

JAXA 風洞センター高エンタルピー風洞における 試験領域の拡大について

藤井啓介、石田清道、水野雅仁、藤田和央(JAXA)
長井遵正、吉田哲生(AES)
酒井武治(名古屋大)

Expanding capability of JAXA 750kW arc heated wind tunnel

Keisuke Fujii, Kiyomichi Ishida, Masahito Mizuno, Kazuhisa Fujita (JAXA)
Junsei Nagai, Tetsuo Yoshida (AES) and Takeharu Sakai (Nagoya Univ.)

概要

HTV-R や惑星探査プローブなど近年比較的大型のカプセル再突入機体の開発ニーズが高まってきており、そのための熱防護材としてアブレータ等の特性評価が必要となっている。材料の温度を決める加熱率の他、反応速度を決めるほか剪断による機械的損耗に影響する衝撃圧力(p_{o2})を実機条件に合わせることで、そのような特性評価試験に要求される。これまでの JAXA750kW アーク加熱風洞では衝撃圧力が実機環境の 2 分の 1 から 5 分の 1 程度の低圧に限られていたため、新規ノズルの設計製作により、低加熱率($1\text{MW}/\text{m}^2 \sim \text{数 MW}/\text{m}^2$)ながらも比較的高圧の気流条件を確保した。ここではその他試験ニーズに対応した高エンタルピー風洞の改修に関して報告する。

1. はじめに

アーク加熱風洞はアーク放電により作動ガスを昇温しノズルを介して超・極超音速気流を作り出す高エンタルピー風洞の一つであるが、ヒータ内圧の制限等により、Reynolds 数を実機条件と同程度とすることは一般に困難である。そのこともありアーク加熱風洞は、全機熱空力特性を取得する目的には不向きである。一方で、数分以上の長時間にわたり再突入速度相当の高エンタルピー気流を供給し続けることができる特徴を活かし、耐熱材料評価や、熱化学モデル評価のための実験目的で有効な設備であるといえる。

アブレータや耐熱材料近傍での熱化学反動的環

境では、主に材料の表面温度、表面における気流圧力、また酸化反応を決定する酸素原子分圧などが重要な再現すべきパラメータとなる。そのため、そのような目的では Mach 数や Reynolds 数ではなく、材料表面温度を決定する供試体前面における加熱率 q 、気流澱み圧 (ピトー圧) p_{o2} 、解離度・組成を決定する総エンタルピー h_0 、を再突入軌道条件に合わせる能力が重要となる。

JAXA 調布地区にある 750kW アーク加熱風洞¹⁾の諸元及びアークヒータ部スケッチをそれぞれ表 1. 及び図 1. に示す。このアークヒータはコンストリクタ型のアークヒータに分類されるが、特徴は電極間距離を離すことにより高電圧・低電流とす

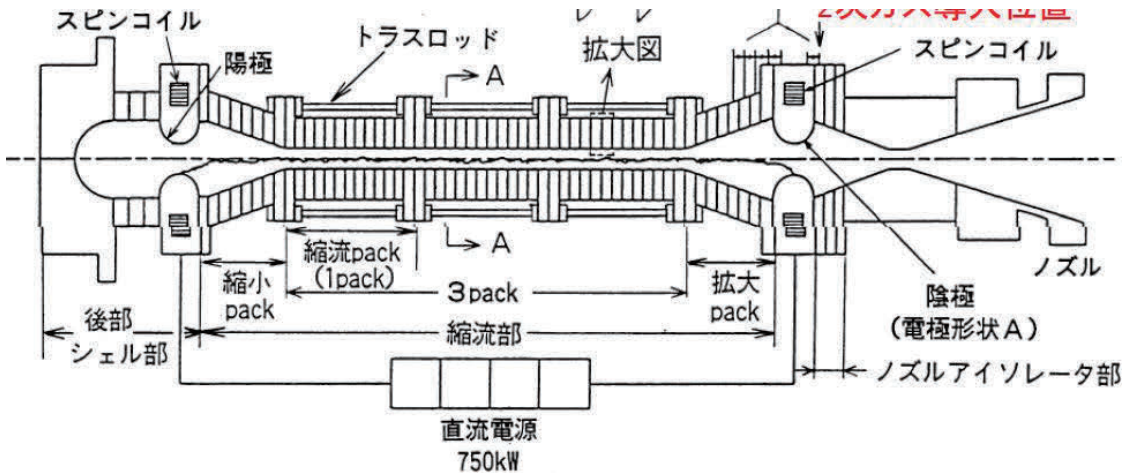


図 1. JAXA 750kW アーク加熱風洞のアーキヒータ模式図¹⁾

表 1. JAXA 750kW アーク加熱風洞仕様概要

アーキヒータ		
電極間電圧	～1.5kV	電源能力
アーク電流	280A～750A	電源能力
ヒータ内圧 p_0	～110kPa	気密～400kPa
ガス流量	10～30g/s	配管系制約
総エンタルピー h_0	～20MJ/kg	
ノズル		
スロート径	φ25mm	
出口径	φ115mm	
ノミナル M 数	5～6	
標準供試体位置(φ40mm 平頭@100mm 位置)		
澱み加熱率	～2MW/m ²	
澱み点圧力	～5kPa	

ることで、銅電極における気化を低減させるため、気流へのコンタミネーションを最小化していることである。これにより、総エンタルピー h_0 は20MJ/kgとなっており、再突入エンタルピー32MJ/kgには満たないものの、酸素分子の全解離、窒素分子の数十%程度の解離まで実現する能力を持っている。

現在検討されている惑星探査プローブ²⁾、再突入カプセル³⁾(図2)や、過去において検討されていた有翼再突入機の飛行経路に沿った澱み点加熱率・圧力の関係を図3に示す。また現状の当設備で実現できる気流条件は同図中にシンボル及び黒

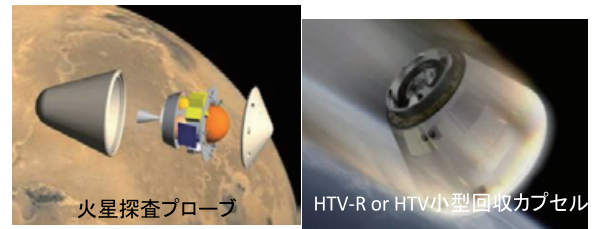


図 2. 熱防護の要する近年のカプセル系プロジェクト

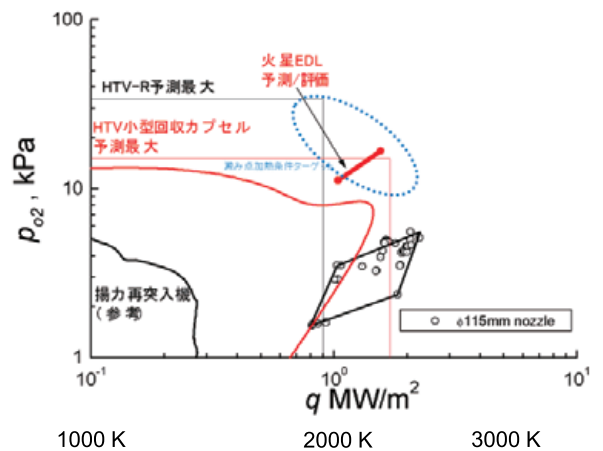


図 3. 想定プロジェクト飛行環境と、既設設備運用エンベロップとの比較

実線で合わせて示される通り、有翼再突入機経路では加熱率は過剰、圧力は適正であることがわかるものの、近年のカプセル形態再突入機経路では、加熱率はほぼ適正、圧力は不足していることがわかる。設計データを取得する観点からは安全側の条件での試験をする必要があるため、当設備のピトー圧力を2～5倍程度高圧化することが望ましい状況であることがわかる(図中青点線の領域がお

およそのターゲット)。

大幅な設備改修をすることなく、ノズル・スロート部のみの新規製作により、この要求を実現することをここで考えることとした。そこで、既設装置の一部改修によってカプセル形態再突入環境に適合するように、供試体淀み圧 20kPa 程度を実現することを目標とし、設備的制約条件として下記の範囲内に収まるようノズル・スロート部の新規設計を行うこととした:

ヒータ内圧	<	400kPa (気密試験圧力)
アーク電圧	<	1.5kV (直流電源能力)
アーク電流	<	750 A (直流電源能力)
ガス流量	<	30 g/s (配管系)
供試体直径	=	φ40mm (当面)

2. ノズル・スロート部検討

2.1 サイジング検討

サイジングに当たりまずは淀み加熱率への効果を考慮せず淀み圧力をできる限り高圧化することのみを考えた。一つはスロート径を小さくすることで同一流量においてヒータ圧力 p_0 を増加させること、また低 Mach 数化することで p_{02}/p_0 比を増加させることが考えられた。現行の標準供試体直径がφ40mm であるため、気流コアがノズル出口径の約 60%程度であるという経験値から、ノズル出口径としての許容最小値はおよそφ60mm 程度であると予想できる。さらに既存観測窓から供試体表面を観測できることを考慮すると、供試体表面はノズル出口面より 50mm 以上離れている必要がある。その距離離れてノズル端より発生する圧縮・膨張波が供試体中央部に到達しないためには $M > 4$ である必要がある。 $M > 4$ とする場合、スロート直径はφ18mm 以下とする必要がある。スロート径が現行のφ25mm からφ18mm となることで、同一のガス流量で、 p_0 が約 2 倍程度、また、現行の $M \sim 6$ から $M \sim 4$ となることで p_{02}/p_0 は約 2 倍、よって二つの効果を合わせることで目標とする p_{02} の 4 倍化の実現可能性を確認できた。ここで上記制約条件として考慮

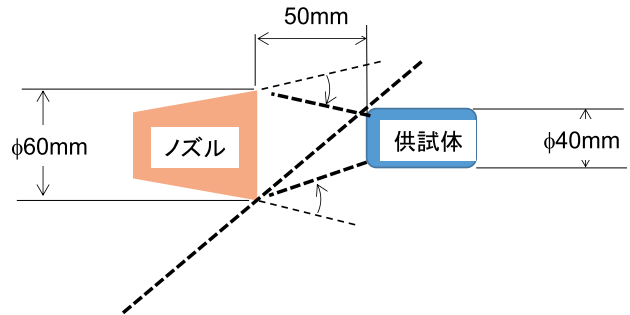


図 4. 新規ノズルサイジングのための制約模式図

していないものは電極間電圧が直流電源能力に収まるかどうかであり、アークヒータ特性に強く関連するため、適切な推定コードによる検討が必要である。

2.2 アークヒータ特性検討

既設コンフィグレーションでヒータ内圧と電極間電圧 (アーク電圧) との関係について再整理し、さらにアークヒータ内放電と、ノズル流の推定を軸対称計算 (ARCFLO3 コード、名古屋大酒井先生) により実施 (中実緑▲印) し、ヒータ内特性推定精度の確認を行った⁴⁾ (図 5)。 $I_{arc}=750A$, $m_g=20g/s$ の条件のみであるものの、既存ノズル・スロート形態では計算は実験値と一致し、ヒータ内特性推定が十分できているものと理解できる。

更にノズル出口径φ 60mm で、スロート径の異なる 2 ケース (φ17.7mm, φ15.3mm) に関して推定した結果を表 2. に示す。2 つケースは同程度の p_{02} 、異なる p_0 となる予測の元に設定されたケースであ

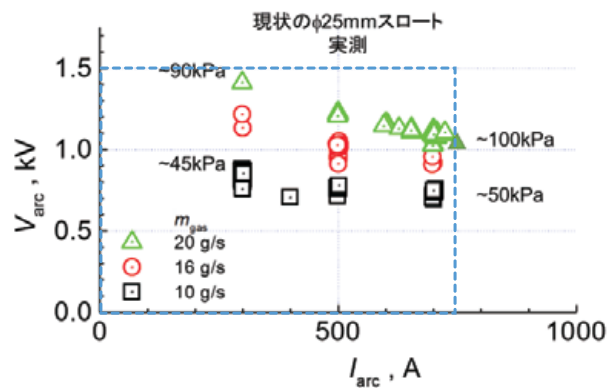


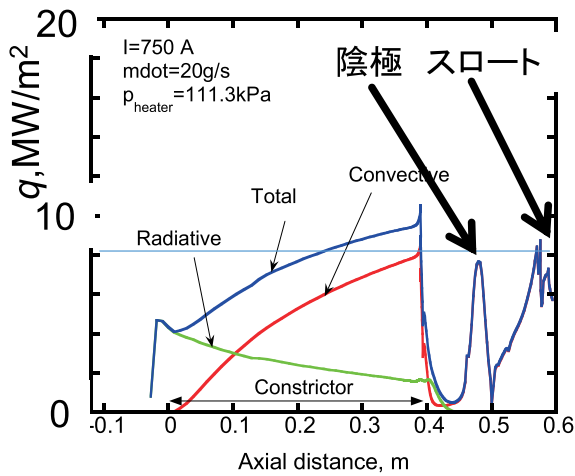
図 5. 既設設備におけるアークヒータ特性 (白抜き) 及び ARCFLO3 推定値 (▲) 比較

表 2. ARCFLO3 によるヒータ特性予測

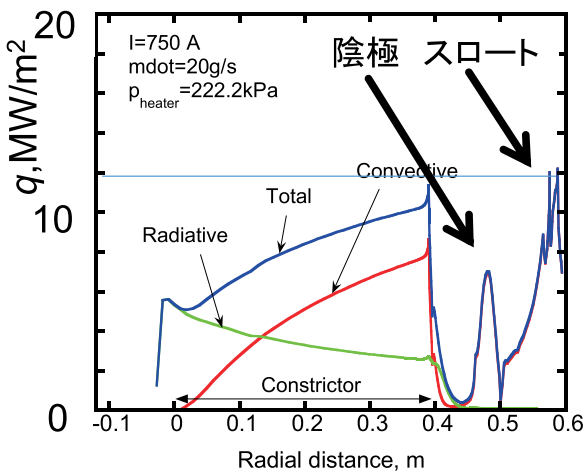
スロート径 , mm	アーク 電流 A	ガス流量 , g/s	ヒータ圧 , atm	アーク電圧 V
25	750	20	1.10	1030
17.7	750	20	2.19	1049
15.3	750	20	2.93	1066

るが、ヒータ圧は予測通り大きく異なるものの、電極間電圧（アーク電圧）には大きな影響が表れないことがわかった。

次に検討すべきは、ヒータ内圧増加に伴い、セグメント内面への放射・対流熱流束の増加である。ARCFLO3 コードにより計算されたアークヒータセグメント内面における熱流束分布をオリジナル



(a) 既設形態



(b) φ18mm スロート形態

図 6. ARCFLO3 によるヒータ内加熱率予測

形状（φ25mm スロート）及びφ18mm スロート形状それぞれ図 6.に示す。一般部セグメント部で放射加熱成分増加により全体で 10%程度上昇がみられる他、スロート部で 8MW/m²程度と推定されていたものが、12MW/m²程度まで増加する予測であることがわかった。予測される加熱率が大幅に増加するものではなかったため、運用時にスロート部、一般部における損傷を確認することで対応することとした。

最後にノズル出口での気流動圧分布の予測結果を図 7.に示す。ここで、前述の通り運用上ノズル出口から 50mm の位置で試験することを想定すれば、この条件で、12kPa 程度の動圧でφ40mm の範囲内ではほぼ均一は分布を有することが予測できた。

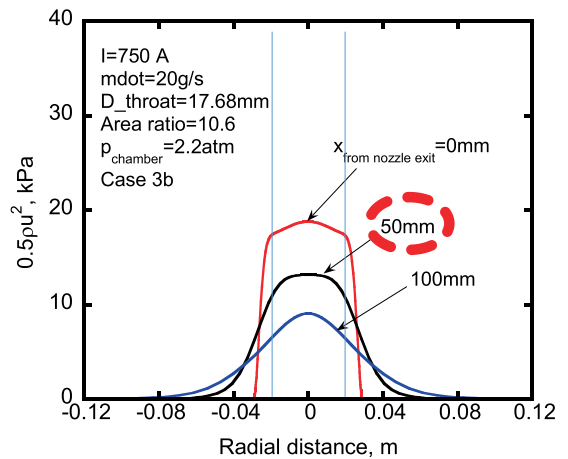


図 7. ARCFLO3 による動圧分布予測

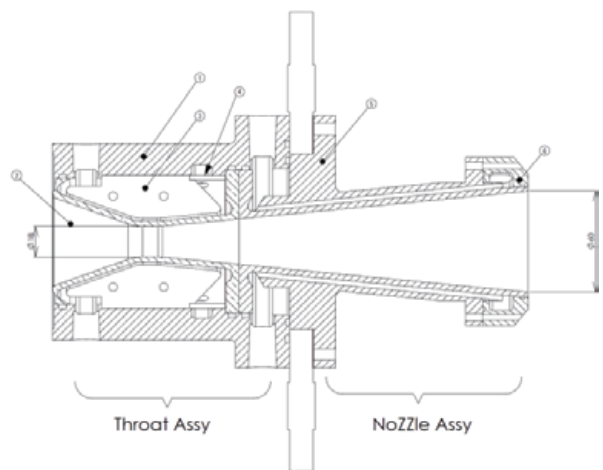


図 8. 新規φ18mm スロート高動圧ノズル

3. 高動圧ノズル・スロート製作／特性確認

上記検討に基づきノズル出口径 $\phi 60\text{mm}$ 、スロート径 $\phi 18\text{mm}$ 及び $\phi 15\text{mm}$ のノズル・スロートの製作を行った。ここでは紙面の都合上、 $\phi 18\text{mm}$ スロート形状のもの(図8.)のみ報告する。前述運用制約条件の範囲内での運用で得られたアーク電流・電圧の関係及び標準形状供試体での澱み加熱率・ピトー圧の関係をそれぞれ図9及び図10に示す。当風洞では電極間距離を調節するため図1に示される様に「縮流 pack」と呼ばれるセグメントの組を2~3pack挿入できる構造となっているが、これまでは主に3pack形態での運用であった。しかし図9で示される様に1.5kVの電源制約のため、作動ガス流量を増加させるためには2packによる電極間距離減少で電圧を20%程度抑えることができることがわかった。更にこの変更は図10で見られるように p_{o2} への影響は小さいことがわかった。

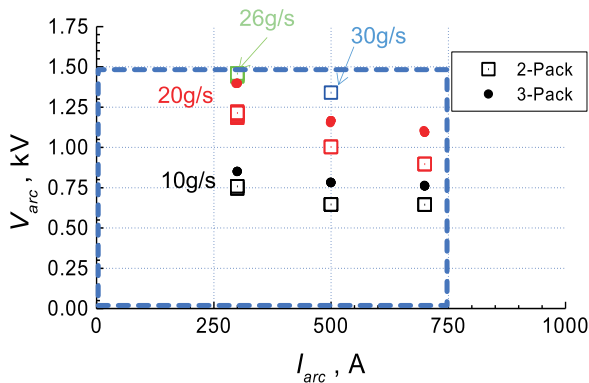


図9.新規ノズル形態でのアークヒータ特性

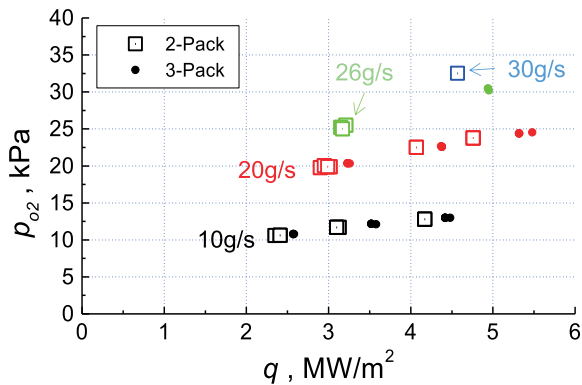


図10. 新規ノズル形態での加熱率・ピトー圧特性

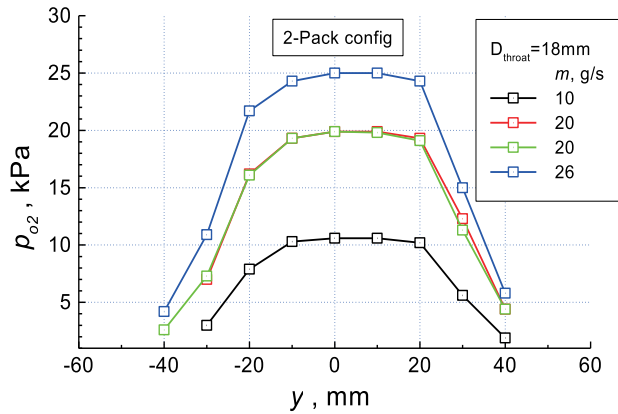


図11. 新規ノズル形態でのピトー圧分布

気流ピトー圧力分布に関して、標準供試体形状($\phi 40\text{mm}$ 平頭)の圧力プローブを水平方向に $-40\text{mm} < y < +40\text{mm}$ の範囲でトラバースすることで目安とすることとした(図11)。これは $I_{\text{arc}}=300\text{A}$ で、作動ガス流量を $m_g=10\sim 26\text{g/s}$ まで変化させたときの結果である。これから、想定通り $-20\text{mm} < y < +20\text{mm}$ の範囲でほぼ均一の圧力分布が得られたことが分かった。

ここで当初の対象であった惑星探査プローブや再突入カプセルにおける環境との比較を図12に改めて示す。今回の高動圧ノズルにより、ピトー圧は目標である 20kPa を超え、最大で 30kPa 以上を実現することができたが、一方で加熱率が本来評価すべき範囲と比べ過大となっていることが分か

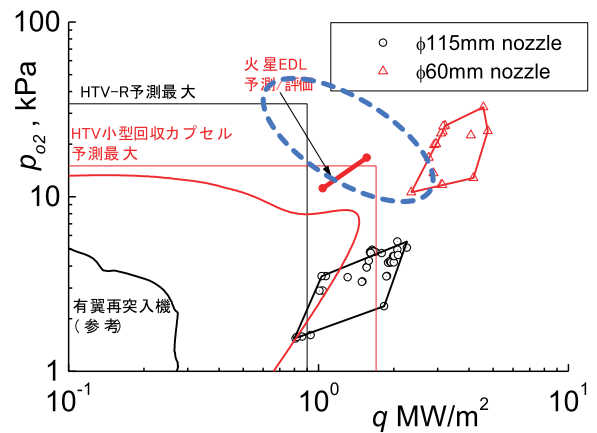


図12.新規ノズル形態での設備運用エンベロープ及び想定プロジェクト飛行環境

る。これは熱防護材の評価をするとき適正な材料を採択できないこととなりかねないため、動圧はそのままで加熱率のみ低減することが望ましい。気流の解離度を保つためには総エンタルピーを下げずに供試体サイズを大きくすることで加熱率を下げるのが望ましいが、それは設備の大型化が必須となってしまう。そのためここでは希釈ガスを導入することで総エンタルピーを低減させ加熱率を抑制することを実用的な解決策として実行することとした。

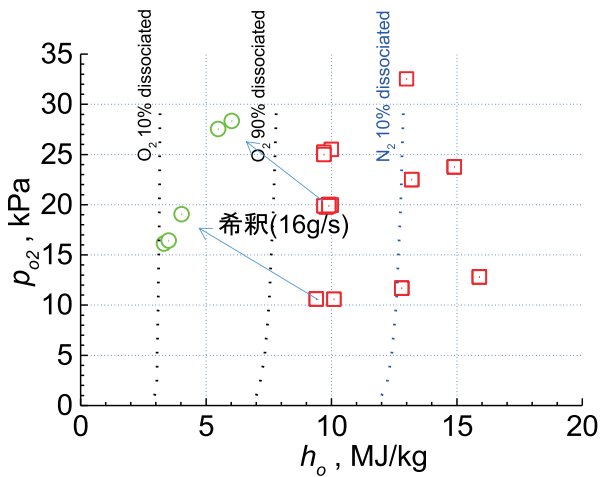


図13. 新規ノズル+希釈ガス導入形態での総エンタルピー・ピトー圧特性

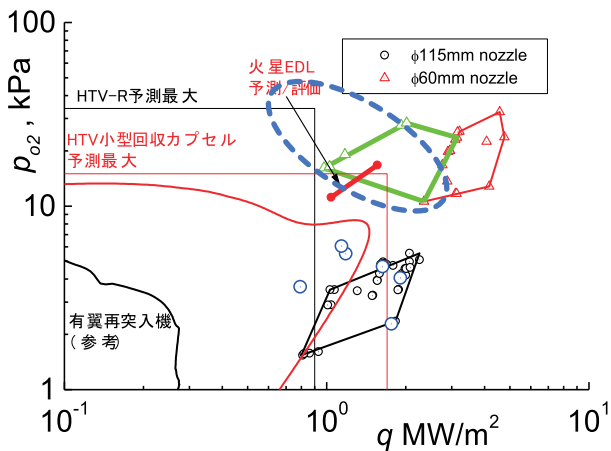


図14. 新規ノズル+希釈ガス導入形態での拡大運用エンベロープ

4. 希釈ガス導入による加熱率抑制

希釈ガス導入のためのセグメントを図1の陰極とスロートブロックとの間に増設し、最大で16g/sまで導入する様に設備の改修を実施した。それにより得られた総エンタルピーとピトー圧の関係を図13に、加熱率・ピトー圧関係を図14に示す。両図から、酸素がほぼ全解離と予測される10MJ/kgであった条件が酸素分子の解離が境界層端で10%程度となってしまう5MJ/kg程度とすることで実機条件に近い1MW/m²を実現できるようになったことが分かる。そのため、今回拡大された試験条件範囲を有効に使うためには、アブレータ損耗解析などにおいては境界層端からの酸素原子の拡散速度が律速条件を決める状況か、あるいは表面の反応速度が律速条件を決める状況であるかを検討する必要がある。

5. まとめ

カプセル形態再突入機における熱環境を再現するためのアーク加熱風洞の改修として、新規ノズル・スロートを設計・製作し、試験条件の確認を行った。

希釈ガス導入と併せることで、当初目標とした低加熱・高圧環境を実現することができた(1MW/m²、20kPa程度)。

謝辞

本成果は平成24年度JAXA重点研究「月惑星探査に用いる大気突入機熱防御システムの高精度評価技術の開発」によるものである。

参考文献

- 1) 松崎ら NAL TM-760 (2001)
- 2) K.Fujita et al, 29th ISTS,IST52013-k-11(2013)
- 3) T.Imada et al, 28th ISTS,IST5-2011-g-10 (2011)
- 4) T.Sakai et al, AIAA paper 2013-2896 (2013)