

中性子照射超伝導材料の高磁場、極低温下での物性に関する研究

(受託者) 国立大学法人東北大学

(研究代表者) 四竈樹男 金属材料研究所

(再委託先) 独立行政法人自然科学研究機構核融合科学研究所

(研究開発期間) 平成20年度～22年度

1. 研究開発の背景とねらい

原子力システムの成熟化、高度化に伴い、多様な機能性材料が過酷な放射線環境下で使用されることが現実的な工学課題として検討されるようになってきている。核融合炉は多くの物理・工学課題を抱えてはいるが、エネルギー資源に乏しい日本においては大きな可能性を秘めた魅力的なエネルギー源であり、関連する技術開発を先導的に進めることはこの分野において、世界的なイニシアティブをとる上で極めて重要である。現在最も有望視される磁場閉じこめ型核融合システムの成立性を決定づけるものの一つに経済性に優れる超伝導マグネットシステムが挙げられる。ITER計画の進展、DEMO炉設計へ向けた具体的作業の開始などを契機として、超伝導マグネットシステムの使用条件の詳細が明らかになってきており、その中で核融合反応から発生する中性子による照射効果の重要性が強く認識されるようになってきている。

中性子照射により超伝導マグネットの電気磁気特性は大きく変化することが古くから知られているが、強く放射化された試料の電気磁気特性を使用環境に相当する強磁場、極低温で評価した例は皆無に近い。これは、超伝導マグネットは超伝導材料、電流安定化材料、電気絶縁材料などの多様な素材の複合体から構成されるが、素材そのもの、及びマグネット製造の過程において導入される触媒的添加剤などが中性子により非常に強く放射化されること、その一方、強く放射化した材料、システムを取り扱えるホットラボにおいて、強磁場を発生できる実験システムが整備されていないこと、に起因している。

超伝導マグネットは日本が世界最先端の技術を誇る分野であり、原子力分野での実用化は核融合システムのみならず、核分裂システムにおいても、システムの経済性向上、信頼性向上に大きな正のインパクトを与えることが期待される。本研究では、新たな研究分野への展開を図るための基盤設備として、強磁場、極低温試験設備をホットラボ内に設置する。そして、超伝導磁石を応用した原子炉構造検査システム開発、核融合炉用超伝導磁石開発などの基礎研究を実施するとともに、中性子照射した超伝導コイル材料などの極低温物性研究、極低温高磁場物性研究を行う。

研究の概要としては、ホットラボの有効活用の一つとして、将来的にはJMTRに極低温照射場が整備されれば、極低温で照射し、極低温で照射後特性評価が行える一連の試験環境となり、極めて極限に近い非常に特殊な環境を組み合わせた世界で初めての研究施設となることを目指して、極低温、強磁場下での物性研究設備をホットラボに導入し、極低温材料、超伝導材料の物性研究、核融合や加速器用超伝導コイル応用などを目指した設計データベースの構築、超伝導材料を用いた原子炉内構造の健全性評価システムの開発研究などの新しい研究分野へのホットラボの新たな利用展開を図る。最終年度までに整備された設備を用いて、実用レベルまで原子炉照射された放射化超伝導材料の強磁場下での挙動に関するデータを取得し設備整備の有効性を実証することを目的とする。

2. 研究開発成果

東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターは日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター内に立地し、三基の大型研究原子炉に近接した大学関連の共同利用施設として40年に亘り機能してきている。比較的大規模にRI及び核燃料を取り扱える大学関連唯一の施設として、また、実用レベルの原子炉照射を行え、かつ連携した照射後試験を行える施設として、全国の大学関連研究者のホット研究の場を提供してきている。一般的に中性子照射により、超伝導特性は劣化(臨界磁場、臨界電流の減少)することが予想されてきているが、研究提案の契機となった実験では、劣化の生ずる前に磁場中での臨界電流が増大する可能性があることが明らかとなった。この結果から、従来のような照射後の超伝導特性を電気抵抗の温度依存性のみから評価する手法は超伝導材料に対する中性子照射効果を理解するには極めて不十分であることが明らかとなった。この結果から、少なくとも15T以上の磁場において、200Aを超す臨界電流を測定できるシステムをホットラボに整備する必要が認識され、本事業の実施となった。

表1の事業計画に基づき、想定される磁場下での大電流測定が可能な、無冷媒超伝導マグネットを作成した。作成されたマグネットまた、それをホットラボ棟へ設置した状況を図1に示す。大洗センターでは通常超伝導関連の研究を行うに不可欠な液体ヘリウムの手入が困難なこと、比較的成本が高くなることなどから、共同利用のランニングコストを合理化するために無冷媒超伝導マグネットを整備したが、それを用いて大電流の臨界磁場、電流測定を行うためには、試験片温度を適切に制御し、大電流通電が可能な温度可変インサートの開発が不可欠である。開発に向けた温度可変インサートの試作品の概要(300A)を図2に示す。

表1 本事業の年次計画

項目	年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度	
1. 極低温、高磁場試験設備導入に関する研究 (1) 小型冷凍機の検討 (東北大学) (2) 15.5T超伝導磁石の検討 (東北大学、核融合科学研究所)		試験環境整備フェーズ (設計、検討、製作、設置)		設備導入、検証フェーズ (放射化超伝導材料の特性評価)	
		無冷媒超伝導マグネット冷却システムの整備		試験運転 総合試験、評価	
		無冷媒超伝導マグネット制御システムの整備	無冷媒超伝導マグネットの整備	試験運転 総合試験、評価	
		磁場分布評価作業		鉄シールドの整備	
	2. ホットセルでの高磁場中超伝導特性評価法に関する研究 (1) 管理区域での計測に関わる検討 (東北大学) (2) 臨界電流測定法の検討 (東北大学)		真空排気装置の整備	計測システムの検討	計測システムの整備 総合試験、評価
			4端子法による高精度臨界電流測定法の検討	無冷媒臨界電流測定法の検討	試料通電電源の整備 総合試験、評価
	3. 中性子照射による超伝導材料の特性変化に関する研究 (1) 低被爆試験法の検討 (東北大学) (2) 温度可変インサートの検討 (東北大学)		中性子照射試料の検討	中性子照射試験	ホイスの整備 総合試験、評価
			試料電流導入部の温度分布評価作業	温度可変インサートの検討	温度可変インサートの整備 総合試験、評価

15.5Tの無冷媒超伝導マグネットのホットラボ棟管理区域内への設置

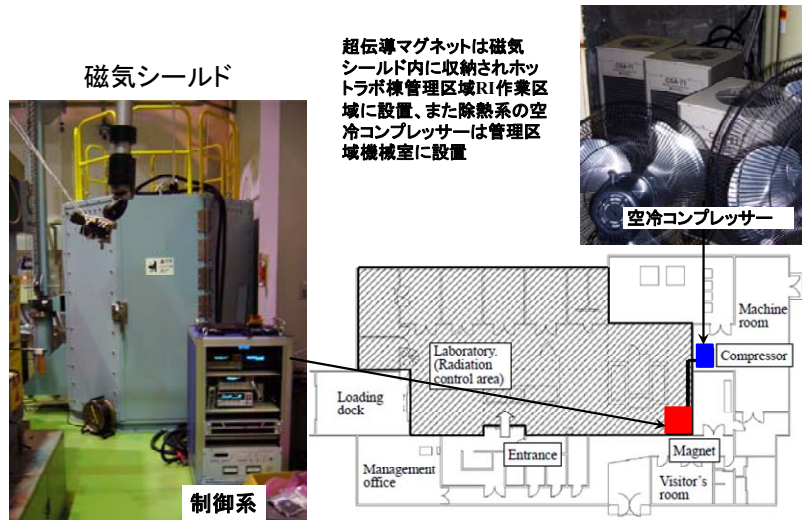


図1 作成した無冷媒超伝導マグネットのホットラボ棟への設置

精密温度制御無冷媒型インサートの開発状況

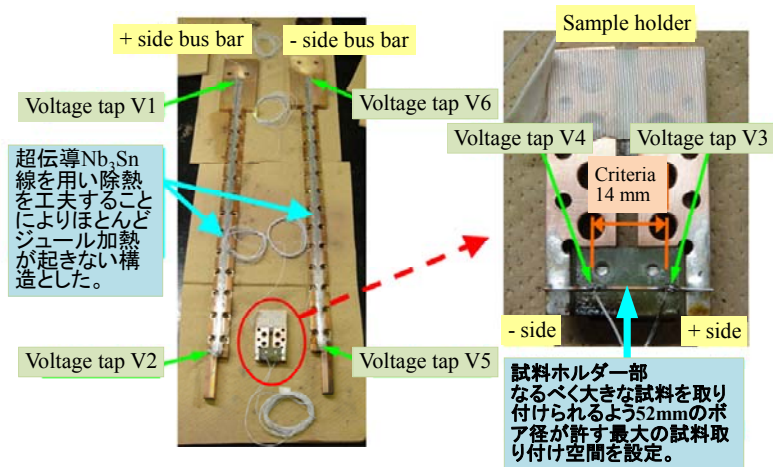


図2 試作された温度可変インサートの概要

測定結果から、許容しうる温度上昇内で 300A までの電流導入が可能なことを確認した。電流変化に対応した発熱分布変化を補償する形で、インサートが適切に機能し、一定温度を保持することが確認された。一方、500A までの電流を流し、且つ試料部位を 4.2K 以下に保持するには 2 台の冷凍機を作動させる必要があることが明らかとなった。

全体の設備整備は予定通り終了し、設備整備と併せて進めてきている超伝導材料原子炉照射もほぼ予定通り進捗した。整備された施設を使用し、原子炉照射した試料を用いた実験を実施し、本設備が予定通り稼働することを確認する一方、世界で初めての原子炉重照射された試料の高磁場中での超伝導特性評価を行うことができた。得られた成果の一例を図3に示す。照射により臨界磁場が増大することが幅広い温度領域で明らかになった。

Nb₃Snの臨界磁場強度の温度依存性(未照射(仙台強磁場センター内のハイブリッドマグネットで測定)と照射材)

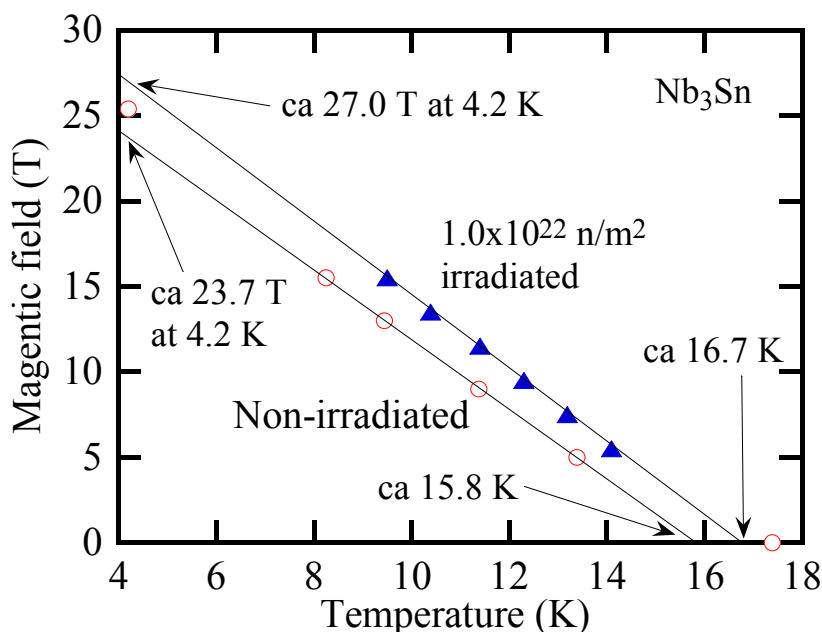


図 3 本装置を用いて測定された臨界磁場の温度依存性。照射前データは金属材料研究所の強磁場センターのハイブリッド型マグネットを用いて測定された。

3. 今後の展望

本事業で放射線管理区域内に整備された超伝導マグネットは世界唯一の設備であり、今後、これを利用して国内外からの多くの共同利用研究者が大洗センターを訪れることが強く期待される。これらの研究を通じて、超伝導材料に対する中性子重照射効果に関する包括的な理解が得られると同時に、核融合炉開発に不可欠な工学的データベースが構築されるものと強く期待される。一方、本事業をより有効な研究手段とするためには、原子炉内極低温照射の実現が重要となる。現在までに、日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターと JMTR 内の極低温照射設備実現に向けて方策を検討してきている。ある程度の資金的裏付けが必要な計画であり、一朝一夕に実現することは難しいが、今後とも関係研究コミュニティとの連携を深めつつ実現に向けて努力してゆきたい。また、本事業と平行して、原子力環境で使用される超伝導材料開発に向けた研究ネットワークを立ち上げつつある。このネットワークを通じて、大洗センターの共同利用がより一層活性化することを強く期待している。

4. 参考文献

本研究の概要、及び成果については、国内誌、「低温工学」及び、核融合工学に関する代表的国際会議である、SOFT (Symposium on Fusion Technology, 2010) ICFRM (International Conference on Fusion Reactor Materials) 等で報告されており、また、成果の一部は公開論文誌、Fusion engineering and Design において複数公表され、また Journal of Nuclear Materials に投稿中である。