

ユニットテーマ提案書

1. ユニットテーマ：

極低温流体の熱流体力学を基軸とする大型科学と応用技術

Fundamental Research and Development for Common Technology and Big science based on Cryogenic Thermo-Fluid Dynamics

2. 提案者（氏名・所属）：高田 卓, 今川 信作, 濱口 真司, 菱沼 良光, 高畑 一也 (NIFS)

3. テーマと研究内容の概要

テーマの意味：極低温流体の熱流体力学研究の視点を基軸に、経験則に埋もれる超伝導マグネット冷却安定性のもつ複雑性を解きほぐす研究を進める。こうした分解要素的な基礎研究から、極低温流体を熱流体力学の特徴的な流体と捉えて一般化する流体物理への展開、分解要素を共通とする一般技術への展開、原型炉マグネットをはじめとする大型科学の為の技術開発へ展開を目指す。

具体的な研究課題：超臨界ヘリウムの低 Re~高 Re における熱伝達の理解を進める。液化冷凍機を使って様々な流量・圧力・温度条件において模擬流路内の温度・流速・圧力分布測定を行う。これにより超伝導導体の断面内の非一様性、冷却安定性を解明する。この計測装置の姿は言葉を変えると極低温風洞であり、一般乱流研究に利用可能な高分解能センサの開発を含めることで流体力学一般への貢献も展望できる。流量と温度、圧力を広範囲で制御可能である為、高 Re 数の実現のみならず Re 数が同一で Mach 数が違うという状態を作ることが出来、圧縮性効果について浮かび上がらせる特長的な風洞開発となる。その風洞中のサンプル例として、超伝導素線から撚り線までの冷却安定性、多孔質や隘路—拡大路の熱流動、沸騰—疑似沸騰現象等の研究を展開する。更に臨界点が 0.25MPa である扱いやすい超臨界流体である特長を生かした模擬実験場としての価値を追求することで、近年の社会的要請が高いものの実験が難しい水素を対象に、NIFS で超臨界ヘリウムを用いた基礎実験、現在協力関係にある JAXA 能代ロケット試験場で実証実験といったコラボレーションを展望する。また、分解要素的基礎研究のゴールの一つである核融合用の大口径・高磁場マグネットについては、他の大規模科学との連携によってその製作、運用技術の習熟等を進める。

10 年間のプロジェクトで達成する目標：強制流動下の超臨界ヘリウム 3 次元的熱流動計測、高 Re 数風洞実現とそれに向けたセンサ開発。これらを基礎とした、CIC 導体における冷却安定性理解、導体評価法の確立、新超伝導素線とその導体構成法の提案。更に、大口径マグネットを用いたダークマター（アクシオン）探索実験実施。基礎研究からの学際的展開として多孔質流れの理解（蓄熱・熱交換器・フィルターなどへの展開）、超臨界流体理解（水素利用場面等）、隘路—拡大路における熱流動理解等を一般技術、大規模科学の為の技術開発者達と協働するプロジェクトの立ち上げを目標とする。まずはアクシオン探索実験を皮切りに大口径マグネットの運用連携を始め、核融合技術との連携した物理が実現することを示したい。

4. 位置づけ：

ITER, JT60SA の超伝導導体：CIC 導体（次ページ図が断面）を基礎に原型炉設計が進められている。中央に超臨界ヘリウムが流れる大きな流路、撚り線の隙間の小さな流路があると共に超伝導線と銅線がより合わさった複雑系ともいえる導体構造であるが、断面内均一状態という大胆な仮定を元に



設計されており、事実上実規模試験による経験則的開発である。加速器用、次世代核融合炉用高温超伝導マグネット等でも同様に安全率過剰設計と経験則に依存しており、NIFS においても実規模中心で、基礎に立脚した縮小試験が出来ていない。そうした中では原型炉のように装置大型化・要求高度化の前に高額な開発費がネックとなり、大学等への技術伝承・展開の裾野も広がらなくなる。この状況を打破する基礎からの学際的科学・学識的工学の模索、同じ悩みを抱える大規模科学との連携・協創を目指している。

極低温流体を使った流体力学への取り組みはフランスのグループが先行しており、特に超流動も含んだ液体ヘリウム温度の乱流研究について一日の長がある。一方で、NIFS 現有の液化冷凍機は温度・流量・圧力可変の幅広いパラメータに特長を持ち、液化機直結の循環型高 Re 数風洞には広いレンジを単一装置で取り組める。大規模科学との連携で掲げたアクション探索については、核融合炉用導体の巨大な電磁力模擬の為に必要であった大口径という要素が新たな探索領域を開く。先行研究では不可能な低質量側に届く大口径の特長と高磁場によって達成可能である。ここで NIFS には無い技術のマイクロ波キャビティ等については東北大と連携し、外部資金獲得を狙っている。

極低温流体を使った流体力学への取り組みはフランスのグループが先行しており、特に超流動も含んだ液体ヘリウム温度の乱流研究について一日の長がある。一方で、NIFS 現有の液化冷凍機は温度・流量・圧力可変の幅広いパラメータに特長を持ち、液化機直結の循環型高 Re 数風洞には広いレンジを単一装置で取り組める。大規模科学との連携で掲げたアクション探索については、核融合炉用導体の巨大な電磁力模擬の為に必要であった大口径という要素が新たな探索領域を開く。先行研究では不可能な低質量側に届く大口径の特長と高磁場によって達成可能である。ここで NIFS には無い技術のマイクロ波キャビティ等については東北大と連携し、外部資金獲得を狙っている。

5. 研究の方法：

温度、流量共に独立に制御可能な液化冷凍機（超伝導マグネット研究棟）を使用し、ヘリウム（超臨界、液体、超流動）の熱流動実験、極低温高 Re 数風洞へと展開する。更に、小型装置群により縮小試験法の検討、新規導体案の検討において相補的な実験を行う。キーコンポーネントは全て現有の装置かそのアップグレードであり、ステップを踏みながら計画を進められるため実現可能性は極めて高い。大型計算機による数値計算による乱流研究との協働も考えている。超伝導については素線開発・導体作成の各段階で NIFS-NIMS をはじめとする連携、冷却についても NIFS-KEK-NAOJ や大学等の連携を軸に進める。水素液化については NIMS 主導の JST プロジェクトに既に参加しており、液体水素利用では JAXA 能代ロケット試験場で LHD 計画共研、科研費で共同研究を進めてきた実績を活用する。数値計算についても NIFS 内の中性乱流研究をハブに大学との連携を持ち、こうしたネットワークを使って研究を進めていく。

6. 自己評価

1) 未来志向であること：現状の数値目標型の経験則的開発の方向性から、分解要素的基礎研究に立脚する縮小試験アプローチによって学際性と大規模科学への裾野を広げる。このアプローチは原型炉のみならず大規模科学全体を大学へ開く未来志向の方向性であると考えます。

2) 目標を具体的に示していること：目標は、多孔質熱流動理解、極低温風洞実現、導体試験法確立、新導体提案、アクション探索実験実現等に分解して示すことが可能であり具体性がある。

3) 10 年後に学术界に輝くテーマに育つこと：超伝導・低温を使った大規模科学の敷居を下げる役割を果たすため、10 年後の核融合をはじめとする大規模科学の基盤を支えると考えます。

4) 多様な「個人のテーマ」を包摂できること：極低温工学・超伝導という分野そのものが実のところ総合工学であり、多くの研究者は金属工学と超伝導物性、発電機と超伝導応用、流体力学と極低温工学、センシングと低温物性というような複数専門にまたがるメンバーで構成されることを期待している。こうしたメンバーで取り組める分野横断的で融合的な本テーマは多様性を包摂できると考える。