

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 展開ノズル材耐熱試験本試験報告書

Report of main combustion test for material of deployable nozzle

竹内 伸介, 北川 幸樹, 徳留 真一郎, 戸部 裕史, 荒川 聡, 餅原 義孝  
鈴木 直洋, 芳仲 敏成, 森下 直樹, 岩崎 祥大, 岩淵 頌太, 和田 明哲

TAKEUCHI Shinsuke, KITAGAWA Koki, TOKUDOME Shin'ichiro, TOBE Hirobumi  
ARAKAWA Satoshi, MOCHIHARA Yoshitaka, SUZUKI Naohiro, YOSHINAKA Toshinari  
MORISHITA Naoki, IWASAKI Akihiro, IWABUCHI Shota and WADA Asato

2021年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目次

概 要	1
第 1 章 試験計画	2
1.1 試験概要及び目的	2
1.2 供試体	3
1.3 試験設備	4
1.4 点火系	4
1.5 計測項目	4
1.6 ノズル形状計測	5
第 2 章 取得されたデータと評価	19
2.1 試験結果概要	19
2.2 サーモカメラによる供試体温度測定結果	19
2.3 燃焼特性	19
2.4 その他の計測データ	20
2.5 設備の運用結果	20
2.6 ノズル変形	20
第 3 章 総括	51

# 展開ノズル材耐熱試験本試験報告書

竹内 伸介<sup>\*1</sup>, 北川 幸樹<sup>\*1\*2</sup>, 徳留 真一郎<sup>\*1</sup>, 戸部 裕史<sup>\*1</sup>, 荒川 聡<sup>\*1</sup>, 餅原 義孝<sup>\*1</sup>  
鈴木 直洋<sup>\*1</sup>, 芳仲 敏成<sup>\*1</sup>, 森下 直樹<sup>\*3</sup>, 岩崎 祥大<sup>\*1\*4</sup>, 岩渕 頌太<sup>\*1</sup>, 和田 明哲<sup>\*1</sup>

## Report of main combustion test for material of deployable nozzle

TAKEUCHI Shinsuke<sup>\*1</sup>, KITAGAWA Koki<sup>\*1\*2</sup>, TOKUDOME Shin'ichiro<sup>\*1</sup>, TOBE Hirobumi<sup>\*1</sup>  
ARAKAWA Satoshi<sup>\*1</sup>, MOCHIHARA Yoshitaka<sup>\*1</sup>, SUZUKI Naohiro<sup>\*1</sup>  
YOSHINAKA Toshinari<sup>\*1</sup>, MORISHITA Naoki<sup>\*3</sup>, IWASAKI Akihiro<sup>\*1\*4</sup>  
IWABUCHI Shota<sup>\*1</sup> and WADA Asato<sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

This paper reports the purpose, plan and result of “the main combustion tests for material of deployable nozzle” that was carried out from 2020/01/20 to 2020/02/04 at Akiruno Experiment Lab of ISAS/JAXA. In this test two simulated deployable nozzles made of titanium alloy sheets are used as extensions for opening ratio 50 to 100 with  $\Phi 250$  solid motors and each motor was combusted on 1/27 and 1/31. As the result, the nozzles are not broken during combustion in spite of small residual plastic deformation and significant test data to develop the deployable nozzle are acquired.

### 概要

本報告書は、2020年1月20日から同年2月4日にかけてJAXA宇宙科学研究所あきるの実験施設において実施した「展開ノズル材耐熱試験本試験」の試験目的から得られた実験データまでをまとめたものである。本試験では $\Phi 250$ 固体モーターを使用して、開口比約50～100の部分を展開ノズルを想定したチタン合金薄板製ノズルとし、1/27及び1/31の2回の燃焼試験を実施している。試験の結果、チタン合金薄板製ノズルには若干の残留変形等は見られるものの、燃焼中の破損等には至っておらず、展開ノズルの実現に向けた貴重なデータが得られた。

---

\* 2020年11月30日受付 (Received November 30, 2020)

<sup>\*1</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

<sup>\*2</sup> 現・九州工業大学 (at present Kyushu Institute of Technology)

<sup>\*3</sup> 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第二研究ユニット

(Research Unit II, Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency)

<sup>\*4</sup> 現・ワイスペース (at present Yspace)

## 第1章 試験計画

### 1.1 試験概要及び目的

固体推進系の打ち上げ能力向上の一手段として、固定ノズルの後方に薄い金属板で作られた展開式のノズル（図 1.1 参照）を取り付けることを提案している。現時点では収納時には図左上の様な形状で折り畳まれて拘束されており、拘束が解除されると自身の弾性力により図右下の様に展開する事を想定している。収納状態で弾性変形の範囲内に留まるためには板厚が極めて薄く弾性域の広い金属板を使用する必要があり、現時点では直径 1 m 弱のノズルで板厚 0.25mm 程度のチタン合金板を想定している。

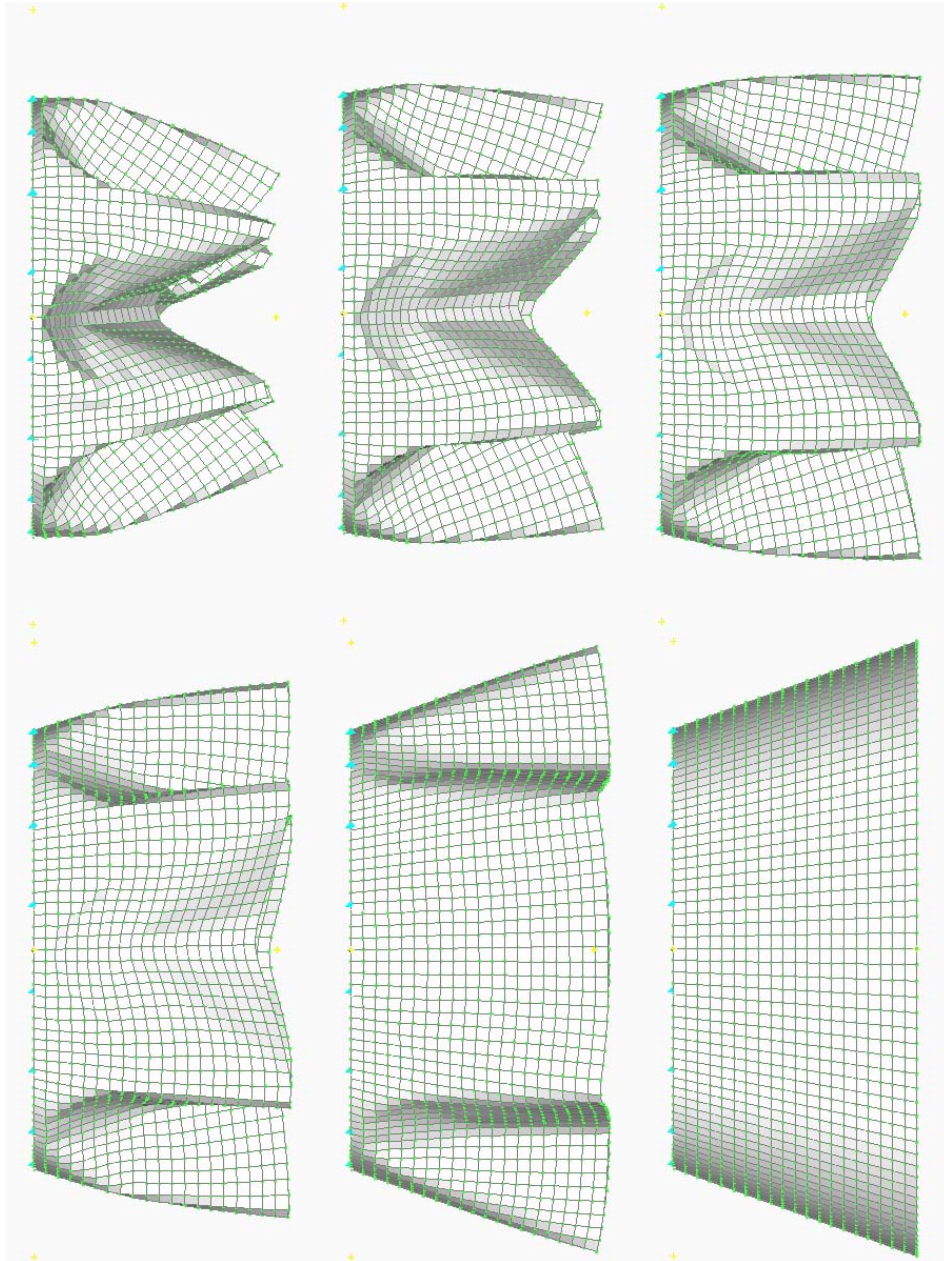


図 1.1 : 展開式ノズルの収納・展開

一方で固体推進系の場合は比較的加熱率が大きく、現在金属製ノズルの使用を想定している開口比50以上の領域でも壁面1000度を超えるという予測がある。それに対してチタンは900度を越える辺りから急激に強度が低下し、大きなクリープ変形を生じる可能性が出てくるため、注意が必要である。上記を背景として、本試験は固体推進系への金属製ノズルの適用に必要なデータの取得を目的とする。

今回の本試験では前回の予備試験(2016Nov.)で確認した実験手法に基づき、Φ250モーターを用いたノズルの耐熱試験を行う。実験に用いる展開ノズル部は想定している実機の凡そ1/4サイズであり、板厚のみ実機と同等としている。またモーター内圧・温度、固定ノズル部開口比も実機と同等もしくはそれ以上とし、加熱率を実機と同等以上の条件としている。これにより展開ノズル部の加熱条件・温度分布が実機とほぼ同等以上となると考えており、本試験でノズル材料の耐熱性の確認を行う。なお固定ノズルはCFRPおよびグラファイト製の2種を用意しており、フィルム冷却効果の測定も併せて行う。

本試験と並行して実機大サイズの展開ノズルの試作及び収納展開試験を進めており、共に問題ない事が確認されれば実機サイズのノズルを用いた試験につなげていく予定である。展開ノズル適用可能となれば、Destiny+キックステージの打ち上げ能力を向上できる。

## 1.2 供試体

本試験では、展開ノズルに相当するチタン合金製ノズル2式、Φ250固体モーター2式、CFRP製固定ノズル1式、グラファイト製固定ノズル1式を用いて2回の燃焼試験を実施する。チタン合金製ノズルは、実機で使用を予定しているチタン合金SP-700(Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo、加工後に熱処理をする事で3%程度の形状記憶性を発揮するチタン合金)で作られており、ノズル径・ノズル長は実機の約1/4、板厚は実機と同等の0.25mmである。ノズル図面を図1.2に示す。発生する応力は80MPa程度と予想しており、常温強度は数百MPaであるので安全率数倍と常温では十分な強度を持つが、高温では強度低下が起きるため、破損、破断等の可能性がある。応力的に想定される破壊モードは、1.周方向の破断、2.軸方向の圧縮座屈、の2つであるが、局所加熱等による穴あき等も可能性として想定される。またCFRP製固定ノズル付きΦ250モーターの図面を図1.3に、グラファイト製固定ノズル付きΦ250モーターの図面を図1.4に示す。また両モーターの予測燃焼特性を図1.5に、その内圧及び予備試験結果から予測されるチタン合金製ノズルの壁面温度予測を図1.6に示す。またモーターケース本体の強度評価を図1.7に、セーフティバルブを図1.8に示す。

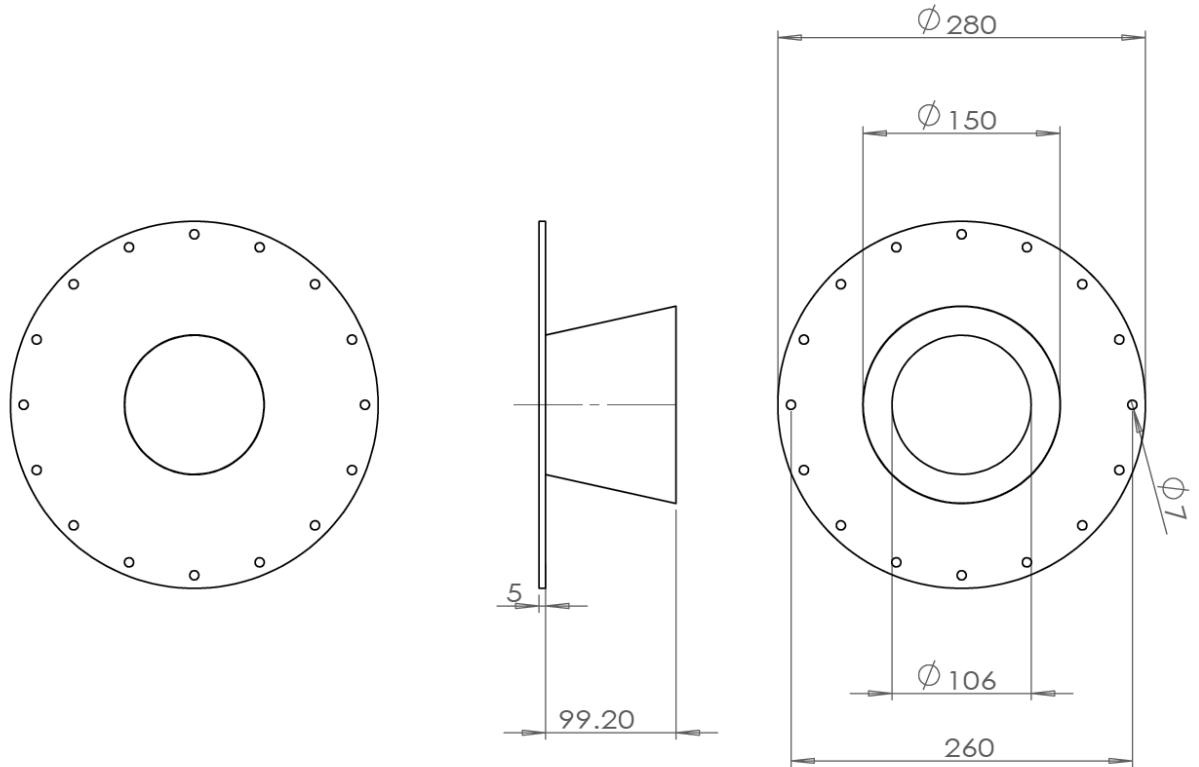


図 1.2 : チタン合金製ノズル図面

### 1.3 試験設備

本試験にはあきる野実験施設の小型真空槽及びバッファタンクとそれらを接続する水冷式拡散筒を使用する。設備の写真を図 1.9a,b に示す。小型真空槽内には門型・ロードセル・フレクシャ等を用いて図 1.10a,b に示すようなテストスタンドを組み、供試体を設置する。図 11 にテストスタンドの諸元を示す。

### 1.4 点火系

本試験では固体モーターの点火にレーザー着火方式を使用する。レーザー発振器の制御盤は管制室に設置、レーザー発振器をスタンド上に設置する。計測室の点火管制盤からの接点信号にて点火スイッチを ON し、点火する。点火系の概要を図 12 に、また安全仕様を図 13 に示す。

### 1.5 計測項目

本試験の計測項目を表 1.1 に示す。これらに加えて、通常のビデオカメラやサーモカメラによる映像取得も行う。

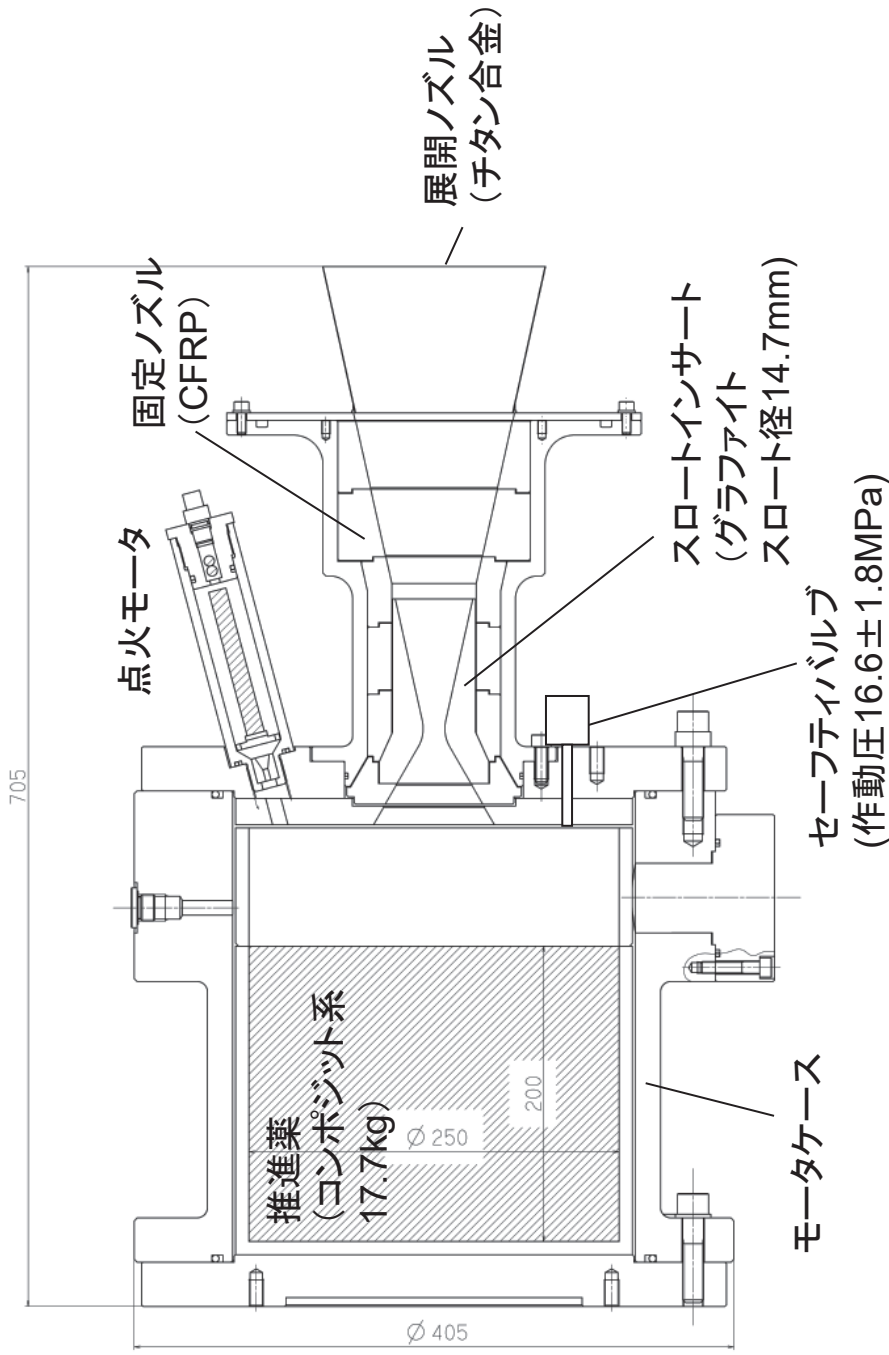
表 1.1 : 計測項目一覧

項目	仕様	項目	仕様
モータ内圧	～8MPa	バッファタンク圧	20Torr～120Torr
主推力	～3kN	バッファタンク温度 1,2,3	K 熱電対
横(Y)推力	1kN ロードセル	拡散筒内圧力 1,2,3	10Torr～120Torr
横 (Z1) 推力	5kN ロードセル	拡散筒内温度 1,2,3	0～1300℃
横 (Z2) 推力	5kN ロードセル	拡散筒冷却水温度	0～100℃
真空槽圧	10Torr～120Torr	冷却水流量	超音波流量計 0～160L/s
真空槽温度 1,2	K 熱電対	冷却水タンク圧力	0～550kPaG
展開ノズル壁温	サーモカメラ 真空槽外から撮影	冷却水タンク液面高	ビデオカメラ 2～5m
展開ノズル壁温 1,2,3	K 熱電対		

### 1.6 ノズル形状計測

試験の前後でノズル形状の3次元計測を行い、地上燃焼試験で発生するノズルの残留変形についてのデータを取得する。

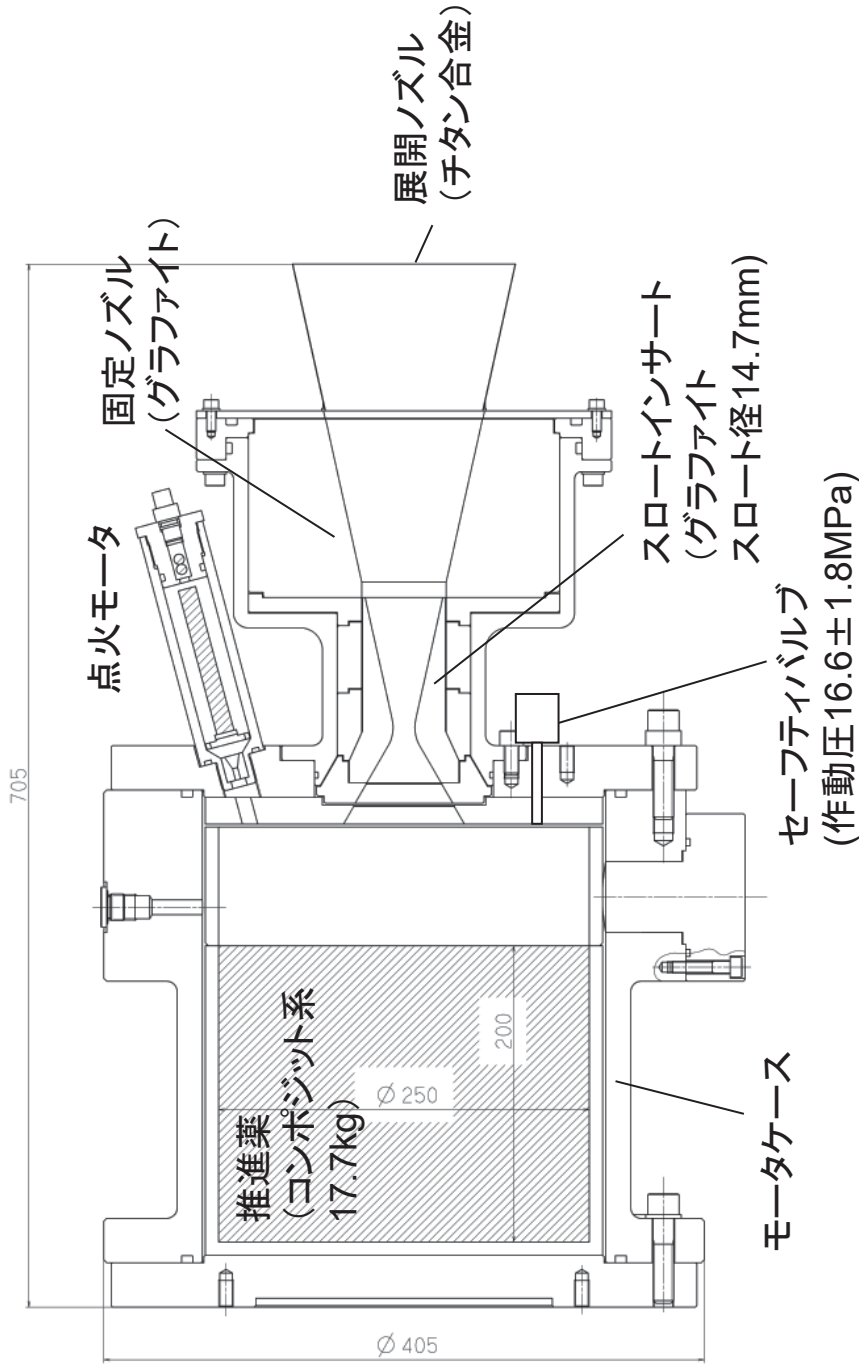
# 図1.3: Φ250固体モータ(CFRP製固定ノズル)



構成: 点火モータ、モータケース、推進薬、スロートインサート、固定ノズル(CFRP)、展開ノズル(展開なし)、セーフティバルブ  
 ノズル以外は、固体モータの開発時の燃焼実験の実績のあるものと同設計。(モータケースはM-35開発時の燃焼実験で使用したものを再整備し再使用)

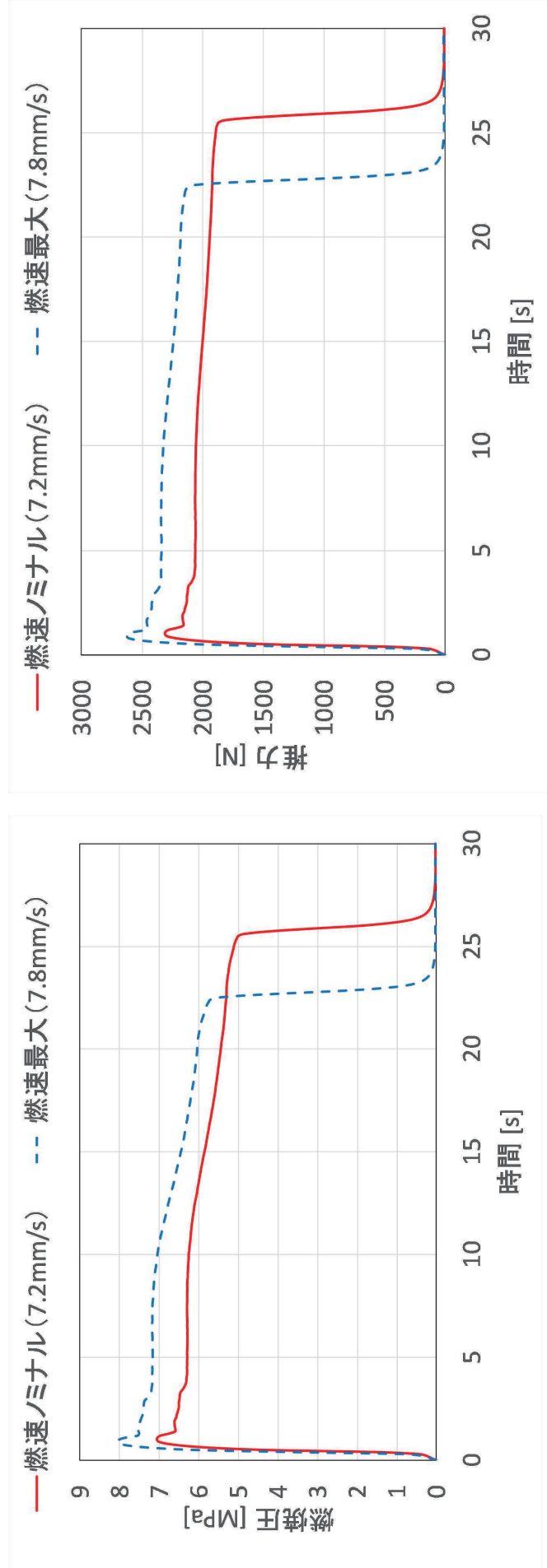


図1.4: Φ250固体モータ(グラファイト製固定ノズル)



構成: 点火モータ、モータケース、推進薬、スロートインサート、固定ノズル(グラファイト)、展開ノズル(展開なし)、セーフティバルブ  
 ノズル以外は、固体モータの開発時の燃焼実験の実績のあるものと同設計。(モータケースはM-35開発時の燃焼実験で使用したものを再整備し再使用)

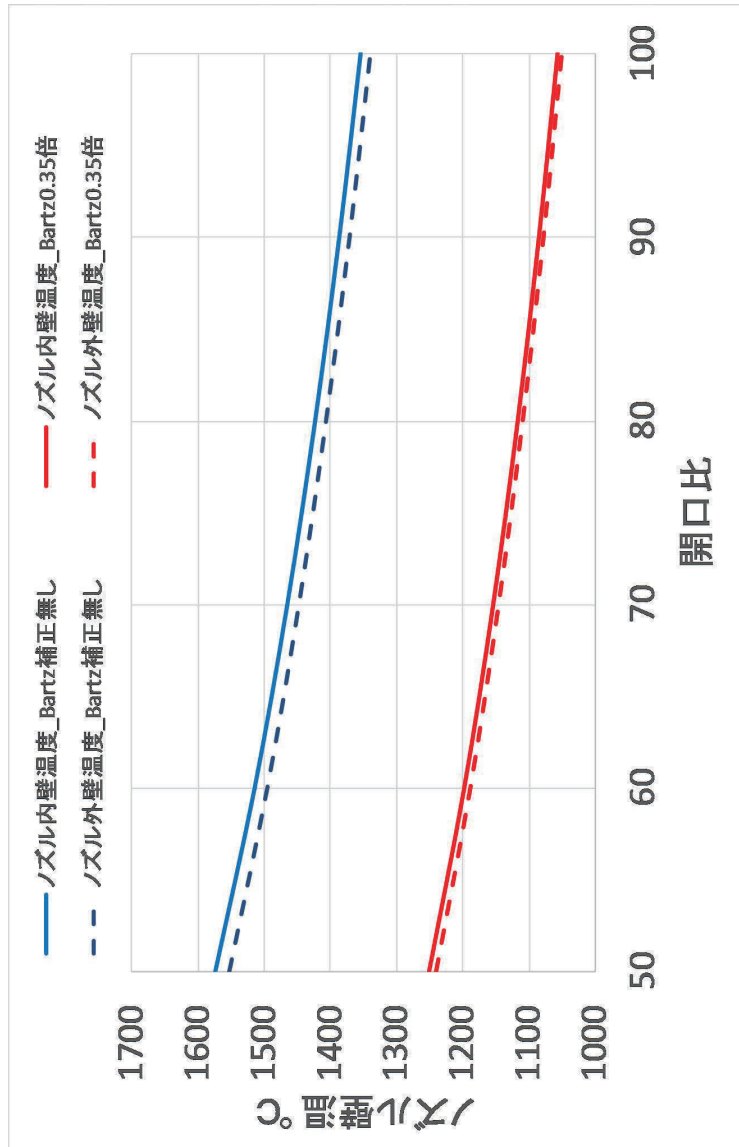
# 図1.5： 燃焼特性履歴予測



最大燃焼圧力: 8MPa 最大推力: 2.6kN 燃焼時間: 30s以下

# 図1.6：ノズル壁温予測

- ・ Bartz式を用いてノズル壁温を計算(定常状態)
- ・ ノズル内燃焼ガスからの熱輸送とノズル内熱伝導、ノズル壁からの放射を考慮
- ・ ノズル内流れは、一次元定常、断熱、等エントロピー流れと仮定して計算
- ・ Bartz式を0.35倍に補正した場合も計算。(予備試験で得られた結果)

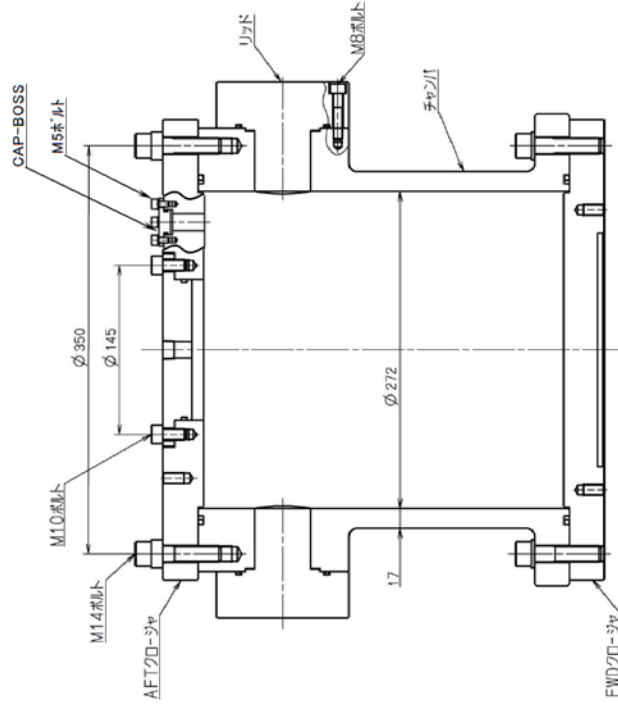


開口比50(展開ノズル先端)の位置で、最大1250°C以上に達する可能性がある。その場合、展開ノズルは変形する可能性がある。

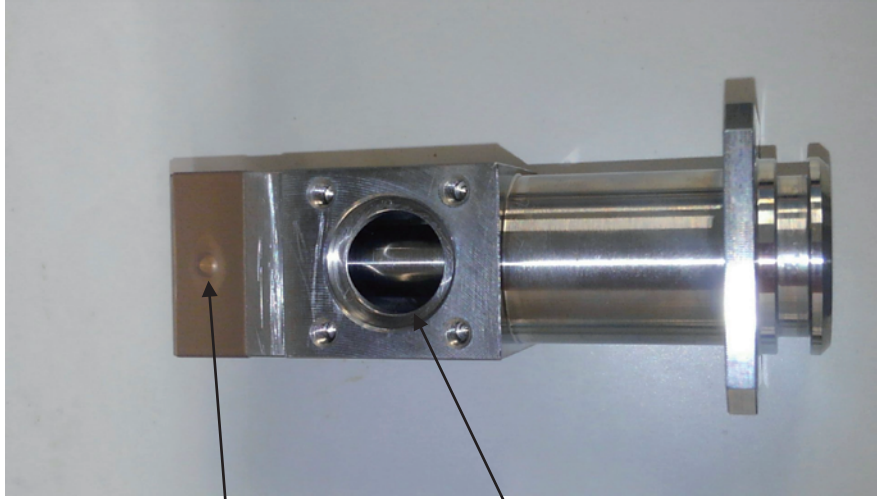
# 図1.7：モータケース強度

設計圧力：18.4MPa(セーフティバルブの作動圧上限)

部位	材質	安全率	安全余裕	備考
チャンバ	SCM440	1.25	4.0	平行部周方向引張応力
AFTクローージャ	SCM440	1.25	2.91	曲げ応力
FWDクローージャ	SCM440	1.25	2.66	曲げ応力
M14ボルト	SCM435	1.25	0.32	ワッシャの圧縮による破壊応力
M10ボルト	SCM435	1.25	1.28	被締付体の圧縮による破壊応力
M8ボルト	SCM435	1.25	1.78	被締付体の圧縮による破壊応力
M5ボルト	SCM435	1.25	2.84	被締付体の圧縮による破壊応力



## 図1.8：セーフティバルブ



シアピン

噴出孔  
(両面、φ12)

各種モータで使用されている実績品  
16.6±1.8MPaで作動

シアピンが切断することによって、  
圧力が開放される。

シール面はベークライトで断熱

ワーストケースとして推進薬上面と側面が燃焼がするとした場合、セーフティバルブが作動し、最高燃焼圧は18MPaとなる。設計圧力より低いため、安全が保障される。

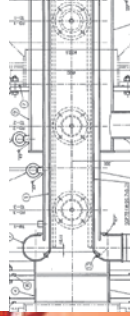
# 図1.9a: 小型真空槽及びバツファアタンク



バツファアタンク



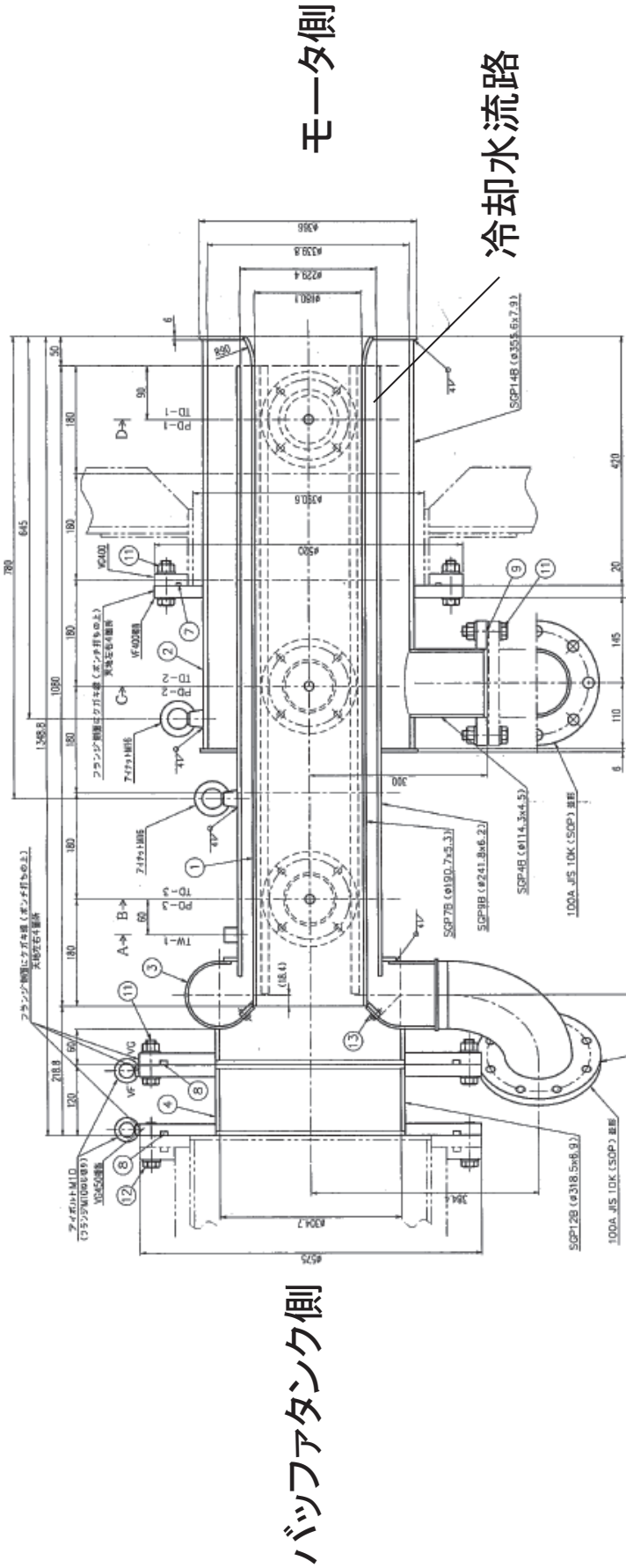
小型真空槽



水冷式拡散筒

- ・ 供試体は小型真空槽内に設置し、初期真空槽圧は40torr程度。
- ・ 真空槽は既存の水冷却式拡散筒を介して、バツファアタンクに接続。
- ・ 燃焼終了時には、バツクファア防止弁を開放する。(手動スイッチ)

# 図1.9b: 水冷式拡散筒



- 既存の拡散筒を使用。(DOM-4燃焼試験の実績有り)
- あきる野既存の冷却水供給設備から水を供給。
- DOM-4の実績より求めた冷却水流量  
燃焼初期: 61L/s、燃焼末期: 47L/s
- 上記流量の1.2倍以上を流し、十分に拡散筒を冷却する。
- 事前に水流し試験を行い流量を確認する。(加圧圧力500kPa, PID制御)

図1.10a:テストスタンド概略図

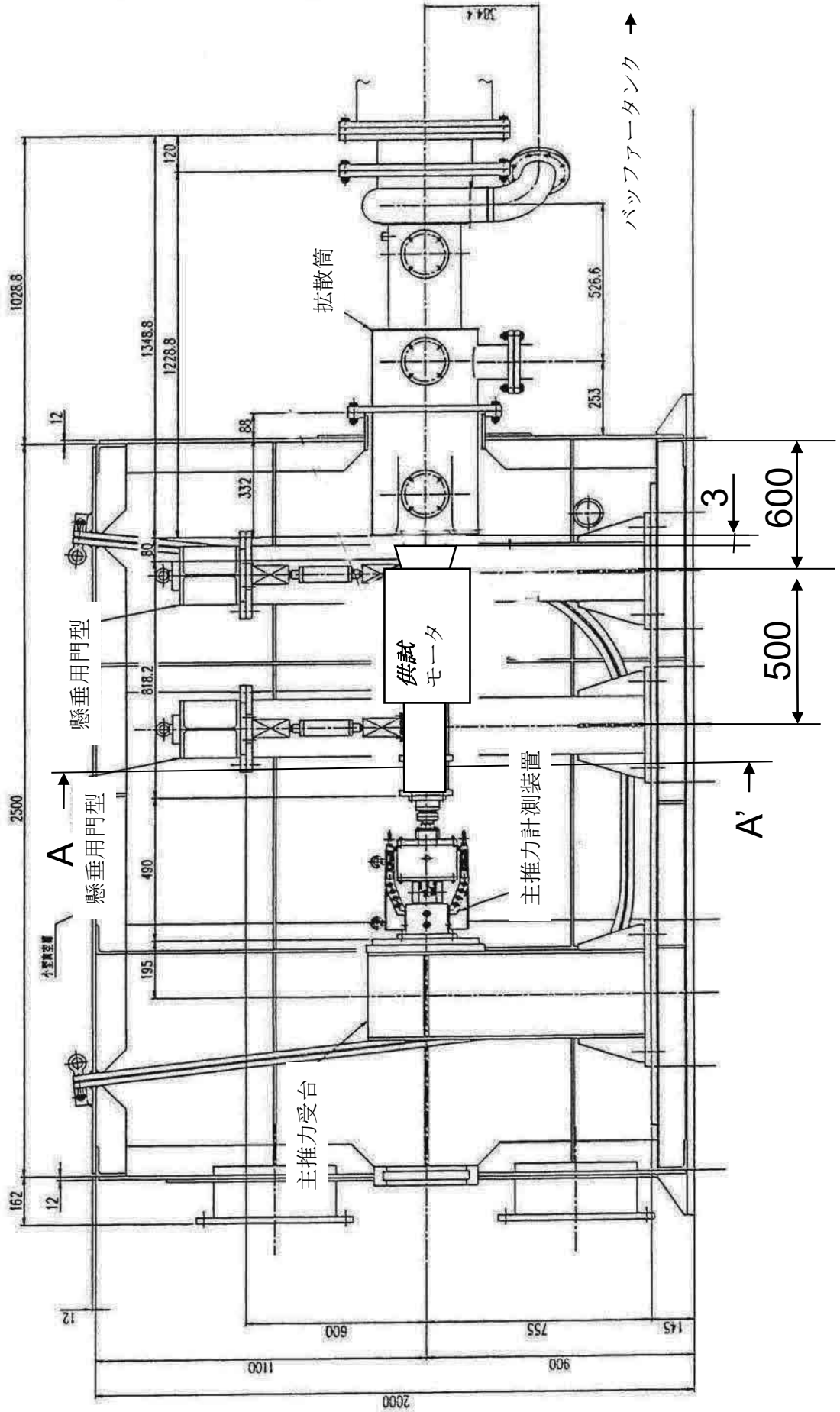
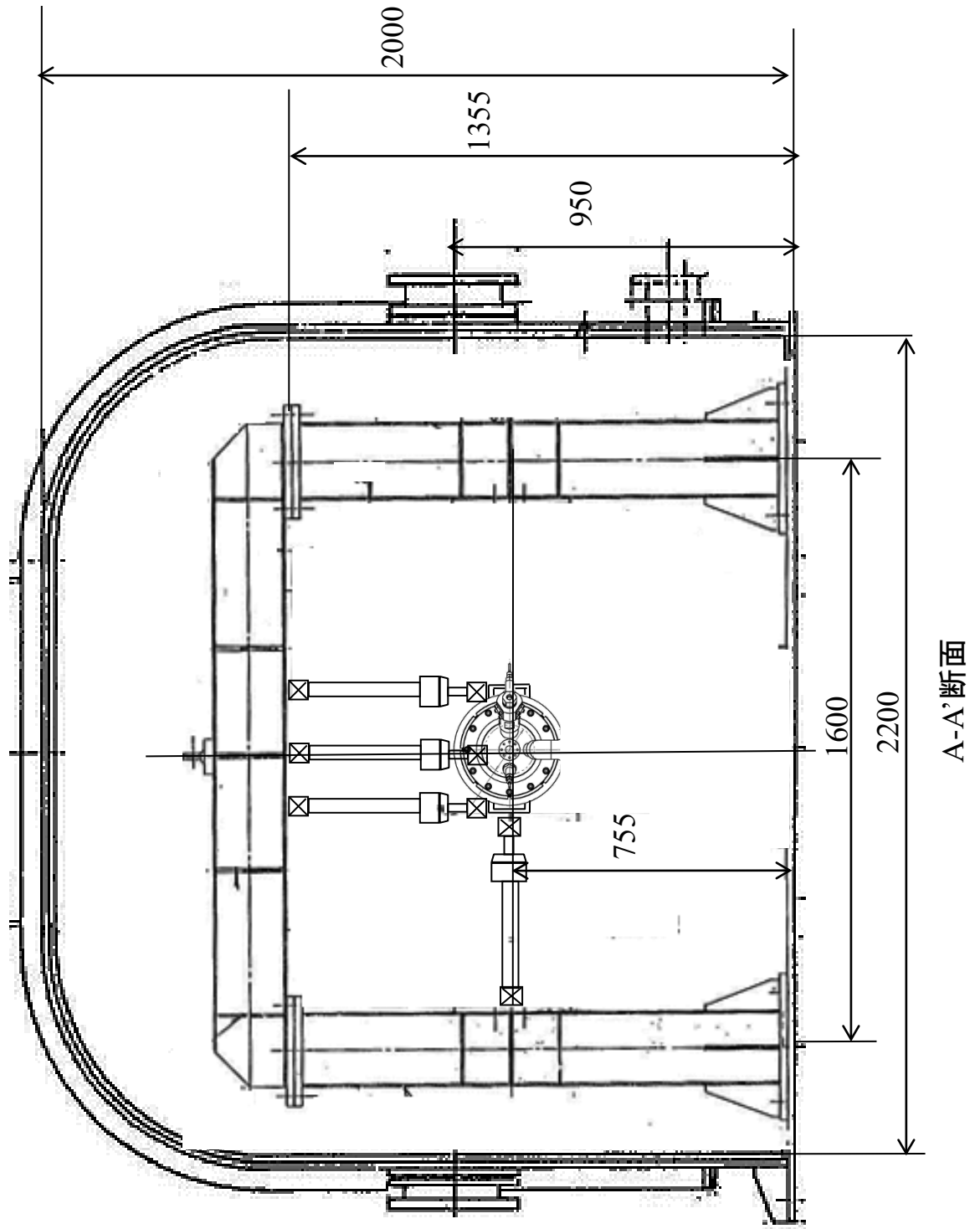




図1.10b: スタンド設備概略図(A-A'断面)



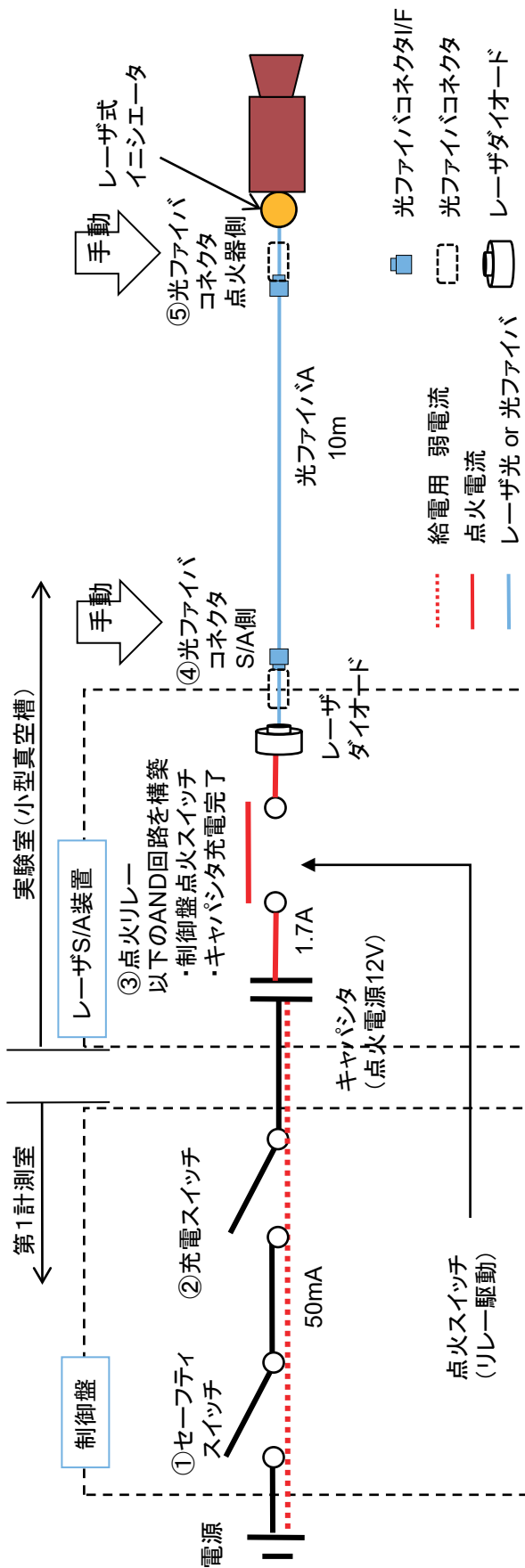
# 図1.11: テストスタンド諸元

- ・ 供試体は門型にロードセル・フレキシャ・ターンバックルを介して垂直、水平方向に固定する。また、軸方向にもロードセル・フレキシャ・ターンバックル・推力計測較正装置を介して推力受け台に固定する。
- ・ 下表に示すようにスタンド系の耐荷重を見積もり、安全余裕が十分であることを確認した。

	場所(弱いところ、太字は最弱)	断面積[mm <sup>2</sup> ]	荷重[N]	発生応力[N/mm <sup>2</sup> ]	許容応力[N/mm <sup>2</sup> ]	安全率	材料	材料の強度[N/mm <sup>2</sup> ]	備考
主推力Fx	ロードセル	-	2600	-	-	2.88	-	-	定格5kN、許容過負荷7.5kN、共和電業製 引張衝撃荷重として(実際には圧縮だが、同等と判断) 定格20kN用 1ton用=9.8kN用
	<b>M12のニゲまたは谷</b> 推力計測較正装置	80.2	2600	32.4	60	<b>1.9</b>	S45C	343	
	推力受け台	-	2600	-	-	7.7	-	-	
	ロードセル	-	260	-	-	3.8	SS400	-	
横推力Fy	M8のニゲまたは谷	34.7	260	7.5	60	8.0	アルミ合金	-	定格1kN、許容過負荷1.5kN、TEAC製 引張衝撃荷重として 引張衝撃荷重として M4を3本
	M12の谷	80.2	260	3.2	60	18.5	S45C	343	
	<b>ロードセル固定ボルト</b>	24.8	260	10.5	60	<b>5.7</b>	SCM435	785	
	フレキシャ	-	260	-	-	18.8	SNCM439	883	
横推力Fz	<b>ロードセル</b>	-	820	-	-	<b>3.7</b>	-	-	0.5ton用=4.9kN用 定格2kN、許容過負荷3kN、Teac製。3点吊りなので、自重(2200N) +機構推力(260N)を1/3にしている。 引張衝撃荷重として 引張衝撃荷重として
	M12のニゲまたは谷	80.2	820	10.2	60	5.9	S45C	343	
	W3/4の谷	196	820	4.2	60	14.3	S45C	343	
	ロードセル固定ボルト	152	820	5.4	60	11.1	SCM435	785	
門型	フレキシャ	-	820	-	-	24	SNCM439	883	2ton用=19.6kN用 200x200x8x12 H型鋼 ねじりの衝撃荷重として
	<b>門型200 x 200 H型鋼</b>	6353	2460	0.4	30	<b>77</b>	SS400	215	

明らかに強度の足りているプレート等は省略している。

# 図1.12: 点火系



No.	作業	解除されるインヒビット	有効なインヒビット	燃焼スタンドでの作業者	備考
1	試験日の初期状態		①～⑤全て	あり	
2	レーザーS/A駆動チェック	(①～④ 駆動時のみ)	⑤ (モータ設置前)	点火系作業者のみ	レーザー出力をパワーメータで確認 レーザー光保護メガネ着用
3	光ファイバ結線	⑤+④	①～③	点火系作業者のみ	
4	セーフティスイッチON	⑤④+①	②③	なし	
5	充電スイッチON	⑤④①+②	③	なし	
6, X	点火	⑤④①②+③		なし	

## 図1.13:レーザS/A安全仕様

### 作動順序／仕様

1. S/A信号によりコマンド入力および給電が可能となる。
2. 充電信号の入力により、小電流 (mA単位) で蓄電
3. キャパシタ充電完了 (モニタ検知) により、駆動回路が動作可能となる。  
(キャパシタ充電完了とのAND回路)
4. 点火信号によりレーザの駆動回路が作動し、レーザ出力する。出力時間は最長0.5s
5. レーザが光ファイバを通り点火器まで到達し、点火する。
6. 0.5s以降は、自動的にARMスイッチをOFFにして放電が開始される。  
充／放電信号OFF からキャパシタの電圧が0.7V(5%)になるまでの時間は10s以下。
7. 逆行時には、キャパシタを任意に完全放電が可能。

### 耐環境 作動確認実績

高真空 (1.0e-4Pa, 高度170km相当) 動作実証済  
恒温槽 -20°C ~ 65°C の環境で動作実証済

## 第2章 取得されたデータと評価

### 2.1 試験結果概要

真空ポンプ及びエジェクターを用いて小型真空槽+バッファタンクを真空引きし、5kPa以下に到達したところで固体モーターに点火して試験を実施した。試験は1/27に実施した第1回目燃焼試験(CFRP製固定ノズルを使用、以降#1と略記)及び1/31に実施した第2回目燃焼試験(グラファイト製固定ノズルを使用、同#2)の2回実施した。通常のビデオカメラで撮影した試験の画像時刻歴を図2.1(#1)及び図2.2(#2)に示す。燃焼中のノズルには大きな変形は認められない事が分る。各試験での最高到達温度は、#1で概ね1160°C、#2で1060°Cであった(詳細は後述)。また#1でバッファタンクからのバックファイアの影響を小さくするためにバックファイア防止弁を開したところ、外圧により供試体が座屈する現象が発生したため、#2ではバックファイア防止弁の開は行っていない。座屈した供試体を図2.3に示す。

### 2.2 サーモカメラによる供試体温度測定結果

サーモカメラを用いてノズルを撮影し、燃焼中の温度分布を計測した。まず最初に熱電対の温度データを用いてサーモカメラの較正を行った結果を図2.4に示す。温度分布は軸対称と仮定して、ノズル内で最高温度が検出されるノズル中央部付近の温度データと、軸方向位置は同じで位相が90度異なる位置の熱電対の温度データを比較した所、放射率 $\epsilon=0.94$ で熱電対のデータと概ね一致する結果が得られた。供試体には温度計測のために黒色塗装(ジャパンセンサーJSC-3号)を行っているが、こちらの仕様上も同じ $\epsilon=0.94$ であり、以降はこの値でデータ処理を行った。

サーモカメラから得られた温度分布画像の時刻歴を図2.5(#1)と図2.6(#2)に、ノズル上の最高温度履歴(計測された場所は一定ではない)の時刻歴を図2.7に示す。理論上はノズルの入口が一番加熱率が高く温度が高くなりそうであるが、ノズル入口にはI/F用のフランジがあるため、この熱容量が影響してノズル入口付近は若干温度が下がり、入口から全長の1/3~1/2程度下流の位置が最高温度になっていると考えられる。また時刻歴で共に27s付近に瞬間的な温度上昇が見られるが、これはバックファイアの影響と推定され、打ち上げ時に起きない現象であるのでこれを無視すると、最高到達温度は先述の通り#1で概ね1160°C、#2で1060°C程度である。なお試験前の予測ではCFRP製固定ノズルを用いた#1の方が、CFRP昇華により形成されるガス層によるフィルム冷却でノズルの温度が低くなることが予想されていたが、実際にはグラファイト製固定ノズルの#2の方がノズル温度が低い。この傾向は2016年11月に実施した予備試験でも同じであり、グラファイト製ノズルの熱容量のため燃焼ガス温度が低下したためではないかと推測している。

### 2.3 燃焼特性

図2.8に#1の燃焼内圧・真空推力履歴及び燃焼特性を、図2.9に#2の燃焼内圧・真空推

力履歴及び燃焼特性を示す。結果は概ね事前予測と一致しており、燃焼に問題は無かったと考えている。図 2.10 にバルツの式を用いて温度予測をした際の補正係数の推定結果を示す。係数は小さめで 0.3 程度であり、以前の予備試験の結果とほぼ一致している。

## 2.4 その他の計測データ

表 2.1 に本燃焼試験における計測点の一覧を、図 2.11a,b,c に各計測点の位置を示す。また図 2.12a-g に#1 の計測結果を、図 2.13a-e に#2 の計測結果を示す。全データは問題なく取得されており、詳細な評価を実施中である。

## 2.5 設備の運用結果

本試験では拡散筒を水冷で運用しており、その運用実績を評価した。事前の水流し試験、拡散筒入熱量検討等の結果から、冷却水供給目標量を 80~110L/s と設定し、冷却水タンクの初期水面高を 3.9m。初期タンク圧力を 500kPa、PID 設定目標圧力を 460kPa とした。PID パラメータ設定値は、n.P=35、n.I=1、n.D=2 であった。#1、#2 のときの、冷却水タンク圧・冷却水流量履歴、拡散筒・冷却水温度履歴、小型真空槽・拡散筒・バッファタンク・モータ内圧履歴をそれぞれ図 2.14, 2.15 に示す。全ての値に異常は見られなかった。

図中(a)は冷却水タンク圧・冷却水流量履歴を示しており、タンク圧が PID 制御によって一定の範囲(375kPa~550kPa)に保たれ、燃焼中の冷却水流量は 80~110L/s の範囲に保たれていることが分る。またタンクの安全弁設定圧 550kPa を超えること無く、安全に運用が行われ、かつ 80L/s 以上の流量を常時確保できている。

図中(b)は拡散筒・冷却水温度履歴を示しており、拡散筒・冷却水に異常な温度上昇は見られなかった。拡散筒温度は、鋼材の強度が低下し始める 300℃~400℃に対して十分な余裕があり、また冷却水温度は 1 気圧に於ける沸点である 100℃に対して十分な余裕があったことから、安全に運用が行われたと言える。

図中(c)は小型真空槽・拡散筒・バッファタンク・モータ内圧履歴を示しており、燃焼中の拡散筒内圧から、バッファタンク圧が上昇するに従い、衝撃波面が上流側に遡っていたが、最上流には到達していなかったことが分かる。さらに、小型真空槽の圧力は上昇しなかったことから、拡散筒内の衝撃波面の形成により排煙が逆流しない、適切な拡散筒直径・長さの条件が満たされていたことが分かる。

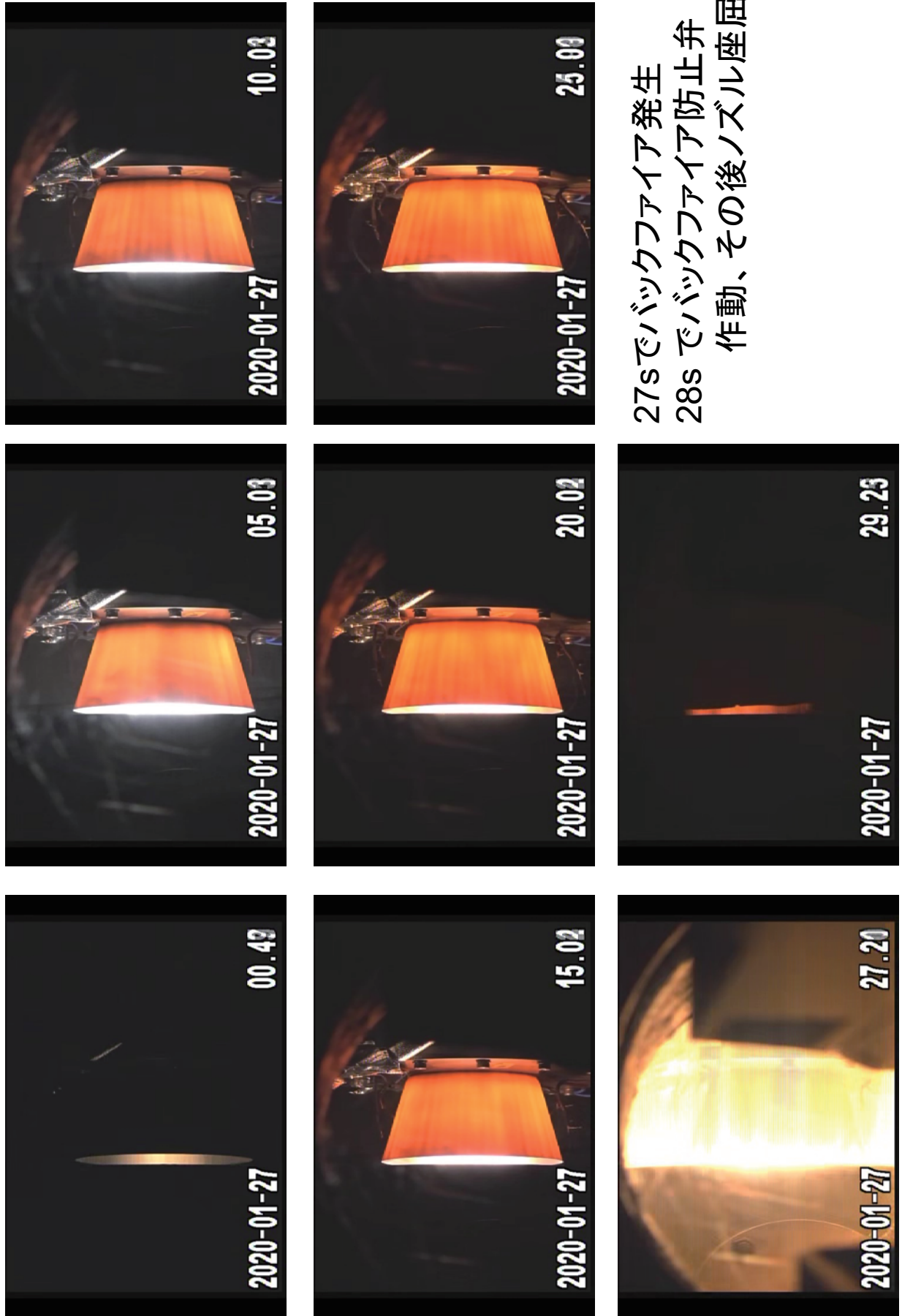
なお、#1 後にバッファタンクの排水バルブを開けておらず、溜まった洗浄水が拡散筒を通じて真空槽側に逆流する事象があった。#2 ではバルブを開けており発生していない。

## 2.6 ノズル変形

本試験では試験前後でノズルの 3D 計測を行い、試験によるノズルの残留変形について評価した。#1 では先述の様に燃焼試験直後にノズルが座屈してしまったため、#2 についてのみ評価を実施した。#2 での変形量を図 2.16 に示す。展開ノズルの基部で最も残留変形が

大きく、外側に最大 **0.4mm** 程度変形している事が分る。有限要素法による解析結果でも燃焼中のノズル内圧によりノズルに発生する応力はこの箇所が最も大きくなっており、高温による強度低下と合わせて塑性変形が残ってしまったと推定している。

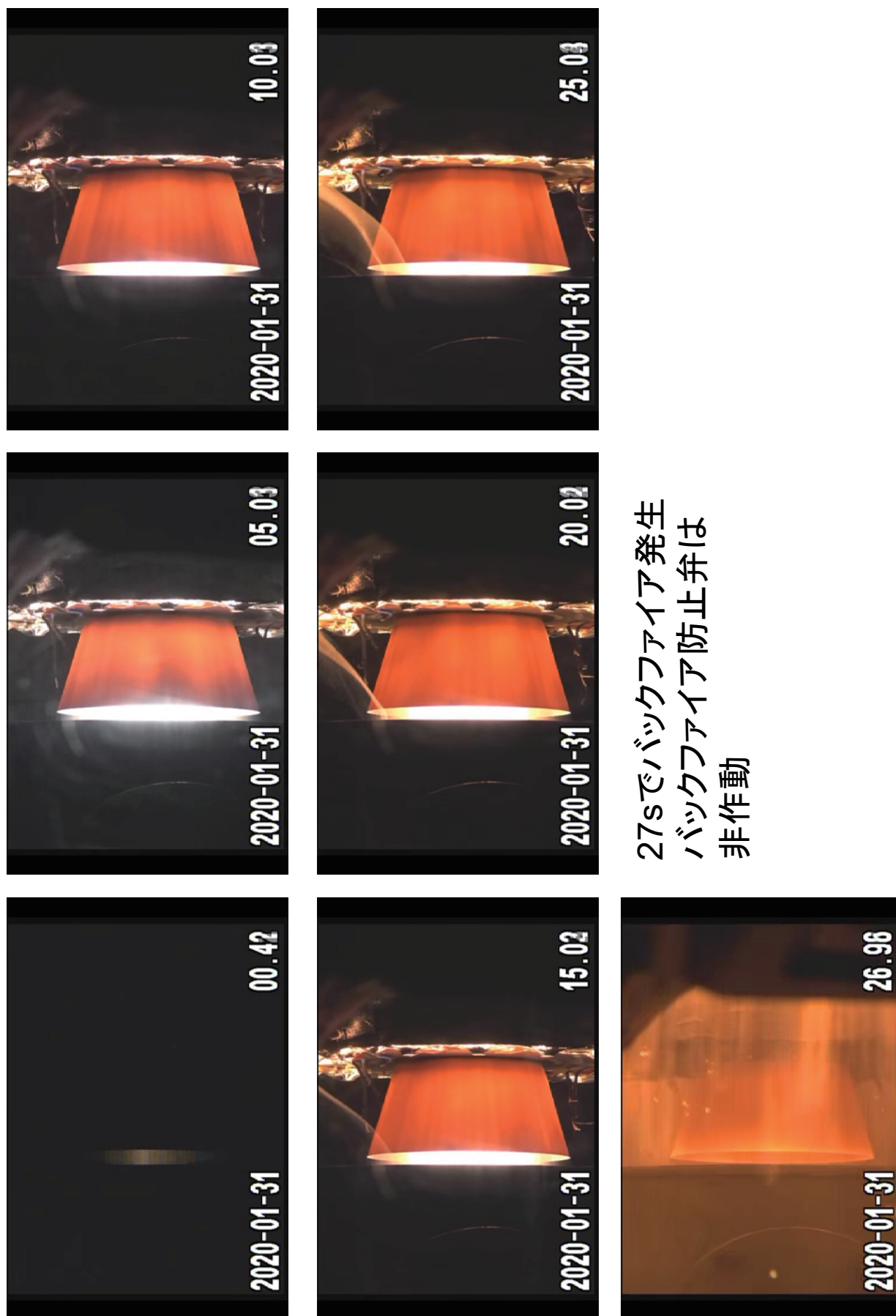
図2.1: 試験#1 実画像時刻歴(真空槽東側よりビデオカメラで撮影)



27sでバックファイア発生  
 28sでバックファイア防止弁  
 作動、その後ノズル座屈

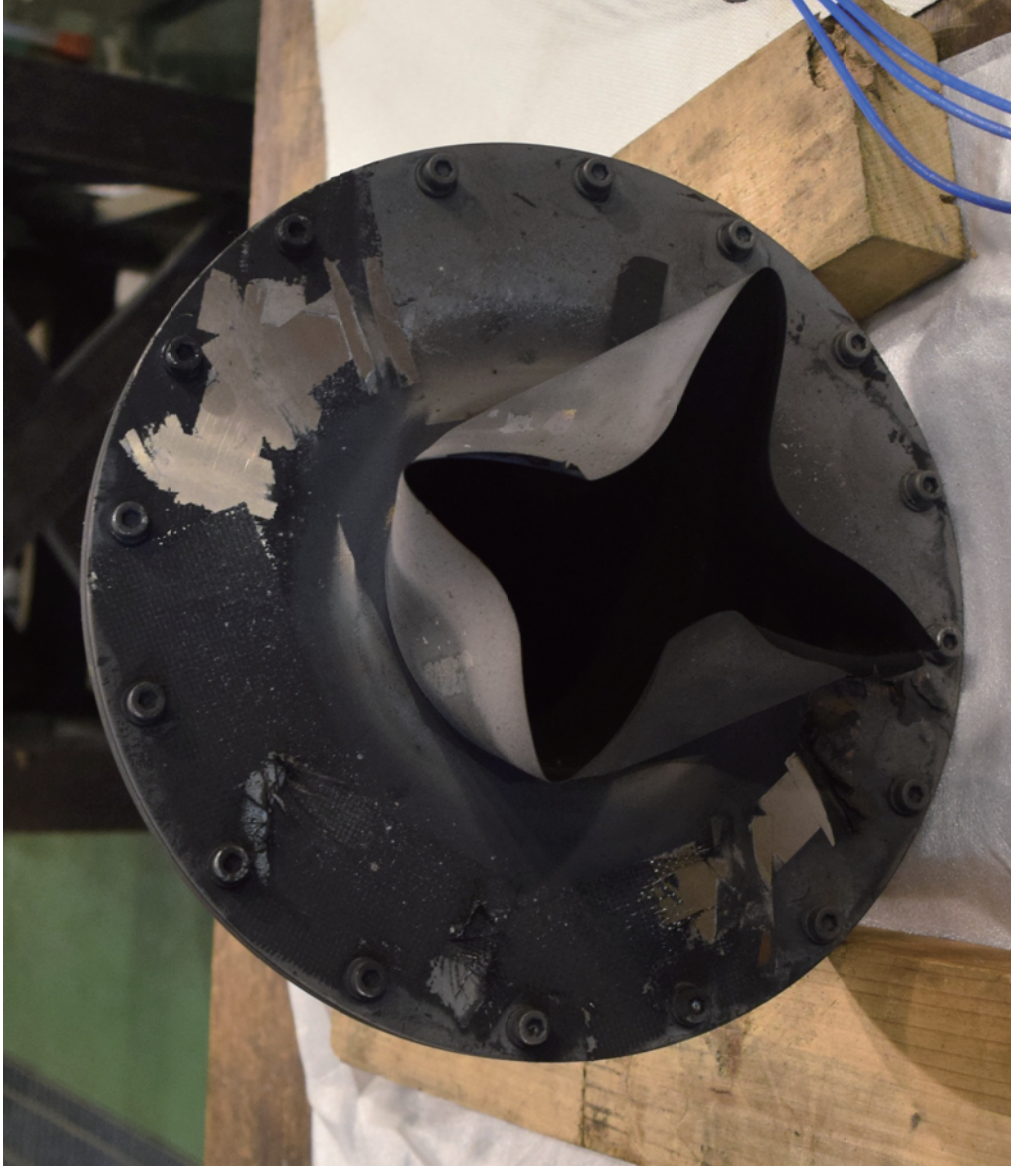


図2.2: 試験#2実画像時刻歴(真空槽東側よりビデオカメラで撮影)



27sでバックファイア発生  
バックファイア防止弁は  
非作動

図2.3:座屈した試験後ノズル(#1)



- ・バックファイア防止弁が作動したため、外圧が作用して座屈
- ・最低次の座屈モードは周方向波数4ではないため、溶接線と熱電対の溶接部(90度おき)が何らかの影響を与えたと推測
- ・形状計測は非実施

## 図2.4: サーモカメラ校正

○サーモカメラ画像解析用の実効放射率の校正を実施

- ・ノズルに塗装した黒体塗料(ジヤパンセンサーJSC-3号)の仕様は $\epsilon=0.94$
- ・試験#1において熱電対Tn2の計測結果と、Tn2計測点から90度の位置(左下図参照)で $\epsilon=0.94$ として取得したサーモカメラデータを比較(右下グラフ)
- ・両者はほぼ一致しており、以後 $\epsilon=0.94$ としてサーモカメラデータを処理

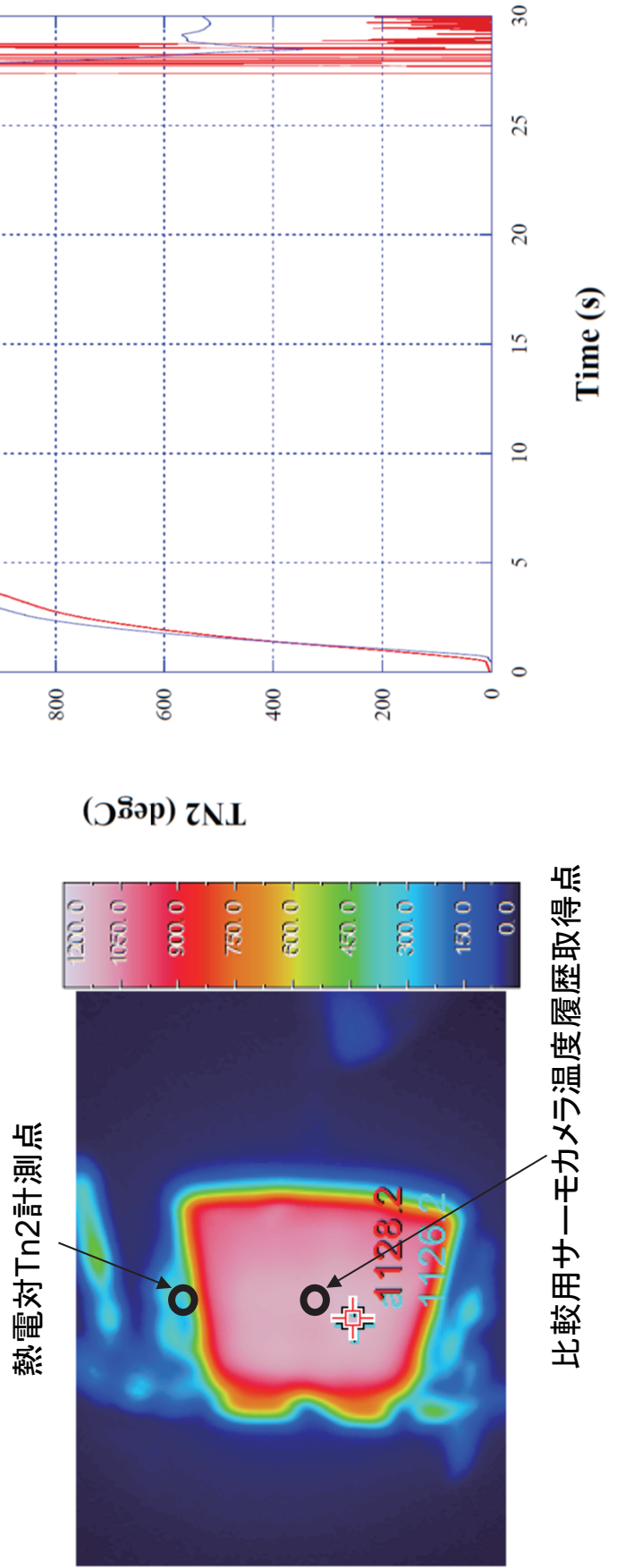
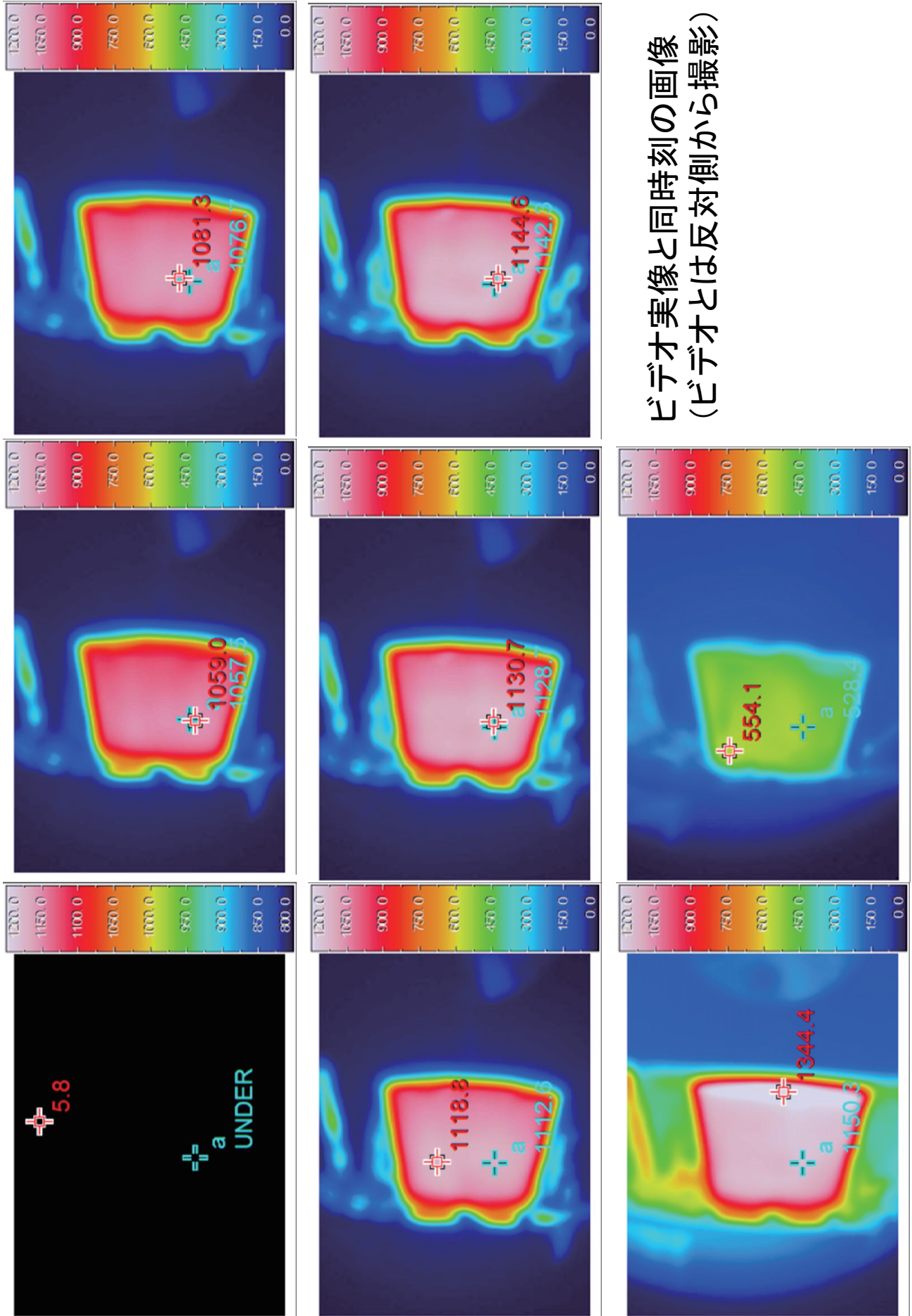
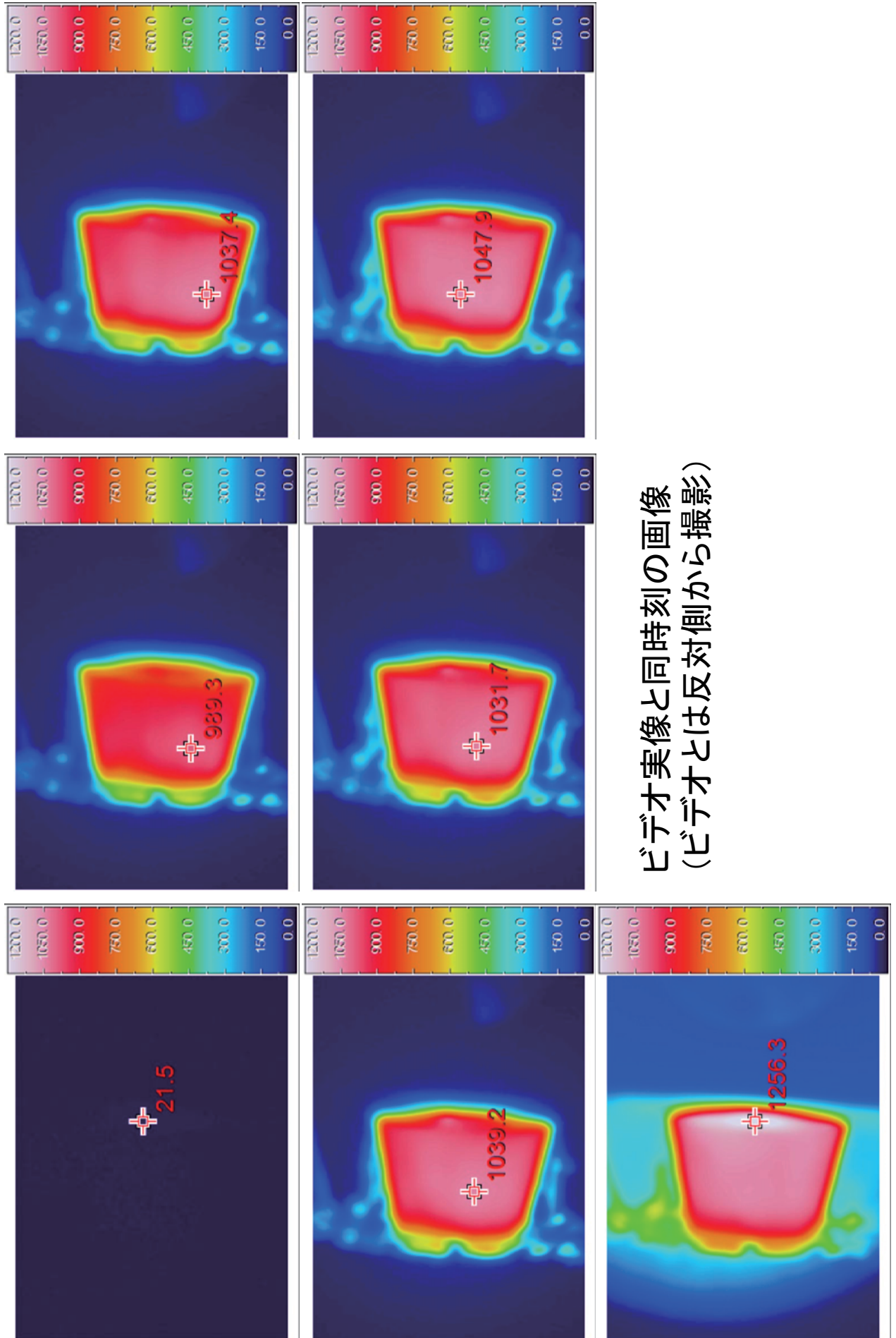


図2.5: 試験#1 温度時刻歴 (真空槽西側よりサーモカメラで撮影)



ビデオ実像と同時刻の画像  
(ビデオとは反対側から撮影)

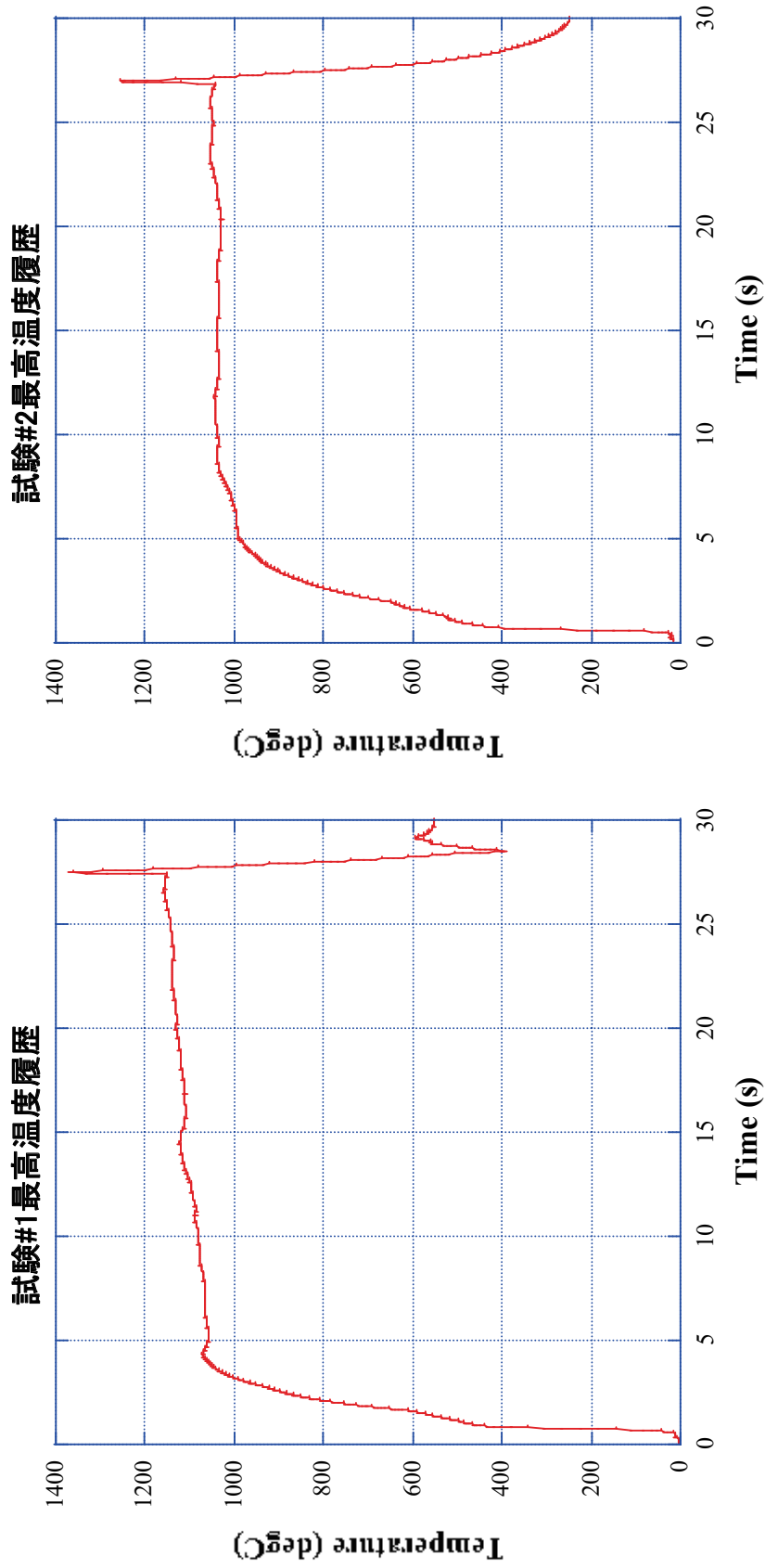
図2.6: 試験#2温度時刻歴(真空槽西側よりサーモカメラで撮影)



ビデオ実像と同時刻の画像  
(ビデオとは反対側から撮影)

## 図2.7: ノズル最高温度履歴 (サーモカメラ)

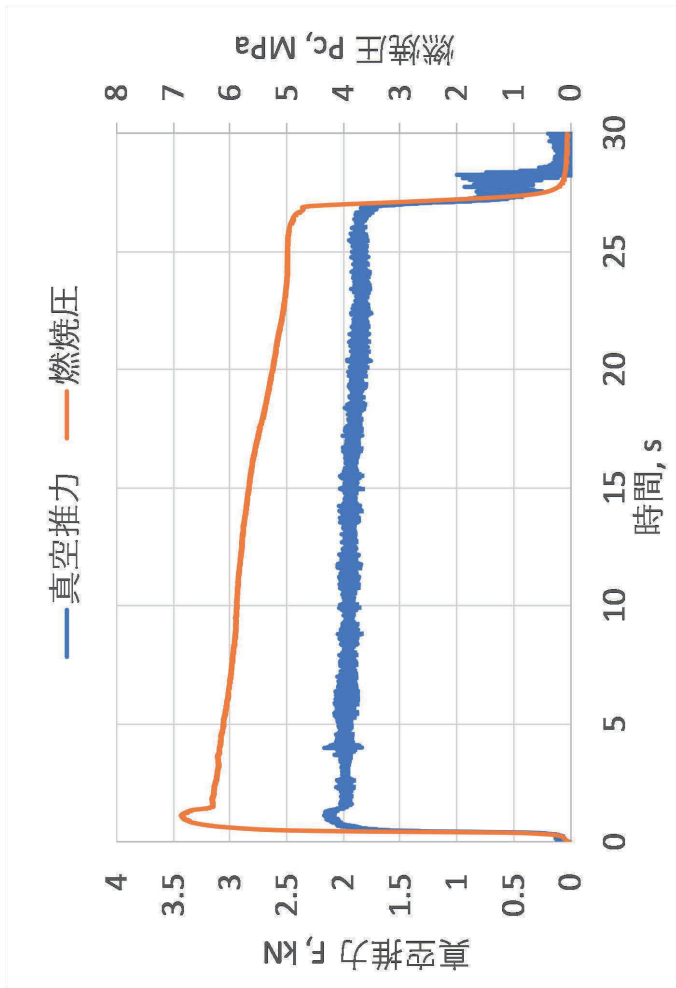
- サーモカメラデータより、ノズル上の最高温度を抽出 (場所は一定ではない)
- ・共に27s付近で瞬間的な温度上昇があるが、バックファイアの影響と推定
- ・試験#2の方が到達温度が低い原因は固定ノズル熱容量と推定



最高到達温度 1157°C@26.6s  
(バックファイアによるピークを除く)

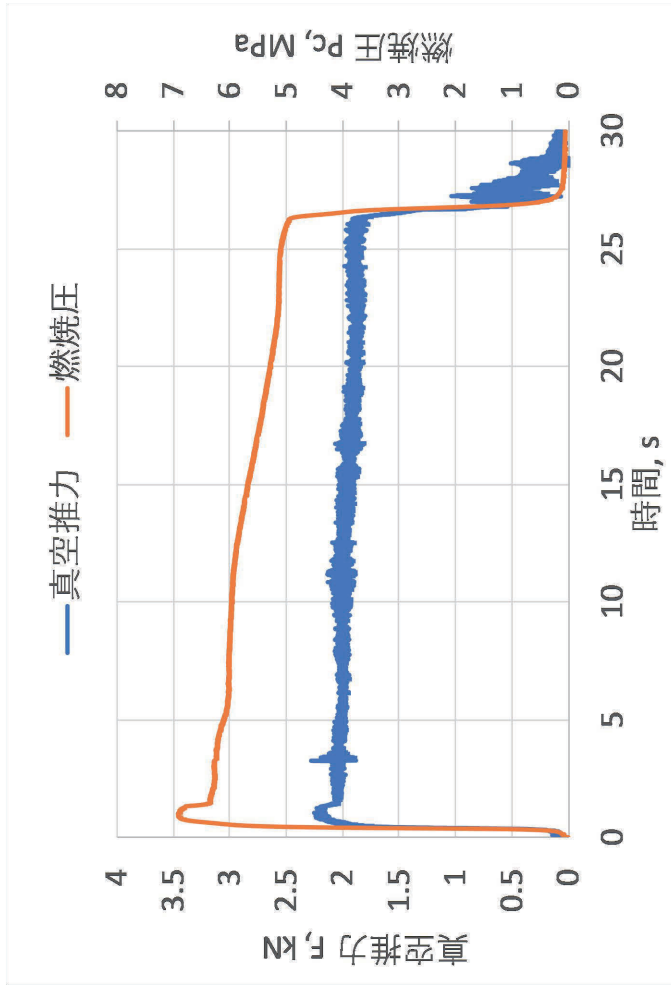
最高到達温度 1055°C@23.6s  
(同左)

図2.8: 燃焼特性(#1)



燃焼時間, s	27.3	平均燃焼圧5%以上
推進薬量, kg	17.6	
平均真空推力, kN	1.89	
平均燃焼圧, MPa	5.53	
Cf効率	0.938	一定と仮定
C*効率	1.018	インジェクションの燃焼分が加味されてい られていると思われる。
平均C*, m/s	1588	
平均真空Isp, s	299.6	C*効率の高さに伴って、高くなってい ると思われる。
スロート径, mm	14.7 → 16.0	

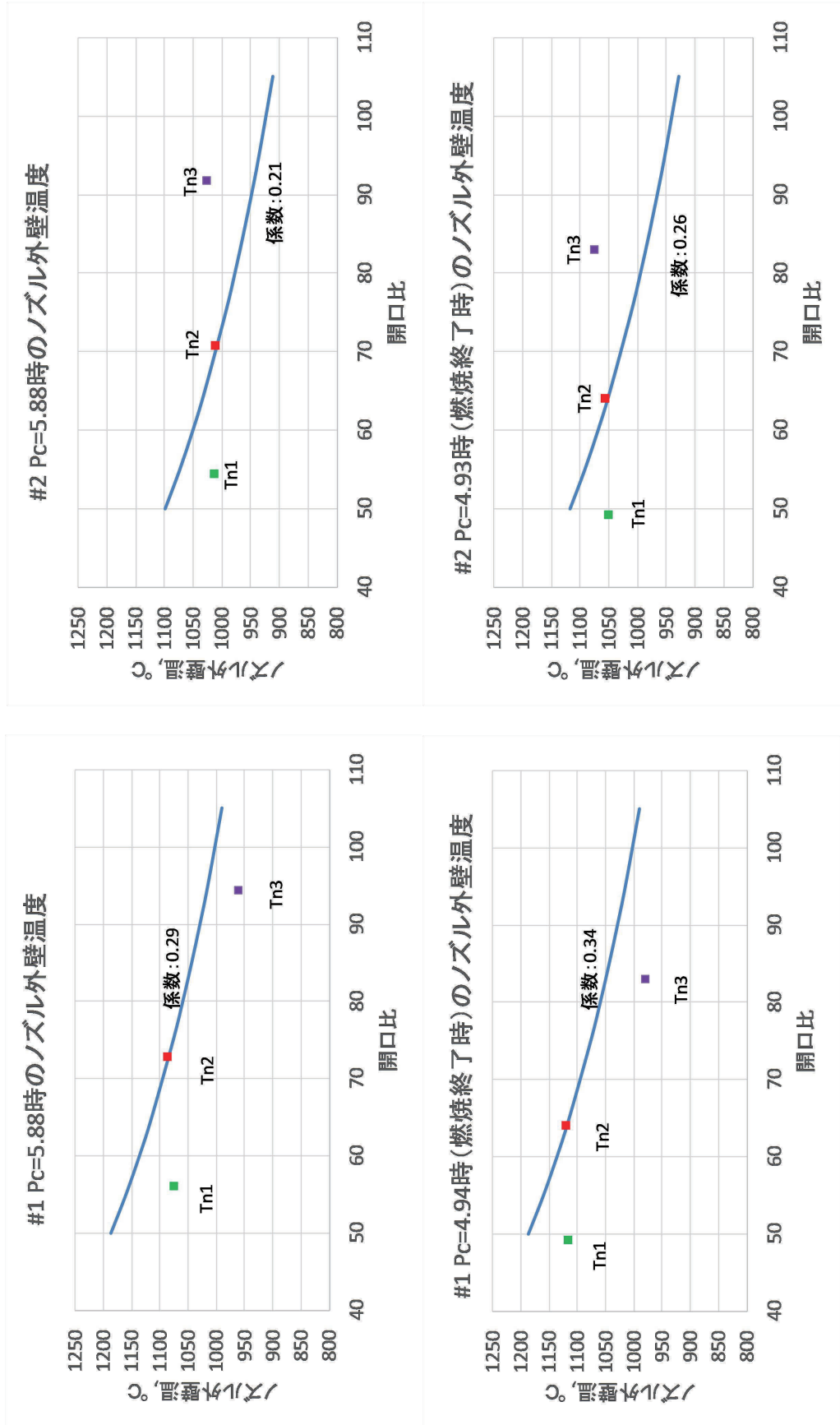
図2.9: 燃焼特性(#2)



燃焼時間, s	26.9	平均燃焼圧5%以上
推進薬量, kg	17.4	
平均真空推力, kN	1.93	
平均燃焼圧, MPa	5.60	
Cf効率	0.933	一定と仮定
C*効率	1.021	インシュレーションの燃焼分が加味されていると思われる。
平均C*, m/s	1593	
平均真空Isp, s	303.8	C*効率の高さに伴って、高くなっていると思われる。
スロート径, mm	14.7 → 16.0	



図2.10: バルツ式の補正係数推定



展開ノズルの中間点で最も確からしい壁温Tn2と一致するように、バルツ式に対する係数を求めた。

係数は予備試験とほぼ同等の0.3程度であった。

表2.1:計測項目表

展開ノズル材熱試験 本試験 (2020年1月実施) 計測項目 2020/3/23 Rev. A E04

分類 イベント 信号	計測項目		センサ			アンブ				備考	設置位置						
	名称	記号	センサ型式	S/N	センサ定格	許容 過負荷	予定最高圧	収録レンジ	型式			S/N or Ch	BV	ATT	Gain	FL	DAQ
推力	主推力	Xマージ	N/A	←	LUK-A-5KN	±5 KN	±7.5 KN	0~3.5 KN	DAS-406	No.1	10	1/5	備考参照	←	N/A		
	風力/推力 Fwd	Fx	FY1	LUK-A-5KN	±5 KN	±7.5 KN	0~3.5 KN	DAS-406	No.1	10	1/5	備考参照	←	N/A			
	風力/推力 Aft	Fy	FY2	TU-PGRS	±1 KN	±1.5 KN	-125~125 N	-125~125 N	T	No.2	1	1	1	1	スタンバイ方向 Fwd側		
	風力/推力 Fwd	Fz1	FZ1	TU-PGRS	±2 KN	±3 KN	-250~250 N	-250~250 N	T	No.3	1	1	1	1	スタンバイ方向 Aft側		
	風力/推力 Aft	Fz2	FZ2	TU-PGRS	±2 KN	±3 KN	-250~250 N	-250~250 N	T	No.4	1	1	1	1	スタンバイ方向 Fwd側		
	風力/推力 Aft	Fz3	FZ3	TU-PGRS	±2 KN	±3 KN	-250~250 N	-250~250 N	T	No.5	1	1	1	1	スタンバイ方向 Aft側		
	モータ内圧	Pc	HEM-375-5000A	35 MPa	49 MPa	0~8 MPa(G)	AM32AZ	No.3	10	N/A	1/20	1	1	1	スタンバイ方向 Aft側		
	真空槽圧	Pt	DHF	196 kPa	UNK	1.9~16.0 kPa(A)	(10~120 Torr)	0~20 kPa(A)	T	No.4	1	1	1/5	1	真空槽上部		
	圧力	拡散筒内圧1	Pd1	K370024	UNK	UNK	UNK	UNK	0~20 kPa(A)	T	No.5	1	1	1	真空槽系中継線使用		
		拡散筒内圧2	Pd2	K360005	UNK	UNK	UNK	UNK	0~20 kPa(A)	T	No.6	1	1	1	拡散筒中流		
拡散筒内圧3		Pd3	K8X0110	UNK	UNK	UNK	UNK	0~20 kPa(A)	T	No.7	1	1	1	拡散筒下流			
バッファタンク圧		Pbt	K580662	UNK	UNK	2.7kPa~16.0kPa(A)	(20~120 Torr)	0~20 kPa(A)	T	No.8	1	1	1	バッファタンク上部			
温度	冷却水タンク内ガス圧	PIQ-601	EJA430	UNK	3 MPa	4.5 MPa	-0.1~0.5 MPa(G)	4~20 mA出力~250Ω抵抗により1~5 Vに変換	NG	アンプは使用しない	1	1	1	1	冷却水タンク上部		
	展開ノズル壁温1	Tr1	K熱電対	N/A	1370°C	UNK	-270~1370°C	DH-710A No.1 Ch 1	N/A	1 V	100	10 Hz	1	1	展開ノズル外表面		
	展開ノズル壁温2	Tr2	T	T	T	T	T	T	No.1 Ch 2	T	T	T	T	T	T		
	展開ノズル壁温3	Tr3	T	T	T	T	T	T	No.2 Ch 1	T	T	T	T	T	T		
	展開ノズル壁温4	Tr4	T	T	T	T	T	T	No.2 Ch 2	T	T	T	T	T	T		
	展開ノズル壁温5	Tr5	T	T	T	T	T	T	No.3 Ch 1	T	T	T	T	T	T		
	展開ノズル壁温6	Tr6	T	T	T	T	T	T	No.3 Ch 2	T	T	T	T	T	T		
	真空槽内温度1	Tt	シースK熱電対	UNK	UNK	UNK	UNK	-270~1232°C	T	No.4 Ch 1	T	T	200	1	1	真空槽内上部	
	拡散筒内温度1	Td1	T	T	T	T	T	室温程度	T	No.4 Ch 2	T	T	1	1	1	拡散筒上流 (真空槽内)	
	拡散筒内温度2	Td2	T	T	T	T	T	室温~100°C	T	Ch 2	T	N/A	N/A	1	1	拡散筒中流	
流量	拡散筒内温度3	Td3	T	T	T	T	室温~40°C	T	Ch 3	T	T	T	T	T	1	1	拡散筒下流
	バッファタンク温度1	Tr1	T	T	T	T	室温~40°C	T	Ch 4	T	T	T	T	T	1	1	バッファタンク上部
	バッファタンク温度2	Tr2	T	T	T	T	室温~40°C	T	Ch 5	T	T	T	T	T	1	1	バッファタンク中部
	バッファタンク温度3	Tr3	T	T	T	T	室温~40°C	T	Ch 6	T	T	T	T	T	1	1	バッファタンク下部 ※3
	基準圧力計付近気温	Tw	T	T	T	T	室温~40°C	T	Ch 7	T	T	T	T	T	1	1	基準圧力計付近
	拡散筒冷却水流量	Ql	ターゼン式流量計(型式不明)+F/Vコンバータ(SP-564A)	UNK	20~200 L/s	UNK	0~160 L/s	0 Hz時0 L/s, 130 Hz時149.474 L/s (1.1498 L/s/Hz)となるようにF/Vコンバータを設定	0 Hz時0 L/s, 130 Hz時149.474 L/s (1.1498 L/s/Hz)となるようにF/Vコンバータを設定	3 Hz	1	1	1	1	0~20 L/sの領域はセンサ仕様としてレンジ外であるが収録は行う。コンバータの出力はアナログ電圧1~5V (0~200Lに対応)		
	拡散筒冷却水流量1	Ql-601	ターゼン式流量計(型式不明)+F/Vコンバータ(SP-564A)	UNK	20~200 L/s	UNK	0~160 L/s	0 Hz時0 L/s, 130 Hz時149.474 L/s (1.1498 L/s/Hz)となるようにF/Vコンバータを設定	0 Hz時0 L/s, 130 Hz時149.474 L/s (1.1498 L/s/Hz)となるようにF/Vコンバータを設定	3 Hz	1	1	1	1	流量計設置部の配管内径は約200mm		
	拡散筒冷却水流量2	Qd	超音波流量計 UL330	EM19-20059	0~10 m/s	N/A	0~4.70 m/s	0~5.87 m/s	4~20 mA出力~250Ω抵抗により1~5 Vに変換	Ch 7	T	T	T	T	計測誤差は流速1m/s未満の時±0.02m/s		
	展開ノズル壁温 (赤外線)	N/A	<サーモカメラ>													配管内が水で満たされていないときは正しく計測できない	
	冷却水タンク表面温	N/A	<ピデオカメラ>													冷却水タンクが室内に入る手前の位置	
ノズル・噴流光学計測	N/A	<噴流速度カメラ>													Ql-601と近い配管平行部		

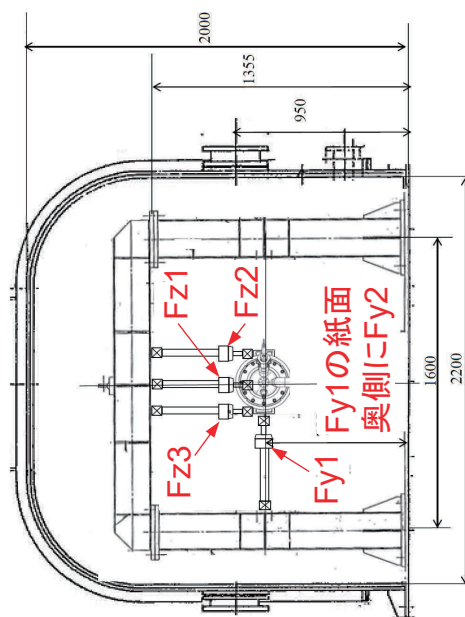
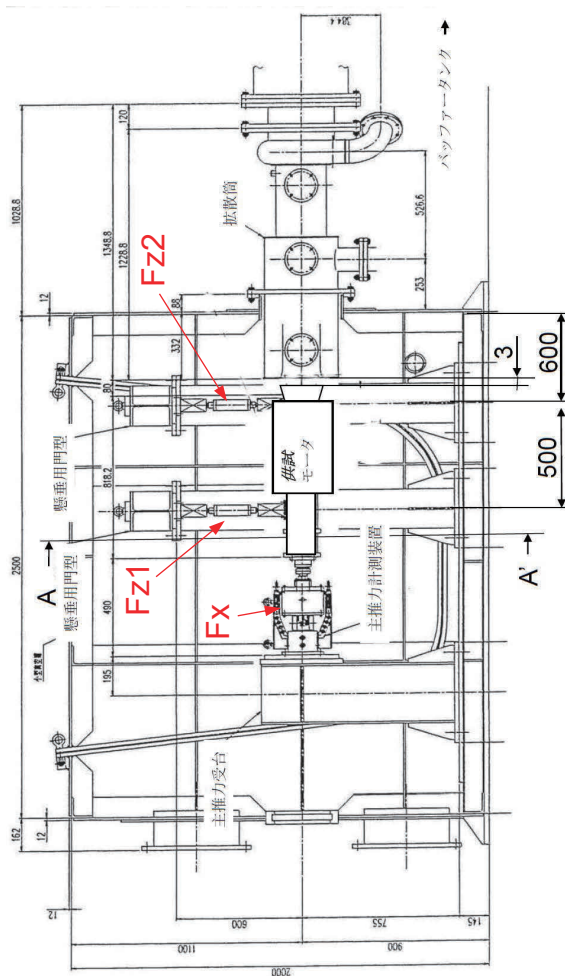
【備考】  
 点火モータ内圧の計測はなし  
 1 torr = 133 Pa(A) (1 torr は標準大気圧の1/760)

【備考】  
 N/A: Not Applicable (不適用)  
 UNK: Unknown  
 WB: Wide Band

【備考】  
 AT: Attenuator  
 BV: Bridge Voltage  
 DAQ: Data Acquisition  
 FL: Filter  
 LFF: Low Pass Filter  
 S/N: Serial Number  
 UNK: Unknown  
 WB: Wide Band

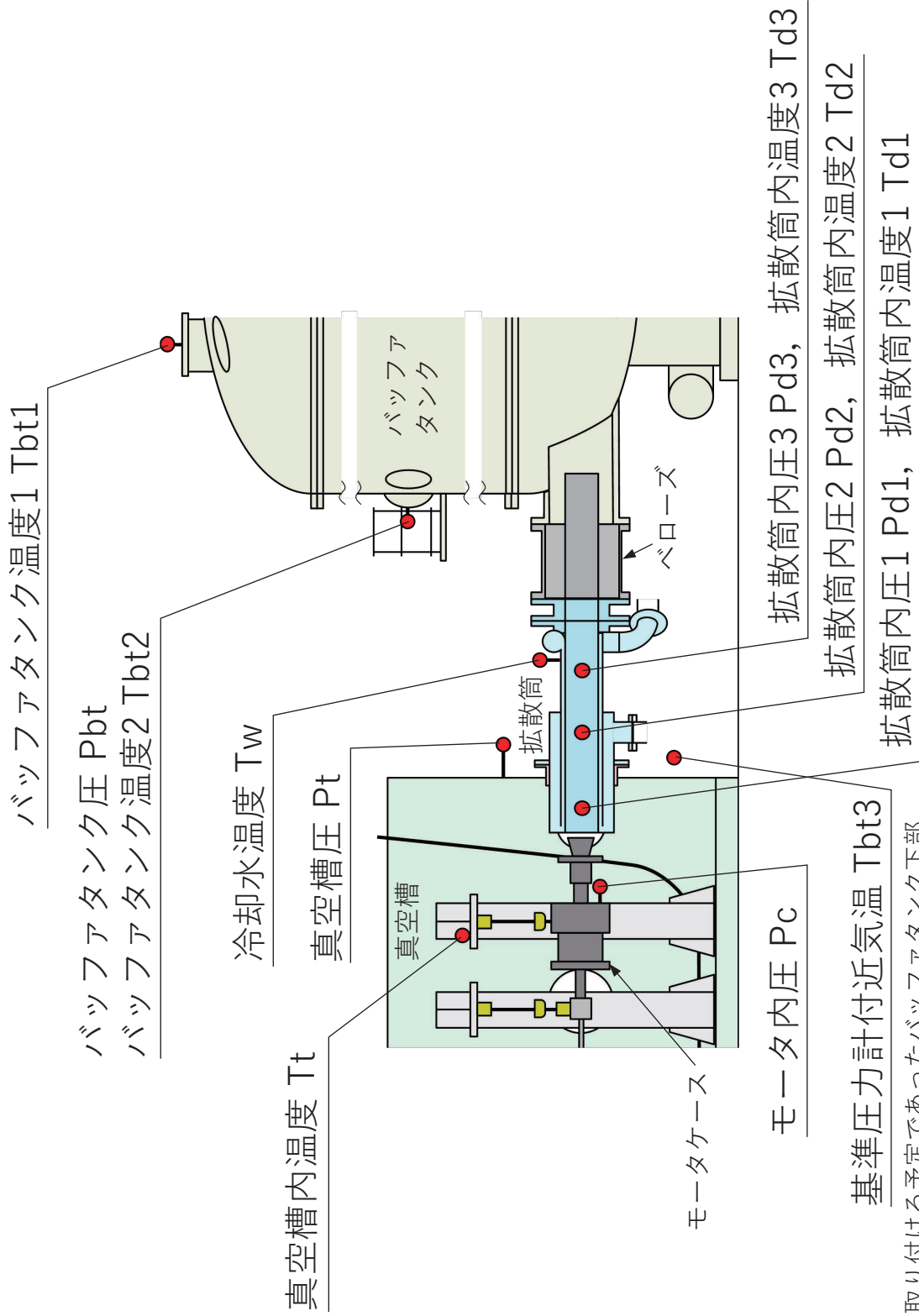
【説明】  
 ※1 展開ノズル壁温についてはサーモカメラを併用するため検失を許容する。  
 ※2 当該製品の上限温度は不明であるが、一般に上限は500~1000°C程度  
 ※3 バッファタンク下部のポートへ取り付け予定であったが、拡散筒とバッファタンクをつなぐベローズ部の内部構造と干渉するため有効に行えなかったため、代わりに基準圧力計付近の雰囲気温度測定に使用した。

図2.11a: 計測位置(スタンド)



A-A'断面

図2.11b:計測位置(燃烧ガス流路)



(Tbt3を取り付ける予定であったバックアータンク下部のポートはベローズ内部構造と干渉するため有効に取り付けられず、代わりにTbt3を基準圧力計付近の雰囲気温度測定に使用した。)

図2.11c: 計測位置(冷却水系)

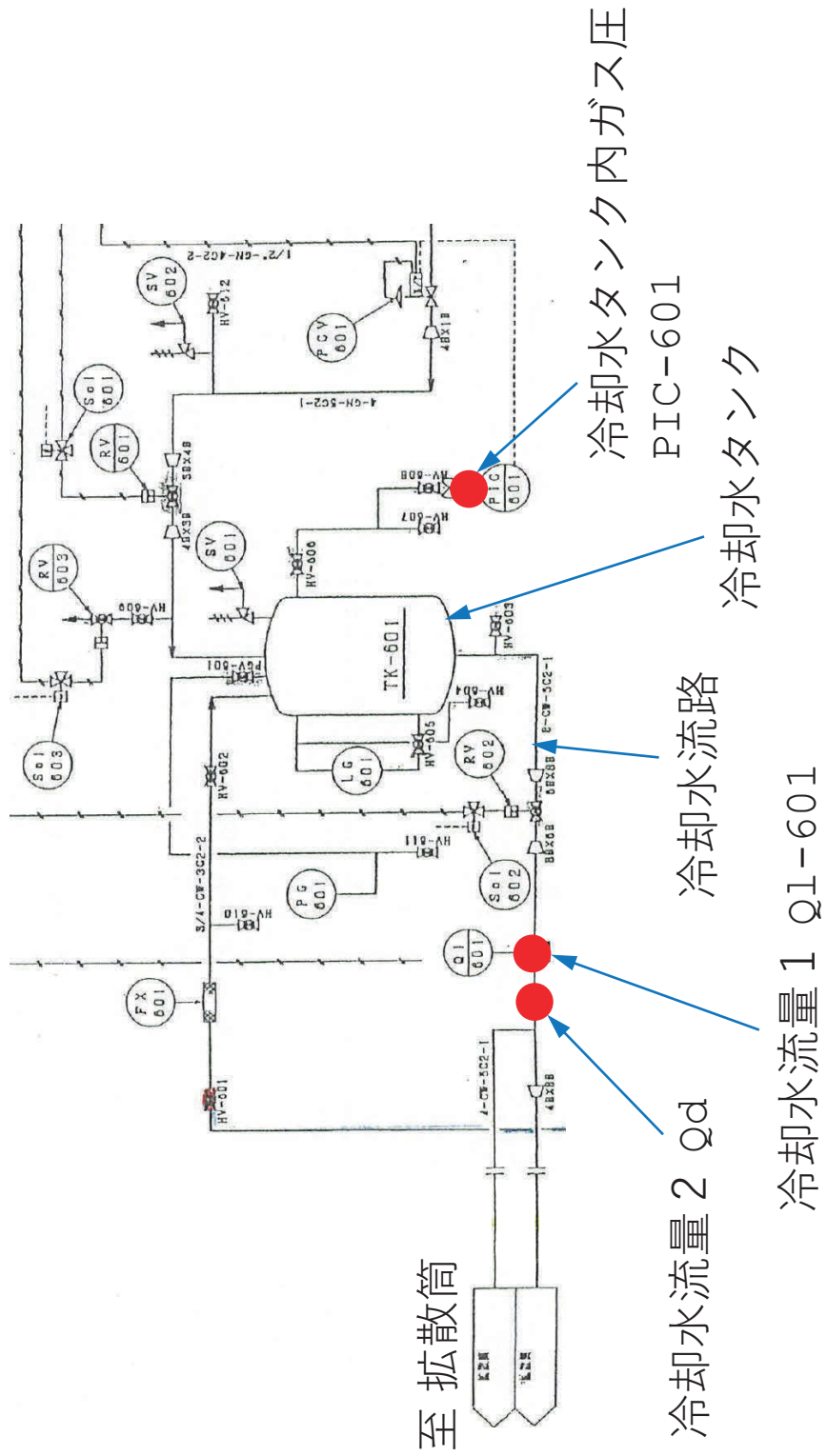


図2.12a:#1計測データ(圧力)

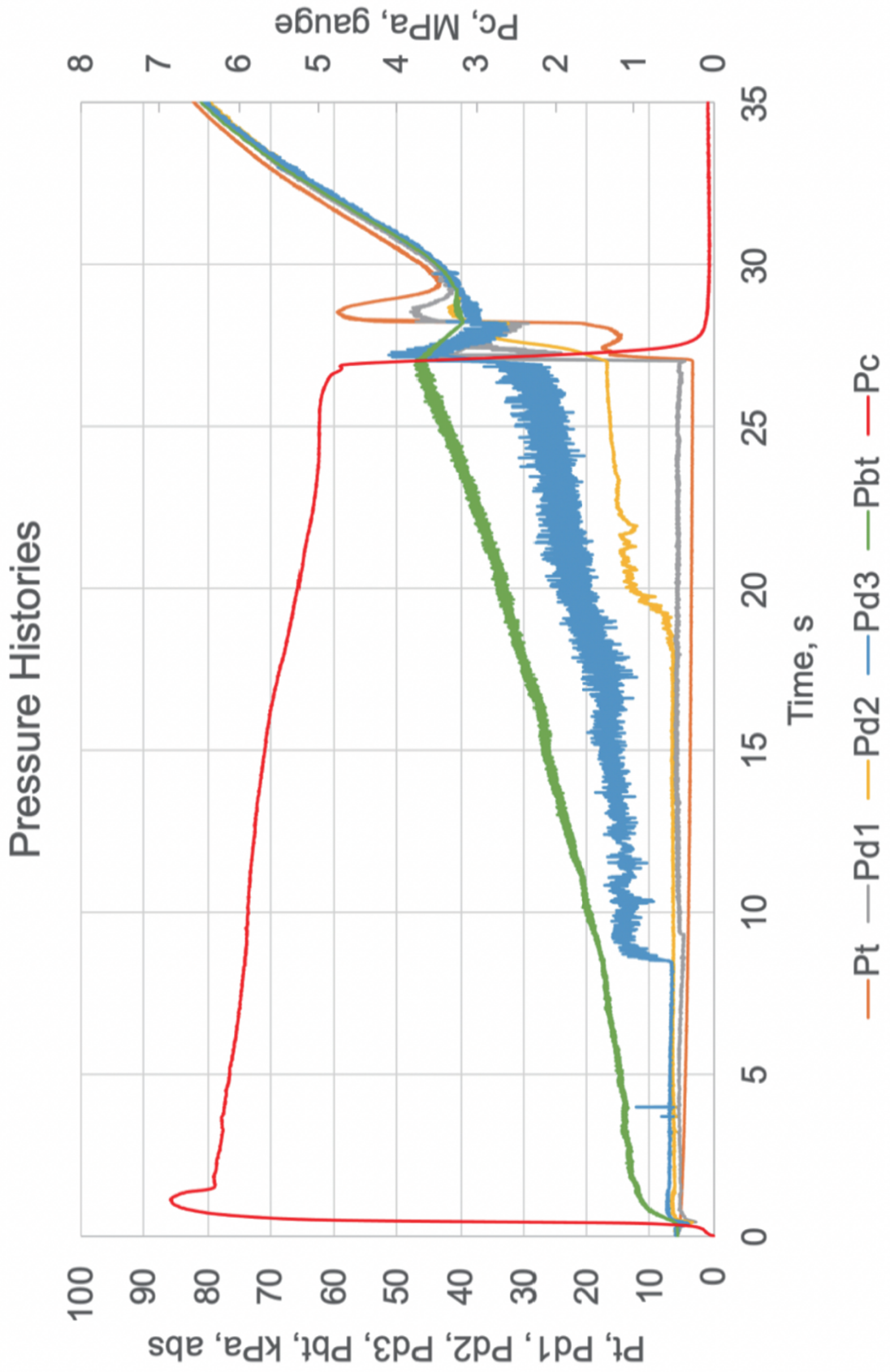


図2.12b:#1計測データ(圧力2)

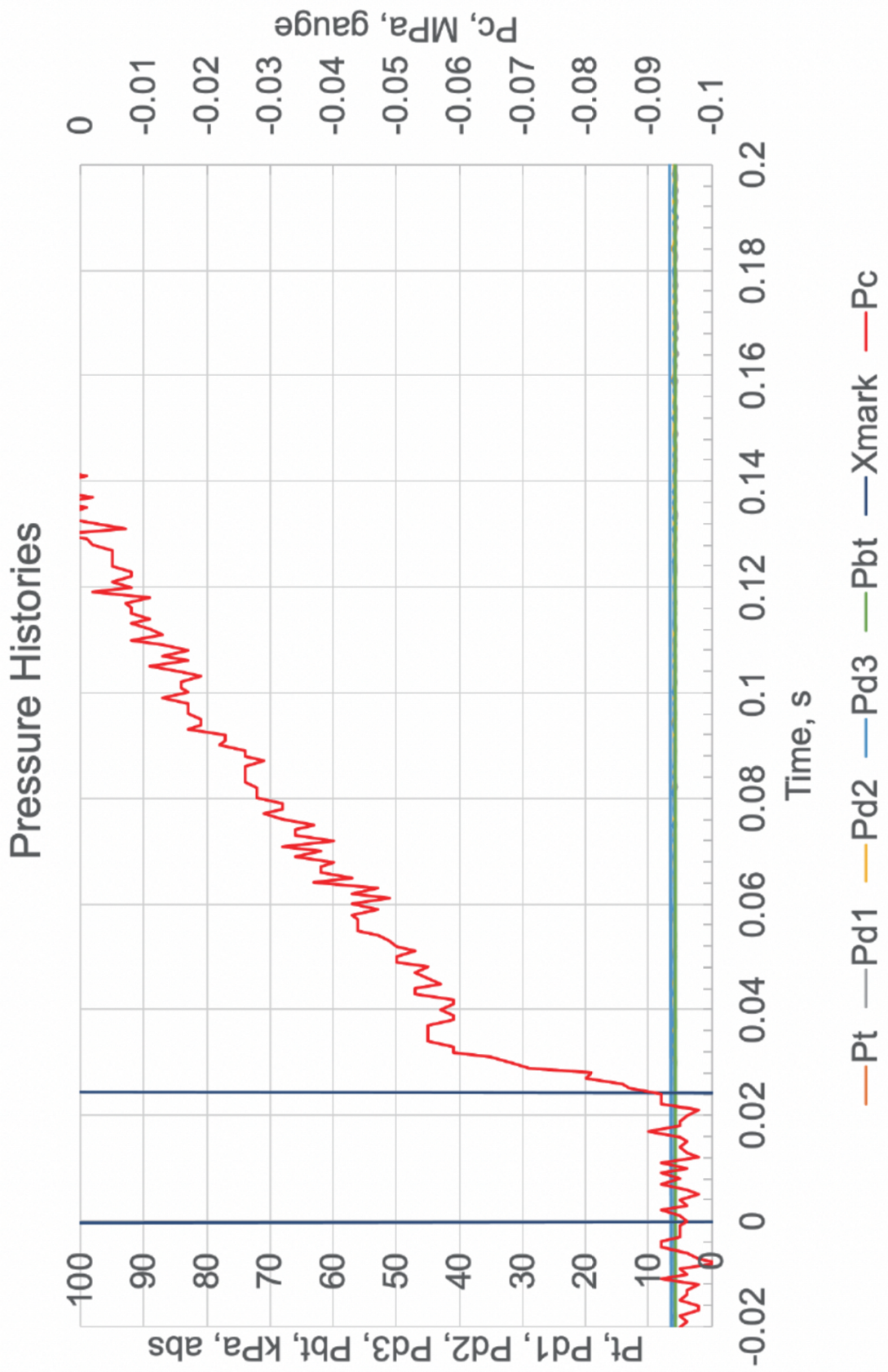


図2.12c:#1計測データ(温度)

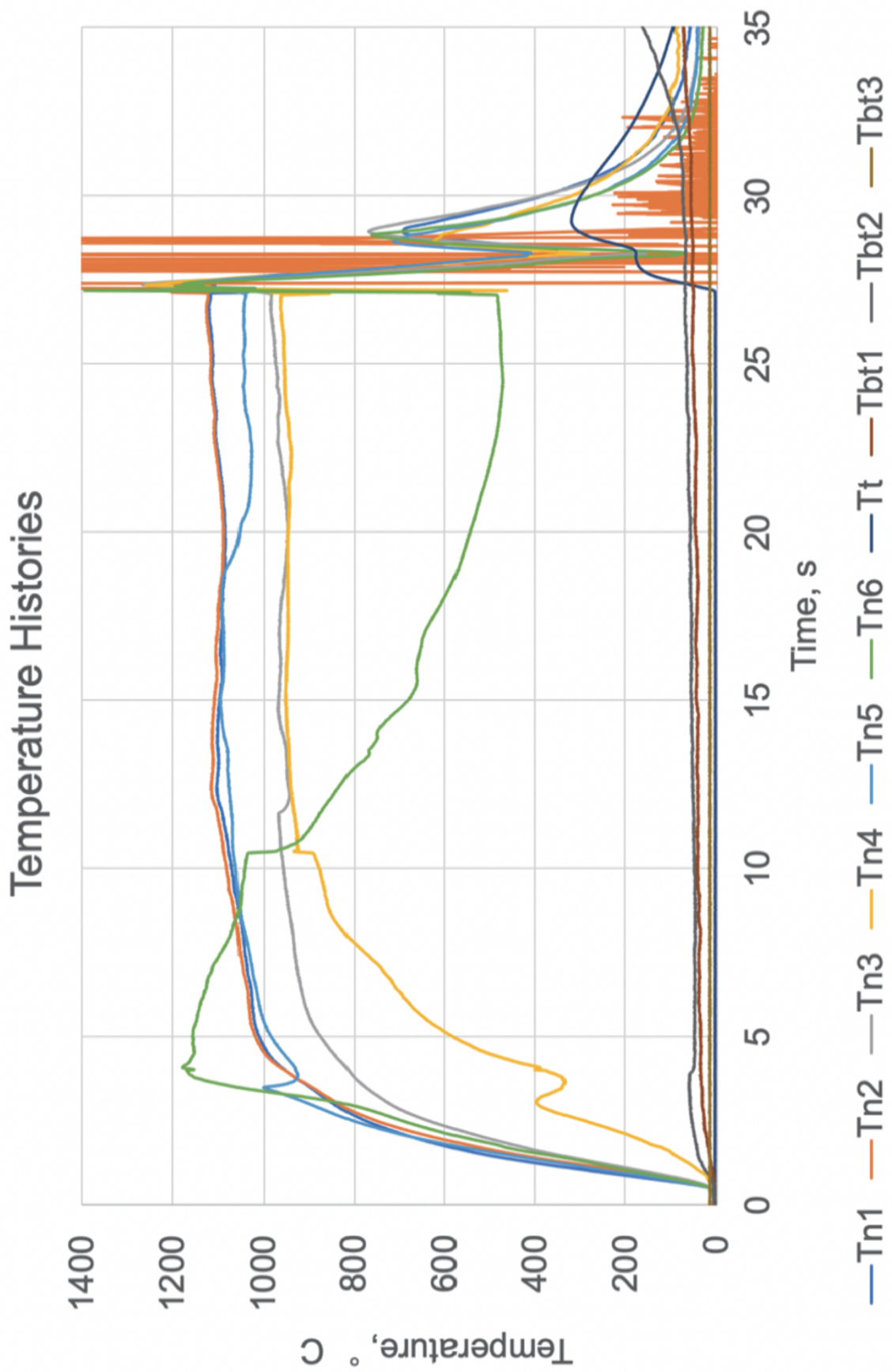




図2.12d:#1計測データ(推力)

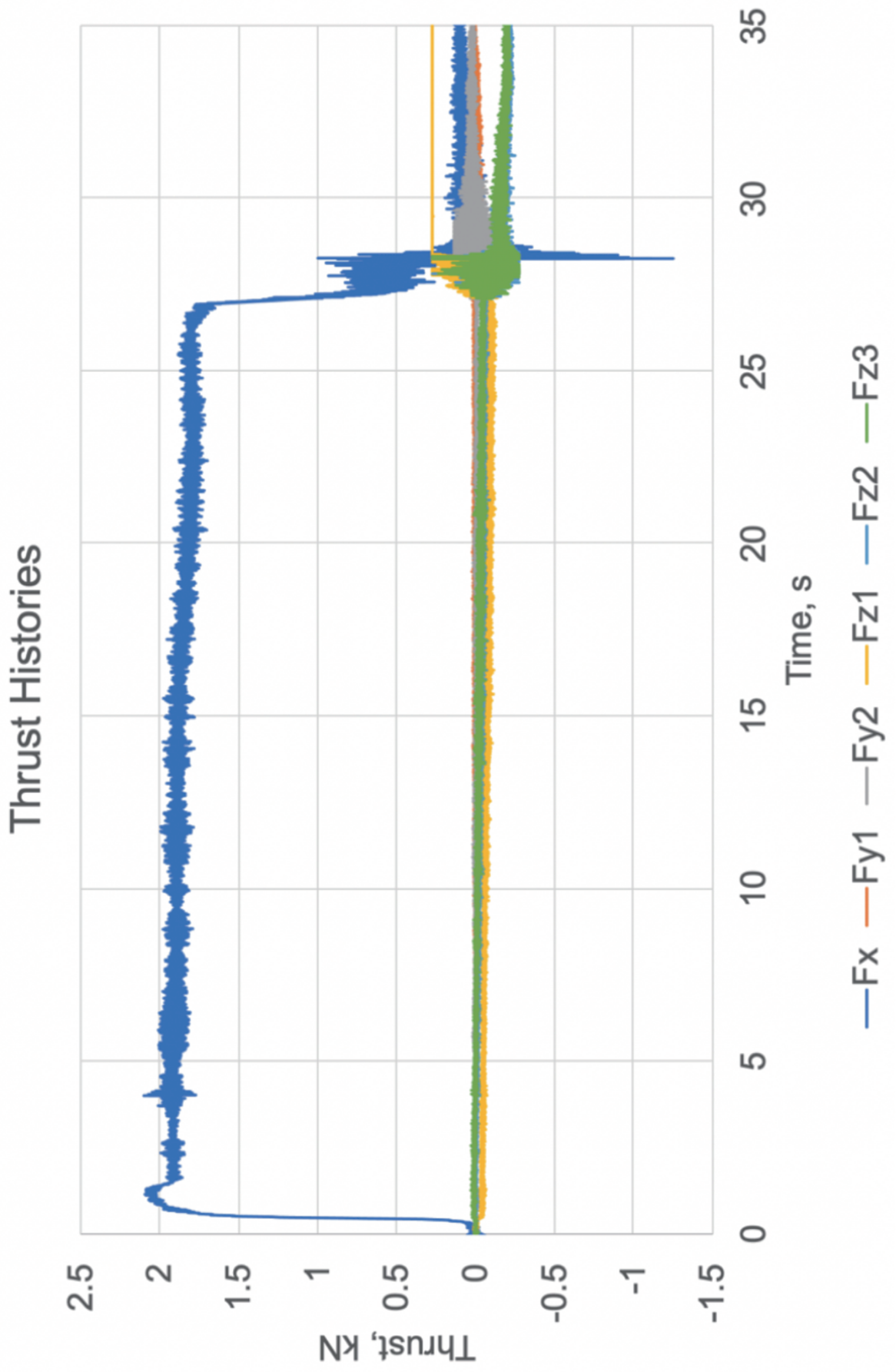


図2.12e:#1計測データ(横推力)

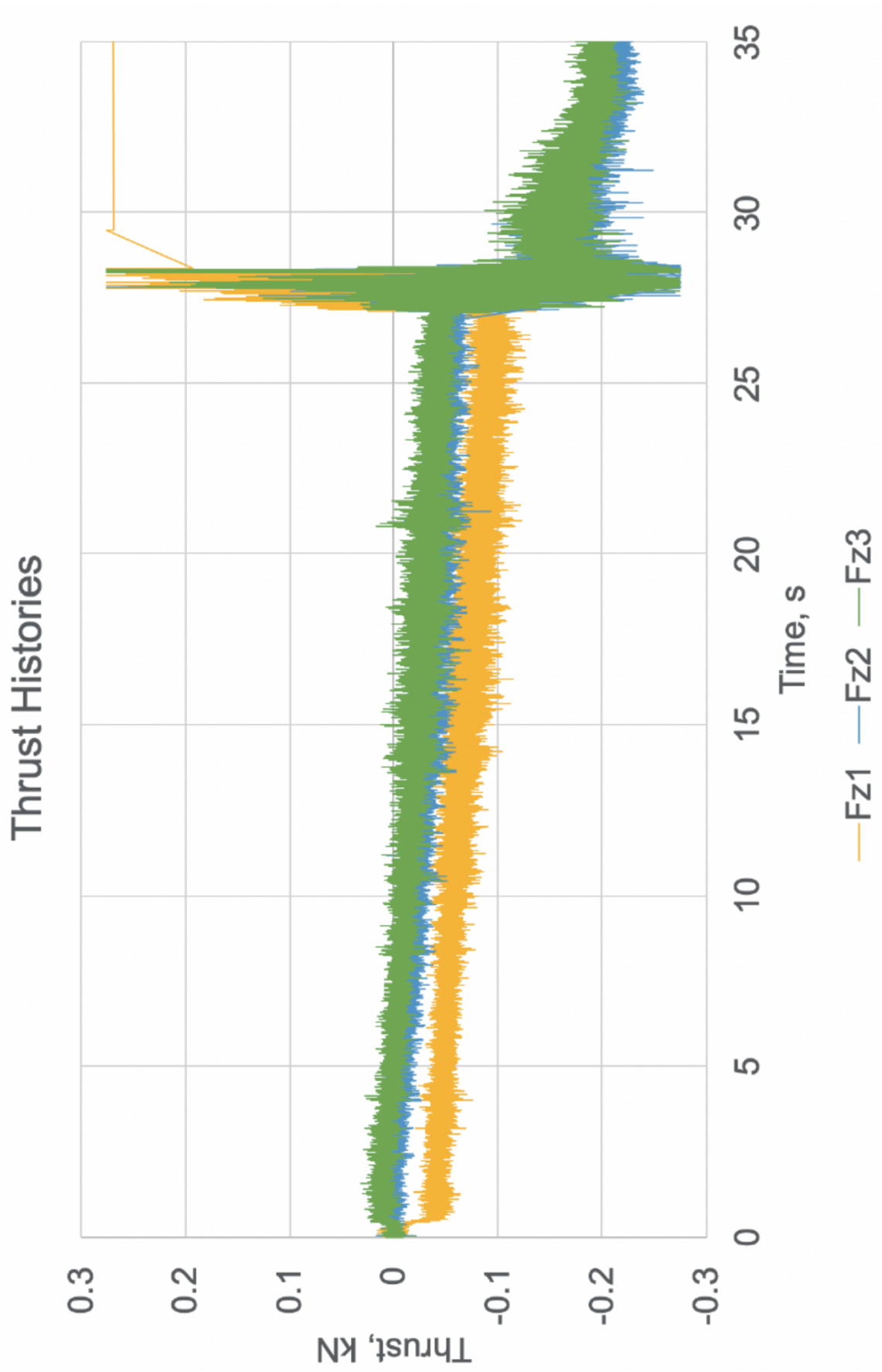


図2.12f: #1計測データ(横推力)

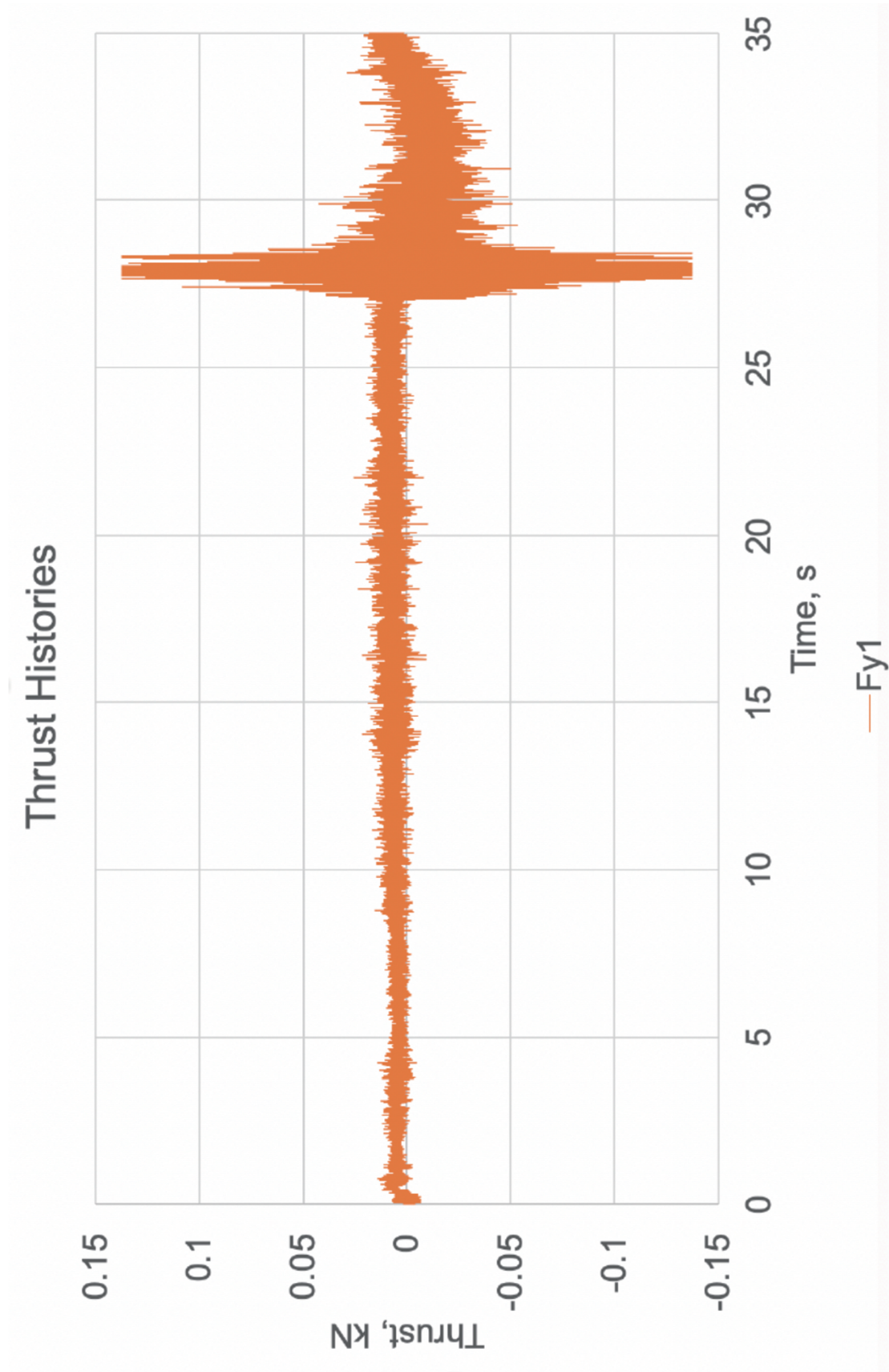


図2.12g: #1計測データ(横推力)

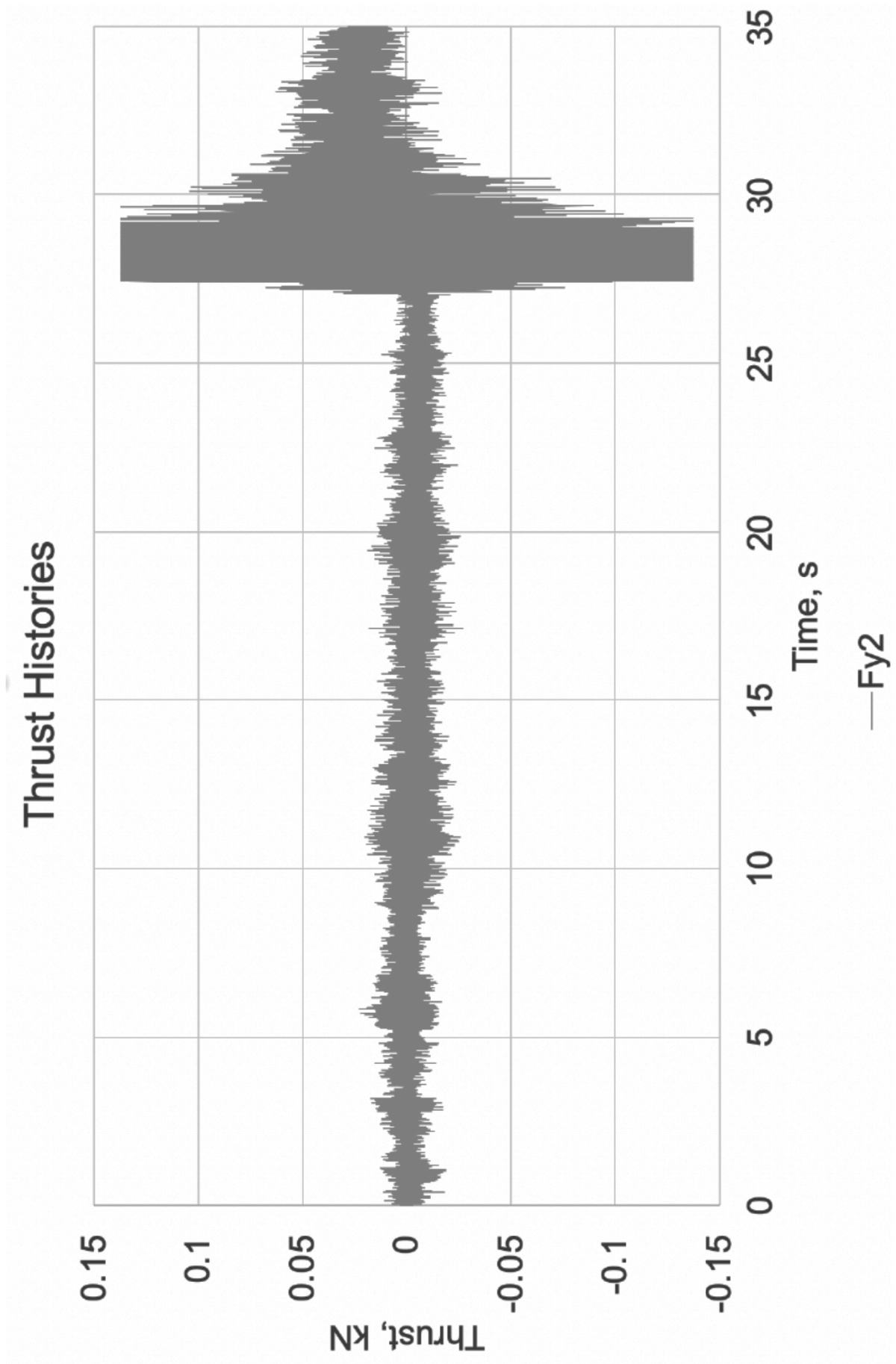


図2.13a:#2計測データ(圧力)

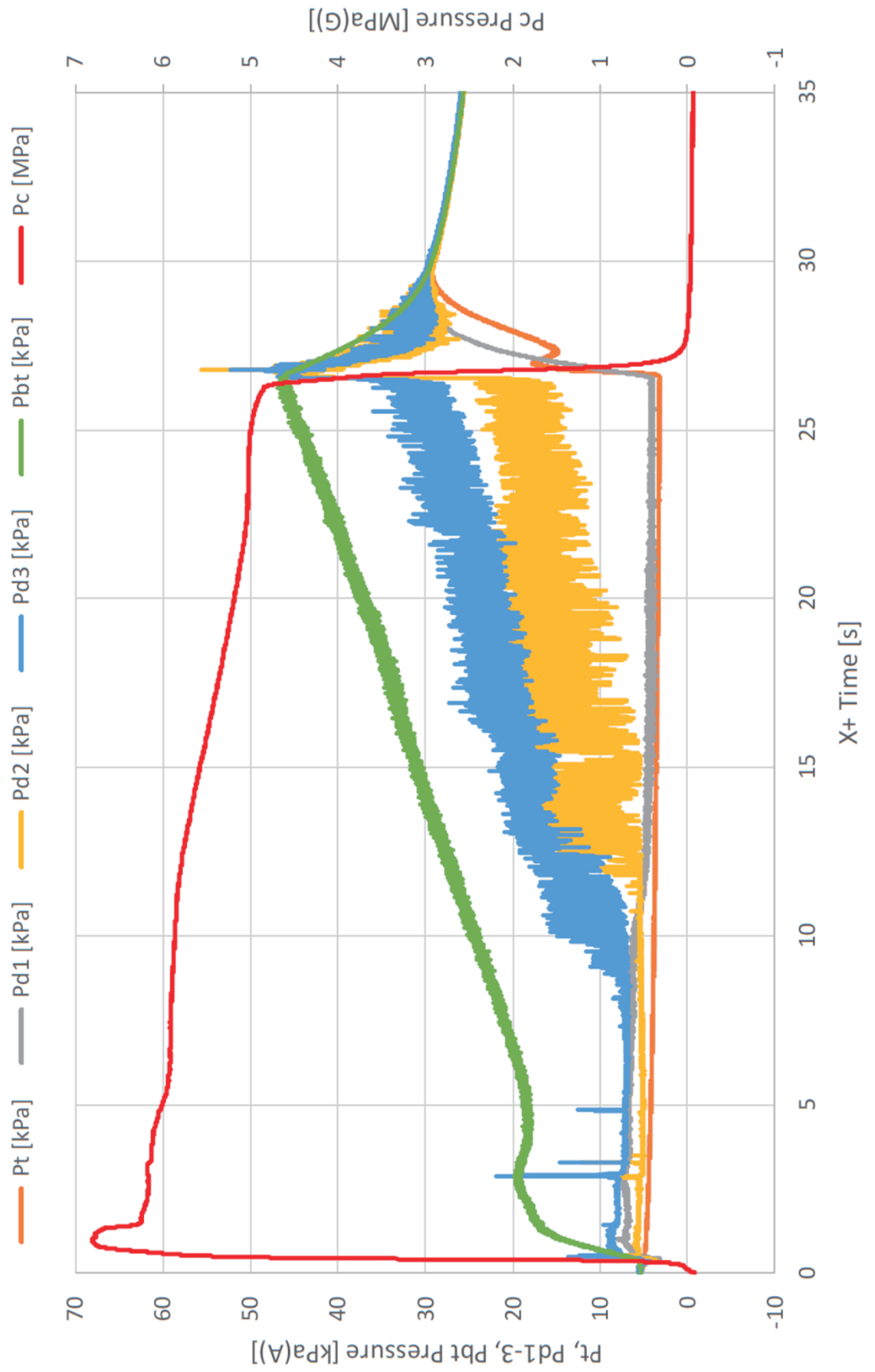


図2.13b:#2計測データ(温度)

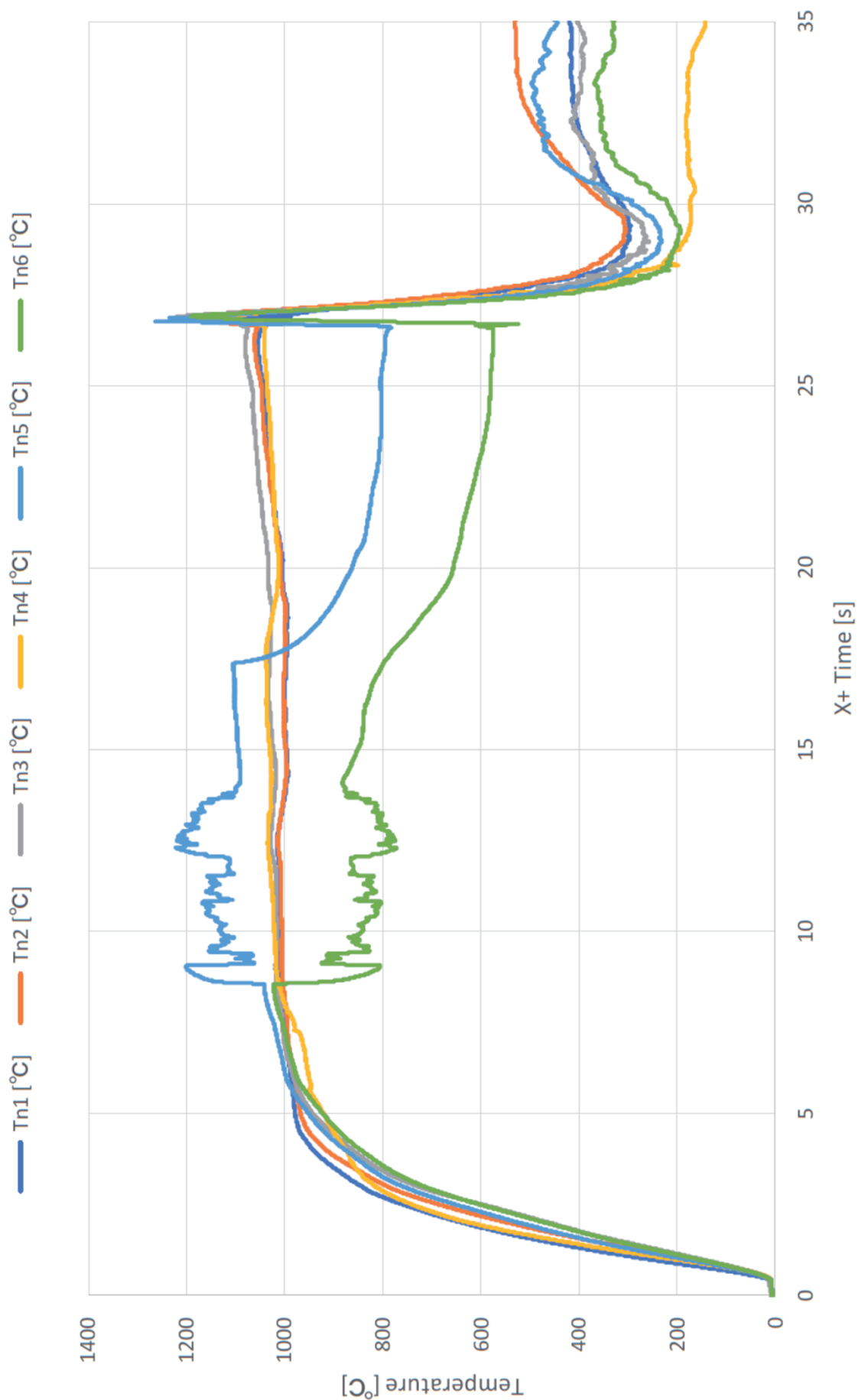


図2.13c:#2計測データ(温度2)

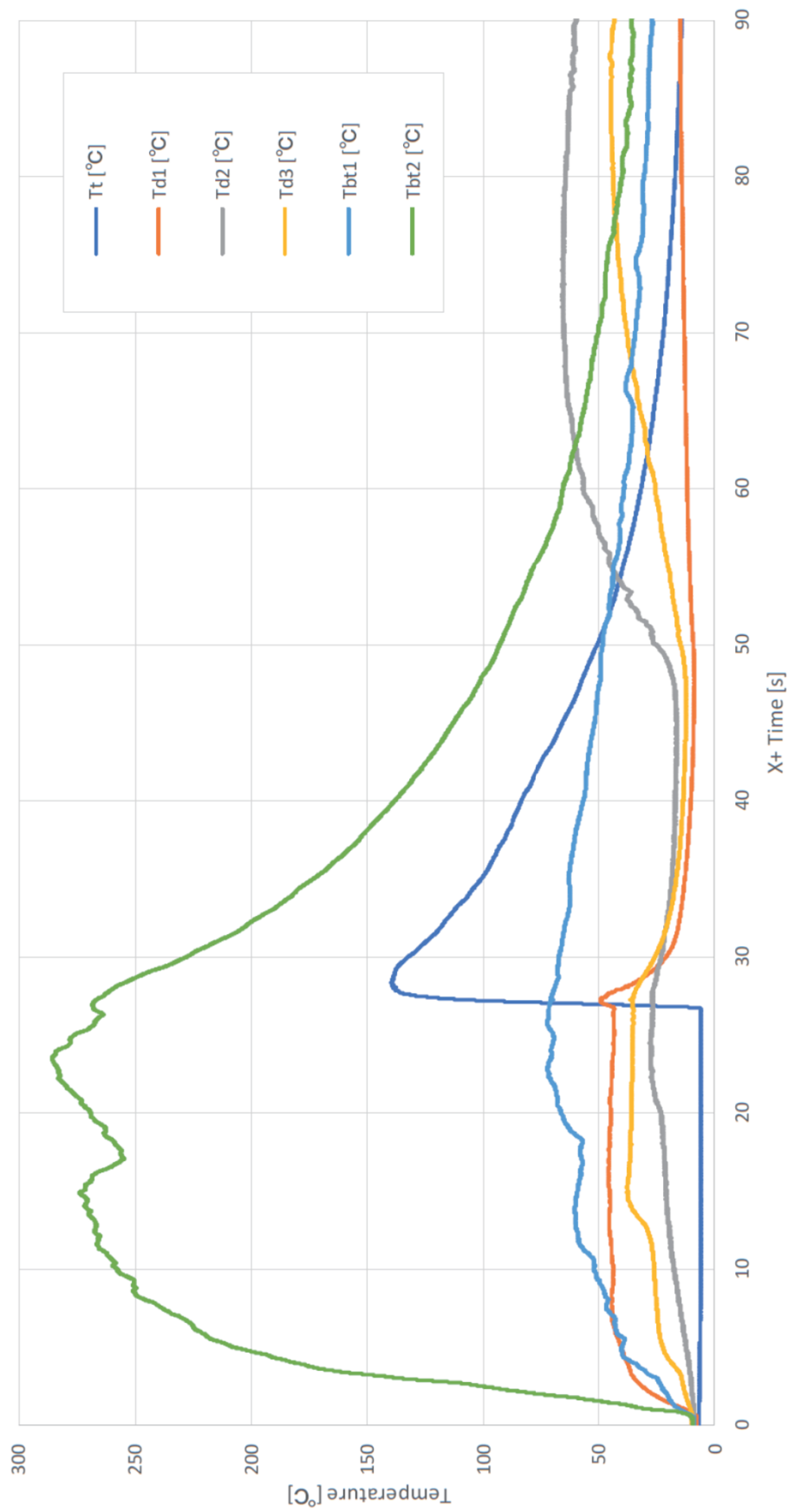


図2.13d: #2計測データ(推力)

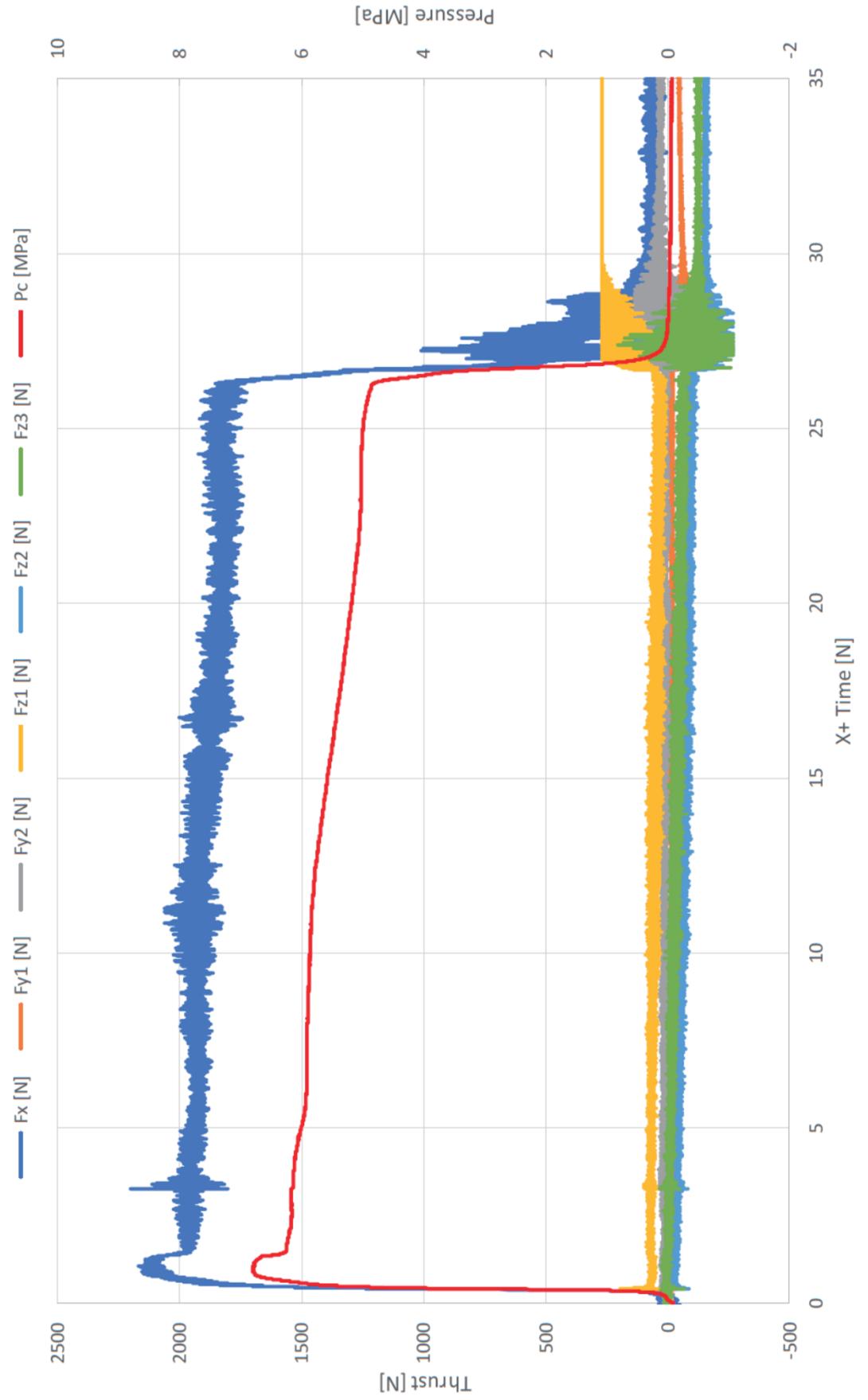




図2.13e:#2計測データ(横推力)

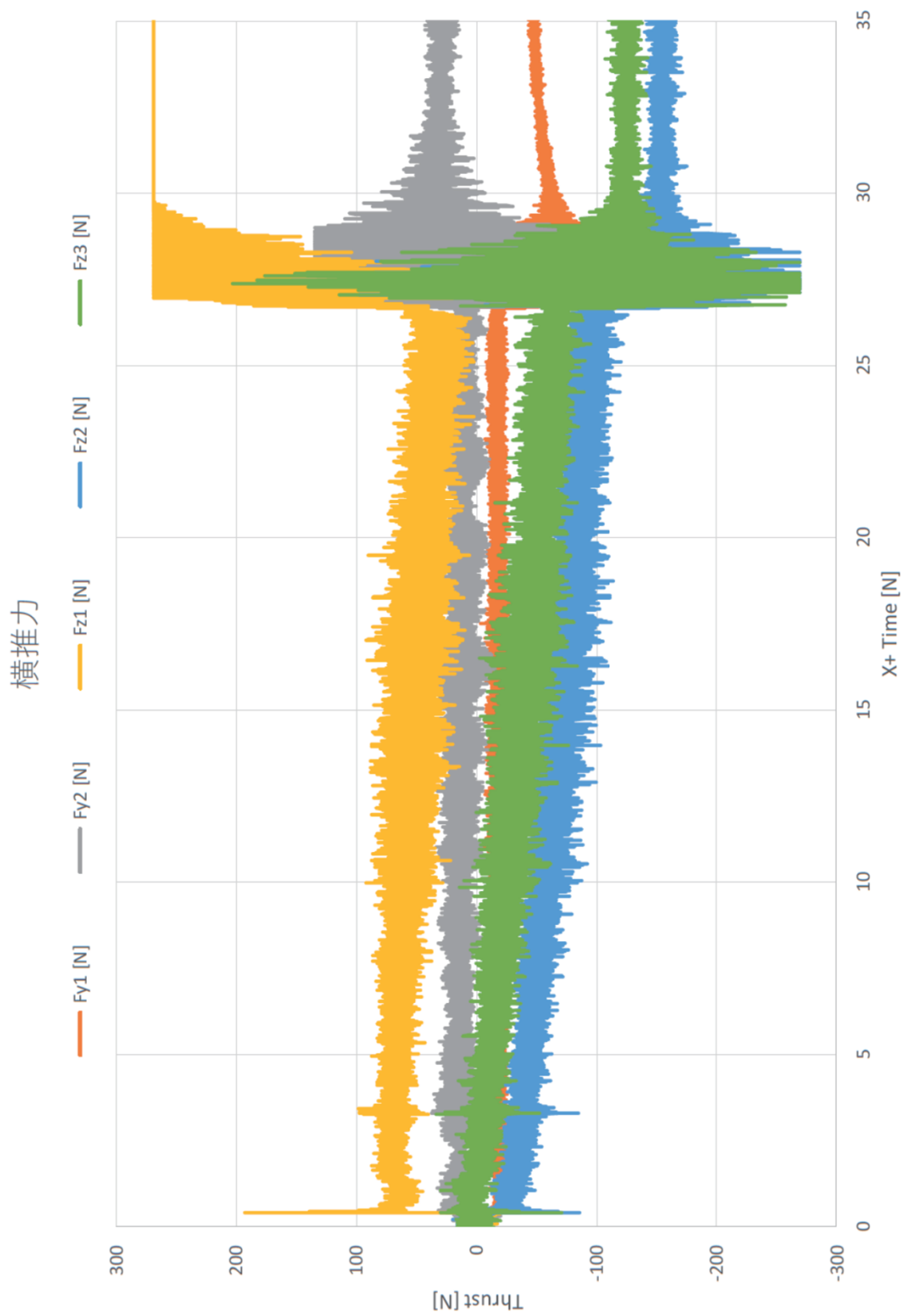


図2.14: #1水冷拡散筒運用実績

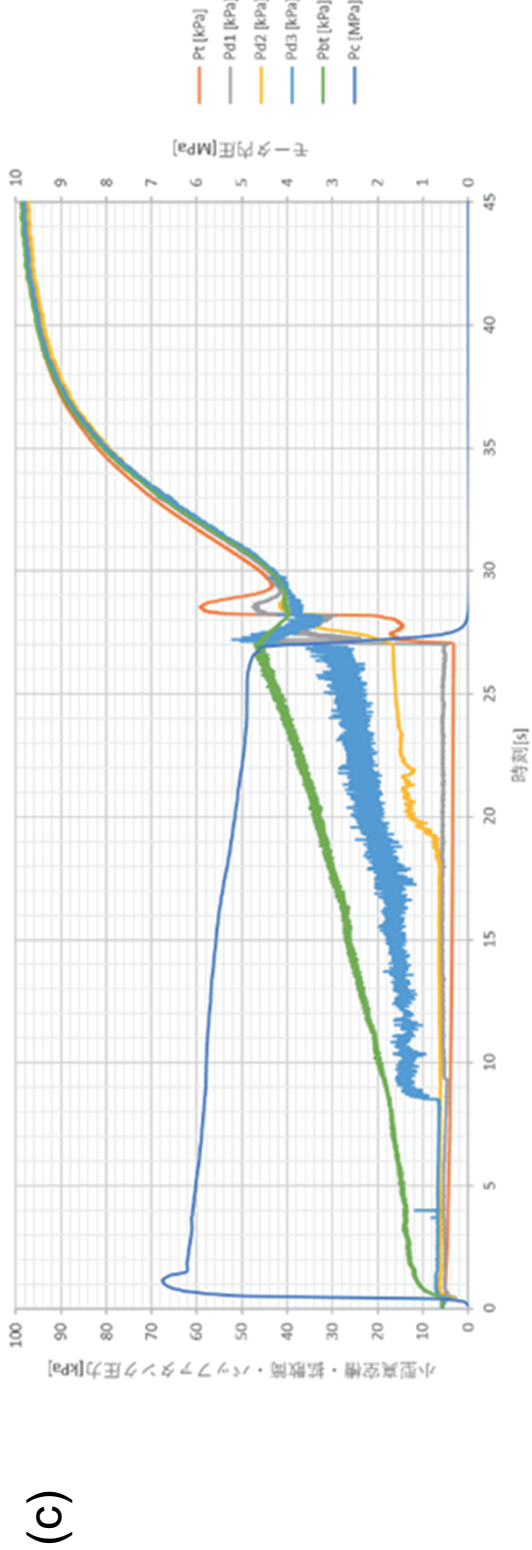
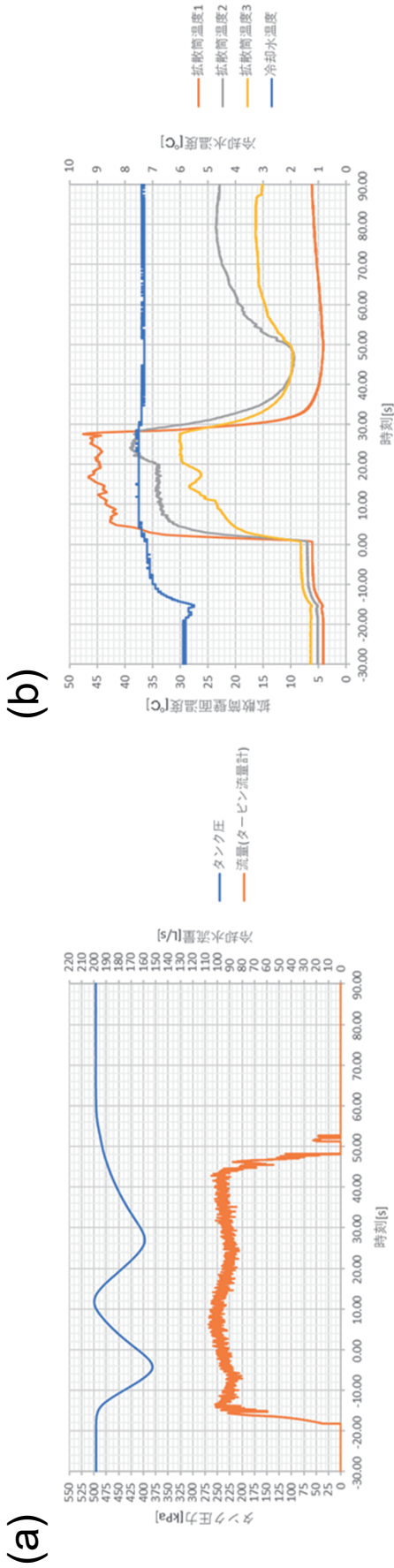


図1 燃焼試験#1時の(a)冷却水タンク圧・冷却水流量履歴、(b)拡散筒・冷却水温度履歴、(c)小型真空槽・拡散筒・バックアタック・モータ内圧履歴

図2.15:#2水冷拡散筒運用実績

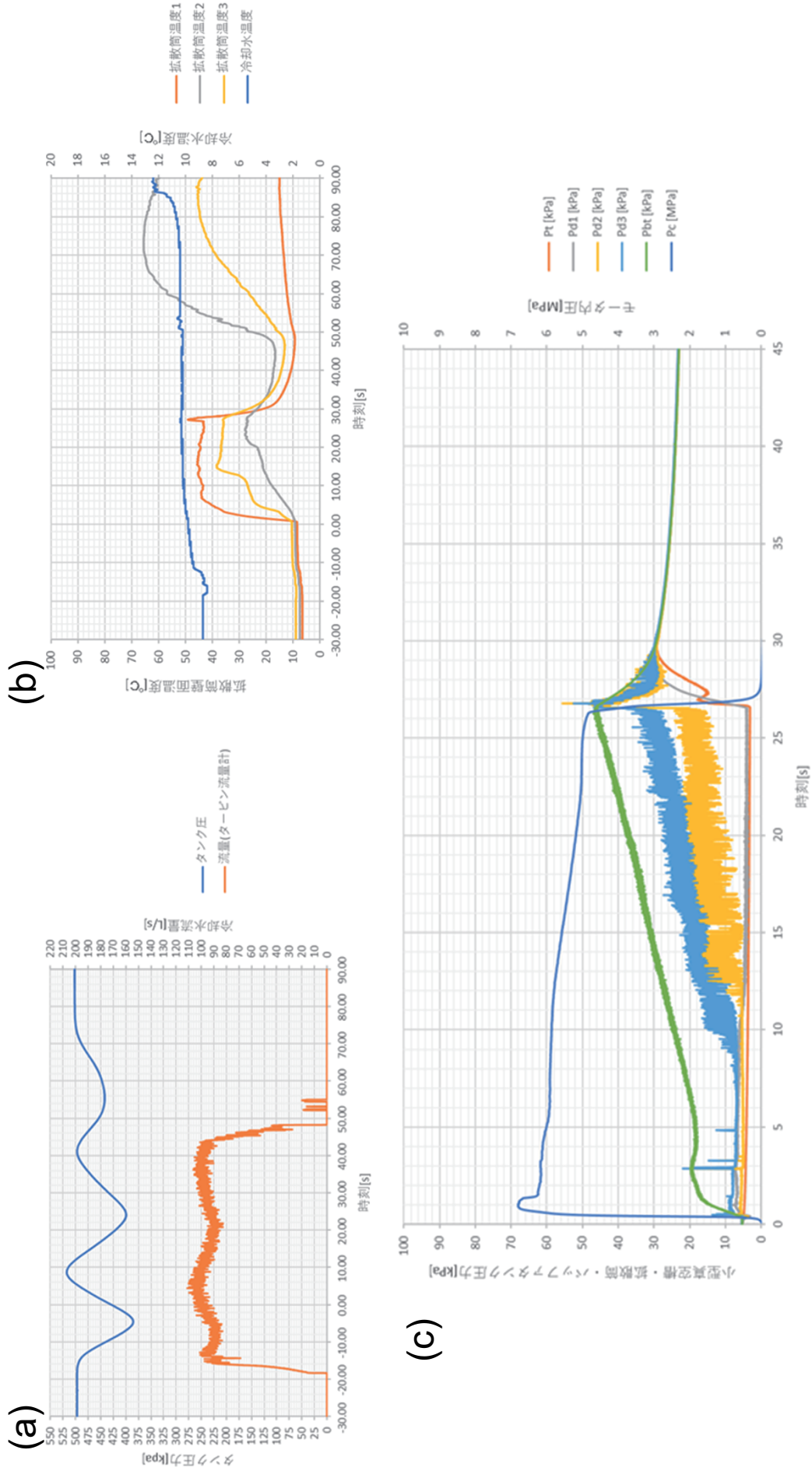
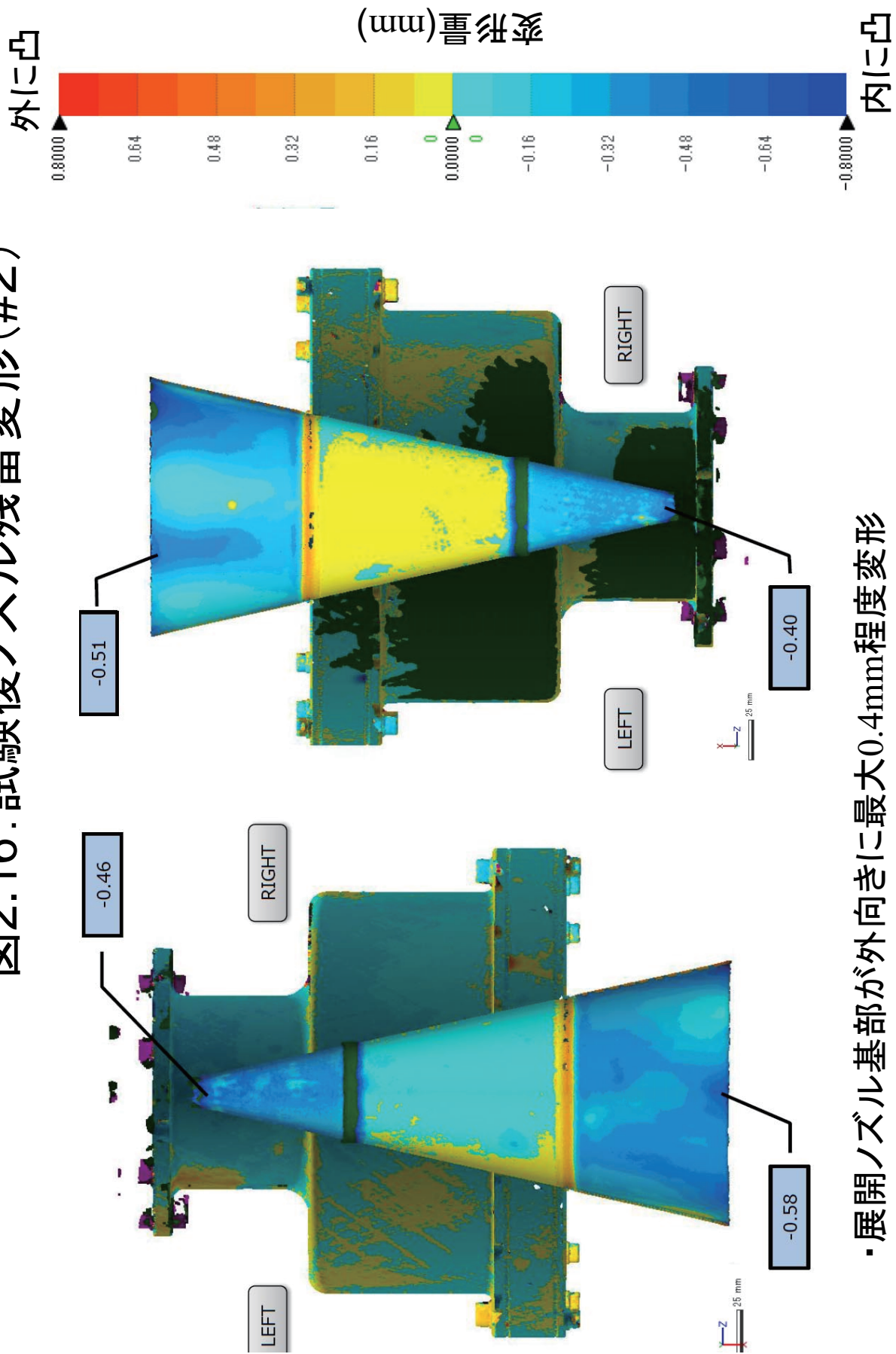


図2 燃焼試験#2時の(a)冷却水タンク圧・冷却水流量履歴、(b)拡散筒・冷却水温度履歴、(c)小型真空槽・拡散筒・バツファタンク・モータ内圧履歴

図2.16: 試験後ノズル残留変形(#2)



- ・展開ノズル基部が外向きに最大0.4mm程度変形
- ・後端側は若干波打つように変形

### 第3章 総括

- ・到達最高温度は、試験#1（CFRP製固定ノズル）で約1160℃、試験#2（グラファイト製固定ノズル）で約1060℃であり、グラファイト製固定ノズルの方が温度が低かった。この傾向は予備試験と一致しており、固定ノズルの熱容量が原因と推定している。
- ・試験#1・#2とも、燃焼中の供試体の断裂等は発生していない。ただしノズルに残留変形（塑性変形）は発生しており、また板厚は実機同等・寸法は実機の約1/4のため発生応力的には実機の約1/4であるので、実機相当の応力で問題ないかは別途評価が必要である。今後材料の高温強度の取得と詳細な設計解析を行っていく予定である。
- ・試験系に関しては真空槽セット時のトラブルやバッファタンク洗浄水の逆流等あったが、試験結果に及ぼすような大きな影響はなかった。

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-20-005

JAXA Research and Development Report

展開ノズル材耐熱試験本試験報告書

Report of main combustion test for material of deployable nozzle

---

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 2021年2月26日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

