

NAL TM-778

ISSN 1347-460X
UDC 629.7.018
629.7.036.7

NAL TM-778

航空宇宙技術研究所資料

TM-778

独立行政法人
航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-778

イオンエンジンの寿命試験における評価精度および
試験効率の向上のためのイオンエンジン
試験装置のターゲットの改修

宮崎 勝弘

2003年8月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

イオンエンジンの寿命試験における評価精度および 試験効率の向上のためのイオンエンジン 試験装置のターゲットの改修*

宮崎 勝弘*¹

Improvement of the Beam Target of the Ion Thruster Test Facility to Improve Test Efficiency and Evaluation Accuracy in Lifetime Tests

Katsuhiko MIYAZAKI

Abstract

The ion beam target installed in an ion thruster test facility was improved to attain higher test efficiency and evaluation accuracy in ion thruster lifetime tests.

There were four main objectives for this improvement: 1) to reduce the contamination of the ion thruster due to back-sputtered material by introducing a new mechanism to the ion bombarding surface of the target, 2) to operate the vacuum-pumping capability of the cryopanel longer by eliminating flon gas leakage from the target, 3) to increase the vacuum-pumping capability of the cryopanel by reducing thermal radiation from the target, and 4) to increase the electrical isolation capability of the target from the vacuum chamber, necessary to simulate ion thruster operation in space.

To achieve these objectives, a new target was designed and fabricated, and installed in the vacuum chamber of the ion thruster test facility. Trial operation of the facility presented several problems with regard to the new target. Improvements were carried out to solve these problems. For 1), a new ion collector was devised to reduce back-sputtering from the target by creating a sharp oblique incidence of ions. For 2), the leakage of flon was found to occur at the flange couplers in the vacuum chamber, so these were moved to positions outside the vacuum chamber. For 3), the temperature of the target baseplate was lowered by improving the heat transfer efficiency, achieved by increasing the thickness of the target baseplate and arranging the flon piping more densely on the target.

We also gained extensive knowledge on target design and fabrication.

Keywords: Ion Beam Target, Vacuum Facility, Xenon Ion Thruster

概 要

イオンエンジンの寿命試験において、評価精度を上げ、また試験効率を改善するため、イオンエンジン試験装置の真空槽内に設置されているターゲットの改修を行った。

主な改修目的は次の4つである。1) ターゲットのイオン衝突面に新たな機構を取り入れることにより、ス

* 平成15年6月20日受付 (Received 20, June 2003)

* 1 宇宙システム研究センター (Space Technology Research Center)

パタ物質によるイオンエンジンの汚染を減少させる。2) ターゲットからのフロンガス漏れを解消し、クライオパネルの真空排気能力を長時間確保する。3) ターゲットからの熱放射を減少させ、クライオパネルの真空排気能力を向上させる。4) ターゲットは絶縁状態で真空装置内に設置されている必要があり、電気絶縁を強固にする。

このため、新たにターゲットを設計・製作した。新ターゲットを試用したところ、幾つかの問題点が生じたため、それらの対策のため改修も行った。本製作によって、1) については、イオンの斜め入射によってスパタの低減を図るため、イオン衝突器を考案した。2) については、フロンガスの漏れ箇所がフランジ継手であることを突き止め、継手を大気側に移した。3) については、ターゲットの基板板厚の増加や基板へのフロン配管の配置間隔を狭める等を実施し、熱伝導の改善を図り、基板温度を低下させた。また、ターゲット製作における多くの知見が得られた。

第1章 はじめに

航空宇宙技術研究所ではイオンエンジンの研究を長年に渡って進めている。イオンエンジンは、推進剤をイオン化し、イオンのみを高速噴射して推力を得る宇宙用の推進機で、ヒドラジンをを用いたガスジェット等に比べ、推力は小さいが高比推力が得られることを特徴とする。用途としては推力レベルに応じて衛星の姿勢制御や主推進機等がある。

イオンエンジンを実用に供するには様々な地上試験が必要である。地上試験（作動）は宇宙空間を模擬したイオンエンジン試験装置（真空槽内）で行う。真空槽内でイオンエンジンを作動させると、宇宙環境（障害物はなく超高真空）と異なることから、様々な問題を引き起こす。

ここで、真空槽内でのイオンエンジン作動で特に問題となる2項目について記述する。1) イオンエンジンがスパタ物質により汚染される。イオンエンジンが噴射した高速イオン（約40 km/s）が真空槽構造物に衝突することでスパタが起り、スパタ物質を飛散させる。飛散したスパタ物質の一部がイオンエンジンに飛来し付着することで汚染が起こる。イオン加速電極系が汚染すると、高電圧絶縁破壊を起こし易くなり、イオン加速が停止する。2) イオンエンジンの加速電極が電荷交換イオンにより損耗する。真空槽内に存在する中性原子の近傍を、高速イオンが通過すると電荷が移動し、高速中性原子と遅いイオンが生じることである。加速電極近傍で電荷交換が生じると、遅いイオンは加速電極の負電圧（-300 V）で引かれ衝突することで損耗が起こる。真空状態が悪くなると、中性原子は多くなり、電荷交換イオンの発生は増加する¹⁾。

イオンエンジンは小推力のため一般的に長時間作動を要することから、長寿命であることが求められる。そのため、寿命評価は重要な課題である。上記の問題等は寿命評価に誤差を与えることになり、評価精度を上げるた

めにイオンエンジン試験装置には様々な工夫が必要である。しかしながら、イオンエンジン作動に適した試験装置を得ることは容易なことではなく、その開発も重要な課題である。

当研究所のイオンエンジン研究は推進剤に水銀を用いた2 mN級イオンエンジンで開始された。このイオンエンジンの作動に用いた小型試験装置は、直径1500 mm、全長が約2500 mmであり、排気装置は液体窒素シュラウドと油拡散ポンプであった。

その後、イオンエンジンの大推力化と推進剤を水銀からキセノンに変更したことにより、小型試験装置では対応できなくなり、新しい試験装置が必要となった。キセノンは液体窒素シュラウドでは排気できないので、キセノンに対する排気能力が大きく、かつクリーンな排気装置としてクライオパネル（クライオポンプの別形態）を小型試験装置に設置し、排気能力試験を行った²⁾。その結果、キセノン用の排気装置としてクライオパネルの実用化が確かめられ、真空槽内にクライオパネルを設置したキセノンイオンエンジン専用で大規模のイオンエンジン試験装置を開発した。このイオンエンジン試験装置は、150 mN級キセノンイオンエンジン（詳細は付録を参照）の性能試験では特に問題とする点はなかったが、寿命試験の長時間作動により多くの問題点が浮かび上がった。そして、問題点の殆どは現ターゲットに起因していることが明らかとなった。

問題点の解消を検討した結果、現ターゲットの手直しでは解消できないことが分かり、改修として新ターゲットを製作することになった。

本報告書は、現ターゲットの問題点を解消するために、製作した新ターゲットと新ターゲットで新たに見つかった問題点の改修についてまとめた。

本報告書は、まず初めに開発した現イオンエンジン試験装置を紹介する。次に明らかになった現ターゲットの問題点を、続いて新ターゲットの設計工夫点を記述する。最後にそれに基づいて製作した結果について記述する。

第2章 イオンエンジン試験装置

改修の対象となった現イオンエンジン試験装置（本装置と呼ぶ。昭和62年3月完成）は、推進剤にキセノンを用いたイオンエンジン研究を目的として製作した。本装置の概略を図1に、諸元を表1に示す。

本装置の真空槽は主真空槽、副真空槽、鏡板およびエンジン格納庫から構成される。主真空槽は全長が3650 mmで、直胴部（クライオパネル等の設置部）は内径3000 mm、長さ3000 mmである。副真空槽は内径1500 mm、幅800 mmである。鏡板を含む総全長は約6100 mmである。エンジン格納庫は内径550 mmで、ゲート弁を介して副真空槽に取付けてある。これらの構造材は全てステンレスである。鏡板側を大気側から見た外観を図2に示す。

クライオパネルはキセノンの排気装置で、内径2660 mm、幅1000 mmの円筒形で、円筒の内表面積は8.35 m²である。円筒外面にコイル状に溶接した管に、50 Kヘリウム冷凍機で冷却したヘリウムガスを循環させ、クライオパネルを50 K以下に冷却してキセノンを凝着させる。排気速度は約200 m³/sである。

その他の気体排気は、ターボ分子ポンプ（5000 L/s）または外付けのクライオポンプ（10000 L/s）で行う。

ターゲットは、イオンエンジンが噴射した高速イオンの殆どが衝突するので、イオンエネルギーを吸収して発熱する。ターゲットからの放射はクライオパネルの排気能力に影響するため、熱をフロン冷凍機で除去する。

ターゲットに斜板を挿入した状態の概略を図3に示す。また、イオンエンジン側から見た外観を図4に示す。ターゲットは直径2400 mm・幅305 mmである。鏡板への取付けは固定金具で行う。固定金具とフランジ継手は、

表1 イオンエンジン試験装置の諸元

イオンエンジン試験装置の諸元		
各部の名称等	規模・能力	
主真空槽	内径 3000 mm 直胴部長 3000 mm 全長 3650 mm	
	鏡板にクライオポンプ及びターボ分子ポンプ設置	
副真空槽	内径 1500 mm 幅 800 mm	
	VG550 ポート3箇所、VG200 ポート2箇所付き 但し、VG550 ポート2箇所はゲート弁設置	
エンジン格納庫	内径 550 mm 長さ 550 mm (両端面 VG550 仕様)	
	VG150 ポート2箇所、φ15 ケージポート4箇所付き	
クライオパネル	内径 2660 mm 幅 1000 mm	冷凍機出力 100W
100K シュラウド	内径 2850 mm 全幅 3000 mm	冷凍機出力 500W
100K リングシュラウド	内径 2180 mm 総幅 1100 mm	
フロンシュラウド	内径 1200 mm 幅 870 mm	冷凍機出力 3.4kW
ターゲット	外径 2420 mm(基板)	
全 長	約 6100 mm (主真空槽+副真空槽+鏡板)	
容 積	約 32m ³ (主真空槽+副真空槽+鏡板)	

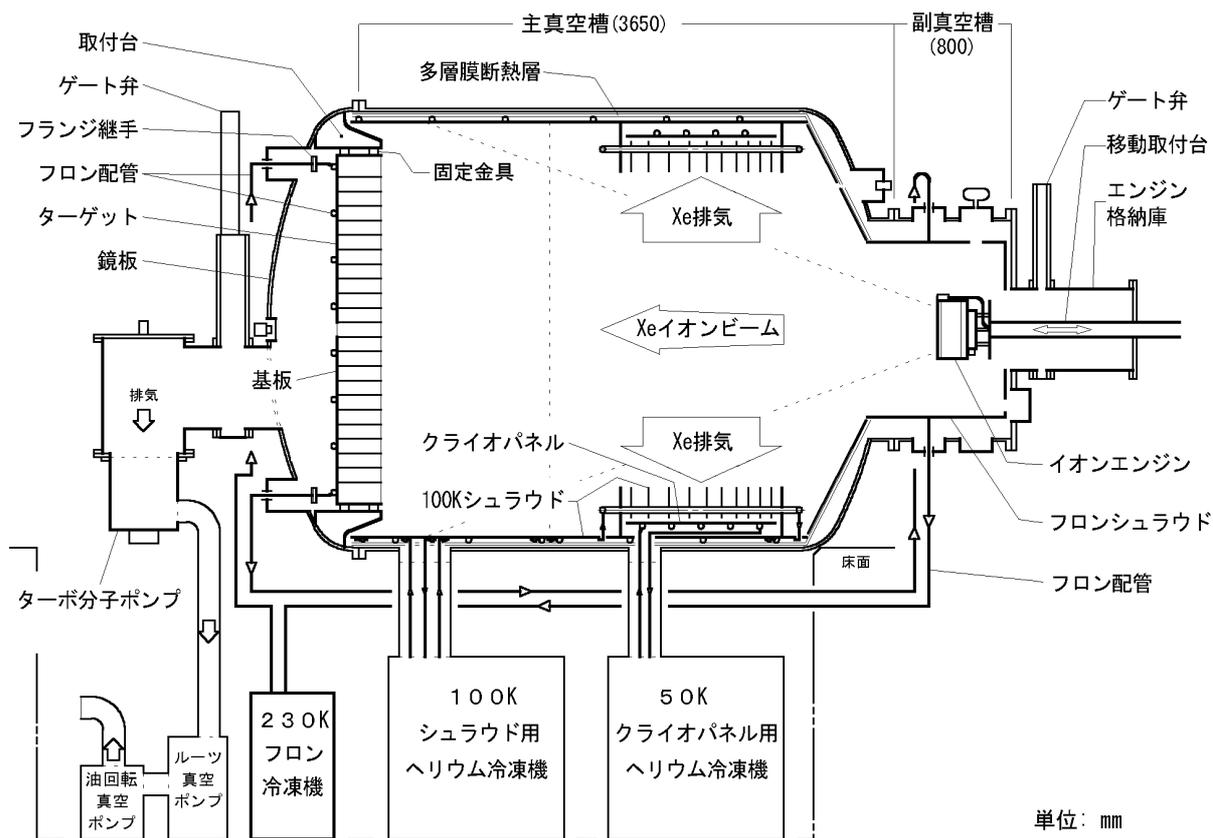


図1 イオンエンジン試験装置の概略図



図2 イオンエンジン試験装置（鏡板）の外観

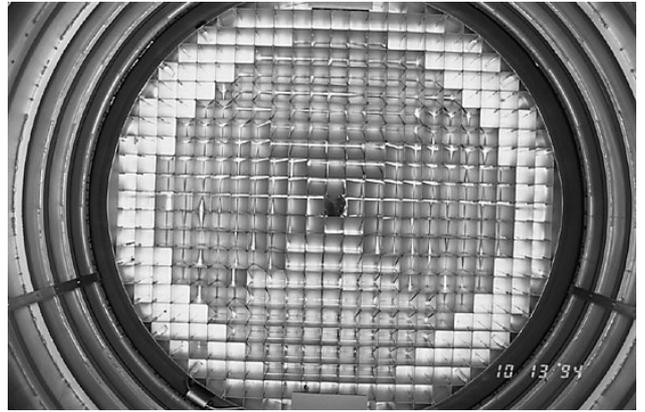


図4 現ターゲットの外観

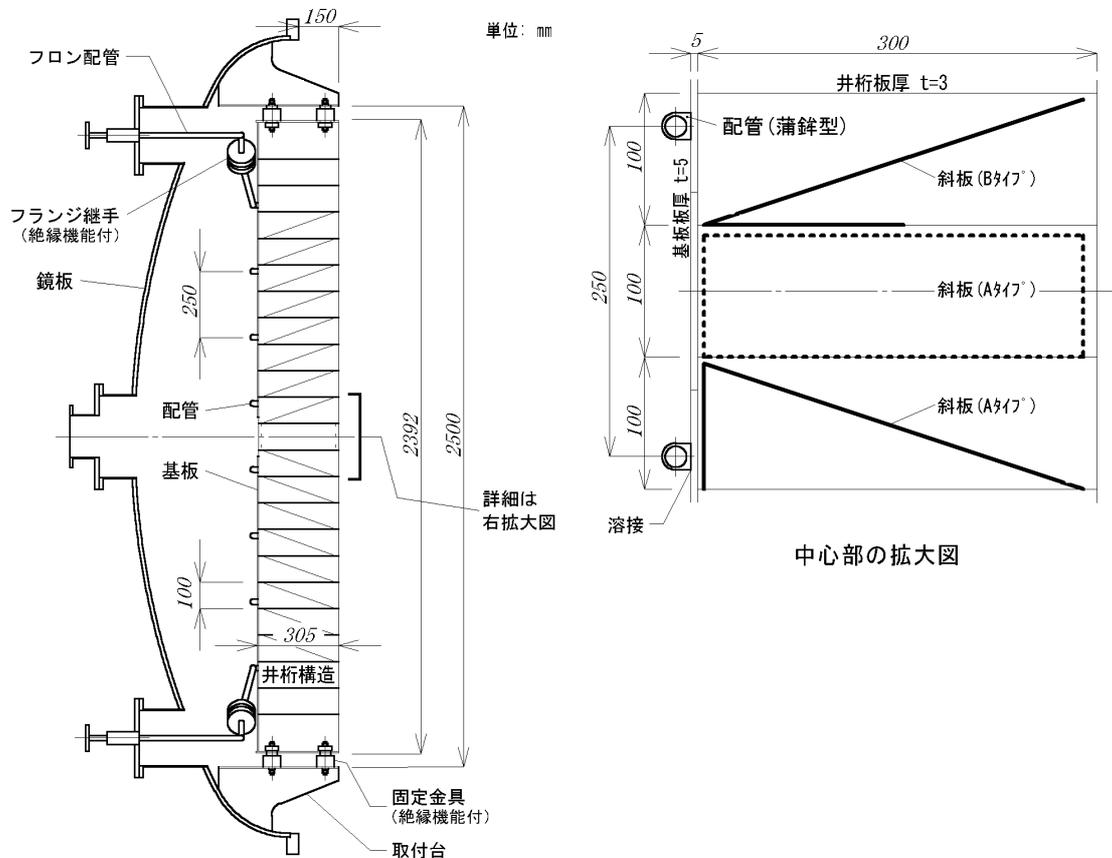


図3 現ターゲットの概略図

ターゲットをその他の部分から電氣的に絶縁するため、絶縁機能を持たせてある。

ターゲットのイオン衝突面は、イオンエンジンへのスパタ物質の飛来量軽減のため井桁構造にしてある。個々の井桁は約 100 mm 四角で、板厚は 3 mm である。板厚 5 mm の基板（底板）と井桁全体を溶接による一体構造とし、熱伝導を良好にしてある。

吸収した熱を除去するためターゲットの基板には横方向に 250 mm 間隔でフロン配管が溶接してある。フロン配

管は上部および下部にあるフランジノズルから大気側に引き出して、フロン冷凍機に繋がれる。その途中にフランジ継手が設けてある。

挿入した斜板は 2 種（A タイプと B タイプ）であり、挿入箇所はターゲットの周辺近傍を除く部分であり、図 4 で井桁に陰影がある部分である。斜板の板厚は 1 mm である。斜板を挿入したのはターゲットからのバックスパタを低減するためであり、詳細は 3.1 項で記述する。

100 K シュラウドは、クライオパネルへの熱入力を小さ

くするために設けてある。冷却方法はクライオパネルと同様である。シュラウド冷却は液体窒素で行うのが一般的であるが、試験装置の取扱い易さと運転コストを抑えるために冷凍機を採用している。シュラウドには外部（大気側）からの熱入力を減らすためアルミを蒸着したマイラフィルムを多層に巻き付けた多層膜断熱層が設けてある。

クライオパネル、ターゲット、シュラウドの構造材はアルミ材である。アルミ材は、高熱伝導率を持ち、比較的高い構造強度で重量が軽く、良好な加工性を持つため使用した。それぞれの製作では高熱伝導を確保するため溶接加工を多用した。冷却配管は溶接を容易にするため、断面形状が蒲鉾型をした（冷媒流路は直径17 mm）特注管を使用した。

第3章 現ターゲットを改修するに至った問題点

本章では、150 mN級イオンエンジンの長時間試験の開始に伴って、浮き彫りになった現イオンエンジン試験装置の問題点を項目別に記述する。

3.1 イオンエンジンのスパタ汚染問題と汚染軽減措置の有効性

イオンエンジンの作動時間が長時間になるにつれ、イオン加速電極系はスパタ物質で汚染され、高電圧絶縁破壊の頻度が増した。高頻度のイオン加速停止は総イオンビーム電流量に誤差を生じさせ、絶縁破壊に伴う電極間の放電電流は電極損耗の原因にもなる。

イオンエンジンへ飛来するスパタ物質を減少させるため、ターゲットの井桁内には斜板が挿入してある（図3中の中心部拡大図参照）。

斜板の挿入は、高速イオンの斜め衝突を作り出し、エンジン方向（ビーム入射方向）へ飛来するスパタ物質を減少させようとする意図に基づいている。本改修に先立って、25 mN級キセノンイオンエンジン用い、水晶振動子式膜厚計によって、斜板の有効性を評価した。その結果、スパタ物質の飛来量は、斜板なしの状態と比較して35%減少した³⁾。

この結果から斜板を用いたが、斜板に入射するイオンビーム電流は150 mN級イオンエンジンでは25 mN級の約6倍となるため、次のような問題点があった。斜板は、井桁内に単に置いた状態であるため、熱伝導による冷却はなく発熱し、熱放射が増大する。熱放射の増大はクライオパネルへの熱放射入力を増加させるので、クライオパネル用冷凍機への負荷が増し冷却能力を超えると、クライオパネルの温度が上昇し、排気能力を低下させる。また、斜板はイオン衝突により激しく損耗し、短期間の作

動で交換が必要となる。交換作業は大変な労力が必要で、かつ危険を伴う。

3.2 クライオパネルの汚染による排気能力低下

イオンエンジン寿命試験は、試験装置および電源装置等をパソコンによる運転制御で、昼夜を問わず連続して行う。イオンエンジンに供給されたキセノンはクライオパネルにより排気され、イオンエンジン定格作動時のキセノン流量3250 mAeq (47.74 SCCM) における真空槽内圧力は約 1×10^{-3} Paの高真空を確保している。クライオパネルの排気能力が低下する事態がほぼ2週間毎に生じ、寿命試験は中断した。この事態は長時間作動を必要とする寿命試験では大問題であった。

排気能力低下の原因は、クライオパネルの表面が汚染されたことで熱放射吸収率が増大し、ヘリウム冷凍機の冷凍能力不足から、50 K以下に温度を維持できなくなったためである。クライオパネルの汚染状況を真空槽の大気開放後に観察すると、内表面全体が程度に差はあるが膜状に煤状物質で覆われ黒くなっていた。クライオパネルの汚染状況を図5に示す。光っている部分は煤状物質が剥がれ落ちたところである。

煤状物質の発生源を特定するため、四重極型質量分析計（アネルバ製、AQA-200）で、エンジン非作動時の高真空状態で、残留ガス分析を行った。その結果、フロン冷凍機に用いているフロンガス（R22）の存在を確認した。汚染は、フロンガスがイオン等の何らかの作用で分解し、炭素または炭素化合物が生成され、生成物が内表面に付着したことで生じたと推定した。煤状物質の成分分析は行っていないが、黒色であり、静電気で発火することなどからも、炭素系物質であると推定した。

フロンガスの存在は、真空槽内のガス循環経路中に漏



図5 クライオパネルの汚染状況

れ箇所がある証拠であり，それを探索したところ，フロン配管に設けてあるフランジ継手（図3参照）からであることが分かった．継手はターゲットの電気絶縁をとるためと鏡板に取付ける際の作業性向上のために設けてある．漏れを止めるため，継手に使用しているOリング（パッキン）の交換等を行ったが，有効ではなかった．

クライオパネルの排気能力は煤状物質を除去することで容易に回復できるが，試験効率の低下や中空陰極への影響が問題となる．煤状物質の除去作業は，真空槽を大気開放し，真空掃除機を用い，吸い込み口先端に刷毛を付けた器具で，掃くように吸い込むことで行う．この作業には（イオンエンジンの放電停止から次の放電開始まで）約80時間を必要とする．また，作業の度にイオンエンジンを大気に曝すことになり，中空陰極（主陰極及び中和器）内部のインサートの劣化が生じる心配がある．

3.3 基板の熱伝導不足の問題

ターゲットからの熱放射の一部はクライオパネルへの入熱となり，クライオパネルの熱負荷を増加させるため，温度は十分低く保っておく必要がある．温度計測のため，図6に示すように8箇所に熱電対を取付けてある．①と②はフロン配管上の測定点であり，③から⑧は基板上的測定点である．

イオンエンジン定格作動時の基板各部の温度は約245 K（基板周辺）～約265 K（基板中心）である．フロン配管

温度は共に約230 Kである．

基板各部の約20 Kの温度差は，イオンエンジン試験装置を設計する際に熱計算によって推定した温度差の約5 Kより大きく，熱伝導不良があることを示唆した．熱伝導不良の原因として，1) 配管溶接に不具合があり，配管と基板との熱接触抵抗が大きい．2) フロンガスとともに配管内を循環する潤滑油のため，長期間の運転経過で配管内面が汚れて，熱交換不良となっている．3) 基板の板厚が，長期間のイオン衝突により減少している．等を挙げることができる．

3.4 固定金具の絶縁不良の問題

真空槽内に宇宙空間の電氣的に孤立した状態を近似するため，ターゲットは真空槽本体から電氣的に絶縁する必要がある．そのため，鏡板にターゲットを取付ける固定金具およびフロン配管は絶縁機能を持たせてある．碍子には高速イオンの衝突で生じるスパタ物質の付着を防止するため，汚染防止キャップを必ず設けなくてはならない．現固定金具の汚染防止キャップは碍子が露出していること，固定金具全体にスパタ物質の蓄積に対する対策が取られていないという不具合がある．そこで今回の改修に合わせ，固定金具も同様に交換することにした．

第4章 新ターゲットの設計

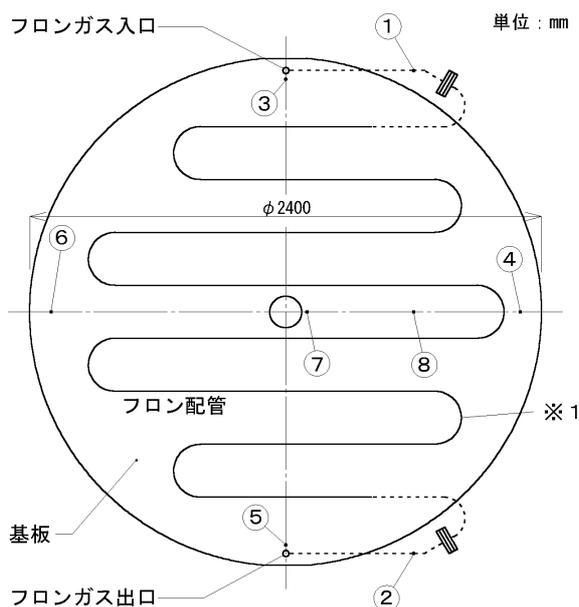
前章の問題点を解消するため新しいターゲットを製作することにした．本章では，新しいターゲットを製作するに当たって，前述の問題点を解消するための工夫点等について，項目毎に記述する．

4.1 新ターゲット

本改修では鏡板は改修しないので，鏡板のターゲット取付台の位置と構造およびフロン配管を大気側に引き出すフランジノズル位置から根本的な変更は不可能であり，新ターゲットの基本的な構造は現ターゲットと同様とした．

設計した新ターゲットの概略を図7に示す．ターゲットの基板は，フロン配管溶接の容易性，後述のイオン衝突器の取付け方法，熱伝導および質量を考慮して，直径2420 mm，板厚10 mmの平板とした．製作は1枚板で行うと製作費が嵩むので2枚の板を溶接で繋いでから行った．平板では構造強度不足となるため，外周に板厚5 mm，幅100 mmの補強枠を設けた．

全体の構造材料は，イオン衝突器（イオン衝突板）のチタンを除き，全てアルミ材とした．アルミ材は，溶接時の歪みが問題となるので，基板板厚や配管溶接におけるビード長等を検討した．



※1 フロン配管で実線部は基板に溶接されている。

- ①, ② フロン配管温度測定点(熱電対取付箇所)
- ③~⑧ 基板温度測定点(熱電対取付箇所)

図6 現ターゲットの熱電対取付け位置図

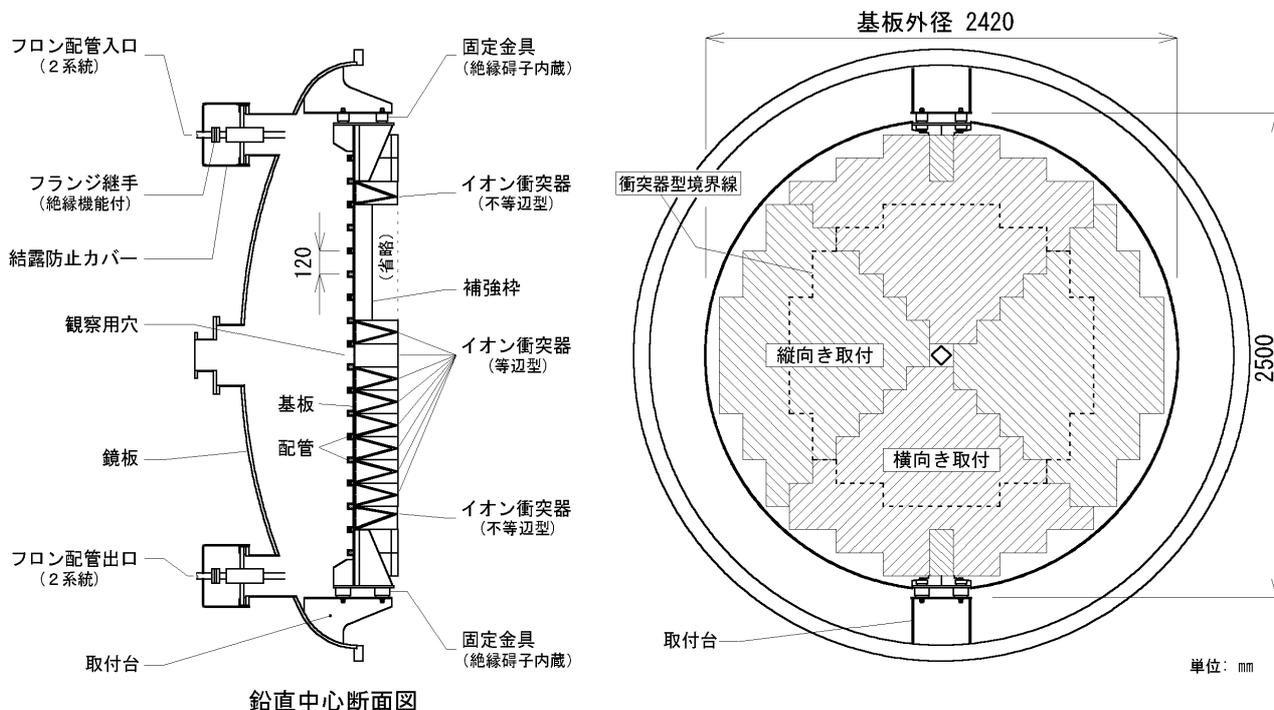


図7 新ターゲットの概略図

なお、銅材は、熱伝導率の点では優れているが、銀ロウ溶接時に用いるフラックスの除去が困難で、真空での脱ガス源になること、加工性および質量に難があるので採用しなかった。

4.2 スパタ物質汚染軽減対策とイオン衝突器の考案

イオンエンジンのスパタ物質汚染の軽減対策として、イオンの斜め入射を取り入れ、かつイオン衝突による損耗に対して容易に交換可能なイオン衝突器を考案した。構造詳細を図8に示す。

イオン衝突器は、イオンエンジンから噴射されたイオンを受けるイオン衝突板、およびそれを基板に取付けるための衝突板取付台からなり、等辺型と不等辺型の2種を製作した。不等辺型のイオン衝突器はターゲット基板の周辺部分に取付け、イオン斜め入射角を大きくすることをねらったものである（図7参照）。イオン衝突板の頂角は共に30度で、上部から見ると正方形（約119.5 mm角）である。正方形とすることで、基板へのイオン衝突器の取付けは、稜線を縦横自在にできる。自在にするため、衝突板取付台に60 mm 間隔で穴を設け、基板全面に同間隔で貫通M5ネジ穴が設けてある。この間隔は次項のフロン配管間隔を考慮した結果でもある。

イオン衝突板は2 mm厚のチタン板であり、衝突板取付台は4 mm厚のアルミ板である。チタンはイオン衝突による損耗（スパタリングイールド）がアルミより小さく、

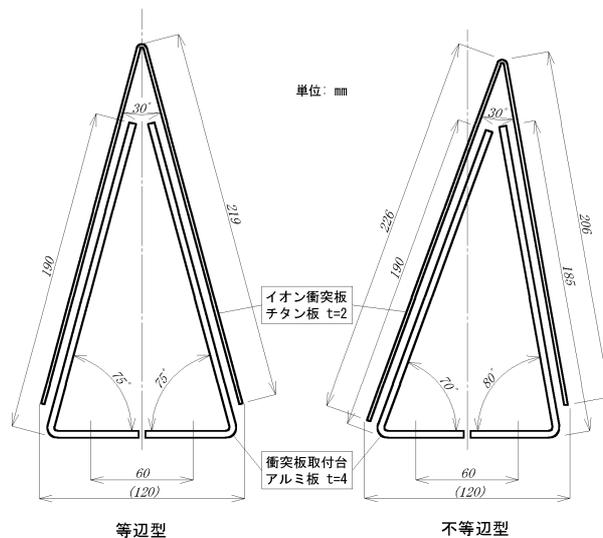


図8 1次イオン衝突器の詳細図

アルミは熱伝導率がチタンより大きい。両者を組み合わせることで、イオン衝突板の損耗を小さくすることができる。また、低温に保つことができる。また、ネジで締結することで損耗時の交換が容易にできる。

4.3 ターゲット熱伝導の改良及びフロン漏れ対策

現ターゲットのフロン配管間隔では基板とフロン配管の熱伝導面積が不足していた。新ターゲットでは十分な熱伝導を得るために、配管間隔を250 mmから120 mmに

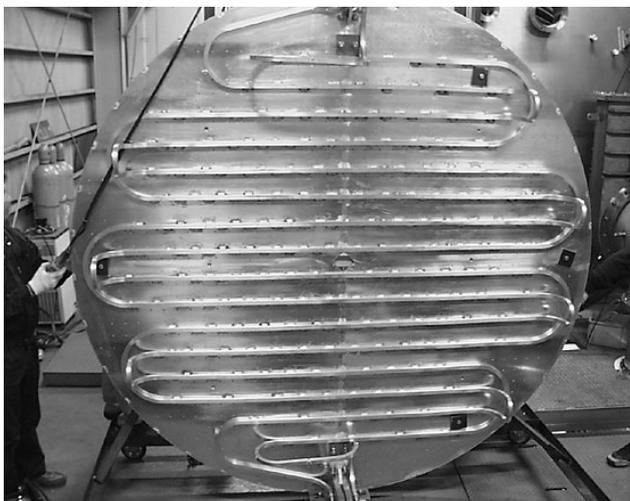


図9 新ターゲットのフロン配管の外観



図10 フランジ継手の外観

狭めた。

1系統の流路で配管間隔を120 mmにするには製作上困難があるので、流路は2系統に分割した。流路を2系統にすると流れに不平衡が生ずる可能性があるため、配管の曲げ箇所および流路長をほぼ等しくした。現ターゲットで用いた管は入手できなかったため、正方形断面（辺の長さ19 mm、肉厚2.4 mm）の角管を採用し、溶接の容易性を確保した。基板に溶接されたフロン配管の外観を図9に示す。

フロンガス漏れを解消するため、真空槽内となるフロン配管は全て溶接で繋ぎ、フランジ継手は真空槽内から大気側に移した。フランジ継手は冷却時に結露が生じ、電気絶縁が取れなくなる可能性があるため、フランジノズル部に結露防止対策を施した。フランジ継手の外観を図10に示す。フランジ継手間にある白い部分はターゲットの電気絶縁を取るためのアルミナ板である。

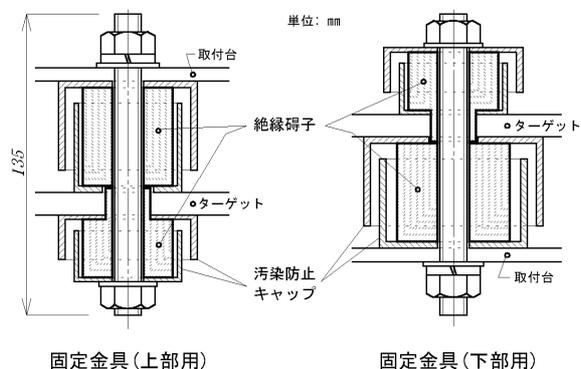


図11 新固定金具の詳細図

4.4 新固定金具

ターゲットの電気絶縁を長期間確保するため、碍子汚染防止キャップの形状を見直し、新固定金具を設計した。設計した新固定金具を図11に示す。

第5章 新ターゲットの製作結果と新たな問題点

この章では、完成した新ターゲットの製作結果と新たに生じた問題点を記述する。

5.1 新ターゲットの製作結果

完成した新ターゲットを鏡板へ取付けた状態を図12に示す。ターゲットの組立は次の手順で行った。最初に新固定金具を用いて鏡板のターゲット取付台に基板を取付け、次にM5ネジで基板にイオン衝突器を取付け、最後にフランジノズル部を含むフロン配管系を組み立てた。

本製作では溶接加工を多用した。基板へのフロン配管溶接では、基板が予想以上に歪むことが製作途中で分かった。そのため、溶接加工は当初予定より溶接ビード長は短く、ビード間隔は大きくする変更を行った。それでも基板とフロン配管の間には、溶接歪みによって狭い隙間が多く発生した。

イオン衝突器の製作の際、イオン衝突板および衝突板取付台は共に曲げ成形したが、成形角は両者とも設計曲げ角度と殆ど差がなく、問題なく組み立てることができた。基板への取付けでは、基板の歪みによりぶつかりが生じ、手直しを必要とする箇所もあったが、ほぼ順調に行うことができた。

基板へのイオン衝突器の取付け配置は、中心付近と周辺部でイオン入射角度の差が大きくなるように、中心付近は等辺型イオン衝突器を取付け、その外側に不等辺型イオン衝突器を稜線が基板中心に傾くように取付けた。また、軸対称になるべく近づくよう、基板を斜め45

度に四分割し、その左右は稜線が縦向きになるよう取付け、上下は横向きを取付けた。中心部の等辺型イオン衝突器取付け状態の外観を図13に示す。

現ターゲットとはほぼ同位置（図6参照）に熱電対を取付け、イオンエンジン定格作動時の温度を計測した。その結果、現ターゲットの基板各部の温度は約245 K～約265 Kで20 Kの温度差があったのに対し、新ターゲットでは約240 K～250 Kとなり、10 Kに縮小した。また、基板中心部の温度は約265 Kから約250 Kとなり、15 K低下した。これらは、基板板厚の増加およびフロン冷却配管間隔の縮小が有効であったことを示している。フロン配管温度は出入口で差はなく、ともに約230 Kであり、現ターゲットとの差も殆どない。

ところで、基板各部の温度はフロン配管の温度と比べ10 K～15 K程高い。フロン出入口温度に差がないことは、フロン冷凍機の冷凍能力には十分余力があることを示す。これは、フロン配管と基板の熱接触抵抗を小さくすれば、

基板温度を更に下げることが可能であることを示唆している。

フロンガス漏れについて試験再開前に4重極質量分析計で測定したところ漏れがないことを確認した。クライオパネルの汚染については、イオンエンジンを約650時間作動した後、クライオパネルを目視したところ、汚染されていることが判明し、他にも汚染源がある可能性を示唆した。

5.2 イオン衝突板に表面荒れ発生

新ターゲット設置後のイオンエンジン作動約880時間経過後に、イオン衝突板表面が凹凸を伴って激しく荒れている箇所があることを発見した。表面荒れが生じた箇所の部分拡大概略図を図14に示す。表面荒れ状態を比較するため、表面荒れが生じた衝突板と新品の衝突板を図15に示す。表面荒れが生じた箇所は、ターゲット中心部の稜線が横向きを取付けてある等辺型イオン衝突器であり、衝突板の上側表面で生じている。

稜線を横向きを取付けたイオン衝突板で表面荒れが生じ、縦向き取付けのものでは表面荒れは見られない。更に前者でも特に上側の面だけが極端に荒れている。これ

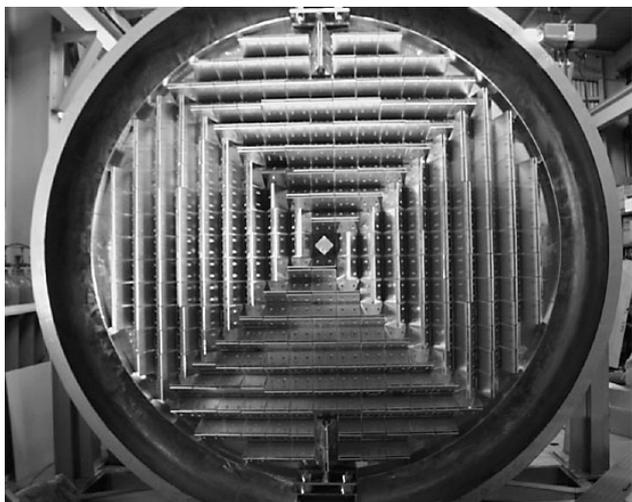


図12 新ターゲットの外観

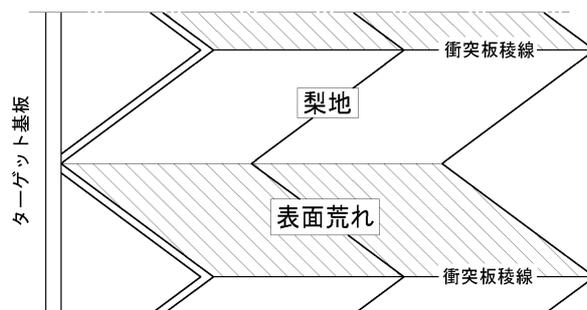


図14 1次イオン衝突板の表面荒れ発生箇所の概略図

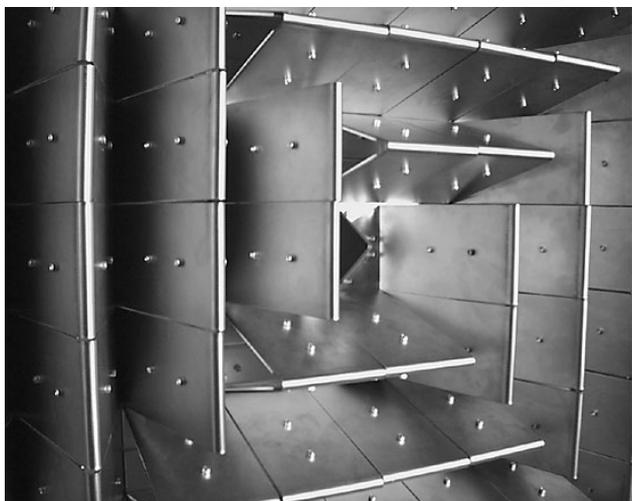


図13 中心部の1次イオン衝突器取付けの外観

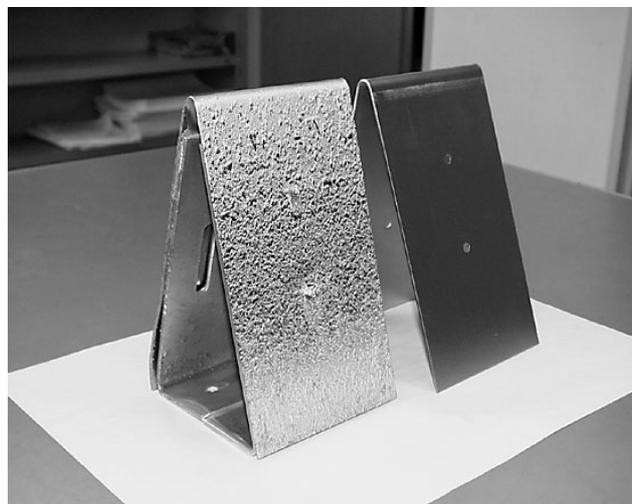


図15 表面荒れが生じた1次イオン衝突板（左）と新品（右）

らのことから、表面荒れの原因を推定した。ある衝突板でスパタされたチタンは、それと向かい合った衝突板の表面に付着する。上側（上向き）の衝突板上では、付着したチタンがそのまま蓄積されるとともに、更にそれと向かい合った下側（下向き）の衝突板からも付着チタンが落下し、チタンの蓄積が増加する。イオンエンジン試験の経過とともに、蓄積したスパタチタンにイオン衝突が加わり、イオン衝突板の凹凸は更に拡大した。

凹凸はイオンエンジンへのスパタ物質の飛来量を増加させる。そのため、この状態を放置して試験を続行するのは問題となった。

第6章 新ターゲットの改修と製作結果

新ターゲットで採用したイオン衝突器のイオン衝突板に生じた表面荒れを解消するには、衝突板の取付け方を縦向きに変更する必要があった。特に激しい表面荒れは、等辺型イオン衝突器が取付けてあるターゲット中心部で生じているので、少なくともこの部分は縦向きに変える必要があった。更に、イオン入射角について再検討したところ、イオンエンジンへのスパタ物質飛来量を少なくするには、頂角をより鋭角にする必要があることが分かった。

イオン衝突板のチタン板を、更に鋭角に曲げることは製作上困難であり、同じ構造にはできないので、新たにイオン衝突器を設計・製作することにした。新ターゲットで採用したイオン衝突器を1次イオン衝突器と呼び、

新たに設計・製作したものを2次イオン衝突器と呼ぶ。

2次イオン衝突器の製作およびフロン配管と基板の熱伝達を強化するため、新ターゲットの改修を行った。

6.1 2次イオン衝突器の設計・製作

2次イオン衝突器の構成は、1次イオン衝突器と同じで、イオン衝突板と衝突板取付台からなる。2次イオン衝突板は、1次イオン衝突板のように曲げ加工では成形できないので、両者を平板の組合せに変更した。頂角は30度から約22度に変更し、各衝突板取付台の角度を変えることで、全ての衝突器に対するイオン入射角が約11度に収まるようにした。2次イオン衝突器を組合せた構成を図16に示す。

図16で示すように、2次イオン衝突器は基板の鉛直中心線を境にして左右対称に並べ、衝突器の稜線を縦向きにして基板に取付ける。1次イオン衝突器で衝突板の表面荒れが目立ったのは、衝突器型が変わる境界線の内側（等辺型の範囲）であったので、その範囲に対応して2次イオン衝突器の取付け数は13列とした。

2次イオン衝突器の詳細を説明するため、中心列と第6列の衝突器を図17に示す。衝突板取付台は1次と同形状で、イオン入射角を小さくしたので背がより高くなり、熱伝導を考慮して板厚を4mmから5mmに変更した。イオン衝突板から衝突板取付台への熱伝導は、曲げ成形した1次衝突板に比較して衝突板取付台との密着性が増し、大幅に改善した。

2次イオン衝突器を基板に取付けた状態のターゲットの

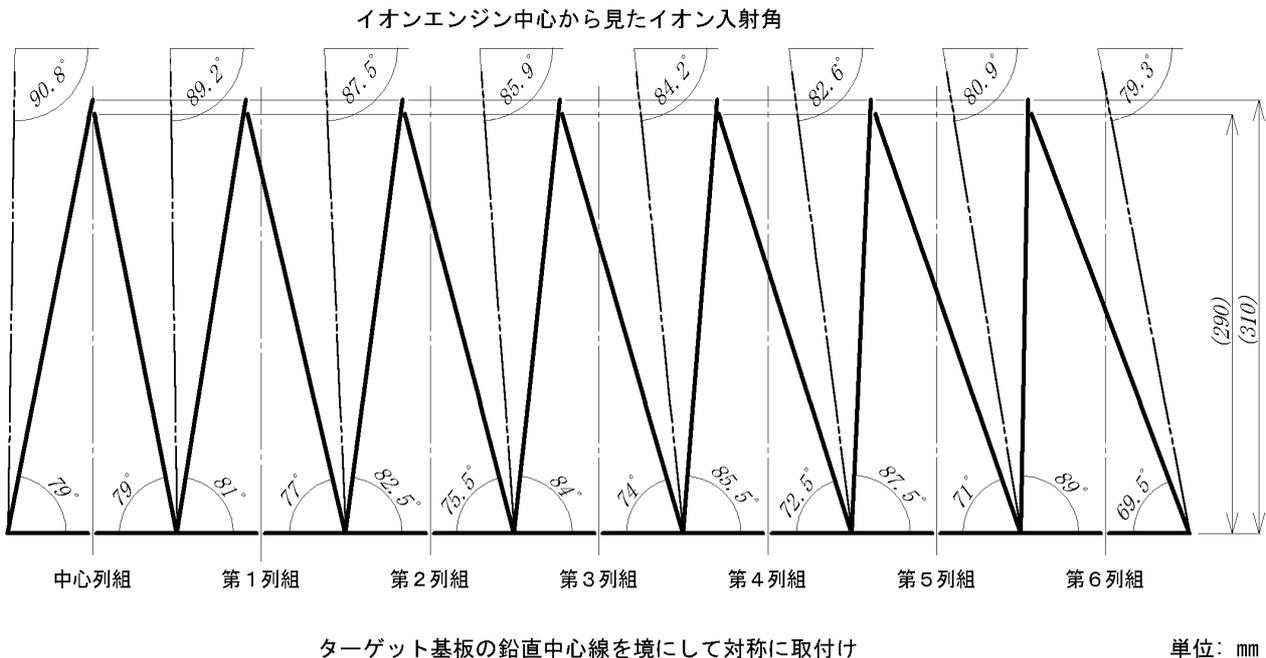


図16 2次イオン衝突器の取付け配置図

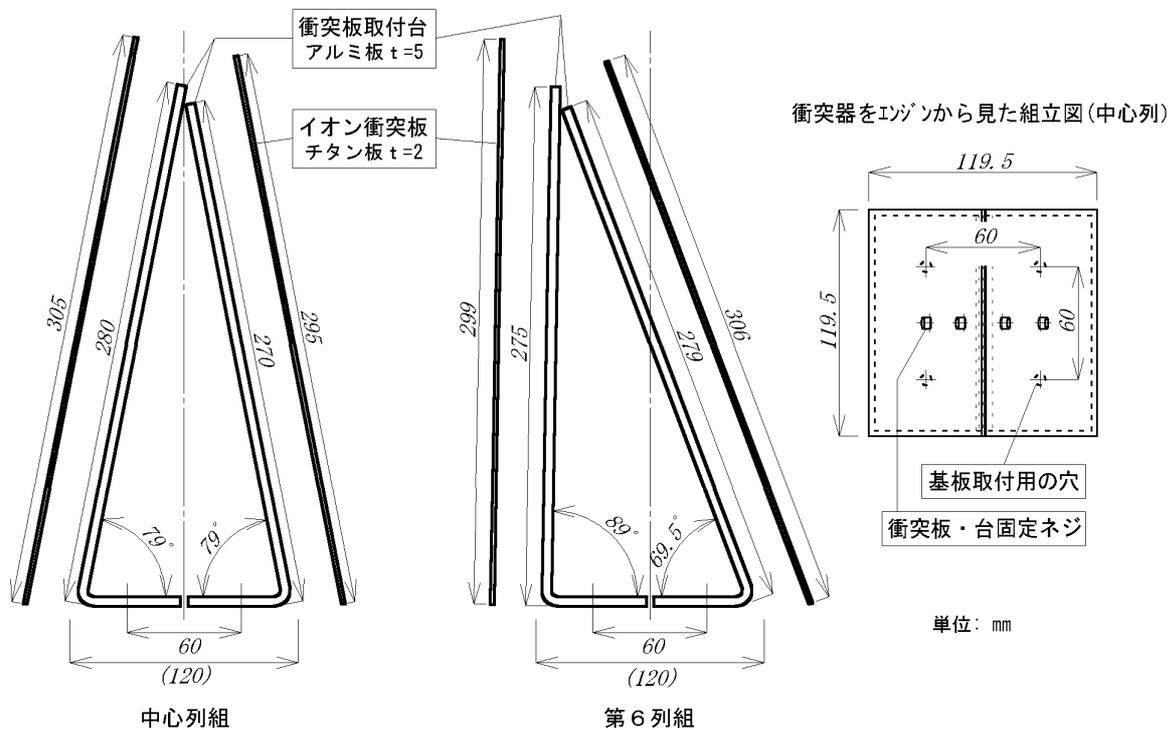


図17 2次イオン衝突器の詳細図

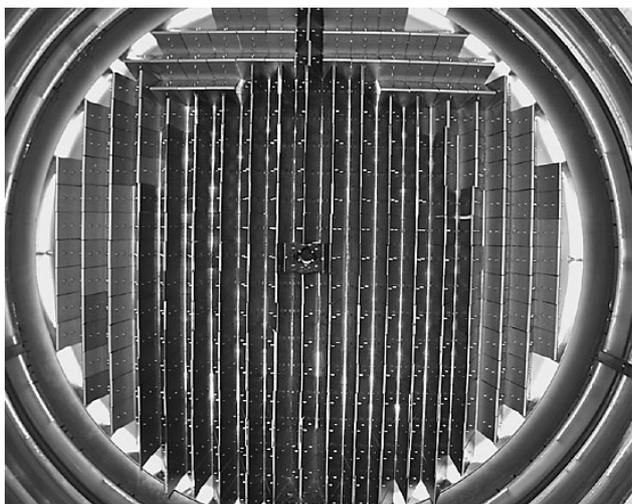


図18 新ターゲット改修後の外観

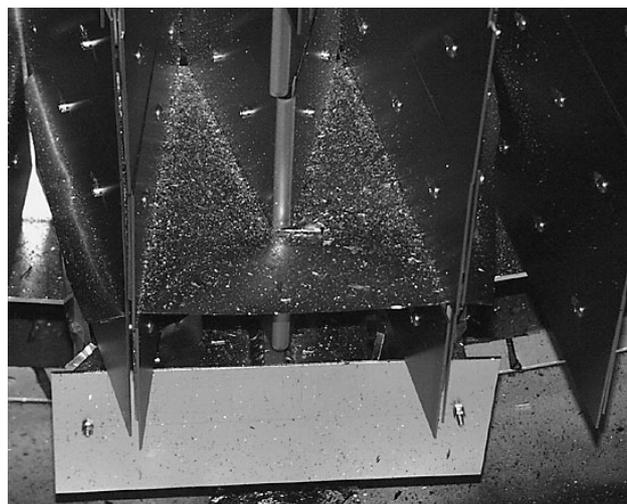


図19 落下チタンの蓄積状況

外観を図18に示す。2次イオン衝突器においてはイオン衝突板を平板の組合せで構成したので、取付け作業性は大きく向上した。

2次イオン衝突器の取付けを縦向き列としたことにより、スパタされたチタンがターゲットの下部固定金具の周辺に降り積もると予想された。ターゲットの電気絶縁を確保するために、衝突器の隙間にステンレス薄板を挿入する簡便な対策を施した。

2次イオン衝突板の表面状態をイオンエンジン作動約860時間後に目視したところ、表面は梨地状であり、凹凸

は全く見られなかった。衝突器の取付けを縦向きに変更したことは正しい選択であった。

スパタチタンの降り積もり状況を図19に示す。この状況から察すると、長期間のイオンエンジン作動でターゲットの電気絶縁は取れなくなる可能性が大きい。ステンレス薄板挿入による対策も十分でない心配があり、この問題への対策は今後の課題となった。

6.2 フロン配管の熱伝導の補強

フロン配管の基板への溶接の際に、予想以上の歪みが

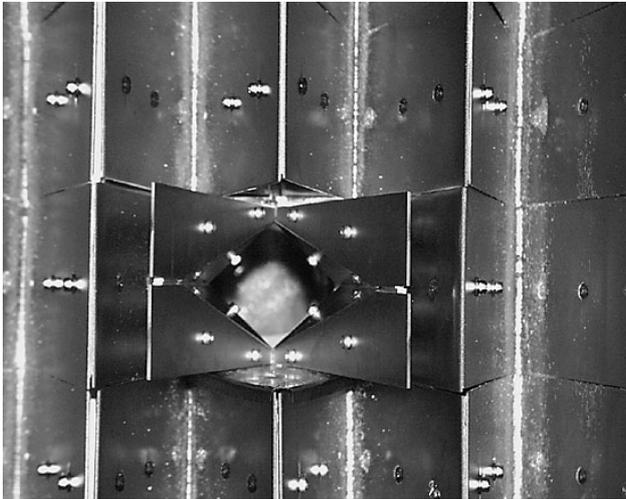


図20 中心専用イオン衝突器の外観

現れたため、歪みを抑えるために溶接ビード間隔を広げる等の設計変更をした。にもかかわらず、基板と配管との間に隙間が生じた。そこで、熱伝導の補強策を取った。補強策は、角形状のフロンの配管に合わせた配管カバーを銅板（板厚2mm、幅80mm）で製作し、これを基板にネジ留めした。本補強策は有効に働き、イオンエンジン作動時の基板各部の温度を約5K低下させることができた。

6.3 中心専用イオン衝突器の考案

イオンエンジン作動状態を観察するため、基板の中心に正方形の穴が45度傾けて設けてある（図7参照）。ターゲット中心部はイオンビーム密度が高く、この穴の四隅は基板が露出しており、イオン攻撃によるスパタの飛散増とそれに伴う基板の損耗が生ずるため問題であった。そこで、イオン斜め入射を取り入れた穴の四隅を覆う中心専用イオン衝突器を考案した。構造的には前記のイオン衝突器と同様で、アルミとチタン板の組合せである。形状を決めるに当たって、加工が楽なバルサ材を用いて立体模型を作った。本衝突器を基板に取付けた状態の外観を図20に示す。

第7章 1次及び2次イオン衝突器でのイオンエンジンのスパタ汚染比較

1次イオン衝突器の頂角は30度であり、2次イオン衝突器の頂角は約22度であった。頂角を小さくし、これによってイオン入射角を小さくした効果について検証するため、1次イオン衝突器と2次イオン衝突器のスパタ物質の飛来量を測定し比較した。

測定は水晶振動子式膜厚計（アルバック製 CRTM-1000）を用いて行った。図21に示すように、ターゲット

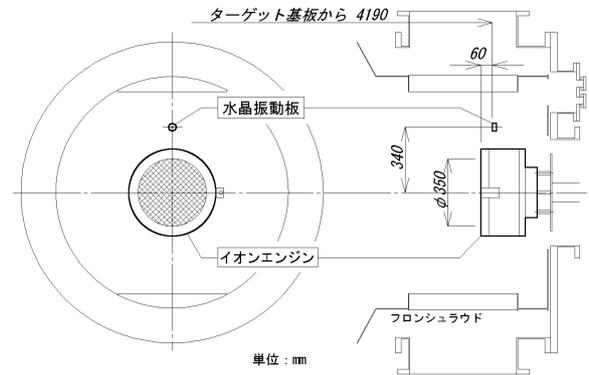


図21 水晶振動板の取付け位置図

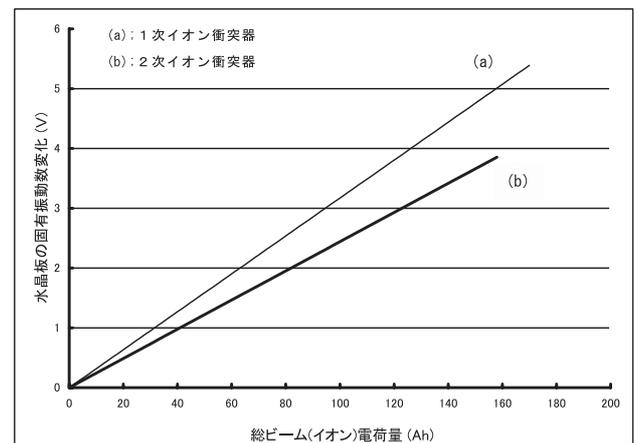


図22 水晶板へのスパタ物質付着測定の結果

の基板表面から約4190mmの位置で、イオンエンジンの加速電極面よりやや後方に、膜厚計の測定子である水晶振動板をターゲットに向けて取付ける。スパタ物質の飛来量は水晶振動板にスパタ物質が付着することによる固有振動数の変化で計測した。

測定結果を図22に示す。横軸はイオンエンジンが噴射した総ビーム（イオン）電荷量で、縦軸は水晶振動板の固有振動数の変化を電圧で表す。(a)は1次イオン衝突器で、(b)は2次イオン衝突器である。

その結果、スパタ物質の付着速度は1次イオン衝突器は3.17nm/Ahであり、2次イオン衝突器は2.44nm/Ahであった。2次イオン衝突器は1次イオン衝突器に比べ23%減少し、イオン入射角を小さくしたことによる効果を実証した。

第8章 まとめ

今回の新ターゲットの製作で、イオン衝突器の表面荒れの発生や予想以上の溶接歪みの発生等が生じた。そのため、新ターゲットについても改修することになった。

これらから、当初の目的であった個々の問題点の解決を含め、ターゲットの製作手法について大きな知見を得ることができた。

新ターゲットの製作結果を個々の問題点毎にまとめると次のようになる。

(1) イオンエンジンのスパタ物質汚染軽減のため、イオンの斜め入射を取り入れ、イオン衝突による損耗と発熱対策を加味したイオン衝突器を考案した。イオンエンジンへのスパタ物質の飛来量は、イオン入射角を小さくした2次イオン衝突器では1次と比べ23%減少した。イオンビームの斜め入射の有効性が再確認できた。

(2) 1次イオン衝突器でイオン衝突板表面に凹凸を伴う表面荒れが生じた。その原因は、横向きに取付けた衝突器では、スパタ物質が表面上に蓄積することにあると推定し、2次イオン衝突器は縦向きに取付け方に変更した。その結果、表面荒れはなくなり、イオン衝突面はスパタ物質が蓄積しない構造とすることが重要であると分かった。

(3) 新ターゲットの改修実施後に、150 mN 級イオンエンジンを約860時間作動させたところ、クライオパネルの汚染は引き続いていたが、この間真空度に変化は見られなかった。その理由として、1) イオン衝突板からの放射が減り、クライオパネルへの熱入力が減少したこと、および2) 新ターゲット製作中に実施した50 Kヘリウム冷凍機の保守によって、冷凍機の能力が若干向上したことが考えられる。1)に関しては、フロン配管間隔の縮小や熱伝導の補強策を実施した新ターゲットの基板各部の温度は、現ターゲットより約25 K低下させることができた。これは、基板からフロン配管への熱伝導が改善されたことを示す。これにより、イオン衝突器の温度が低下し、更にそれに伴ってイオン衝突板の温度も低下していると推測できる。

(4) ターゲットの製作において、当研究所のイオンエンジン試験装置に適合するターゲットでは、強度、加工性、質量等を考慮すれば基本構造材としてはアルミが最適素材である。アルミ材は溶接時の歪みが避けられないので製作方法等について更に十分な検討を加える必要がある。

当研究所のイオンエンジン試験装置は、イオンエンジン研究が発展する中で先駆的に開発してきた。そのため、現イオンエンジン試験装置にはターゲットの他にも様々な改良すべき箇所がある。その箇所についても改修を行い、その成果を次期イオンエンジン試験装置に反映させていく予定である。

付録 150mN 級イオンエンジン

本イオンエンジンの概略を図23に、移動取付台に取付けた状態のイオンエンジン外観を図24に、主要諸元を表

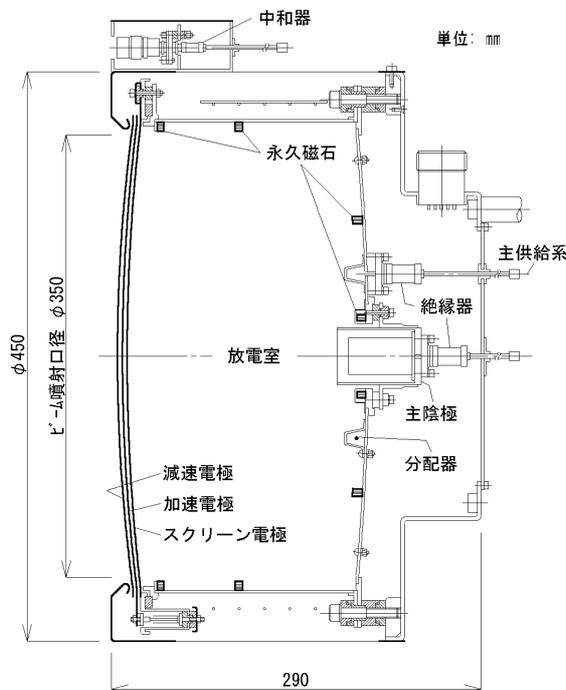


図23 150 mN 級イオンエンジンの概略図

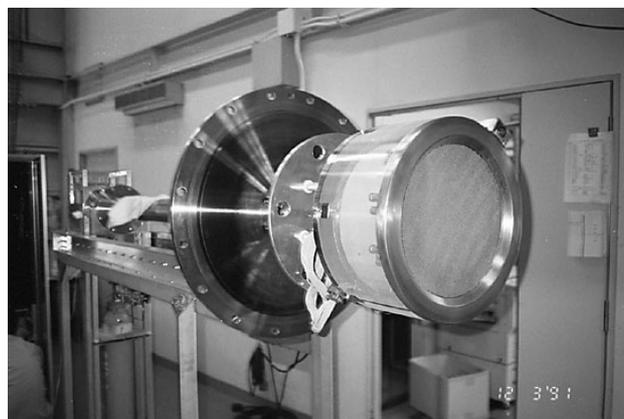


図24 150 mN 級イオンエンジンの外観 (移動取付台)

表2 150 mN 級イオンエンジンの諸元

項目	値	項目	値
推力, mN	150	ビーム電圧, V	1030
比推力, s	3518	ビーム(イオン)電流, A	2.88
消費電力, kW	3.29	加速電極電圧, V	300
イオン生成コスト, W/A	104	加速電極電流, mA	12.7
推進剤利用効率, %	90.0	減速電極電圧, V	0
		減速電極電流, mA	7.0
推進剤流量, mAeq	3250	放電電圧, V	30.0
放電室	3200	放電電流, A	12.9
中和器	50	中和器キープ電圧, V	22.8
		中和器キープ電流, A	1.0

2に示す。

イオンエンジンの作動は次のように行われる。主陰極および主供給系から放電室内に推進剤のキセノンを導入する。主陰極から熱電子を放出させ、これを陽極電圧で加速し、キセノンに衝突させることでキセノンを電離し、放電室内にプラズマを生成させる。そして、スクリーン電極 (+1000 V) と加速電極 (-300 V) の両電極で、放電室内のプラズマ中からイオンのみを抽出し、高速噴射させることで推力を得る。

放電室内部に環状に配置してある永久磁石は、その極性を交互配置することでカスプ磁場を作り出し、放電室内プラズマの壁面への損失を低下させる働きを持つ。

主陰極及び中和器の内部には熱電子放出を司るインサートが入っている。インサートは酸化バリウム等を含浸させた焼結金属でできている。インサートは湿気等により熱電子放出性能が劣化するため取扱いに注意を要する。

中和器は主陰極とほぼ同じ構造であり、噴射されるイ

オンビームとほぼ等電荷の電子を放出し、イオンビームを電氣的に中和するとともに宇宙空間で衛星が負に帯電することを防ぐ働きを持つ。

減速電極は加速電極の寿命を延ばすために用い、イオン加速には関係しない。

参考文献

- 1) 宮崎, 他: 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, TR-1198, 1993.4
- 2) 早川, 他: キセノンイオンエンジン試験用クライオパネルの開発, TR-981, 1988.6
- 3) 北村, 他: イオンエンジン試験用真空装置におけるバックスパタの低減, 94年度宇宙輸送シンポジウム, 1995.2

独立行政法人 航空宇宙技術研究所資料 778 号

平成15年8月発行

発行所 独立行政法人 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 (0422)40-3935 〒182-8522
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

©2003 独立行政法人 航空宇宙技術研究所

- ※ 本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。
- ※ 本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、情報技術課資料係にご連絡下さい。
- ※ 本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。



Printed in Japan

