

「きく6号」イオンエンジン用の試験装置

梶原堅一（有人宇宙システム(株)）、杵淵紀世志（(独)宇宙航空研究開発機構）

1. はじめに

現在、電気推進による軌道変換の研究が進められている。推進機がどのような方式を採用されるかにかかわらず、最終的には宇宙空間を模擬した環境下での作動試験が必要となってくる。即ち、推進機を試験する設備が必要となる。

推進機そのものを研究する機会は少なくはないが、その推進機の試験装置を整備する機会はそれほど多くない。現在、日本国内にある宇宙機搭載用のイオンエンジンを作動させることが可能な試験設備は（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）調布航空宇宙センターと相模原キャンパスの2箇所であるが、これに加え、既に休止した試験装置が筑波宇宙センターにも設置されていた。

これは平成4年（1994年）打ち上げられた「きく6号」（技術試験衛星VI型（ETS-VI））に搭載されたイオンエンジンの作動寿命確認を主目的として整備されたものであった。当時、イオンエンジンは実用化の手前で、所謂、信頼性の確保は手探り状態で進めていた。

今後、現在の電気推進研究進捗に伴い、本格的な試験設備の整備が必要と思われるので、その当時の経験をお伝えしたい。

2. 「きく6号」とイオンエンジン

1980年代半ば、衛星通信・放送利用の伸びとともに、ペイロード搭載能力の増加が求められた。衛星の大型化が進み、我が国でもH-IIロケットの開発が着手された。その頃の国産の静止衛星は、1987年に打ち上げられた「きく5号」が最大で静止軌道上初期550kgであった。

「きく6号」は21世紀にかけて必要となる2トン級静止衛星バス日本ではそのペイロードに対応する2トン級静止衛星三軸姿勢制御型の実用衛星を実現するための技術基盤を確立することを第一の目的として開発が進められた。

「きく6号」の具体的な開発目的は以下の4つである。

- ◇ 大型静止三軸衛星を実現するための基本機器技術や大型衛星のシステム技術の確立
- ◇ 将来の高度情報化社会や広範な人類の宇宙活動を支えるための高度衛星通信技術の軌道上実験・実証
- ◇ 衛星を一層高性能化するための先端的な技術や機器・部品を宇宙で実証するためのパス系搭載実験機器の搭載、実証実験。
- ◇ H-IIロケットの打上げ能力の確認、打上げ環境の測定。

2トン級静止三軸衛星バス技術修得には次の技術課題が抽出され、それを実現するための技術開発項目を設定した。各々の対応を表1に示す。また、きく6

号の諸元を表2に示す。そして、ペイロード搭載能力の向上を実現する手段の1つとしてイオンエンジンによる南北軌道制御を採用した。

当時のイオンエンジンの技術レベルは、1982年に打ち上げられた「きく4号」に実験装置として搭載し、軌道上での作動に成功した段階にあり、この成果を基に研究開発・開発を進めていた。表3に「きく4号」のイオンエンジンと「きく6号」のイオンエンジンの比較を示す。

3. イオンエンジンの寿命試験

イオンエンジンを南北軌道制御に使用すること、即ち、衛星バス機器の1つとして搭載するという事は、衛星ミッションの成否をその機器が正常に機能

表1 技術課題とそれを実現するための技術開発項目の対応

技術課題	技術開発項目
①ペイロード 搭載能力の向上	CFRP ハニカム構造による大型・軽量構体
②大電力化	薄型シリコン太陽電池セル(50μm)を用いた 大型・軽量のセミリジッド型太陽電池パドル
③高精度化	大容量非安定マルチバス電源
④運用性の向上	高精度・フォールトトレラント姿勢制御方式
⑤長寿命 ・高信頼性化	高性能大容量ニッケルカドミウム電池 二液式アポジ推進系とトランスファ軌道での 三軸姿勢制御 イオンエンジンによる南北軌道制御 高排熱処理および大型外部機器による放射干渉環境下での熱処理技術

表2 「きく6号」とイオンエンジン

項目	諸元
打上げロケット	H-IIロケット試験機2号機
打上げ射場	種子島宇宙センター
打上げ時期	1994年8月28日
衛星質量	3.8 ton (打上げ時) 約2 ton
発生電力	4,100 W (10年後夏至時)
姿勢制御方式	三軸制御方式
信頼度	0.8以上(10年後衛星バス部)
設計寿命	10年



に委ねることを意味する。従って、バス機器に相応しい信頼度が要求され、それを立証しなければならなかった。

それでは以下の信頼度を予測するか。「きく6号」イオンエンジンは以下の4つの機器から構成されている。

- 電源装置
- 制御器
- 推進剤供給器
- エンジン本体

これらのうち、電源装置と制御器は電子部品の集合体であり、従来の電源装置あるいは制御器の考え方を踏襲することによって予測した。また、推進剤供給器は推進剤タンク、圧力センサ、バルブなどから成り、化学推進系の考え方を踏襲した。

しかし、エンジン本体は従来の機器とは全く異なり、試験実証を選択した。エンジン本体への信頼度配分は10年間の運用、6,500時間のビーム噴射と2,920回のOn/Offに対し0.9。これを満足するためには70,000時間以上の作動実証が必要であった。

この試験に使用した供試体のモデルと数は次のとおりである。

- 設計確認モデル 2
- エンジニアリングモデル 4
- プロトタイプモデル 2 計 8

各モデルの差は使用部品のグレード、品質管理であり、作動寿命への影響はない。

8台の供試体に対し、設計確認モデルとプロトタイプモデルは連続作動、エンジニアリングモデルはOn/Off作動とし、1台あたり要求仕様の約1.5倍9,500時間、4,380回のOn/Offを課した。そして、連続作動2台とOn/Off作動4台の交互作動、即ち4台同時運転を計画した。

表3 「きく4号」のイオンエンジンと「きく6号」のイオンエンジン

	「きく4号」イオンエンジン	「きく6号」イオンエンジン
打上げ時期	1982年	1994年(当初は1992年度)
形式	電子衝撃型	
推力	2 mN	25 mN
推進剤	水銀	キセノン
作動時間 ／設計寿命	約100時間×2台(結果)	6,500時間、2,920回 (1台当たり、要求)
機器の位置付け	搭載実験機器	衛星バス機器
信頼度	N/A	0.9**以上(注)

(注) 資料処分につき詳細値不詳

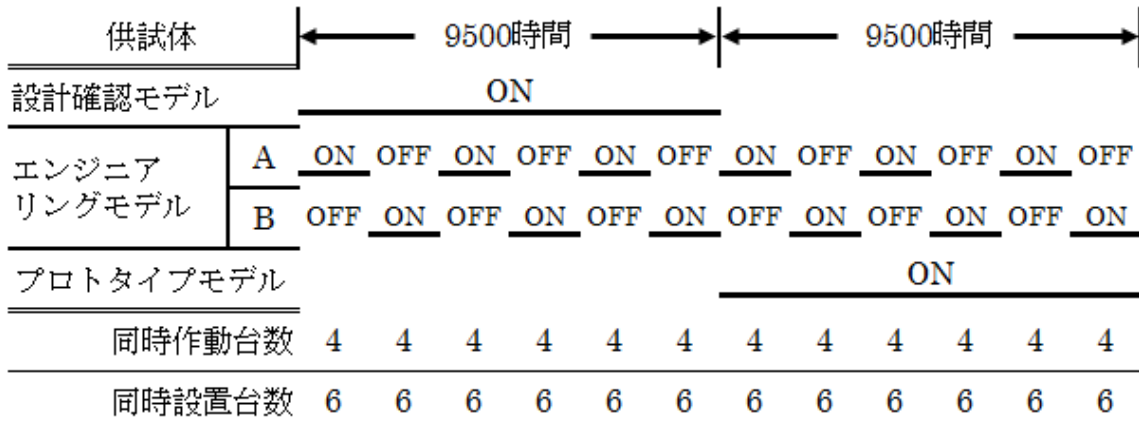


図1 イオンエンジン本体の試験モデルと実施計画

図1に使用する供試体のモデルと作動形態の考え方を示した。この図から、

- 4台同時作動
- 6台同時設置
- 試験期間は9,500時間×2；累積作動19,000時間（約20,000時間）

これが、試験装置の規模への仕様要求となった。

4. 試験装置の製作

(1) 試験装置の整備

イオンエンジンの試験装置、それはひと言で言えば「真空装置」に他ならない。ただし、一般の真空装置と違う点は、中で扱う供試体がガス負荷を持つという点である。ここで問題となるのが以下の事実である。

- 試験装置の利用者＝イオンエンジンの開発担当者；イオンエンジンのことは知っているが真空装置には詳しくない。
- 試験装置の整備者＝真空装置の製作者；真空装置のスペシャリストだがイオンエンジンに関しては素人。

即ち、「真空装置の素人」が「イオンエンジンの素人」に試験装置の製作を依頼する！ということである。真空装置として宇宙開発分野で一般的なのはスペースチャンバである。しかし、大いに異なる点は、前述のとおり供試体がガスを放出する、しかも高速であり、熱負荷も大きい。従って、イオンエンジンとその試験計画の情報を如何に有効に伝えることが出来るか、が課題であった。

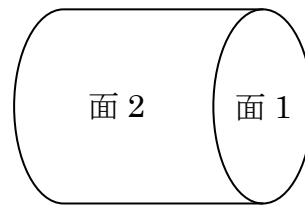
(2) 供試体（イオンエンジン）のモデル化

「イオンエンジンがどのような性格を持っているか？」そして「試験実施に当たってどのような条件を求めているか？」についてモデル化を図った。

表4にイオンエンジンの作動が試験装置に与える負荷を示した。

表4 1台当たりのイオンエンジンが試験装置に与える負荷

項目	仕様
形状	円筒形
寸法	Φ20cm×20cm
質量	4 kg
エンジン発熱量	図2による。
放出物質	キセノンイオン
イオンのエネルギー	1 keV
個数	約 3×10^{18} 個/秒
ビームエネルギー	約 500W
ガス負荷	10sccm (キセノン)
ガスの放出状況	図3による。



面1：直径 200mm の円板
赤外放射率 0.9
温度 500K

面2：直径 200mm、
長さ 200mm の円筒
赤外放射率 0.3
温度 500K

図2 エンジンの発熱コンフィギュレーション

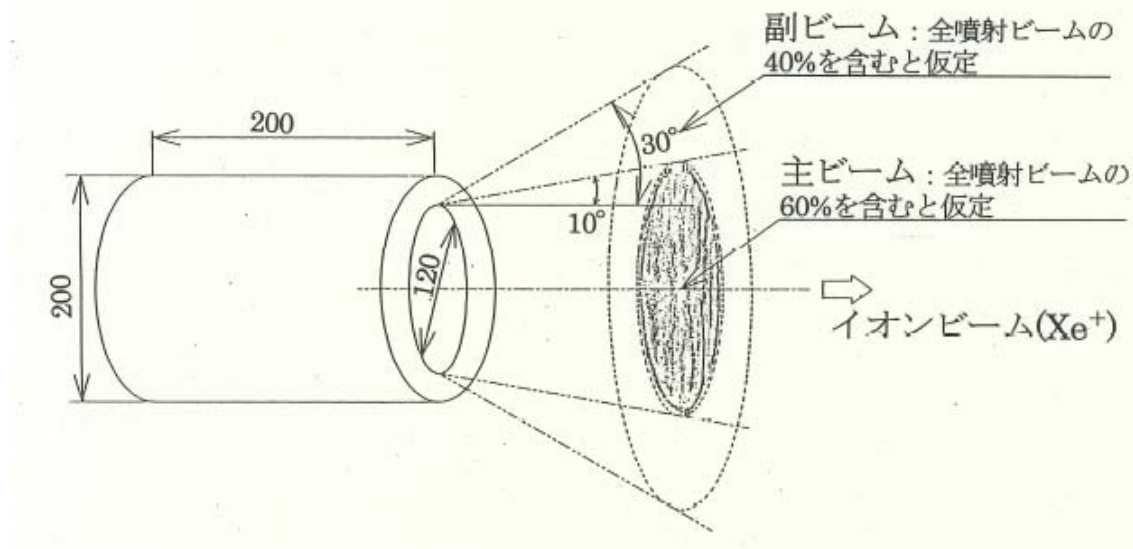


図3 発熱コンフィギュレーション

(3)試験条件

イオンエンジンの作動は、実作動環境を模擬することが望ましいが、それは困難である。そこで、真空槽内の圧力を安定な作動を得られるであろうと思われる 10^{-4} Pa (10^{-6} torr) 以下に抑えることを目標とした。

そのためにエンジンから排出されるキセノンガスをクライオパネルに凝着させる方法を探った。図4はキセノンの蒸気圧曲線を示している。この図からキセノンの蒸気圧を考慮すると、クライオパネル温度は 50K 以下にする必要があった。

従って、液体窒素(77K)ではクライオパネルを所期の温度まで下げることが出来ず、極低温ヘリウムガスを使用した。ここで、クライオパネルへのキセノン凝着による効率低下を考慮して、要求仕様を 20K に設定した。

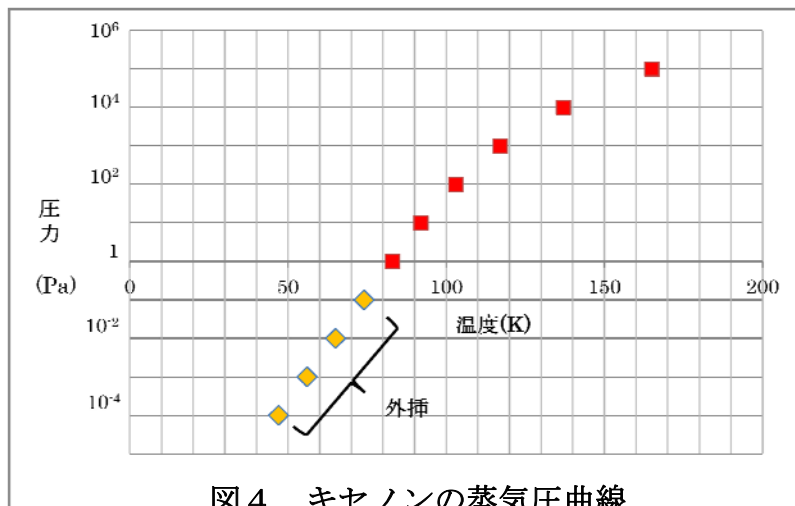


図4 キセノンの蒸気圧曲線

一方、エンジンから噴射されたイオンビームは真空槽内壁、内部機器等に当たった後戻ってくる。従って、エンジン前面の空間が狭いとその影響は大きい。

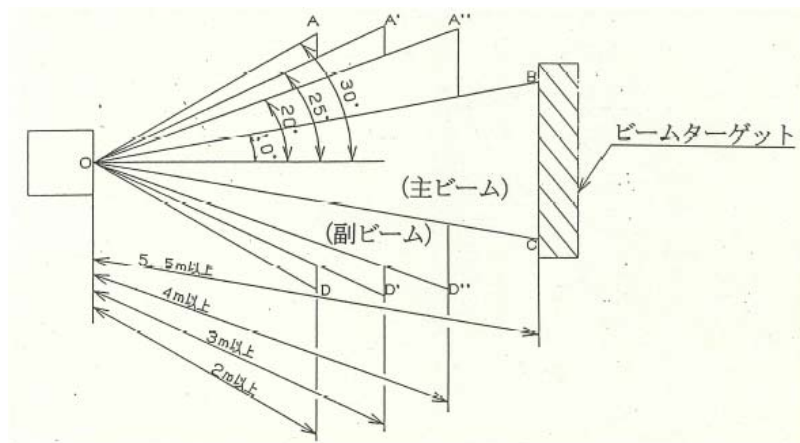


図5 噴射ビームのモデル化

そこで図5に示すように噴射ビームをモデル化、中心軸からの傾きに応じて、真空槽内部の障害物までのクリアランスを規定した。

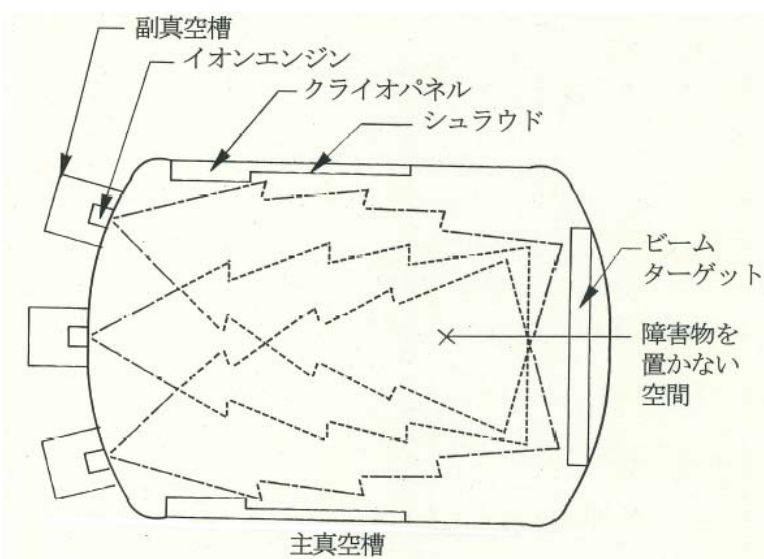


図6 真空装置内の空間の確保

個々の噴射ビームとクリアランス要求を設置する全ての供試体に対して図6のように適用し、真空槽の大きさ、供試体、内部機器の配置を決定した。

(4)その他の制約

液体窒素を使用するスペースチャンバは高圧ガス取締法（現 高圧ガス保安法）の適用を受ける。同様にイオンエンジン試験装置もクライオパネルを冷却する極低温ヘリウムガス製造のため同法の適用を受ける可能性があった。しかし、適用される場合、装置の運用に当たっては、正・副そして交替要員毎に多数の資格者を配置する必要があるが生ずる。そこで、高圧ガスの製造を冷却目的（＝冷凍則適用）とすることにより、大幅な減員を図った。

そのため、液体窒素は使わず、クライオパネル冷却に加え、真空槽内壁とクライオパネル間の温度差緩衝用シュラウドも低温ヘリウムガスにより行った。エンジンから排出されるイオンは、ターゲット衝突時に極力熱を奪うことにより、クライオパネルへの熱負荷軽減を図った。ターゲットの冷却には当時はまだ規制が緩かったフロン冷凍機を使用した。

図7に試験装置の系統図を示す。

その他、以下の点を配慮した。

- コスト低減

現地（試験装置の設置場所＝JAXA 筑波宇宙センター(TKSC)）での作業を極力減らすため、真空槽の製作は工場内でほぼ完成させ、TKSC には運ぶだけの工程を組んだ。その結果、輸送の制約から真空槽の外径は4m

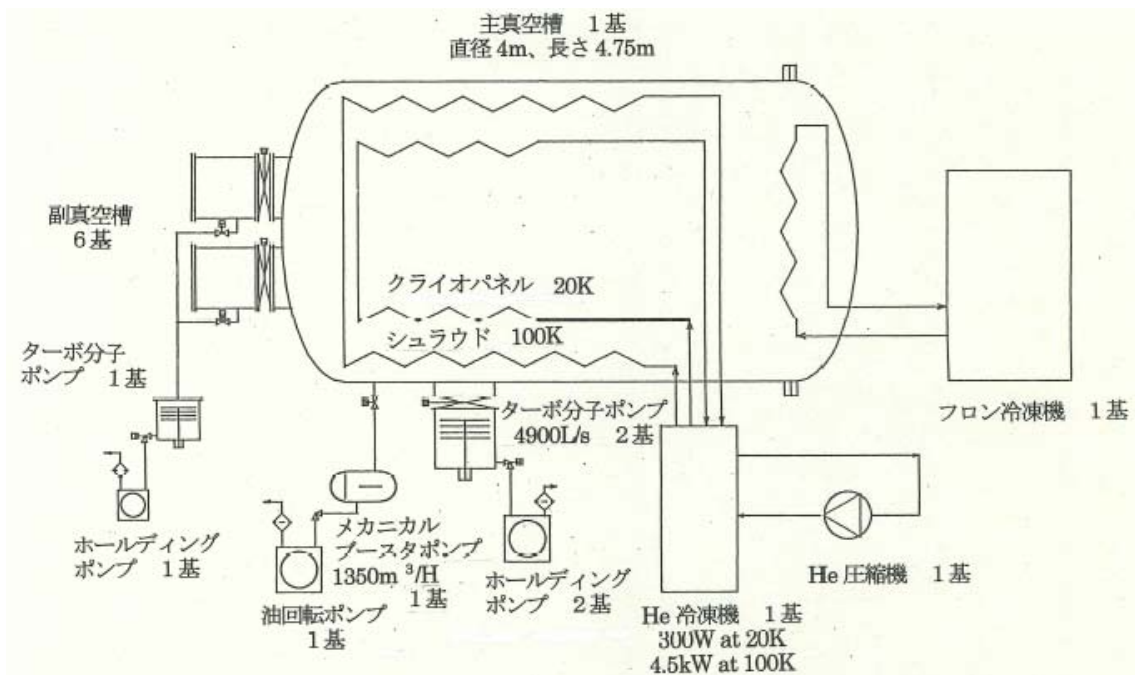


図7 イオンエンジン試験装置系統図

とし、その範囲内で図6の空間確保を狙った。

- 試験の容易さ

副真空槽を設け、エンジン本体をその中に収納。ゲート弁で仕切ることにより、他の供試体の試験を邪魔することなくエンジン個別へのアクセスを可能とした。

また、副真空槽のうち1つに冷却シュラウドを設け、低温試験を可能とした。

- キセノンガスの再生利用

試験装置保守等のクライオパネル昇温時、気化したキセノンを採集、再生利用を図るため、採集ポートを設けた。

以上の条件を踏まえ試験装置の設計を行った。装置の完成後、実際のイオンエンジンを作動させることにより、機能確認を行った。表5に試験装置の主要な仕様諸元を示した。図8に真空槽の内部、図9にエンジンの取り付け状況を示した。

表5 試験装置の主要諸元

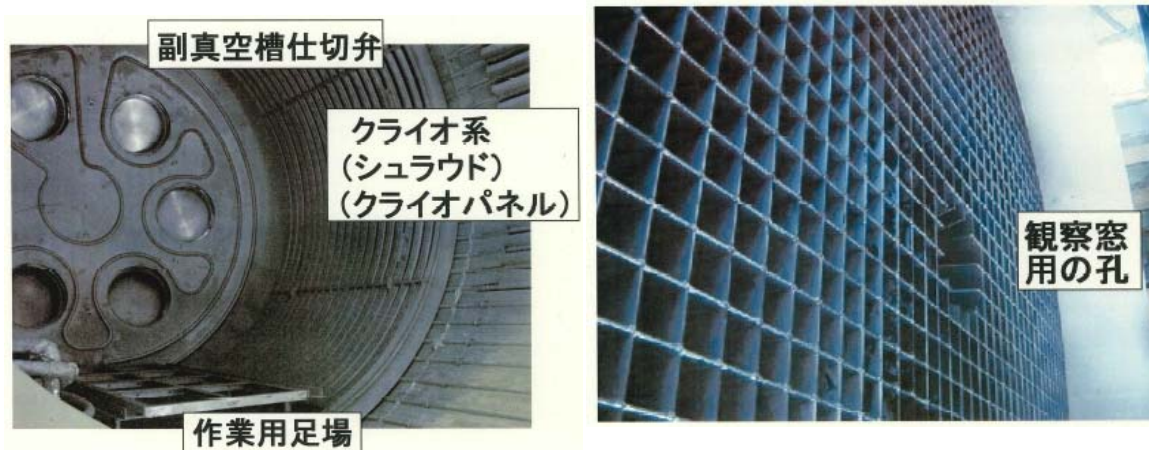
項目	仕様
主真空槽の形式	水平円筒型
主真空槽の寸法	直径 4m、直胴部 4.75m
副真空槽	主真空槽鏡板に 6 式装着 (うち 1 式に供試体用 100K 以下のシュラウド設置)
運用時の圧力環境	3×10^{-6} Torr (4×10^{-4} Pa) 以下
無負荷時の圧力環境	1×10^{-7} Torr (1.3×10^{-5} Pa) 以下
真空排気時間	大気圧⇒ 5×10^{-6} Torr 以下 : 16 時間以下
ヘリウム冷凍機の冷却時間	常温⇒20K 以下 : 40 時間以下
クライオパネルの昇温時間	50 時間以下
大気圧戻し時間	6 時間以下 (シュラウド、クライオパネルの昇温時間を除く)
無保守運転時間	5,000 時間以上
累積試験時間	20,000 時間以上

5. 試験概要

寿命確認試験そのものは所定の作動時間、ON/OFF 回数を終えた。ここでは試験の進行を通じて得た「思惑外れ」の状況について紹介する。

(1) ビームターゲットの絶縁確保

試験の進行に伴い、イオンビームによるスパッタ物質が各所に堆積してくる。



主真空槽内部（供試体設置側） ビームターゲット（供試体の対面側）

図8 イオンエンジン試験装置系統図

その結果、ビームターゲットと真空槽内壁の間に導通が生じ、エンジン⇒ターゲット⇒真空槽に電流が流れる形となり、中和器が働かずともビームが引き出されるという状況となった。

ターゲット・真空槽間（に限らず）の絶縁箇所の保護が必要である。



図9 イオンエンジンの取り付け状況

(2)複数台作動時の中和器作動の偏り

複数台のイオンエンジンを同時に作動する時、各エンジンの中和器間で働きに差が生じ、中和器電流にばらつきが見られた。そのため中和器流量の調節により、働き方を均等に調整した。この調整は実際の軌道上でも実施した。

(3)キセノンの再生利用

当初の試験計画に比べ、大気開放の間隔が短かったため、クライオパネル昇温後のキセノン濃度は目論見ほどには大きくなり、所期のキセノン単価の低減には至らなかった。

6. まとめ

本試験装置を整備後、既に4半世紀が経過したが、この種の試験装置の開発

が各所で行われている訳ではなく、数少ない経験者の一人として話をさせて頂いた。

試験装置・設備の整備においては、面白い技術的課題よりも、設置場所の決定、法的手続き、輸送方法などうんざりする庶務的作業が多く発生することを覚悟して欲しい。

また、真空装置そのものは特殊な設備ではないので、製造業者の選定も公明正大にやらないと後々苦勞する恐れが生ずる。

試験装置が当初の目的を終えた後の話として、設備は維持費が掛りことを忘れないように。特に法規に絡む設備は法定点検費用が定常的な負担となり、経費節減が叫ばれる時は真っ先に目の敵にされる。常に使用されている状態を保つこと。即ち、絶え間のない研究態勢を維持しておくことが肝要である。

参考資料

- 1) K. Kajiwara, M. Katada, “The Test Facilities for ETS-VI Ion Engine System” AIAA-90-2656
- 2) 梶原他、「技術試験衛星VI型(ETS-VI)イオンエンジン装置の開発」(日本航空宇宙学会誌第46巻第530号)
- 3) 梶原、斎藤、「イオンエンジン試験装置」(日本真空協会(現日本真空学会)誌「真空」第45巻(2002年)第4号)