

## H - Aロケット6号機 打上げ失敗の 原因究明状況について（その5）

平成16年1月19日  
宇宙航空研究開発機構

# 目次

1. 異常事象の原因検討	…	1
2. ノズルの表面後退量増大に寄与する要因の検討	…	6
2.1 表面後退量増大現象の整理		
2.2 寄与する要因の検討		
3. 試験および解析計画	…	17

## 1. 異常事象の原因検討

前回(1月9日)、故障の木解析および想定事象の検討の結果、SRB - Aが分離しなかった要因は飛行データから以下の事象が発生した可能性が高いと推定した。

故障の木解析を図1 - 1に示す。

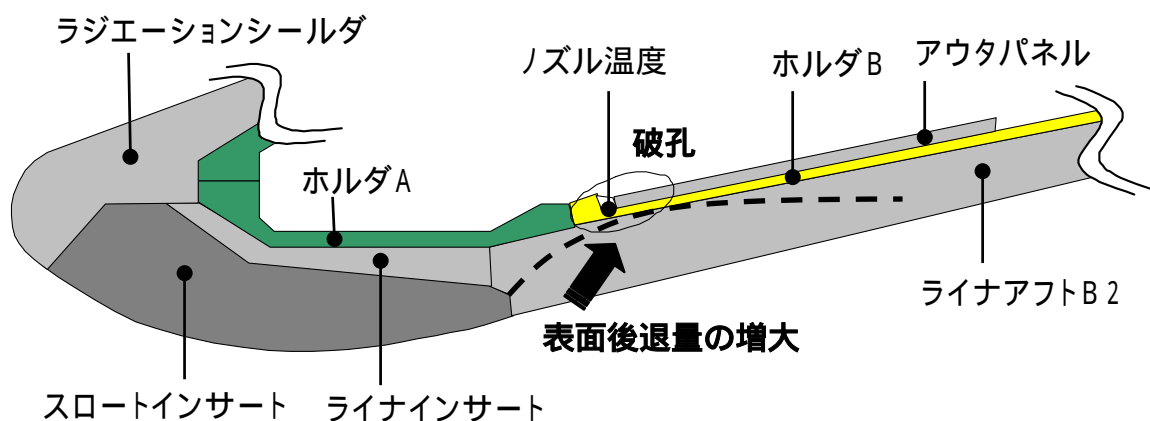
SRB - A (R側)ノズル開口部の断熱材(ライナアフトB2)に想定を超えた板厚減少が発生し、燃焼ガスがホルダBを過熱した。

打上げ後約62秒時点で、ノズル温度 近傍(数10mmの範囲)でホルダB(アルミ合金)が溶融したか、或いは他の位置からホルダB溶融面がノズル温度 近傍に達し、破孔し燃焼ガスが後部アダプタ内に噴出した。

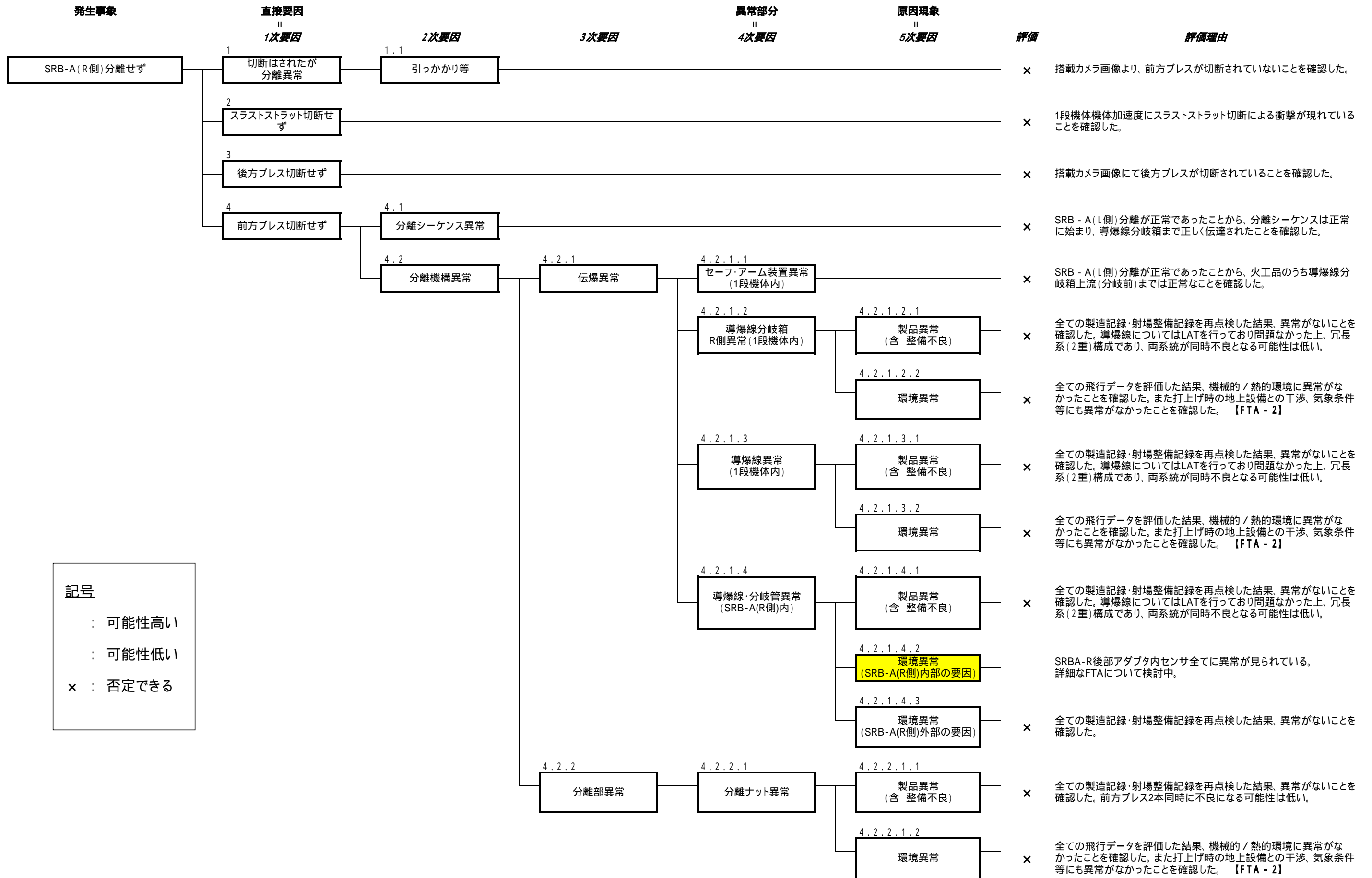
SRB - A (R側)後部アダプタ内の温度が上昇(熱環境異常)し、ノズル温度の温度上昇・短絡に始まり、後部アダプタ内のセンサ及び機器データの異常が発生した。

後部アダプタ内に艀装されている前方プレス分離用の導爆線の温度が上昇し導爆線が2系統とも異常(機能喪失)に至った。

その結果、SRB - A分離信号が送出されたもののR側の前方プレスが分離せずSRB - A (R側)が分離しなかった。



- 推定事象(概念図) -



記号  
 ○ : 可能性高い  
 △ : 可能性低い  
 × : 否定できる

図1-1(1/4) SRB-A(R側)分離不良に関する故障の木解析  
 【FTA-1】 全体FTA  
 2

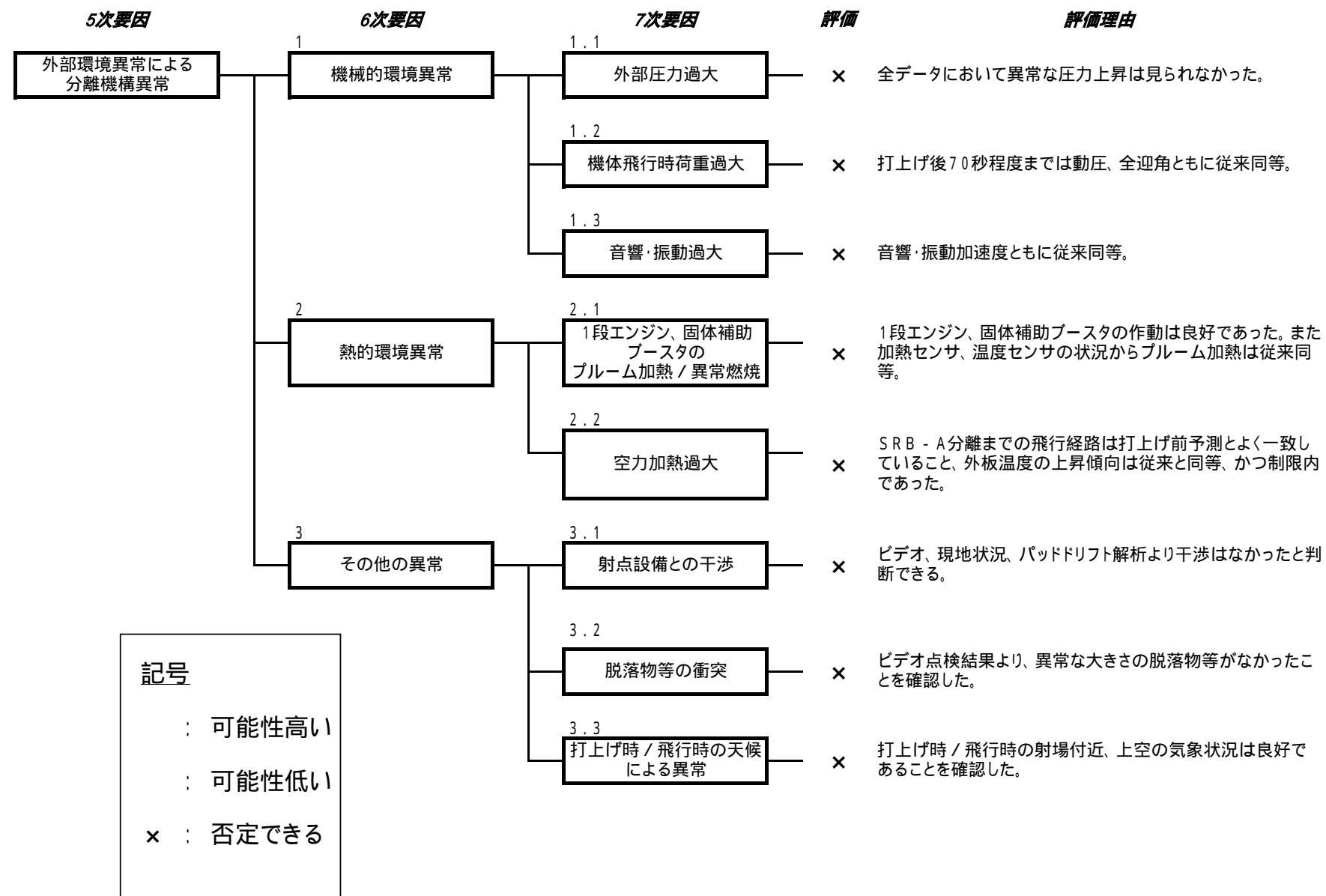


図1 - 1 ( 2 / 4 ) SRB - A ( R側 ) 分離不良に関する故障の木解析  
【 F T A - 2 】 外部環境異常 F T A

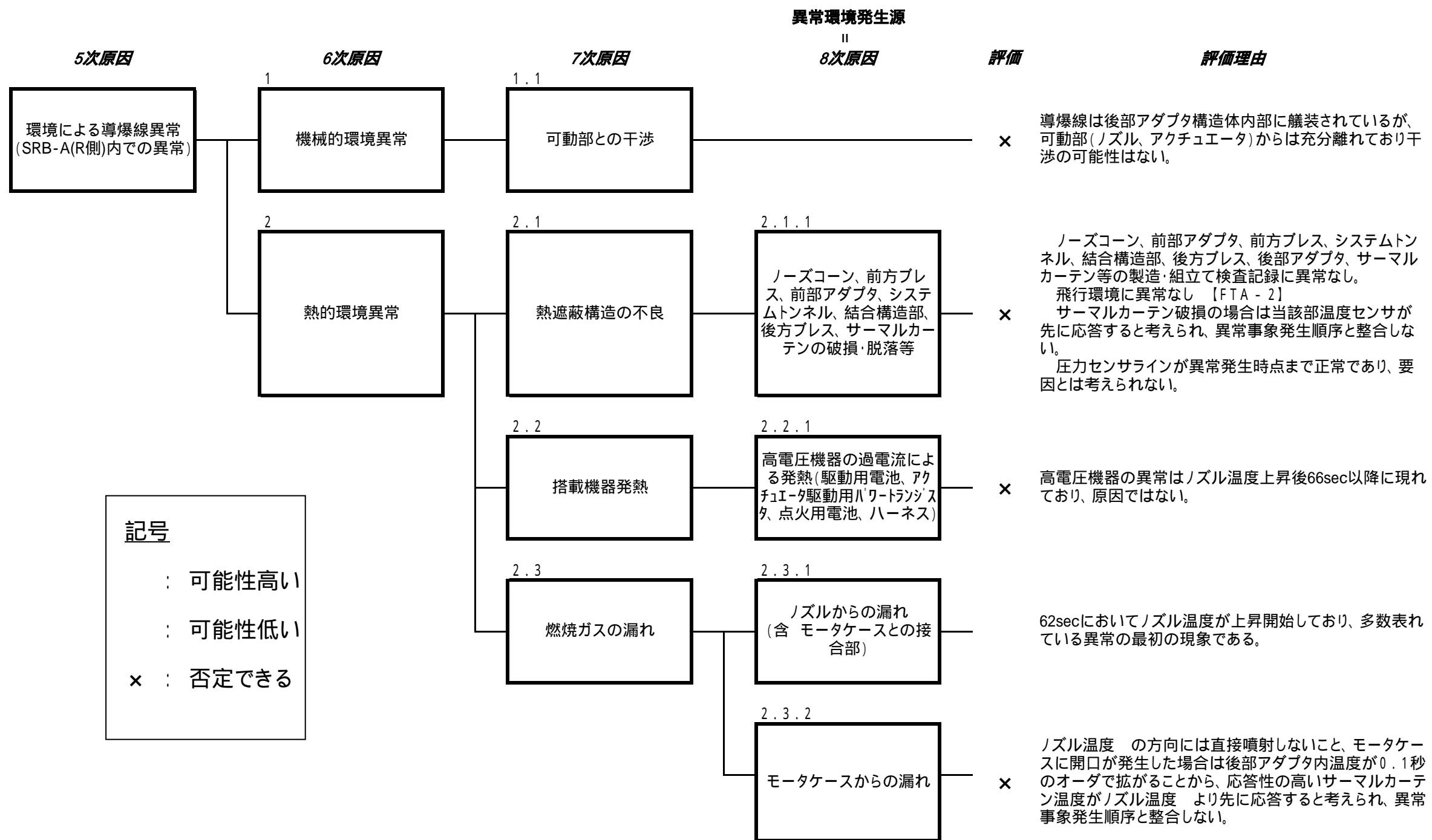
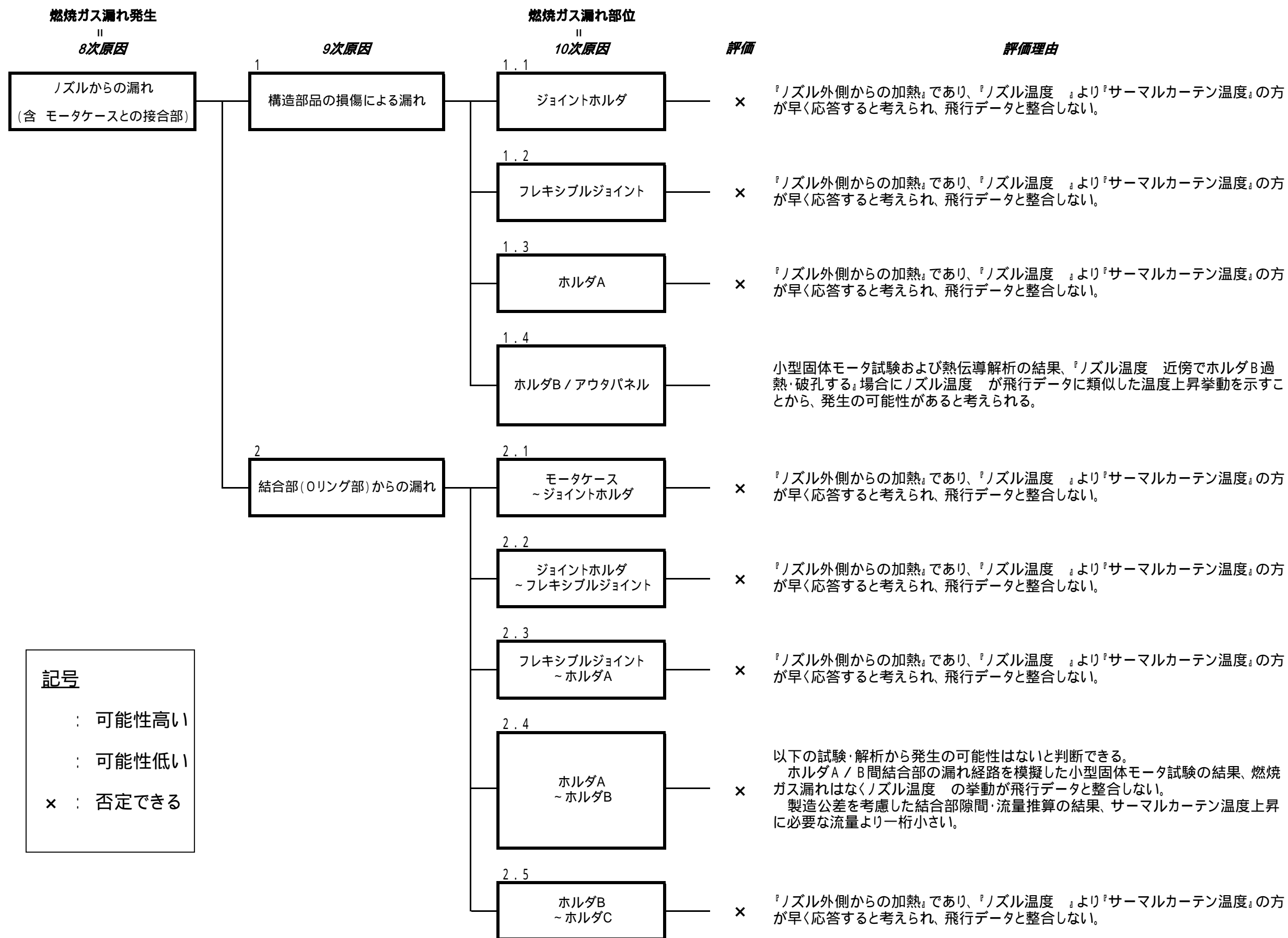


図1-1(3/4) SRB-A(R側)分離不良に関する故障の木解析  
【FTA-3】 環境による導爆線異常(SRB-A(R側)内部での異常)



記号

○ : 可能性高い

△ : 可能性低い

× : 否定できる

図1 - 1(4 / 4) SRB - A(R側)分離不良に関する故障の木解析  
【FTA - 4】ノズルからの漏れ

## 2. ノズルの表面後退量増大に寄与する要因の検討

### 2.1 表面後退量増大現象の整理

『SRB - A (R側) ノズル開口部の断熱材 (ライナアフトB2) に想定を超えた板厚減少が発生し、ホルダBに燃焼ガスが達し、溶融、破孔した。』

この事象を引き起こす要因として、以下の3つが考えられる。(図2 - 1参照)

化学的、熱・機械的要因等の重畳による局所エロージョン増大

ライナアフトB2 (CFRP製断熱材) 前端部の欠け・剥離

スロートインサート(C/C製耐熱材) 後端部の欠け

#### (1) 化学的、熱・機械的要因等の重畳による局所エロージョン増大

##### 【現象の概要】

断熱材の表面後退は主として、化学的腐食と機械的侵食によって起き、燃焼ガスの気流特性(動圧、渦等)や材料特性(物性、積層角等)が寄与すると考えられる。

局所的な表面後退はノズル壁の不均一な形状等に伴う気流特性の変動(衝撃波や渦の発生など)や材料特性の不均一等により影響を受け増大することが考えられる。

これらの要因が複合的に重畳することにより想定を超えた局所エロージョンが発生しホルダBに燃焼ガスが達し、溶融、破孔に至ることが考えられる。

##### 【開発段階での発生有無および対策】

開発試験におけるEM ~ QM3の地上燃焼試験においては、炭化層の後退によりライナアフトB2が断熱機能を喪失し、ホルダBへ燃焼ガスが到達するような過大な局所エロージョンは発生していない。ただし、程度の差はあるが、EM, PM, QM2, QM3において局所エロージョンが観測されており、各試験結果を評価して板厚設計を見直している。QM3では、これまでで最大で且つ設定板厚を逸脱する局所エロージョンが発生したことを受け、さらに板厚増加を行うとともに、アウトパネルを追加した。

図2 - 2にQM3地上燃焼試験における局所エロージョンの状況を示す。

また、地上燃焼試験では以下の現象が確認されている。

ノズル先端部(ラジエーションシールド)の不均一な表面後退

程度の差はあるが、地上燃焼試験の全てで発生している。

ライナアフトB2の表面後退によるスロートインサートとの段差

程度の差はあるが、地上燃焼試験の全てで発生している。



## (2)ライナアフトB2(CFRP製断熱材)前端部の欠け・剥離

### 【現象の概要】

ライナアフトB2製造時の欠陥或いは、熱膨張によるライナアフトB2(CFRP)とスロートインサート(C/C)の干渉により、ライナアフトB2前端部が欠損しライナアフトB2とスロートインサートに過大な段差が発生した。

燃焼初期にライナアフトB2の板厚が減少するとともに段差による気流特性が変動(衝撃波や渦の発生)することにより表面後退発生位置の変化、表面後退量の増大が発生する。さらに気流特性の変動等の影響により局所エロージョンが発生しうる。これらにより燃焼ガスがホルダBに達し、溶融、破孔に至ることが考えられる。

### 【開発段階での発生有無および対策】

QM地上燃焼試験において、燃焼後半にライナアフトB2前端部に相当する部位のCFRP製断熱材が欠損し、過大な表面後退(過大エロージョン)が発生した。対策としてCFRP断熱材の設計変更(材料、積層方向、形状)を行った。

図2-3にQM地上燃焼試験における過大エロージョンとその対策を示す。

## (3)スロートインサート(C/C製耐熱材)後端部の欠け

### 【現象の概要】

スロートインサート製造時の欠陥、圧力や熱膨張によるスロートインサートの応力過大により、スロートインサートが欠損し過大な段差が発生した。

燃焼初期にライナアフトB2前部の段差発生および気流特性の変動(衝撃波や渦の発生)により表面後退発生位置の変化、表面後退量の増大が発生する。さらに気流特性の変動等の影響により局所エロージョンが発生しうる。これらにより燃焼ガスがホルダBに達し、溶融、破孔に至ることが考えられる。

### 【開発段階での発生有無】

開発試験において、スロートインサートの欠損は発生していない。

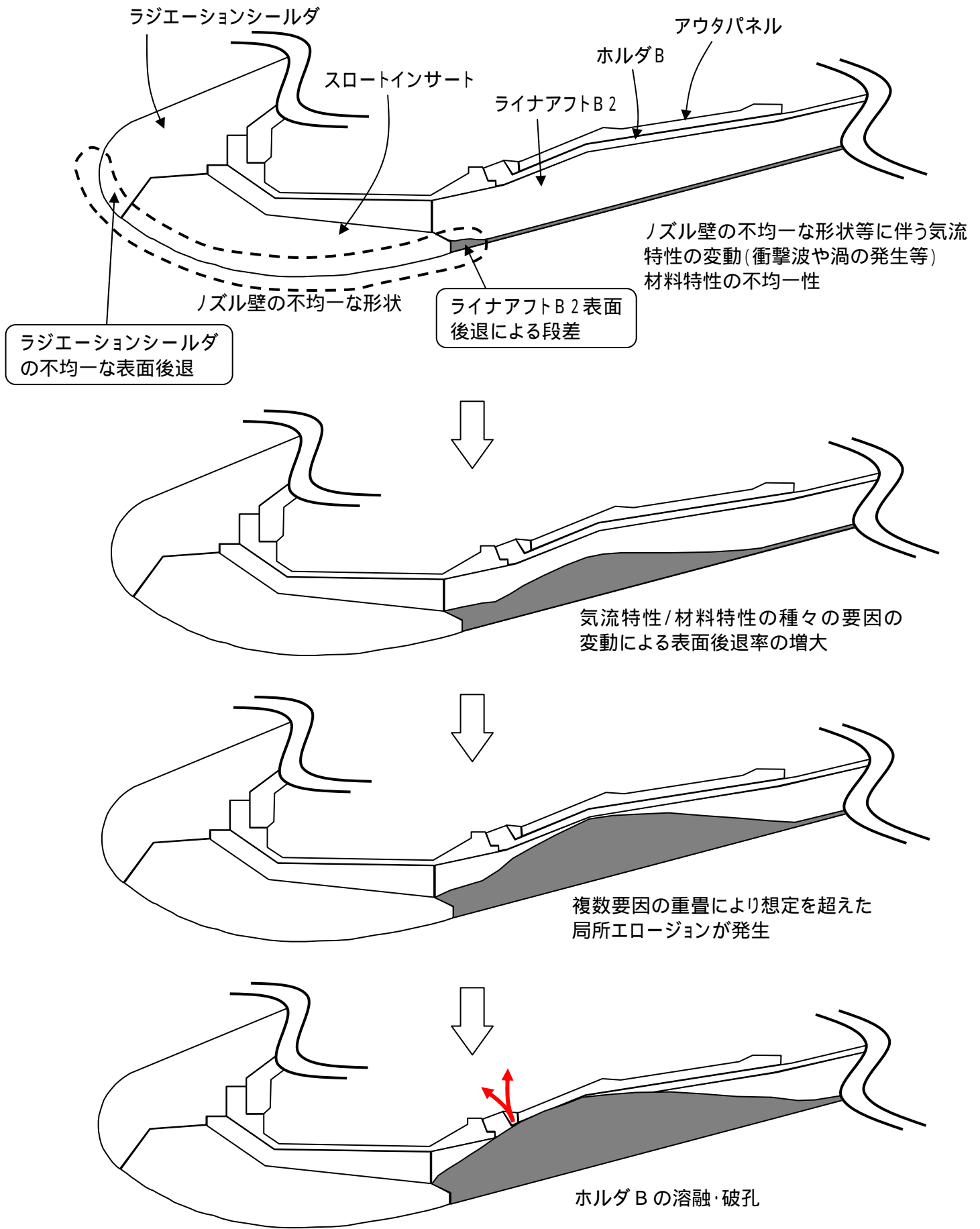


図2 - 1(1 / 3) 化学的、熱・機械的要因の重畳による局所エロージョン増大 (概念図)

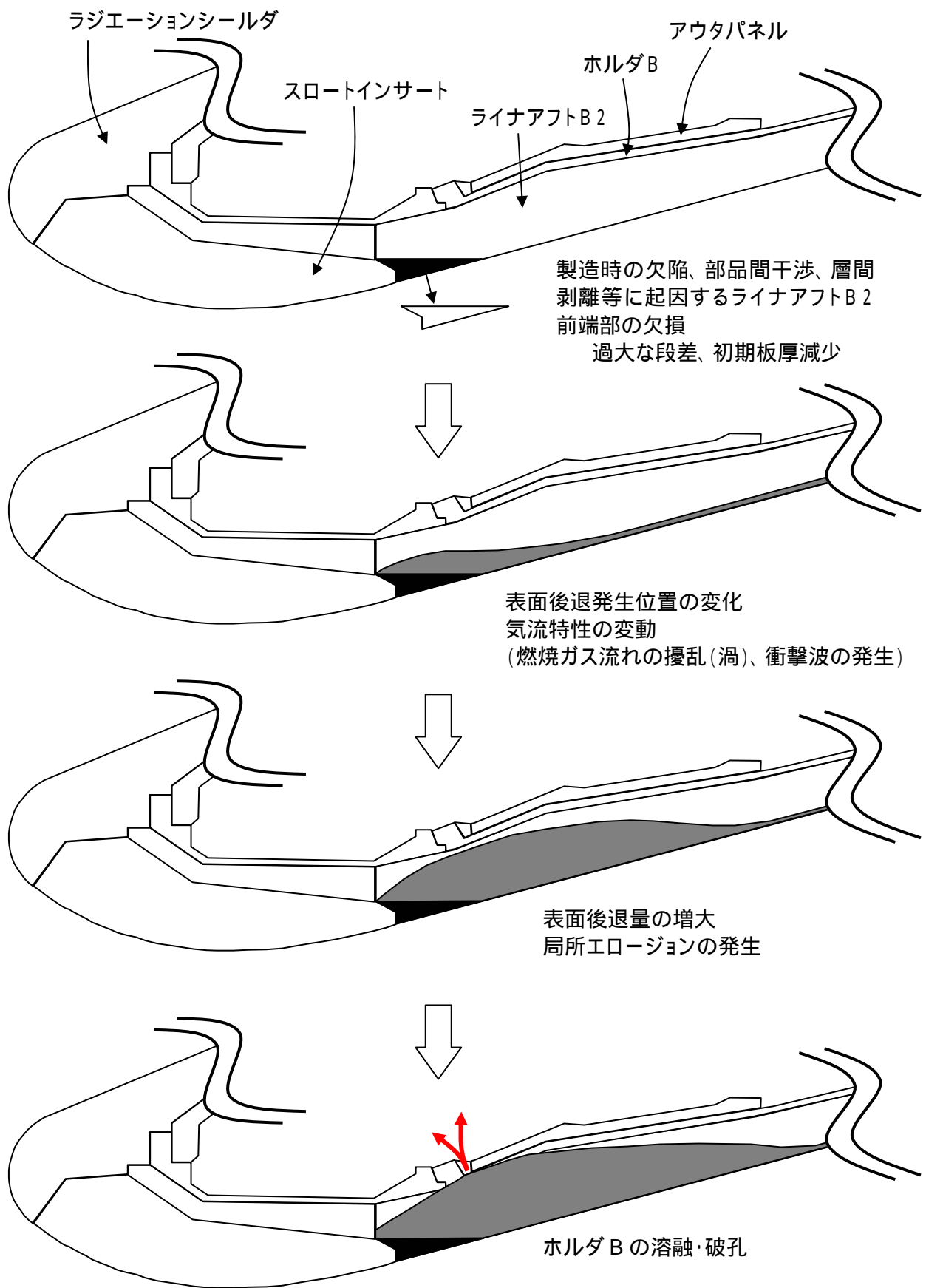


図2 - 1(2 / 3) ライナアフトB2 (CFRP 製断熱材) 前端部の欠け・剥離 (概念図)

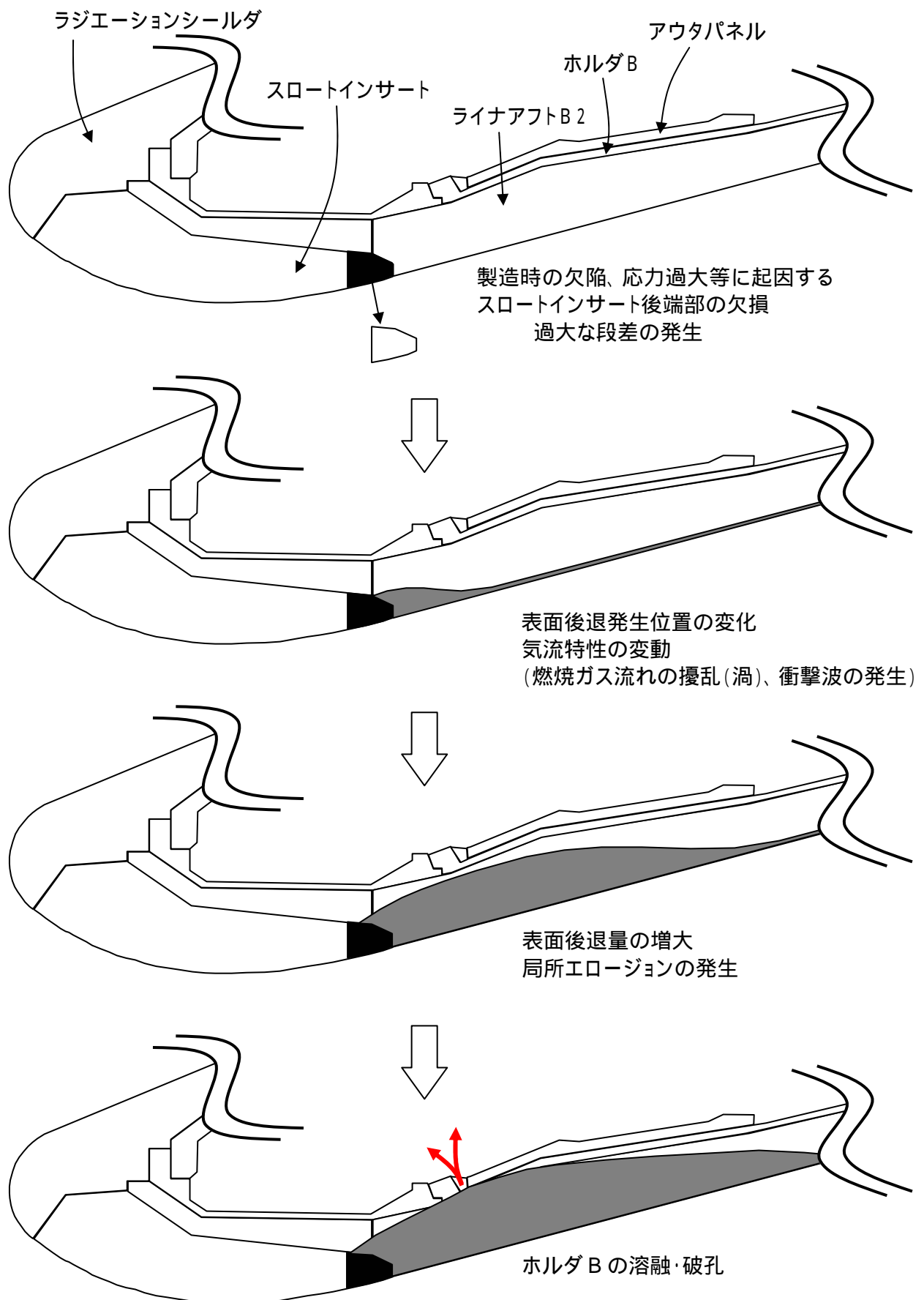
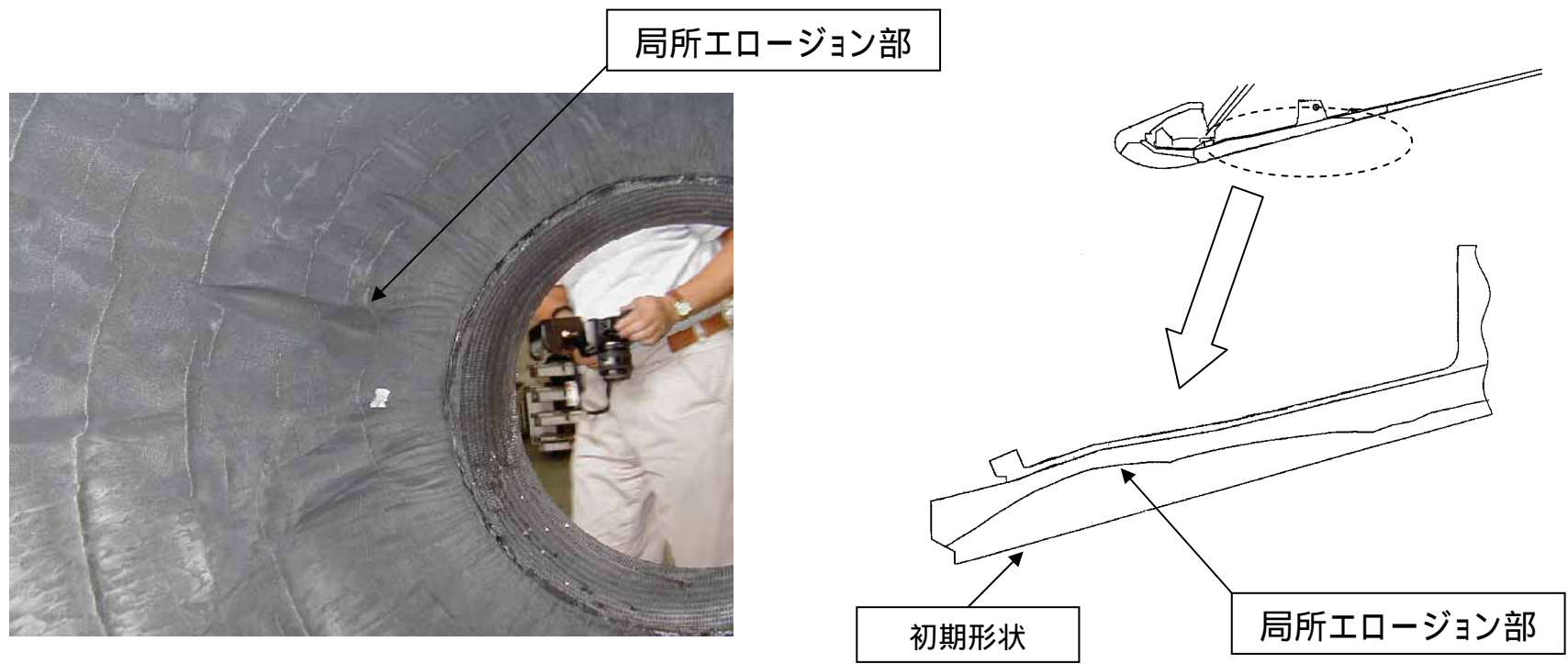


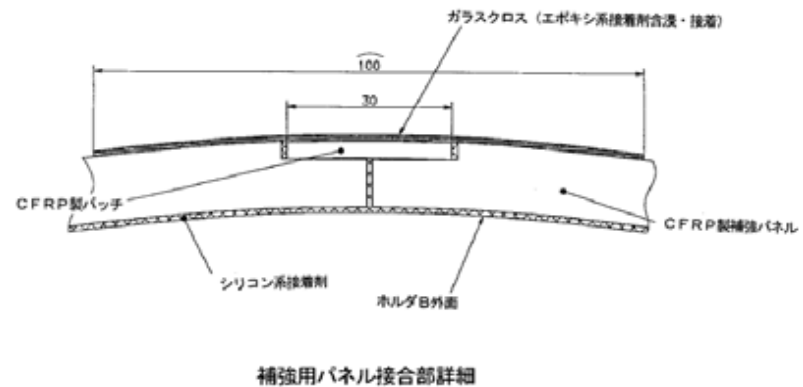
図2 - 1 (3 / 3) スロットインサート(C/C 製耐熱材)後端部の欠け  
 (概念図)



QM3 燃焼試験後ノズル開口部

図2 - 2(1 / 2) QM3局所エロージョンの状況とその対策

認定型モータ地上燃焼試験(QM3)にて発生した局所エロージョンの対策として、ノズル開口部の板厚を増加するとともに外周にCFRP製のパネル(アウターパネル)を装着



詳細設計・製造内容を点検

- ・ 局所エロージョンに対応した熱解析
- ・ パネル強度・剛性解析
- ・ パネル接合用ガラスクロス部強度解析
- ・ 製造図面、作業指示書、検査指示書
- ・ 実機と同時製造の試験片による接着強度確認
- ・ 接着部の超音波検査

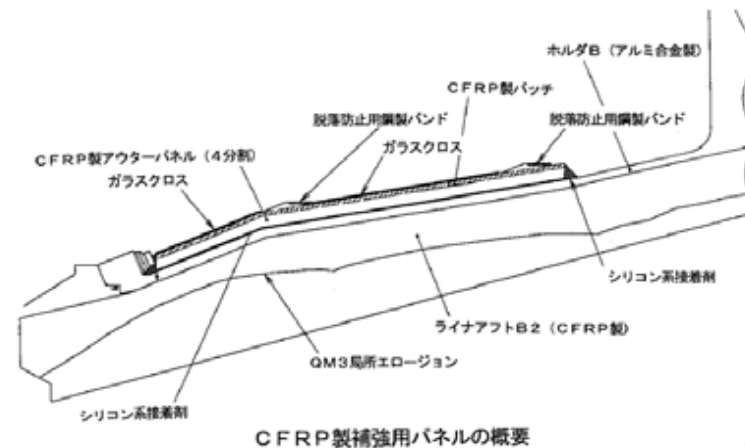


図2 - 2 ( 2 / 2 ) QM3局所エロージョンの状況とその対策

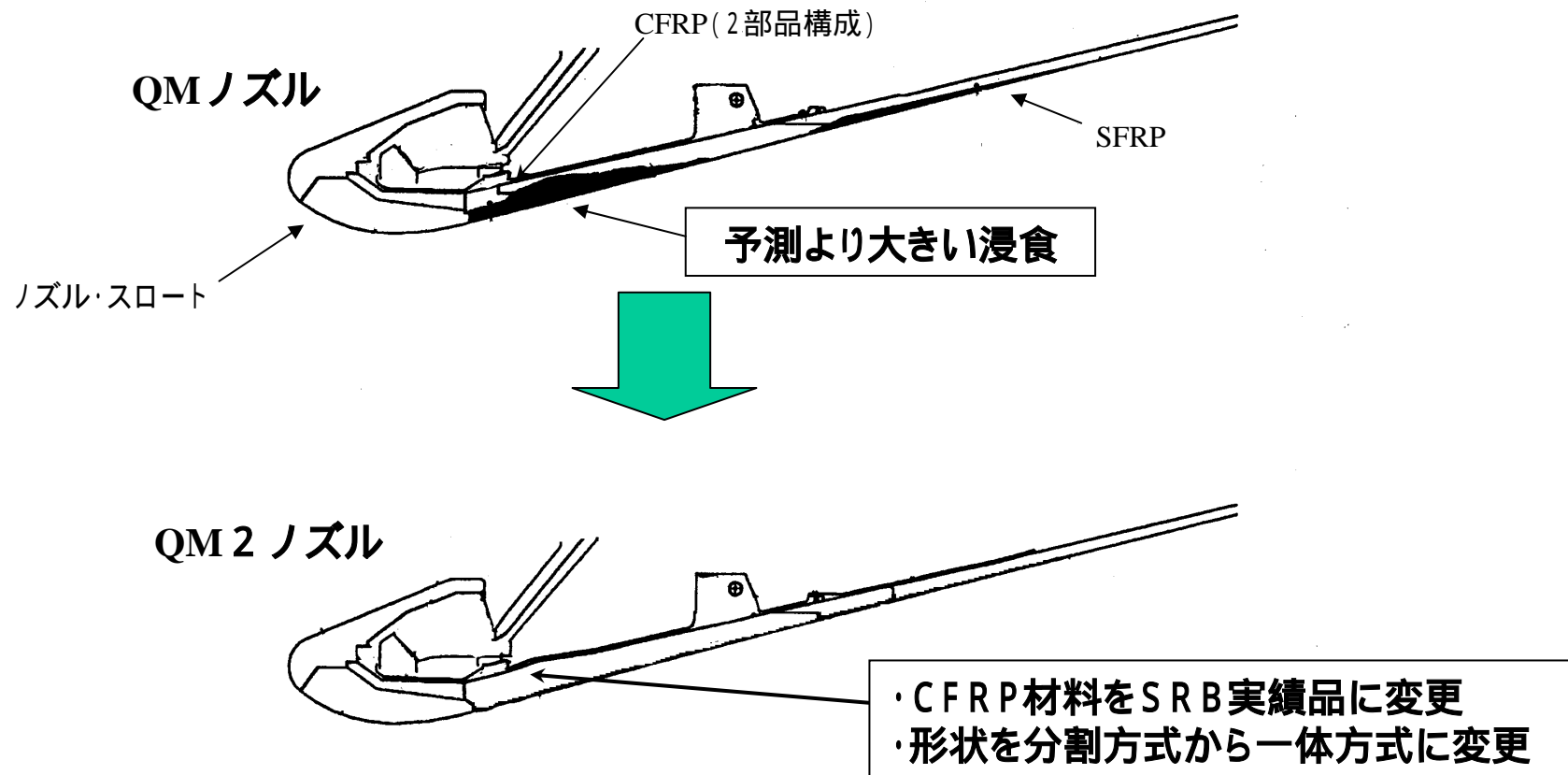


図2 - 3(1 / 2) QM過大エロージョンとその対策

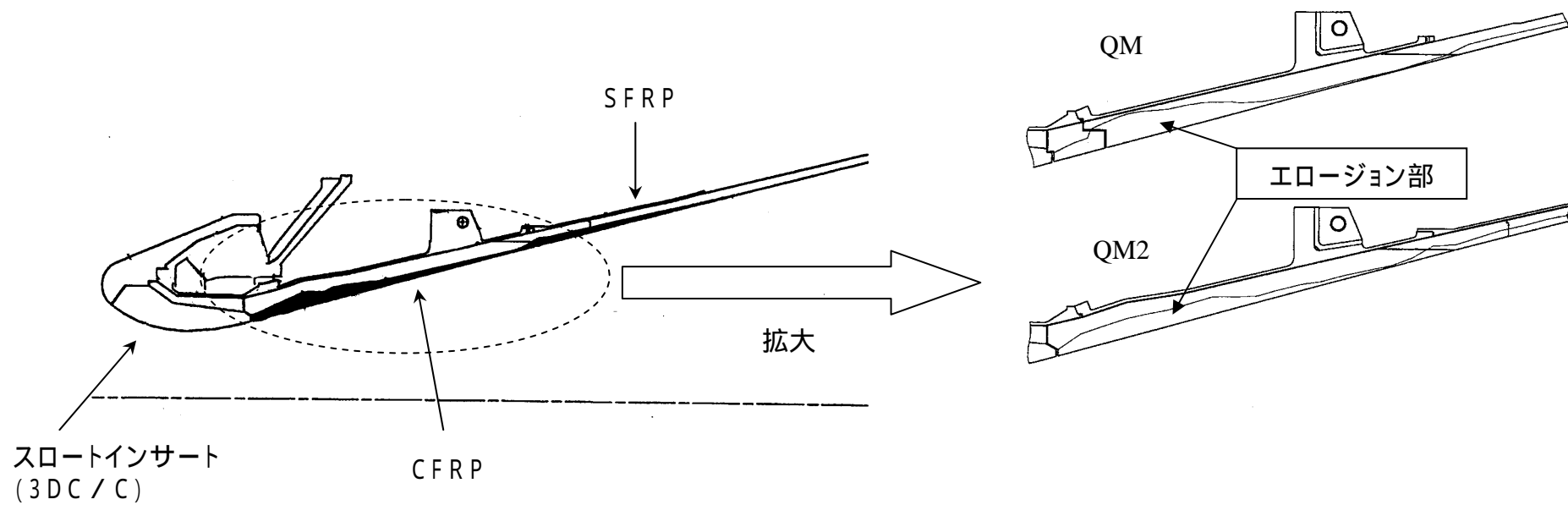


図2 - 3 (2 / 2) QM過大エロージョンとその対策



## 2.2 寄与する要因の検討

### (1) 化学的、熱・機械的要因等の重畳による局所エロージョン増大

CFRP断熱材の表面後退の主な要因は、水性ガス反応や高温アルミナと炭素の反応などによる化学的腐食と 燃焼ガス流の動圧、アルミナ液滴粒子衝突およびCFRP熱分解ガスによる内部圧力等による熱・機械的侵食が考えられる。これらは固体モータの諸特性であるモータ燃焼圧、ノズル(局所)膨張比、ノズル形状と密接な関係があると考えられる。

局所エロージョンは、燃焼ガスの気流特性(動圧、静圧、渦など)や材料特性(物性、積層角など)の不均一が複合的に重畳したり、ある要因が局所的に強調されて発生することが考えられる。

これまでの開発で実施した実機サイズの地上燃焼試験(5回)において発生したノズル開口部断熱材の表面後退量およびその結果に基づく断熱材の板厚設計の経緯と考え方を再整理した。

これらの整理結果を踏まえ、ノズル開口部の断熱材(ライナアフトB2)の想定を超えた表面後退量増大に関し、以下の詳細検討を実施する計画である。これらの結果を踏まえ、原因の推定及び対策を検討する。

### 局所エロージョンメカニズムの検討

表面後退率が周囲に比べ顕著に増大する現象(局所エロージョン)のメカニズムを検討するために、表面後退の主な要因と考えられる『化学的腐食』と『機械的侵食』に影響を及ぼす因子(気流特性や材料特性)の変動規模を評価し、各因子の変動量の表面後退への影響度を評価する。(3項参照)

### サブサイズモータ燃焼試験

表面後退率増大の寄与要因を模擬した供試体を用いたサブサイズモータ燃焼試験を実施する。(3項参照)

## (2)ライナアフトB2前端部の欠け・剥離の要因の検討

ライナアフトB2前端部付近などの欠け・剥離については、熱分解ガスによる層間剥離、部品間干渉、異物混入、欠陥などが考えられる。

これまでの開発で実施した実機サイズの地上燃焼試験(5回)において発生したライナアフトB2に関する不具合およびその結果に基づく設計の経緯と考え方を再整理するとともに製造時の寸法検査及び非破壊検査記録及び既存の実機大ノズルの寸法検査について確認した。

その結果、層間剥離、部品間干渉、異物混入、欠陥の可能性は低いと考えられる。層間剥離評価試験(3項参照)を行うとともに、引き続き検討を行い原因の推定及び対策を検討する。

## (3)スロートインサート後端部の欠けに関する検討

これまでの開発で実施した実機サイズの地上燃焼試験(5回)において発生したスロートインサートに関する不具合およびその結果に基づく設計の経緯と考え方を再整理した。

地上燃焼試験においてはスロートインサートの欠けは発生していないこと、異常発生までの飛行データにおいてスロート背面構造部材(ホルダ A)の歪や燃焼圧力に異常が認められないこと、熱構造解析上の適切な強度余裕を有していることから、スロートインサートの欠けの可能性は小さいと考えられる。引き続き検討を行い原因の推定及び対策を検討する。

### 3. 試験および解析計画

#### (1) 表面後退率の感度解析

表面後退率の感度解析の流れを図3 - 1に示す。

現物観察に基いて **推定された局所エロージョンの直接原因と誘因** について、材料特性と燃焼流特性の観点から表面後退率の **影響因子の変動量** を評価する。

機械的侵食および化学的腐食によるによる **表面後退率の評価方法の設定と検証**

材料特性と気流特性の **各影響因子の変動に対する4つの表面後退率の変動量の評価とそれらの和としての総表面後退率の変化量の評価**

なお感度解析の結果は、別途計画されるサブサイズモータ燃焼試験などの結果と総合して、**局所エロージョンの発生メカニズムの推定と対策方針の策定** において検討の基礎として用いられる。

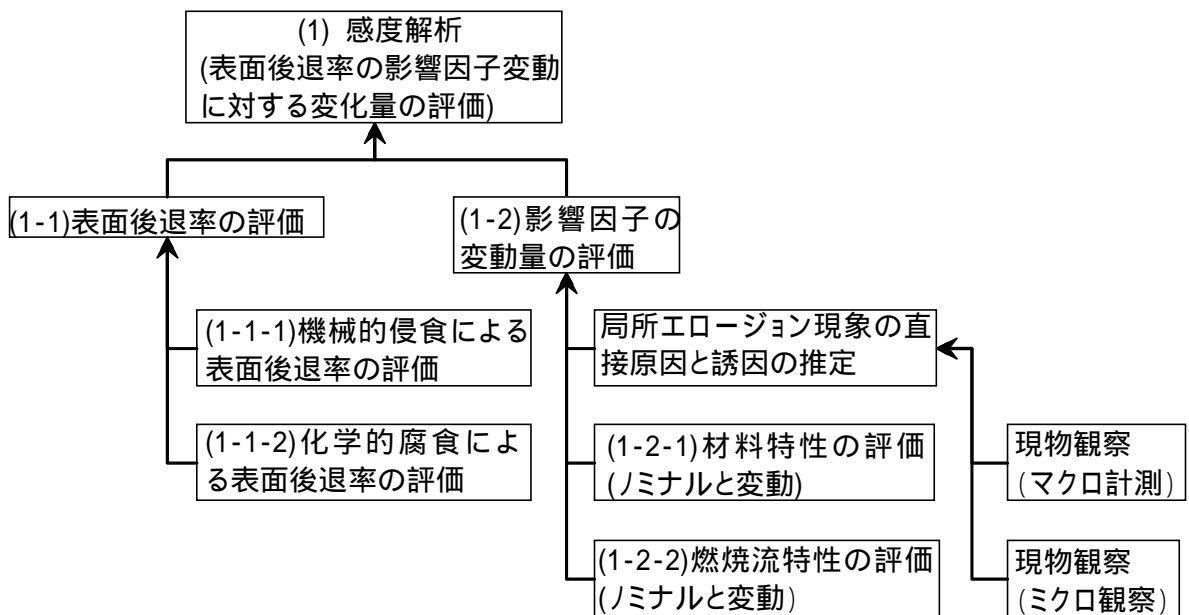
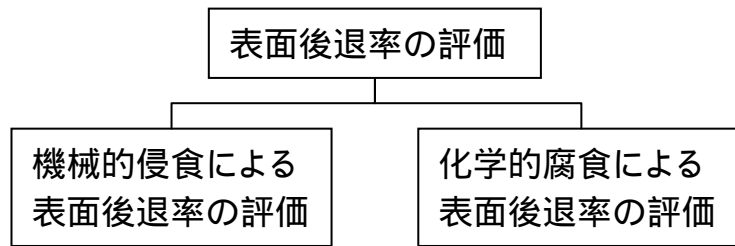


図3 - 1 表面後退率の感度解析の流れ

## (1 - 1) 表面後退率の評価法の確立



### (1 - 1 - 1) 機械的侵食による表面後退率の評価

#### 【目的】

当該ノズルに対して、燃焼流の動圧(外部的要因)及び内部ガス圧(内部的要因)による炭化層の表面後退率を算定する。

#### 【作業項目と手順】

外部的、内部的要因による表面後退率の因子に対応した数学モデルの設定

( Yu, Dimitrienko “Thermomechanics of Composites under High Temperatures”の理論をベースに適切なモデルを定める。)

数学モデルにおいて必要となる物性値及び熱的・力学的条件の準備

当該ノズルにおける表面後退率の試算

試算された値の妥当性の検証

### (1 - 1 - 2) 化学的腐食による表面後退率の評価

#### 【目的】

当該ノズルに対して、燃焼流との化学反応によって生じる炭化層の表面後退率を算定する。

#### 【作業項目と手順】

燃焼ガス中の物質が炭化層表面の炭素との間で自発的に進行する化学反応と、そのための条件及び反応熱の評価

それらの化学反応を想定したアブレーション解析により、外部環境条件(渦拡散係数や局所静圧など)に対する炭化層の表面後退量を算定

算定値の妥当性の検証

(1 - 2) 影響因子の変動量の評価

(1 - 2 - 1) 材料特性の評価

【目的】

(1 - 1 - 1) で作成する数学モデルに必要となる材料物性値と、燃焼中に変動する要因とその量について評価する。

【作業項目と手順】

機械及び熱物性値、特性値の整理

熱分解反応特性の整理

炭化層引張り試験

炭化層ガス透過係数測定

炭化層表面微視的観察及び分析

(1 - 2 - 2) 燃焼流特性の評価

【目的】

推定された局所エロージョンの直接原因や誘因を流体力学的に定量化することで、表面後退率に影響する因子の変動幅を評価する。

【作業項目と手順】

基本流動特性の評価 (軸対称 CFD 解析)

インレット部形状不整の影響評価 (3次元 CFD 解析)

開口部断熱材の溝の影響評価 (3次元 CFD 解析)

スロートと開口部断熱材接合部下流段差の影響評価 (3次元 CFD 解析)

推進薬光芒の影響評価 (3次元 CFD 解析)

ノズル形状の影響評価 (3次元 CFD 解析)

## (2) サブサイズモータ燃焼試験

表面後退量増大現象の要因分析および対策案の検討に資するため、サブサイズモータ(1/5スケール)による燃焼試験を計画している。(表3-1)

試験(その1): 表面後退率増大に対する寄与要因確認

試験(その2): 寄与要因の影響低減確認

試験(その3): 対策仕様の確認

上記、については の試験結果を踏まえ計画検討する予定である。

### (2-1) サブサイズモータ燃焼試験(その1)

#### 【目的】

表面後退率増大の要因として以下の3つが考えられる。

化学的、熱・機械的要因等の重畳による局所エロージョン増大

ライナアフトB2(CFRP製断熱材)前端部の欠け・剥離

スロートインサート(C/C製耐熱材)後端部の欠け

これらの要因の寄与を確認するために2回のサブサイズモータ(1/5サイズ)燃焼試験を実施する。

表面後退率への影響を顕在化させるため、モータ燃焼圧力をSRB-Aより高くし燃焼ガスのエネルギーを増加させるとともに、寄与要因として以下の要因の重畳について検証データを取得する。

要因 : ノズルスロート上流部の形状不均一(凹凸)から生ずる燃焼ガス流れの擾乱(渦)が招く加熱率の増大によるライナアフトB2表面後退率の増大

要因 : ライナアフトB2前端部の欠け・剥離による過大な段差から生ずる加熱率増大が招く表面後退率の増大

要因 : スロートインサート後端の欠けによる過大な段差から生ずる加熱率増大が招く表面後退率の増大

#### 【供試体の概要】

項目	サブサイズモータ	SRB-A
モータ代表直径(m)	0.5(1/5サイズ)	2.5
平均燃焼圧力(MPa)	11.8	9.8
燃焼時間(秒)	16	100
概要図	図3-2	図3-3

### 【試験条件】

試験条件を下表に示す。

試験 No.	試験条件
1	要因 として、ノズルスロット上流部に形状不均一(凹凸)を設ける。 要因 として、ライナアフトB2前端に欠けを設ける。 上記要因 及び を同一位相に設けることにより、重畳効果の確認も行う。
2	要因 は上記試験No.1と同じ 要因 として、スロットインサート後端部に欠けを設ける。 上記要因 及び を同一位相に設けることにより、重畳効果の確認も行う。

### 【試験後評価】

試験後にはノズル全周に渡りレーザー計測を実施し、表面後退量データを取得する。

### 【試験実施時期および場所】

実施時期：平成16年1月20日及び23日

実施場所：(株)IHIエアロスペース 武豊試験場(愛知県知多郡武豊町)

#### (2-2) サブサイズモータ燃焼試験(その2)(検討中)

ノズルへの加熱率を低減させる手法として、スロットインサート直後流の膨張比を大きくする(ノズル開口角を大きくする)ことによって、前項(2-1)の要因、及び、の重畳による表面後退率が低減することを確認する。

#### (2-3) サブサイズモータ燃焼試験(その3)(検討中)

新たに設定した対策ノズル仕様により前項(2-1)の要因、及び、の重畳による影響を確認する。

表3 - 1 サブサイズモータ燃焼試験全体計画

試験名	目的	モータ燃焼平均圧力	ノズル	ノズル付加形状
試験(その1): 表面後退率増大 に対する寄与要因 確認	次に示す要因、の重畳及び、の重畳による表面後退率の増大に関するデータを取得する。 ノズルスロート上流部の形状不均一(凹凸)から生ずる燃焼ガス流れの擾乱(渦)が招く加熱率の増大によるライナアフトB2表面後退率の増大 ライナアフトB2前端部の欠け・剥離による過大な段差から生ずる加熱率増大が招く表面後退率の増大。 スロートインサート後端の欠けによる過大な段差から生ずる加熱率増大が招く表面後退率の増大	SRB-A より 約20%高圧 (11.8MPa) とし、ノズル内 加熱率を増大 させ、影響を顕 在化させる。	SRB-A と同形状	ノズルスロート上流部に 凹凸を設け、下流の加熱率 を増大させるとともに、 ライナアフトB2前端部に 欠けを設け、後流の加熱率 を増大させる。 スロート後端部に欠けを 設け、後流の加熱率を増大 させる。
試験(その2): 寄与要因の影響 低減確認 (検討中)	ノズルへの加熱率を低減させる手法として、スロートインサート直後流の膨張比を大きくする(ノズル開口角を大きくする)。 これにより、上記(その1)の要因、及び、の重畳による表面後退率が低減することを確認する。	同上	SRB-A よりも開口角を 増加し、後流の加熱率 を低減させることで表 面後退率の低減効果 を確認する。	検討中
試験(その3): 対策仕様確認 (検討中)	新たに設定した対策ノズル仕様での上記要因及びの重畳による影響を確認する。	SRB-A と 同等圧力 (9.5MPa)	対策仕様	検討中



: 太枠内の試験を今回実施予定。



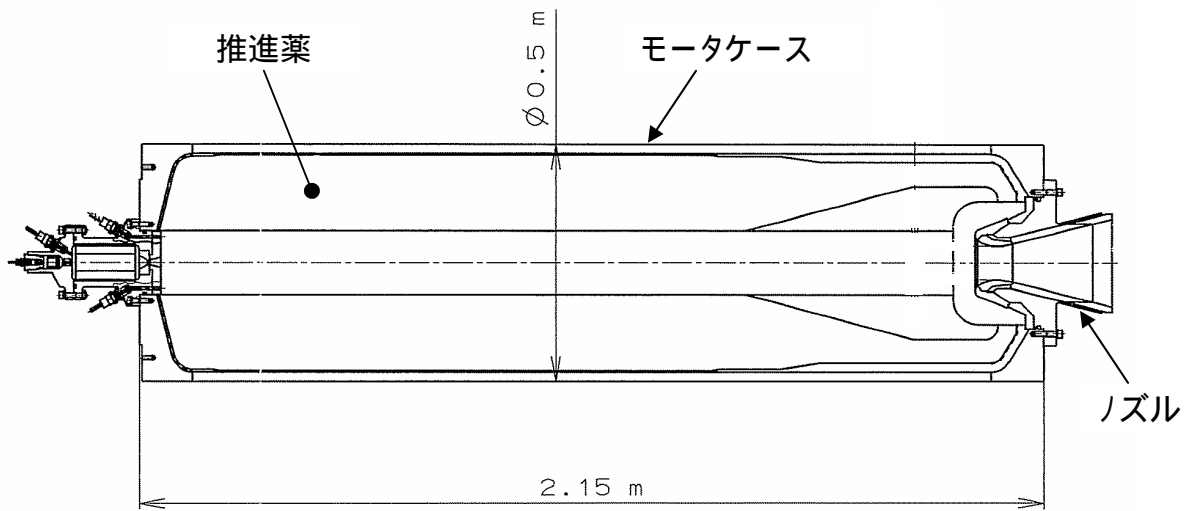


図3 - 2 サブサイズモータ概要図

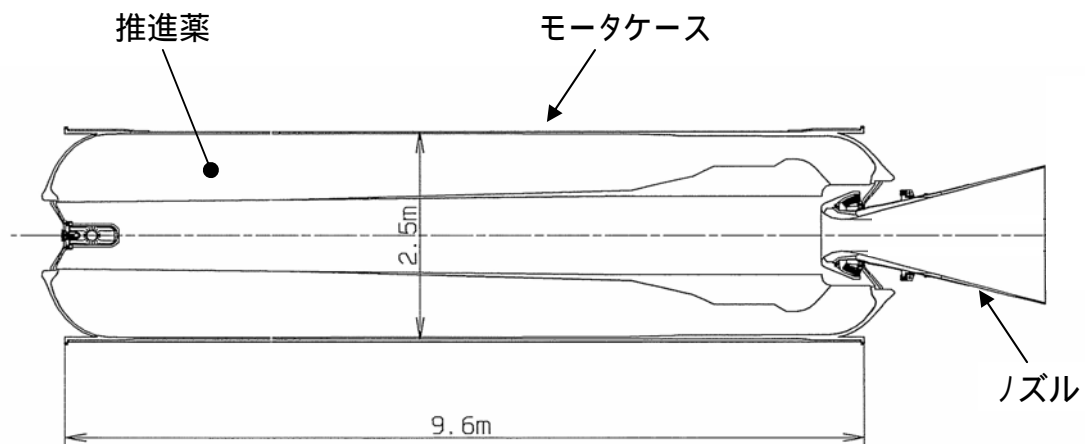


図3 - 3 SRB-A概要図

### (3) アーク加熱による層間剥離評価試験

ライナアフトB2の余長部(製造時の端材)を用いたアーク加熱試験を行い、6号機(R側)用素材の層間剥離に対する耐性を他号機用素材との差異を含め評価する。

なお、本事象については、開発試験段階で実施した加熱試験により、発生のないことを確認しているが、実機品の余長部を用いた実機環境に近い条件での試験にて追加評価を行うものである。

## SRB-A開発におけるエンジニアリングモデル(EM)、プロトタイプモデル(PM)、認定型モデル(QM)の地上燃焼試験について

### (1) EM地上燃焼試験

- ・実機サイズモータでの推進特性等設計妥当性の確認及びモータケース内断熱材、ノズル断熱材耐熱データの取得

SRB-Aは最大予測作動圧力 11.8Mpa、推進薬質量約65トンと国内で初めての大型高压燃焼ロケットモータであることから、開発の可能な限り早い段階で実機サイズのモータにより、各開発要素の技術データを取得することとした。

主要な点としては、H-SRBに対して金属製からCFRP製に変更したモータケースの特性、推進薬の高压下での燃焼特性、3DC/C製のスロートインサートの耐熱及び表面後退の特性、モータケース内断熱材の断熱性、点火モータの着火性能、ノズルの断熱性等である。モータの仕様として、技術導入中であったモータケースは米国製を使用し、モータケース内断熱材厚さに十分な余裕を確保した。実機のノズル駆動装置は電動方式であるが、当時並行して開発中のため、SRB時と同様な油圧方式で駆動させた。

EMの主な結果として、燃焼初期の圧力が予測と異なった。モータケースの歪データの挙動等から、推進薬の粘弾性特性により圧力の立ち上がりに対して推進薬の変形が遅れて生じ、燃焼面積の増加が遅れたものであることが分かった。3DC/C製スロートインサートは、表面後退量が少なく十分に耐荷した。モータケース内断熱材は実機仕様で問題ないことが確認された。ノズル開口部断熱材の一部に予測よりも大きな表面後退量が確認され、実機仕様については、厚みを増加させる設計変更を行った。

### (2) PM地上燃焼試験

- ・実機仕様モータ(モータケース内断熱材薄肉化)による推進特性・推力方向制御系機能等設計・製造工程の妥当性確認

EM地燃結果を踏まえて、実機仕様に必要な設計変更を行い、地上燃焼試験を実施した。EMからの主な変更点として、モータケース内断熱材厚みの余裕を最適化し薄肉化した。ノズル断熱材は表面後退に対する断熱性を向上させるため厚みを増加した。モータケースは技術移転を完了した国産ケースを使用した。ノズル駆動方式は実機仕様の電動方式とした。

PM地燃の結果として、推力曲線はEM時とよく一致しており良好な再現性を確認した。スロートインサートの表面後退の特性、モータケース内断熱材の断

熱特性も予測通りで良好であった。ノズル開口部断熱材の一部に予測よりも大きな表面後退量が確認されたため、スロートインサート下流断熱材接合部形状を設計変更した。

### (3) QM地上燃焼試験

・実機仕様モータの推進特性の再現性を確認し、設計・製造工程を確立する。

PMと同一仕様のモータとPM試験結果を踏まえて設計変更したノズルを用いて地上燃焼試験を実施した。

推力曲線等推進特性は予測値と良く一致し良好であることを確認した。スロートインサートの表面後退の特性もEM、PMと同様良好であった。モータケース内断熱材の断熱特性も予測通りで良好であった。ノズルについては、開口部に過大な表面後退量が確認されたため、開口部のCFRP材料をH-SRB実績品に変更するとともに、形状も分割方式から一体方式とし、さらに板厚を増加させる設計変更を行った。

### CFRP断熱材の炭化層の表面後退率に影響する因子

表面後退率  $D$  を機械的侵食による表面後退率  $D_m$  と化学的腐食による表面後退率  $D_c$  との和として表す。

$$D = D_m + D_c$$

$D_m$  : 機械的侵食による表面後退率,

$D_c$  : 化学的腐食による表面後退率

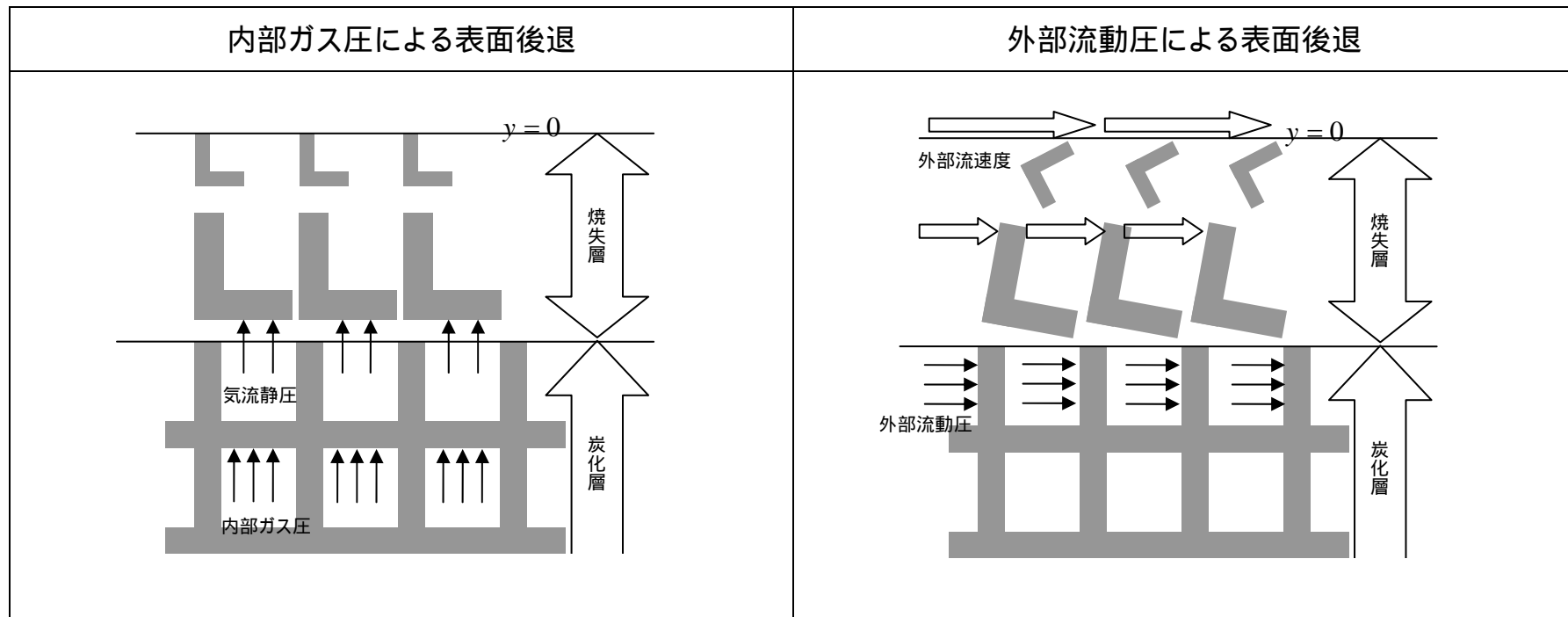
#### (1) 機械的侵食による表面後退率 $D_m$

一般に次の二つの要因によって機械的侵食が起きるとされている(図1)。

- 内部ガス圧(内外差圧)
- 外部ガス流の動圧

表面後退率に影響する変動要因としては以下があげられる。

材料特性	炭化層保持力と熱物性, ガス透過係数, 繊維の強度, 積層角, 表面温度, 等
気流特性	外部流の密度, 速度, 圧力, 等



出典) Yu, Dimitrienko “Thermomechanics of Composites under High Temperatures”

図1 機械的侵食による表面後退現象(概念図)

(2) 化学的腐食による表面後退率  $D_c$ 

SRB - Aの燃焼ガスに含まれる化学種が炭素と自発的に反応する場合を考えると、次の二つの場合が考えられる(図2)。

- 水性ガス反応 ( $T \geq 800$ )<sup>1</sup>

$$\begin{aligned} \text{C(s)} + \text{H}_2\text{O(g)} & \quad \text{H}_2\text{(g)} + \text{CO(g)} \\ \text{C(s)} + \text{CO}_2\text{(g)} & \quad 2\text{CO(g)} \end{aligned}$$
- $\text{Al}_2\text{O}_3$ とCの酸化還元反応 ( $T \geq 2200$ )
$$\begin{aligned} 3\text{C(s)} + \text{Al}_2\text{O}_3\text{(l)} & \quad 2\text{Al(g)} + 3\text{CO(g)} \\ 4.5\text{C(s)} + \text{Al}_2\text{O}_3\text{(l)} & \quad 0.5\text{Al}_4\text{C}_3\text{(g)} + 3\text{CO(g)} \end{aligned}$$

アルミナと炭素の反応に関しては高温の場合に限り進行するので、壁に付着するアルミナ粒子の温度が重要なパラメータとなる。

なお、化学熱力学的な検討結果については、今後詳細な報告を予定している。

表面後退率に影響する変動因子として以下が挙げられる

材料特性	炭化層の密度と熱物性、表面温度、等
気流特性	気体静圧、渦拡散係数、入射アルミナ粒子質量流束、等

<sup>1</sup> 水性ガス反応は厳密には、水と炭素の反応に対する呼び名である。以下では二酸化炭素との反応も含めて、代表名としてこの呼び名を用いる。

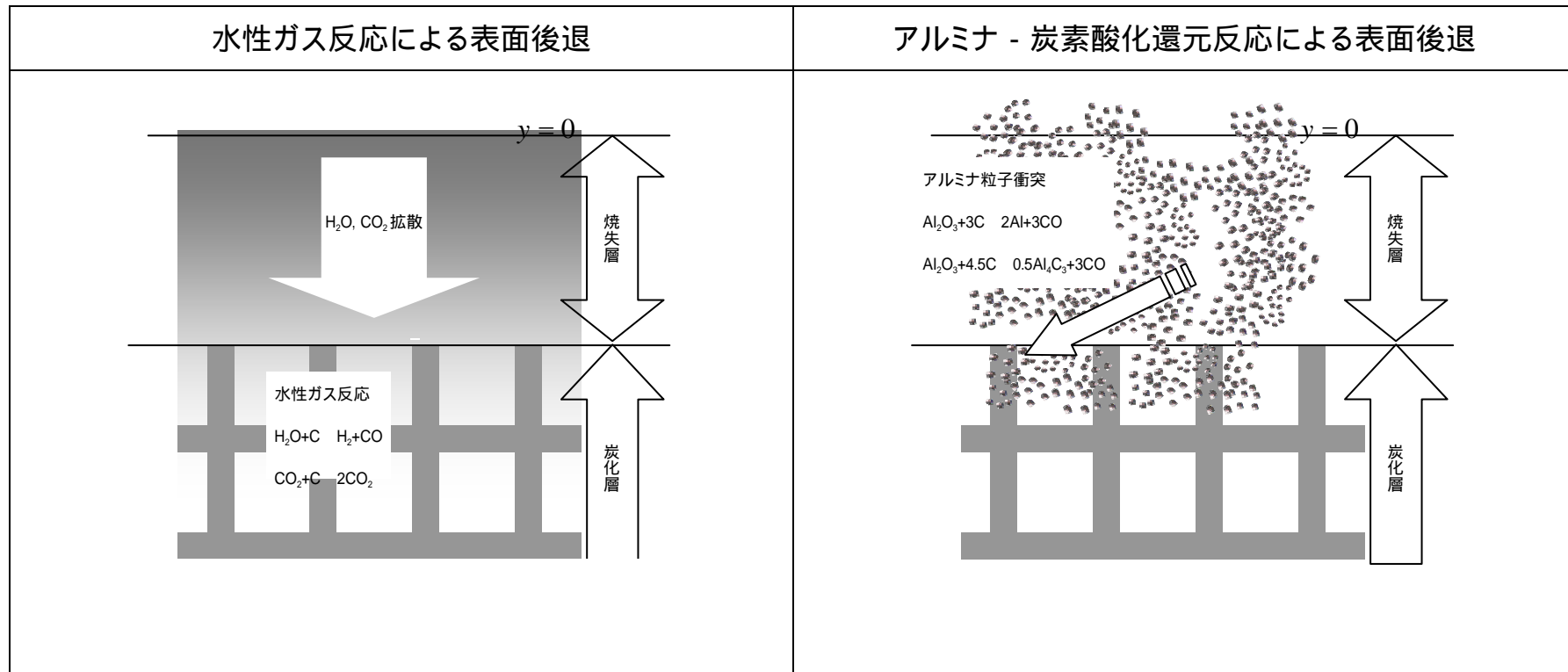


図2 化学的腐食による表面後退現象(概念図)