

6.5. 大型ホールスラスト用真空装置の 整備と運転状況

宇宙航空研究開発機構

研究開発部門 第二研究ユニット /

JAXA ホールスラスト研究開発チーム

張 科寅 氏

1

大型ホールスラスタ用真空装置の整備と運転状況

JAXAホールスラスタ研究開発チーム
(発表者：JAXA 研究開発部門 張科寅)

謝辞

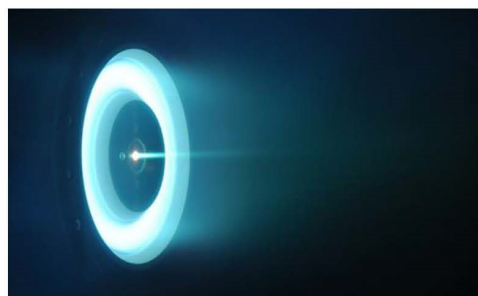
2

本試験設備の整備にあたり、多大なご協力をいただいた、以下の関係者の方々に感謝いたします(順不同)。

- IHI/IHIEアロスペース ホールスラスタ研究開発担当各位
- 日本シード研究所各位
- JAXA技術試験衛星9号機プロジェクトチーム各位
- JAXAホールスラスタ研究開発チーム各位
- JAXA國中研各位



ETS-9 All-electric Satellite



6 kW Hall Thruster for ETS-9

概要

3

- 技術試験衛星9号機用ホールスラスタ開発
- 大型ホールスラスタ用真空装置の特徴と仕様
- 装置設計
 - ・真空排気系
 - ・冷却系
 - ・スパッタ対策
- 初期稼働実績
- まとめ

技術試験衛星9号機用ホールスラスタ開発概要

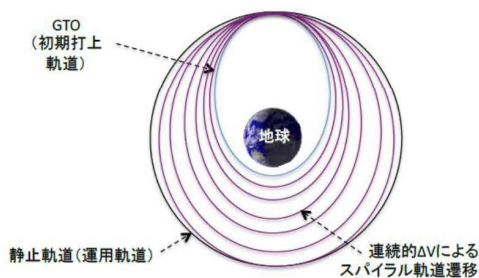
4

IA/IHI/TMU/JAXAが協力し、全電化衛星向けホールスラスタの研究開発を推進中
背景

- ・ 全電化衛星が702SPにより実証
- ・ 高Ispでかつ軌道遷移期間が短いホールスラスタによる全電化衛星が市場を占拠しつつある (SPT-140, PPS-5000, XR-5)

目的

- ・ 技術試験衛星9号機プロジェクト(ETS-9)としては、全電化電気推進は日本として保持すべき中核技術として、国産ホールスラスタサブシステムを軌道上実証
⇒スラスタの開発試験に供するため、大型ホールスラスタ用試験設備をJAXA相模原に整備



全電気推進衛星^{*1}

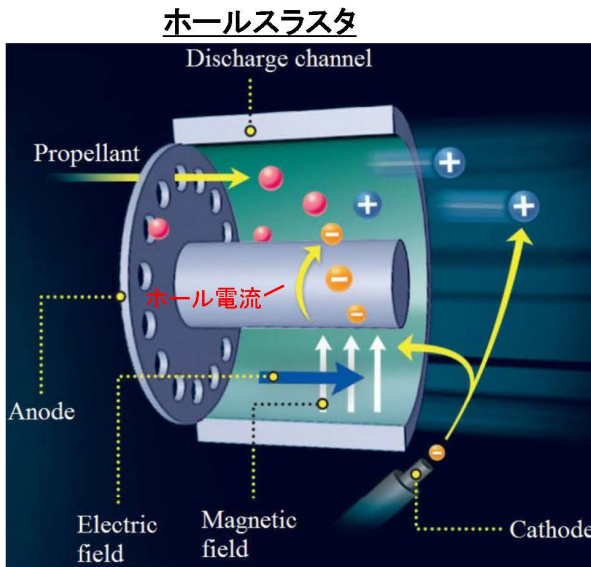
	Orbit Raising (OR)	North-South Station Keeping (NSSK, SK)
トータル供給電力 (kW)	6	1.8
放電電圧 (V)	300	400
推力 (mN)	BOL	≥ 359
	MOL	≥ 330
	EOL	-
比推力 (s)	BOL	≥ 1710
	MOL	≥ 1573
	EOL	-
総インパルス (MNs)	≥ 4.72	≥ 2.33
作動時間 (hrs)	≥ 3803	≥ 8564
サイクル数 (cycles)	≥ 132	≥ 5844
放電電流変動0-p (%)	≤ 20	≤ 20

技術試験衛星9号機用ホールスラスタの開発仕様

*1 田代洋輔, 他, “全電化衛星向けホールスラスタの開発状況”, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 1105, 2016

ホールスラスタの作動原理

5



イオンエンジン

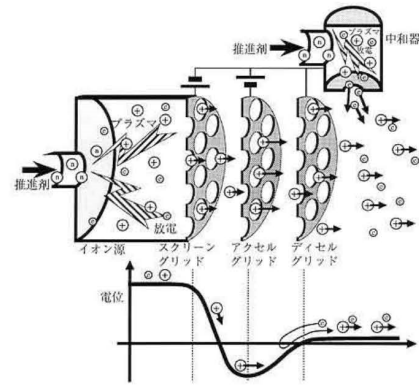


図1 イオンエンジンの作動原理

ホールスラスタとは

- Grid-less ion thruster = グリッド(加速電極)がないイオンエンジン
- グリッドではなく、印可磁場によるHall current(ホール電流)によって推力を得る

ホールスラスタ用試験設備の特徴

6

Experimental study of a high specific impulse plasma thruster PlaS-120CM

IEPC-2015-154 / ISTS-2015-b-154

Presented at Joint Conference of 31st International Symposium on Space Technology and Science
34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium,
Fuyoo-Kobe, Japan
July 4 - 10, 2015

M.Yu. Potapenko¹, V.V. Gopanchuk²
FSUE EDB Fakel, Kaliningrad, 236001, Russia
D.V. Merkuriev³, P.G. Smirnov⁴
RIAME, Moscow, 125080, Russia

特徴①排気能力要求が高い:

- 多量の推進剤を排出しつつ高真空($\sim 10^{-3}$ Pa)を維持する必要がある
- 推進剤流量(~ 200 sccm@ETS-9 ORモード)は $\mu 10$ はやぶさいオンの数十倍以上

特徴②排熱要求が高い:

- スラスタ投入電力はすべてイオンビーム照射、または輻射で設備への入熱となる
- スラスタ投入電力(6kW@ETS-9 ORモード)は $\mu 10$ (300 W)の20倍

特徴③イオンビームスパッタ対策が必要:

- 高エネルギーのイオンビーム照射を受け止めるターゲット材が必要
- 高エネルギーのイオンビーム照射は、ポンプやスラスタ自身へのターゲット材のスパッタ蒸着を引き起こす(推定 $\mu 10$ の20倍)

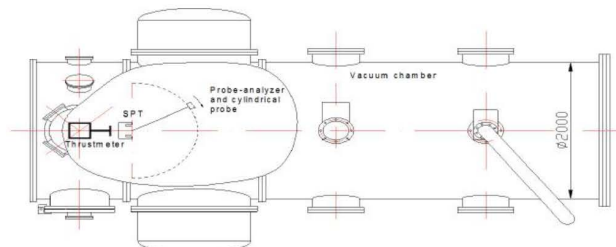


Figure 3. Y-2B-2 vacuum chamber scheme for PlaS-120CM firing test

Overall view of the PlaS-120CM ser.01 mounted on the thrust measurement equipment with the probe movement device in vacuum chamber is shown in figure below.



Figure 4. PlaS-120CM ser.01 in vacuum chamber of the Y-2B-2 test facility with the probe movement device

世界の主な電気推進試験設備

表 5.1 世界の電気推進研究開発用真空装置^{(3)-(5),(7),(8)}

組織/真空タンク	サイズ [m]	排気方式	キセノン排気	主なスラスタ
NASA Glenn Research Center				
VF6	φ7.6×L22	油拡散	390 kI/s	SERT II
VF5	φ4.6×L19	油拡散+クライオ	1 700 kI/s	
NASA Jet Propulsion Laboratory				
148-1	φ3×L10	クライオ	100 kI/s	NSTAR
248-1	φ4×L12	クライオ	200 kI/s	NSTAR
University of Michigan				
LVTF	φ6×L9	クライオ	140 kI/s	
L3 Communication				
	φ6×L12	クライオ	1 000 kI/s	XIPS
ESA ESTEC	φ4×L2		153 kI/s	
Giessen University				
Jumbo	φ3×L6	油拡散	50 kI/s	RIT10
JAXA				
筑波	φ4×L5	クライオ	200 kI/s	MELCO 12
調布	φ3×L5	クライオ		
相模原	φ2×L5	クライオ		

MELCO(鎌倉) φ3 × L5(*) クライオ 125kI/s(推定) 国産250 mN
 (*:ホール~ターゲット間距離=2.5m)



大学	真空チャンバ	排気量(l/s) *
東大	φ 2.0 m × L 3.0 m 学科共用	37,000
	φ 1.4 m × L 3.0 m 共同利用	12,000
大工大	φ 1.2 m × L 2.3 m 専有	10,000
岐阜大	φ 1.0 m × L 1.8 m 専有	8,400
九大	φ 1.0 m × L 1.2 m 専有	4,200

出典

イオンエンジンによる動力航行(2006.12 コロナ社)
 JSASS-2010-4045,2012-4204、ALTA社website
 ホールスラスタ2012年度研究成果報告(JAXA In-Space Workshop)

7

主な仕様

8

サイズ

- 内径 3.0 m, 直胴部長さ 8.0 m

耐久試験目標稼働率

- 70%

排気能力関係

- 2×10^{-6} torr以下の到達真空度
- キセノン(Xe)流量40mg/sにて 3×10^{-5} torr以下
⇒ETS-9開発要求に対し約2倍のマーヅン

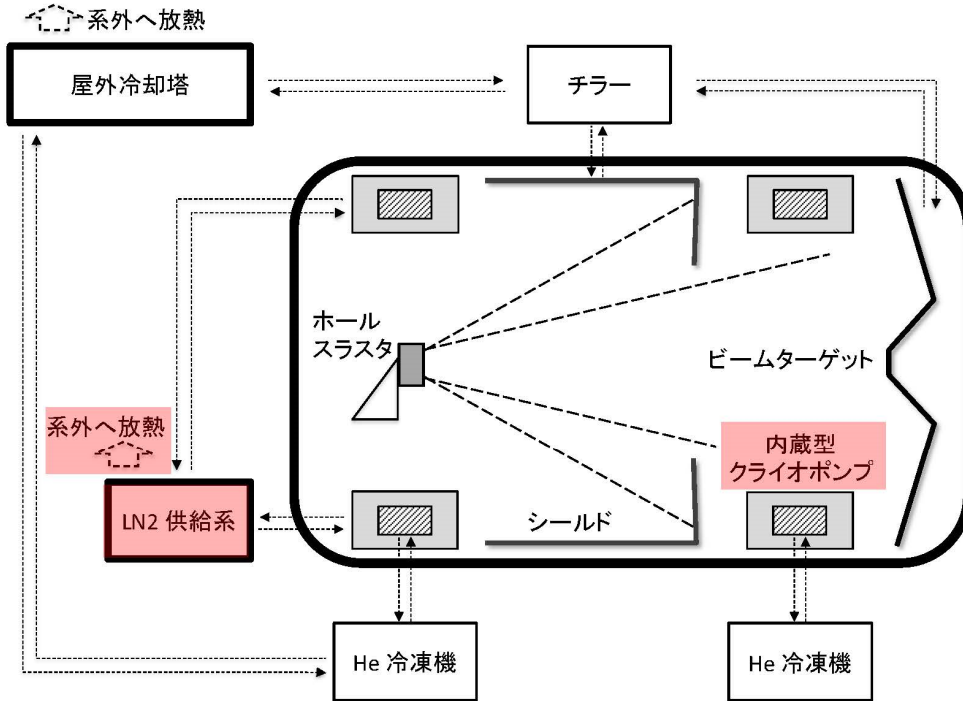
排熱関係

- 10 kWの排熱能力
⇒ETS-9開発要求に対し約2倍のマーヅン
- LN2を一切用いないシステム
⇒真空排気系の設計で後述
- 水冷シュラウド、クローズドループ水冷系
⇒排熱系の設計で後述

イオンビームスパッタ対策関係

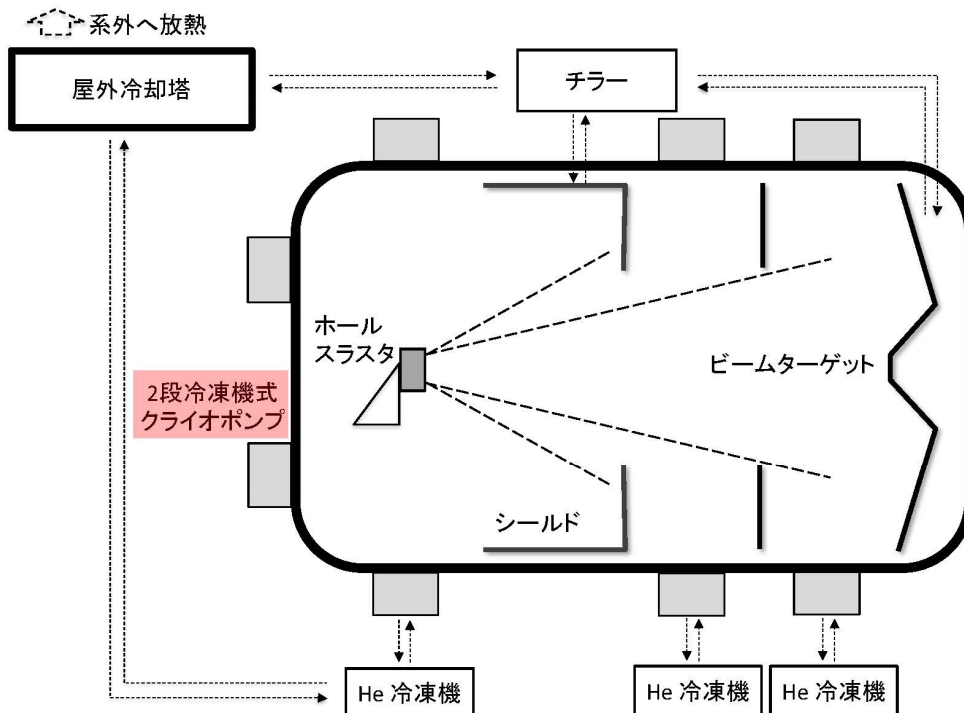
- ターゲットおよびイオンビーム照射部はすべてチタン材で保護すること
⇒スパッタ対策で後述
- チタン材は容易に交換可能な構造

真空排気系(LN2冷却式内蔵型, 海外設備のほとんどで採用)



9

真空排気系(LN2不使用外付型, 本設備で採用)



10

真空排気系(トレードオフ)

11

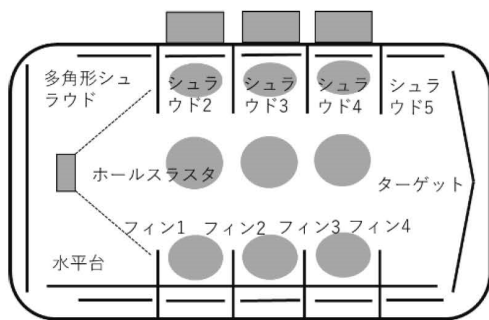
	LN2不使用外付型		LN2冷却式内蔵型	
運用面	運転・停止が簡単	○	LN2設備の管理が必要	△
フットプリント	ポンプ1台につきコンプレッサー2台必要	△	LN2管理設備が必要	△
試験頻度	冷却・昇温の1サイクル~10h	○	冷却・昇温の1サイクル~20h	△
性能	排気量中 熱負荷に弱い	△	排気量大 熱負荷に強い	○
初期コスト	中	△	小	○
運転コスト	中	△	大	×
保守コスト	中	△	小	○
不具合・故障時の対応	国内メーカーによる迅速な対応 複数の既存ISAS設備で同じ排気系を用いており、予備品を共有可	○	米国からの輸入品であり、復旧作業の長期化が懸念される	×

LN2不使用外付型を選定

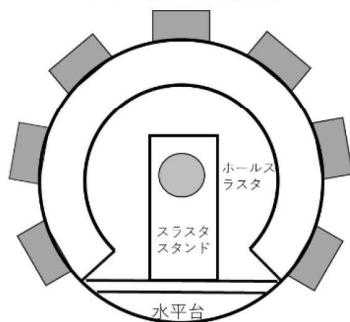
- ・ 累積10,000時間級の耐久試験が開発で求められていることから、設備稼働率(不具合対応、運用面)と運転コストのメリットを重視
- ・ 性能面は、予備ポートの用意と、熱設計の工夫でカバー

真空排気系(ポンプ配置)

12



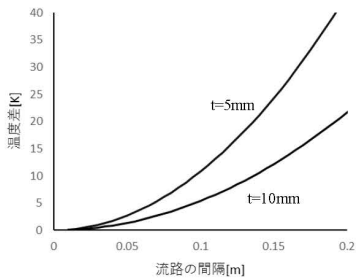
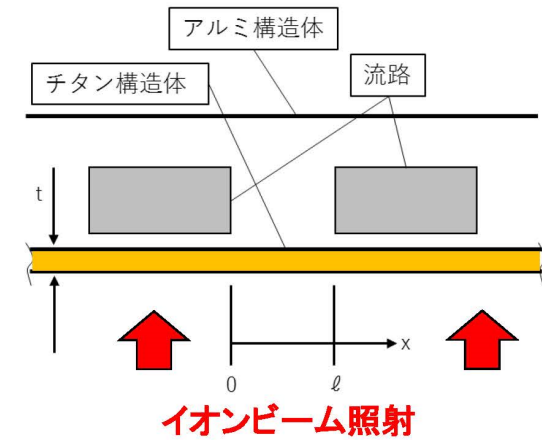
クライオポンプ(1列7台)



- ・ U30Hクライオポンプを周方向に7台×3列の計21台
- ・ 要すれば追加できるよう、4列目に7台分の予備ポート
- ・ 各列のポンプをビーム照射から保護する(隠す)よう、シールド(フィン)を配置
- ・ ポンプを配置しないチャンバ底面は、作業性や位置出しのため水平台を配置
- ・ U30Hクライオポンプへの輻射入熱をコントロールするため、ポンプから視野角があるシュラウド、シールド、ターゲット、水平台のすべてを隅々まで常温以下に水冷

チャンバ内水冷部設計

13



要求

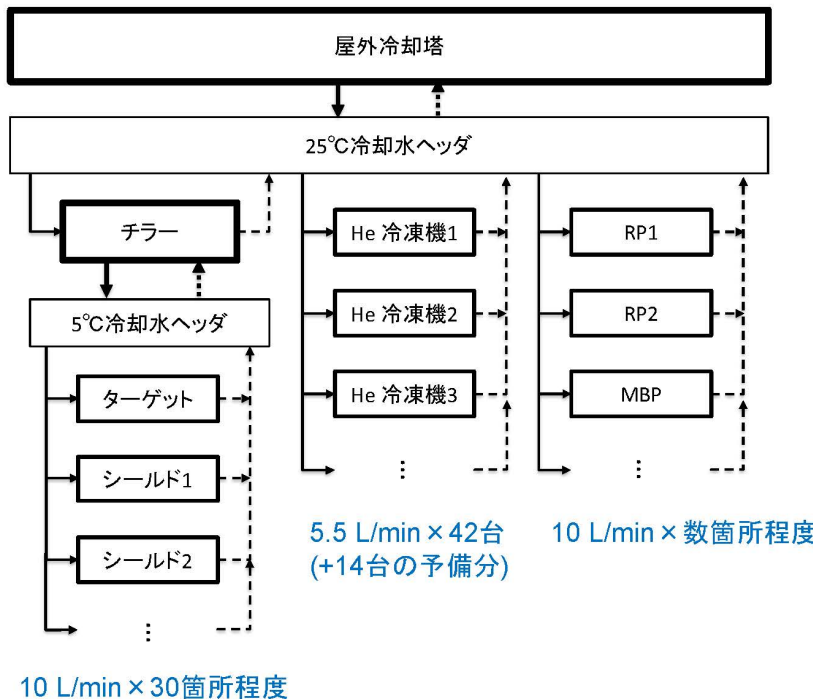
- シュラウド、シールド、ターゲット、水平台のすべてを“隅々”まで常温(20°C)以下に水冷
⇒ポンプが直視するのはビーム照射を受けるチタン板であり、その表面温度を20°C以下にする必要がある
⇒一方で、スパッタ対策のため、チタン板は容易に交換可能な構造にする必要がある

設計

- 流路を埋め込んだアルミ構造体に、チタン板をボルト締結する構造とした
- アルミ/チタン間の熱伝達はボルトの軸力により面圧を確保。要素試験を実施して確認
- 流路間隔による温度上昇を5°C程度に抑制するため、流路間隔を10 cm程度以下とした
- 冷却水温度は5°Cとした

水冷系概要

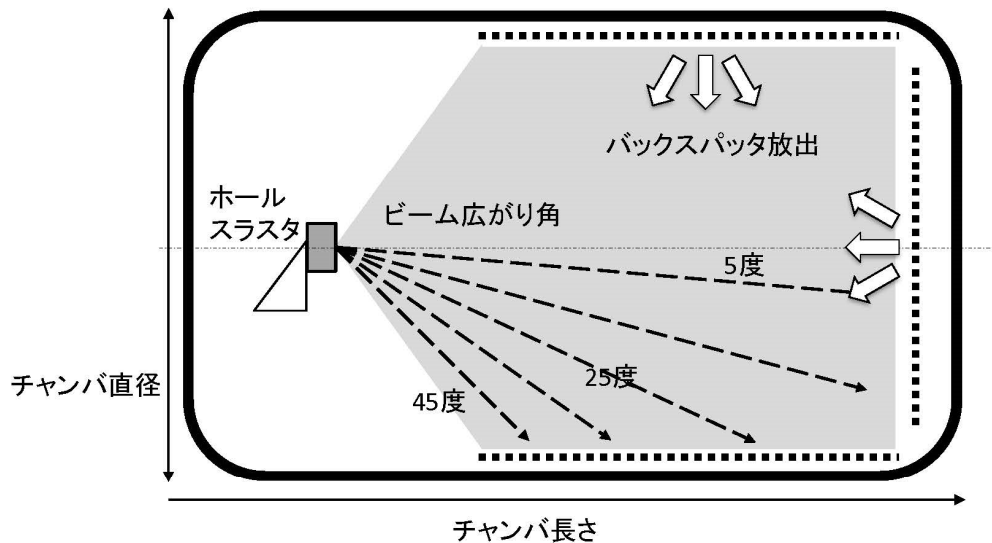
14



必要な水温管理の差により、2つの閉ループ水冷系を有する

- チャンバ内水冷部用の5°Cループ
⇒チラーにより精密な水温管理
- 真空ポンプ類や上記チラーの抜熱用の25°Cのループ
⇒大容量の屋外冷却塔(到達水温はある程度環境依存)

ターゲット材のスパッタ蒸着

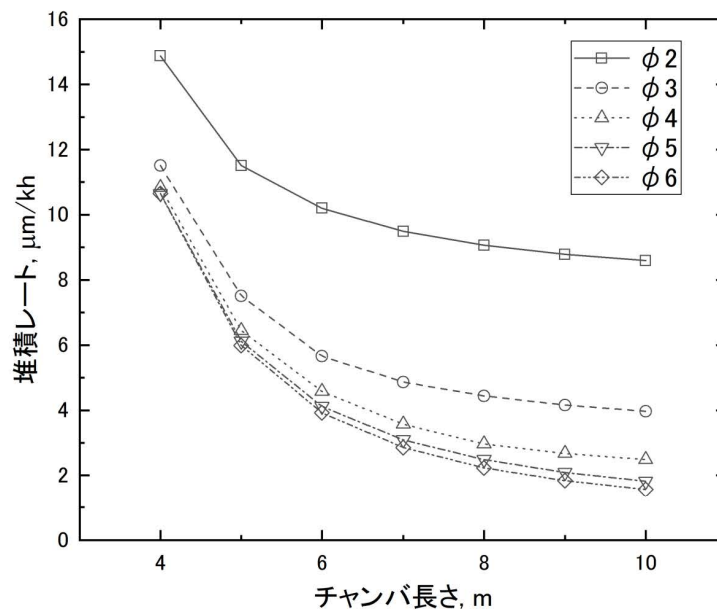


- はやぶさ耐久チャンバでの実績と、スラスタで用いていないことから、ターゲット材はTiを選定
 ⇨ 海外はほとんど耐スパッタ性に優れるCグラファイトを使用。Cはスラスタで用いる材料であること、蒸着するとポンプへの入熱が増加することから、採用せず
- スラスタへのTi蒸着量 << スラスタの損耗量 (~100 $\mu\text{m}/\text{kh}$) が目標

15

スパッタ蒸着モデルと実測値

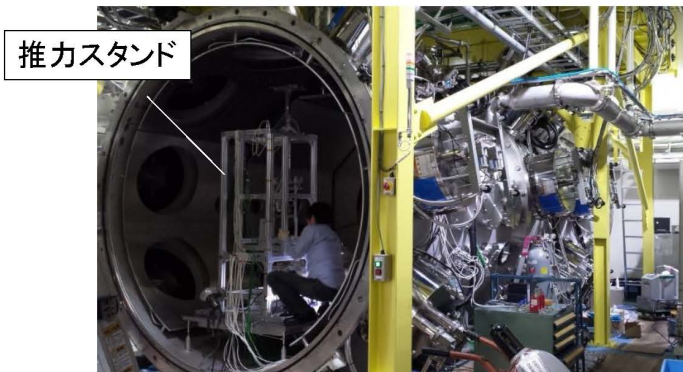
16



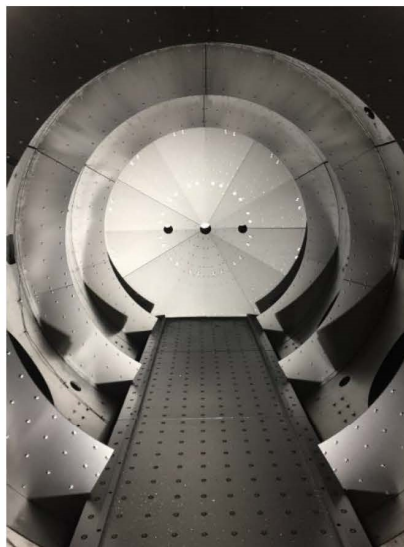
- スラスタへの蒸着量(堆積レート)をイオンビーム分布からモデル化し、NASA JPL実績で校正
 - チャンバ径、長さが大きい程低減できるが、諸制約あり、φ3m × 8mでも十分に低い蒸着量
 - 結果として、スラスタ耐久試験での実測値と概ね一致することを確認できた
- ※Tiの蒸着量はCの2倍程度

2017年11月竣工のチャンバ内外景

17



推カスタンド



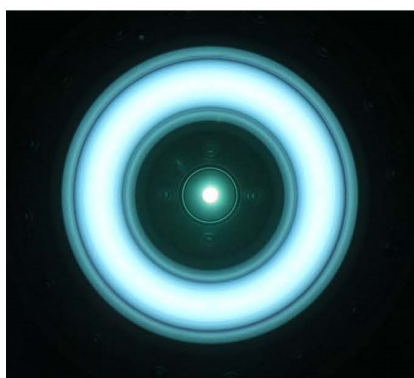
ビームターゲットとシールド



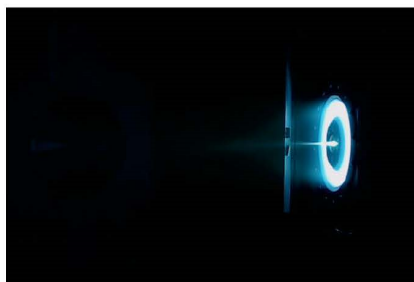
U30H クライオポンプ

2017年11月竣工のチャンバ内外景

18

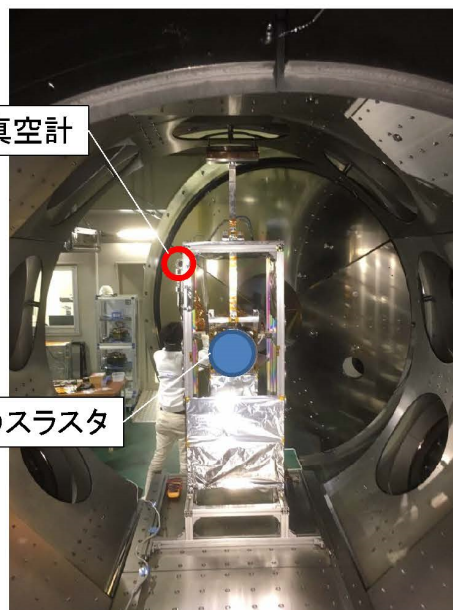


DTチャンバで作動中のスラスタ



耐久試験中のスラスタ

内部電離真空計



まとめ(仕様と実績の比較)

19

ETS-9ホールスラスタ開発のため、JAXA相模原キャンパスに大型ホールスラスタ用試験設備を整備した

- FY2018の4~10月の7カ月(~5,000時間)で累積作動時間3,000時間を達成
- 稼働率が目標の70%未達である原因は、初回のMDC試験を慎重に進めるため、500~1,000時間ごとにスラスタの分解点検(0.5カ月/回)を実施したことによるところが大きい(夏場に相模原地区の消費電力超過のため、0.2カ月装置を止めるなどのトラブルもあった)⇒EM以降の開発試験では、分解点検回数を減らして加速予定
- 設備不具合による数日以上以上の停止はなく、初期運用としては概ね順調であった

質疑応答

質問者① 株式会社スペースゲート 齋藤様

発表ありがとうございます。筑波のイオンエンジンチャンバの経験からお話しさせていただくんですが、このチャンバはイオンそのものの回収というのはされないで、全部クライオポンプで吸着して後は再生して大気に出してしまう、そういう考え方になっているんでしょうか？

発表者

実は回収装置を実際に導入して運用しております。クライオポンプに溜め込んだキセノンを回収装置の方にもう一度ポンプで流し込んで回収しております。ただ実態として、出したキセノンを全て回収しているという運用にはなっていません。回収にそれなりに時間がかかる為、回収をしている分だけ試験が進みません。またキセノンが非常に高価なのでコストとスケジュールとのトレードオフになっています。

質問者①

分かりました。筑波の場合は結構トラブルが多くて、回収率が非常に悪かったのですが、しかし、今日のお話しを聞いていると安定して動いているみたいなので、上手くやれば回収できるのかなと思いました。ありがとうございます。

発表者

ありがとうございます。ホールスラストはイオンエンジンと比べてちょっと流量が多いというのもあって、比較的やり易いのだと思います。

質問者② 三菱電機株式会社 吉田様

ご講演どうもありがとうございました。私たちも熱衝撃を作るような装置で海外の液体窒素を使う装置を使っているんですけども、やはり凄く故障が多くて、その度に海外から呼んできて何か月も装置が止まってしまうということがありまして、とても興味深く聞かせていただきました。で、コストなんですけれども導入コストとかいっぱいポンプがいると思うんですけど、そういう設備の大きさとか、講演資料の11ページでは「中」とか「小」とか書いてありますが大体何倍くらいかかるものですか？

発表者

少なくとも今はっきりと言えることは、我々の試算の中では運転コストが、コストのカテゴリの中では非常に大きくて、運転コストだけで比較しますとLN₂使用型に比べて大体4分の1かそれくらいでした。というところで、記憶ベースになってしまうんですけども運転コストがとにかく安いもので、保守とか初期コストを考えたとしても1、2年で恐らく

元が取れそうだなという様な試算があって、それに基づいてこのような選択をしたと記憶しております。

質問者②

ありがとうございます。ここに書いてあるような1万時間を超えるとお得になるということによろしいでしょうか？

発表者

そうですね。1万なのか5千なのか3千なのかその辺りはあると思うんですけど、数千時間動かせば得になってくるといようなイメージで正しいと思います。

質問者②

量にもよると思うんですけども。ありがとうございました。