

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 極低温流体中でインデューサに発生する キャビテーションの直接可視化 (その2 極低温透視管の検証試験結果)

渡邊 光男, 永浦 克司, 長谷川 敏,  
島垣 満, 吉田 義樹, 杉田 栄一郎

2010年3月

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency

# 極低温流体中でインデューサに発生するキャビテーションの直接可視化\* (その2 極低温透視管の検証試験結果)

渡邊 光男<sup>\*1</sup>, 永浦 克司<sup>\*2</sup>, 長谷川 敏<sup>\*1</sup>,  
島垣 満<sup>\*1</sup>, 吉田 義樹<sup>\*1</sup>, 杉田 栄一郎<sup>\*3</sup>

## Direct Visualization for Cavitating Inducer in Cryogenic Flow\* (2nd Report : Verification Test of Transparent Resin Casing)

Mitsuo WATANABE<sup>\*1</sup>, Katsuji NAGAURA<sup>\*2</sup>, Satoshi HASEGAWA<sup>\*1</sup>,  
Mitsuru SHIMAGAKI<sup>\*1</sup>, Yoshiki YOSHIDA<sup>\*1</sup> and Eiichiro SUGITA<sup>\*3</sup>

### 概 要

本報告では、「極低温流体中でインデューサに発生するキャビテーションの直接可視化（その1：耐低温樹脂の特性検証試験結果）」で行った要素試験のデータを基に、更に極低温透視管に改良を加え、目標耐圧圧力7MPaを目指した検証試験について述べる。（その1）でネジ強度に課題のあったポリカーボネートは、ネジ山形の設計変更を行い、シールは新たにスプリング荷重式テフロンシールを選定し、シール構造にも改良を加えることで目標とする耐圧7MPaを達成することができた。また、ポリカーボネート樹脂の懸念材料であった低温脆性の劣化についても、熱サイクル試験を行うことで素材の潜在能力の高さを確認できた。これらの経緯と試験結果について報告する。

Key Words: Visualization, Cryogenic, Cavitation Flow

### 1. 緒言

極低温流体を推進剤とするロケットエンジン用ターボポンプには、種々のキャビテーションが生じるため、これまで多くの研究が進められて来た。1999年に日本の宇宙開発史上初めて爆破指令を送信したH-IIロケット8号機の事故<sup>(1)(2)</sup>は、旋回キャビテーションによる疲労破壊が原因とされた一例である。

現在JAXAでは、極低温流体中で発生するキャビテーションの熱力学的効果の解明には『直接見る』ことが重要な技術要素であると考え、ターボポンプインデューサの可視化装置の設計・試作を進めている。すでに報告した（その1：耐低温樹脂の特性検証試験結果）<sup>(3)</sup>では、透視管材料として選定したポリカーボネート材の極低温における要素試験を行い、基礎データを取得した。しかしながらポリカーボネートと金属部との接触部に用いる

シールにおいては、樹脂に使用可能な低温・高圧シールの選択に依然課題を残していた。

本報告では、ポリカーボネートのネジ形状へ改良を加え、また新たにスプリング荷重式テフロンシールを選択し、目標値である耐圧試験圧力7MPaまでの試験を試みた結果について報告する。

### 2. インデューサ可視化の経緯と低温樹脂の選択

1967年に米国NASAにおいて液体水素中でインデューサの可視化を行ったことが報告されているが、これまでに世界で成功した例はこの一例<sup>(4)</sup>だけである。

日本では、1975年から水によるポンプキャビテーション可視化の試みが始まり、幾多の失敗を経て1982年に極低温流体のポンプ入口での気液二相流の可視化<sup>(5)</sup>に初めて成功した。この時の試験において液接側内筒に使用

\* 平成22年2月4日受付 (received 4 February 2010)

\*1 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系推進技術研究開発センター (Space Transportation Propulsion Research and Development Center, Space Transportation Mission Directorate)

\*2 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japan Aerospace Technology)

\*3 ダイナックス(株) (dynax Incorporated)

した樹脂がポリカーボネート（以後PCと記述する）である。PCは耐熱性を兼ね備えた、強度的に優れた透明樹脂として開発された素材である。極低温可視化を始めた1980年頃には、低温に強く加工が容易であり更に透明性に優れた素材は皆無であったが、極低温試験により筆者らは極低温環境下でもPCを使用できることを見いだした。

しかし、極低温という環境下での使用は素材メーカーにとって想定外のため、低温下での材料データは現在に於いても皆無である。さらに低温脆性の限界温度は一般的に $-100^{\circ}\text{C}$ と云われているが、この温度も一度だけの限界の温度を示すのか、もしくは熱サイクルによる低温劣化

を示すものか不明でありこれを見極める必要がある。

また（その1：耐低温樹脂の特性検証試験結果）<sup>(3)</sup>の結果から、常温における材料物性表が適用できないことは明らかになっており、現在試作中の可視化装置の目標である耐圧7MPaに対し過去の経験則をそのまま現設計に反映することは困難との結論が得られた。従って、高圧に耐えるPCの設計と、異種材料間の高圧シールの新たな選定のために以下に述べる実証試験を行った。

### 3. 可視化装置の設計と対策

#### 3.1 基本設計

低圧で配管の一部をPCに取り替えるような簡易な装置であれば、接合部はクランプ方式に、シールはインジウムとし比較的易しい設計が可能である。

一方、高圧のターボポンプのケーシングを透視管とする場合は、図1に示すように、ケーシングの一部が金属から強度の落ちるPCとなるために接合部の設計は複雑になり、また厳しいスペースの制約を受ける。従って試作している装置は、接続部に最短設計が可能なネジ方式を採用した。

ここでは、可視化部の結露防止のため二重管構造として、液接側の内筒にPCを採用し、大気側の外筒はアクリル材を選択した。支持金具からアクリルが冷えないように対策を施し、その中間部は真空断熱とした。内外の温度差（歪み）は伸縮管で吸収する。PCの低温縮みとインデューサ径を考慮して内径は $\phi 150$ 、外径は $\phi 180$ とした。

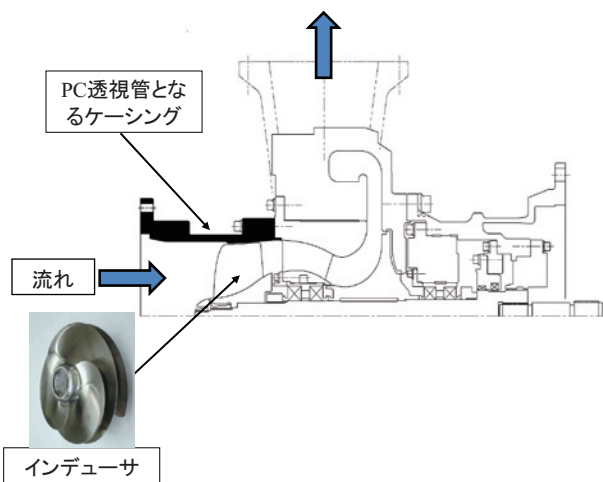


図1 インデューサ試験機概略図

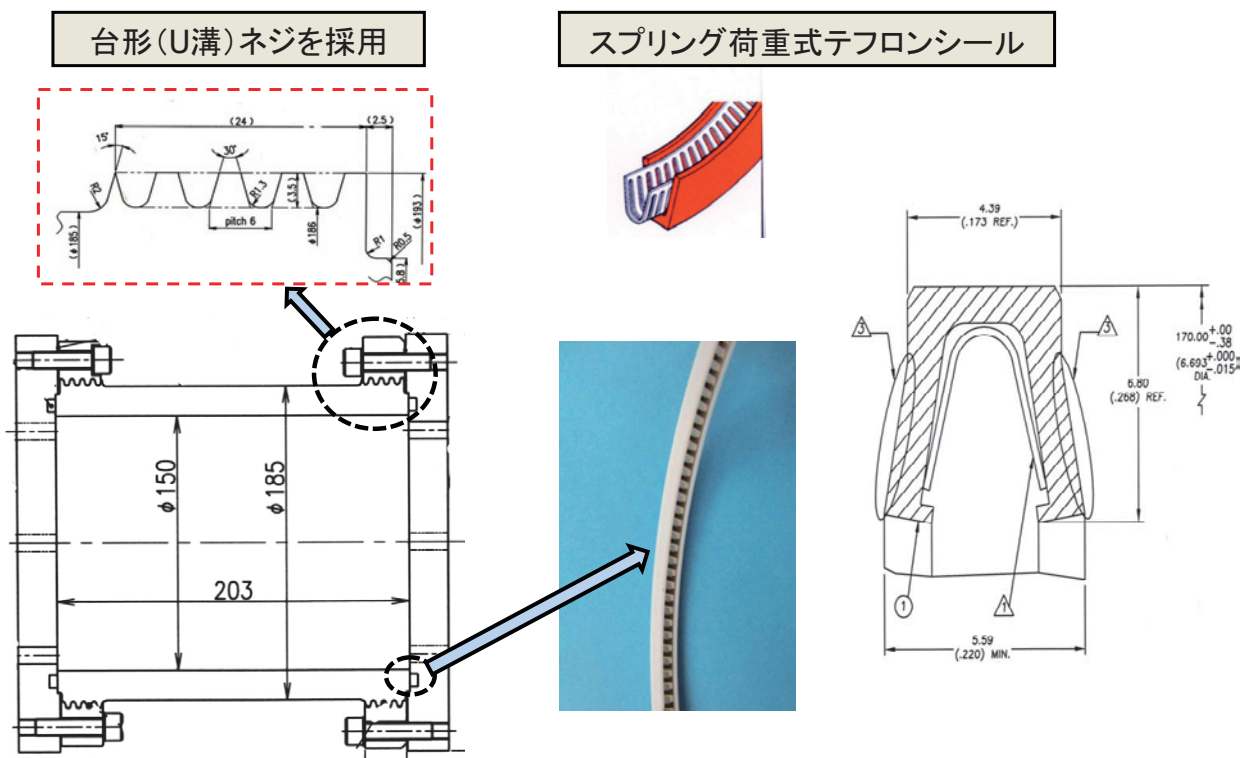


図2 改良台形ネジとスプリング荷重式テフロンシール概略

### 3.2 高圧化への対策

前報告（その1：耐低温樹脂の特性検証試験結果）<sup>(3)</sup>に示したように、インジウムシールには反力が無く、一方、ボルテックスシール、メタルジャケットシール、波形シール、デルタシール等は反力が強すぎてPCの許容締付けトルク値を超えるために十分な潰し代が得られず、低温試験ではいずれも1MPa付近から漏れが認められた。

そこで、図2右に示した、低温歪み変形にも追従し、圧力上昇に合わせシール面圧を高める効果を持つ、スプリング荷重式のテフロンシールを採用することにした。ただし、欠点は外筒部がテフロン材（PTFE）のためシールメーカー標準の設計圧力では4MPaと目標圧力の7MPaに達しないことである。

一方、PCも5.4MPaで破裂し目的は達せられなかったが、ネジ部から破壊に至る過程が判明したことは大きな成果の一つであった。この結果を踏まえ、ネジ形状は一山の強度を増し、さらに谷部に集中する応力を低減するため、図2左に示す特殊な台形ネジ（U溝型）とし、谷径をPC外径よりも大きくする対策を施すこととした。

## 4. 低温実証試験

### 4.1 実証試験その1

試験は安全を考慮して、（その1：耐低温樹脂の特性検証試験結果）<sup>(3)</sup>の要素試験を行ったダイナックス（株）<sup>(6)</sup>の高圧試験場で行った。ネジ改良型PCとメーカー標準規格のスプリング荷重式のテフロンシールを組合わせて試験を実施した。低温試験では供試部の予冷は実試験を想定して、全て低温ガスと液体窒素液予冷で行い合計約4時間をかけて行った。

初めに低温脆性を検証するために、熱サイクル試験として図3に試験状況を示したように、1MPaのGHeによる常温気密を行い、次に液体窒素冷却後に試験時のインデューサ出口圧力である3MPaの極低温気密（GHe加圧）を

行った後、自然昇温により常温に戻すサイクルを加えた。このサイクルで3回の試験を行った。

図4は、熱サイクル試験の3サイクル目に行った低温におけるデータを示す。PCに取り付けた長手方向の歪みにはほとんど変化はなく、また周方向の歪みは圧力の変化に追従して増加しているが、減圧後には元の位置に戻っており、試験を行った3サイクルでは低温脆性の影響は全く見られない。なお、気密試験における漏洩の可否は、ヘリウムリークディテクタを用い、測定値  $\chi \times 10^{-7} \sim \chi \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ （大気中のGHe濃度程度）のレベルでリークゼロとの判断をした。

また、熱サイクル試験後の限界確認試験では、PC内部に液体窒素が充填された予冷状態で、0MPaからGHeで歪みと圧力の安定を確認しながら徐々に加圧した。初期型PC<sup>(3)</sup>の破壊圧力であった5.4MPaをクリアし、6.0MPaを目指しさらに加圧したところ、5.8MPaでフランジの間隙からガス漏れが確認されたので脱圧し試験を終了した。

分解検査の結果、スプリング荷重式のテフロンシールの背面部中央付近に外周の約1/3程度に割れが生じていたことが判明した（図5参照）。このシールの外装はテフロンを機械加工したもので、低温でも柔軟性に優れている

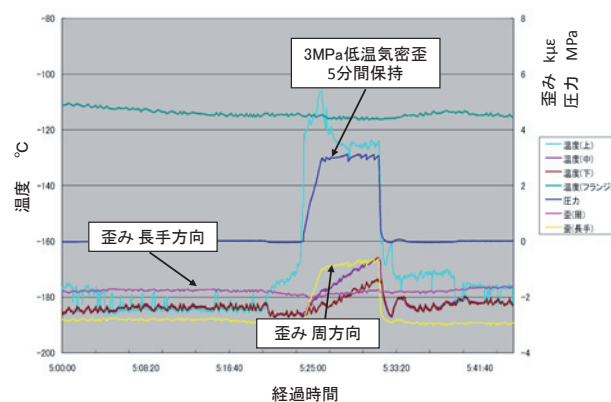


図4 ポリカーボネートの熱サイクル試験

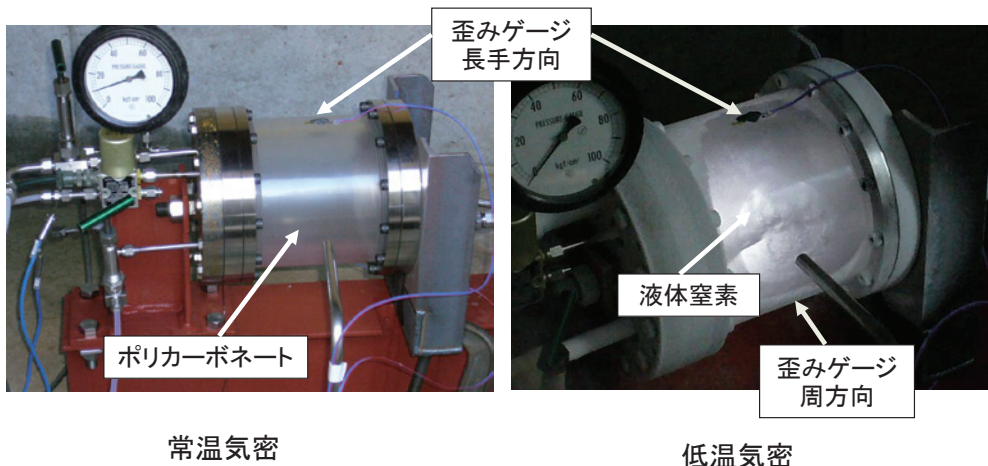
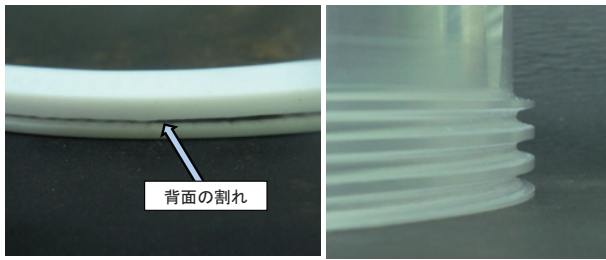


図3 ポリカーボネートの熱サイクル試験



破損したテフロン外筒背面部 改良型台形ネジ  
図5 試験後のシール外筒とPCネジ部

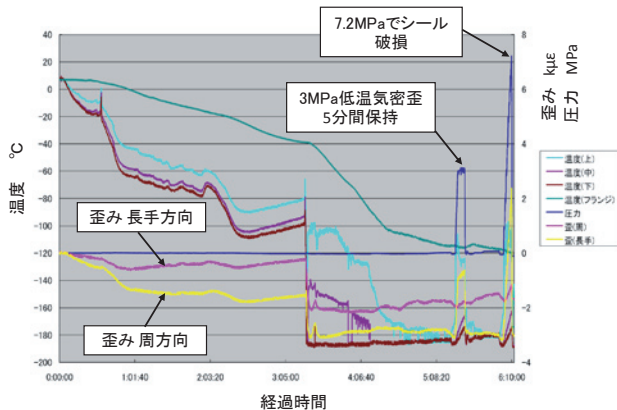


図6 熱サイクル試験と破壊試験

が、強度が劣るといふ素材の欠点が現れたものであった。しかしながら、PCの改良ネジ部は、傷及び変形等は全く見られず良好であり、設計変更を行った効果が認められた(図5参照)。

シール外筒は標準規格品で、設計圧力4MPaに対して実際の低温試験の結果では、破損した圧力は5.8MPaであり、シール自体は約40%の余裕をもっていることが判明した。そこで、シールメーカーと共同で破損(背面部の割れ)の状況を詳細に分析し、対策を施すことで破損圧力を更に引き上げることが可能であるとの判断を下し、次の二点について改良を行うこととした。

- ①テフロンシールの背面の厚みを、シール溝の寸法を考慮しつつ、最大限に増加させる。
- ②サイド側のシール部の厚みを増し、接触部を補強する対策を施す。

#### 4.2 実証試験その2

ネジ改良型PC(5.1項と同一PC)と上記①と②の改良を施した強化型のスプリング荷重式テフロンシールの組み合わせで試験を行った。5.1項で行った熱サイクル履歴と同様に常温(1MPa)、極低温気密(3MPa)を行った後、液体窒素を満たした状態で0MPaから段階的に圧力を上げた(試験パターンを図6に示す)。

図7に示すように、5.1項でシールが破損した5.8MPaをクリアし、耐圧目標値の7.0MPaにおいて1分間保持し歪み、圧力が安定していることを確認した(図8参照)。

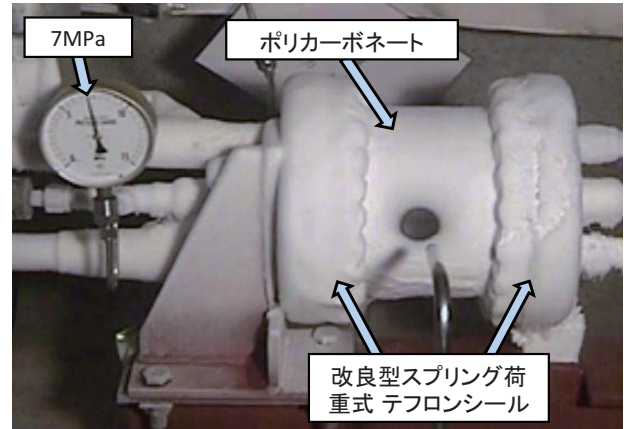


図7 ポリカーボネートの7MPa耐圧試験

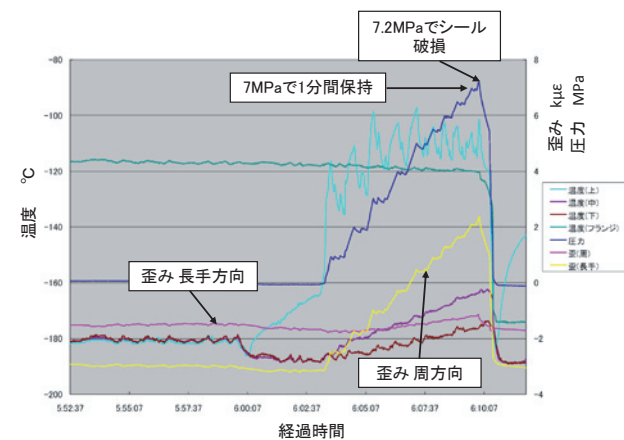


図8 ポリカーボネートの極低温高圧試験

その後、PCの極低温における限界を探るために、さらに加圧したところ7.2MPaでフランジから弱い白煙の発生が認められたために、PC内の圧力を低下させ試験を終了した。

漏洩は前回同様にシール背面側の割れが原因であったが、7.0MPaの目標値には達しており、強化対策の効果は十分に認められた。また、PCは図5と同様に特に問題はなく、さらに周・軸方向の歪みも共に圧力降下に追従して予冷開始時の位置に戻っており、今回の試験データからは未だ弾性領域に在ることを示していた。

さらに同一PCケーシングにおいて、1MPaの常温気密、3MPaの極低温気密を4サイクル、さらに極低温(0MPaから5.8MPa)、極低温(0MPaから7.2MPa)各1回の繰り返し試験を行ったところ何れも問題はなく、低温強度、低温脆性共に設計を注意深く行えばPCはかなり高い潜在能力を持つ極低温素材であることが明らかとなった。

#### 5. 可視化装置の試作

透視管を設計する上で、最も懸念されたのはPCの低温縮みの問題であった。過去に行ったLE-5、LE-7のターボポンプの可視化の試みが全て失敗に終わったのは、この低温縮みのデータが皆無の中で設計を進めたことが原因

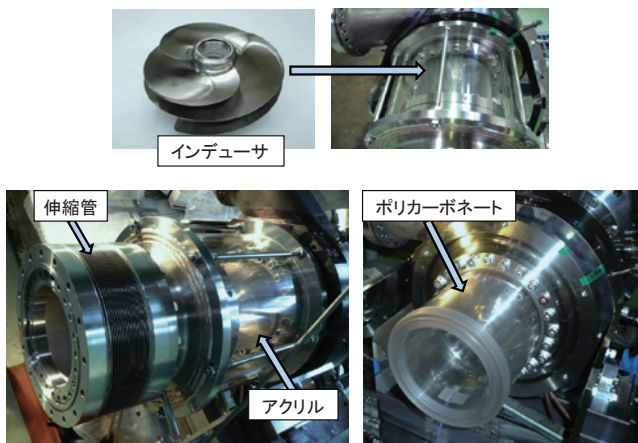


図9 可視化装置組立

と考えられた<sup>(7)</sup>。

試作したPCケーシングは内径φ150mm、外径φ185mmのものであるが、PC単体で冷却された場合は半径方向の低温縮みは外径で約1mmであり、両端がフランジで拘束されている場合は0.7mm～0.8mmと若干小さめの値となった。この値は歪み計測から算出した値とほぼ一致していたので、この結果を可視化装置の設計に反映して試作可視化装置を製作した。

インデューサ試験機との整合性を確認するために、試験機のライナケーシング（図1参照）を取り外し、試作可視化装置の組み立てを行った様子を図9に示す。可視化装置は透視管部、入口伸縮管、入口インターフェース管部から成り、図10に示す極低温インデューサ試験設備の枠で囲った位置に設置される。

## 6. おわりに

今回の一連の改良設計と検証試験で、目標の耐圧圧力7.0MPaをクリアし、PC素材の限界は極低温環境下においてもかなり高いことが証明された。しかし、常温の材料物性表<sup>(8)</sup>が低温の場合には適用できない点や、さらにネジ部の設計に見られたように、設計により強度が大きく異なる点等、まだまだ解らないことも多いことから、現時点では形状が大きく変わる場合には個々の形状について検証試験は必要と考えられる。

また、PCに使用可能であることを今回実証できたスプリング荷重式のテフロンシールにおいても、素材の問題から改良を加えても7MPa強が限界であり、より高い圧力を追求する場合には今後更なるシールの選定、検証が必要と考えられる。

今回試作した可視化装置を用い、世界で二例目のイン

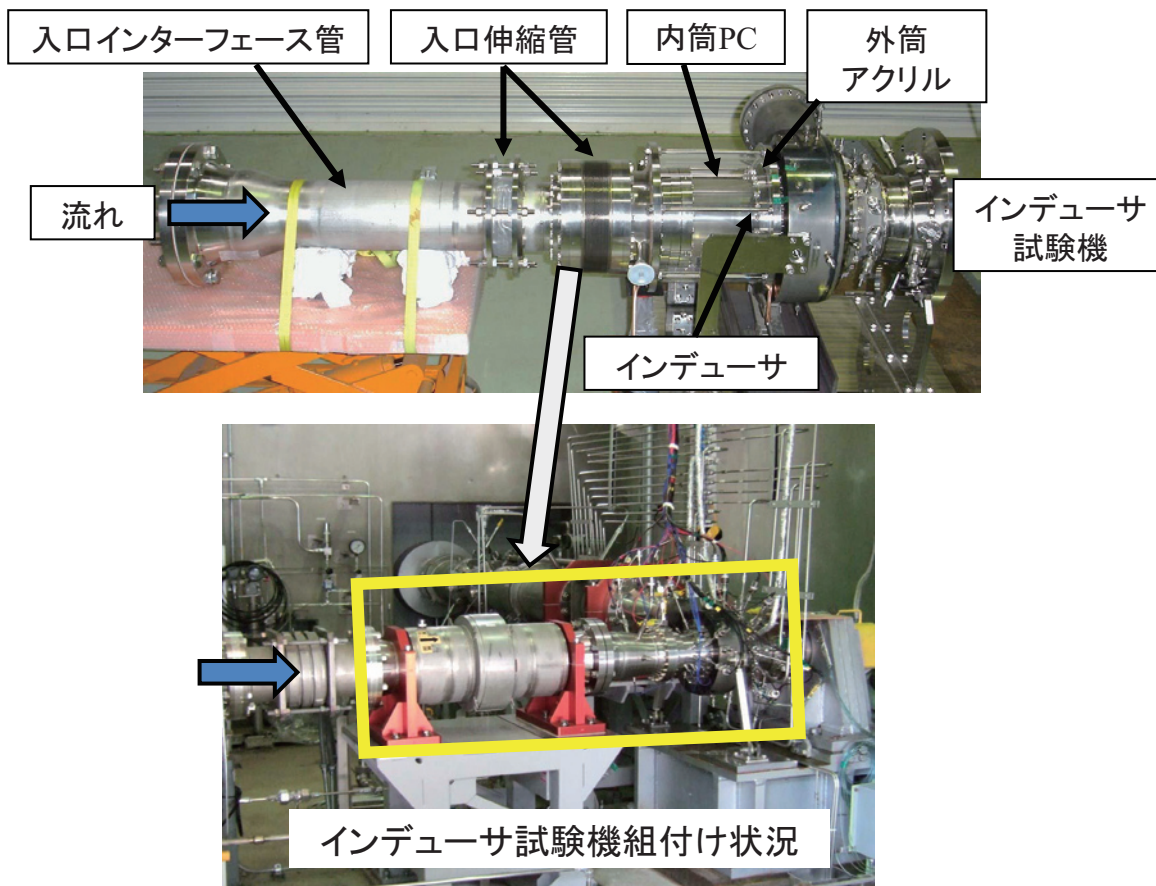


図10 可視化装置と設備組付け位置

デューサに発生する極低温キャビテーションの直接可視化試験を行うべく現在準備中であるので、(その3)ではその結果について報告する予定である。

#### 7. 参考文献

- (1) 今野 彰, “H-II ロケット失敗の原因とその教訓”, 圧力技術, 第41巻第6号, (2003), pp.335-344
- (2) 今野 彰, 坂爪 則夫, “LE-7 エンジンターボポンプと8号機の失敗の原因”, ターボ機械, 第29巻第3号, (2001), pp.139-144
- (3) 渡邊光男, 長谷川敏, 島垣満, 吉田義樹, 永浦克司, 杉田栄一郎, “極低温流体中でインデューサに発生するキャビテーションの直接可視化 (その1 耐低温樹脂の特性検証試験結果)”, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-09-008, (2010)
- (4) Ball, C.L., Meng, P.R., Reed, L., “Cavitation Performance of 84 deg Helical Pump Inducer Operated in 37 deg and 42 deg Liquid Hydrogen” NASA, TMX-1360, (1967)
- (5) 山田仁, 渡邊光男, 長谷川敏, 上條謙二郎, “極低温ポンプの二相吸込性能試験”, 航空宇宙技術研究所報告, NAL-TR-870, (1985.8)
- (6) ダイナックス株式会社ホームページ, <http://www.dynax-jpn.com>
- (7) 渡邊光男, 長谷川敏, 島垣満, 永浦克司, 中村憲明, 橋本知之, 吉田義樹, “極低温ロケットポンプの入口流れの可視化について”, 日本機械学会2006年次大会講演会論文集, (2006.9)
- (8) 芝軽粗材株式会社ホームページ, 材質物性表 (その2), <http://www.shibakei.co.jp/zaishitsu/zaishitsu2.htm>