

ISSN 0389-4010  
UDC 629.7.018  
629.7.036.73

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1198

イオンエンジン作動真空の向上のための  
エンジン移動取付台の製作とその機能評価

宮崎勝弘・早川幸男・北村正治

1993年4月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# イオンエンジン作動真空の向上のための エンジン移動取付台の製作とその機能評価\*

宮崎 勝弘<sup>\*1</sup>, 早川 幸男<sup>\*1</sup>, 北村 正治<sup>\*1</sup>

## Extensible Thruster Stand to Improve Vacuum Environment for Ion Thruster Operation\*

Katsuhiro MIYAZAKI<sup>\*\*</sup>, Yukio HAYAKAWA<sup>\*\*</sup>  
Shoji KITAMURA<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

This paper describes the design and fabrication of an extensible ion thruster stand, the tests to demonstrate its functions, and the test results. The purpose of this thruster stand is to improve the vacuum environment for xenon ion thruster operation while allowing easy access for replacing the thruster in a vacuum. To achieve this, the vacuum facility was furnished with a thruster lock chamber, and a gate valve between the vacuum chamber and the lock chamber. After opening the gate valve, the thruster stand moves the thruster from the lock chamber into the vacuum chamber, where the vacuum is higher than in the lock chamber, and tests can then be conducted on the thruster.

Using conventional methods, if the thruster is placed directly in a vacuum chamber, the chamber must be opened to the air and then evacuated again each time it is opened for the thruster access. This can be very time-consuming, particularly in a large vacuum chamber. Although installing the thruster lock chamber and the gate valve can provide easy thruster access, the problem of small gas flow conductance due to their small inner diameters makes it difficult to attain a high vacuum around the thruster. The extensible thruster stand, together with the lock chamber and the gate valve, can provide both easy thruster access and a high vacuum around the thruster.

To demonstrate the advantages of this improved method, we measured the pressures in the main chamber and in the thruster lock chamber as the thruster position was changed. Also, we measured the thruster performance as the chamber pressure was changed by feeding extra xenon. Results of these tests revealed that the pressure around the thruster was lowered to  $1/2 \sim 1/3$  by using this thruster stand and that evaluation accuracy was improved during thruster endurance tests. We further found that this vacuum facility is capable of operating two 25 mN thrusters simultaneously or of operating a larger thruster of 150 mN class.

Keywords: Electric Propulsion, Xenon Ion Thruster, Vacuum Facility, Thruster Stand

### 概 要

本論文はイオンエンジン移動取付台の設計, 製作, 機能, 評価試験および試験結果について述べる。この

\* 1992年11月2日 受付 (received 2 November 1992)

\*1 宇宙研究グループ (Space Technology Research Group)

移動取付台の目的は、キセノンイオンエンジンの作動を高真空下で行い、かつ真空槽からの出し入れを容易に行えるようにすることである。容易にエンジンを出し入れするため真空装置に門型弁を介してエンジン格納槽を取り付けた。門型弁を開けた後、移動取付台によりエンジンを格納槽から真空槽内へと移動させる。真空槽内は格納槽よりも高真空になっており、ここでエンジンの作動を行う。

従来のエンジン設置方法には問題があった。真空槽内に直接エンジンを置く方法ではエンジンの出し入れごとに真空槽への大気導入と真空排気が必要であり、これは大型真空槽では不相当である。エンジン格納槽と門型弁を取り付けるとエンジンの出し入れは容易になるが、それらの内径が小さいため気体流れのコンダクタンスも小さく、エンジン周りを高真空に排気することが困難になる。エンジン移動取付台はエンジン格納槽と門型弁と共に用いて、エンジン出し入れの容易さとエンジン周りの高真空の両方を実現することができる。

この改良した方法の有効性を示すため、エンジンの位置を変化させて、真空槽本体内の圧力とエンジン格納槽内の圧力を測定した。また、キセノンの追加導入により真空槽内の圧力を変化させ、この時のエンジン性能の変化を測定した。これらの試験の結果は、本移動取付台の使用によりエンジン周りの圧力は1/2~1/3に低下すること、およびエンジン耐久試験での評価精度を向上させることを明らかにした。また、本真空装置では、25mNエンジンの2台同時作動、またはより大型の150mN級エンジンの作動が可能であることがわかった。

### 1. まえがき

イオンエンジンは、従来のヒドラジンと比べ約10倍高い比推力を持つという特徴のため、推進剤の重量を大幅に軽減できる。この特徴を生かして静止衛星の南北位置保持用スラスタに用いれば、衛星寿命の延長とミッション機器の増加をもたらすことができる。また、軌道交換用ロケットとして用いれば、化学式アポジロケットを用いる場合よりも大きな質量の衛星を静止軌道に投入することも可能となる<sup>1)</sup>。

イオンエンジンの推力は、放電室内で生成されたプラズマから正負2枚の高電圧電極の間に作られた電場でイオンを抽出加速することによって得られる。この作動原理のため地上試験は真空装置を用いて行うわけであるが、放電や加速に影響を及ぼさないように高真空である必要がある。また、イオンエンジンの耐久性を評価するには高真空だけでは不十分で清浄な環境であることも必要となる。

推進剤としては当グループも含めほとんどのイオンエンジンにキセノンが用いられている。このキセノンを大量に真空排気するため、当グループでは真空槽内に直接クライオパネルを設置した真空装置をイオンエンジンの作動試験に使用している<sup>24)</sup>。

クライオパネルはヘリウム冷凍機からの冷媒ガスの循環によって冷却される。キセノンの排気能力を有するにはクライオパネル温度を常時50K以下に保つ必要がある。クライオパネルを50K以下に冷却する所要時間として、真空槽の真空状態が良く冷凍機の運転が可能なお場合には約12時間要する。真空槽が大気開放状態になっている場合、冷却開始までの真空排気時間が加わるため、最少でも24時間要する。また、冷凍機停止から大気開放できる状態になるには、クライオパネルを昇温させてから行う必要があるため約48

時間必要とする。

部品変更や不具合修理のためのイオンエンジンの出し入れごとに真空槽を大気開放すると、上記のように長時間を要し、試験効率を著しく低下させる。そこで従来は、真空槽に門型弁で仕切りを設け、そこにエンジンを設置する格納槽を取り付け、格納槽のみを大気開放する方法を採用してきた。

しかしながら、この方法ではイオンエンジン周りの環境が次の点から問題であった。

- 1) 格納槽の真空度が悪い。すなわち、排気装置を持つ真空槽から離れた位置に門型弁等の小口径部を介してエンジンを取り付けることになり、排気効率が悪くなる。
- 2) 格納槽からのエンジンの汚染がある。すなわち、イオンビームが格納槽壁面等に衝突し、スパッタ物質が発生し、このためエンジンが汚染される。

これらを避ける手段としては、格納槽と門型弁の径を大きくすれば良いが、これは費用および作業性等から容易ではない。

この問題を解決する方法として、イオンエンジンの出し入れの際には格納槽と門型弁を使用するが、試験の際にはイオンエンジンを門型弁を通り抜けて真空槽内まで移動することとし、そのためのイオンエンジン移動取付台（以下、移動取付台と略す）を2期にわたって設計製作した。

本研究では、製作した移動取付台の有効性を明らかにするため、同取付台を使用して格納槽と副真空槽の間でエンジンの位置を変えて、格納槽の圧力と副真空槽の圧力を測定した。イオンエンジンへ供給する推進剤の他に更に推進剤を他の場所から導入することによって副真空槽内の圧力を高くし、イオンエンジン性能の変化を調べた。本報告では、これらの試験方法と結果を述べる。また、移動取付台については、その機能と特徴について記述する。さらに、

2期にわたって製作したなかで、1期製作で軸受部、加工性等の不具合が見い出されたので、2期で改良した点についても報告する。

## 2. イオンエンジンおよび試験装置

### 2.1 試験用真空装置<sup>24)</sup>

イオンエンジン試験用真空装置の概略を図1に示す。装置は主真空槽部、副真空槽部および格納槽部に分けられる。主真空槽部は径が3 m、直胴部分の長さは3 mである。

直胴部上流側（副真空槽側）にクライオパネルが設置されている。クライオパネルの大きさは内面径が2.66 mで、長さは1.0 mである。その表面積は8.36 m<sup>2</sup>となる。このクライオパネルを取り囲むように100 Kに冷却されたシュラウドが配置され、クライオパネルへの熱の侵入を減少させている。さらに、多層膜断熱層（スーパーインシュレーション）がシュラウドへの熱の侵入を減少させている。

移動取付台を使用する場合、イオンエンジンは図1に示すように副真空槽内に設置する。ただし、移動取付台の移動機構部分等はエンジン格納槽の右側に組み付けるが、図では省略した。

軸上の下流側正面では、イオンが衝突するターゲットが他の部分とは電氣的に絶縁して設置してある。

クライオパネルとシュラウドは2台のヘリウム冷凍機からの冷媒ガスの循環によって、それぞれ50 K以下および100 Kに冷却されている。副真空槽シュラウドおよびター

ゲットはフロン冷凍機によって約220 K以下に冷却されている。

キセノン以外のガス排気は、ターゲット裏の鏡板に取り付けた50001/秒の排気能力を持つターボ分子ポンプによって行う。

今回の改良の対象となっている各部の名称および寸法等の概略を図2に示す。副真空槽の大きさは径が1.2 m、長さは0.8 mである。副真空槽には径0.55 mのフランジポート2個ならびにゲージ取付口等が設けてある。副真空槽の中心軸上とこれに直交する軸上には門型弁とイオンエンジン格納槽とが取り付けられている。ここでは識別のため中心軸上格納槽を格納槽A、直交軸上格納槽を格納槽Bと呼ぶ。副真空槽内面（主真空槽側を除いて）を径1.2 mのフロンシュラウドが各フランジポートおよびゲージ取付口等を切り欠いた状態で覆っている。

移動取付台は、格納槽Aに径550 mm規格真空用フランジ（図5参照）とともに組み付けられる。エンジンは真空槽中心軸上を前後する。最も後退した位置が試験の基点位置となる。

### 2.2 供試体イオンエンジン

試験に用いたイオンエンジンを図3に示す。このイオンエンジンは放電室内面にリング状に永久磁石を3環配置したもので、この磁石によって作り出されるとがった形状の磁場にちなんでカスプ磁場型イオンエンジンとよぶ<sup>5)</sup>。

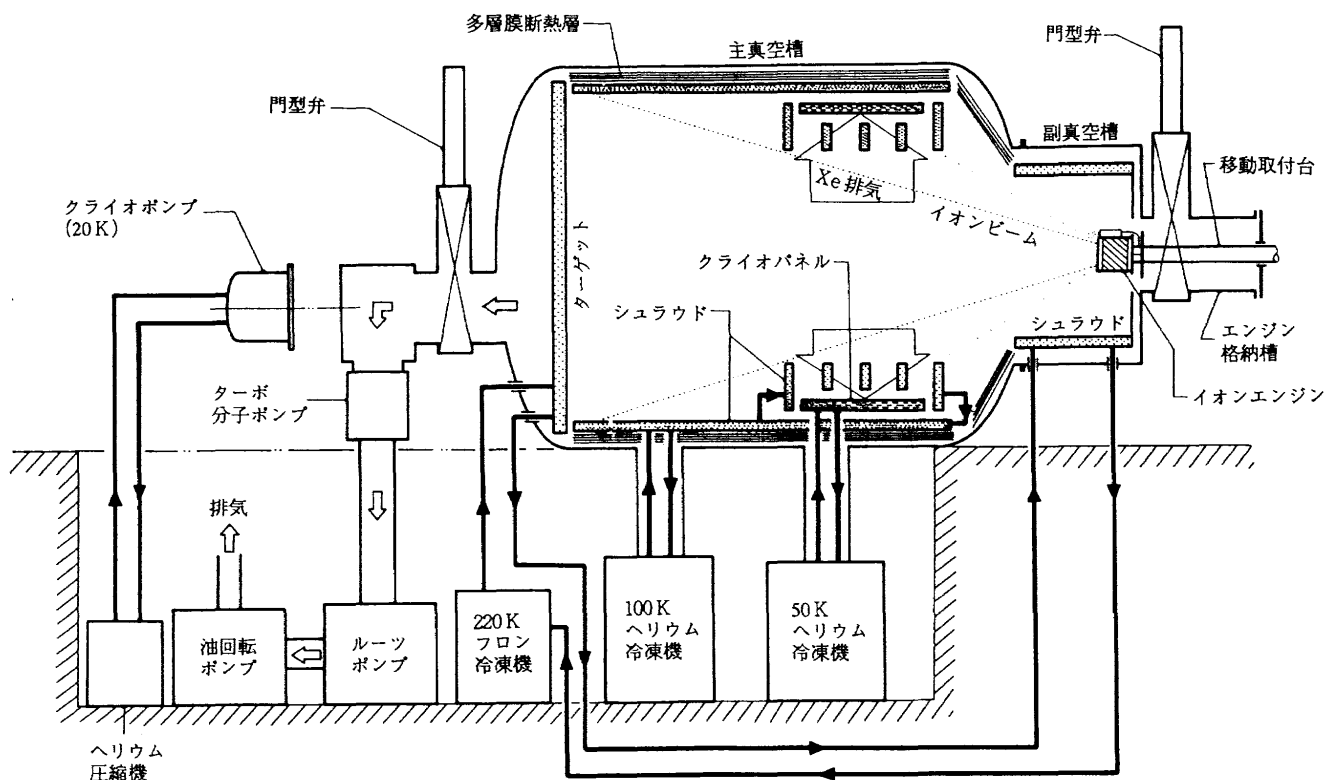


図1 試験装置

この型のイオンエンジンは、従来当グループでも研究してきたカウフマン型イオンエンジン<sup>6)</sup>と比べ高性能を得ることができ、特に大型化した場合はその優位性を増すため研究の対象としている。ちなみに1994年に打ち上げ予定の技術試験衛星VI型 (ETS-VI) に搭載されるイオンエンジンはカウフマン型である<sup>7)</sup>。

イオンエンジンの作動では、放電室の上流側 (推進剤供

給側) にある主陰極 (メインホローカソード) から放出された電子が陽極との電位差で加速され、供給されたキセノン原子を衝突電離し、プラズマを生成する。磁場はこの生成されたプラズマを効率良く閉じ込める働きをする。下流側は、同軸上に多数の穴を持つスクリーン電極と加速電極があり、この両電極が作り出す電場でイオンが穴より抽出加速され、推力が得られる。真空槽内の作動においては、

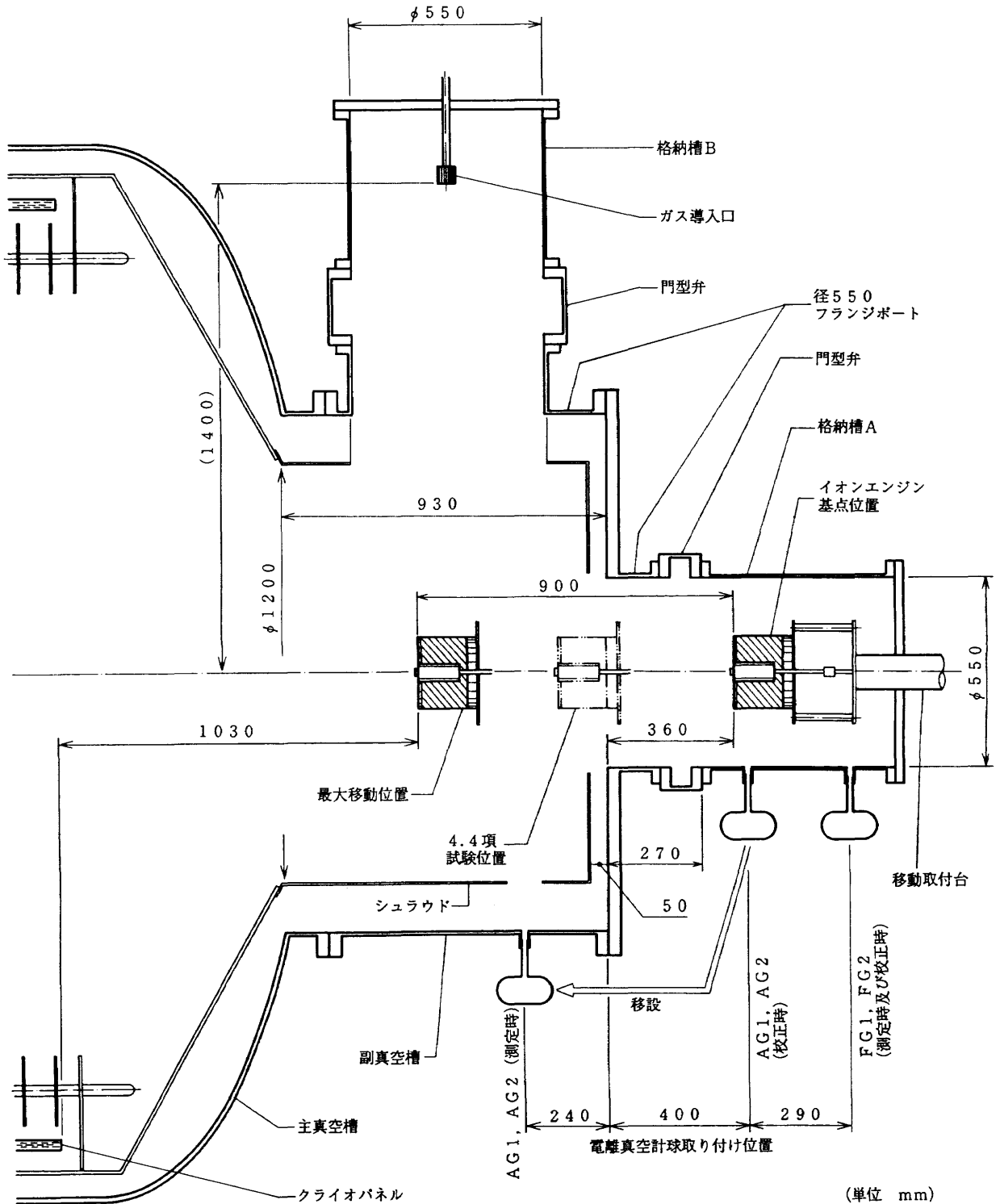


図2 副真空槽と格納槽および電離真空計球との関係

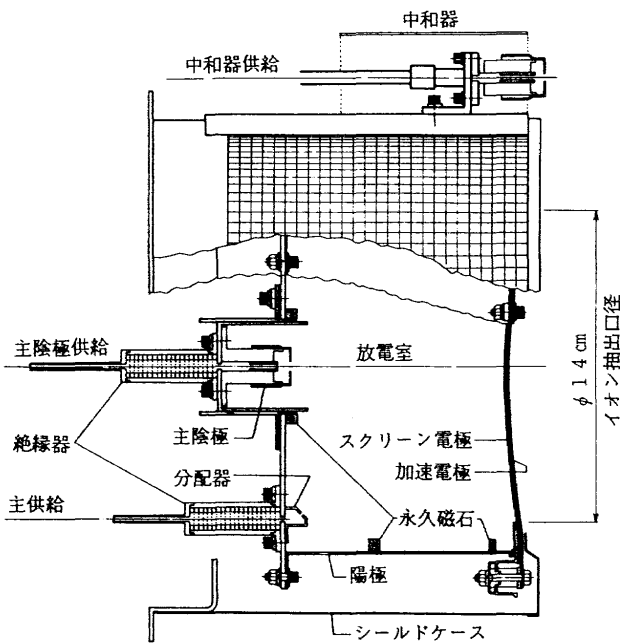


図3 供試体イオンエンジン

加速されたイオンの多くはターゲットに衝突し、再びキセノン原子に戻る。

推進剤供給系は3系統ある。放電室内への供給としては、大部分のキセノンを分配器を通して供給する主供給系および主陰極放電を維持するための主陰極供給系の2系統があり、これらは推力を得るために使用される。もう1系統は中和器系である。

中和器は主陰極とほぼ同一構造で、宇宙空間でイオン抽出するとき同量の電子を出し、衛星の電気的中性を維持する働きをする。地上試験では中和器作動はなくてもイオン抽出は可能であるので、中和器を作動させない場合もある。

イオンエンジンの性能比較は、次式の (1), (2) で定義される推進剤利用効率とイオン生成コストによって行う。

推進剤利用効率  $\eta_p$  (%)

$$= \frac{\text{ビーム電流 (A)}}{\text{推進剤流量 (電流換算) (A)}} \dots\dots\dots(1)$$

イオン生成コスト  $\varepsilon$  (W/A)

$$= \frac{\text{エミッション電流 (A)} \times \text{放電電圧 (V)}}{\text{ビーム電流 (A)}} \dots\dots\dots(2)$$

式中のエミッション電流とは、放電電流 (陽極電流) からビーム電流を減じた値である。

当グループでは、推進剤利用効率を90%とし、このもとでイオン生成コストを小さくすることを目標に性能向上の研究を進めている。

良い性能とは、推進剤利用効率が高く、イオン生成コス

トが小さいことであるが、推進剤利用効率を上げると一般的に放電電圧が上昇するため、推進剤利用効率をむやみに高くすることは好ましくない。それは、放電電圧が高くなるに従い、イオンエネルギーの増大と二価イオンの増加を招くからである。イオンエネルギーの増大は、これにさらされる部分のスパッタを増加させ、エンジンの耐久性に影響する。二価イオンはスパッタを増加させるだけでなく推力にも影響する。放電電圧の上昇は一般に放電電力の増加を伴うため、その熱によって放電室内にある永久磁石の磁力を低下させる可能性がある<sup>8)</sup>。磁力低下は性能低下を招くので絶対に避けなければならない。

### 3. イオンエンジン移動取付台

#### 3.1 その必要性

イオンエンジン移動取付台は、これによりエンジンを副真空槽に移動させることにより、エンジン周辺の真空度の向上とイオンビームが通過する空間の確保をねらったものである。エンジン周辺の真空度の向上は、エンジンの性能と耐久性の高精度な評価のため重要である。イオンビーム通過空間の確保は、イオンビームの壁面への衝突によるスパッタを防ぐために必要である。

イオンエンジンの性能として、推進剤利用効率90%でのイオン生成コストの低下を目標にしている。このためエンジンは通常推進剤利用効率90%の近傍で作動させる。このとき、供給された推進剤の90%はイオンとして抽出加速されターゲットに達するが、残りの10%は原子のまま電極穴から放電室温度程度の熱エネルギーを持って漂い出る。

従来のイオンエンジンの取り付け方法を図4に示す。エンジンを設置する格納槽は副真空槽部に径0.55mの円型弁とフランジポートを介して接続されている。副真空槽部は高真空であるにもかかわらず、比較的口径が小さくかつ長さのある格納槽部分の真空度は悪くなって、イオンエンジン周辺部にはキセノンがより多く存在する。このキセノンの一部が放電室内 (図3を参照) に逆流し、これがイオンとなって抽出加速される。このため見かけ上推進剤を余分に供給することになり、性能評価へ影響する。推進剤利用効率が下がればこの状況は更に悪化する。

抽出加速された高速イオンがエンジン周辺を漂う原子の近傍 (原子レベル) を通過すると、電荷交換が発生する。その結果、高速度原子と低速度イオンが生まれる。この低速度のイオンは加速電極の負の電位に引かれ、加速電極に衝突する。この時加速電極はスパッタにより損耗を受け、電極の寿命は短くなる。

また、加速されたイオンには拡がりがあるので、格納槽部の径が小さいと格納槽部内壁にビームが衝突し、壁面をスパッタする。このスパッタ物質がイオンエンジンを汚染し、絶縁破壊や放熱機構の劣化等の原因となる。壁面に衝

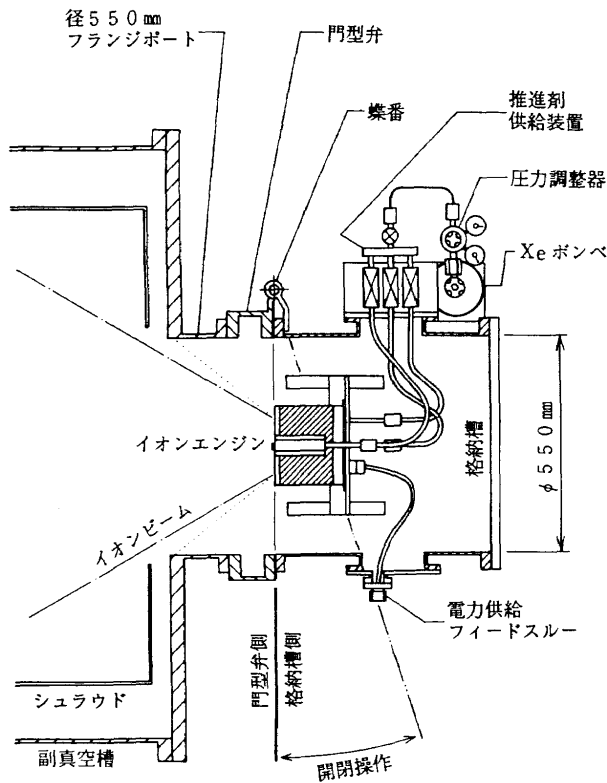


図4 従来のイオンエンジン取り付け方法

突したイオンはキセノン原子の発生となり、エンジン周辺に漂うキセノンを増加させる。

このように、イオンエンジンを従来より使用中の格納槽内に設置して試験を続行することは問題が多いことが分かる。また、大型イオンエンジンの試験では、推進剤の流量は推力に比例して増加するので、更に状況が悪くなる。

この解決策としては、次が考えられる。

- 1) イオンエンジンを直接副真空槽内に設置する。
- 2) 門型弁と副真空槽フランジポートの径を大きくする。
- 3) 従来の格納槽を利用して、格納槽の真空排気後にイオンエンジンを副真空槽内に移動する。

以上について検討し、3) が最も実現可能な策であると判定した。

1) については、まえがきに述べたようにクライオパネルは極低温で作動するため冷却、昇温に長時間必要するため問題がある。真空槽内へ水分が侵入すると、クライオパネルが作動可能な圧力まで排気するのに更に時間を消費せねばならない。よって試験効率が甚だ悪くなり、この策は考えられない。2) については、門型弁と副真空槽のフランジポートを改修すると相当重量が増すので、重量を支えるための対策を必要とする。この対策は作業性や空間確保に障害となる。しかも改修費用が甚だ高額となるため、この策も好ましくない。

### 3.2 設計条件

イオンエンジンを作動させるには、スラスト各部に電力を供給する電力供給系、推進剤を必要流量供給する推進剤供給系、電圧・温度等を計測する計測系が必要となる。これらを大気側から真空側へと導入した状態で、イオンエンジンを副真空槽内に移動させなくてはならない。このため種々の工夫がいる。

推進剤供給系は、漏れを生じさせないため取付台本体と一体構造として、できる限り分離を必要としない構造とする。漏れは陰極（主陰極と中和器陰極）の劣化と推進剤流量測定の精度に関わるので有ってはならない。供給系を分離すると、その度ごとに漏れが無いことを確認する必要がある。漏れの有無の確認はヘリウムリーク試験で行っているが、ヘリウムリーク試験はかなり高度な作業と時間を要する試験であるので、頻繁に行うことは避けたい。陰極の劣化は、推進剤中への大気（特に酸素の）混入によって生じ、結果としてエンジンの作動を不可能にする。

構造的には管構造を採用し、エンジンに接続すべき電力供給と計測の配線および推進剤供給の配管をこの管構造内に納めることで一体化を図る。大型イオンエンジンの重量は約10kgであり、これを約1m移動できるような構造強度を考慮する必要がある。移動は直線運動であり、作業性を考えて全体を台車に乗せると、片持ち構造となってモーメント荷重を支える工夫がいる。直線運動構造の真空シールとしてペローズシールを使用すれば漏れを完全に無くすることができるが、ペローズシールは甚だ価格が高いため、Oリングシールを採用する。Oリングでも停止中は高いシール性能が有るので、イオンエンジン移動中の漏れを最小限にする工夫をすれば使用可能である。

### 3.3 設計と製作

設計条件を満たす移動取付台の設計と製作を2期にわたって行った。1期製作も基本的に使用できる結果であったが、いくつか問題も残されたので、2期製作では問題点を修正してより完璧なものにした。2期製作移動取付台の概略図を図5に示す。また、移動取付台にイオンエンジンを取り付けられた状態の写真を図6に示す。1期の移動取付台を用いて格納槽に組み付けた状態の外観写真を図7に、イオンエンジンが副真空槽内に移動された状態を図8に示す。図8は格納槽Bの反対側の観察窓から撮影した写真で格納槽B内のイオンエンジンも同時に写してある（後述図14参照）。

エンジン移動取付台は、ガイド管や配線室などの移動部分および中間室やフランジなどの固定部分で構成される。エンジン作動時には、径550規格フランジがエンジン格納槽に接続される。格納槽の真空排気に伴って、ガイド管と配線室内部も排気される

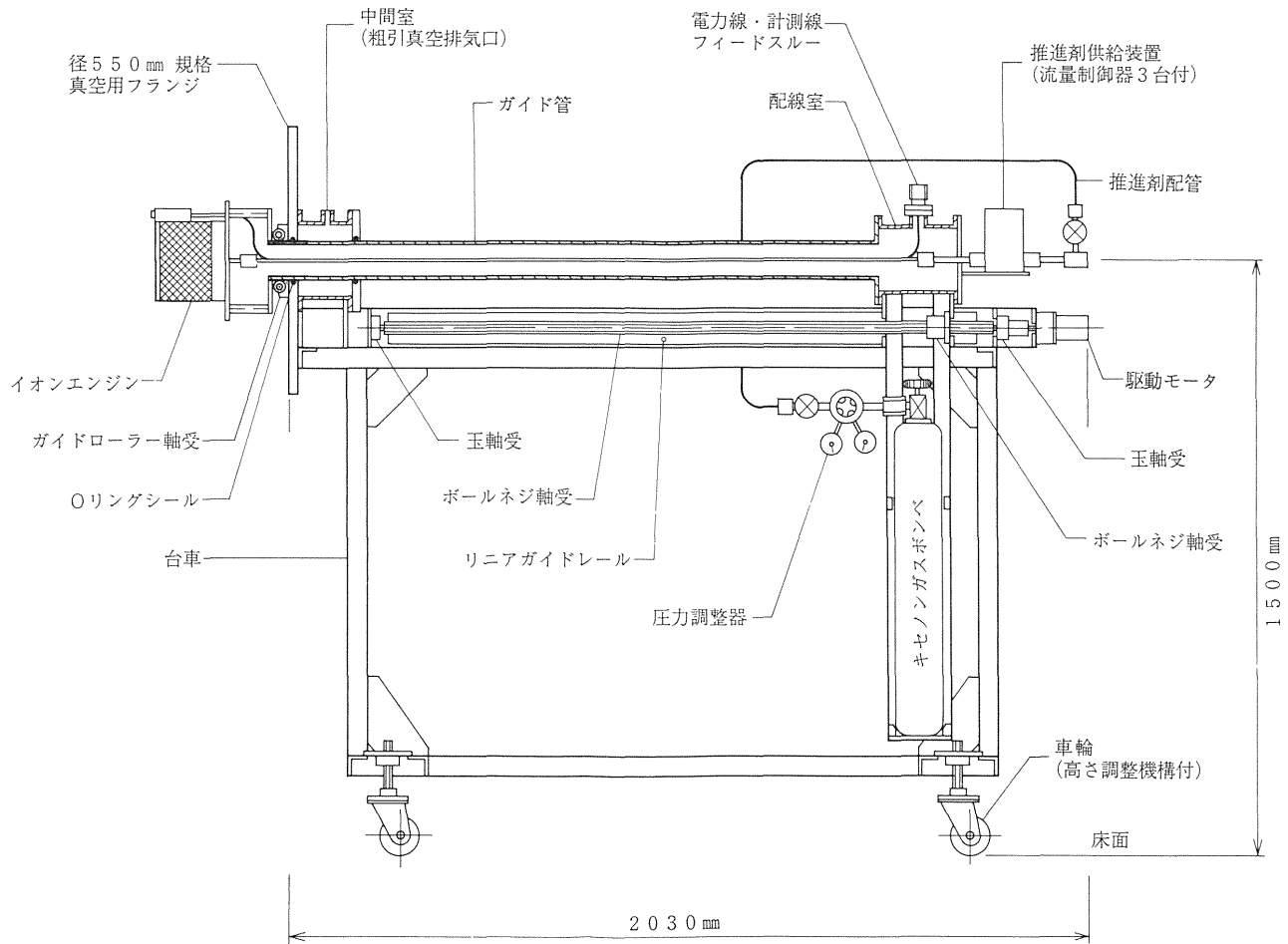


図5 イオンエンジン移動取付台の概略

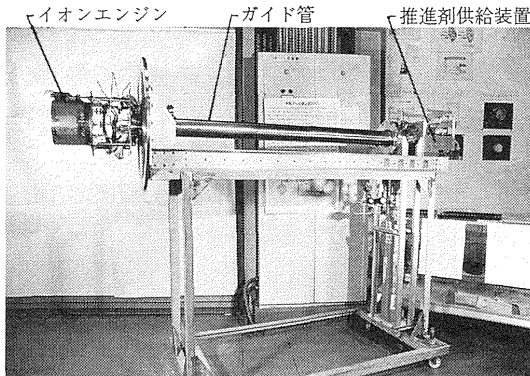


図6 移動取付台の写真1 (イオンエンジン取り付け状態)

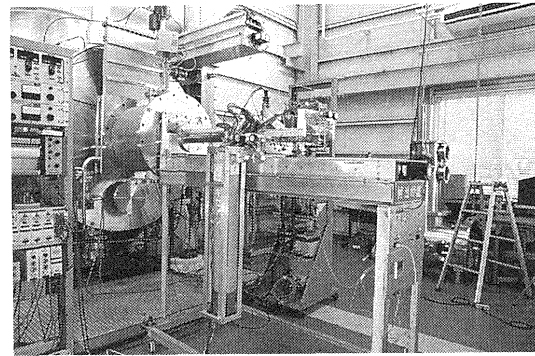


図7 移動取付台の写真2 (格納槽に組み付けた状態)

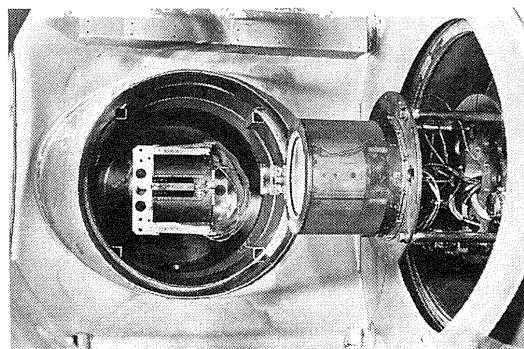


図8 移動取付台の写真3 (副真空槽内に移動させた状態)



直線運動は2本のリニアガイドレールと放射状に配置したガイドローラー軸受で受持ち、ガイド管がこれによって案内される。ガイド管の材料は防錆ならびに気体透過性からステンレス鋼以外を用いることはできない。ステンレス鋼の材料硬度は高くないので、モーメント荷重をガイドローラー軸受に接している部分で受けるため、圧痕が心配されるが、直線運動をさせると面状痕となるため問題はないと判断した。

駆動はボールネジ軸と小型モータで行う。駆動力は、断面積が約78cm<sup>2</sup>のガイド管に働く760Nの大气圧に移動の際に生じる摩擦抵抗を加えて、約1000Nあれば十分とした。ガイド管と径550規格フランジとの間の真空シールは運動用Oリングを使用した。Oリングのシール性能は回転運動では高いが直線運動では低くなるため、2段シールを取り更に中間室を設けた。この中間室を真空引きすることによって、高真空側への漏れを最小限にしている。ガイド管の先端（高真空側）にエンジン取付板とコネクタ類を設け、後端には電力用配線と計測用配線のコネクタを取り付ける配線室を設けた。配線室の脚がリニアガイドレールの軸受機構部に取り付けてある。脚は更にキセノンポンペを載せる台としても使用される。

推進剤供給系は主供給、主陰極供給、中和器供給の3系統必要とする。流量制御器（マスフローコントローラ）3台とそれに付属する配管およびバルブを推進剤供給装置として一体構造とし、配線室に取り付ける。キセノンポンペは脚に載せて、圧力調整器を取り付け推進剤供給装置に配管する。これによって供給系全体がガイド管とともに移動されるためガスポンペの交換時以外では分離する必要はない。分離できる部分の接続はすべてOリング継手構造とし漏れを無くしている。ここで使用している圧力調整器はヘリウムリーク試験をした特別品で、特にポンペと接続する口金部はOリング構造に改造して漏れを無くしている。このOリングはポンペ交換ごとに交換する。

電力供給系と計測系は従来から使用しているハーメチックシークコネクタをそのまま使用できる構造とし、配線室にICF70のフランジポートを設けた。

以上の装置を台車上に載せた。実際の試験では作業容易な位置まで移動取付台全体を移動し、イオンエンジンを取り付けた後に格納槽に合体し（図7を参照）、門型弁に取り付けられている真空排気装置で排気を行い、門型弁を開いた後に、エンジンを移動（図8を参照）させる操作をする。

### 3.4 1期と2期の設計変更点

1期設計の移動取付台はいくつか問題点が発見されたので、2期設計ではこれを改良するため次のような変更を行った。

1) ベース取付を溝構造とした。このベースはガイドローラー軸受を取り付けるもので、ガイド管の荷重が直接作用する。1期製作ではベースをフランジ平面上にボルトの締め付け力のみで固定させた。そのため、ベースは台車移動中の振動荷重によって動いてしまうことが判明した。この解決策として第2期製作ではフランジ上に溝を設け、ベースをはめ込む構造とした。

2) ガイド管径を1期では、JIS規格のミリメートル系列のOリング規格から管径を100mmとしたが、それに合致するJIS規格管では機械加工が多少困難であるとの指摘を受けたので、2期ではJIS規格のインチ系列のOリングを使用することにした。これによってガイド管径を細くすることができ、加工を容易にした。

3) 推進剤配管の継手をすべてOリング継手とした。

4) 全体を軽量かつコンパクトにした。

次のような点の改良を考慮する必要があるが、今回の製作には反映できなかった。それは、推進剤供給装置等に使用している手動小型弁は対外気との漏れ（外部漏れ）は漏れ試験済み品なので問題ないが、弁座シールが度重なる開閉によって変形したもようでシールが僅かではあるが不完全となっている。このため、この状況が発生することを予測した設計が必要とされる。

## 4. 試験と結果

### 4.1 電離真空計の校正

今回の試験で真空槽内圧力を計測するために4個のB-A型電離真空計球を用いた。電離真空計の指示値の絶対値には各真空計間に誤差があることが予想されたので、真空計球と制御器の4組に対し校正を行った。校正の際の状況は図2に示す。用いた電離真空計は、日電アネルバ製2組（MIG-821）と富士精密製2組（FLIG-104B）である。アネルバ製の電離真空計をAG1、AG2とし、もう一方をFG1、FG2とした。

上記4個の電離真空計球を格納槽Aに取り付け圧力が一定となるようにした。真空槽内圧力を上昇させるためのガスは、格納槽B内に設けたガス導入口より導入した。導入流量の制御はキセノンガスで校正されている流量制御器で行った。導入流量を変更した時には電離真空計出力を記録計に出力させて監視し、圧力が一定となったことを確認した。また、電離真空計球はフィラメントの熱等によって吸着ガスの放出が起り、指示圧力が変化する。ここでも計測に入る前に記録計で圧力が一定となるまで長時間点灯放置した。

試験結果から、全ての電離真空計の出力は導入流量に対して直線的に上昇しているので各真空計の直線性の点では問題はないことが確認できた。しかし、その傾きがすべて異なっていたので電離真空計球のどれかを基準にして補正

する必要が生じた。

補正の基準として購入時期が最も新しい真空計AG1を用いた。真空計AG1の出力を基準として各真空計の出力を図9に示す。この図より補正係数を求めた。求めた各補正係数を図中に示す。各真空計の出力にこの補正係数をかけると、全てAG1で測定した場合の圧力に換算される。

各電離真空計の測定値は窒素を基準とした値である。ここで計測する圧力はキセノンを対象としているが、相対値を主として議論をするのでそのままの値を使用した。

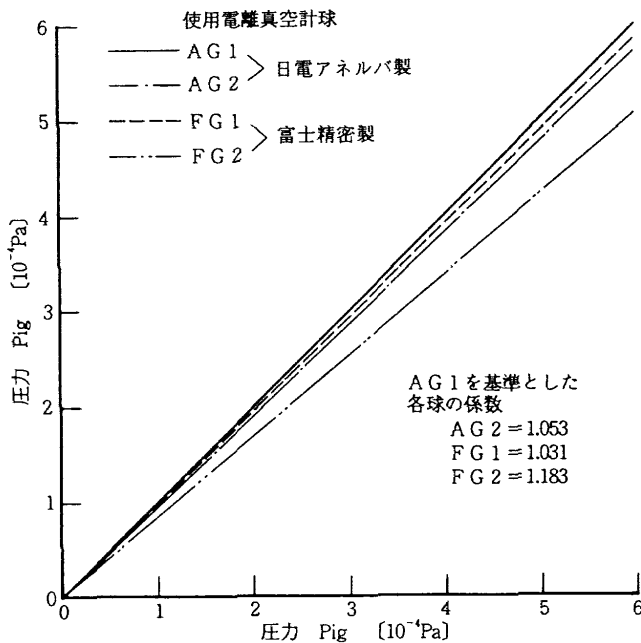


図9 電離真空計の校正試験結果

#### 4.2 試験方法

各試験において、格納槽Aの圧力測定はFG1とFG2とで行い、副真空槽の圧力測定はAG1とAG2とで行った。しかし、圧力計測中に電離真空計球AG2の作動に不安定が生じたため、副真空槽の圧力計測はAG1のみで行った。AG2の値は参考とした。キセノン流量の変更やエンジン位置の変更時には、圧力が安定するのに少々時間を要する。そこで圧力計測は、校正の時と同様に電離真空計出力を記録計に出力させて値が一定となったことをその都度確認した後に行った。

放電室への推進剤供給において定格流量とは、推進剤利用効率90%、ビーム電圧1kVのもとで、イオンエンジンの推力(理論値)として25mNを得るに必要な流量と定義し、電流換算値で531mA相当(標準状態で7.8cm<sup>3</sup>/分)となる。通常、主供給へ90%(478mA相当)、主陰極供給へ10%(53mA相当)の流量比で供給する。中和器供給の定格は50mA相当とする。定格全流量の値は、これらの流量の和で581mA相当(8.54cm<sup>3</sup>/分)となる。電流換算値はキセノンが全て一価のイオンに電離するとした値である。推進剤供給量の制御と測定には、キセノンで校正した3台の流量制御器を使用した。

イオンエンジンの移動距離は、エンジンを最も引き出した(上流側)時のエンジン加速電極面の位置を基点位置0cmとし、これから副真空槽内側(クライオパネルに接近)方向に移動する距離で示す(図2)。最大90cm移動できる。イオンエンジンが基点位置にあるとき、その加速電極面は副真空槽フランジポート取り付け面(下流側)から36cm上流側となる。

#### 4.3 エンジン非作動時のエンジンの位置による圧力の変化

イオンエンジンを全く作動させずに各供給系を通して定格全流量581mA相当(8.54cm<sup>3</sup>/分)を与えて、イオンエンジンの位置を変えて圧力の変化を計測した。

その結果をエンジン位置と圧力の関係で図10に示す。横軸はエンジンの移動距離で値が大きい方がクライオパネルに接近する。縦軸は圧力である。

格納槽内の圧力はエンジンが副真空槽フランジポート取り付け面より格納槽内側に移動すると急激に上昇している。これは断面積が小さくなったことによる圧力の上昇で、明らかに気体発生源(エンジン)と排気部(クライオパネル)の間のコンダクタンスが小さくなった影響であることがわかる。

副真空槽の圧力はクライオパネルに接近するに従ってなだらかに低下する。イオンエンジンがフランジポート取り付け面を過ぎた後はほぼ直線的に低下しているのは、ここでもコンダクタンスの影響があるためと思われる。圧力は

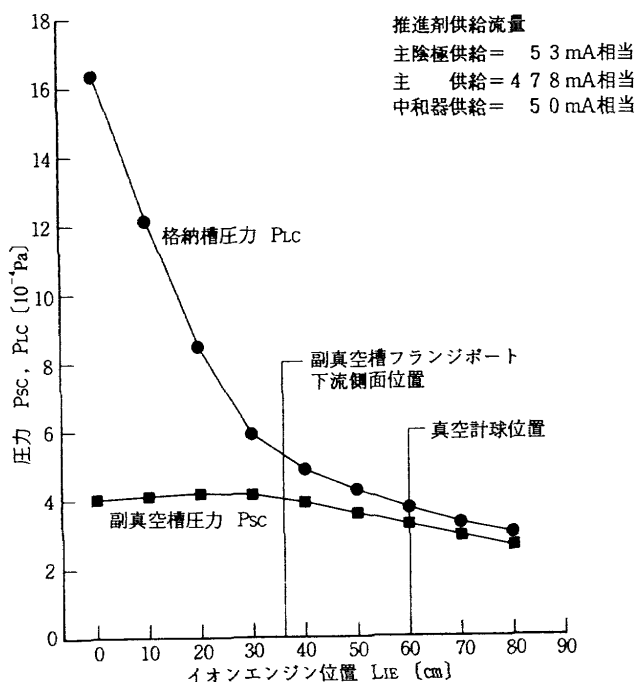


図10 エンジン位置の変化に対する真空槽圧力の変化(エンジン非作動時)

僅かにピークを持っている。これは、エンジンから放出され、直接に副真空槽真空計部分に達するキセノン量が最も多くなる位置に対応していると考えられる。これより前方（ターゲット方向）では、エンジンからの放出キセノンの多くはターゲット側に直接噴射され、これより後方（格納槽側）は、エンジンからの放出キセノンは内径の小さい格納槽のため直接真空計部には達し難い。

#### 4.4 イオン抽出時のエンジン位置による圧力の変化

イオンエンジンに4.3項と同様に定格全流量を与えてイオン抽出加速を行いつつ、イオンエンジンの位置を変えて圧力の変化とエンジン作動パラメタの変化を測定した。

試験開始時にビーム電流が478mA（推進剤利用効率90%）となるように放電電流を調整しながら、安定状態になるまで放置した。試験中は放電電流は一定とした。また、圧力はターゲットへのイオン衝突による脱ガスのため変わるので、安定したのを確認してから測定を行った。

試験においてエンジン位置の移動は、エンジン移動取付台を引き出す方向、すなわちターゲット面からエンジンが離れる方向にとった。これは、ガイド管のシール面からの漏れを最少にでき、イオンエンジンに悪影響を及ぼさないための配慮からである。しかし、この移動方法では、加速されたイオンに拡がりがあるためエンジンの移動とともにイオンが新たな壁面に衝突し、壁面に吸着されていた気体をたたき出し、真空槽内の圧力が上昇する。この影響を除くためにも、エンジンの各位置での圧力測定は、圧力が十分安定するのを待って行った。

その結果をエンジン位置と圧力および加速電極電流の関係で図11に示す。

格納槽と副真空槽の圧力はエンジン非作動時の圧力（図10）に比較して全体に低くなっている。これは、キセノンがイオンとして加速抽出され下流側に運ばれ、ターゲットや100 K シュラウド等に衝突しそこで原子に戻るため、キセノンの発生場所が実効的にターゲット側に移ったことによるものである。

格納槽の圧力変化は、エンジン非作動時（4.2項）にみられるような格納槽と副真空槽という径の違いによる明確な変化は現われていない。副真空槽の圧力変化はほぼ一直線で低下しており、ピークは見られない。

イオンエンジン周囲の圧力上昇による推進剤の放電室への逆流が多い場合には、放電電圧ならびにビーム電流はこの影響を受ける。しかしながら、本実験での圧力上昇の範囲ではこの影響は全く認められない。よって、2.2項、式(1)、(2)より性能への影響も全くない。

加速電極電流は圧力の上昇に伴い、僅かであるが緩やかに増加している。最大値と最小値での増加比率は約7.8%である。加速電極寿命の長短は加速電極電流の大小で決ま

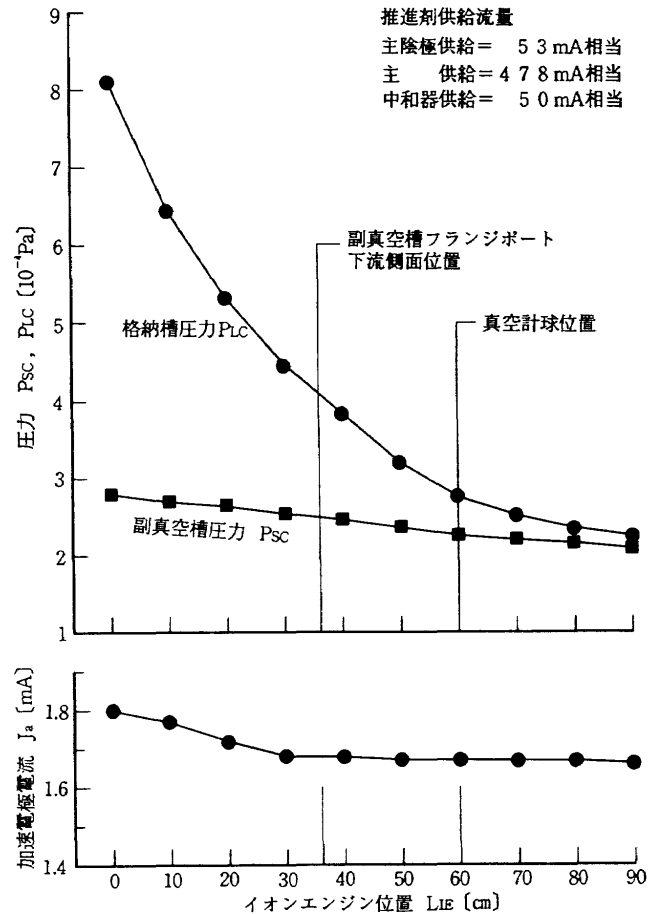


図11 エンジン位置の変化対真空槽圧力および加速電極電流の変化（エンジン作動時）

る。宇宙でのイオンエンジンの作動に比較して加速電極電流が多いと電極寿命を過小評価するので、加速電極電流は当然少ない方が良い。

#### 4.5 加速時イオンエンジンから漂い出る流量を与えた時の圧力変化

エンジン作動を行わずに主陰極と中和器に定格時に供給される流量103mA相当（ $1.52\text{cm}^3/\text{分}$ ）を与えて圧力を測定した。この供給流量は、エンジン作動時にキセノン原子としてエンジンから放出される流量に等しい。すなわち、推進剤利用効率を90%とした場合、キセノンの90%はイオンとして抽出加速されてターゲット方向に運ばれ、残り10%は電極穴から漂い出る。また、中和器供給キセノンはほとんど電離されない。そこで、定格流量531mA相当（ $7.8\text{cm}^3/\text{分}$ ）の10%の53mA相当（ $0.78\text{cm}^3/\text{分}$ ）と中和器流量の50mA相当（ $0.74\text{cm}^3/\text{分}$ ）を加えて、全流量103mA相当のキセノンがエンジン周りへ出ると考えられる。

結果をエンジン位置と圧力の関係で、エンジンの定格作動時の結果（4.4項）とともに図12に示す。

エンジン定格作動時と比較して、格納槽と副真空槽の圧力はそれぞれ低い値となっているが、エンジン位置の変化に対する圧力変化は類似している。すなわち、エンジン定

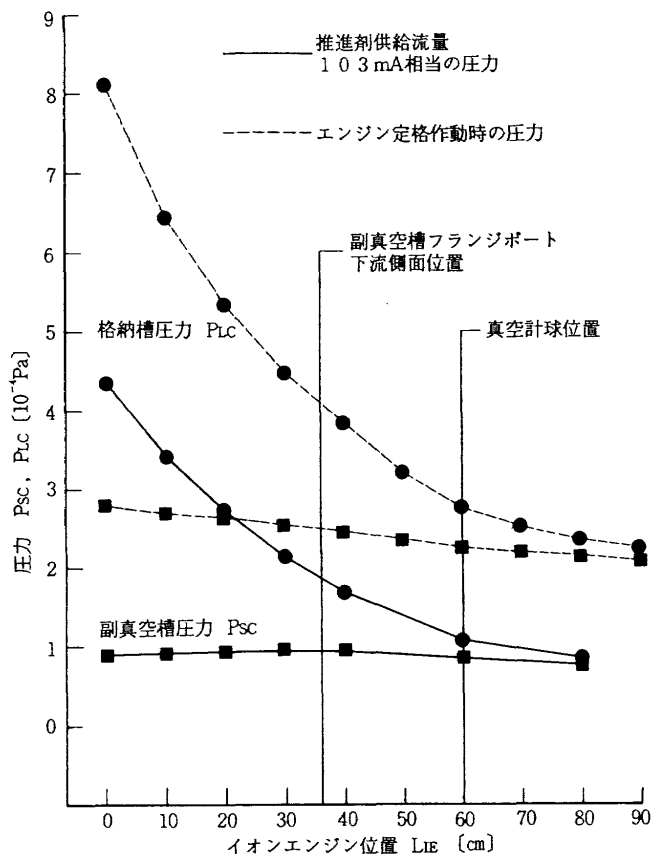


図12 エンジン位置の変化に対する真空槽圧力の変化 (エンジン非作動時, 推進剤流量 103mA相当)

格作動時の圧力は、エンジンから漂い出るキセノン原子による圧力とイオンビームとしてターゲットに移動してここで原子となるキセノンによる圧力の和と考えられ、前者はエンジン位置の影響を強く受けるが後者はほぼ一定となっている。このためエンジン定格作動時の圧力変化との上記類似性が生じるものと考えられる。

エンジン定格作動時と比較して圧力が低い主要な理由は、イオン加速時では抽出加速されたイオンは、壁に衝突後にキセノン原子となって副真空槽に逆流してくるけれども、本項の試験ではこの逆流がないことである。この他に次の理由が考えられる。抽出加速されたイオンの中には実際には二価イオンが存在しているが、ビーム電流は全て一価イオンのみとして推進剤利用効率を算出しているため、実際の推進剤利用効率は90%以下となっている。また抽出加速されたイオンは拡がりをもっているため副真空槽やフランジポートの壁にイオンが衝突し、ここで原子に戻る。

別個にみると、格納槽の圧力変化は、格納槽と副真空槽という径の違いによる明確な変化は現われていない。これは、エンジン定格作動時と同様である。副真空槽の圧力変化の形状は僅かではあるが異なっている。この形状は図11よりもむしろ図10と類似しているが、ピークの位置がクライオパネル側にずれている。

#### 4.6 ビーム抽出中に更にキセノンを導入した時の圧力

ここでは、イオンエンジンに定格全流量を与えてビーム抽出しているところに、格納槽B内に更にキセノンを追加導入し、圧力とイオンエンジン性能の関係を試験した。この時のエンジンの位置は、試験4.5項で加速電極電流にほとんど影響が無くなる位置として、基点からターゲット側に50cm移動し、フランジポート取り付け面から下流側に14cm出た位置とした (図2参照)。

結果を圧力対エンジン性能の関係として図13に示す。横軸の圧力は副真空槽内の値である。

加速電極電流は圧力上昇に伴って1次関数的に上昇する。圧力を0に外挿すると加速電極電流は1.63mAとなる。追加導入キセノンのない通常の作動では、加速電極電流は1.68mAであるから、圧力の0の時との差は3%となり、十分高精度で加速電極電流を測定していることがわかる。

圧力が $10 \times 10^{-4}$ Pa以下では、放電電圧 (30.0 V) は変化しない。それ以上の圧力では圧力上昇とともに徐々に低下する。なお、 $10 \times 10^{-4}$ Paの圧力に対応する推進剤の追加導入量は500mA相当である。また、ビーム電流については試験圧力内では変化が見られない。

ここで、イオンエンジンの2台同時作動が可能であるか調べる。図13より、定格全流量581mA相当を追加導入した時の圧力を見積ると $11.5 \times 10^{-4}$ Paとなる。放電電圧は僅かに影響されて29.8Vに低下する。ここで4.3項 (図10)、4.4項 (図11)の結果から、イオン加速時ではエンジン非作動時に比べ圧力は低下することが明らかになっているので、2台ともイオン加速状態であれば放電電圧への影響は更に小さくなる。よって、2台のイオンエンジンを同時に作動させることが可能であることがわかる。しかしながら、一方のイオン加速が停止すると、わずかながら性能に影響が出ることで、加速電極電流が1.93mA程度に増加すること

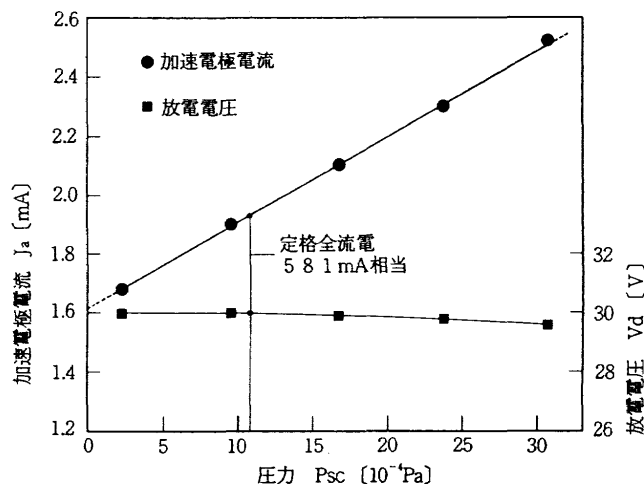


図13 真空槽内圧力の変化に対するエンジン性能の変化

を考慮する必要がある。

### 5. イオンエンジン移動取付台の有効利用

移動取付台はエンジン周りの環境を良好にすること以外にも、取付台が2台あることで長時間試験と他の試験を交互に効率良く進められる。

イオンエンジンの重要な用途として大型静止衛星の位置保持用スラストがある。イオンエンジンの比推力は極めて高いため推進剤消費量が小さく、衛星の運用期間を大幅に延ばすことができる。ところが、イオンエンジンは小推力であるため長時間の作動が必要となる。長時間の作動では構成部品の損耗（寿命）が問題となるためイオンエンジンの長寿命化を目指す寿命評価試験を欠かすことができない<sup>9),10)</sup>。

寿命評価試験を例えば5000時間実施すると、単純に24時間で割ると209日必要である。ところが、当所は電力供給停止日数が多い、最少人員での研究活動等で中断を余儀なくされることから、実際には一年では達成できない。また、寿命試験期間中のイオンエンジンは大気暴露を避ける必要から非作動時においても真空保持することが望ましいので、格納槽内に取り付けたままが最も良い。これでは試験装置を占有することになって、従来の格納槽にイオンエンジンを設置する方法では、他の開発試験等は実行不可能となって甚だ試験効率が悪い。

2台の移動取付台を用いてこれを解決する方法が考えられる。その概略を図14に示す。格納槽Aには性能試験に供するイオンエンジンを取り付け、格納槽Bには寿命評価用イオンエンジンを取り付けて、交互に副真空槽内に移動し作動させる。寿命評価試験を中断する時は、イオンエン

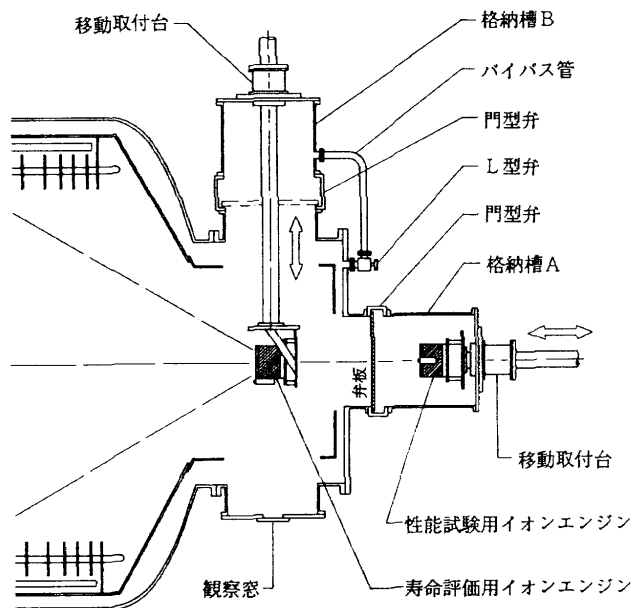


図14 2台の移動取付台を使用しての試験の効率化

ジンを格納槽B内に収納し、門型弁を閉にする。この操作は、性能試験をしているイオンエンジンからのスパッタ物質等の汚染から寿命評価用エンジンを保護するためである。格納槽Bと副真空槽とをバイパス管で接続することで格納槽Bの真空維持が可能となる。

また、格納槽AとBに性能試験用イオンエンジンを取り付けて交互試験をすることも可能である。特に一方のイオンエンジンを取り出してエンジン部品交換等を行っている間にもう一方の試験をすると効率的である。

移動取付台の使用により大型イオンエンジンの作動試験も可能となった。現在研究中の大型イオンエンジンはビーム抽出口径30cmで、推力は150mNである<sup>11),12)</sup>。推力の大きさと推進剤供給量は比例関係にあるので、推進剤供給流量は大きく、従来の方法ではエンジン周りの圧力は相当悪いと思われる。移動取付台により性能はほとんど影響を及ぼすことのない圧力範囲で試験できるようになった。

### 6. まとめ

今回の試験結果を次のようにまとめることができる。

- 1) イオンエンジンを副真空槽内まで移動することで、従来の格納槽内設置に比べ、エンジン周りの圧力を1/2～1/3と低く改善できることを確かめた。
- 2) 従来の格納槽内設置に比べ、加速電極電流は減少し、エンジン耐久試験における加速電極の耐久性評価の精度を向上させることができた。
- 3) イオン抽出加速中の性能には、従来の格納槽内設置でもほとんど影響が無いことが判明した。(しかしながら、エンジンの汚染等も考えると副真空槽での作動が望ましい。)
- 4) エンジン供給キセノン以外にキセノンガスを追加導入し、圧力と加速電極電流の関係を得た。この結果から、通常のエンジン作動においては、加速電極電流の測定は十分高い精度を持つことがわかった。
- 5) 同様の結果から、2台のイオンエンジン性能試験を同時に行っても問題ないこと、および大型イオンエンジン試験を行うことができる環境であることが確かめられた。
- 6) 2台のイオンエンジン移動取付台を使用することで、2つの試験を交互に効率よく行うことが可能となった。
- 7) 2期にわたるイオンエンジン移動取付台の設計製作により、その手法を確立した。

イオンエンジン試験では比較的大流量の推進剤導入下で高真空を必要とするため試験用真空装置は大型化する。現在、推進剤として使用されているキセノンを排気するにはクライオパネルを持つ真空装置以外は実用的ではない。この真空装置を効率的でかつその能力を十分に発揮させるには移動取付台が非常に有効である。

今回製作したイオンエンジン移動取付台はその目的に沿うものであることが確認された<sup>13)</sup>。また、この移動取付台は僅かな設計変更で、当所に限らず他の研究装置においても活用できるものである。

## 7. 参考文献

- 1) 北村正治, 斎藤紀男, 中村嘉宏, 東久雄: 長寿命大型静止衛星の南北位置保持用イオンエンジン, 日本航空宇宙学会誌第33巻, pp.100-107, 1985。
- 2) キセノンイオンエンジン試験用真空装置, 航技研ニュース, 1987-10, No.342。
- 3) Kitamura, S., Miyazaki, K., Hayakawa, Y. and Nakamura, Y. :Vacuum Facility for Xenon Ion Thruster Testing, Proc. of 16th ISTS, pp.95-100, 1988.
- 4) Kitamura, S., Miyazaki, K., Hayakawa, Y. and Nakamura, Y. :Xenon Ion Thruster Test Facility-Design and Operation, DGLR/AIAA/JSASS IEPC Paper 88-60, 1988.
- 5) Hayakawa, Y., Miyazaki, K. and Kitamura, S. : Performance Test of a 14 cm Xenon Ion Thruster, AIAA Paper 92-3147, 1992.
- 6) 宮崎勝弘, 早川幸男, 北村正治: 12cmカウフマン型キセノンイオンエンジンの実験的研究, 航空宇宙技術研究所報告1099号, 1991。
- 7) Shimada, S., et al. :Ion Engine System Development of ETS-VI, DGLA/AIAA/JSASS IEPC Paper 91-145, 1991.
- 8) カサブ磁場型イオンエンジンの基礎研究, 航空宇宙技術研究所/東芝共同研究成果報告書, 昭和61年度, pp.86-96, 1987。
- 9) Kitamura, S., Miyazaki, K. and Hayakawa, Y. :1000 Hour Test of a 14cm Diameter Xenon Ion Thruster, AIAA Paper 90-2543, 1990.
- 10) Kitamura, S., Miyazaki, K. and Hayakawa, Y. :Cyclic Test of a 14cm Diameter Xenon Ion Thruster, AIAA Paper 92-3146, 1992.
- 11) Yoshida, H., et al. :Investigation on a Primary Xenon Ion Thruster, IAF-90-229, 1990.
- 12) 宮崎勝弘 他: 30cmキセノンイオンエンジンの性能特性, 第36回宇宙科学技術連合講演会前刷集, pp.83-84, 1992。
- 13) 大型イオンエンジンの予備試作研究 (NASDA筑波研究センターにおける作動試験), 航技研ニュース, 1990-3, No.371。

---

## 航空宇宙技術研究所報告 1198号

平成5年4月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話三鷹 (0422) 47-5911 (大代表) 〒182  
印刷所 株式会社 セイコー社  
東京都調布市西つつじヶ丘1丁目5番地15

---