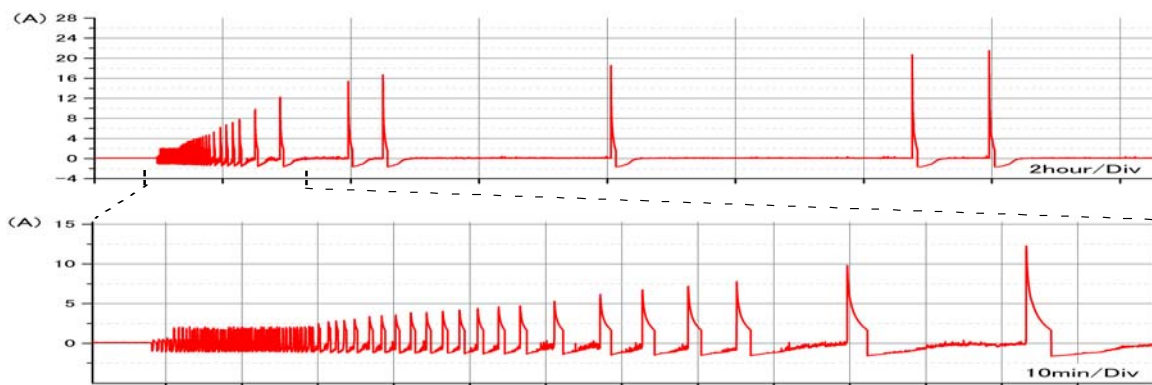


図 2.11.3-2 短い周期の充放電

この現象に対するT社の見解は、「設計の意図していない動作であるが、セルの発熱現象には関係がなく、セル寿命を縮めるだけのものである」とのことであった。同様に、この現象に対するB社見解も、「セルの発熱現象には関係がなく、セル寿命を縮めるだけのものである」とのことであった。G社の見解は、「セルの発熱現象には関係がなく、セル寿命を縮めるだけのものと思われるが、実際に試験をしてみないとその影響についてはよくわからない」とのことであった。

インバランス検知機能の動作を確認するため、2番セルに抵抗を接続し、徐々に放電させて、セル電圧インバランス検知機能の試験を実施した。その結果、図2.11.3-3に示すように2番セルの電圧が3.89Vを下回ってから、充電禁止信号がONになることを確認した。

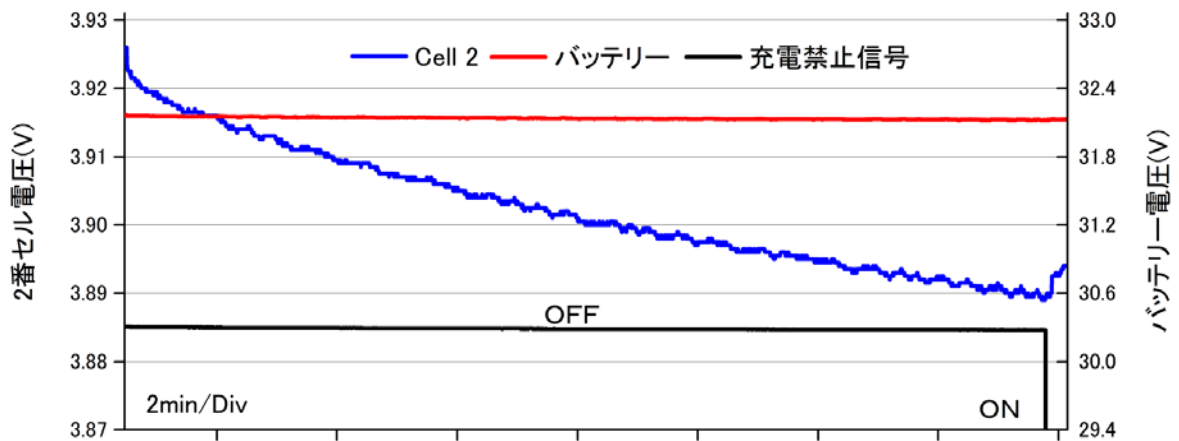


図 2.11.3-3 セル電圧インバランス検知

2.11.4 同機を使用した実機検証

メインバッテリーに接続されている装置が機上で正常に機能するかを確認するため、複数の測定点で電圧又は電流を測定する実機検証を平成25年4月に高松空港で同機を使用して実施した。図2.11.4-1の青点は電流測定点を、赤点は電圧測定点を示している。バッテリーの電圧は、バッテリーの正極（BCUとコンタクター間の計測結果であるJ1ケーブルのBattery Voltageを分岐）で、バッテリーの電流は、バッテリーの負極（バッテリー内にあるHECSの計測結果であるJ1ケーブルのBattery Current Signalを分岐）で測定した。その結果は、次のとおりであった。

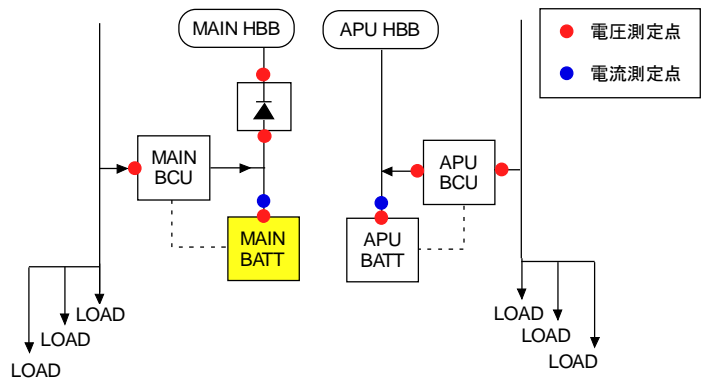


図 2.11.4-1 実機検証測定点

- (1) 充電末期において、充電電流が+3A～-2A（プラスの値は充電、マイナスの値は放電を意味する。）で振動する現象が確認された。これは、B社が行ったバッテリー-BCU接続試験（2.11.6.1に後述）で認められたものと同様のものであった。
- (2) 充電時において、充電電流が6.8A～2.3Aで振動する現象が確認された。また、メインバッテリーの電圧に瞬間的な電圧上昇（約4.5V）が確認された。この瞬間的な電圧上昇は、充電電流が規定された低電流値を下回ってから約1秒後に発生し、同じ時期に電流が約2.5ms間遮断された。（図2.11.4-2 参照）

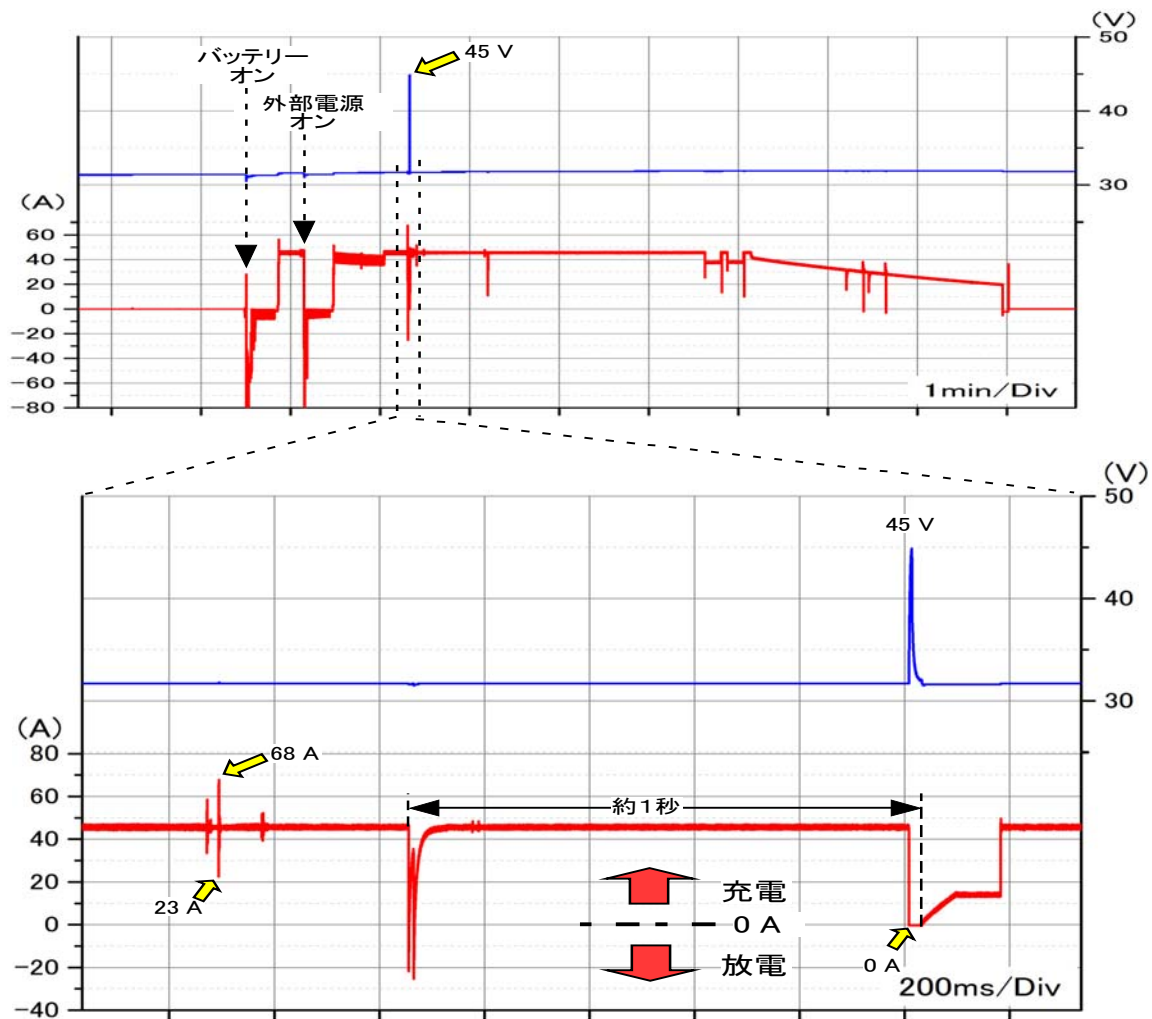


図 2.11.4-2 瞬間的な電圧上昇

- (3) 放電 (約 -60 A) 時において、メインバッテリーの電圧に瞬間的な電圧降下 (0 V) が確認された。この瞬間的な電圧降下は、充電電流が規定された低電流値を下回ってから約 1 秒後に発生しており、同じ時期に電流が約 23ms 間遮断された。(図 2.11.4-3 参照)

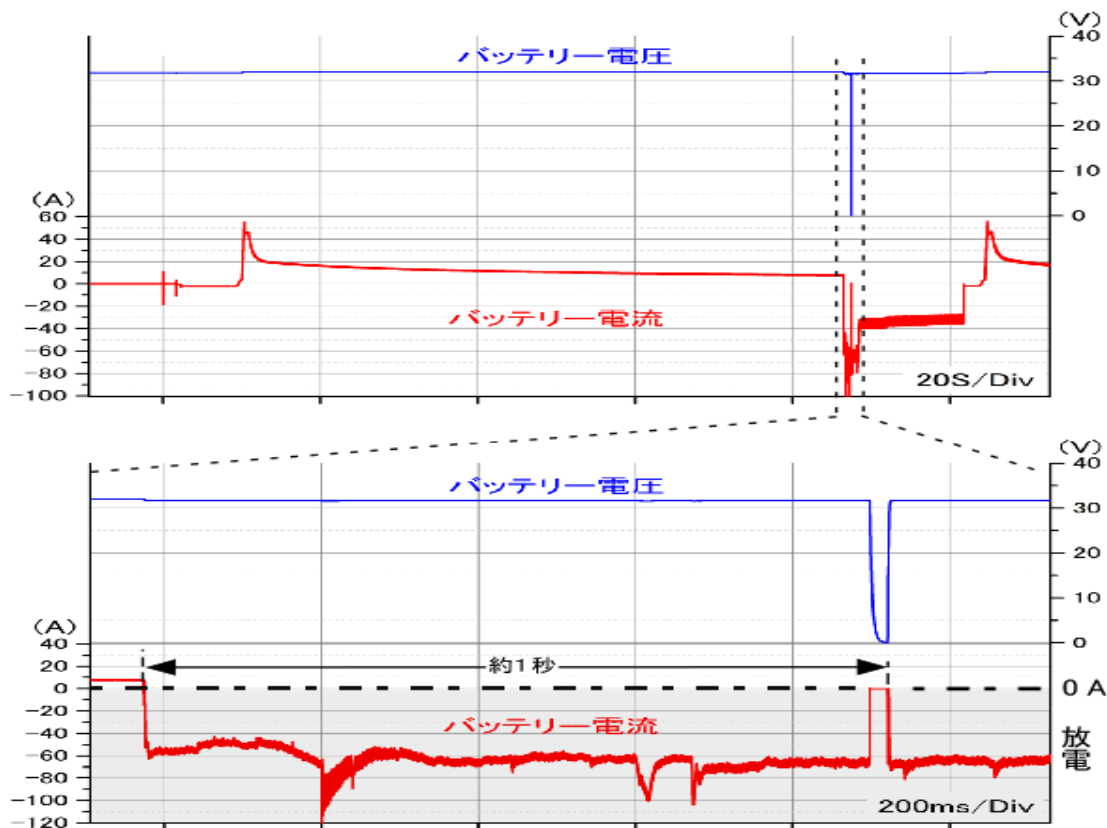


図 2.11.4-3 瞬間的な電圧降下

以上のように、瞬間的な電圧変動や充電電流の振動が確認されたが、バッテリーの発熱等は見られなかった。

2.11.5 バッテリー熱伝播再現試験（角田試験）

セルが内部短絡した際にバッテリー全体に熱伝播するかどうかを確認するため、

平成25年11月、JAXA^{かくだ}角田宇宙センターで試験を行った（以下「角田試験」という。）。試験は表2.11.5の3つの形態で実施し、各種データをデータロガーにて記録（10Hz）するとともに、ビデオ映像も記録した。記録したデータは、温度（別添2 「角田宇宙センターでの熱伝播試験」の「付図2-2 温度センサーの配置」参照）、各セル電圧、バッテリー電圧IN（1番セル負極-8番セル正極間）、バッテリー電圧OUT（J3コネクター）、アース線電流値及びJ1信号である。

| 形態 | バッテリー温度 | BCU | バッテリーボックス |
|----|---------|-----|-----------|
| 1 | 70°C | 接続 | 接地 |
| 2 | 30°C | 接続 | 接地 |
| 3 | 30°C | 非接続 | 非接地 |

表 2.11.5 試験形態(角田試験)

短絡方法は、B社の解析（2.11.6.7に後述）によりベント起点セルと考えられた6番セルに釘を刺すことにより行った。使用した釘の内部には熱電対が入っており、これにより内部短絡部の温度変化も記録した。

図2.11.5が本再現試験の形態1及び形態2の配線で、機体搭載時の状況を模擬し、バッテリーのJ3コネクタ（電源供給）をBCU及び負荷に、バッテリーのJ1コネクタ（制御信号）をBCU及び機体側回路であるBPCUを模擬した疑似BPCUに、バッテリーケースのアース用スタッドをアース線に接続した。ただし、アース線の材料及び長さについては、実機に装備されているものとは異なるものを使用した。

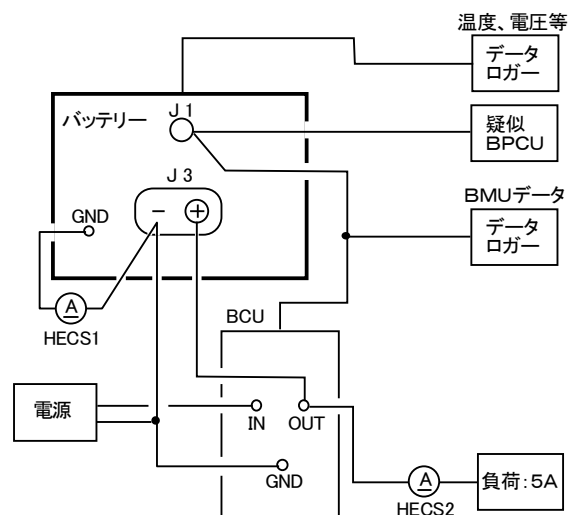


図 2.11.5 試験設定(角田試験)

(1) 形態1

形態1では、6番セルに釘を刺して短絡させた約15秒後にベントするとともに火炎が発生した。その5分後に5番セルがベントした。以降、火炎のためデータの記録に使用していた信号線が熱損傷を受けて、データの記録が取れなくなった。このため6番セルのベント以降8分間で4つのセルがベントしたところで試験を中断した。6番セルに釘を刺した直後、バッテリー外部で測定していたバッテリー電圧OUTが数回0Vとなったが、バッテリー内部で測定していたバッテリー電圧INは変化していないことから、コンタクターの動作によるものと結論付けられた。

バッテリーを分解した結果、5番、7番及び8番セルの3つのセルに熱伝播によるベントが発生しており、熱暴走^{*8}が確認された。アース線には200～600Aの電流が流れたことが記録されており、ブレースバーが6番セルのS1に2点で溶着されていた。火炎の発生は、ビデオ映像を確認した結果、釘とバッテリー間にスパークが飛んだことによるものであった。

(2) 形態2

形態2では、釘刺し以降約46分間で全てのセルに熱伝播によるベントが発生し、熱暴走が確認された。アース線は、最大1,630Aの電流が流れて溶断した。また、ブレースバーの一部が6番セルのS1に溶着され、ブレースバー近傍のセルケースが溶けていた。(写真2.11.5 参照)

*8 本報告書における「熱暴走」とは、「バッテリーにおいて、温度及び圧力が自立的に高まり制御できないこと」を意味する。なお、787のLIB特別要件の前文において、「温度及び圧力の自立的な高まり（熱暴走）(self-sustaining increases in temperature and pressure (thermal runaway))」と記載されている。

6番セルに釘を刺した直後、バッテリー外部で測定していたバッテリー電圧OUTが数回0Vとなったが、バッテリー内部で測定していたバッテリー電圧INは変化していないことから、コンタクターの動作によるものと結論付けられた。

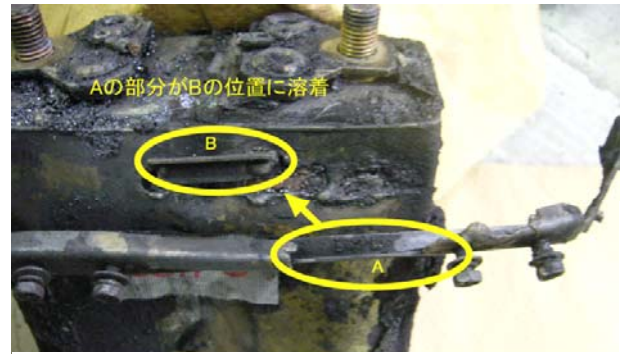


写真 2.11.5 6番セル及びブレースバー
(角田試験)

試験後にコンタクターを分解した結果、コンタクターの接点には、アーク放電の痕跡が残っていた。

セルがベントした順序は、各セル電圧の記録から6番、7番、5番、8番セルの順であった。しかし、8番セル以降のベントの順序については、データの記録に使用していた信号線が火炎による熱損傷を受けたため、信頼できる記録が取得できず、確認できなかった。

火炎の発生時期は、ビデオ映像の確認の結果、7番セルがベントするタイミングと一致しており、アース線に1,630Aの最大電流が流れた3秒後に1,010Aの電流が流れた時期と一致していた。

釘を刺して発生したセル内部短絡直後の6番セルの挙動は、次のとおりであった。

釘が刺さった直後にベントが発生して白煙が確認され、釘に内蔵された熱電対の温度が400℃以上まで急上昇した。約34秒後、アース線に約940Aの電流が流れ、その時点から釘に内蔵された熱電対及び6番セルS1に取り付けられた熱電対の温度の上昇率が上がった。その後も温度は上昇を続け、釘に内蔵された温度センサーによると、約45秒後に最大約950℃まで上昇した。(別添2「角田宇宙センターでの熱伝播試験」の「付図2-6 セル等温度変化(形態2)」参照)

釘を刺した直後の6番セルの電圧は、一旦約1V低下したあと約4Vまで回復し、その後0Vまで低下した。セル電圧が4Vから0Vに低下するタイミングでベント直後よりも濃い白煙が確認された。同様の電圧低下の現象が、7番セル及び5番セルがベントする時にも確認された。

(3) 形態3

形態3では、6番セルがベントし、約66分後に6番セルの一時的な温度上昇が見られたが、熱伝播には至らなかった。6番セルに釘を刺した直後、バッテリー外部で測定していたバッテリー電圧OUTが数回0Vとなったが、バッテリー内部で測定していたバッテリー電圧INは変化していないこ

とから、コンタクターの動作によるものと結論付けられた。

6番セル、ブレースバー及びその他のセルやバッテリーボックスには、アーク放電の発生を示す痕跡は確認されなかった。

(別添2 「角田宇宙センターでの熱伝播試験」の「付図2-3 試験結果」参照)

2.11.6 本重大インシデント後にB社が行った試験及び解析

2.11.6.1 バッテリー-BCU接続試験

各種の負荷が掛かっている場合におけるバッテリーの充放電時の特性を明らかにするため、2013年2月、米国ワシントン州シアトルにあるB社のHazardous Test Facility (HTF) で、同機に搭載されていたメインバッテリー用BCU及びAPUバッテリー用BCU並びにボストン事案(2.13.2(1)に後述)の同型機に搭載されていたAPUバッテリー用BCU及びB社保有のBCUを用いて、同型バッテリーとの接続試験を実施した。

本試験では、標準的な離陸及びAPU始動、バッテリーのみでのAPU始動、BCUの入力電圧の瞬断を模擬し、各セルの電圧、温度並びにバッテリーの電圧、電流、温度を測定した。

その結果、BCUの入力電圧の瞬断を模擬した試験(負荷0A、瞬断時間200ms)において、メインバッテリー用BCU及びAPUバッテリー用BCUで、充電電流が小振幅で振動することが確認された。(図2.11.6.1-1 参照)

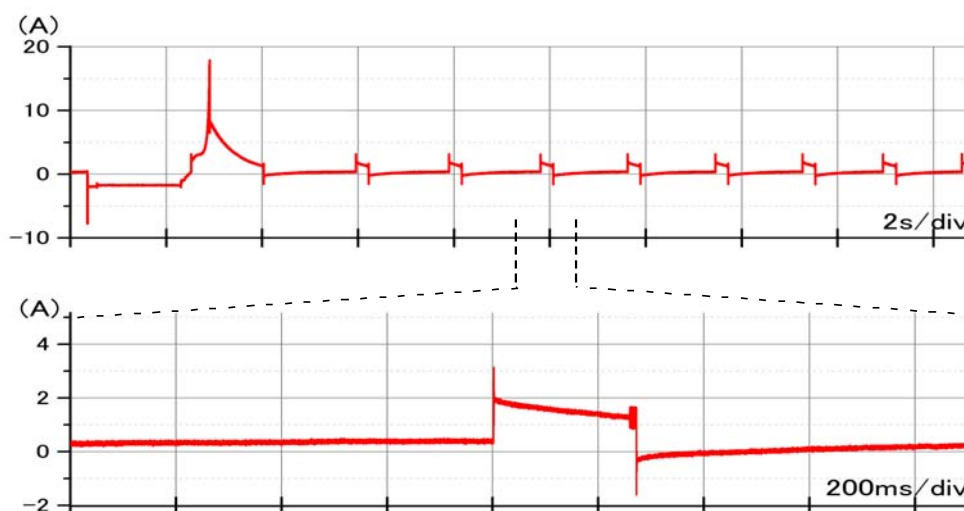


図 2.11.6.1-1 充電電流の振動

また、ボストン事案のAPUバッテリー用BCUを用いたエンジン運転時における標準的なAPU始動を模擬した試験では、2.6.5.3(6)に記述したコンタクター動作確認の実施条件を満たしてから約1秒後に、電流が約22ms間遮断され、その直

後、各セルの電圧に過渡現象による高電圧の印加が見られた。(図2.11.6.1-2 参照)

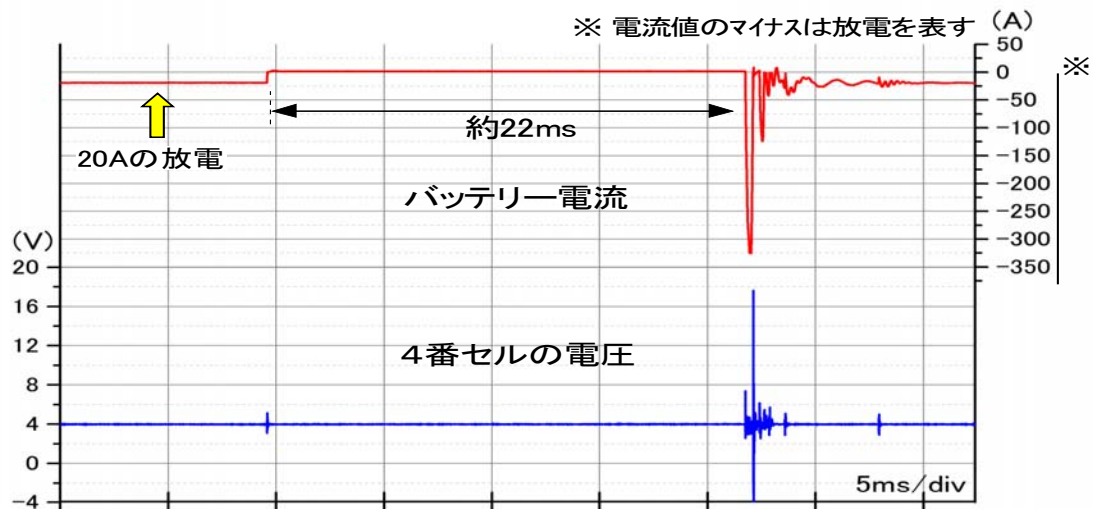


図 2.11.6.1-2 過渡現象による高電圧

この現象について、B社は「本試験では、バッテリーの自己診断によりコンタクターが開いて、過渡現象が発生した。しかし、本試験はエンジン運転時における標準的なAPU始動を模擬したもので、実機におけるバッテリーの自己診断は、APU始動前の機体電源投入時に行われるので、実機環境では発生しない」との見解を示した。

2.11.6.2 セルケース浸水試験

本試験は、バッテリーボックスに水分が侵入した時にセルケースが水分を介して接地短絡し内部短絡が発生するかを確認するため、接地したアルミニウム製ケースに食塩水を入れ、その中にセルを浸ける試験である。この試験は、8番セルを模擬して、セルの負極に28Vの電圧を印加して行った。本試験の結果、セルケースが食塩水を介して接地短絡され、最終的にベントに至った。

試験後、セルを分解すると、短絡痕、アーク痕、熱損傷及び導電性の堆積物が負極周辺で確認された。

2.11.6.3 セルケース接地短絡試験

本試験は、2.11.6.2のセルケース浸水試験の結果を受け、セルケースが直接バッテリーボックスと接地短絡した時に内部短絡が発生するかを確認するため、6番セル

を模擬して負極に 20 V の電圧を印加したセルのセルケースを接地して短絡させた試験である。この試験の結果、セルケースを接地させてから 40 時間後にベントが発生した。ベント時のセル電圧のデータによれば、電圧は 4.2 V から約 0.5 V 低下するもののすぐに約 4 V まで復帰し、その後 0 V に低下した。

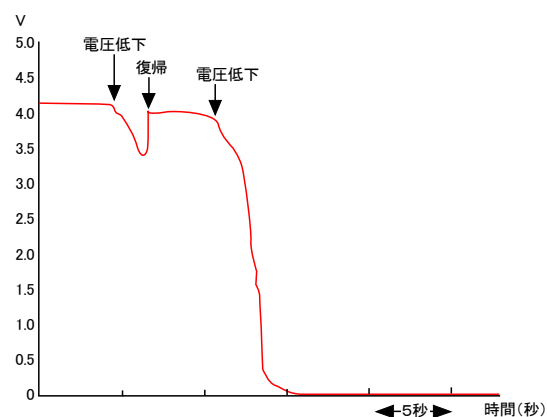


図 2.11.6.3 セルベント時の電圧変化

試験後の解析により、電圧復帰の理由について、最初に内部短絡が発生したエレメントの正極集電体が内部短絡による熱により溶断したものとされ、最終的な 0 V への低下は他のエレメントの内部短絡によるものとされている。

2.11.6.4 バッテリーベント（セルケース短絡）試験

B社は、発熱現象に関係があると思われる事象の確認のため、同型バッテリーを用いてセルケース短絡試験を行った。この試験は、7番セルのセルケースを、アース線によりバッテリーボックスと短絡させて行われた。

本試験の結果、7番セルのセルケースをバッテリーボックスに短絡させたアース線が溶断した。バッテリーの蓋とセル上方の間に入れられた絶縁用プラスチックシートの7番セル負極近辺が熱により溶解した。7番セルを分解した結果、負極集電体とセルケースにアーク放電の痕跡が確認された。

2.11.6.5 バッテリーベント（ヒーター）試験

バッテリーが熱伝播した時の挙動及びバッテリーシステム改修後のエンクロージャーボックス（5.1.1(3)①に後述）の効果を評価するため、同型バッテリー（改修前）を使用した試験が2回行われた。この試験は、バッテリーの7番セルをヒーターにより加熱して強制的にベントを起こさせる方法で行われた。

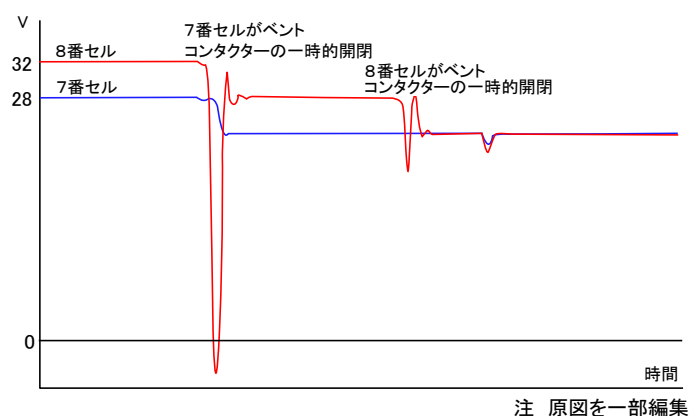


図 2.11.6.5 バッテリー電圧の変化(試験1回目)

1回目の試験では、7番セルがベントしたあとコンタクターが一時的に開閉する現象が発生した。7番セルの影響を受けた8番セルがベントしたとき

にも本重大インシデントと同様のコンタクターの一時的な開閉現象が発生した。また、この試験では8番セルがバッテリーボックスと接触した際に接地されているJ3ケーブルのマイナス線に1,000Aを超える電流が流れ、この際、バッテリー電圧は約5Vに低下した。この時、4秒間で24Vから約5Vまで低下した。

2回目の試験でも、7番セルがベントしたあとコンタクターが一時的に開閉する現象が発生した。

2.11.6.6 アース線への大電流負荷試験

本試験は、アース線に大電流が流れた時のアース線の挙動を確認するため、バッテリーの正極と負極の間にアース線をつなぎ、一挙にバッテリーを短絡させた試験である。本試験の結果、アース線には約6,000Aが流れ、約0.1秒で芯線が溶断した。溶断したアース線は被覆が焦げたりせず、芯線が高熱で溶けて被覆内から飛び出していた。

B社は、「損傷の程度から、本重大インシデントでアース線に流れた電流値は6,000A以下であろう」との見解を示している。

2.11.6.7 本重大インシデントでの熱伝播シナリオ

B社は、本重大インシデントにおいて、フライトレコーダーに記録されていたメインバッテリーの電圧変化について、図2.11.6.7に示すA～Hのイベントに区別し、本重大インシデントでの熱伝播シナリオについて、これらのイベントごとに以下のように説明している。

① イベントA

セルの変形の状況から、最初にベントしたセルは3番か6番セルである。3番セルの負極集電体～セルケース(S1とS4の角)～ブレースバーに対応する場所にアーク

放電の痕跡がある。アーク放電が発生するためには、事前に3番セルとブレースバーの間にあるプラスチックの固定フレームが溶けている必要がある。したがって、このアーク放電が発生する前にいずれかのセルがベント

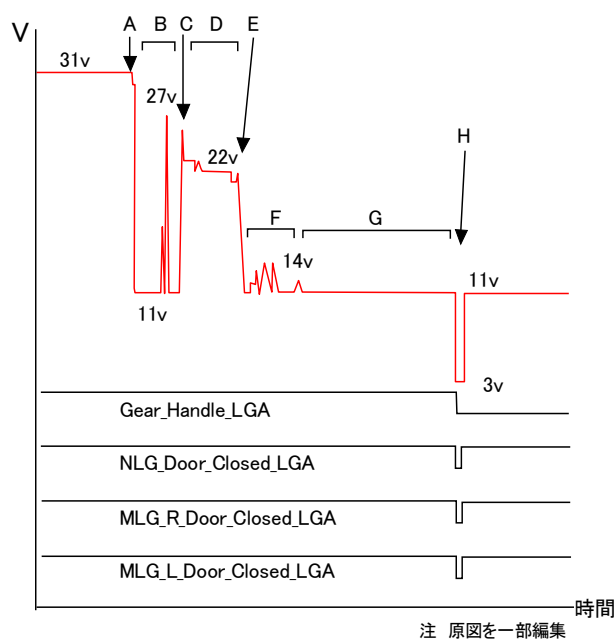


図 2.11.6.7 本重大インシデントでの
メインバッテリー電圧変化

していなければならない、それは6番セルである。

6番セルがベントし、フライトレコーダーのメインバッテリー電圧（実際のメインバッテリー出力電圧はフライトレコーダーの記録値より約1V高い。この差はメインバッテリーとフライトレコーダーの電圧センサーの間にあるBDMによる電圧降下で生じる。）は、31Vから一旦29Vに下がり、11Vに低下していた。11Vを示した理由は後述する⑦イベントGのとおりであり、実際の電圧は11V以下で、このとき高い確率でコンタクターが開いていると考えられるため、おそらく0Vと思われる。

バッテリーの1つのセルがベントした際、コンタクターが一時的に開く現象は2.11.6.5の試験で確認されている。

② イベントB

電圧が短時間で20V、次いで27Vに上がった。これは、コンタクターが閉じたためである。その後、アース線が溶断した。これは、内部短絡により膨らんだ6番セルがブレースバーと接触し、バッテリーケースとの短絡回路ができ、大電流が流れたためである。アース線が溶断した後、バッテリーケースとバッテリートレイへの取付けボルトが高抵抗であるため、電流が大きく低下した。

③ イベントC

コンタクターが閉じて電圧が26Vに上昇し、その後23Vに低下した。3番セルがベントしたことによる可能性が高い。

④ イベントD

電圧が変動しているのは、吹き出した電解液の影響、セルの膨張及びスペーサー等の溶解により、セル同士が直接又はセルとバッテリーケースを介して短絡したためである。この時点で、6番セルとバッテリーケースが短絡し、6番と3番セルのケースも互いに短絡していた。これらの短絡により3番～4番～5番～6番セルの閉回路ができ、4番及び5番セルのエネルギーが消費された。3番セルの正極端子が高電流及びアーク放電により溶解した。

⑤ イベントE

3番、4番セルをつなぐバスバーが切断されたため、メインバッテリー電圧は11Vに低下した。

⑥ イベントF

3番、4番、5番、6番セル以外のセルで内部短絡が継続した。バッテリーの内部抵抗が変動しているため電圧も変動した。一部の変動はコンタクターの開閉による可能性もある。

⑦ イベントG

11Vの電圧は、旧配線であるカードが残っていたため、APUバッテリーから回り込んだ電圧である。正確なメインバッテリー電圧は、11V以下であるが、実電圧はこの旧配線による回り込み電圧でマスクされているため不明である。

⑧ イベントH

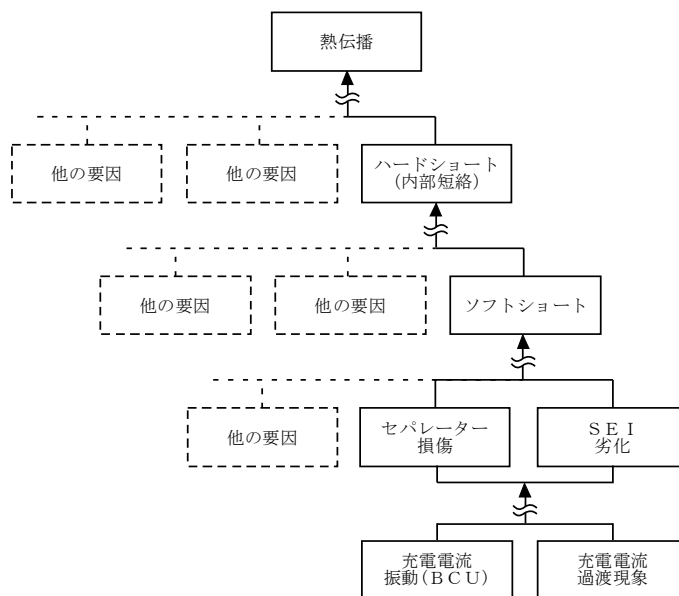
3Vに電圧が低下している時期と、着陸のためギアドアが開いた時期が一致している。脚収納室 (Wheel well) にはGear Door Unsafe Lightがあり、ドアが開いたためこれが点灯し電圧が下がった。

2.11.6.8 事象発生後にB社が作成した因果関係図 (Cause Effect Diagram)

B社は、ボストン事案及び本重大インシデントの発生を受けて、対策チームを立ち上げた。対策チームでは、原因究明と改善策の探求が行われた。これらの活動はRCCA (Root Cause and Corrective Action) と呼ばれ、その一環として、ボストン事案及び本重大インシデントが発生する可能性がある不具合を因果関係図にまとめた。

その因果関係図では、「過充電」及び「過放電」の他に「外部短絡」と「内部短絡」についても示されている。「内部短絡」については、「BCUの充電電流の振動」及び／又は「充電電流の過渡現象」から「SEIの劣化」及び／又は「セパレーター損傷」が起こり、図2.11.6.8のように他の要因も加わりながら、「ソフトショート」から「ハードショート (内部短絡)」へと至り、最終的に「熱伝播」が発生する可能性があるとして示されている。

なお、この因果関係図には、低温環境における影響が示されていない。



(B社の資料を基に作成)

図 2.11.6.8 因果関係図の一部

2.11.6.9 B社の外部委託調査報告書

2013年にB社で実施された試験に加え、米国国家運輸安全委員会 (以下「NTSB」という。) と調整の後、ボストン事案及び本重大インシデントの原因を究明するた

め、B社は外部民間機関と追加の試験に関する契約を結び、試験結果がB社に提示された。以下は、新品セルの調査及び航空機から取り卸したセルの分解調査の報告書の抜粋である（ただし、項目名は当委員会が追加したものである。）。

(1) セルケースとバッテリーボックスとの短絡について

セルケースとバッテリーボックスの短絡が発生すると、ベントが発生し、セルケースの負極近くの特定の場所（写真2.11.6.9-1の赤点線参照）に負極集電体とセルケースの短絡回路が形成されて発生する特徴的な損傷ができる。



写真 2.11.6.9-1 特徴的な損傷

(2) セル内部への金属片の混入について

セルの詳細調査で、製造時に混入した可能性がある銅金属粒がセパレーター上に確認された。

この銅金属粒は、直ちにセルの内部短絡等を引き起こすような影響を与えるものではないが、使用時間が増加すればセパレーターを貫通する可能性があるとしてされている。

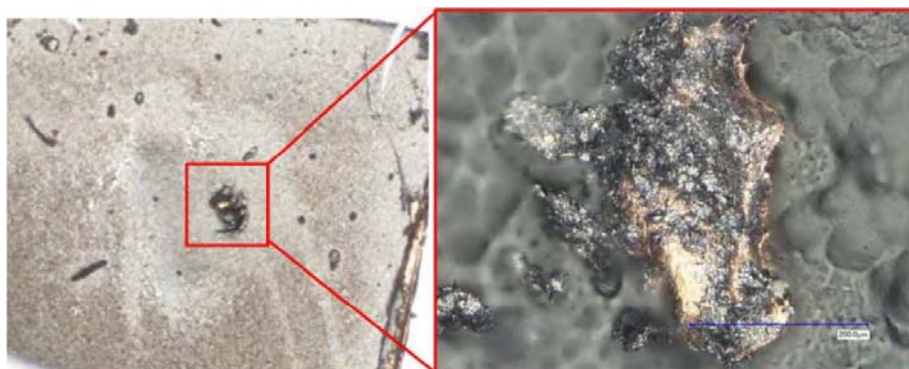


写真 2.11.6.9-2 セパレーター上で発見された銅金属粒

(3) 炭素微粒子及びコバルト酸リチウム粒子について

セルの正極に、電子導電性を高めるために導電助剤として加えられているカーボンブラックの塊が確認された。この塊の存在は、電極の導電率が均一になっていない可能性を示している。

さらに、正極活物質にセパレーターの厚さの約2倍で正極活物質の厚さとほぼ同じ大きさのコバルト酸リチウムの粒子が確認された。

(4) 銅の溶出について

銅を豊富に含む蓄積物がセパレーターの孔内で確認され、セルの負極とセパレーターの間では炭素粒子を覆っていた。銅の溶出はセルが使用中に過放

電された場合又は製造工程で長時間電解液中に放置されていた場合に発生する。

(5) エレメントの間隙について

セルケースが膨らんでいたセルを、CTスキャン、光学顕微鏡及び電子顕微鏡を使用して調査したところ、写真2.11.6.9-3に示すようにエレメントの一部に間隙が認められた。この間隙は、製造時のエレメントの不均一性に起因する可能性がある。

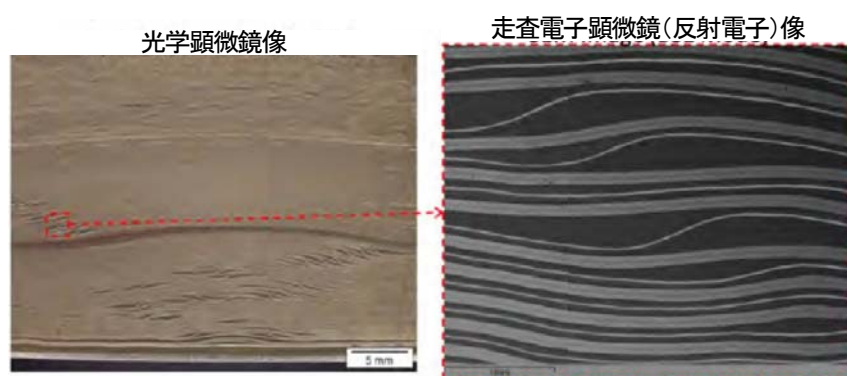


写真 2.11.6.9-3 エレメントの間隙

2.11.7 ポストン事案の調査においてNTSBが行った試験

NTSBがボストン事案の調査の一環として行った試験の結果、以下のことが判明した。

2.11.7.1 APUスタート模擬試験

NTSBは、外部の研究機関において、使用経歴を有する同型バッテリーを用いたAPUスタート模擬試験を行った。

この試験は、B社の仕様で最も過酷となるAPUスタートを3回連続で行うことを1セットとし、試験開始時の温度環境をそろえるため、1セットが終了した後、セルの温度が周辺温度と同じになってから次のセットを開始することとし、計14セット実施した。本試験でのAPUスタート模擬を行った時に流れた電流は、約600A程度であった。

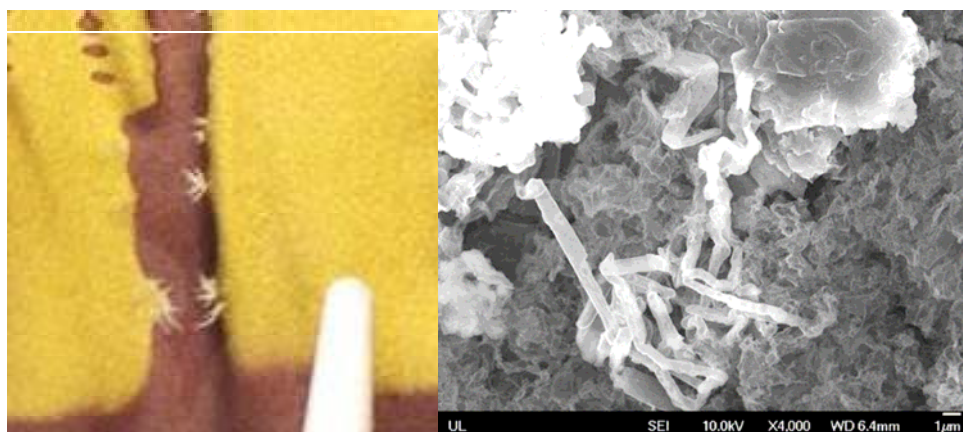
本試験において、複数回のセットを実施すると5番セルの正極端子部が周辺温度に比べ高温となっていることがサーモグラフィーにより観測された。この時の5番セルの正極側リベットの温度を熱電対で測定した結果、その温度は100℃を超える温度であった。さらに、リベット部の抵抗値測定の結果、当該5番セルの抵抗値が通常のセルの抵抗値を大幅に超える値であることが判明した。

試験を実施した研究機関の見解は、発生した熱がセパレーターまで伝わり内部短絡を起こす可能性があるとしている。また、リベット-端子板間抵抗値が通常の値をはるかに超える値を示したことについては、CTスキャンやリベット部を切断し

た断面の調査の結果、リベットと集電体等との間に接触不良となる箇所があったことによるものとされている。これらの不良は、製造時又は使用中に発生するとされており、結合力を必要とする部材（リベット）にアルミニウムを用いたことが原因であると指摘している。

2.11.7.2 セルの分解試験

満充電（SOC 100%）の状態セルを分解し負極表面を確認したところ、しわや色むらが確認された。また、しわの付近に析出していた物質に樹枝状構造物があることが観察され、当該物質を成分分析したが、成分を確定することはできなかった。試験を行った研究機関は、文献にあるリチウム・デンドライトの形状との比較から、樹枝状構造物は充放電の繰り返しにおける電氣的現象によって負極に析出したリチウム金属であることが疑われるとしている。



(白い円錐物は固定用器具である)

写真 2.11.7.2 析出した樹枝状構造物

2.11.8 本重大インシデント後にG社が行った試験

2.11.8.1 リチウム金属の析出検証試験

G社は、リチウム金属の析出を検証するため、低温でSOC 100%を超える充電を繰り返し行う試験を独自に行ったが、リチウム金属の析出を示す結果は得られなかったとしている。

2.12 型式証明

2.12.1 米国における型式証明

米国連邦航空局（以下「FAA」という。）は、米国で設計・製造される機体等に対し、設計、材料、構造、作業品質及び性能に対して、安全のために要求される最低技術基準（以下「耐空性基準」という。）を規定する責任がある。この耐空性基準は、米国連邦航空規則（以下「CFR」という。）に定められている。

787のような耐空類別「輸送T」の大型機に適用される耐空性基準は、14CFR

Part 25である。

航空機的设计・製造者は、型式証明（以下「TC」という。）を取得するため、「機体又は製品が、適用される全ての規則に適合していること」を明確に示す必要がある。FAAによるTC審査に合格すると、TCが発行される。

適用される耐空性基準及び適合性を示す方法は、FAAが承認した証明計画に記述される。

2.12.2 787のTC

B社は、2003年3月28日に、新たな航空機として787のTCをFAAに申請した。TCデータシート（基準適合の状況や限界事項の情報を盛り込んだ書類）によると、787に適用された耐空性基準（適用基準）は、14 CFR Part 25の改訂25-119まで、改訂25-120、25-124、25-125及び25-128であり、適用除外、同等安全性及び特別要件（LIB搭載のための特別要件25-359-SCを含む。）が含まれている。787のTCにおける適合性を示す方法は、FAAが承認した証明計画「787 electrical power system (EPS) certification plan」に記述されている。

787は2011年8月26日に耐空類別「輸送T」のTCを取得した。

2.12.3 TCにおけるFAAの権限の委任

FAAは、従来からTCにおける認証行為の権限の一部をFAAが承認した組織の代行者に委任してきた。2005年には、より包括的で広範囲の委任が行えるようにするため、Organization Designation Authorization (ODA) という組織認証委任制度を創設した。B社は2009年8月18日にODAの認定を取得した。

この制度により、FAAはFAAの権限の一部を組織に委任することができるようになり、ODAを取得した組織の管理を行う。ODAを取得した組織は、FAAに代わり認証を行う。

2.12.4 特別要件

概念設計段階での適用基準の選定で新技术又は特異な設計に対して既存の耐空性基準を用いた審査では不十分又は不適切であるとFAAが考える場合、安全性を確保するための特別な基準（特別要件）が設定される。特別要件は、既存の耐空性基準と同等の安全レベルを保つための追加の耐空性基準を含んでいる。(14 CFR 21.16)

特別要件は、適合性見解書（IP）の作成から検討が始まり、その過程が適合性見解書で管理される。

当該LIBの搭載は、既存のバッテリーの基準による審査では不十分である新技术を用いた設計であると判断され、FAAは、IP（SE-9）「LIB搭載に対

する特別要件」を作成した。

(1) 適合性見解書

F A Aによる787の設計審査時、民間航空におけるL I Bの使用は限定的な経験しかなかったため、F A Aは、携帯電話や電気自動車などの他業種の経験から、過充電、過放電及びセル材料の燃焼性を含む以下のL I Bの安全上の問題点を指摘した。

① 過充電

一般に、L I Bは、ニッカドバッテリーや鉛バッテリーと比較すると、温度と圧力の自立的高まり(熱暴走)を発生し得る内部故障に陥りやすい。この現象は、自発的な火災や爆発に至り得る非常に不安定なリチウム金属の電析が形成されるセルコンポーネントの発熱及び不安定化を引き起こす過充電時に特に見られる。

ある種のL I Bは、セルに使用される有機溶剤の電解液の不安定性及び燃焼性による安全上の問題を引き起こす可能性を有する。また、過充電からの熱暴走の影響度は、バッテリー容量が増えるに従い増加する。すなわち、大きいバッテリーでは電解液の量が増えるため、バッテリー容量の増加とともに熱暴走の激しさが増す。

② 過放電

特定の電圧(通常2.4V)を下回るL I Bの過放電は、電極が腐食する原因となる可能性があり、結果的に、再充電では回復不可能なバッテリー容量の減少となる。

容量の減少は、航空機乗組員が簡単に点検できる電圧値で検出することはできない。これは、ニッカドバッテリーと共通する問題である。

③ セル材料の燃焼性

L I Bは、ニッカドバッテリー及び鉛バッテリーと違い、可燃性の電解液を使用している。電解液は、バッテリー容器が破損すると、外部火災が発生したときに燃料供給源となる可能性がある。

(2) 特別要件(25-359-SC)

適合性見解書における検討の結果、F A Aは、過充電、過放電及びセル材料の燃焼性に起因する安全上の問題を軽減するため、787のL I B搭載に対する9つの基準「ボーイング式787-8型機のL I Bの装備に対する特別要件」(25-359-SC)を2007年9月28日に公布し、同特別要件は、同年11月13日、787のTCの適用基準として施行となった。

なお、787のL I Bに対する特別要件は、2006年11月30日に発行され、同日付けで有効となったエアバス製A380型機の非常灯用L I B

(787の同型バッテリーとは構成及び容量が異なる。)に対する特別要件と同じ内容である。

以下が特別要件の内容である。

In lieu of the requirements of 14 CFR 25.1353(c)(1) through (c)(4), the following special conditions apply. Lithium ion batteries on the Boeing Model 787-8 airplane must be designed and installed as follows:

(仮訳)

14 CFR 25.1353(c)(1)～(c)(4)の代わりに、以下の特別要件を適用する。ボーイング式787-8型機におけるLIBは、下記の要件に従って設計され、航空機に搭載されなければならない。

- ① *Safe cell temperatures and pressures must be maintained during any foreseeable charging or discharging condition and during any failure of the charging or battery monitoring system not shown to be extremely remote. The lithium ion battery installation must preclude explosion in the event of those failures.*

(仮訳)

予測可能な充電又は放電状態の間、並びに発生確率が極微(extremely remote)と証明されない充電又はバッテリー監視システムの故障の間、安全なセル温度及び圧力が維持されなければならない。LIB装置は、それらの故障が発生した場合に爆発を防止するものでなければならない。

- ② *Design of the lithium ion batteries must preclude the occurrence of self-sustaining, uncontrolled increases in temperature or pressure.*

(仮訳)

LIBの設計は、温度又は圧力の自己持続的、制御不能な上昇の発生を防止するものでなければならない。

- ③ *No explosive or toxic gases emitted by any lithium ion battery in normal operation, or as the result of any failure of the battery charging system, monitoring system, or battery installation not shown to be extremely remote, may accumulate in hazardous quantities within the airplane.*

(仮訳)

通常運用時又は発生確率が極微と証明されない充電器、監視システム若しくはバッテリー装置の故障(不具合)によってLIBから発生する爆発性又は有毒性の気体は、機内に有害な量が蓄積されることがあってはならない。

- ④ *Installations of lithium ion batteries must meet the requirements of 14 CFR 25. 863(a) through (d).*

(仮訳)

L I Bの装備は、14 CFR 25. 863(a)～(d)の要求基準に適合しなければならない。

- ⑤ *No corrosive fluids or gases that may escape from any lithium ion battery may damage surrounding structure or any adjacent systems, equipment, or electrical wiring of the airplane in such a way as to cause a major or more severe failure condition, in accordance with 14 CFR 25. 1309(b) and applicable regulatory guidance.*

(仮訳)

14 CFR 25. 1309(b)及び適用される規則指針に従い、L I Bから漏えいする可能性のある腐食性の液体又は気体が、周囲の構造物、隣接するシステム、機器又は機体の電気配線に損傷を与え、重大な (major) 又は更に厳しい故障状態を引き起こしてはならない。

- ⑥ *Each lithium ion battery installation must have provisions to prevent any hazardous effect on structure or essential systems caused by the maximum amount of heat the battery can generate during a short circuit of the battery or of its individual cells.*

(仮訳)

各L I B装置は、バッテリー又は個別のセルが短絡した時に発生し得る最大熱量によって構造又は基幹システムに危険な影響が及ぶことを防止する方策を含むものでなければならない。

- ⑦ *Lithium ion battery installations must have a system to control the charging rate of the battery automatically, so as to prevent battery overheating or overcharging, and,*

(i) *A battery temperature sensing and over-temperature warning system with a means for automatically disconnecting the battery from its charging source in the event of an over-temperature condition, or,*

(ii) *A battery failure sensing and warning system with a means for automatically disconnecting the battery from its charging source in the event of battery failure.*

(仮訳)

L I B装置は、バッテリーの過充電又は過放電を防ぐために、自動的に

バッテリーの充電率を制御できるシステム及び下記の装置を装備していなければならない。

- (i) バッテリー温度が規定値を超過した場合に温度を検知して充電器とバッテリーの接続を自動的に遮断するバッテリー温度検知及び超過温度警報装置、又は、
- (ii) バッテリー故障発生時、充電器とバッテリーの接続を自動的に遮断するバッテリー故障検知及び警報装置

⑧ *Any lithium ion battery installation whose function is required for safe operation of the airplane must incorporate a monitoring and warning feature that will provide an indication to the appropriate flight crewmembers whenever the state-of-charge of the batteries has fallen below levels considered acceptable for dispatch of the airplane.*

(仮訳)

航空機の安全運航のためにその機能が必要であるLIB装置には、バッテリーの充電容量が航空機の出発に許容されるレベル以下に低下したときに直ちに適切な乗員に情報を提供する監視警報機能が組み込まれていなければならない。

⑨ *The Instructions for Continued Airworthiness required by 14 CFR 25.1529 must contain maintenance requirements for measurements of battery capacity at appropriate intervals to ensure that batteries whose function is required for safe operation of the airplane will perform their intended function as long as the battery is installed in the airplane. The Instructions for Continued Airworthiness must also contain procedures for the maintenance of lithium ion batteries in spares storage to prevent the replacement of batteries whose function is required for safe operation of the airplane with batteries that have experienced degraded charge retention ability or other damage due to prolonged storage at a low state of charge.*

(仮訳)

14 CFR 25.1529に規定されている耐空性を継続するための指示には、航空機の安全運航のためにその機能が必要であるLIBが、航空機に搭載されている限りその機能を発揮するようにバッテリー充電容量を適切な間隔で測定するための整備要件が含まれていなければならない。また、当該指示には、低充電状態で長期間保管されたために、充電保持力の低下その他

の損傷を受けたバッテリーに交換されるのを防止するため、予備品庫におけるL I Bの整備手順を含んでいなければならない。

Note: These special conditions are not intended to replace 14 CFR 25.1353(c) in the certification basis of the Boeing 787-8 airplane. These special conditions apply only to lithium ion batteries and their installations. The requirements of 14 CFR 25.1353(c) remain in effect for batteries and battery installations of the Boeing 787-8 airplane that do not use lithium ion batteries.

(仮訳)

注：これらの特別要件は、787の型式証明の適用基準において14 CFR 25.1353(c)に代わることを意図したものではない。これらの特別要件は、L I Bとその装備にのみ適用されるものであり、14 CFR 25.1353(c)は、787におけるL I Bを使用しないバッテリー及びバッテリー装備に対して引き続き有効である。

2.12.5 B社の証明計画

787の電源システムの証明計画は、FAAにより、2005年12月22日に承認された。この証明計画は、バッテリーとバッテリー充電システムを含む電源システム全般の説明に続いて、適用基準に適合していることを示す方法を定義している。FAAは、証明計画の承認後、試験方案を精査、適合性検査要求書の発行及び試験報告書の最終承認を行った。

2.12.6 安全性評価

787の開発時に、TCの一環として機体の各部位及び各システムに対して安全性評価が行われた。

2.12.6.1 システム安全性評価の基準

世界の旅客機に適用されている耐空性基準としては米国の14 CFR Part 25及びEASA (European Aviation Safety Agency) のCS-25 (CS: Certification Specifications) があり、それらのシステム設計の安全性評価の一般基準は、CFR/CS 25のF章「装備」の中の25.1309項(装備、システム、取り付け)に規定されている。この14 CFR 25.1309項の解釈指針であるAdvisory Circulars (AC) 25.1309-1aは改正検討中であるが、その改正原案(AC 25.1309-1b Draft/Arsenal Version)にはCS-25 AMC 25.1309 (AMC: Acceptable Means of Compliance)と同様の内容が記述さ

れており、787のTCにおいてはその改正原案 (Arsenal Version) に従ってシステムの安全性評価が行われた。

| 故障状態の分類 | 安全に影響なし | Minor | Major | Hazardous | Catastrophic |
|---------------|---------|---------------|-------------------|------------------------|----------------------|
| 定性的許容確率 | 要求値なし | Probable | Remote | Extremely Remote | Extremely Improbable |
| 定量的許容確率 (/hr) | 要求値なし | $<10^{-3}$ | $<10^{-5}$ | $<10^{-7}$ | $<10^{-9}$ |
| 機体への影響 | 影響なし | 機能、安全余裕が僅かに低下 | 機能、安全余裕がかなり低下 | 機能、安全余裕が大幅に低下 | 通常、機体喪失 |
| 乗客への影響 | 不便 | 不快 | 苦痛、負傷 | 少数の重症、死亡 | 多数死亡 |
| 乗員への影響 | 影響なし | ワークロードが僅かに増加 | 不快、又はワークロードがかなり増加 | 苦痛、過大なワークロードが業務遂行能力を阻害 | 死亡、機能喪失 |

(CS-25 AMC25. 1309)

表 2.12.6.1-1 大型航空機のシステム設計における故障状態の重大度と許容確率の関係

この改正原案及びCS-25 AMC 25.1309に示されているシステム安全性評価の基本的考え方は、重大な故障状態の発生確率は極めて小さくしなければならないが、重大性が低く軽微なものの発生確率は比較的大きくてもよい（故障状態の許容発生確率は重大度と逆進関係にする。）というものである。万一発生すればその影響は極めて甚大で、航空機が損壊し多数の死者が発生する事態に至るおそれがあり、破局的(Catastrophic)と分類される故障状態の許容発生確率は $10^{-9}/hr$ （10億飛行時間に1回）のオーダー未満の極微(Extremely Improbable)でなければならないとする一方で、航空機の機能、安全性にほとんど影響を与えないような軽微な状態については比較的大きい発生確率が許容されている。

| 定性的確率表現 | 説明 |
|----------------------|--|
| Probable | 1機的全運航期間中に1回又は複数回発生すると予測される |
| Remote | 1機的全運航期間中では発生しそうにないが、その型式の多数機的全運航期間には数回発生し得る |
| Extremely Remote | 1機的全運航期間中では発生するとは予測されないが、その型式の全機的全運航期間には少数回発生し得る |
| Extremely Improbable | 極めて発生しそうもなく、その型式の全機的全運航期間でも発生するとは予測されない |

(CS-25 AMC25. 1309)

表 2.12.6.1-2 故障状態の定性的確率表現の説明

2.12.6.2 同型バッテリーの安全性評価

787の同型バッテリーに対する安全性評価は、電気システムの故障で発生する航空機及び乗員にとっての潜在的ハザードを決定するためにAC 25-1309-

1 a の改正原案及びCS-25 AMC 25.1309が引用するSAE ARP 4761「安全性解析手法のガイダンス」及びSAE ARP 4754「開発保証活動のガイダンス」に従って実施され、Functional Hazard Assessment (FHA)によりセルのベントを伴う危険事象が確認された。

この危険事象に対して、AC25-1309-1 a の改正原案及びCS-25 AMC 25.1309に従って許容される発生確率が定められ、「火災及び煙を伴ったベント」の発生確率は 10^{-9} /hr未満、「煙を伴うベント」の発生確率は 10^{-7} /hr (1,000万飛行時間に1回) 未満が要求された。(表2.12.6.2 参照)

| 危険事象 | 故障状態の分類 | 発生確率 | 発生源 |
|-------------------------------|-----------------------|-----------|---|
| 火災及び煙を伴ったベント | 破局的 (Catastrophic) | 10^{-9} | BCU故障 コンタクター故障 セル電圧のインバランス BMU故障 |
| 煙を伴うベント | 危険 (Hazardous) | 10^{-7} | 圧壊 刺入 オーバーヒート |
| 爆発及び煙は発生しないが 電解液の漏えいを伴うベント | 危険 (Hazardous) | 10^{-7} | 発熱 ガス発生 セルの電食 |
| 爆発及び煙を伴わない ベント | 重大 (Major) | 10^{-5} | BCU故障 BMU故障 加熱 |

表 2.12.6.2 安全性評価で定められた危険事象

2.12.6.3 同型バッテリーの故障モード解析

表2.12.6.2のとおり、787の電源システムの安全性評価において、火災及び煙を伴うベントの発生源として、BCU故障、コンタクター故障、セル・インバランス及び/又はBMU故障が挙げられている。T社が行ったFault Tree Analysis (FTA)では、BCU故障、コンタクター故障、BMU故障、セル・インバランスが複合して過充電を生じ、その結果、火災を伴ったベントが発生すると分析されている。当該FTAにおいては、火災を伴ったベントは、過充電によるもの以外は分析されていない。

また、当該FTAにおいては、火災は発生しないが煙が発生するベントは重大な内部短絡又はバッテリーの過熱によって引き起こされると分析している。

内部短絡の結果として起こるセルベントの影響を確認するため、G社は内部短絡(釘刺し)試験(2.12.7.1に後述)を行い、内部短絡を誘発させた。この試験では、煙を伴うベントが発生したが、炎は出なかった。

なお、T社より提出された安全性解析書のFTAでは、熱伝播のリスクは評価されていなかった。

2.12.6.4 同型バッテリーの故障率の推定

T社が承認したFailure Modes and Effects Analysis (FMEA) に関する文書において、G社が算出した同型バッテリー用セルの故障率は、G社が以前から製造しておりセルの構造が類似である産業用大型LIBのセルの使用実績を基にして、推定されている。故障率を算出した時点で、この産業用大型LIBの故障がG社に報告されていなかったことから故障数を0とし、故障数及び総使用期間からポアソン分布により平均故障間隔を算出した。この平均故障間隔から故障率を求めている。セルの大きさの違いについては、係数を使用して補正している。

ただし、同型バッテリー用セルとこれら産業用大型LIBのセルとでは、形状は類似であるが、内部材料は同一ではない。また、故障率推定に用いられた信頼水準は、60%であった。

このようにして、787の同型バッテリーの故障率が算定された。

2.12.7 同型バッテリー開発時の試験

2.12.7.1 内部短絡（釘刺し）試験

2006年、バッテリーの開発時にG社は、T社及びB社と協議を行いながら、内部短絡の影響を確かめるため釘刺し試験を行った。この試験は、バッテリーとBCUの充放電・信号ケーブルの接続及びバッテリーボックスとアース線との接続を行わず、温度も外気温の状態で、2番セルに釘を刺すことにより行われた。この試験の結果、釘を刺したセルは煙を発生しベントしたが、他のセルは発煙もベントも発生せず、熱伝播は発生しなかった。



写真 2.12.7.1 開発時の内部短絡（釘刺し）試験

この試験は開発時のエンジニアリング試験として行われ、試験結果はB社により787のメインバッテリー用LIBの技術要求の明確化時にFAAへの説明に使用された。その結果、内部短絡（釘刺し）試験は、TCにおける試験には含まれないこととなった。

2.12.7.2 温度試験（低温及び温度変動）

2010年、G社は、TC試験として温度試験（低温及び温度変動）を行った。なお、試験は、あらかじめT社及びB社により承認された手順に従い実施された。

(1) 低温試験

本試験では、バッテリー温度を航空機の巡航中の外気温に近い温度から同型バッテリーの下限運用温度付近までの範囲で変化させ、BMUの動作確認、数十A放電及び充電を行った。

本試験の結果、バッテリー電圧、絶縁抵抗、温度センサー、コンタクター、インピーダンス、外観点検に異常は認められず、電解液の漏えいも発生しなかった。

(2) 温度変動試験

本試験では、温度を同型バッテリーの運用温度範囲内で変動させて温度変動中の放電、BMU動作確認及び充電を行うことを複数回繰り返した。

本試験の結果、異常は認められなかった。

2.12.7.3 外部短絡試験

2010年、G社は、TC試験として外部短絡試験（低抵抗及び高抵抗）を行った。なお、試験は、あらかじめT社及びB社により承認された手順に従い実施された。

(1) 低抵抗外部短絡試験

本試験は、同型バッテリーの運用温度範囲の上限温度で予熱された満充電のバッテリーを、低抵抗で外部短絡させて行われた。使用した電源ケーブルは機体搭載時に使用されるケーブルと同じものを長さ数ftにして使用した。

本試験の結果、短絡直後に、極短時間数千Aを超える電流が流れた。その後、電流が0Aとなった。当初、コンタクターが開いたと考えられたが、データ解析の結果、コンタクターは開いておらず集電体が大電流によって溶断されたために電流が0Aになったとの結論となった。また、試験後のバッテリーは安全な温度を維持しており、電解液の漏えい、煙及び火炎も発生しなかった。

(2) 高抵抗外部短絡試験

本試験は、同型バッテリーの運用温度範囲の上限温度で予熱された満充電のバッテリーを、高抵抗で外部短絡させて行われた。使用した電源ケーブルは機体搭載時に使用されるJ3ケーブルと同じものを長さ数ftにして使用した。

本試験の結果、短絡直後に数千Aを超える電流が流れてから電流が低下し、平均電流は1,000Aを超える値であった。試験開始（短絡）の2分後に白煙の発生が認められ、5分後に白煙は最も濃くなった。試験後のJ3ケーブルコネクタには外部短絡による特徴的な損傷が認められた。（写真2.12.7.3参照）



写真 2.12.7.3 J3ケーブルコネクタの損傷

2.12.7.4 過充電試験

(1) 過充電試験（過充電状態の継続及びコンタクター動作）

2010年、G社は、TC試験としてバッテリー電圧を過充電状態となるある一定の電圧値まで上昇させる過充電試験を行った。なお、試験は、あらかじめT社及びB社により承認された手順に従い実施された。

本試験では、バッテリー電圧を過充電状態となるある一定の電圧値に保つように充電を継続し、長時間（1日以上）経過後に、さらにコンタクターの動作電圧までバッテリー電圧を上昇させて行われた。

本試験の結果、バッテリー電圧が過充電状態となるある一定の電圧値の間、バッテリー温度は安全な温度を保ち、電解液の漏えい、煙及び火炎は発生しなかった。その後、コンタクターの動作電圧までバッテリー電圧を上昇させた結果、BMUの過充電検知及びコンタクターの動作も正常であった。

(2) 過充電試験（1セルベント）

同型バッテリーの開発時にG社は、T社及びB社と協議を行いながら、過充電試験（1セルベント）を行った。

本試験では、同型バッテリーの8セルのうち1セルをSOC100%を超えてベントが発生するまで充電した。

本試験の結果、過充電にしたセルの安全弁から激しい火炎が発生し、火炎発生直後にバッテリーボックスが溶解した。さらに、バッテリーボックス横に設置していた金属製の防護壁も溶解する結果となった。

2.12.8 LIBシステムに対する最低運用性能基準

RTCA（米国無線技術委員会）は、航空のための無線通信技術などの開発、適用などを検討するために1935年に設立された産業界等の代表で構成する非営利組織であり、航空機に搭載する様々な機器に対する規格を作成するための特別委員会

(SC: Special Committee) を設置している。LIBに対する規格 (DO-311「LIB (充電機) システムに対する最低運用性能基準 (MOPS: Minimum Operational Performance Standard)」) は、SC-211で取りとりまとめられ、2008年に制定された。この委員会にはB社、T社、G社及びFAAの代表者も参加していた。

RTCA規格は業界基準であるが、特定のTSO (Technical Standard Order) に対応するRTCAの内容を呼び出すことが適当であるとFAAが認める場合、その多くが、航空機の装備品の設計承認の制度であるTSOにおけるMOPSとして採用されている。787のLIBの特別要件が定められた2007年当時のLIBのTSO規格はTSO-179 (2006年発行) であるが、787のTCにおいては、この基準が発行されたのが787の特別要件25-359-SCが施行された後であったことから、FAAは787のLIBに対する耐空性基準として取り込まなかった。787のLIBは、TCの一環として承認された。

当該TSO規格は2011年に改正のためTSO-179aが発行され、その認証基準としてRTCAのDO-311、DO-178B、DO-254、DO-160Fが引用されている。TSO-179aには最低運用性能基準が規定されているが、具体的な基準はRTCA/DO-311を参照するよう指示している。

RTCA/DO-311においては、熱暴走の影響を調べるため、「安全装置を不作動とした破壊誘発過充電試験」(Induced Destructive Overcharge Test with Protections Disabled) が規定されている。当該試験は、単一又は複数のセルが短絡し、かつ充電器が切り離されない場合を模擬するとされている。さらに、RTCA/DO-311は、単一のセルが短絡した場合に起こり得る発火を封じ込めるケースの能力を調べるための「爆発封じ込め試験」(Explosion Containment Test) も規定している。しかしながら、これらの試験はいずれも過充電によって実施するとされており、RTCA/DO-311には、内部短絡を評価する具体的な試験方法は規定されていない。

2.13 その他必要な事項

2.13.1 同型バッテリーの製造

2.13.1.1 セルの製造

セルの工程は、正負の各電極に塗布するペーストの練り合わせ、エレメントの製作、エレメントのセルケースへの組込みからなる。セルの製造工程は、全てクリーンルームにて行われている。

また、787の同型バッテリー用セルの製造施設では、同じ材料、製造方法及びエレメント製造用の巻取機械で他用途向けの大型LIBセルも製造されており、G

社によれば、この大型LIBセルに不具合は発生していないとしている。

(1) ペーストの練り合わせ

正極にはコバルト酸リチウムを主成分とする正極活物質、負極には炭素系材料である負極活物質をペースト状に練り合わせたものが使用される。練り合わされた各ペーストには使用期限が設定され、期限が過ぎれば廃棄される。

(2) エレメントの製作

両極板の製造工程は同じで、機械を使用してペースト状の化合物を細長い銅箔及びアルミ箔に均一な厚みになるように塗布し、加熱乾燥及びプレスにより定着させる。この製造中に厚み、気泡、しわ及び巻きズレの検査が行われる。厚みの検査は、ハンディタイプの厚さ測定器により手作業で、その他については目視で行われる。

次に極板は巻取機械にかけられる。両極板の間に絶縁用のセパレーターを挟んでロール状に巻き上げ、手作業で平坦にした後、3つのロールを専用のプレス治具で平坦にする。この平坦にする工程後、エレメントにはたわみが認められた。G社によると、LIBでは充放電を行うと両電極で膨張収縮が発生するため、このたわみに問題はないとのことであった。

(3) セルの組立て

成型されたエレメントにヘッダーと一体となっている集電体を対応する極板に超音波溶接し、エレメントの周囲を絶縁シートで囲み、セルケースに挿入する。ヘッダー部とケースはTIG (Tungsten Inert Gas) 溶接され、耐圧試験が行われる。

次いで電解液注入口から電解液を注入し、その穴を小さなボールで塞いで抵抗溶接して閉鎖し、気密性チェック及び内部抵抗測定、重量計測、ソフトショート試験及びCTスキャン等が行われる。

2.13.1.2 同型バッテリーの組立て

組立てに使用する主要な内装部品を図2.13.1.2に示す。同型バッテリーの組立作業は、全て手作業である。

バッテリーボックスの底に固定フレームを入れ、その上にセルの安全弁が外側を向くように2種類あるセルを配置し、各セルがお互いに絶縁されるよう必要なスペーサーを挿入し、上部固定フレームを取り付け、同フレームをボックスに固定する。次いで、バスバー、各種センサー、BMU、コンタクター、HECSが取り付けられ、組立てが完了する。そして、DC/AC抵抗測定、出荷前検査が実施される。

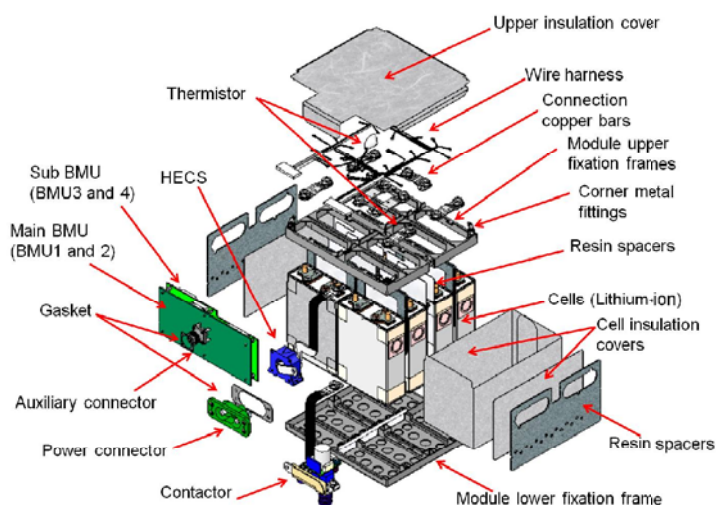


図 2.13.1.2 同型バッテリー組立て

2.13.1.3 異物混入対策

製造工程での異物混入対策として、下記(1)及び(2)が行われている。このことから、G社は製造工程での異物混入はないとの見解を示している。

(1) 製造工程

セル製造施設はクリーンルームとなっており、耐電靴、頭髮混入防止用の帽子等の着用が義務付けられている。施設入口には2重の扉が装備され、エアーカーテンが衣服に付着した異物を取り除いている。それぞれの扉の床には、粘着シートが設置され、靴底の異物を取り除かれる。また、工場内部の気圧は外部の気圧より高く設定されており、扉の開閉時に空中に浮遊する異物が外部から進入するのを防止している。工場内部に外部空気を取り入れる送風機のフィルターは、定期的に交換されている。

セル製造施設内部は、電極用パウダーミキシング部とセル製造部に大きく区別されているが、異物混入対策は同等である。セル組立て作業員は、手袋とマスクを着用することが求められている。

両電極のペーストの原料となるパウダーは、納入後に重量計測され、混合機で攪拌されてペーストとなるが、異物除去の手順はない。

セル製造工程中、製品を切断する工程はないため、切り屑が混入する可能性はない。

正・負極のペーストの塗布、集電体の取付時の超音波溶接及びセルケースの封印時の溶接時に異物混入の可能性がある。エレメントに塗布するペースト中の異物に対しては、マグネットフィルターを使用して混入した鉄系の異物を取り除いている。一方、集電体を取り付ける超音波溶接時に発生する異物に対しては、溶接装置に空気吸引装置を装着して発生する異物を取り除いている。

(2) 製造時及び製造後の検査

セル製造工程で、電解液注入前に正負極間に電圧を印加して短絡がないかを確認する耐圧試験が行われている。

セル製造後には、ソフトショート試験及びCTスキャンによる検査が行われている。

2.13.2 787の同型バッテリー事案

(1) ボストン事案

平成25年1月7日10時21分（米国東部標準時）ごろ、ボストンのローガン国際空港で駐機中の同型機のAPUバッテリーから煙が発生した。このとき機内にいた整備士が後方電気室のドアを開け、小さな炎2つがコネクタ部から出ているのを確認した。

ボストン事案は、NTSBが調査^{*9}を行っている。

(2) 成田事案

平成26年1月14日、成田国際空港において出発前整備中の同型機で、整備士が機外に煙が漂っていること並びにメインバッテリー及びBCUの不具合を示すメッセージが表示されていることを確認した。その後、メインバッテリーの5番セルがベントしていること、並びに残りの7つのセルは依然として通常の電圧（約4V）が出ていることが確認された。前年の2013年に、全ての787型機を対象として、同型バッテリーをエンクロージャーボックス内に収納し、エンクロージャーボックスには機外に通じるダクトが取り付けられる改修が行われていたことから、この事案では、このダクトが有効に機能し漏れた電解液は機内に入らず、機外に放出された。

この時点での787全機による総飛行時間は約25万時間であった。

*9 ボストン事案のNTSB調査の詳細は、NTSBのウェブサイト（<http://www.nts.gov>）で公開されている。

成田事案について、その後、国土交通省航空局（以下「航空局」という。）が主体となって行われた調査では、5番セル以外のセルを充電率（SOC）100%の状態にして分解を行った。その結果、負極のグラファイト表面に、しわが形成されていることが確認された。

また、このセル分解調査において、セパレーターから金属片が見付かった。成分分析の結果、この金属片はステンレスであることが判明した。G社は、セル分解時の作業によりセルケース等の材料が細かい金属片となり、それらがセル内部に付着した可能性が高いとの見解を示している。その他、セルを分解した電極板上からリチウム蓄積物の初期生成物と思われるもの（成分分析中）が観測された。



写真 2.13.2-1 負極のしわ(成田事案)

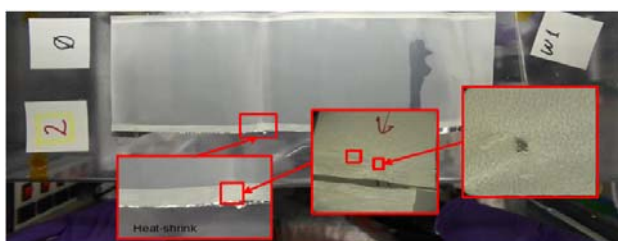


写真 2.13.2-2 発見された金属片(成田事案)

5番セル以外のセルのCTスキャンの結果から、セル間で電解液の量に不均一が認められた。

成田事案の調査の過程で、B社から運航中の機内のエンクロージャーボックス表面温度が0℃以下まで低下することがあると報告された。B社によると、改修前の同型バッテリー表面温度にも運航中に同様の温度低下が起こっていた可能性が考えられるとのことであった。

2.13.3 緊急着陸に関する非常操作手順

同機の飛行機運用規定（AOM）には以下のように記述されている。

2.0 AOM, Chapter CI Checklist Instructions

2.0.0 Section 2 Non-Normal Checklists

General

(中略)

この章に記載されたNon-Normal Procedureは、発生した異常に対処するための典型である。したがってこれらのProcedureだけでは対応できないような不測の事態が発生した場合は、状況に応じた最善の処置が求められる。

(中略)

(12) *Emergency Landing*

機長は以下の異常が発生した場合およびその他必要ならば、最寄りの適当な空港への緊急着陸を考慮する。

(中略)

- ・ *Cabin*および/または*Crew Rest Compartment*に*Smoke/Fumes*および/または*Fire*が発生し、排煙又は消火を明確に確認できない場合

(中略)

- ・ その他、飛行の継続に重大な支障があると判断される場合

(中略)

Cabin or Cockpit Smoke/Fumes/Fire

Cabin (*Overhead Crew Rest Compartment*も含む) で*Smoke/Fumes*あるいは*Fire*が発生した場合は、*Cabin*での消火活動等の進捗状況の報告を受けするため、客室乗務員のうちの1名を*Cockpit*との連絡にあたらせ、継続的な*Communication*を確保する。

機内の秩序を維持するために*Seat Belt Signs Selector*をONとし、必要ならPA *Announce*を実施する。

*Cabin/Cockpit*の空気が*Smoke/Fumes*、その他有害*Gas*、あるいは悪臭で汚染されている時、あるいは汚染される恐れがある時には、直ちに*Oxygen Mask*、*Smoke Hood*を使用することを考慮する。これらの使用は、*Smoke/Fumes*、*CO2*、その他有害*Gas*の防御に有効である。

(以下略)

2.13.4 非常脱出手順

同機の非常脱出手順は以下のとおりである。

- 1 *PARKING BRAKE* *SET*
- 2 *OUTFLOW VALVE switches (both)* *MAN*
- 3 *OUTFLOW VALVE MANUAL switches (both)* *Hold in OPEN until the outflow valve indications show fully open to depressurize the airplane*
- 4 *FUEL CONTROL switches (both)* *CUTOFF*
- 5 *Evacuation* *Initiate (PIC)*
- 6 *Advise the tower*

7 Engine fire switches (both) Pull
8 APU fire switch Override and pull
9 If an engine or APU fire warning light is
illuminated:
Illuminated fire switch Rotate to the stop
and hold for 1 second

2.13.5 本重大インシデント発生前の同機の夜間係留地

本重大インシデント発生前、平成24年12月1日から平成25年1月15日までの同機の夜間係留地並びに夜間係留中の最低外気温について、調査を行った。その結果、夜間係留中の最も低かった外気温は、-2.6℃（平成24年12月23日）であった。

（付図4 同機の夜間係留地における最低外気温（2012/12/1～2013/1/15）参照）

3 分析

3.1 乗務員の資格等

機長及び副操縦士は、適法な航空従事者技能証明及び有効な航空身体検査証明を有していた。

3.2 航空機の耐空証明等

同機は有効な耐空証明を有し、所定の点検整備が行われていた。

3.3 気象との関連

2.13.2に記述したボストン事案及び成田事案に本重大インシデントを加えた類似3事案がいずれも1月の寒冷期に発生している。これは、統計的にはサンプル数が十分ではないと思われるが、類似するバッテリー不具合が全て冬期に発生したことは、現時点では無視できない。そのため、低温環境が同型バッテリーの不具合の発生に関与した可能性が考えられる。

3.4 事象発生から着陸まで

(1) 最初のバッテリー異常兆候が操縦室に表示されたときの同機の位置及び高度、機長及び副操縦士の口述、管制機関との交信の時系列から判断すると、同

機は、メインバッテリーの不具合が検知された時点で最も短時間で着陸できる高松空港に着陸した。これには、管制官が同機に先行して高松空港に進入していた他機を復行させたことも寄与したものと推定される。

同機のフライトレコーダーの記録から判断すると、機長及び副操縦士は手順に従って冷静に対応していたものと推定される。そして通常は着陸後の手順であるAPU起動を着陸前に行って予備電力を確保していた。このため、メインバッテリーが故障し予備電源がなくなった状態で両エンジンを停止した後にもAPU発電機による電力が確保でき、機内アナウンス等が可能であったものと推定される。

- (2) 機内で焦げくさい臭いがした理由は、次のとおりと推定される。

付図2のフライトレコーダーの記録のとおり、メインバッテリーの電圧低下後に排煙システムの作動が記録されており、図2.6.2に示したとおり、煙を検知した前方電気室からの排煙システムは、設計どおりに作動していたと推定される。排煙システムの作動によりオーバーライド・バルブ及び前方アウトフロー・バルブから排気された煙は一旦機外に排出され、排出された煙の一部が、その後方に位置するキャビンエアー・コンプレッション・インレットから再び機内に入り、操縦室及び客室に循環したことで異臭が感じられたものと考えられる。

- (3) 非常灯は、機体電源が失われたとき（HBBが電力を失ったときを含む。）に自動的に点灯するように設計されている。本重大インシデントで最初にEICASに「EMER LIGHTS」が表示された理由は、メインバッテリーが故障したためHBBの電力が失われ、非常灯が点灯したためと推定される。

3.5 非常脱出

2.1.2(2)の口述及びフライトレコーダーの録音内容から、機長はタワーが機体から煙が出ているのを確認した時点で脱出を決意したものと推定される。客室乗務員の口述から判断すると、乗客の中には荷物を持参した者もいたが、ほとんどの者は荷物を機内に残す指示に従い、荷物を持たずに非常脱出スライドを滑ったものと推定される。非常脱出スライドを使用した行動は、軽傷者が4名いたものの整然と行われたものと推定される。

高松空港の救急機関の消防車は、同機の着陸前に滑走路脇に展開を完了していたものと推定される。

3.6 フライトレコーダーのメインバッテリー電圧の記録

2.11.1に記述したとおり、同機には本来あるべきでないカードが装備されていたため、メインバッテリーの電圧が降下してAPUバッテリーから回り込んでくる電圧を

下回るとAPUバッテリーから電気が流れることが確認された。この時、図2.11.1に示すとおり、メインバッテリー電圧の電圧センサー位置でもAPUバッテリー電圧が測定される。そのため、本重大インシデント時にメインバッテリー電圧が低下した際に記録されたメインバッテリー電圧1.1VはAPUバッテリーの電圧であったものと推定され、真のメインバッテリー電圧は1.1V以下であったと推定される。

本来あるべきでない旧設計のカードが装備されたままの状態での運航会社へ航空機が引き渡されたことは、機体搭載機器の最終確認に不備があったものと考えられる。

3.7 角田試験結果等の分析

3.7.1 内部短絡発生時のセルの挙動

2.11.5(2)の記述及び別添2「付図2-7 セル電圧低下の詳細状況(形態2)」の記録にあるとおり、内部短絡が発生すると、その直後に内圧が上昇してベントが発生した。セル電圧は、一旦1V程度の電圧低下があり、その後、約4Vへ回復した後に0Vへ低下した。

内部短絡直後にベントが発生するのは、1つのエレメントで内部短絡が発生すると短絡部で正負極が低抵抗で接触することにより大電流が発生し電解液が分解し内圧が上昇するためと推定される。

ベント発生後に一旦電圧が低下するのは、内部短絡が発生したエレメントが電気エネルギーを使い果たすとともに炭化した導体となるため、並列に接続された2つのエレメントから電流が流れ込み、セル内部抵抗による測定電圧の低下が発生することによる可能性が考えられる。

セル電圧が回復するのは、2つのエレメントから流れ込んだ電流により内部短絡が発生したセルの正極集電体がヒューズのように熔断され電流が遮断されたことによる可能性が考えられる。負極集電体ではなく、正極集電体が熔断されたのは、それぞれの材料として使用されている銅とアルミニウムの融点の違いと推定される。

セル電圧が4Vから0Vへ低下したことは、セル内部で発生した発熱現象により内部短絡が発生したエレメント以外のエレメントでもセパレーターが溶解して、正負極間の短絡が発生したためと推定される。

3.7.2 ベント発生時のコンタクター誤作動

2.11.5に記述した角田試験の形態1、2及び3の結果から、セルのベントが発生した後にコンタクターの開放が発生することが確認された。本来、コンタクターは、2.6.5.4の記述のとおり、バッテリー又はセルの過充電が発生した時に開放されるよう設計されている。しかし、角田試験のベント後のコンタクターの開放時、各セル電圧及びバッテリー電圧の記録から過充電は発生していない。過充電が発生して

いないにもかかわらずコンタクターが開放したことは、ベントによるセルからの噴射物がBMUに付着した影響又はセルの発熱現象による熱の影響によるコンタクターの誤作動の可能性が考えられるが、コンタクター開放の原因を特定することはできなかった。このコンタクターの誤作動は、2.11.6.5に記述したB社による2回のバッテリーベント（ヒーター）試験でも発生しており、同型バッテリーにおいてセルのベントが発生した時には、コンタクターの誤作動が発生する可能性が高いと推定される。

コンタクターの誤作動は、ベント発生後数秒～数十秒で発生する。また、コンタクター開放時のバッテリー電圧の変動は、ごく短時間で0Vとなる。

787においてメインバッテリーが主な電源として使用されるのは機体電源が全て喪失した場合であり、電源全喪失時にメインバッテリーにベントが発生する確率は極めて小さいと考えられるものの、万一そのような事態が発生すればその影響は極めて深刻であることから、3件の類似事案が発生したことを踏まえ、そのリスクの評価の必要性について検討すべきものと考えられる。

3.7.3 ベント後のセルケースとバッテリーボックスの短絡

2.11.5(2)の記述及び別添2「角田宇宙センターでの熱伝播試験」の付図2-8-1及び付図2-8-2「セル電圧・アース線電流変化（形態2）」の記録にあるとおり、アース線の電流変化を見ると6番セルのベント後約30秒でアース線に1,000A前後の電流が発生しており、このタイミングで膨張した6番セルのセルケースとブレースバーが接触したと考えられる。この時、3.7.1で述べたとおり6番セルは全てのエレメントで短絡が起こり、各エレメントを覆っている樹脂シートも溶解してセルケースと各エレメントが一体となった導体となっていたものと推定される。そのため、バッテリーボックスとの短絡によって6番セルの正負極はアース電位になったものと推定される。しかしながら、ブレースバーとの短絡時に、バッテリー電圧の低下は記録されていない。一方、2.11.6.5に記述したB社によるバッテリーベント（ヒーター）試験では、アース線に大電流が発生している間バッテリー電圧の低下が確認されており、これはバッテリーボックスへの短絡部がアース電位となったためと推定される。

セルケースとバッテリーボックスの短絡は断続的に発生するため、それに伴う電圧も不規則な変動を示すものと考えられる。

3.7.4 アーク放電の発生

2.11.5(2)で記述した角田試験の形態2の試験において、6番セルのセルケースとブレースバーにアーク放電による溶着が確認された。3.7.3で述べたとおり、

アース線に1,000 Aを超える大電流が流れたことと併せて考えると、6番セルのセルケースとブレースバーの短絡が断続的に発生したため、電流が発生しているときに短絡箇所が離れたことにより、アーク溶接のようなアーク放電が発生したと推定される。6番セルのセルケースとブレースバーが溶着した時期は、最後にアース線に大電流が流れ7番セルがベントした前後と推定される。

電流が発生している時に、接点が接触したり離れたりすることを繰り返すと断続的にアーク溶接のようなアーク放電が発生し、アーク放電の放射熱により周辺は高温となる。

また、2.11.5(3)で記述した形態3の試験では、アーク放電の痕跡が確認されていない。これは、バッテリーボックスのアース線を接続していなかったため、セルケースとバッテリーボックスを介したアースへの短絡回路が形成されなかったためと推定される。

3.7.5 アース線の溶断

2.11.5(2)及び別添2「角田宇宙センターでの熱伝播試験」の付図2-8-1及び付図2-8-2「セル電圧・アース線電流変化(形態2)」の記録にあるとおり、7番セルがベントする前後で、6番セルからの熱伝播によって7番セルで内部短絡が発生し、7番セルは内部短絡により内圧が上昇するためセルケースの膨張が発生していたと推定され、これによりブレースバーが押され6番セルのセルケースと再度接触したため、アース線に再度高電流が流れたと推定される。この再接触の時期は、7番セルがベントした直後の電圧低下時にアース線に最大1,630 Aが流れていたことと一致する。また、次の電流値のピークは1,010 Aであり、試験の録画映像ではこのタイミングでチリチリという音の後に火炎が出ていることから、2番目の高電流発生時にアース線が切れたものと推定される。

角田試験で使用したアース線は、実機に装備されているものとは長さや材質に違いがあるため、抵抗が実機とは異なるものとなっている。しかし、アース線を溶断させたと推定される電流値は、アース線抵抗を考慮すると妥当な値であり、アース線溶断という実機の事象を模擬できたと考えられる。

3.7.6 角田試験の形態2と形態3の相違

2.11.5(2)及び(3)で記述した角田試験の形態2及び形態3の試験において、熱伝播の違いが発生した。

一方、3.7.4で述べたように、試験後の結果から形態2ではアーク放電が発生しており、形態3ではアーク放電が発生していなかった。

セルケースとブレースバー又はバッテリーボックスとが接触と非接触を断続的に

繰り返すのに伴ってアーク放電が発生し、あたかもアーク溶接のような状況となる。そのため、アーク放電の放射熱が断続的に発生し、セルの発熱現象による温度上昇以上に高温となると考えられる。したがって、角田試験において形態2で熱伝播が発生し、形態3で熱伝播が発生しなかった主な理由は、セルケースとブレースバー又はバッテリーボックスとの短絡時に、アース線が接続されていると接地短絡して大電流が流れることによりアーク放電が発生するが、アース線が接続されていないと大電流が流れずアーク放電が発生しないことによるものと考えられる。

3.8 メインバッテリー損壊の経過に関する分析

3.8.1 ベントの順序

(1) CTスキャン画像から判断されるベントの順序

セルの内圧が高まるとセルが膨張し、隣接セルをへこませる。2.6.5.2に記述したとおり、膨張したセルの内圧がある基準以上になると圧力を開放するためベントが発生する。次に、隣接セルの内圧が上昇すると、今度は隣接セルが膨張を起こし、先に膨張したセルはベントにより内圧が低下しているため、隣接セルの膨張により押されへこまされることになる。このことを考慮し、2.8.3に示したCTスキャン画像による各セルの変形状態を分析すると、最初にベントが発生したセルは3番セル又は6番セルであったものと推定される。その他のセルについては、以下のように推定される。

- ・ 3番セルのあとに2番セル、そのあとに1番セル
- ・ 6番セルのあとに7番セル、そのあとに8番セル

(2) 熱暴走起点セルの考察

上記(1)で述べたように、初めにベントしたセルは3番セル又は6番セルと推定される。

付図3のフライトレコーダーに記録されていたメインバッテリー電圧によると、バッテリーの不具合が発生した後の電圧低下では、29Vの2秒後に14Vに低下し、更に2秒後に11Vへと低下している。11Vが記録されている時のメインバッテリー電圧は、3.6で述べたように、11V以下であったと推定される。

メインバッテリーの電圧低下には、以下の2つの原因が考えられる。

① ベント後のコンタクターの動作

3.7.2で述べたように、ベント発生後にコンタクターが開放する誤作動が確認されている。コンタクターが開放すると、物理的及び電氣的な接続が無くなるため、電圧はごく短時間で0Vとなる。

コンタクターの誤作動の発生時期は、ベント発生後数秒～数十秒である。

② セルケースとバッテリーボックスの短絡

3.7.3で述べたとおり、ベントしたセルのセルケースとバッテリーボックス又はブレースバーが短絡すると、短絡したセルがアース電位となり、バッテリー電圧の低下が発生することがある。

セルケースとブレースバーの短絡が発生した場合、最初にベントしたセルが3番セルであれば測定されるバッテリー電圧は4番～8番セルの合計電圧である20Vとなり、6番セルの場合は、7番及び8番セルの合計電圧となるため8Vとなる。3.6に記述したようにメインバッテリー電圧は11V以下であることから、最初にベントしたセルは6番セルの可能性が高いと考えられる。

その他、2.11.5(2)に記述した角田試験の形態2における6番セルとブレースバーの溶着が示すように、6番セルが先にベントした場合、6番セルが膨らんでブレースバーと接触し短絡が発生する。その際の接触は断続的なため、6番セルS1とブレースバー間でアーク放電が激しく発生したと考えられ、2.8.3(6)に記述した6番セルの損傷状況と矛盾しない。また、角田試験の形態2における6番セルとブレースバーの溶着と本重大インシデントの6番セルとブレースバーの溶着の発生状況が酷似していることから、先にベントしたのは6番セルと推定される。

3.8.2 コンタクターの開閉

本重大インシデントのフライトレコーダーのメインバッテリー電圧の記録が11Vになっている間、3.8.1で述べたようにバッテリーボックスとの短絡が継続したとすると、アース線は短時間で溶断するため、バッテリーボックスとの短絡が継続したとは考えられない。

3.7.2で述べたように、バッテリー内の1セルをベントさせると、コンタクターが開放する誤作動が高い確率で発生することが分かっており、同機のメインバッテリーでも、同様にコンタクターの開閉が発生したと推定される。

3.8.3 メインバッテリー損壊の経過

メインバッテリー損壊の経過について、2.11.6.7で記述したB社の説明のイベントを用いて分析した結果は以下のとおりである。なお、本項の「メインバッテリー電圧」は、全てフライトレコーダーに記録されたメインバッテリー電圧を意味する。

① イベントA

メインバッテリー電圧が31Vから30Vに低下した。この直前から電圧低下の間、メインバッテリーのいずれかのセルに急激な温度上昇を伴う内部短絡（3.10に後述）及びセルケースの膨張が生じて、最終的にベントしたものと推定される。3.8.1(2)に述べたように、その最初のセルは6番セルと推定される。ベントが発生したことから、6番セルは、発熱現象が発生しておりセルケースも膨張していたものと推定される。このセルケースの膨張及び発熱現象により、6番セル周辺のスペーサーが溶解したものと推定される。

さらに、メインバッテリーの電圧は29Vを記録した後、14Vへ低下している。

この電圧低下は、コンタクターの開放による可能性又は3.8.1(2)で述べたとおりバッテリーボックスとセルケースの短絡による可能性が考えられる。

② イベントB

メインバッテリー電圧が11Vを維持している間は、3.8.2で述べたとおり、コンタクターの開放と6番セルのセルケースとバッテリーボックスの短絡のどちらか又は両方が発生していたと考えられる。

メインバッテリー電圧の20Vへの上昇は、コンタクターが閉じている時に6番セルのセルケースとブレースバーの短絡が一時的に離れたためと考えられる。その後、メインバッテリー電圧が27Vに上昇していることは、その時点ではベントしていたのは6番セルのみであったことを示している。バッテリー電圧の11Vへの低下は、再び、コンタクターが開放したか又は6番セルのセルケースとブレースバーが短絡したことによるものと考えられる。

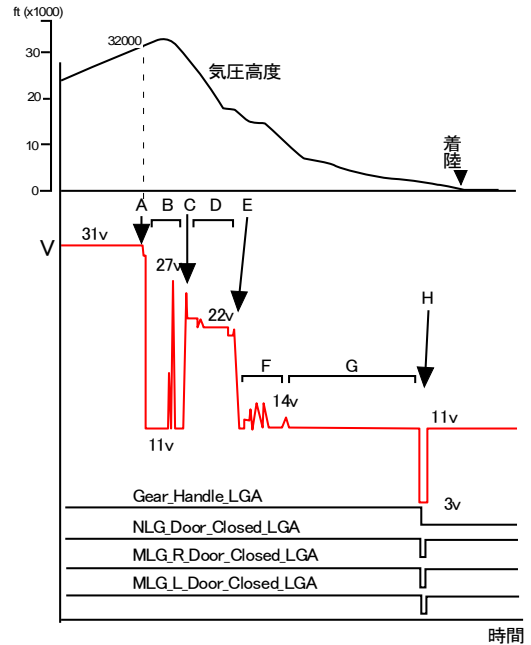


図 3.8.3-1 本重大インシデントでのメインバッテリー電圧変化(分析)

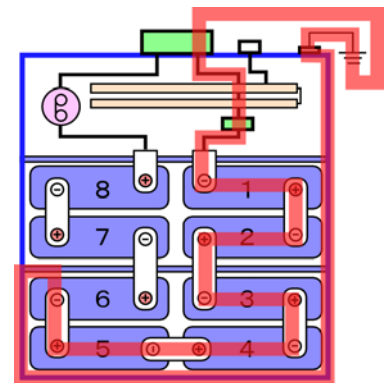


図 3.8.3-2 短絡時の回路

③ イベントC

メインバッテリー電圧が26Vを記録していることは、コンタクターが閉じられ、その時点で2番目のセルが短絡していた可能性を示し、その後の23Vへの低下は、当該セルがベントした可能性を示している。これは、2.8.3(5)で記述したとおり5番セルがベントしていなかったこと並びに2.11.5(2)等に示した同型バッテリーを使用した熱伝播再現試験において、起点セルの次に熱伝播によりベントするセルは、S1又はS3側のセルである可能性が高いことから、当該セルは7番セルである可能性が高い。

④ イベントD

23Vから21Vへの電圧の降下は、セル同士又はセルとバッテリーボックスの短絡によりアーク放電等が発生し、1番～5番セルの充電エネルギーが消費されたためと考えられる。

この後、3番セルのベント、6番セルケースと3番セルケース間で短絡、アーク放電及び溶着が発生したと考えられる(3.8.3.1に後述)。6番セルと3番セルが溶着したことにより、3番～4番～5番～6番～3番セルの閉回路が形成され、4番及び5番セルのエネルギーが更に消費されたと考えられる。

3番セルの正極のガスケットが溶解したため、3番セルと4番セルをつなぐバスバーと3番セル正極周辺との間でアーク放電が始まり、そこで4番及び5番セルの充電エネルギーを全て消費したと考えられる。

4番及び5番セルは充電エネルギーを全て消費したため、ベントに至らなかったものと考えられる。

⑤ イベントE

メインバッテリー電圧が22Vから11Vに低下した。これは、再び、コンタクターが開放したか又は6番セルのセルケースとブレースバーが短絡したのものと考えられる。

⑥ イベントF

メインバッテリー電圧の変動は、セル相互の短絡又はアーク放電の発生によるものと考えられる。

⑦ イベントG

メインバッテリー電圧は、11Vを維持していた。B社の説明及び3.6で記述した分析のとおり、メインバッテリー電圧の11Vの記録は、旧配線が残っていたことによるAPUバッテリー電圧が記録されたものと推定される。

⑧ イベントH

B社の説明のとおり、ギアドアのLightが点灯したため、電圧が3Vに低下したものと推定される。

3.8.3.1 3番セルと6番セルの溶着シナリオ

6番セルのセルケースとブレースバーとの短絡時に発生するアーク放電の放熱により、7番セル及び3番セル内部のセパレーターが溶け、内部短絡が発生してベントが発生する。この現象により、3番セルが膨らんだ際に、3番セルのS4と6番セルのS2が接触し、アーク放電が発生したことにより、この2面は溶着されたと考えられる。

3番セルのS4と6番セルのS2が溶着されたことにより、3番、4番、5番及び6番セルの短絡回路が形成される。更に3番セルの正極端子板下にある樹脂製のガスケットが周辺の熱の影響により溶解したため、正極端子板とバスバーに間隙が生じ、電流が流れている状態で接触と分離を繰り返したためアーク溶接のようなアーク放電が継続して発生したと考えられる。これにより、3番セル正極端子板、3番セル正極周辺のセルケース上部カバー、ボルト及び3番セル正極と4番セル負極を接続するバスバーが溶解したと考えられる。

3.9 バッテリーの充電制御

3.9.1 充電電流の振動

2.11.3、2.11.4及び2.11.6.1に記述したとおり、セルバランシング試験、実機検証及びバッテリーとBCUの接続試験において、小さい変動ではあるが充電電流が振動していることが確認された。バッテリーの容量からみて相当小さいが、短時間で浅い充放電が頻繁に繰り返されること、不要な振動であること、バッテリーの寿命に影響すると考えられることから、改善されることが望ましいものと考えられる。

3.9.2 放電時における過渡現象による瞬間的な高電圧

2.11.6.1に記述したとおり、B社のエンジン運転時における標準的なAPU始動を模擬した試験で、バッテリーから20Aの放電時に過渡現象による瞬間的な高電圧の印加が確認された。この瞬間的な高電圧の印加は、2.6.5.3(6)に記述したコンタクター動作確認の実施条件を満たしてから約1秒後に、電流が約22ms間遮断され、その直後に発生していることから、2.6.5.3(6)に記述したとおり、BMUの自己診断機能にあるコンタクターの動作確認によるものと考えられる。

また、2.11.4(3)に記述したとおり、同機を使用した実機検証で、約60Aの放電時に瞬間的な電圧降下(0V)が確認された。この瞬間的な電圧降下は、充電電

流が規定された低電流値を下回ってから約1秒後に発生しており、同じ時期に電流が約2.3ms間遮断されていることから、2.6.5.3(6)に記述したとおり、BMUの自己診断機能にあるコンタクターの動作確認が行われたものと考えられる。

以上のように、同じ放電時にコンタクターの動作確認が行われていたことから、同機においても過渡現象による瞬間的な高電圧が各セルに印加される可能性が考えられる。

3.9.3 充電時における瞬間的な電圧上昇

2.11.4(2)に記述したとおり、同機を使用した実機検証で、4.6Aの充電時に瞬間的な電圧上昇(約4.5V)が確認された。この瞬間的な電圧上昇は、充電電流が規定された低電流値を下回ってから約1秒後に発生し、電流が約2.5ms間遮断されていることから、2.6.5.3(6)に記述したとおり、BMUの自己診断機能にあるコンタクターの動作確認によるものと考えられる。

上記のようなコンタクターの動作確認は、電流値が高い時にコンタクターの開閉を行うと高電圧の過渡現象が発生する可能性があるため、それを回避するために充電末期における低電流値で実施するという設計の意図と異なる動作であることから、改善されることが望ましいものと考えられる。

3.10 発熱現象の原因

2.7.2の記述にあるように、バッテリーの発熱現象の主な原因としては、過充電、過放電、外部短絡、セルケースの短絡及び内部短絡が考えられる。以下のとおり、本重大インシデントで発生したセルの発熱現象について、それらが原因である可能性を検討した。

(1) 過充電

過充電が発生すると電圧が上昇するが、付図2のとおり、フライトレコーダーの記録からメインバッテリー電圧の上昇は見られなかった。そのため、バッテリーレベルの過充電は発生していないと推定される。

また、セル電圧のインバランスが発生することにより1つ又は少数のセルで過充電が発生した場合、2.12.7.4(2)に記述したように、メインバッテリー周辺に火災による損傷が発生すると思われるが、2.8.3の記述のとおり、メインバッテリー周辺に火災による損傷が見られないことから、セル電圧のインバランスによるセルレベルの過充電も発生していないと推定される。

(2) 過放電

過放電が発生すると電圧が低下するが、付図2のとおり、フライトレコーダーの記録からメインバッテリー電圧の低下は見られなかったことから、過放電は

発生していないと推定される。

(3) 外部短絡

2.12.7.3(1)の記述のとおり、低抵抗回路となる外部短絡が発生すると数千Aの大電流が流れるため、瞬時にアルミニウムのセル正極集電体がヒューズのように溶断され、バッテリー外観に損傷が発生しない。また、2.12.7.3(2)に記述したとおり、高抵抗回路となる外部短絡が発生するとJ3ケーブルコネクタに損傷が現れるが、2.8.3に記述したとおり同機のJ3ケーブルコネクタには外部短絡による損傷は認められなかった。その他、同機のJ3ケーブル及びJ1ケーブルにも損傷がないことから、外部短絡の可能性は低いものと推定される。

(4) セルケースの短絡

2.11.6.2及び2.11.6.9(1)に記述したとおり、セルケースとバッテリーボックスが直接又は水分を介して短絡するとベントが発生することが判明した。しかしながら、B社が委託した調査によると、セルケースとバッテリーボックスの短絡には特徴的な損傷が発生し、本重大インシデントのメインバッテリーには、そのような損傷は認められなかったため、セルケースの短絡の可能性は低いものと考えられる。

(5) 内部短絡

以上のように、セルの発熱現象の主な原因と考えられる上記(1)～(4)の可能性は低いことから、バッテリー発熱現象の原因は内部短絡であった可能性が高いと考えられる。

3.1.1 内部短絡の原因に関する分析

3.1.0で述べたように、本重大インシデントで発生したセルの発熱現象の原因は、内部短絡であった可能性が高いため、2.7.2(5)の記述にある内部短絡の主な原因について、それらが原因である可能性を分析した。

3.11.1 セル内部への金属片の混入

2.11.6.9(2)及び2.13.2(2)に記述したように、2つのセル内部から金属片(粒)が発見されている。

これに対してG社は、以下の理由により製造工程での金属片の混入が内部短絡の原因に関与している可能性は低いとしている。

- ・セル製造時のクリーンルームの使用 (2.13.1.3(1))
- ・セル製造時の耐圧試験 (2.13.1.3(2))
- ・セル製造後のソフトショート試験及びCTスキャン検査 (2.13.1.3(2))
- ・同じ材料及び製造方法の他用途向けセルの実績 (2.13.1.1)

- ・セル分解時の金属片の混入 (2.13.2(2))

しかしながら、1つのセルからだけではなく2つのセルの内部から金属片(粒)が発見されており、2.11.6.9(2)に記述したとおり、B社の外部委託調査報告書では、金属片の混入が製造工程に起因している可能性を示している。これらのことから、セル内部に金属片が混入していた可能性を完全に否定することはできないと考えられる。

3.11.2 セル内部のセパレーターの損傷

セパレーターの損傷としては、製造時のごく微小な破れなどからエレメントをロール状に巻く時のテンションにより亀裂が生じる可能性、充放電時に亀裂が生じる可能性並びに熱による溶融及び収縮が生じる可能性が考えられる。

(1) 製造時に生じる亀裂

製造時に生じた亀裂によるものであれば、2.13.1.3(2)の記述のとおり、製造時及び製造後の検査により検知されるものと考えられ、また、2.13.1.1の記述のとおり、G社によれば、同じ材料及び製造方法で製造されている大型LIBセルには不具合は発生していない。これらのことから、製造時のセパレーターの損傷の可能性は低いものと考えられる。

(2) 充放電時に生じる亀裂

充放電時に生じる亀裂については、2.11.6.9(3)の記述のとおり、正極活物質に含まれる粒子の中に通常よりも大きい粒子が確認されており、理想的な活物質の状態ではなかったと考えられるが、その大きさは活物質の層の厚さを超えておらず、直ちにセパレーターの損傷を引き起こす可能性は低いものと考えられる。

(3) 熱による溶融及び収縮

熱による収縮については、可能性のある要因の1つとして外部からの熱がセル内部に伝わりセパレーターを収縮させることが挙げられる。2.11.7.1に記述したとおり、NTSBが行ったAPUスタート模擬試験において、リベット部の温度が上昇する事象が確認されている。リベット部を含むセル端子部の抵抗値が大きくなるとジュール熱(電流の2乗×抵抗)による発熱が大きくなり、その熱が集電体を伝ってセパレーターを溶融及び収縮させ正負極間が短絡して、内部短絡を引き起こす可能性が考えられる。

しかしながら、本重大インシデントで発熱現象が発生したのはメインバッテリーであり、2.6.3に記述したとおり、メインバッテリーの最大放電電流はAPUバッテリーの6分の1程度であることから、本試験で確認されたような温度上昇が同機のメインバッテリーで発生した可能性は低いと考えられる。

3.11.3 セル内部のリチウム金属の析出

(1) 低温環境の関与

本重大インシデントのバッテリーは熱損傷が激しく、バッテリー内部の微細構造を確認することはできなかったが、3.3で述べたとおり本重大インシデントを含めた類似3事案が寒冷期のほぼ同時期に発生していることから、低温環境が内部短絡の発生に関与した可能性を否定することはできないと考えられる。

夜間の地上係留中の機内温度は、外気温の影響により変動する。それに伴い、寒冷期の夜間における地上係留中の同型バッテリーも低温になる機会が多かったものと推定される。機体電源投入後、同型バッテリーが設置された電気室内の温度は空調により短時間で上昇するが、セル内部の温度はすぐには電気室内の温度まで上昇しないこと、さらに2.13.2(2)の記述にあるように運航中のバッテリー表面が低温となっていた可能性があることから、寒冷期の間、飛行ルートや就航地などの条件によって不規則に、セル内部の元素の温度が低温のまま充放電が繰り返し行われていた可能性が考えられる。

(2) 負極板のたわみ及びしわ

2.13.1.1(2)に記述したとおり、ロール状に成形された後に平坦にされた元素にはたわみが確認されており、2.11.2(2)及び2.13.2(2)に記述したとおり、同型機の同型バッテリーから負極板のしわが確認された。また、2.11.6.9(5)に記述したとおり、セルの正負極間に不均一な間隙が確認された。

2.7.4の記述のとおり、たわみやしわのような元素の不均一な形成は、正負極板間の距離の不均一を引き起こし、局所的な充電電流の集中によりリチウム金属の析出を助長する可能性がある。

しわが形成された理由については、LIBの充放電に伴う膨張及び収縮による可能性又は製造工程が関与した可能性が考えられる。

(3) セル内部の劣化

2.5.1に記述したとおり、同機のメインバッテリーは、同機に搭載されてから約3か月しか使用されていないため、使用期間によるセル内部の劣化の可能性は低いものと考えられる。

しかし、3.9.1で述べたように、BCUには充電電流の振動が確認されており、その振動がバッテリーの寿命に影響すると考えられる。このことから、BCUの充電電流の振動によりセル内部の劣化が進み、負極活物質組織の劣化による不均一化が進んでバッテリー性能に影響していた可能性が考えられる。

(4) リチウム金属の析出検証試験

2.11.7.2及び2.11.8.1に記述したとおり、リチウム金属の析出を確認する

ため、NTSB及びG社が検証試験を実施した。

NTSBの試験では、リチウム金属の析出の特徴を持つ析出物が観察されたが、その析出物を成分分析したものの成分を確定することはできず、リチウム金属は検出されなかった。これは、リチウムの高い反応性のため検出作業が非常に困難であったこと、また、検出可能な分析手法が限られていることによるものと考えられる。なお、G社は、自社の試験ではリチウム金属は確認されなかったとしている。

(5) 同機のメインバッテリーにおけるリチウム金属の析出

上記(4)で述べたように、リチウム金属を試験により確認することはできていないものの、2.7.4に記述したとおり、上記(1)、(2)及び(3)で述べた以下のことが確認されていることから、リチウム金属の析出が同機のメインバッテリーに発生していた可能性が考えられる。

- ・低温環境での充電の影響
- ・同型バッテリーの負極板にしわが確認されていること
- ・負極活物質組織の劣化による不均一化が進んでいた可能性があること

(6) リチウム金属の析出による内部短絡の可能性

上記(5)で述べたように、リチウム金属の析出が同機のメインバッテリーに発生していた可能性が考えられる。ただし、2.7.4に記述したとおり、適切な条件で使用されていれば、リチウム金属の析出のみにより内部短絡に至る可能性は極めて低いと考えられる。

しかしながら、3.9.1及び3.9.2のとおり、787に搭載されているバッテリーシステムにおいて、充電電流の振動現象及び過渡現象による瞬間的な高電圧が確認されており、リチウム金属の析出に、このような電氣的過渡現象あるいは他の要因が複合することにより、バッテリーの内部短絡に至った可能性が考えられる。

3.11.4 内部短絡の原因分析のまとめ

3.11.1から3.11.3において内部短絡の主な原因について分析した結果から、内部短絡の原因としては、セル内部でのリチウム金属の析出、金属片の混入、又はセパレーターの損傷の3種類が考えられる。これまでに発生した3件の類似事案が全て1月の寒冷期に発生していることを考えると、これら3種類の原因のうち、特に、低温下での充電によって生じ得るリチウム金属の析出が発生していた可能性が考えられる。ただし、リチウム金属の析出のみでベントが発生するほどの内部短絡を引き起こす可能性は低いものと考えられ、リチウム金属の析出に電氣的過渡現象あるいは他の要因が複合して内部短絡を発生させた可能性が考えられる。

しかしながら、3.11.1から3.11.3の分析においては、内部短絡の原因の可能性を示すまでにとどまり、内部短絡の発生機序を最終的に特定することはできなかった。このため、上記の要因以外の他の設計製造上の要因が内部短絡の発生に関与した可能性を完全に排除することはできないものと考えられる。

3.12 TC

3.12.1 適用基準への適合状況

3.12.1.1 適合性見解書

2.12.4(1)で記述したとおり、FAAは、LIBの危険性として、「過充電」、「過放電」及び「セル材料の燃焼性」に注目している。それらの中で、故障モードは、「過充電」及び「過放電」となるが、2.11.6.8で述べた本重大インシデント後のB社の分析で示されている因果関係図から、LIBの故障モードとしての危険性は、「過充電」と「過放電」の他に「外部短絡」及び「内部短絡」が想定される。2.11.5で記述した角田試験の結果からも、内部短絡から熱暴走が発生し得ることは明らかであり、特別要件の検討時に内部短絡の危険性を過小評価したものと考えられ、「外部短絡」と「内部短絡」を加えた全ての故障モードの危険性を過小評価することなく、検討を行うべきであったものと考えられる。

3.12.1.2 特別要件 25-359-SC

2.12.4(2)で記述したとおり、特別要件は9項目の基準が設定されている。そのうち、2番目の基準は、「LIBの設計は、温度又は圧力の自己持続的、制御不能な上昇の発生を防止するものでなければならない」となっている。同基準及びその解釈に基づき、2.12.6.2に記述したとおり、TCの安全性評価におけるセルのベントを伴う危険事象の発生確率は、「火災及び煙を伴ったベント」が $10^{-9}/\text{hr}$ 未満、「煙を伴うベント」並びに「爆発及び煙は発生しないが電解液の漏えいを伴うベント」が $10^{-7}/\text{hr}$ 未満であることとされた。

本重大インシデントの発生時点で、2.13.2(1)に記述したとおり、その9日前の平成25年1月7日にボストン事案が発生しており、2.6.1に記述したとおり、本重大インシデント発生時の787全機の総飛行時間が約5万時間であったことから、実際の運用実績による煙を伴うベント (Vent without Fire) 事案の統計的な発生確率は $4.0 \times 10^{-5}/\text{hr}$ となり、 $10^{-7}/\text{hr}$ を大きく上回る結果となっている。

3.12.1.3 セルの故障率

2.12.6.4で述べたように、TC時に行われたFMEAによると、セルの故障率に関する推定では、G社が以前から製造している類似産業用大型LIBの使用実績に

基づき、セルの故障率が求められている。この産業用大型L I Bの故障は、この解析が行われた時点でG社に報告されていなかったため、故障数を0として、故障数と総使用期間からポアソン分布を使用して、平均故障間隔を算出し、これから故障率を求めている。

この計算時には、類似産業用大型L I Bのセルと同型バッテリーのセルの大きさの違いを、係数を使用して補正していた。また、計算では、信頼水準を60%と想定していた。一般の統計解析では、信頼水準として95%や99%を用いることが多いが、当該計算では、J I S C 5 0 0 3に記載されている「信頼水準60%」を用いた可能性が考えられる。ただし、当該J I S規格は、「本質的に同一設計で連続的に製造され、確立した品質管理によって生産される電子部品であって、原則として期待される寿命期間中、一定の故障率を合理的に仮定できる部品について適用」とされている。

2. 12. 6. 4の記述のとおり、G社によれば「類似の産業用大型L I Bの電極材料と、同型バッテリーの内部材料は同一ではない」とのことであった。過充電、過放電、内部短絡等の故障の発生条件が類似しているかどうかを示されていない産業用大型L I Bの使用実績を基に故障率の推定を行ったことは、T C時の安全性評価手法として適切でなかった可能性が考えられる。また、J I S C 5 0 0 3においては信頼水準90%での故障率推定も規定されており、産業用大型L I Bの使用実績を基に解析するとしても、一般の統計解析でよく用いられる信頼水準95%や当該規格の90%を用いるべきであったと考えられる。

3. 12. 2 T C審査における内部短絡（試験）の取扱い

2. 12. 7. 1に記述したとおり、G社は、バッテリー開発段階のエンジニアリング試験として内部短絡（釘刺し）試験を行った。その結果、内部短絡を発生させてもバッテリー全体の熱暴走には発展しなかった。この結果及び類似設計のセルの信頼性の解析結果に基づき、内部短絡による熱暴走は発生しないとして、B社は、T Cの公式な証明試験に内部短絡試験は必要ないとの提案をF A Aに行った。F A Aは、この提案を受け入れ、内部短絡（釘刺し）試験を証明計画に取り入れなかった。

しかし、開発時の内部短絡（釘刺し）試験は、B C U及び負荷につながっているJ 3ケーブル、B M U、B C U又はB P C Uの信号を伝達するJ 1ケーブル並びにアース線を接続しない状態で行われた。これは、機体搭載時の状況を模擬しておらず、バッテリーボックスが非接地状態の試験となっていた。

2. 11. 5で記述したように、機体搭載時の状況を模擬した回路を接続して行われた角田試験の形態1及び形態2の試験では、熱暴走が再現された。ただし、形態1では、セルに釘を刺した直後に火炎が発生した。これは、ビデオ解析の結果、試験機

材とバッテリーの設置方法に起因する釘及び試験台の絶縁不良からのスパークによる火炎の発生と考えられる。また、形態2でも、2つ目のセルが熱伝播によりベントした直後に、アース線の加熱及びアース線が溶断する時に発生したと推定されるスパークにより火炎が発生した。なお、これらの火炎は、釘及び試験台の絶縁不良があったこと並びに試験に使用したアース線が航空機用のものではなかったことから、試験設備等の試験条件により発生したものと推定される。

しかし、形態2では、火炎の発生前に、釘を刺したセルから次のセルへの熱伝播が発生している。一般的に高温であるバッテリーの方が熱エネルギーが大きいことから、バッテリーに蓄えられているエネルギーは、充電容量が同じであれば、高温であるバッテリーの方が大きい。そのため、形態1の試験において、火炎が発生しなかった場合でも熱伝播が発生したものと推定される。

形態3の試験は、温度の条件は異なるが、開発時にエンジニアリング試験として行われた内部短絡（釘刺し）試験と同じ設定での試験であり、熱伝播は発生しなかった。

形態1及び形態2の試験後にバッテリーを解体した結果、釘を刺した6番セルは、セルのS1とブレースバーとが溶着されていた。これは、アーク放電によるものと推定され、バッテリーボックスにアース線が接続されていない状態では発生しないことが、形態3の試験により確認された。

開発時に行われたエンジニアリング試験では、バッテリーボックスにアース線が接続されていなかったためアーク放電の影響を受けず、熱伝播が発生しなかったと推定される。

このことから、機体搭載時の状態を模擬していない試験を根拠に、安全性の評価に内部短絡試験を入れなかったことは、適切ではなかったものと推定される。航空機装備品の試験方法は、実運用を適切に模擬したものでなければならないとの原則が、結果的には、十分に守られていなかったと推定される。

3.12.3 現在のLIBの耐空性審査基準(TSO-179a/RTCA DO-311)

2.12.8の記述のとおり、現在、航空機装備品としてのLIBの耐空性審査基準として、TSO-179aが策定されている。TSO-179aには、最低運用性能基準が規定されているが、具体的な基準はRTCA/DO-311を参照するよう指示している。

しかしながら、RTCA/DO-311では、内部短絡を適切に模擬する具体的な試験方法が示されていないため、仮に、787のLIBの適用基準にRTCA/DO-311が採用されていたとしても、実運用を適切に模擬した内部短絡試験が行われたかは明確ではない。航空機搭載の環境条件を適切に模擬する内部短絡試験が実施されるように耐空性審査基準及びRTCA/DO-311を改正すべきである。

4 結 論

4.1 分析の要約

以上に述べたことから、メインバッテリー不具合発生に関する分析を要約すると、以下のとおりである。

(1) 気象との関連

本重大インシデントを含むバッテリー不具合が全て冬期に発生したことは現時点では無視できず、低温環境が同型バッテリーの不具合の発生に関与した可能性が考えられる。 (3.3)^{*10}

(2) 角田試験結果等の分析

① ベント発生時のコンタクター誤作動

角田試験では、セルのベントが発生した後に過充電が発生していないにもかかわらずコンタクターが開放することが確認された。 (3.7.2)

② ベント後のセルケースとバッテリーボックスの短絡

形態2（アース線接続）では、アース線の電流変化を見ると6番セルのベント後約30秒でアース線に1,000A前後の電流が発生しており、このタイミングで膨張した6番セルのセルケースとブレースバーが接触したと考えられる。セルケースが接地短絡したことにより6番セルの正負極はアース電位になったものと推定される。 (3.7.3)

③ アーク放電の発生

形態2では、6番セルのセルケースとブレースバーにアーク放電による溶着が確認された。アース線に大電流が流れたことと併せて考えると、6番セルのセルケースとブレースバーの短絡が断続的に発生したため、アーク溶接のようなアーク放電が発生したと推定される。 (3.7.4)

④ アース線の溶断

形態2では、7番セルベント後の1,010Aの高電流発生時にアース線が切れたものと推定される。 (3.7.5)

⑤ 角田試験の形態2と形態3の相違

形態2では熱伝播が発生し、形態3（アース線非接続）では熱伝播が発生しなかった主な理由は、アース線が接続されていると接地短絡して大電流が流れることによりアーク放電が発生するが、アース線が接続されていないと

*10 本項の各文章末尾に記載した数字は、当該記述に関連する「3 分析」の主な項番号を示す。

大電流が流れずアーク放電が発生しないことによるものと考えられる。

(3.7.6)

(3) メインバッテリー損壊の経過に関する分析

① CTスキャン画像による各セルの変形状態から、最初にベントが発生したセルは3番セル又は6番セルと推定され、フライトレコーダーに記録されたメインバッテリー電圧、角田試験等の結果及びメインバッテリーの損傷状況から、最初にベントしたセルは、6番セルと推定される。(3.8.1)

② バッテリー内の1セルをベントさせると、コンタクターが開放する誤作動が高い確率で発生することが分かっており、同機のメインバッテリーでも、同様にコンタクターの開閉が発生したと推定される。(3.8.2)

(4) バッテリーの充電制御

① 充電電流の振動

実機検証等において確認された充電電流の振動は、バッテリーの容量からみて相当小さいが、短時間で浅い充放電が頻繁に繰り返されること、不要な振動であること、バッテリーの寿命に影響すると考えられることから、改善されることが望ましい。(3.9.1)

② 放電時における過渡現象による瞬間的な高電圧

B社の試験において、放電時にコンタクターの動作確認が行われると各セルに瞬間的な高電圧が印加されることが確認された。実機検証でも放電時にコンタクターの動作確認が行われることが確認されたことから、同機においても過渡現象による瞬間的な高電圧が各セルに印加される可能性が考えられる。(3.9.2)

(5) 発熱現象の原因

バッテリーの発熱現象の主な原因としては、過充電、過放電、外部短絡、セルケースの短絡及び内部短絡が考えられるが、フライトレコーダーの記録及びバッテリーの損傷状況等から、バッテリー発熱現象の原因は、これらのうち内部短絡であった可能性が高いと考えられる。(3.10)

(6) 内部短絡の原因に関する分析

① セル内部への金属片の混入

2つのセルの内部から金属片が発見されており、セル内部に金属片が混入していた可能性を完全に否定することはできないと考えられる。(3.11.1)

② セル内部のセパレーターの損傷

セパレーターの損傷は、製造時の極微小な破れなどからエレメントを巻く時のテンションにより亀裂が生じる可能性、充放電時に亀裂が生じる可能性

並びに熱による溶融及び収縮が生じる可能性が考えられる。熱による溶融及び収縮については、本重大インシデントで発熱現象が発生したのはメインバッテリーであるため、セパレーターを溶融及び収縮させる温度上昇が抵抗発熱によって発生した可能性は低いと考えられる。(3.11.2)

③ セル内部のリチウム金属の析出

a 低温環境の関与

本重大インシデントを含めた類似3事案が寒冷期のほぼ同時期に発生していることから、低温環境が内部短絡の発生に関与した可能性を否定することはできないと考えられる。

寒冷期の間、飛行ルートや就航地などの条件によって不規則に、セル内部のエレメントの温度が低温のまま充放電が繰り返し行われていた可能性が考えられる。(3.11.3 (1))

b 負極板のたわみ及びしわ

製造工程で確認されたたわみ及び同型機から取り卸した同型バッテリーから発見されたしわのようなエレメントの不均一な形成は、正負極板間の距離の不均一を引き起こしリチウム金属の析出を助長する可能性がある。

しわが形成された理由については、LIBの充放電に伴う膨張及び収縮による可能性又は製造工程に関与した可能性が考えられる。(3.11.3 (2))

c セル内部の劣化

同機のメインバッテリーの場合、使用期間によるセル内部の劣化の可能性は低いものと考えられる。

しかし、BCUの充電電流の振動がバッテリーの寿命に影響すると考えられ、この振動によりセル内部の劣化が進み、負極活物質組織の劣化による不均一化が進んでバッテリー性能に影響していた可能性が考えられる。

(3.11.3 (3))

d 同機のメインバッテリーにおけるリチウム金属の析出

リチウム金属を試験により確認することはできていないものの、低温環境での充電の影響、同型バッテリーの負極板にしわが確認されていること及び負極活物質組織の劣化による不均一化が進んでいた可能性があることから、リチウム金属の析出が同機のメインバッテリーに発生していた可能性が考えられる。(3.11.3 (5))

e リチウム金属の析出による内部短絡の可能性

適切な条件で使用されていれば、リチウム金属の析出のみにより内部短絡に至る可能性は極めて低いと考えられる。

しかしながら、787のバッテリーシステムで確認されている充電電流

の振動及び過渡現象による瞬間的な高電圧が確認されており、リチウム金属の析出に、このような電氣的過渡現象あるいは他の要因が複合することにより、バッテリーの内部短絡に至った可能性が考えられる。

(3.11.3 (6))

④ 内部短絡の発生原因

内部短絡の原因についての分析結果から、内部短絡の原因としては、セル内部でのリチウム金属の析出、金属片の混入又はセパレーターの損傷が考えられるが、これまでに発生した3件の類似事案が全て1月の寒冷期に発生していることを考えると、特に、リチウム金属の析出が発生していた可能性が考えられる。ただし、リチウム金属の析出のみでベントが発生するほどの内部短絡を引き起こす可能性は低いものと考えられ、リチウム金属の析出に電氣的過渡現象あるいは他の要因が複合して内部短絡を発生させた可能性が考えられる。

しかしながら、内部短絡の発生機序を最終的に特定することはできなかった。このため、上記の要因以外の他の設計製造上の要因が内部短絡の発生に関与した可能性を完全に排除することはできないものと考えられる。

(3.11.4)

(7) T C

① 適用基準への適合状況

a 適合性見解書

F A Aは、L I Bの危険性として、故障モードとして「過充電」及び「過放電」並びに「セル材料の燃焼性」のみに注目していた。F A Aは、特別要件の検討時に内部短絡の危険性を過小評価したものと考えられる。

(3.12.1.1)

b 特別要件 25-359-SC

本重大インシデント発生時の787全機の総飛行時間が約5万時間であったことから、実際の運用実績による煙を伴うベント (Vent without Fire) 事案の統計的な発生確率は $4.0 \times 10^{-5}/\text{hr}$ となり、設計時の許容発生確率 $10^{-7}/\text{hr}$ を大きく上回る結果となった。

(3.12.1.2)

c セルの故障率

セルの故障率の計算時には、787用バッテリーと材料の異なる類似産業用大型L I Bの実績が使用されていた。また、この計算では信頼水準を60%と想定していた。一般の統計解析では、信頼水準として95%や99%を用いることが多いが、当該計算では、J I S C 5003に記載されている「信頼水準60%」を用いた可能性が考えられる。

② TC審査における内部短絡（試験）の取扱い

機体搭載時の状況を模擬した回路を接続して行われた角田試験では、熱暴走が再現された。G社が開発時に行ったエンジニアリング試験では、機体搭載時の状況を模擬しておらず、熱伝播は発生しなかった。

このことから、機体搭載時の状態を模擬していない試験を根拠に、内部短絡のリスクを過小評価して、TC試験を行わなかったことは、適切ではなかったものと推定される。(3.12.2)

③ 現在のLIBの耐空性審査基準(TSO-179a/RTCA DO-311)

現在、LIBの耐空性審査基準TSO-179aが参照するよう指示しているRTCA/DO-311では、内部短絡を適切に模擬する具体的試験方法が示されていない。航空機搭載の環境条件を適切に模擬する内部短絡試験が実施されるよう、RTCA/DO-311を改正すべきである。

(3.12.3)

4.2 原因

本重大インシデントは、同機が離陸上昇中メインバッテリーが熱暴走を起こしたため、高松空港に緊急着陸して誘導路上で非常脱出を行ったものである。

メインバッテリーの熱暴走は、6番セルがセル内部の発熱現象でベントしたことにより熱伝播の起点となって発生したものと推定される。発熱により膨張したセルケースとブレースバーが接触してアース線を介して接地短絡したことによりバッテリーボックス内に大電流が流れてアーク放電が発生したことが熱伝播を助長して熱暴走に至り、バッテリーの損傷を拡大させたものと推定される。

6番セル内部の発熱現象は、内部短絡によるものと考えられるが、その発生機序を最終的に特定することはできなかった。

本重大インシデントにおいては、1つのセルの内部短絡による発熱現象が他のセルに伝播してバッテリーの損傷を拡大させることとなったが、熱伝播に至ったことについては、同型バッテリーの開発時の試験において航空機への装備状態が適切に模擬されず、内部短絡の影響が過小評価されたことが関与したものと考えられる。

5 再発防止策

5.1 B社により講じられ、F A Aにより承認された再発防止策

5.1.1 B社の施した対策

(1) 不具合要因となる可能性を排除するための対策

- ① 電極ナットの締めつけ状態の改善
- ② 電解液への電圧負荷改善
 - ・セルへの絶縁処置
 - ・バッテリーケース内下面の絶縁処置
 - ・セル間、セルとバッテリーケース間の絶縁処理
 - ・バッテリーケース内上面の絶縁処理
 - ・バッテリーケース内ブレースバーの絶縁処置
 - ・結露対策のため、バッテリーケース及び下部セル固定枠に排水口を新設
 - ・バッテリーの満充電時の電圧引下げ
 - ・B C Uの出力電圧の変更
 - ・バッテリー充電電流の安定化
- ③ 過放電対策
 - ・B M Uの改善
- ④ 製造時の不具合除去
 - ・完成検査の厳格化
 - ・製造時の品質管理等の強化

(2) セル間の伝播への対策

- ① セル間、セルとバッテリーケース間の絶縁処理（再掲）
- ② バッテリーケース及び下部セル固定枠に排水口を新設（再掲）
- ③ バッテリーケース内配線の耐熱処理
- ④ 噴出ガスを逃がすための配管の設置

(3) バッテリーのベント等への対策

- ① バッテリーを覆う箱（エンクロージャーボックス）の設置（バッテリーはこの箱の中で絶縁されている。この箱は機体にアースされている。）
- ② 噴出ガスを逃がすための配管の設置（再掲）

5.1.2 上記対策の有効性

2.13.2(2)に記述したように、平成26年1月14日、成田国際空港に駐機していた運航準備中の同型機において、メインバッテリーの5番セルがベントした。

本件については航空局が調査を実施中であるが、今までの調査によると、セルはベントしたが熱伝播は発生せず、電解液等の内容物はバッテリーを覆う箱の中に閉じ込められ、セルケースとブレースバーの間のアーク放電も発生しなかった。噴出ガスはそれを逃がすための配管により機外に排出された。

5.2 FAA及び航空局の対応

5.2.1 FAAの対応

平成25年1月16日（米国東部標準時）、FAAは「787の次回飛行までにFAAの認める改修等の措置を実施すること」とのAD2013-02-51を発行した。この時点での787全機の総飛行時間は約5万時間であった。

同年4月22日、FAAは具体的改修指示（Boeing Service Bulletin B-787-81205-SB 500003-00, Issue 001, dated April 19, 2013）に関するAD2013-08-12を発行し、改修の終了した機体から飛行の再開を許可した。

5.2.2 航空局の対応

航空局は、同年4月26日に上記ADに基づく耐空性改善通報（国航機第92号）を発行した。その際、787を運航している我が国航空会社に対して、「機材の点検・整備、運航乗務員の能力の確保等に万全の措置を講ずるとともに、利用者等に対する適切な情報開示を実施することとされたい」と要請した。これを受け、我が国航空会社は以下の内容を追加措置として実施した。

- (1) 改修後の確認飛行
- (2) バッテリーに対する安全性の確認
 - ① 飛行中のバッテリーの監視
 - ② 使用したバッテリーのサンプリング検査
- (3) 運航乗務員の慣熟飛行
- (4) 利用者に対する情報開示

6 安全勧告

6.1 米国連邦航空局が講ずべき措置

本重大インシデント調査において実施した内部短絡（釘刺し）試験では、バッテリーを機体に搭載した状態を模擬し、バッテリーボックスにアース線を接続した試験で熱暴走が発生したが、アース線を接続しなかった試験では熱暴走が発生しなかった。

この試験結果並びにその他の試験結果及び解析から、本重大インシデントにおいてメインバッテリーが熱暴走を起こしたのは、6番セルが熱伝播の起点となり、6番セルとブレースバーが接触してアース線を介して接地短絡したことによりバッテリーボックス内に大電流が流れてアーク放電が発生したことが熱伝播を助長して熱暴走に至り、バッテリーの損傷を拡大させたものと推定される。

開発時に行われたエンジニアリング試験では熱伝播が発生しなかったが、これはバッテリーボックスにアース線が接続されていなかったためと推定される。このことから、機体搭載時の状態を模擬していない試験を根拠に、安全性の評価に内部短絡試験を含めなかったことは、適切ではなかったものと推定される。

航空機搭載用LIBに適用される現行の基準においては、試験の環境条件として、温度、湿度、加速度等の要件はあるものの、周囲の航空機システムとのインターフェイスに関わる電気的環境については必ずしも十分には規定されていないおそれがある。なお、当委員会に提出された安全性解析書のFTAにおいては、熱伝播のリスクは評価されていない。

また、型式証明においては、煙を伴うベントの発生確率は $10^{-7}/\text{hr}$ （1,000万飛行時間に1回）未満であるものと想定されていたが、現実には、787の累計飛行時間が約25万時間の時点で、発熱現象が3回発生しており、結果的に、その想定を大きく上回る発生率となっている。型式証明におけるセルの故障率の推定は、類似型式LIBの実績から算出されたものであるが、その算出手法は適切ではなかった可能性が考えられる。

さらに、セルのベントが発生した場合には設計時に想定されていなかったコンタクターの開放が発生するものと推定され、全電源喪失時のリスクを再評価する必要性を検討すべきである。

運輸安全委員会は、上記のような本重大インシデント調査の結果を踏まえ、米国連邦航空局が、次の措置を講ずるよう勧告する。

- (1) 航空機装備品の試験が実運用を適切に模擬した環境で行われるよう航空機製造者及び装備品製造者を指導すること。
- (2) LIB試験において電気的環境が適切に模擬されるように、技術基準を見直し、必要があれば技術基準の改正を行うこと。
- (3) 同型式機のTC時のLIBの故障率の想定について見直しを行い、その結果を踏まえ、必要があればLIBの安全性評価の見直しを行うこと。
- (4) 同型式機のTCにおいて、セル間の熱伝播リスクが適切に評価されているか見直しを行うこと。
- (5) 同型式機のセルがベントした後に発生するコンタクターの動作が、運航に与

える影響を検討し、その結果を踏まえ、必要な措置を講じること。

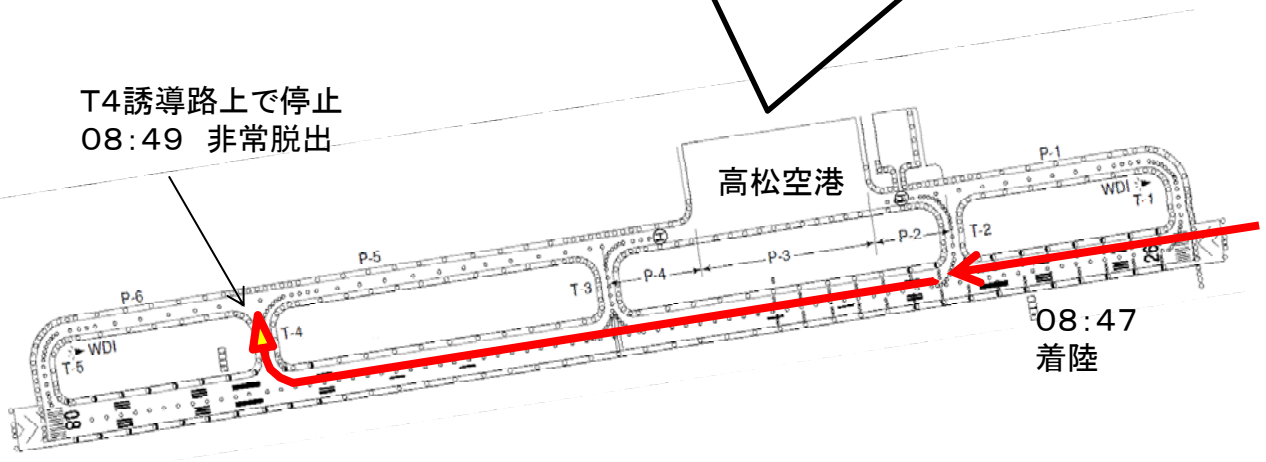
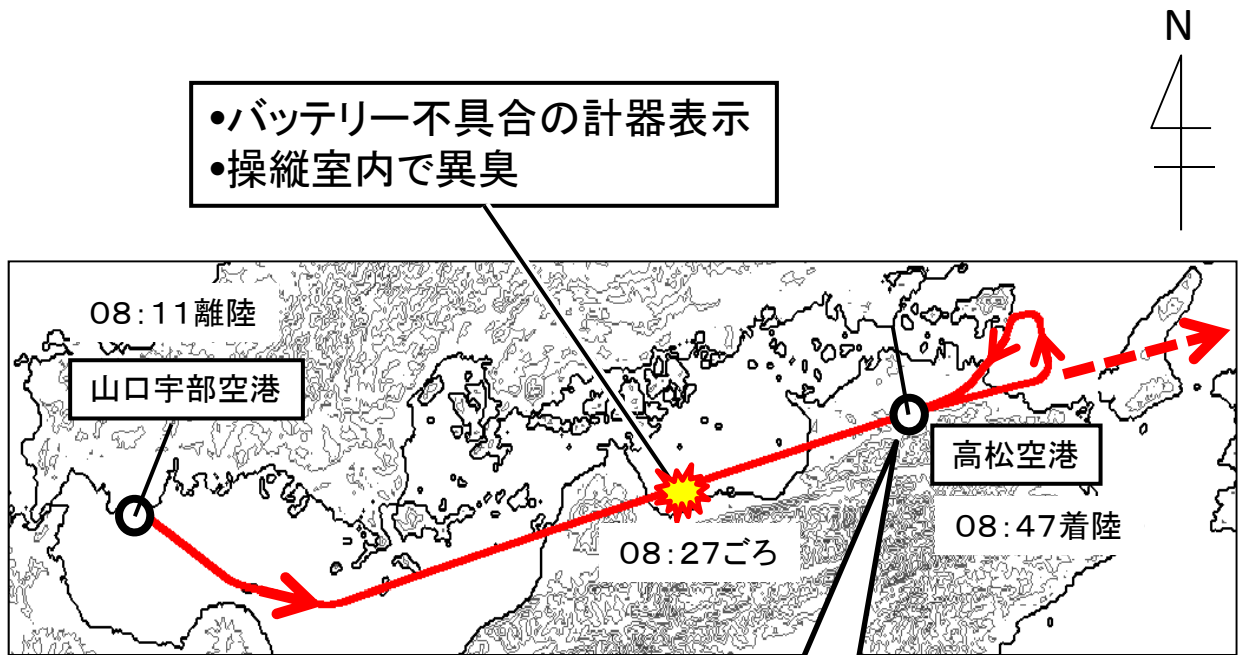
6.2 同機的设计・製造者であるボーイング社に対して指導すべき措置

本調査においては、内部短絡の発生機序を最終的に特定することはできなかったが、これまでに発生した類似事案に本重大インシデントを加えた類似3事案全てが1月の寒冷期に発生していること、及び低温環境はリチウム金属の析出を助長すると言われていたことから、地上係留中の低温環境が内部短絡に関与した可能性が考えられる。また、本重大インシデントの原因への関与が疑われる製造工程に起因する事象が報告されている。さらに、本重大インシデントの調査において、バッテリーの充電制御に関して、設計時に想定されていないBCUの動作及びコンタクターの動作確認が確認された。

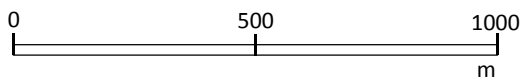
これらを踏まえ、米国連邦航空局はボーイング社に対し、以下の措置を講じるよう指導すること。

- (1) エレメントの不均一な成形及び他の製造工程に起因する事象との関連の可能性も踏まえ、内部短絡の発生機序について更に調査を継続すること。また、その結果を踏まえ、さらなるLIBの品質と信頼性の向上を図るとともに、温度等のLIBの運用条件についても見直しを行うこと。
- (2) 設計時には想定されていないBCUの動作及びコンタクターの動作確認について改善を図ること。

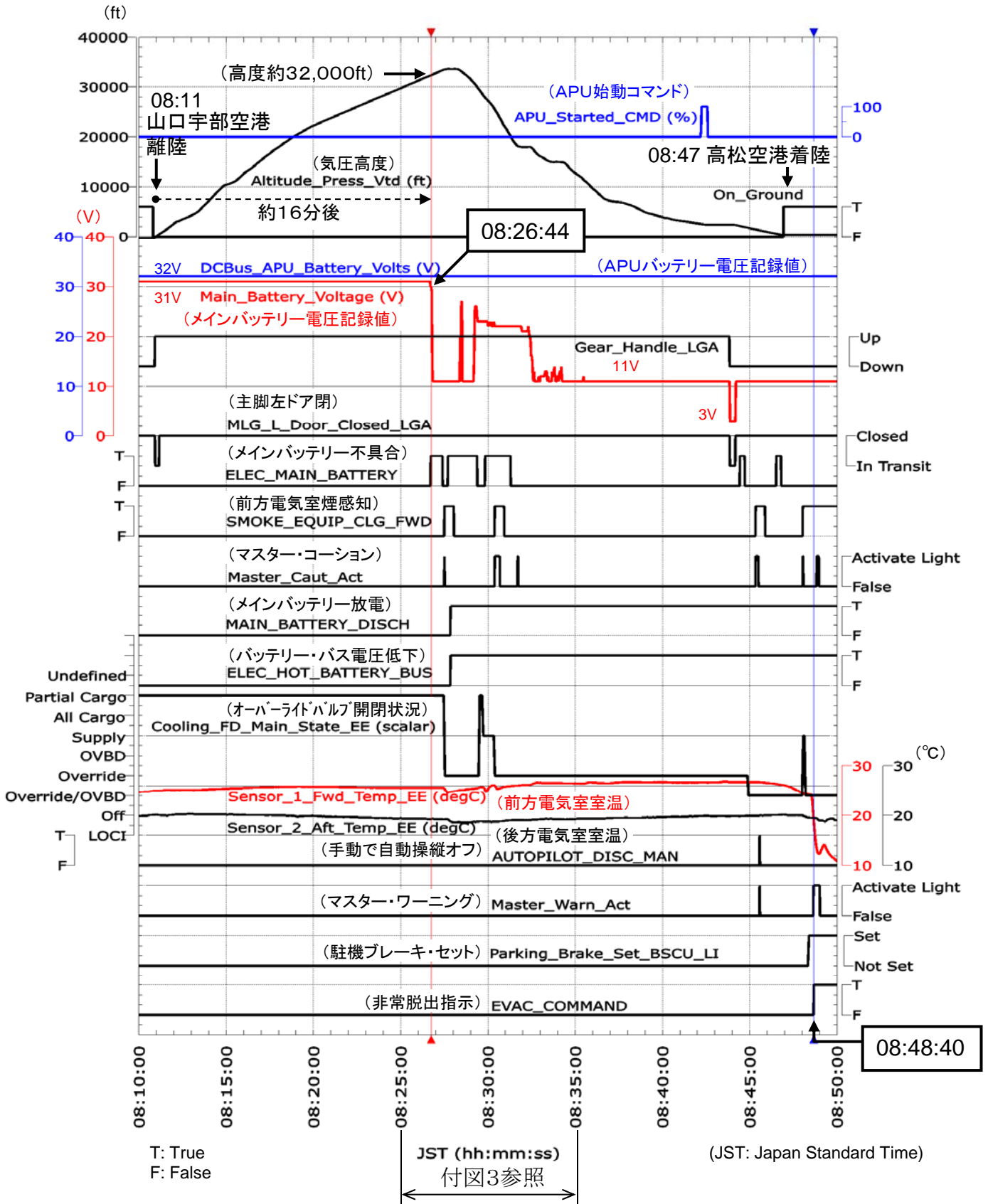
付図1 推定飛行経路図



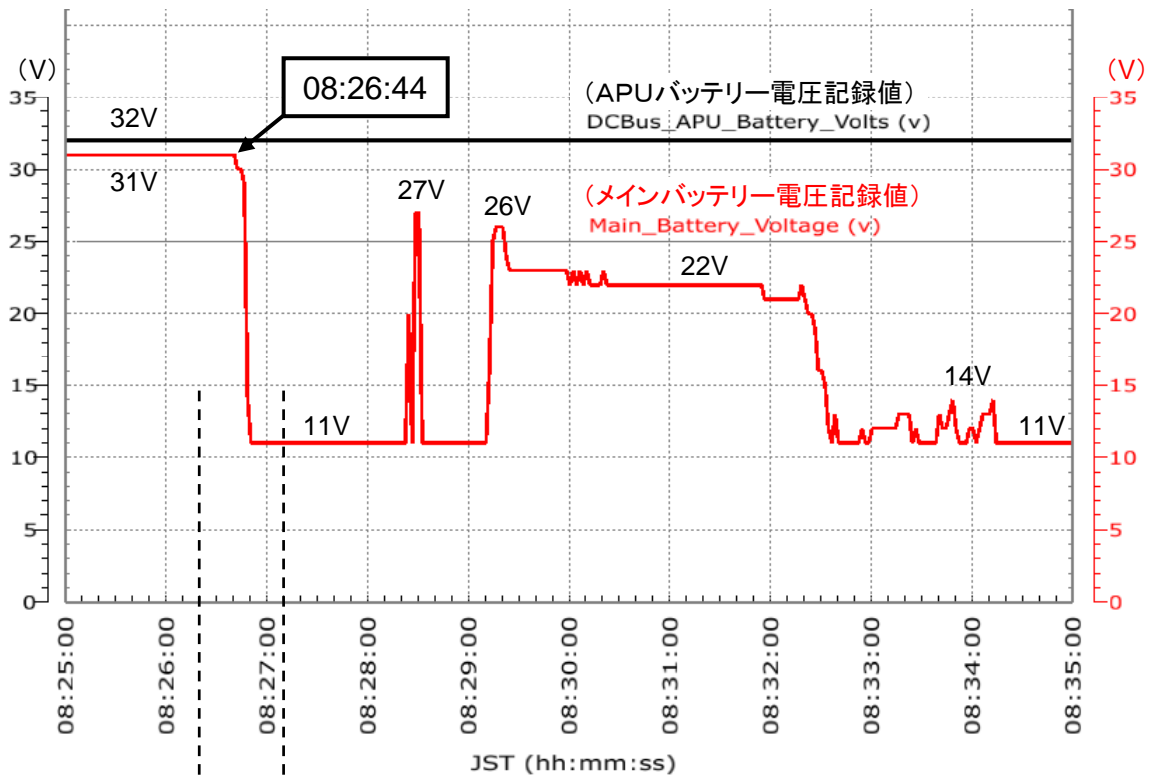
風向 140°
風速 4kt
(09時00分の高松空港の風)



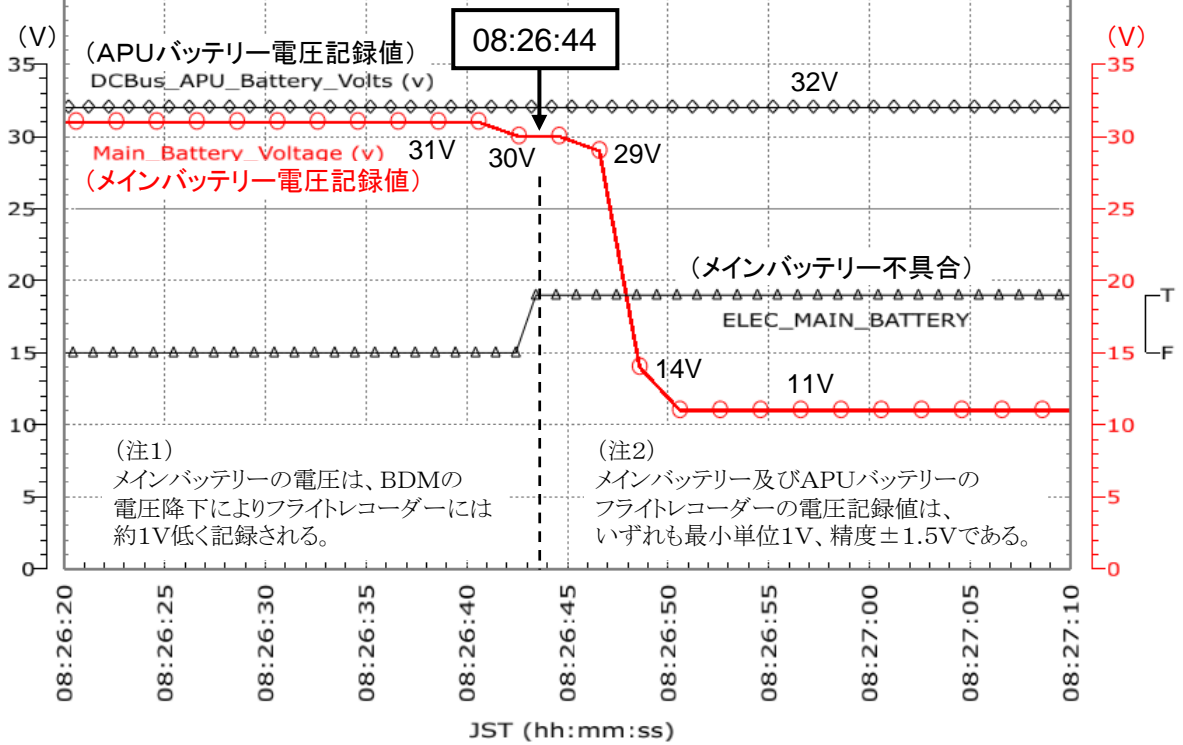
付図2 フライトレコーダーの記録



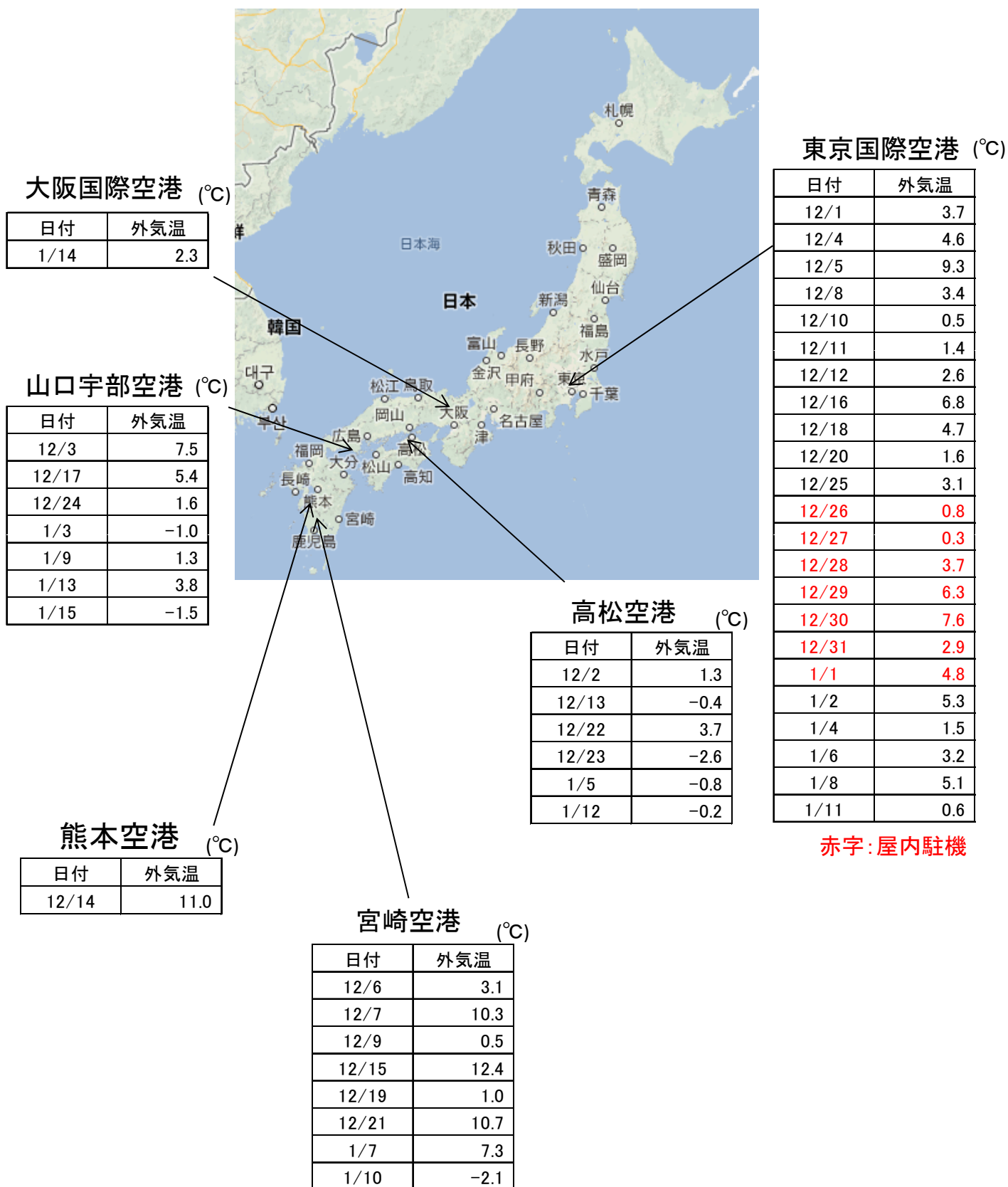
付図3 バッテリー電圧の変化



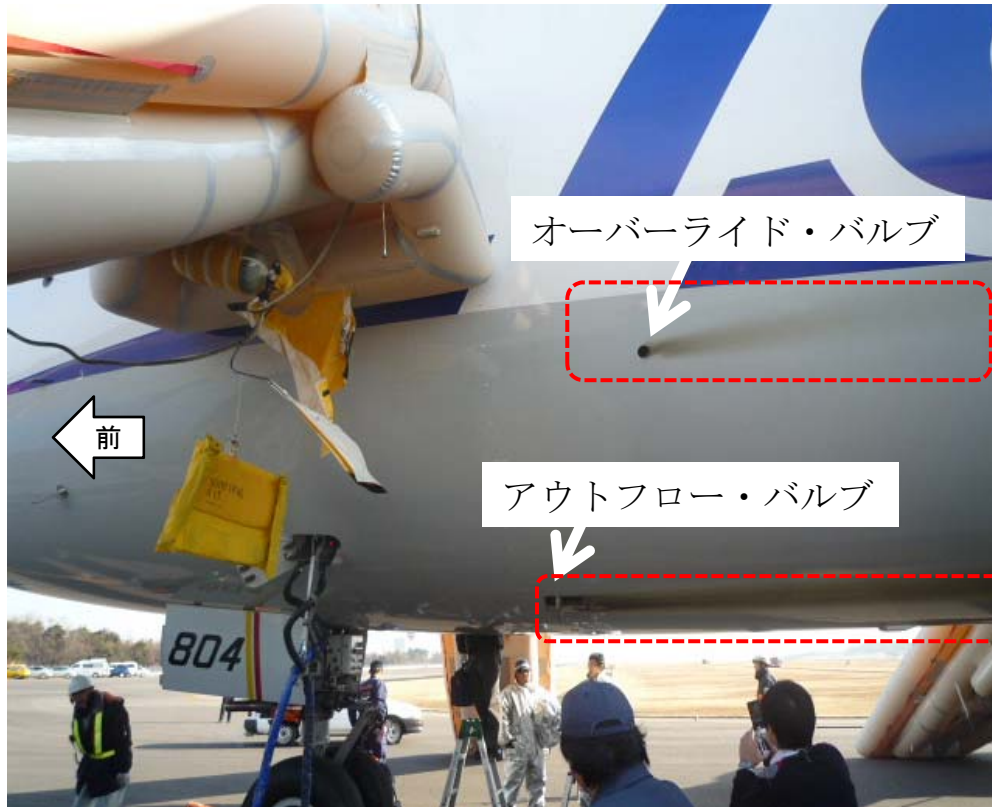
拡大図



付図4 同機の夜間係留地における最低外気温
(2012/12/1~2013/1/15)



写真Ⅰ 機外の状況



写真Ⅱ メインバッテリーの状況



外観



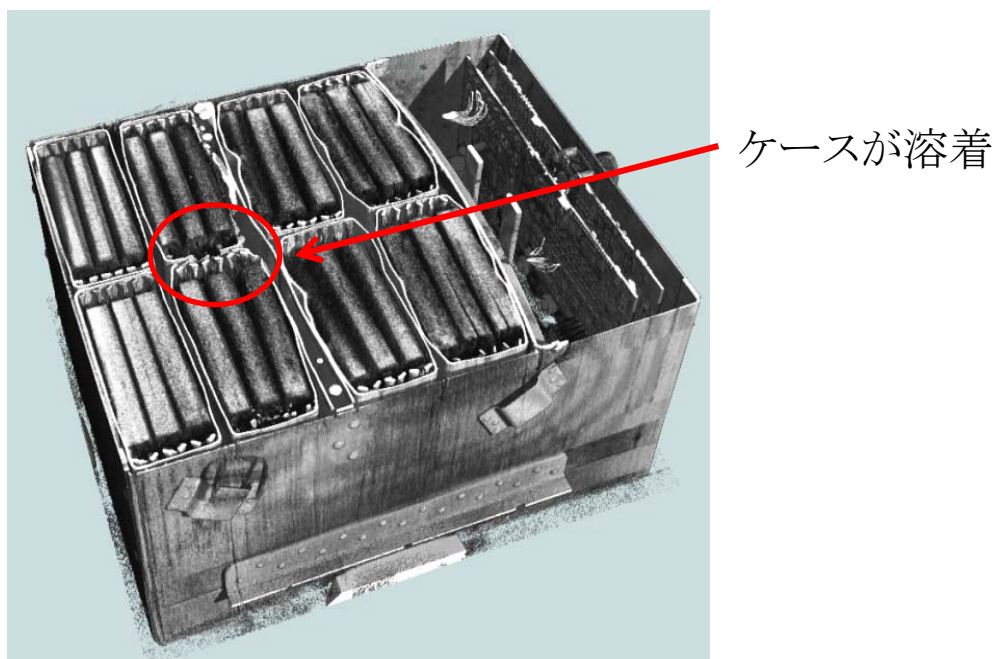
内部

写真Ⅲ メインバッテリー上面の状況

- 3番セルの正極は溶解
- ナット及びワッシャーは残っていた
- 3番セルと4番セルをつなぐバスバーが溶断



写真Ⅳ メインバッテリー内部の状況



写真V 各セルの外観



1 番セル



2 番セル



3 番セル

6 番セル



5 番セル

4 番セル

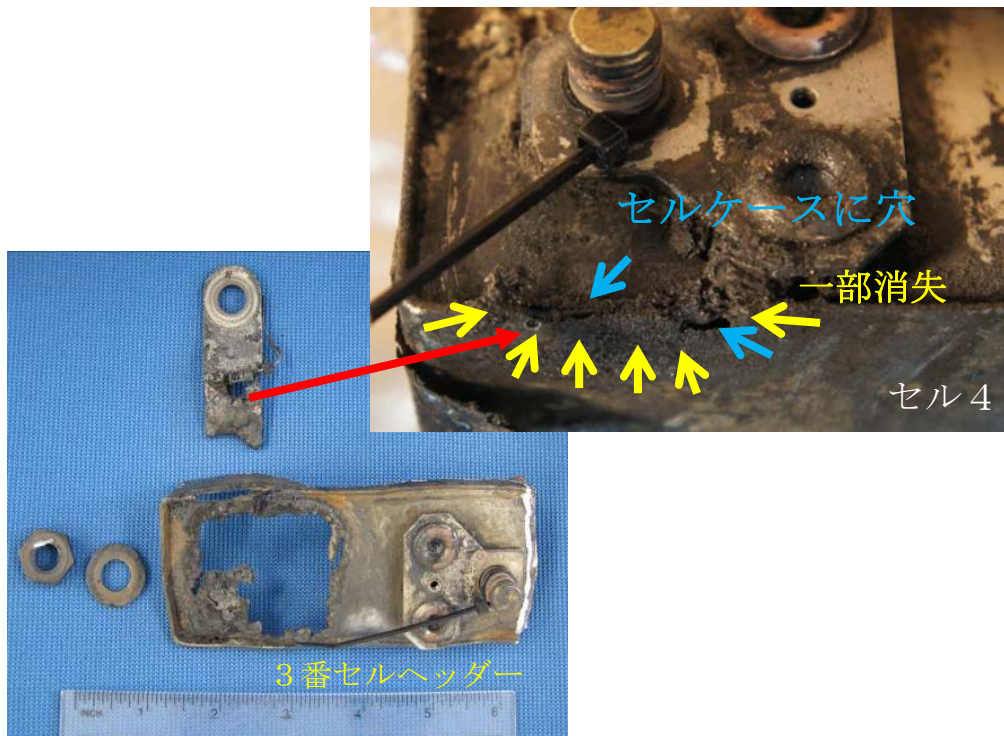


7 番セル



8 番セル

写真VI 3番セルの状況



写真Ⅶ 4番セル内部の状況



写真Ⅷ 5番セルの状況



S 1

エレメントの状況

写真IX 6番セルの状況



ブレースバーのこの部分がセルケースに溶着



写真X 安全弁の状況



1 番セル : 開



2 番セル : 開



3 番セル : 開



4 番セル : 閉



8 番セル : 開



7 番セル : 開

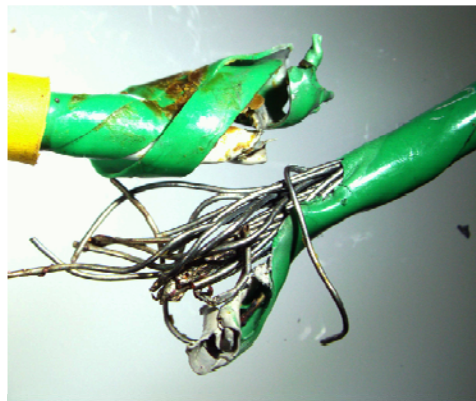
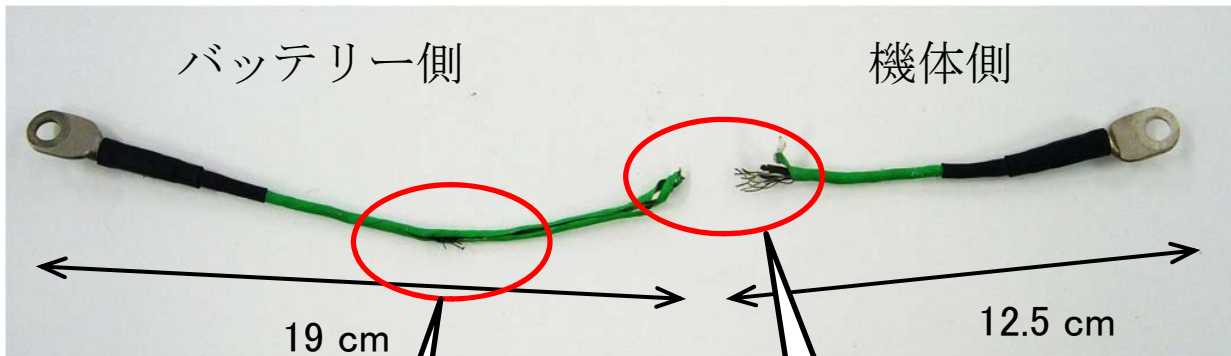


6 番セル : 開



5 番セル : 閉

写真XI アース線の状況



高松空港における空港消防機関等の対応状況

- 08時31分 関西アプローチからTWRへ、同機からエマージェンシーのため高松空港へ着陸したい旨の連絡があった。その情報はTWRから管制事務室、空港長、総務課長を経由して保安専門官に伝えられた。
- 08時37分 東京RCCから運航情報官へ、同機がコックピットスモークにより緊急事態を宣言し、高松空港へダイバートする旨の連絡があった。
- 08時41分 保安専門官は保安協会に、第2種出動を指示した。
TWRは関西アプローチ／運航情報官／保安専門官にクラッシュホンにより、同機の現在位置が香川VORの15nm北東、高度3200ftで、高松空港到着予定が08時46分である旨を連絡した。
保安専門官は高松市南消防署に、クラッシュホンの内容を直通電話により通報した。
- 08時42分 消防1号車、消防2号車及び消防5号車がスタンバイポジションに向けて出動し、消防1号車及び消防5号車がスタンバイポジション（T3誘導路）に08時43分に、消防2号車がスタンバイポジション（T1誘導路）に待機完了した。
保安専門官は県警本部に、クラッシュホンの内容を直通電話で通報した。
- 08時45分 指揮車がスタンバイポジション（T3誘導路）に向け出動し、待機完了した。
- 08時47分 同機は高松空港に着陸し、消防1号車、消防2号車、消防5号車及び指揮車が同機を追尾した。
TWRは関西アプローチ／運航情報官／保安専門官に、クラッシュホンにより、同機が08時47分に着陸した旨を連絡した。
- 08時48分 同機はT4誘導路に停止した。
前脚取付部付近から白煙が出ているのを視認した追尾中の保安専門官は、その旨をTWRにマルチ・チャンネル・アクセス(MCA)により連絡し、TWRはその情報を同機の機長に伝えた。
TWRは運航情報官に、同機から煙が発生している状況を確認した旨連絡した。
- 08時49分 同機のR1～R4及びL1～L3ドアが開放され、乗客は脱出用シューターにて機外への脱出を開始した。
出動中の保安専門官は、脱出した乗客に同機から離れるようスピーカーによる呼び掛けを実施するとともに、保安協会に非常順次通報装置の起動を指示した。
- 08時50分 非常順次通報装置が起動した。

TWRは運航情報官に、同機はT4でエンジンを停止し、乗客がシューターにより脱出している旨を連絡した。

運航情報官はTWRに滑走路を閉鎖する旨通知した。

- 08時52分 乗客及び乗務員の脱出が完了した。
- 08時56分 保安専門官は同機の機長に、搭乗者数及び乗客の安否を確認するよう依頼し、09時15分に乗者数及び安否に係る情報を口頭で受けた。
- 09時05分 客室乗務員及び乗客がターミナルビルに向けて徒歩による移動を開始した。
- 09時25分 保安専門官、ANA整備士及び市消防局隊員が現場確認を開始した。
- 09時35分 市消防局より腰を打撲（軽傷）した男性乗客1名を県立中央病院へ救急搬送した旨の報告があった。
- 09時49分 市消防局は保安専門官に、機体の安全を確認した旨の報告を行った。
- 10時04分 高松市消防局の車両が現場から撤収を開始し、10時25分に撤収を完了した。
- 10時34分 保安専門官は消防1号車、消防2号車及び消防5号車に、現場からの撤収を指示し、10時40分に撤収が完了した。

角田宇宙センターでの熱伝播試験

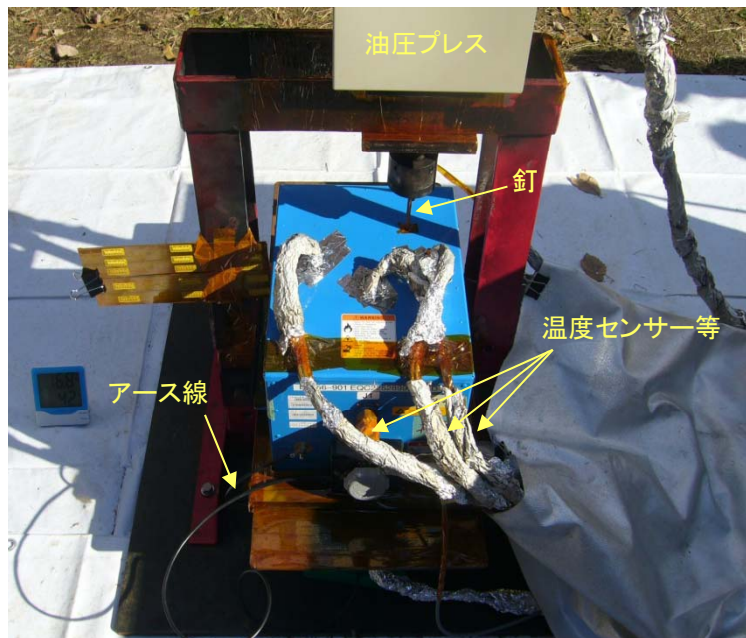
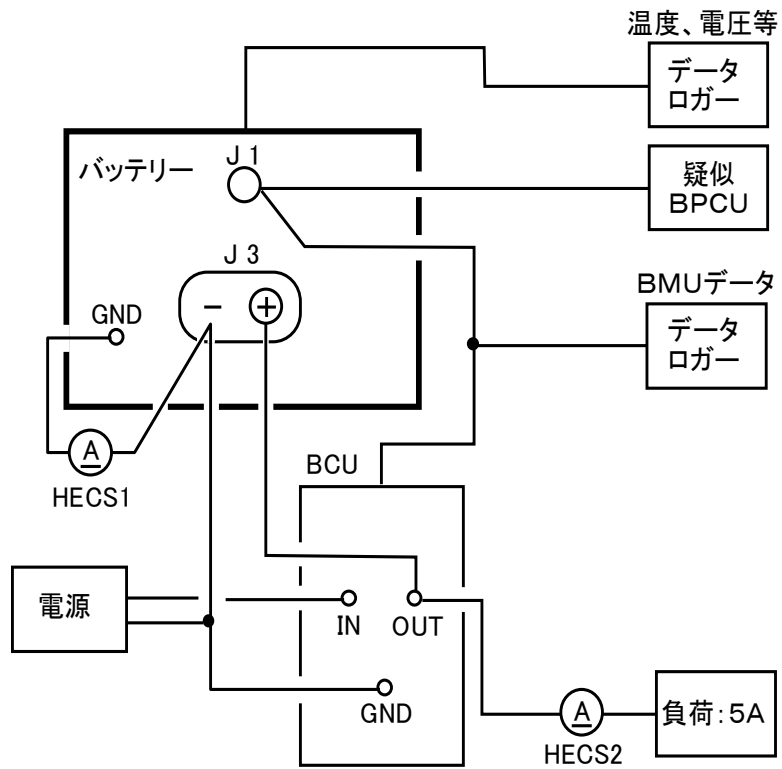
1 目的

バッテリーの航空機搭載状況を模擬した状態で、6番セルを起源とする熱伝播の様子を確認する。

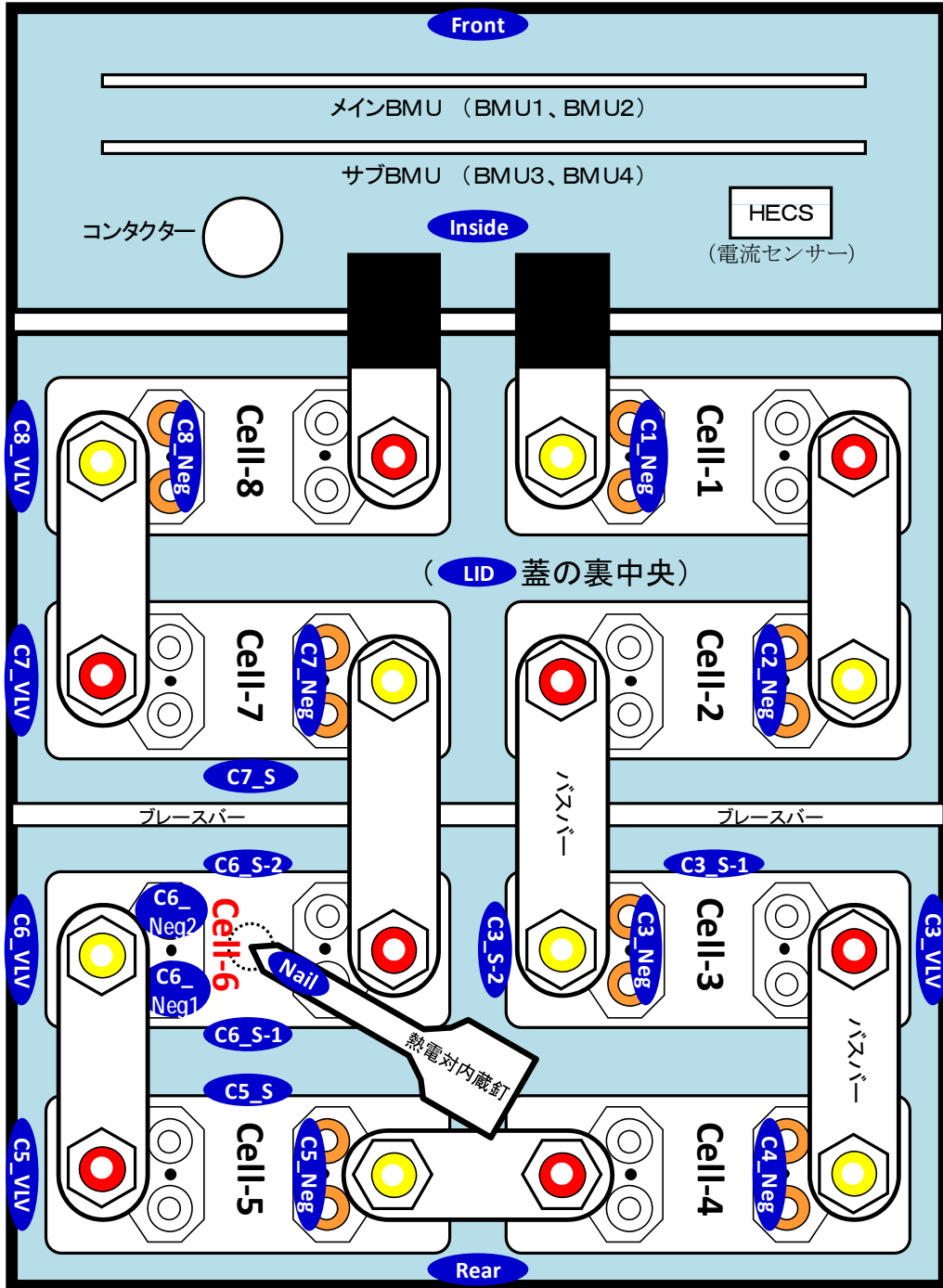
2 試験形態

| 試験形態 | バッテリー製造番号 | トリガー | セル製造番号 |
|------|-----------|---|--|
| 1 | 463 | 釘刺し (予熱70°C) 充電46A 負荷5A | Cell1: 53800299 A Cell2: 53800318 B Cell3: 53800245 A Cell4: 53800320 B Cell5: 53800363 A Cell6: 53800346 B Cell7: 53800362 A Cell8: 53800386 B |
| 2 | 413 | 釘刺し (予熱30°C) 充電46A 負荷5A | Cell1: 53780258 A Cell2: 53780147 B Cell3: 53780253 A Cell4: 53780237 B Cell5: 53780215 A Cell6: 53780143 B Cell7: 53780140 A Cell8: 53780142 B |
| 3 | 189 | 釘刺し (予熱30°C) J1、J3及び アース端子 開放 | Cell1: 53300208 A Cell2: 53300234 B Cell3: 53300209 A Cell4: 53300235 B Cell5: 53300210 A Cell6: 53300236 B Cell7: 53300212 A Cell8: 53300237 B |

付図2-1 試験設定



付図 2 - 2 温度センサーの配置



Th : 温度センサー(熱電対)

○ : 正極(+)

○ : 負極(-)

Neg : セル上部負極

S : セルケース外側側面中央

VLV : バッテリーケース内側側面
(安全弁付近)

付図2-3 試験結果

本試験において、バッテリーの機体搭載状況を模擬した試験(形態1及び2)においては、1セルの内部短絡からアース線が溶断し熱伝播に発展した。機体搭載状況を模擬しなかったバッテリー単体での試験(形態3)では、1セルの内部短絡から熱伝播は発生しないことを確認した。

| 試験形態 | バッテリー番号 | トリガー | セル番号 | 試験結果 |
|------|---------|--|--|--|
| 1 | S/N 463 | 釘刺し (予熱70℃) 充電46A 負荷5A | Cell1: 53800299 A Cell2: 53800318 B Cell3: 53800245 A Cell4: 53800320 B Cell5: 53800363 A Cell6: 53800346 B Cell7: 53800362 A Cell8: 53800386 B | 11:27 釘刺し、Cell6 vent 11:32 Cell5 vent アース線に600~200A(30秒) 11:34 Cell(?) vent 11:35 Cell(?) vent Cell5~8のみvent |
| 2 | S/N 413 | 釘刺し (予熱30℃) 充電46A 負荷5A | Cell1: 53780258 A Cell2: 53780147 B Cell3: 53780253 A Cell4: 53780237 B Cell5: 53780215 A Cell6: 53780143 B Cell7: 53780140 A Cell8: 53780142 B | 10:36 釘刺し、Cell6 vent 10:50 Cell7 その後Cell5 vent 10:56 Cell8 vent 11:07 Cell3(?) vent 11:08 Cell(?) vent 11:11 Cell(?) vent 11:22 Cell(?) vent |
| 3 | S/N 189 | 釘刺し (予熱30℃) J1、J3及び アース端子 開放 | Cell1: 53300208 A Cell2: 53300234 B Cell3: 53300209 A Cell4: 53300235 B Cell5: 53300210 A Cell6: 53300236 B Cell7: 53300212 A Cell8: 53300237 B | 11:40 釘刺し、Cell6 vent 12:46 Cell6温度再上昇 熱伝播せず |

写真2- I 試験後の状況 (形態2)



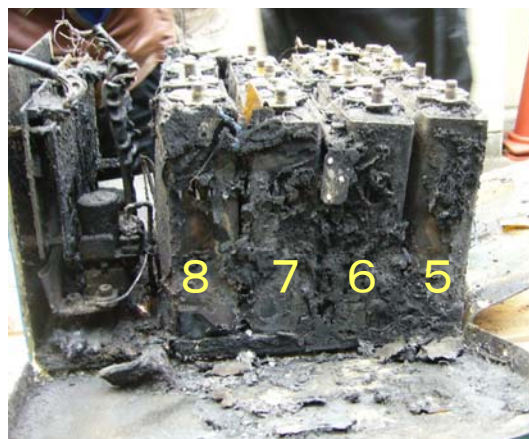
バッテリー外観



溶断したアース線



バッテリー上面

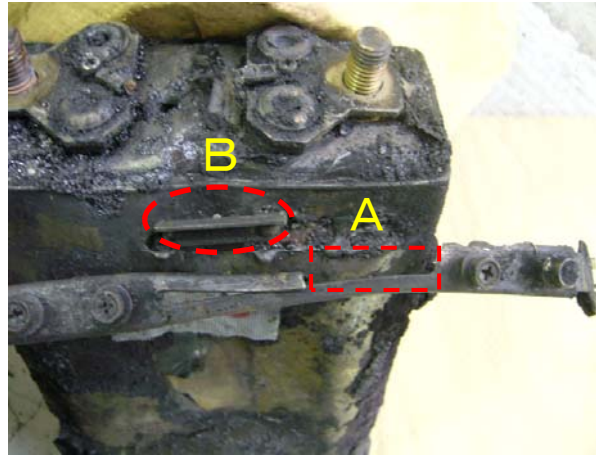


バッテリー右側面

写真2-Ⅱ 6番セル 及びブレースバーの状況(形態1、2)



形態1 (2箇所にてアーク痕)

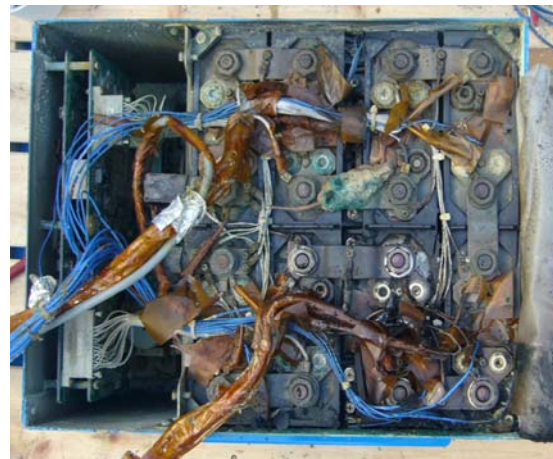


形態2 (ブレースバーのAの部分がB位置に溶接されている)

写真2-Ⅲ 形態2と3の熱損傷の比較

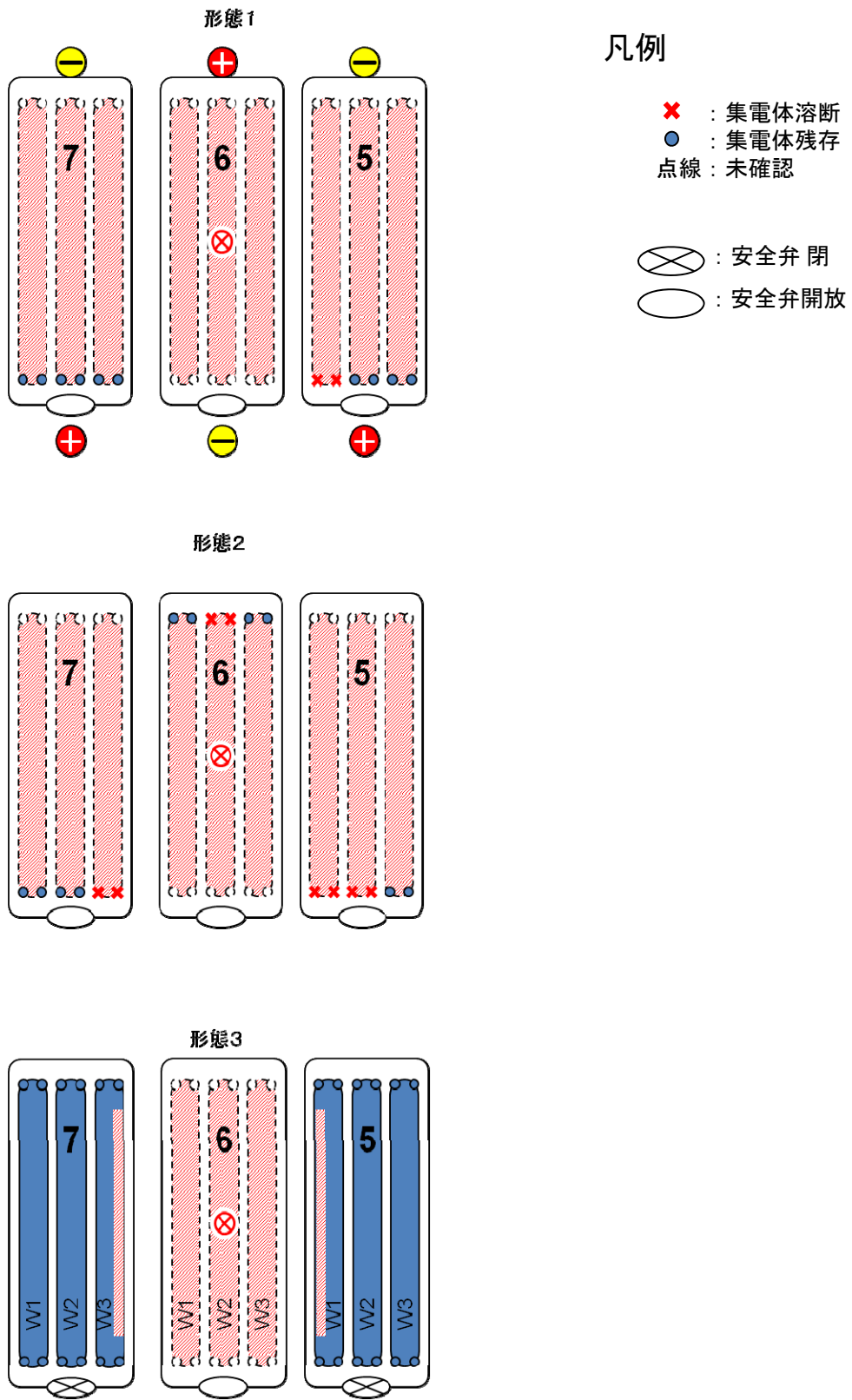


形態2

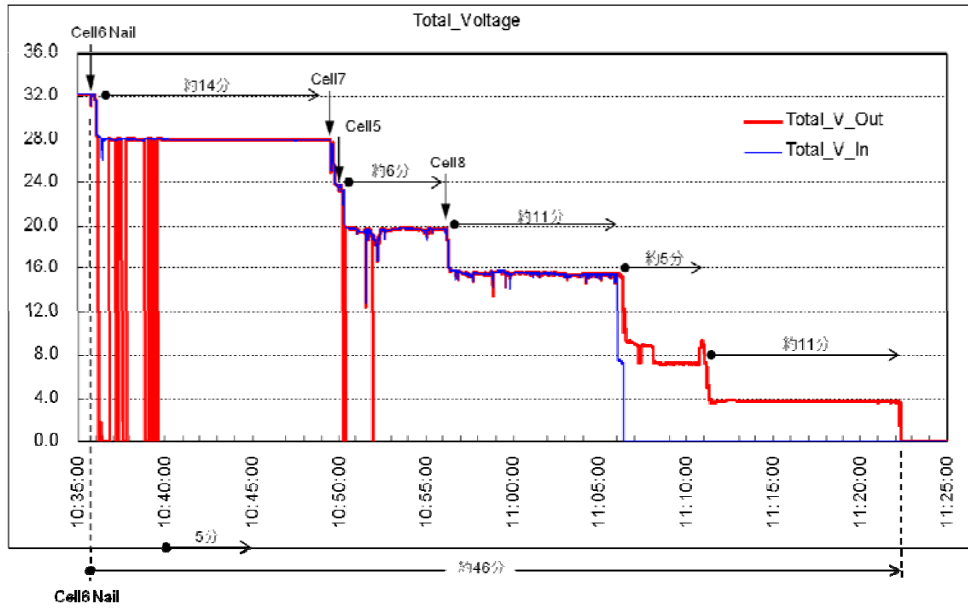


形態3

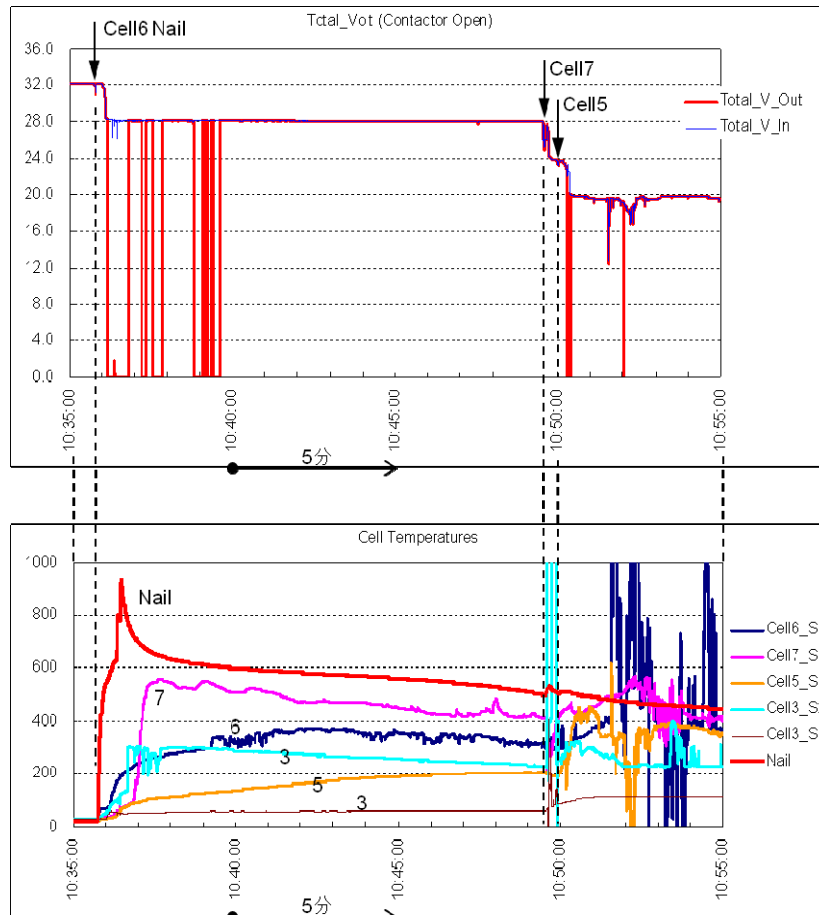
付図2-4 集電体等損傷狀況



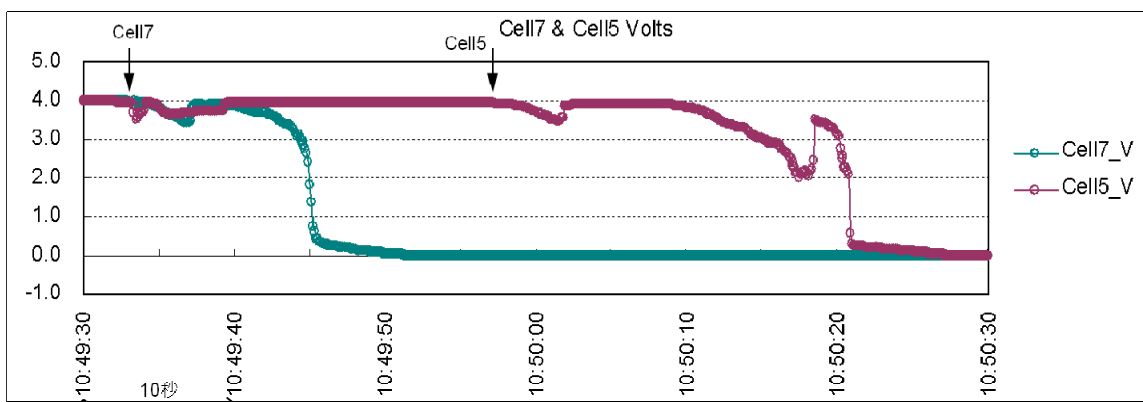
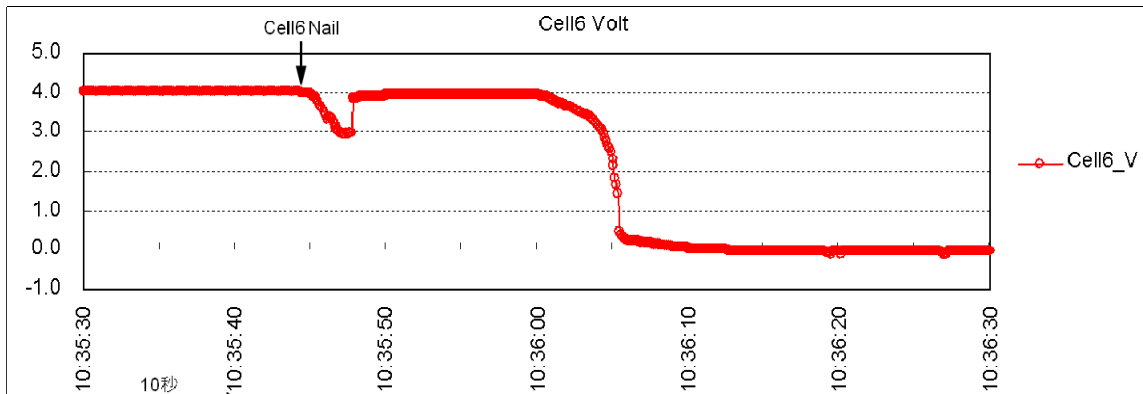
付図 2 - 5 バッテリー電圧変化 (形態 2)



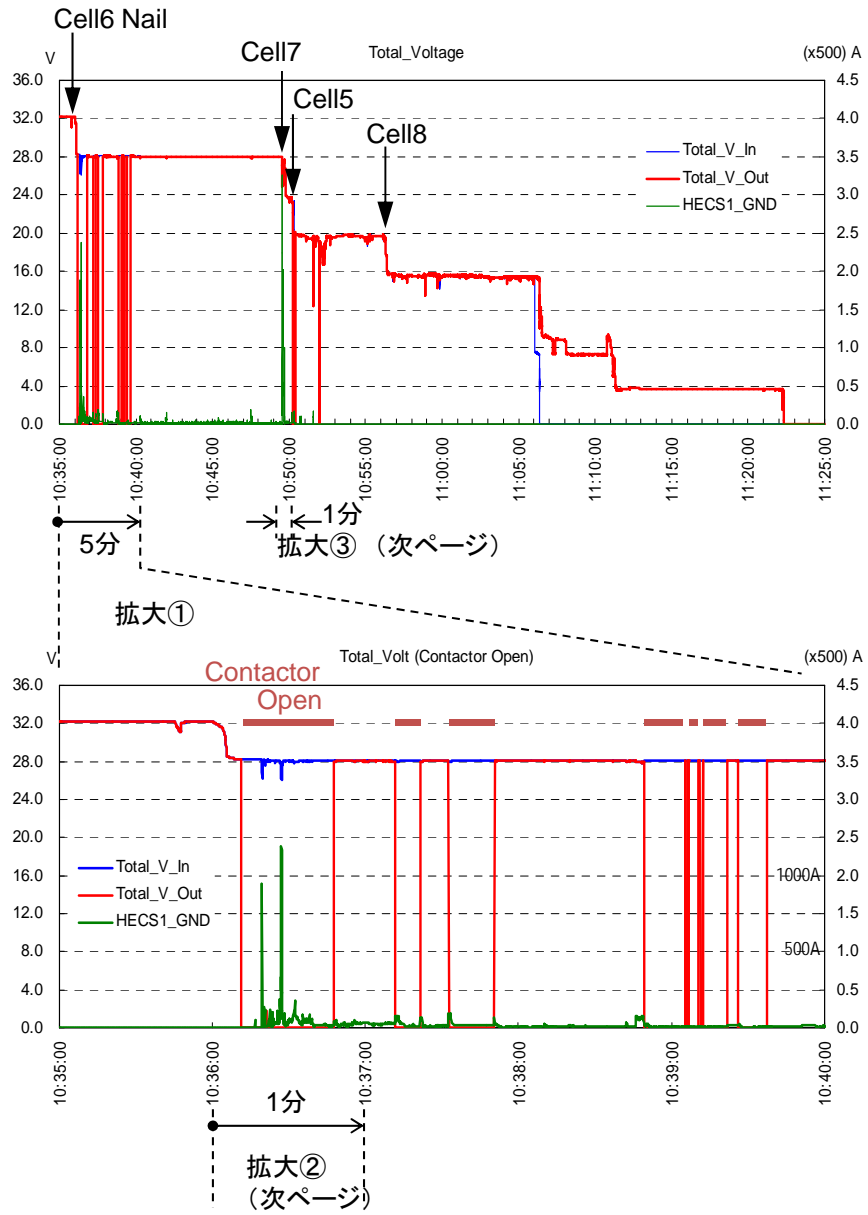
付図 2 - 6 セル等温度変化 (形態 2)



付図 2-7 セル電圧低下の詳細状況 (形態 2)

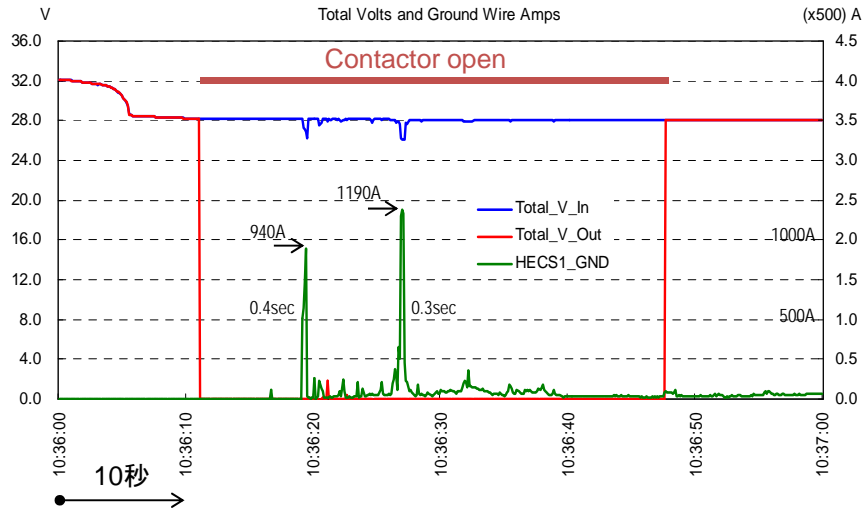


付図 2 - 8 - 1 セル電圧・アース線電流変化 (形態 2)

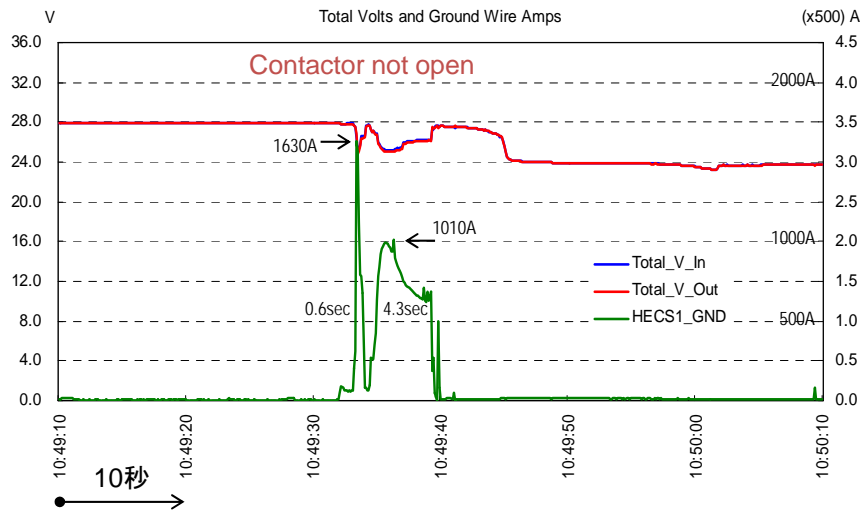


付図 2 - 8 - 2 セル電圧・アース線電流変化 (形態 2)

拡大②



拡大③





Ministère de l'Ecologie,
du Développement durable
et de l'Energie

BEA

Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
pour la sécurité de l'aviation civile

別添 3

仏国からの意見

Le Bourget, le 16 septembre 2014

To : Kosugi san
JTSB investigator

Objet : BEA proposal for appended comments to the JTSB report on the serious incident to the Boeing 787-8 registered JA804A

Dear Kosugi san,

Thank you for giving the BEA the possibility to append comments to your above-mentioned report.

You will find them hereafter. I hope you will append them to the report, in accordance with the provisions of Annex 13.

I wish to thank you again for your understanding and good cooperation that prevailed all over this investigation.

The BEA remains at your disposal for any further information that you may wish to obtain.

Yours sincerely.

Emmanuel DELBARRE
BEA Accredited representative

Aéroport du Bourget
Zone Sud – Bâtiment 153
200 rue de Paris
93352 Le Bourget Cedex
France
Tél. : +33 1 49 92 72 00
Fax : +33 1 49 92 72 03
www.bea.aero



Ministère de l'Ecologie,
du Développement durable
et de l'Energie

BEA

Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
pour la sécurité de l'aviation civile

Proposed comments to append

Charging at low temperature

The coldest temperature outside the airplane during grounding was only minus 2.6 degree Celsius.

Experimentation on electrolyte viscosity and performances demonstrate that these condition do not affect this battery in the operating Temperature range (-18°C to +70°C).

External laboratories performed numerous tests to attempt to create lithium metal in the LVP65 cells with harsh constraints more severe than those recorded in the three incident without any conclusive results.

Oscillation of charging current

The BEA considers that the oscillations observed are due to the pre-load circuit of the BCU equipment. This phenomenon occurs at the end of the charging phase when BCU is in Constant Voltage (CV) mode.

External independent laboratories performed similar tests in order to investigate on this phenomenon. The test results clearly demonstrate that such "noisy" oscillations have no effect on the battery or on a cell safety and performances. The magnitude of current measured is smaller and doesn't induce heat or any negative effect on battery.

The BEA concurs to this conclusion that oscillations have no negative effect on the safety or on the performance of the battery or cell.

Wrinkles or gaps in anode caused by manufacturing or by repeated charging/discharging

GS YUASA performed 125 charging/discharging tests, using cold temperature at -23°C, charge voltage rate at 4.2V and charge current rate at 70 Amperes on LVP65 cells without any evidence of creation of lithium metal deposit and with no conclusive result on an internal short, heat generation and venting.

The BEA concurs to the fact that wrinkles are a very unlikely contributing factor to the incident.

Proposed safety recommendations

1

The BEA suggests to take into account the various reports established during the battery investigations and the Thales testing and to modify the recommendation towards FAA and Boeing as follows :

"Although this investigation could not identify the mechanism of the internal short circuit, the Federal Aviation Administration should instruct The Boeing Company to:

Aéroport du Bourget
Zone Sud – Bâtiment 153
200 rue de Paris
93352 Le Bourget Cedex
France
Tél. : +33 1 49 92 72 00
Fax : +33 1 49 92 72 03
www.bea.aero

- ↳ Continue studies of the internal short circuit mechanisms considering the effects of internal and external phenomenon that potentially impact the lithium-ion batteries in operational conditions, such as the aircraft electrical environment and particularly the risk associated to potential transient current and voltage.
- ↳ Continue studies on the impact of other environmental parameters such as humidity and vibrations.
- ↳ Continue efforts to improve the lithium-ion batteries quality and its reliability”.

2

- In addition, the BEA suggests another safety recommendation: During the investigation it appeared that the Digital Flight Data Recorder didn't record the Main Battery Current as it is done for the APU battery. As this information would be of help for the contributing factors determination, the BEA proposes to the JTSB to add, in the chapter 6.2 (Measures to be Taken to Supervise The Boeing Company as a Designer and Manufacturer of the 787), a recommendation as follows :

“The Federal Aviation Administration should instruct The Boeing Company to:

- add the recording of the Main Battery current by the DFDR with an appropriate current range”.