

ユニット提案書

①テーマ名

超伝導・低温工学 Superconductivity and cryogenics

②核融合としての課題

核融合における超伝導工学及び低温工学の課題は、高磁場大型超伝導マグネットを高い信頼性のもとで運転するための要素技術の確立である。高磁場大型超伝導マグネットは、超伝導導体内部の局在化する電流分布のために、常伝導機器のように材料などの特性を均等化した平均値で設計することができず、複数の超伝導線材を集合化した導体及びコイルの高い信頼性を得るための要素基本技術はまだ発展途上にある。また、ITER以降の高磁場化要求を満たすために、高性能 Nb₃Sn をはじめとする A15 相金属間化合物線材や高温超伝導線材が今後の大型マグネット製造で主流となると考えられる。これらの材料は本質的に顕著な脆性材料であり、巨大化するマグネット製造において理想的な React & Winding 製法（超伝導相生成のための熱処理後にコイル巻線を行う製法）を指向した常伝導転移（クエンチ）対策のための電磁気学的理解や材料学等の基礎研究を積み上げることで、コイルの高い安全性及び信頼性を確立できる。

一方で、昨今、供給が不安定となる傾向にある希少資源のヘリウムに代わる冷却媒体（寒剤）として、「水素」を利用した超伝導導体・コイルの冷却安定性等における基礎研究の蓄積・整理も、磁場を使った核融合炉の持続性を担保する重要な課題である。

③学術的な特徴づけ（何の研究だといえるか）

LHD 計画や大学との共同研究にて培われた核融合に特化した超伝導・低温工学の遺伝子を、持続可能社会実現の加速的な駆動力となる「水素」まで包含した高い安全性及び信頼性を指向する新たな超伝導工学・低温工学へと展開させる。そして、新しく生み出された超伝導・低温工学の進展を次世代の核融合工学にフィードバックすることで、核融合研究における新しい局面を作り出すだけでなく、他のビッグサイエンスの更なる進展にも貢献できる。

これまで NIFS において、超伝導・低温工学の研究として以下の取り組みを行ってきた実績がある。

- ・大型超伝導導体・コイルの大電流通電特性や安定性評価
- ・高温超伝導線材を積層した数 10kA 級導体の試作・評価
- ・ヘリウムの各種形態（SHe、液体、低温気体等）による冷却特性の把握や、冷却安定性評価
- ・各種超伝導線材の高性能化及び集合導体特性評価

これらの実績は、NIFS が有する大規模ヘリウム液化システムの長期安定運転や温度可変超伝導導体評価装置等の実験環境などのハード面とそれぞれを専門領域とする研究者集団というソフト面の両面において、他の大学・研究機関には存在しない貴重な財産によって実現したものである。

今後は、新しいユニットを構築してこれまでの研究を集約し、持続可能社会の実現を加速する「水素」も取り込みながら高信頼性を指向した工学研究に転換することで、新しい技術開発、及び産業応用を切り開くことが可能となる。例えば、NIFS におけるヘリウム液化システムの長期にわたる高稼働率な運転実績は、今後、水素社会の到来に向けて水素液化機を安全に運用する上で貴重な知見の宝庫であり、実績に基づく安全性評価のエビデンスは新たな規格基準を見出すだけでなく、それに基づいた完全無人水素液化システムの構築のような新しい展開が見込める。このような取り組みは、持続可能社会の実現への積み上げとなり、多種多様な分野とも連携、協働できる。

④アプローチ（定式化）

これまで NIFS が行ってきた超伝導工学・低温工学研究を整理し、持続可能社会変革に向けた新たな超伝導・低温工学研究を展開できるように再構築する。そして、持続可能社会における超伝導システムのあるべき姿や産業機器としての出口戦略を明確にし、超伝導技術の社会実装に向けた研究開発を実施する。また、大学共同利用機関の使命である学術的研究拠点として、超伝導マグネット研究棟が現有する温度可変低温システムなどを用いた各種低温実験環境を、産学連携等の様々なユーザーへ提供する。その中で、持続可能社会を実現するための達成目標 Sustainable Development Goals; SDGs のクリーンなエネルギーとして位置付けられる水素を液体水素として運用する実績を積み、その安全性を含めた社会受容性を高め、水素社会の実現に貢献する。

「水素」は昨年 10 月に策定された第 6 次エネルギー基本計画にも、明確に研究開発すべきエネルギー源として明示され、特に液体水素は超伝導工学や低温工学と非常に親和性が高い物質である。

国内で液体水素を取り扱う研究機関や企業とはすでに交流しており、今後はNIFSがこれまでに積み上げてきた低温研究実績を踏まえ、液体水素利用における基礎研究を展開するとともに、大学共同利用機関として、液体水素研究開発のネットワークのハブ的な存在として、基礎研究から社会実装に向けた試みのゲートウェイ的な役割を担うことを考えている。

また、MgB₂を含めた高温超伝導マグネットの信頼性及び汎用性を高める研究開発を展開する。高温超伝導マグネットは、SDGsとして再生可能エネルギーの主電源化に伴う電力の需給調整力確保の観点から、超伝導電力貯蔵(SMES)への応用として、MJ級のコイル化技術の確立や実証試験の実施などに取り組み、その中で、高温超伝導コイルの大型化に伴う諸課題の解決や20K冷却の信頼性検証等の実績を積み上げ、核融合発電炉用のGJ級大型大容量高温超伝導マグネットの実現へと繋げていく。高温超伝導マグネット研究は、航空機などの輸送用途や、MRI・重粒子線加速器等の医療用途、誘導加熱等の産業用途など、幅広い分野に適用可能であり、協働して進展を図っていく。

これらの取り組みには超伝導マグネット研究棟の現有設備を維持、あるいはアップグレードの為の研究資金が必要であり、「超伝導システムの出口戦略」と「液体水素」をキーワードとした国プロ(JSTやNEDO等のプロジェクト公募)に積極的に提案、そして獲得しながら進めていく。

⑤学際的展開

超伝導工学は、DT核融合の試金石となるITERの実現だけでなく、高エネルギー物理における加速器や分子科学における高分解能NMR等のビッグサイエンスを支える機器の発展に貢献してきた。今後の展開として、高い安全性及び信頼性に基づく超伝導技術が拓く高磁界利用の世界は、様々な分野への応用が可能で、その適用範囲は素粒子・天文(宇宙)・医療・エネルギーなどその幅は広い。素粒子のような純粋科学を取扱う学術界から、エネルギー分野のようなSDGsに向かう社会実装に近い産業界に至るまでに適用可能な広い基盤を作り得る。また、液体ヘリウムに加えて液体水素等の寒剤の選択枝が広がることで、思いもつかないような学際領域との連携も視野に入ると考えている。現時点では、高温SMESによる再生可能エネルギーの発電変動補償でSDGsへ貢献することや、極低温冷却が求められる量子コンピュータを含めた新しい量子技術の開拓に寄与することが考えられる。このような取り組みは、核融合の早期社会実装につながる新しい応用超伝導や低温技術だけでなく、量子技術を研究する大学共同利用機関の拠点として発展する可能性がある。

⑥独自性、優位性など

1) 核融合コミュニティにおける超伝導工学の拠点形成

NIFSは保有する低温設備を活用し、大型超伝導マグネット研究やそれを支える低温研究、材料研究を世界的な展開を果たした。さらに、10kAを超える大容量高温超伝導導体の試作と温度可変での特性評価も実施し、核融合炉用の高温超伝導導体・コイル評価機関としての優位性がある。超伝導マグネット研究棟の持つ温度可変低温システムを中心とした低温設備は温度・流量共に独立して制御可能な設備であり、小型サンプルから大型導体・コイルまで対応できる様に設計されており、液体ヘリウムだけでなく、改造を施すことで液体水素も作り得る能力を有している。液体ヘリウム環境、液体水素環境両者を同時に持つ多彩な低温環境を実現できる独自性の高い研究拠点となり得ることから、他の大学と差別化できる優位性があり、極めて重要である。

2) 超伝導・低温分野における立ち位置

超伝導マグネット研究では、超伝導素線の劣化検出や超伝導機器の故障時の焼損回避などは世界中で解決すべき重要事項と認識されている状況である。そこで、NIFS独自の非破壊検査手法や電流分布計測等の超高感度検出技術を用いた超伝導素線や超伝導機器の劣化検出に取り組む。

また、低温研究ではNIFSの有する低温研究実績を礎に、超伝導素線から大電流導体までの冷却安定性、多孔質や狭路—拡大路における熱流動、沸騰—疑似沸騰現象等の低温物理の基礎研究を展開できる基盤が整っている。加えて、液体水素の安全性や社会受容性の課題に対し、液体ヘリウムで培った実績を基に基礎物性等の研究を進める。そして、液体水素の研究拠点として運用実績を積み上げ、液体水素の冷熱利用やそれを用いた超伝導機器の標準化の先駆けとなる。水素は、核融合の熱出力を利用して効率よく製造できる可能性もあり、核融合の新規出力形態を検討するユニットとも緊密に連携して研究を推進する。

超伝導材料研究においては、機械歪みが小さく可撓性を有する様々な超極細線材化研究に取り組む。この研究の独自性は、高磁場特性を有する化合物系超伝導線材では性質上ありえない可撓性をこれまでよりも大幅な線材縮径によって出現することである。超極細線加工がもたらす可撓性がReact & Wind製法によるマグネット製造が見通せるだけでなく、超高次燃線による交流応用、量子応用や宇宙応用への新しい展開が期待でき、超伝導技術を大きく広げるポテンシャルを有している。