

令和6年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

極超音速飛行における可変機構の耐熱性
気密性向上に関する研究

令和7年5月30日

株式会社 ネット

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、株式会社 ネットが実施した令和4年度から令和6年度にかけて実施した「極超音速飛行における可変機構の耐熱性・気密性向上に関する研究」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

研究課題の最終目標及び課題

本研究の最終目標は、高温環境下で使用するバルブ等で実現している摺動部シールの温度の上限を 600℃から 1400℃程度にまで大きく引き上げることに伴い、極超音速飛行の温度環境に適合する超高温軸封設計技術を確立することにある。具体的には、超高温酸化雰囲気における気密性能を保証することを目的に、従来の高温用のパッキン素材である膨張黒鉛やカーボン繊維等に代わり、表 1 に示す素材のように、耐酸化性に優れるニッケル系合金や白金系等を使用する必要がある。また、例えば、軸と軸封装置を同一の材料とすることにより、線膨張係数の違いによる気密性能の低下を防止することができるものの、繰り返し使用することによる気密性能の劣化や摺動抵抗の増加を低減するためには、パッキンの変形量を弾性変形の範囲に極力限定する必要がある。このような特性を有するシール方式に「弾性変形メタルシール」が存在し、既に食品工場やロケット向けの極低温分離継手等における研究開発の実績はあるものの、高温環境に適用した製品や既往研究等はない。

したがって、本シールを高温環境に適用するための要素課題として、以下に示す 3 点を挙げることで、本研究では、スタティックシールを対象に 1) 及び 2) の研究を進めるとともに、可動部シールを対象に 3) の調査及び検討を進めることとする。

- 1) 弾塑性解析によるシール部の形状の最適化に関する検討。特にシール部先端の形状は、塑性流動への影響が大きいため解析の対象となる。高温での素材物性に関しては熱力学の原理に基づいた状態図作成する解析方法を提示する。
- 2) シール部のクリープやサイクル疲労等による気密性能への影響評価。塑性域の大きさ、割合から影響をみる。
- 3) 摺動部の潤滑法の調査及び検討。高温ガスの流れと直に接するので、実績重視で調査及び検討を進める。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

2. 1 研究課題の最終目標及び要素課題

本研究の最終目標は、高温環境下で使用するバルブ等で実現している摺動部シールの温度の上限を 600℃から 1400℃程度にまで大きく引き上げることに伴い、極超音速飛行の温度環境に適合する超高温軸封設計技術を確立することにある。具体的には、超高温酸化雰囲気における気密性能を保証することを目的に、従来の高温用のパッキン素材である膨張黒鉛やカーボン繊維等に代わり、表 1 に示す素材のように、耐酸化性に優れるニッケル系合金や白金系等を使用する必要がある。また、例えば、軸と軸封装置を同一の材料とすることにより、線膨張係数の違いによる気密性能の低下を防止することができるものの、繰り返し使用することによる気密性能の劣化や摺動抵抗の増加を低減するためには、パッキンの変形量を弾性変形の範囲に限定する必要がある。このような特性を有するシール方式に「弾性変形メタルシール」が存在し、既に食品工場やロケット向けの極低温分離継手等における研究開発の実績はあるものの、高温環境に適用した製品や既往研究等はない。

したがって、本シールを高温環境に適用するための要素課題として、以下に示す 3 点を挙げることで、本研究では、スタティックシールを対象に 1) 及び 2) の研究を進めるとともに、可動部シールを対象に 3) の調査及び検討を進めることとする。

- 1) 弾塑性解析によるシール部の形状の最適化に関する検討。特にシール部先端の形状は、塑性流動への影響が大きいため、解析の対象となる。また、弾塑性解析に必要な耐熱合金の熱力学データを第一原理計算により求める。

- 2) シール部のクリープやサイクル疲労等による気密性能への影響評価。塑性域の大きさ、程度から影響をみる。
- 3) 摺動部の潤滑法の調査及び検討。高温ガスの流れと直に接するので実績重視で調査及び検討を進める。

2. 2 最終目標に対する実施項目及び体制

ネッツと NIMS は共同実施体制とする。

ネッツは主に 2) 及び 3) に関する設計、製造、試験及び評価を行い、NIMS は主に 1) に関する解析及び評価を行う。

- 1) 有限要素法による弾塑性解析を適用したシール部の形状の最適化に関する検討 (担当：NIMS)

軸封装置の基本形状を設定し、締め付けや圧力の負荷等によるシールの変形量と応力分布を弾塑性解析によって評価する。評価の対象とする基本形状としては、伸展軸に対する軸封と、回転軸に対する軸封の大きく分けて2種類を設定し、本実施項目における第一ステップとしてスタティックシールを評価の対象とする。また、シールと軸が接触して気密をとるリップ部の形状については、シールの幅、相対接触角度や先端半径等のパラメータが応力レベルに与える影響を調査し、与えられた材料と温度や圧力等の環境条件に対し、最適なシール部の形状を選定するための現象を解明するとともに基準を確立する。

また、超高温環境下に適用する材料について、熱力学特性を理論的に明らかにするための基盤技術の構築を進める。すなわち、計算手法そのものの妥当性を確認するものであり、本研究では Pt 系合金を対象に、第一原理計算と統計力学的な手法を合わせた計算手法による自由エネルギー計算を行うことにより、定量的にその計算手法の妥当性を確認するものである。

- 2) シール部のクリープやサイクル疲労等による気密性能への影響評価 (担当：ネッツ)

基本形状の軸封装置を製作し、高温環境下におけるシール性能を評価する。特に、高温環境下ではリップ部のクリープやサイクル疲労等による変形と気密性能の劣化が懸念されることから、シールの応力レベルの設定と寿命に関する相関データを取得する。また、表 1 に示すシール材料の候補のうち、ハステロイ X 等を対象にベースデータを取得した上で、次に実績と経験を加味する対象として白金相当の超耐熱合金を選定した。結果として、本実施項目を通じて得られるデータについては、耐熱合金のクリープやサイクル疲労等による変形に関する貴重なデータとなることから、今後の活用が期待できる。

また、クリープ寿命を確保しつつ、シールに必要な面圧を十分に確保することを目的に、高温においても耐力を維持できる素材を用いたスタティックシールを対象に、約 1400℃までの高温環境下で繰り返し荷重をかけてシール部のリーク量を把握する。加えて、加工技術を確立するためにシールを試作し試験に供する。

表 1 超高温材料適用候補

表 1 超高温材料適用候補						
N0	材質候補	主な成分	最高使用温度 [℃]	使用環境	他類似実績等	備考
1	白金相当	白金	約 1650℃	酸化 還元 不活性 真空	・ 各種熱電材	令和 6 年度に評価 を実施予定
2	ハステロイ X 相当	ニッケル	約 1200℃	酸化	・ ジェットエン ジン ・ ロケットエン ジン	令和 4 年度から令 和 5 年度にかけて 評価を実施済
3	L-605 相 当	コバルト	約 1038℃	酸化	・ ジェットエン ジン	
〔注〕(1) コストと入手性を考慮し、ハステロイ X を対象とする解析及び実験による実証を進め、成立性を見極めた上で、白金相当に進む。 (2) 約 1400℃に達しない場合には弾性フランジの採用を検討し、更にはフランジ付近への冷却システムの適用についても検討する。 (3) ハステロイ X 等にコーティングすることも検討の視野に入れている。						

3) 摺動部の潤滑法に関する調査・検討（担当：ネッツ）

摺動部シールのリップ部については、接触する相手方の軸が伸展あるいは回転する際に摺動しながら気密性能を維持する必要がある。本実施項目では、摺動時の抵抗を低減し、焼き付きを防止するための潤滑剤や表面処理等に関する調査・検討を実施する。

4) プロジェクトの総合的推進（担当：ネッツ）

本研究を実施する各機関は日常的な情報交換や共同研究等を実施しており、本研究に対する見識や経験等も相当な程度で持ち合わせている。また、基礎研究の成果についても蓄積があり、論文等の公表も多く行っていることから、このようなこれまでに得た知見について、進捗管理も含め、本研究に関する現象の解明や設計基準の確立など、様々な試みを本研究に適用するに際し積極的に活用するほか、必要に応じて外部有識者へのヒアリングを行うことにより、本プロジェクトの推進を図る。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

3.1 令和4-6年度の実施計画と実施内容概要

1) 有限要素法による弾塑性解析を適用したシール部の形状の最適化検討（担当：NIMS）

弾塑性解析を行い、重要なリップ部の形状を熱変形や加工性も含めて評価し候補の絞り込みができ、かつ影響する形状パラメータの感度をあきらかにした。さらに試験データ取得をはかりシール形状の候補を選択し絞りこんでいった。白金について、第一原理計算及び統計力学を基盤とする熱力学計算を行い、1400℃の高温環境下に於いて示す特性を理論的に明らかにし高温弾塑性解析に適用し高温試験によりシールとしての妥当性を確認した。

2) シール部のクリープやサイクル疲労等による気密性能への影響評価

（担当：ネッツ）

高温炉に配管類及び計測系の取り付け等を行い組立、高温炉の機能確認を兼ねた試験を実施後、試験場（JAXA 角田宇宙センター）にて、段階的に昇温した。高温状態での試験のリーク量は弁により締め切っていることから減圧に対する感度がたかく、この減圧状況がないことを確認し、さらにシール形状データからクリープやサイクル疲労等に関する解析も実施し比較した。高温試験は主にハステロイXにより、配管も同素材で 11 サイクル（600℃ - 1250℃）繰り返した。また、炉本体や供試体シール等を対象に断熱材、昇温促進対策、酸化防止ガス流しなど工夫をかさね試験装置として確立した。

3) 摺動部の潤滑法に関する調査・検討(担当: ネット)

文献調査において、候補となり得る高温潤滑剤の調査を行った結果、1500℃程度まで機能を喪失しない可能性のある無機質潤滑剤の存在を確認した。著者らの既取得したケロシン等の吸熱分解反応の基礎データにもとづき、冷却と潤滑が主要要素技術として提案した。今回の成果をうけて可動機構(インテーク、ノズル)こみの動的シールについて実開発のなかで適用可として注目されている。

4) プロジェクトの総合的推進(担当: ネット)

各要素課題に関する研究進捗と課題を管理し、本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会、論文等において積極的に発表継続中である。

国際学会発表と論文等は高温試験成果と熱力学解析の進捗をみつつ数多く発表、掲載をすすめている。高温試験内容と評価については、令和7年11月の第69回宇宙科学連合講演会にて講演予定である。

3.2 令和4～6年度の研究実施日程

▼JAXA 角田宇宙センターにての試験

研究実施内容	実 施 日 程											
	令和4年度				令和5年度				令和6年度			
	1/ 四	2/ 四	3/ 四	4/ 四	1/ 四	2/ 四	3/ 四	4/ 四	1/ 四	2/ 四	3/ 四	4/ 四
高温状態特性把握・弾塑性解析適用のシール部形状の最適化に関する検討、高温試験						試験 ▼					▼	▼
シール部のクリープやサイクル疲労等による気密性能への影響評価												
摺動部の潤滑法に関する調査・検討												
プロジェクトの総合的推進												

3.3 令和4年度-6年度の研究成果

1)有限要素法による弾塑性解析を適用したシール部の形状の最適化に関する検討と熱力学特性を理論的に明らかにするための第一原理解析と統計力学的な手法を合わせた解法の実施(NIMS)

シールの基本形状を50種ほど設定し、締付や圧力の負荷等によるシールの変形量と応力分布を弾塑性解析によって評価することにより、シールの候補となる形状を5種(シール形状3種、締め代1～2種)に絞りこんだ。シールと軸が接触して気密をとるシール部の形状については、シールの幅、相対接触角度や先端半径等のパラメータが応力レベルに与える影響を解析し、現象を解明する重要パラメータを把握した上で、材料と温度や圧力等の環境条件に対し最終的にシール部形状を1種(R型;加工容易のため円弧としている)、素材をハステロイX、白金に絞り込みした。

また、高温環境下に適用する材料について、熱力学特性を理論的に明らかにするために量子力学からの基盤解析技術の構築を行った。結果を比較するために、試験デー

タが豊富な Ni-Al-Ti 系合金を対象に、第一原理計算と統計力学的な手法を合わせた解析手法による自由エネルギー計算を行うことにより、素材選択の幅を広げることを目指すとともにその手法を提示するものである。

試作した主にハステロイ X について、従来のシール使用温度 600℃までの高温サイクル試験をリソース許容範囲(日程、ガス類)も考慮しつつ、かつ弾塑性解析結果で 10 回でもシール面圧に変化ないことも加味し、上限の使用可能回数を求めるため安全率を加味し 36 サイクルまで行いリークが生じないことを確認した。なお、従来の酸化雰囲気でない高温シール(膨張黒鉛などのパッキン)の使用回数は 10 回程度が上限である。まずは耐酸化性シールの最高温度 800℃付近におけるハステロイ X を素材とする供試体の熱変形量と応力の分布に関する弾塑性解析を行い、さらにハステロイ X で 1250℃(融点 1350℃)までの高温サイクル試験を上記と同様の理由で 11 回くりかえし試験を行い、外部リークがまったくなかった。かつ試験後点検でも異常なかった。次にコスト削減もあったので約 1400℃を対象に形状パラメータをしぼりこんだ白金シール 1 種で供試し約 7 分間リークがないことも確認した。

シール部の形状はきわめて重要であり、R 型を最終的に選択することとしたが、アーム部内部歪において塑性域が 30% 以内程度に収まるように考慮するとともに、アームの断面において全面が塑性域とならない形状に絞った。

ここで図 1 に本研究における弾塑性解析モデル、図 2 に弾塑性解析で導入した供試シールの解析条件を示す。内圧が高圧になるほどシール面圧は高くなりシール性はよくなる。また、シール材とシールを保持するフランジはハステロイ X として同質素材としたが、白金の場合にはコスト削減もあり、モリブデンやセラミックとして高温での線膨張差の影響が少なくなるように設計を行った。

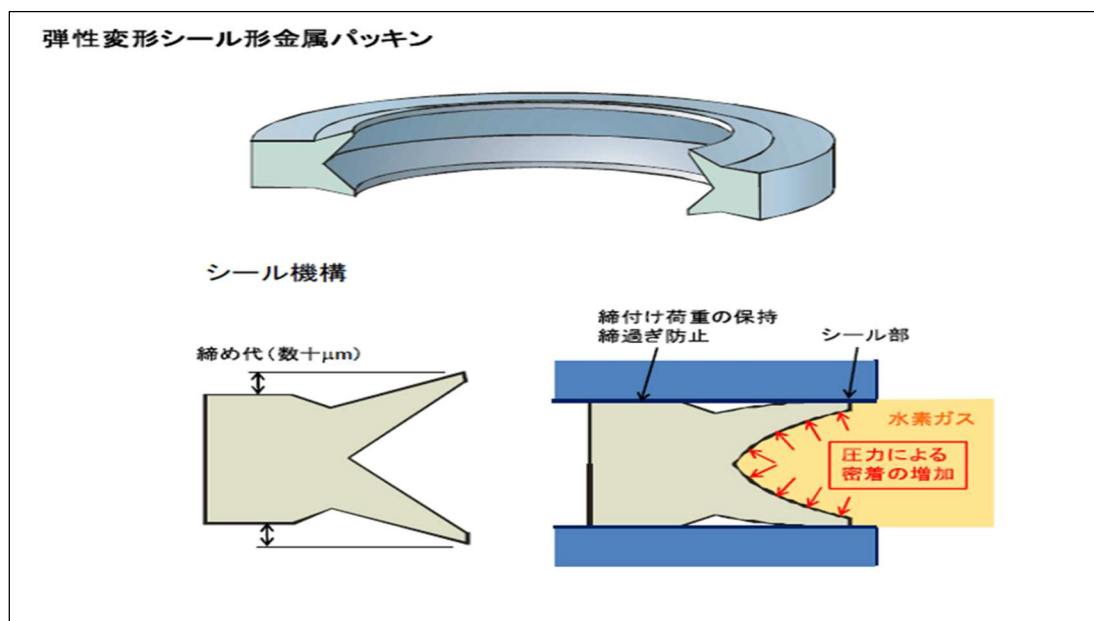
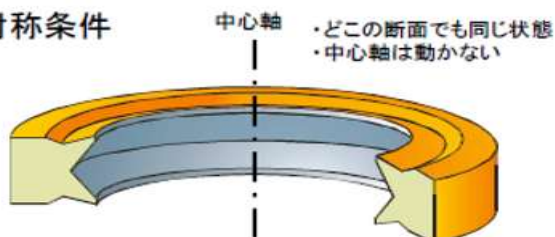


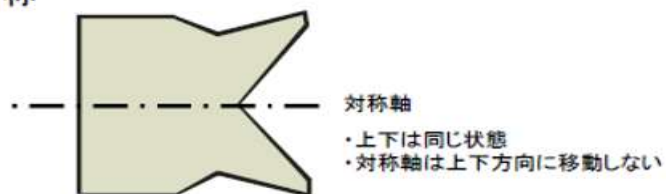
図 1 弾塑性解析モデル

解析モデル

・軸対称条件



・上下対称



・解析モデル

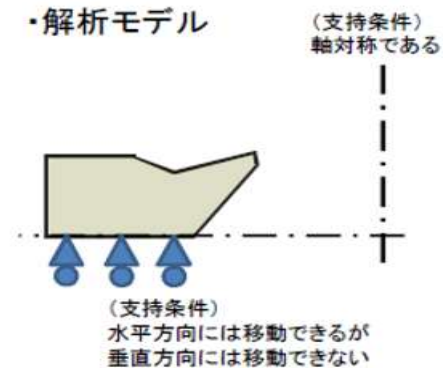


図2 供試シールモデルの解析条件

図 3 に弾塑性解析モデルの代表例として、シール部の形状が R 型、フラット型、丸型の 3 種について示す。

なお、令和 5 年度に実施した試験結果、フラット型は熱変形追従性の面で劣ることが明らかとなったため、ハステロイX、白金シールについては熱変形も考慮し追従性がよく加工も比較的容易なR型にしぼり、ハステロイX製を選択し、1400℃ 試験は白金を用いた。供試シールから150mm以上離れた治具配管はコストと入手性も考慮し、インコ601やモリブデンとした。この治具接合部については約1400℃で長時間(7分以上)たつと溶融し多少のリークが発生した。 $\phi 1.6$ の Pt-Re 熱電対も 1400℃では複数測定不可となった。

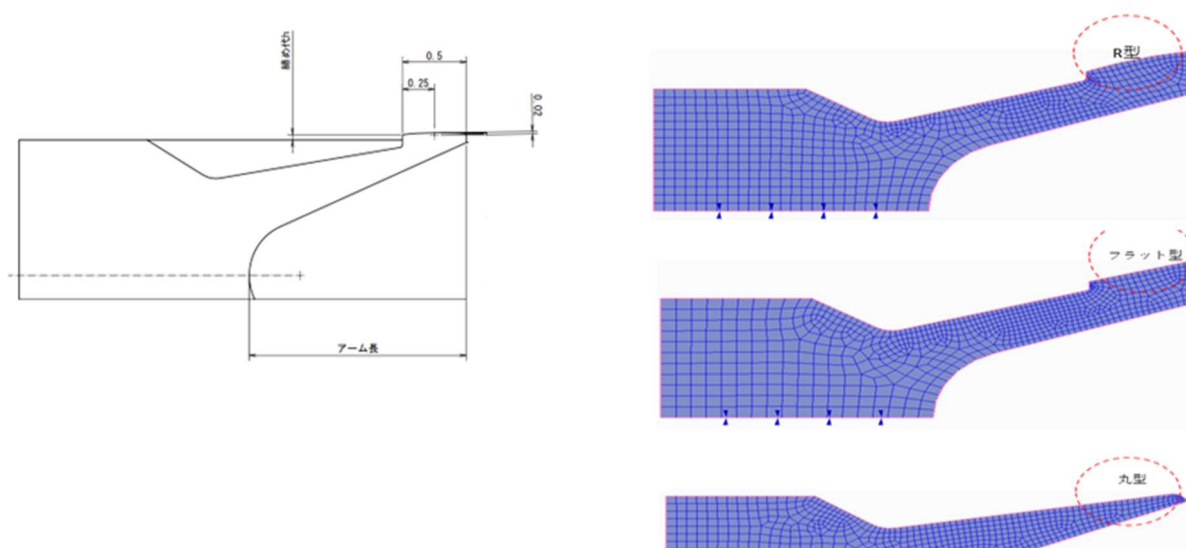


図 3 シール形状(R 型,フラット型,丸型)

図 4 は、シール材がハステロイXであり、形状が R 型の場合の 1093℃ (物性が明らかな温度を選定) における弾塑性解析の結果を示しており、この結果から、高温試験に供するシール部の形状を選択した。

なお、シール部の形状を選択する際の基準として、塑性域のなかに弾性域が残っていて熱歪を抑えていること、また、シール部を含むアームの締め代が片側で 50 ミクロンを超えると内部応力が全般的に急に高くなることを明らかにした。その閾値を超えないこととしている。

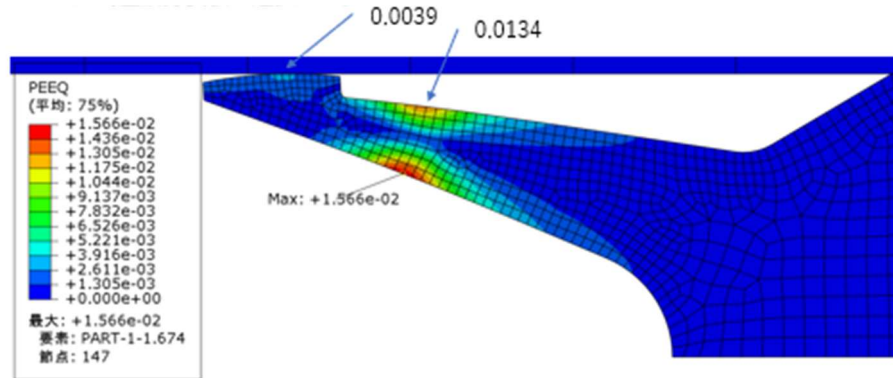


図 4 解析結果例 (R 型ハステロイX, 1093℃; 数字は等価塑性歪)

1400℃における白金 (Pt) の物性については、信頼できる試験値が見当たらないので、提示した第一原理計算と統計力学を用いて合金の高温における物性値の予測を行った。詳細は添付資料に示すが、既に公表されている高温環境下におけるデータとの整合性もよく貴重な高温物性解析手法の結果である。

2) シール部のクリープやサイクル疲労等による気密性能への影響評価 (担当: ネット)

令和 5～6 年度において、高温炉と配管類及び計測系の取付、組立等を行い、試作シールによるリーク試験を行った。

令和 5 年度においては、ハステロイX、L605 を素材とするシール 5 種 (シール形状 3 種、締め代 1～2 種) を試作し、クリープやサイクル疲労等による変位の気密性能への影響を確認するため高温試験及び熱サイクル試験を行い、先に行った弾塑性解析の結果を検証するとともに、リークがないことを確認した。また、1400℃の高温試験を令和 6 年度に計画を進める過程で、入手性を考慮し白金 (Pt) を素材とするシールを選択し、且つ試作可能なことも確認しすすめた。

高温試験の状況と結果を以下に示す。

図 5 は高温試験の系統図である。炉冷却水、炉冷却室素ガスライン、供試体酸化防止の窒素ガスライン、ヘリウムリークチェックライン、各計測系、安全弁等から構成している。供試シール内圧についても、～1400℃までの温度で高压ガス保安法により 0.8MPaG を超えない範囲の設定をした。

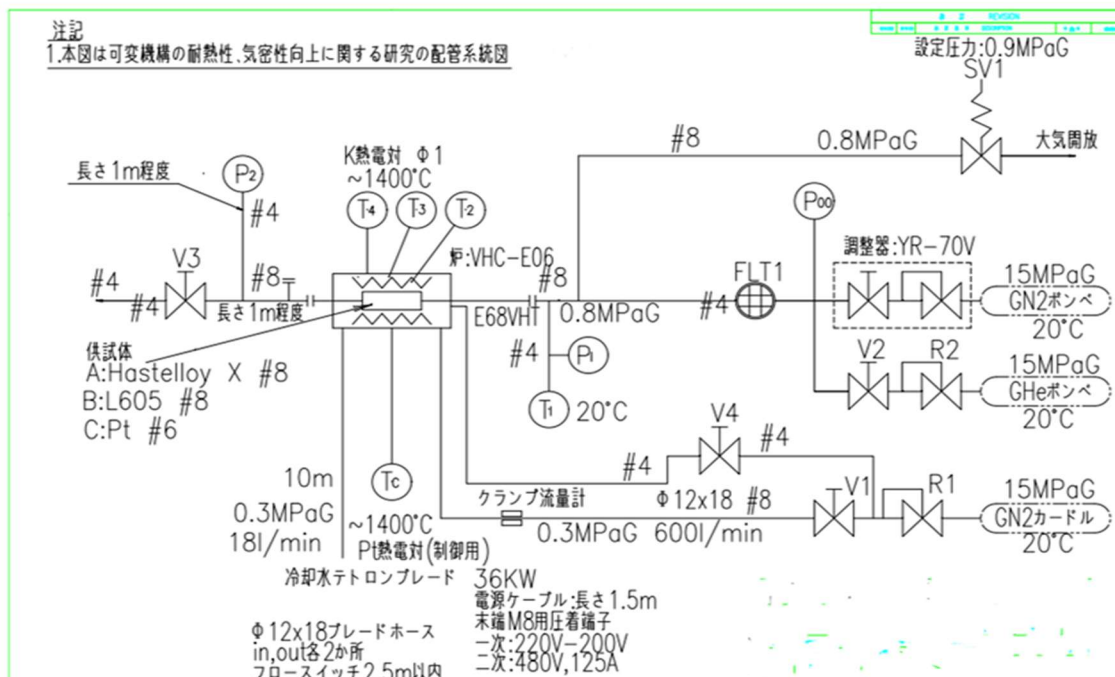


図 6 は供試シールと熱電対による測温状況を示している。超高温炉の熱流束の焦点は約 $\phi 20$ mm 程度と狭く、この焦点に熱流束を効率よく集めて昇温させるため、図 6 に示す位置に断熱材を入れている。

また、炉内ヒータの冷却は窒素ガスで行うため、供試シールに窒素ガスが当たらないように石英管でさえぎり、アルミナ管内部のハステロイX管に供試シールを設置している。すなわち供試シールの酸化を防止するために低圧窒素ガスをハステロイ管外に

流し、供試シールを設置したハステロイ管の内部は弁で窒素ガスを封じ切っていて、高温状態における圧力減圧を測定してリークの有無を確認している。加えて、昇温前と降温後にハステロイ管の内部にヘリウムガスを 0.8MPaG で封入して圧力を測定し、常温時に供試シールからリーク状況をないことを確認している。

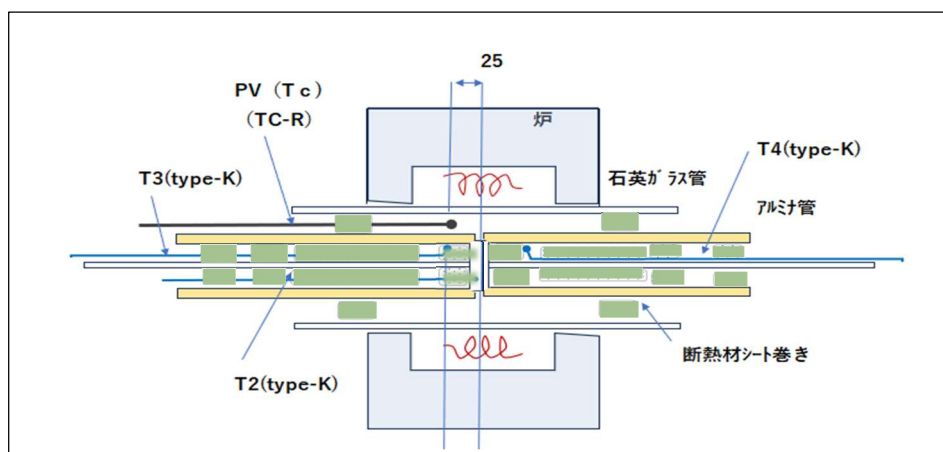


図 6 供試シール(ハステロイ X)と熱電対による測温状況

アルミナ管内部は断熱材を入れている。ハステロイX管がシール内圧を保持している。

図 7 は JAXA 角田宇宙センターにおいて高温試験及び熱サイクル試験を実施した炉と供試シール状況を示す。供試シールをセラミック管(白い管)で挟み込み、透明な石英管が外側を覆っている。温度は炉制御用 Pt 基合金の熱電対 1 点、シール近傍フランジ部 1 点(シールから 1 mm 程度離れている金属部の温度)、さらに 25mm 程度シールから離れた位置で、封入した窒素ガスの温度を上下流で K 型熱電対で測定している。

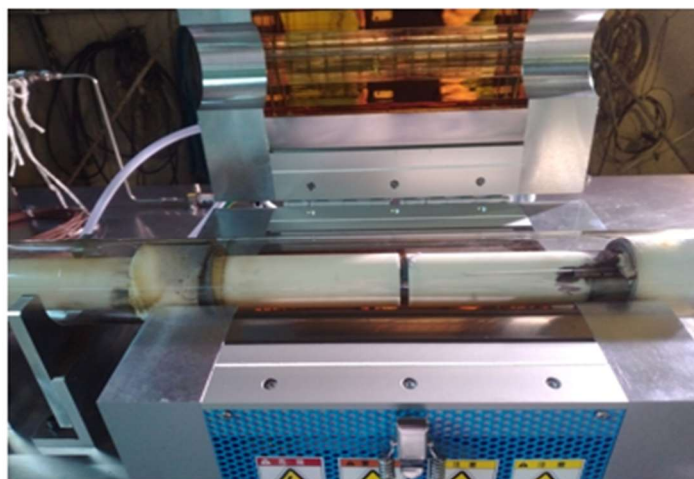
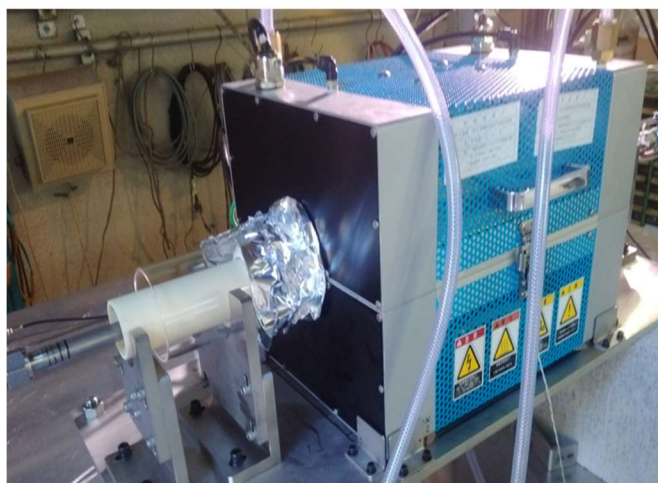
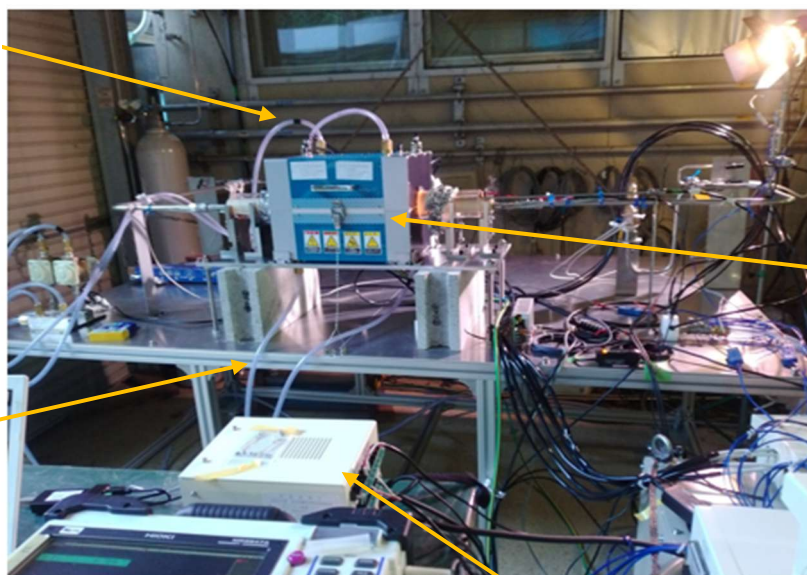


図 7 高温炉と供試シール(JAXA 角田宇宙センターにて)

透明石英管で炉冷却ガスが供試シールにあたらないようにし、白い管はセラミック管で供試シール以外を輻射熱から防御している。

本データはシール部の形状が R 型の場合であり、36 回の熱サイクルをかけたが試験中も試験後もリークは無かった。なお、400℃での耐力が常温の値と近いので 400℃から 800℃の範囲で温度を変化させた。

炉窒素冷却ライン



高温炉

炉水冷却ライン

データロガー

図 8 高温シール試験状況 (JAXA 角田宇宙センターにて)

供試体： Hastelloy X

T2温度負荷： 800℃ 5分保持

実施日： 12月7日

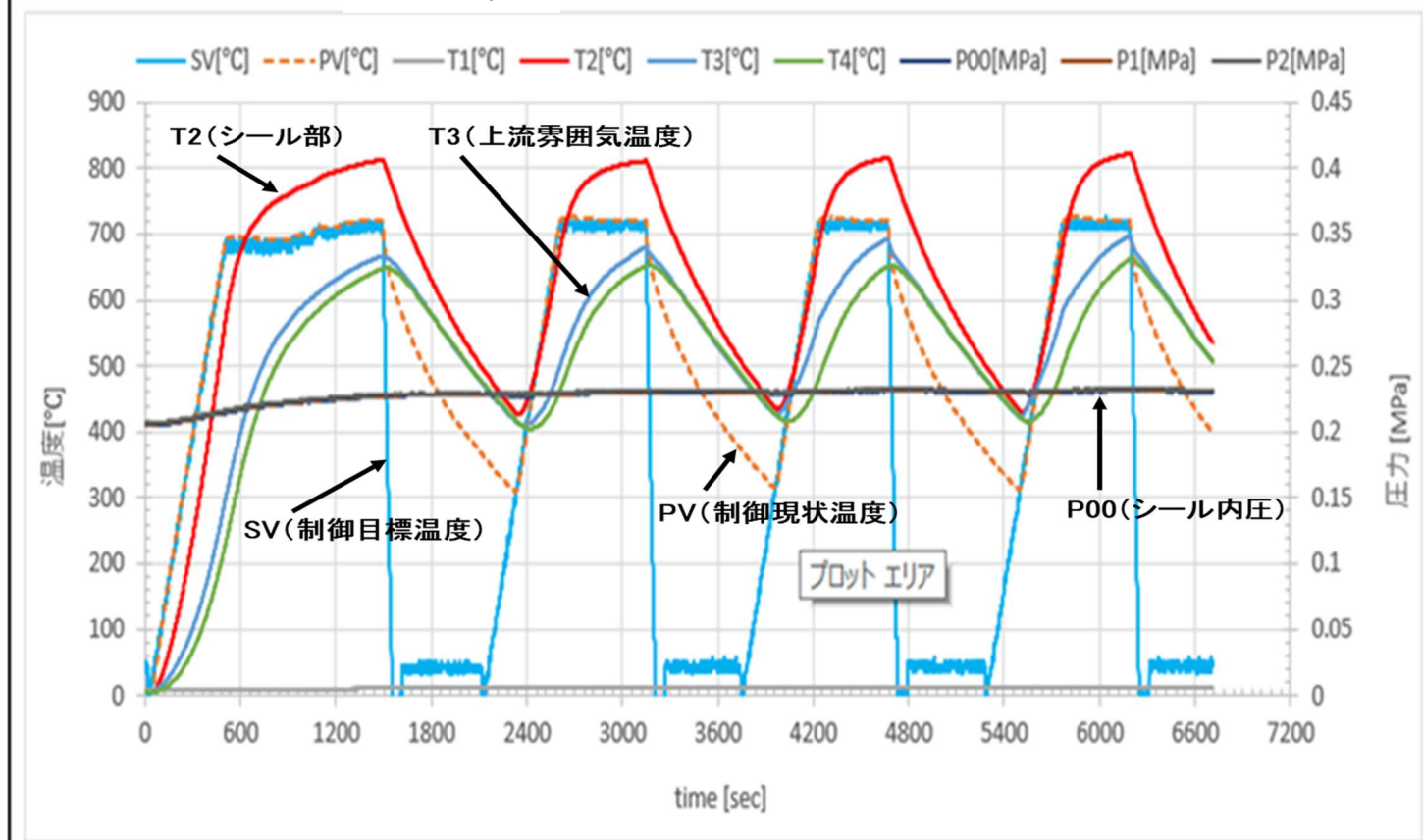


図 9(a) 熱サイクル試験結果 (R 型; ハステロイ X 36 回熱サイクル試験)

図 9(a) は熱サイクル試験データ例 (～800℃) である。赤点線は炉制御温度、赤線は供試シール近傍 (1mm 程度) の温度である。

試験装置のヒートマスで昇温速度はきまるのでここでは試験装置の温度制御可能な昇温速度としている。

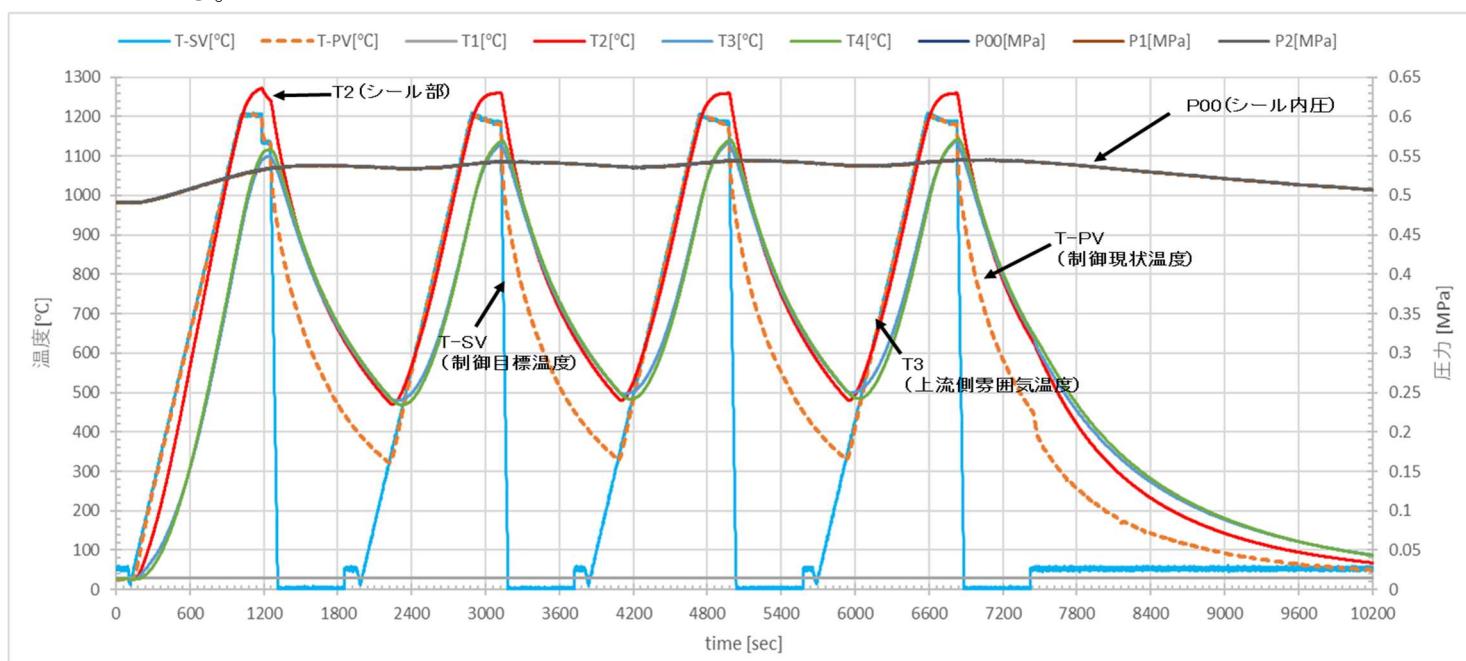
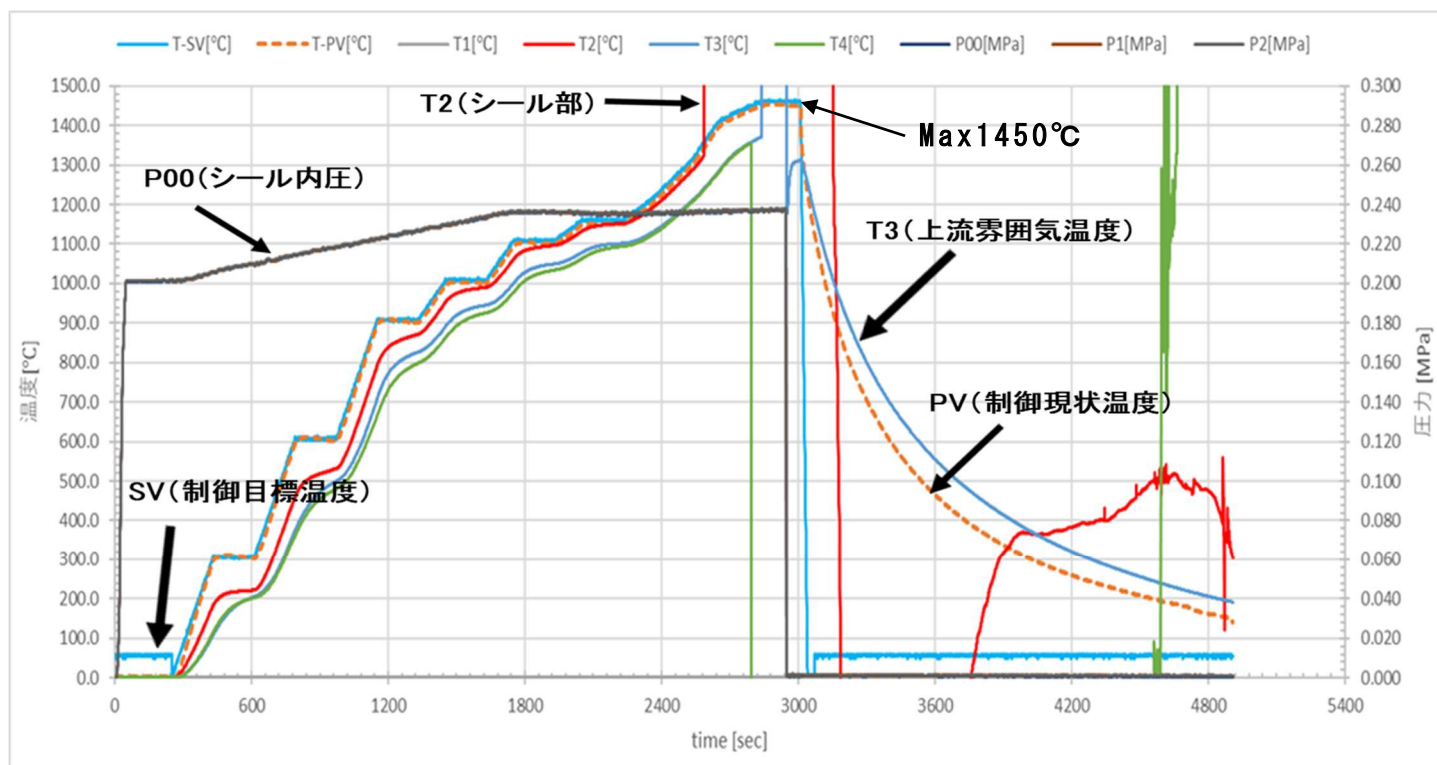


図 9(b) 高温サイクル 試験データ例 (11 回 サイクル)

500℃～1250℃サイクル試験を11回繰り返し、気密性に問題がないことを確認した。(シールはハステロイ X)

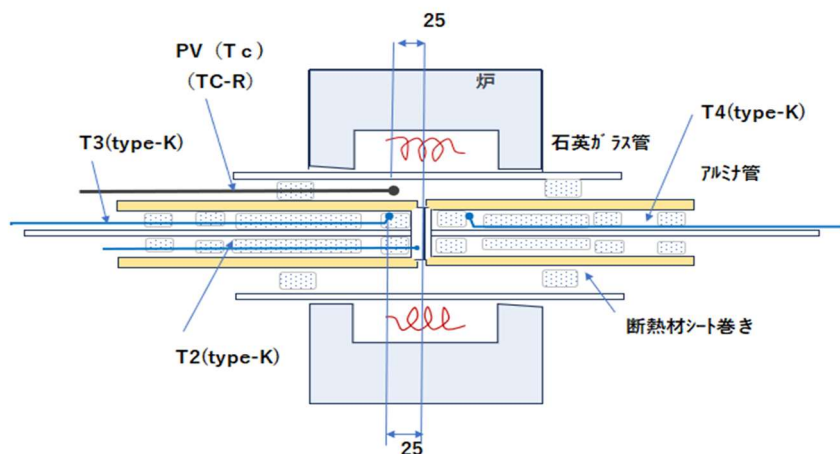


5

図 9(c) 高温試験データ例(約 1400℃ 白金シール)

図 9(c) 1400℃ 試験。7 分間以上シール気密性は良好で定常維持。その後高温のため、治具配管どうしの接合部から若干のリークあった。ここは供試シールから 150 mm 程度はなれている。治具配管はコスト低減のため白金ではなく、シール保持器含めセラミックやモリブデンとし 150 mm 程度以上の長さはインコ 601 の治具配管と異材接合した。高温のため長秒時(7分以上)では治具同士の接合部溶融がおき若干リークが発生した。

また、K 熱電対は 1300℃ 付近で溶融したが、制御温度センサー(Pt-Re $\phi 3.2$)はいきており、実績として供試シールとの温度差は 10～50℃ 以内にあり、図 9(c) 供試シール温度は 1400℃ に達している。なお、ハステロイ X シールでは、保持器もハステロイ X とし長さ 300 mm 程度とり、治具配管インコ 601 と異材接合した。



3) 摺動部の潤滑法に関する調査・検討(担当: ネット)

1400℃の高温試験の実施にむけ、1500℃で使用可能な耐酸化性を有する可動部シールに向けて、冷却と潤滑について調査を継続した結果、1500℃ 使用可能な耐酸化性のある無機潤滑材存在を確認した。炭化水素系燃料(ケロシン等)の熱分解吸熱反応による冷却効果(定量的に把握済)と組合して可動部の構成を提案した。

4) プロジェクトの総合的推進(担当: ネット)

各要素課題に関する研究進捗を管理し、JAXA角田宇宙センターにて高温試験を遂行し解析も含め本委託業務の実施と成果により、初期の目的はたっせられたと考えられる。得られた成果について国内外の学会等において積極的に発表中であり、本研究成果のさらなる応用適用につとめつつある。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果

- 1) 高温素材物性値を熱力学の原理にもとづく状態図を解析にて作成し、弾塑性解析に適用した。この解析手法の妥当性も確認できた。この成果は、吸熱反応や着火反応にも適用でき、工学的知見の深化や遂行に大きく寄与する。
- 2) 高温試験装置を設計検討し、供試シールが1400℃まで昇温可となるようセラミック管や石英管で囲むようにして装置自身が確立できた。
- 3) 弾塑性解析による塑性域の割合等を提示し、高温サイクルにかけてもシール性を失うことがなくかつ寿命についても確保できる高温シール開発手法を提示できた。
- 4) ケロシン等炭化水素系燃料の熱分解吸熱反応による冷却や可動部高温潤滑材等提案できた。本研究成果の基礎試験データを利用しつつ可動部シールへの開発につながる。

4. 2 研究課題の発展性(間接的成果を含む)

上記4. 1の1)~4)はいずれも他応用への発展性が大であり、すでに可動(ダイナミック)シール機構への成果利用等期待されている。冷却や着火性確保も本成果は大きく寄与する。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

別紙のとおり、内外に発表や論文(英文含む)等、数多く発信し、また予定している。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

NIMS、JAXA角田宇宙センターと連携を密にして解析、試験、評価を合理的な判断ですすめてきた。実ロケットエンジンの開発経験、弾塑性解析経験、第一原理と統計力学的解析手法提示、試験遂行技術等々総合的な研究開発力を駆使し、経費も効率的に使用した。

5. 2 経費の効率的執行

研究開発を進める段階で、シール素材、形状及び設備配管素材のしぼり込み、さらに試験パラメータのしぼり込みを行い、目標に達するよう経費と時間削減を図りつつ工夫を重ね、ハステロイXを代表素材として高温試験を大部分実施した。

6. まとめ、今後の予定

1) 有限要素法による弾塑性解析を適用したシール部の形状の最適化に関する検討 (担当:NIMS)

令和 4～6 年度の弾塑性解析結果を踏まえてシール部の形状の候補を 50 種類から選択し、令和 4～6 年度には、そのうちの 5 種類(シール形状 3 種、締め代 1～2 種)についてシールの供試品を試作した。また、量子力学の観点から Pt について、第一原理計算及び統計力学を基盤とする熱力学計算を行い、高温環境下に於いて示す特性を理論的に明らかにするとともに、得られた結果を用いて、白金シールを素材とするシールの設計を進めた。令和 6 年度に白金シールによる 1400℃の高温試験を複数実施し、7 分以上の高温定常データと昇温時のデータ取得ができ、外部リークによる内部減圧なしの良好な結果がえられた。

コストの観点から高温試験が長秒時になると供試シールからは 150 mm 程度以上はなれた治具配管どうしの接合箇所から微小リークがおきた。異材接合部はローズづけ、溶接等ためしたが長秒時では高温になりわずかだが溶融がおきた。

2) シール部のクリープやサイクル疲労等による気密性能への影響評価

(担当:ネッツ)

機能確認を兼ねた 1400℃までの炉単体試験を実施した後に、試験装置を検討し配管類及び計測系の取付等を行った。

令和 5-6 年度に試作した供試シールについて JAXA 角田宇宙センターにて、主にハステロイ X のシールで段階的に昇温試験を行い、試験中及び試験間に於けるリークのないことや、取得したデータからクリープやサイクル疲労等のデータを取得した。その結果 800℃まで昇温してもリーク等がないことや 36 回の熱サイクルを掛けてもリークがなくシールの形状を解析と試験で立証できた。さらに 500℃-1250℃ 11 回の高温サイクル試験でもリークがなく、点検結果も異常なしであった。手法や解析結果の妥当性も確認できた。1400℃における白金シールについても 7 分間以上高温で安定しており、リークないことを試験データで確認立証できた。

3) 摺動部の潤滑法に関する調査・検討(担当:ネッツ)

1400℃の高温試験の実施に向け、1500℃で使用可能な耐酸化性のある無機質潤滑材の存在を確認した。

さらに、冷却についてケロシン系熱分解吸熱反応も冷却有力手段として提案した。本研究成果とあわせ、動的(ダイナミック)シール機構への適用が期待されている。

4) プロジェクトの総合的推進(担当:ネッツ)

NIMS、JAXA 角田宇宙センターと連携協力し、弾塑性解析及び第一原理計算等を基盤とする熱力学計算を遂行し熱サイクル試験データとの比較しその精度確認もおこなった。研究進捗を管理し、パラメータを順次絞りつつコスト低減化も実施した。また、本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表を継続し、動的シール機構への適用など関係者と進展に努めていく。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	2 件
学会発表	10 件
展示・講演	1 件
雑誌・図書	1 件
プレス	2 件
その他	0 件

(2) 知的財産権等の状況
該当なし

(3) その他特記事項

年月日	開催名称	実施場所	備考
令和 5 年 10 月 24 日	研究成果ワークショップ (航空宇宙関連)防衛装備 庁	TKP 市ヶ谷	進捗と中間成果発表及び ブース展示実施。

添付資料: 超高温における物性解析と状態図作成

Pt-Rh 合金は、1400℃という超高温における弾性特性などの実験値がほとんど無いのが現状である。そのため本課題では、有限要素法解析のインプットデータとして、実験パラメータフリーで第一原理計算のみで Pt-Rh 二元系合金の状態図と弾性特性(弾性定数、体積弾性率、ヤング率、剛性率、ポアソン比)の温度依存性を評価した。合金の自由エネルギー $F(V, T)$ は式(1)で近似される。

$$F(V, T) = E_0 + F_{\text{conf}}(T) + F_{\text{vib}}(V, T) + F_{\text{elec}}(V, T) + F_{\text{spin}}(V, T) \quad (1)$$

ここで V は体積、 T は温度である。また E_0 、 $F_{\text{conf}}(T)$ 、 $F_{\text{vib}}(V, T)$ 、 $F_{\text{elec}}(V, T)$ 、 $F_{\text{spin}}(V, T)$ はおのこの、電子系のエネルギー(0ケルビン)、混合エントロピーの寄与(式(2))、格子振動の寄与(式(3))、電子の熱励起の寄与(式(4),(5),(6))、スピンオーダーリングの寄与である。本研究では $F_{\text{conf}}(T)$ は Bragg-Williams 近似で、 $F_{\text{vib}}(V, T)$ は調和近似で評価した。 $F_{\text{elec}}(V, T)$ は電子の状態密度から評価した。

$$F_{\text{conf}}(T) = -TS_{\text{conf}} = -k_B T \sum x_i \ln x_i \quad (2)$$

$$F_{\text{vib}}(V, T) = k_B T \int_0^\infty \ln \left[2 \sinh \frac{\hbar \omega}{2k_B T} \right] g(\omega) d(\omega) \quad (3)$$

$$F_{\text{elec}}(V, T) = E_{\text{elec}}(V, T) - TS_{\text{elec}}(V, T) \quad (4)$$

$$E_{\text{elec}}(V, T) = \int n(\epsilon) f \epsilon d\epsilon - \int^{\epsilon_F} n(\epsilon) \epsilon d\epsilon \quad (5)$$

$$S_{\text{elec}}(V, T) = -k_B \int n(\epsilon) [f \ln f + (1-f) \ln (1-f)] d^{-1} \epsilon \quad (6)$$

ここで k_B はボルツマン定数、 T は温度、 ω は角振動数、 $\hbar$ はプランク定数である。また固溶体の原子ランダム配置には SQS(Special Quasirandom Structure)モデル(A. Zunger et al., Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 353-356.)を導入した。

また、弾性定数 C_{ij} は式(7)

$$C_{ij} = \epsilon_{ij}^{-1} \sigma_{ij} \quad (7)$$

で求められる。ここで σ_{ij} は歪みである。

さらに体積弾性率 B 、剛性率 G 、ヤング率 E 、ポアソン比 ν はおのこの式(8)、(9)、(10)、(11)で求められる。

$$B = \frac{C_{11} + 2C_{12}}{3} \quad (8) \quad G = \frac{C_{11} - C_{12} + 3C_{44}}{5} \quad (9)$$

$$E = \frac{9BG}{G+3B} \quad (10) \quad \nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (11)$$

図 10 に、Pt:Rh が 1:3 組成と 1:1 組成の規則相の例である $D0_{22}$ と $I4_1/amd$ の結晶構造を示す。また、ゼロケルビンにおける生成エネルギーの Rh 濃度依存性(Convex Hull, 凸胞)を示す。この Convex Hull は、相安定性の温度依存性を評価する際に必要な基本データである。この図より、PtRh は $I4_1/amd$ が、PtRh₃ は $D0_{22}$ が最安定構造であることが分かる。図 11(a)に、

例として $I4_1/amd$ 構造のフォノン分散と状態密度(Density of States, DOS)を示す。さらに図 11 (b)に、相の自由エネルギーに対する各項の寄与の一例を示す。自由エネルギーの温度依存性は、フォノン計算から評価される格子振動の項の寄与が大きいことが分かる。様々な組成と結晶構造、原子配置に対して自由エネルギーを求めることで、最終的に状態図を作成する。

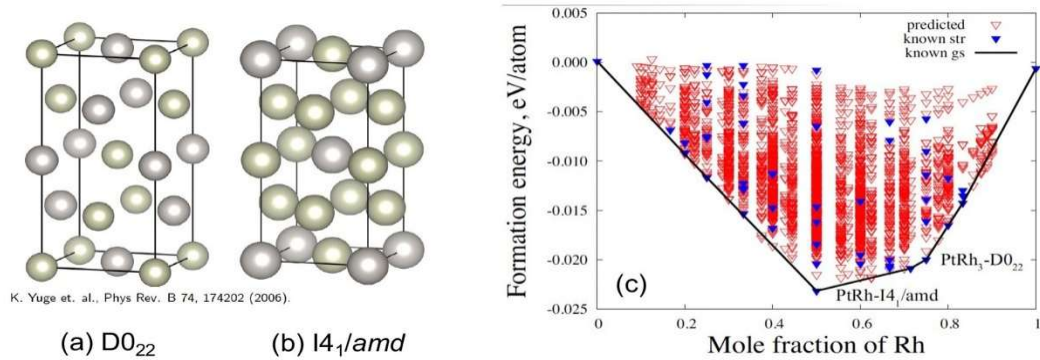


図 10 (a) $D0_{22}$, (b) $I4_1/amd$ 構造、および(c)生成エネルギーの Rh 濃度依存性

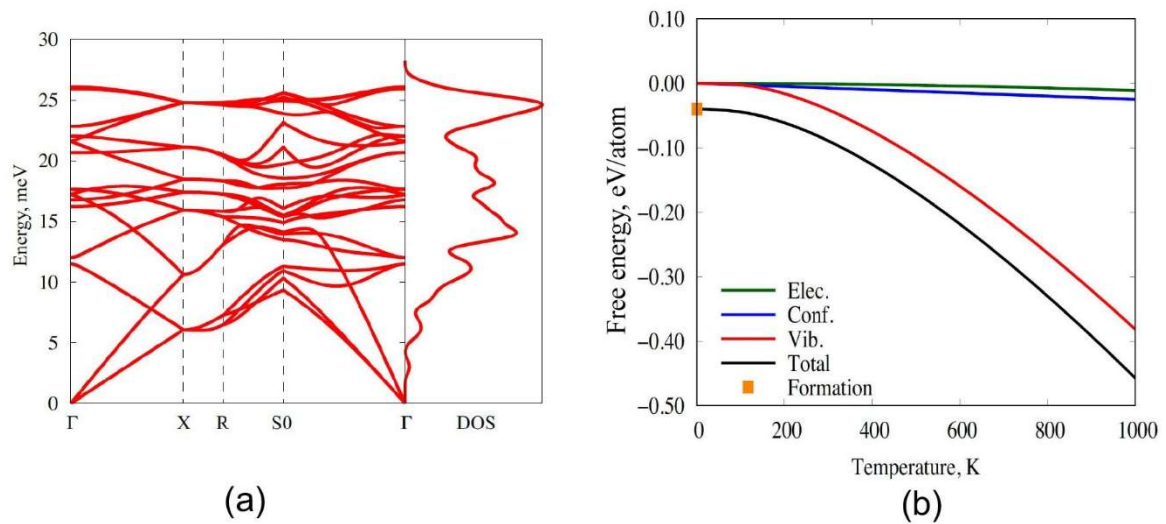


図 11 (a) $I4_1/amd$ 構造のフォノン分散と状態密度(DOS)、
(b)自由エネルギーに対する各項の寄与の例

図 12 に、本計算で最終的に求められた PtRh 合金の状態図の(a)計算値,(b)実験値を示す。計算で得られた結果は、全体的な傾向として実験を良く再現できている。

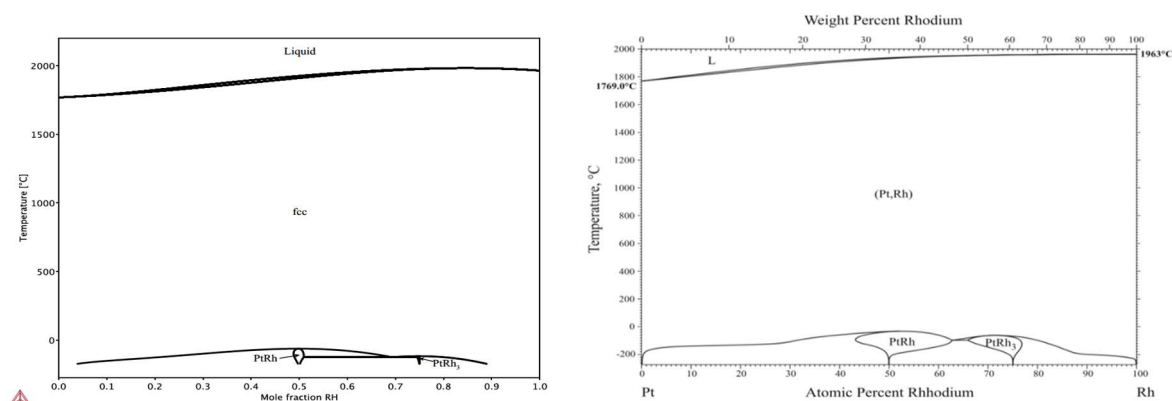


図 12 Pt-Rh 系合金の状態図 (左)本解析、(右)実験の比較

次に弾性特性の計算について述べる。図 13 に純 Pt の純 Pt の剛性率 G 、ヤング率 E の計算と実験値*の比較を示す。本計算は実験を良く再現する事を確認できた。そのため本手法を用いて、実験データの報告がない PtRh 合金の各弾性特性の温度依存性を評価した。図 14 にその結果を示す。これらの値を、有限要素法(FEM)を実行する際のインプットデータとして利用することで、本課題の FEM の精度が向上し、実験の成功へと繋がった。さらに、これまでは実験や現象論に基づいた数値解析で求められてきた材料特性評価について、進展があった。

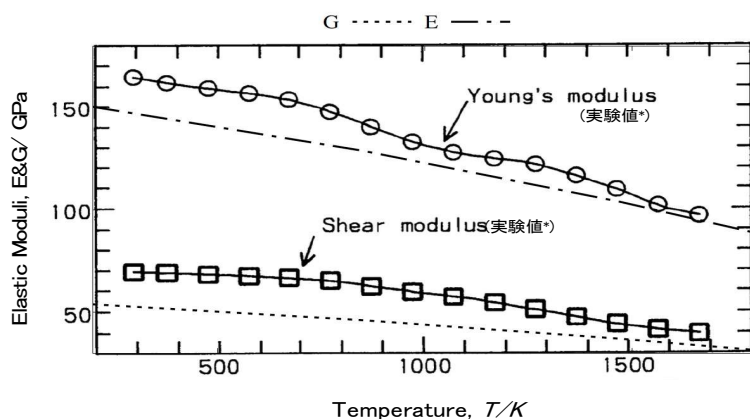
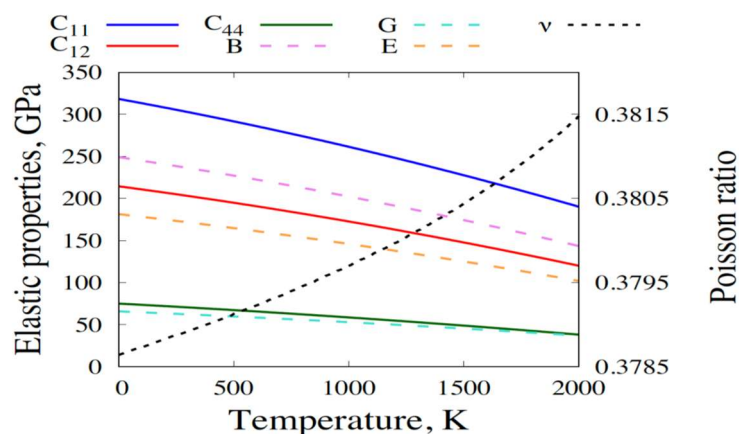


図 13 純 Pt の剛性率 G 、ヤング率 E の計算と実験値*の比較

*T. Hamada et al., Mater. Trans. JIM 37 (1996) 353-358.



14 本解析で求めた PtRh の場合の各弾性特性の温度依存性