

平成11年度の国立機関原子力試験研究 (核融合分野)の研究評価結果について

平成10年6月12日
原子力委員会核融合会議
計画推進小委員会

平成10年6月10日に開催された計画推進小委員会において2件の研究課題についてヒアリングを実施した。これらの研究課題はいずれも各研究機関で事前に外部評価が行われていることから、当小委員会は再度詳細な評価を行わず、原子力委員会の核融合計画の基本方針との整合性、他の研究課題との調整等の観点に重点をおいて、ヒアリングを実施した。以下にその結果概要を示す。

出席委員は、宮主査、本島委員、菊池委員、西委員である。

なお、ヒアリングにあたり関村専門家(東大)、松井専門家(東北大)、安藤専門家(原研)に御参加頂き、御意見、御助言を頂いた。

○事前評価研究課題「核融合炉の超強磁場化のための要素技術の開発」

金属材料技術研究所

研究期間：平成11年～15年

研究内容：原型炉に向けた超電導コイルの高性能化(強磁場化、小型化)のため、従来のNb₃Sn超電導線材に匹敵する高い臨界電流密度と、ジェリーロール法Nb₃Alに匹敵する耐歪み特性を兼ね備える可能性を有する急熱急冷・変態法Nb₃Al超電導線材の開発を行う。

ヒアリング結果

- ・ 本研究による成果は、超電導コイルの高性能化を進め、核融合炉の小型化とコスト低減に有効であると考えられる。
- ・ 本研究は、原子力委員会の「第三段階核融合研究開発基本計画等」の「核融合研究開発の推進について、第IV章 2. 炉工学技術に関する研究開発 (3)超電導コイル」の開発目標の達成に資するものであると判断できる。
- ・ 超電導コイルに応用するためには、既存の超電導線材の持つ安定性を実現させ大型コイルへの応用実績を得ていくことが重要であり、技術的な観点から本研究を進めていく必要があると判断できる。
- ・ 本研究の重要性を考慮して、原型炉に向けた超電導コイルの高性能化の観点から、今後我が国として核融合研究開発基本計画等に沿った核融合炉の高性能化のための炉工学

技術の研究計画を具体的に実施して行く必要がある。

○中間評価研究課題「低放射化核融合炉構造材料における核変換元素の影響」

金属材料技術研究所

研究期間：平成8年～12年

研究内容：原型炉に向けた低放射化材料の開発のため、候補材料であるフェライト鋼やバナジウム合金に核変換元素（水素、ヘリウム）を照射して力学的特性への影響を調べる。また材料組織を観察し、材料の特性変化の機構の解明を目指し、将来の耐ヘリウム脆化合金設計に有益な指針を得る。

研究進捗状況：フェライト鋼の核変換元素の照射後サンプルにおいて、クリープ試験を行い、応力、核変換元素の照射量や温度との関係を調べた。また、ミクロ的観察として破断面の核変換元素の気泡サイズ分布の測定をおこない、定量的な組織データとした。

ヒアリング結果

- ・ 原型炉に向けて、低放射化材料の開発は最も重要な研究項目であり、現在候補材料であるフェライト鋼やバナジウム合金の、力学的特性の核変換元素による影響を調べることは、原型炉の高性能化の観点からも重要である。
- ・ 本研究は、原子力委員会の「第三段階核融合研究開発基本計画等」の「核融合研究開発の推進について、第IV章 2. 炉工学技術に関する研究開発 (6)構造材料」の開発目標の達成に資するものであると判断できる。
- ・ 本研究においては、脆化機構の原因解明の研究がなされている点で重要であり、積極的に推進すべきである。
- ・ 本研究の重要性を考慮すると、適切な人員体制の整備が望まれる。
- ・ 古典的なやり方ではなく、核融合炉構造材開発のための金材研独自のモデル開発という観点も必要である。

以上

国立機関原子力試験研究（核融合分野）の現状及び今後の予定について

(参考)

平成10年6月 現在

研究課題名	施策概要	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16
低放射化核融合炉構造材料における核変換元素の影響（金材研）	低放射化フェライト鋼及びバナジウム合金等の核変換ガス元素（ヘリウム及び水素）の力学的特性への影響を比較・検討・評価し、その特性変化が起こる機構の解明を目指す。							※1						
核融合炉の超強磁場化のための要素技術の開発（金材研）	最大超強磁場が20T級のトロイダルコイル実現を目標とし、急熱急冷・実態法 Nb3Al 線材について、その長尺化、高性能化、大電流容量化およびコイル化のための要素技術を開発する。							※1						
核融合用高磁界超電導マグネットの応力緩和技術に関する研究（電総研）	Nb3Sn を用いてコイルを作成し、応力自己支持型導体の試験を実施。また、対ひずみ性、対放射線性に優れた NbN や Nb3Al についても検討を行う。													
Krレーザーによる核融合の研究（電総研）	高効率で高繰り返し動作が可能なドライバーの開発を目指す。H10-H12までは、高繰り返し動作技術を確立する。このため、スイッチを固定化し耐用性の向上を目指す。							※2						
核融合反応に関する研究（電総研）	中規模逆磁場ピンチ実験装置TPERXを用いた高磁・高ベータプラズマの高効率閉じ込めの実証。H9に設置が完成し、現在主に電源の増強を図っている。													
速中性子による固体中軽元素の動的挙動の測定技術に関する研究（名工研）	速中性子を用いた中性子弾性反跳粒子検出(NERD)法により、材料表面の軽元素を非破壊で測定する技術の確立を目指す。													

※1 当小委員会で今回ヒアリングを実施するもの

※2 昨年度、核融合会議において事前ヒアリングを実施済

1. 研究課題名 核融合炉の超強磁場化のための要素技術の開発
(研究実施機関名) 金属材料技術研究所

2. 目的
磁気封込型核融合炉の開発計画では、現在、パルスモード運転の実験炉 (ITER) においてその大型超伝導マグネットの開発が進行中であり、その場合の超伝導マグネット最大経路磁界は13Tとされている。しかし、次のステップである定常モード運転の原型炉 (SSTR) や実証炉 (Dream) では、トロイダル磁場の大幅な向上 (最大経路磁場: 16.5T (SSTR)、20T (Dream炉)) が要求されている。この強磁場化は、核融合炉をコンパクト化し建設単価の大幅な低減と誘導放射能の最小化をもたらすことから、核融合炉の実用化に決定的に重要であり、可能な限りの強磁場が望ましい。

強磁場化には、強磁場における特性の優れた超伝導材料の開発がキーとなる。強磁場化に対応可能な核融合炉用超伝導材料としては、(1)強磁場下での J_c が高いこと、(2)強大な電磁力で臨界電流密度 J_c が劣化しないこと、(3)中性子照射に対して安定であること、(4)単長がkmクラスの長尺性であること、(5)数万Aクラスの大電流容量化が可能なこと、(6)多量の安定化材を有すること、(7)交流損失が小さいこと、などの性質が求められる。最大経路磁場が20T級のトロイダルコイルの実現を目標にすると、現在、ITERのために開発が進められているNb3Sn線材や低温拡散法ジェリーロール (JR) Nb3Al線材では、耐力力望み性と高磁界での J_c がそれぞれ不十分で、対応できない。

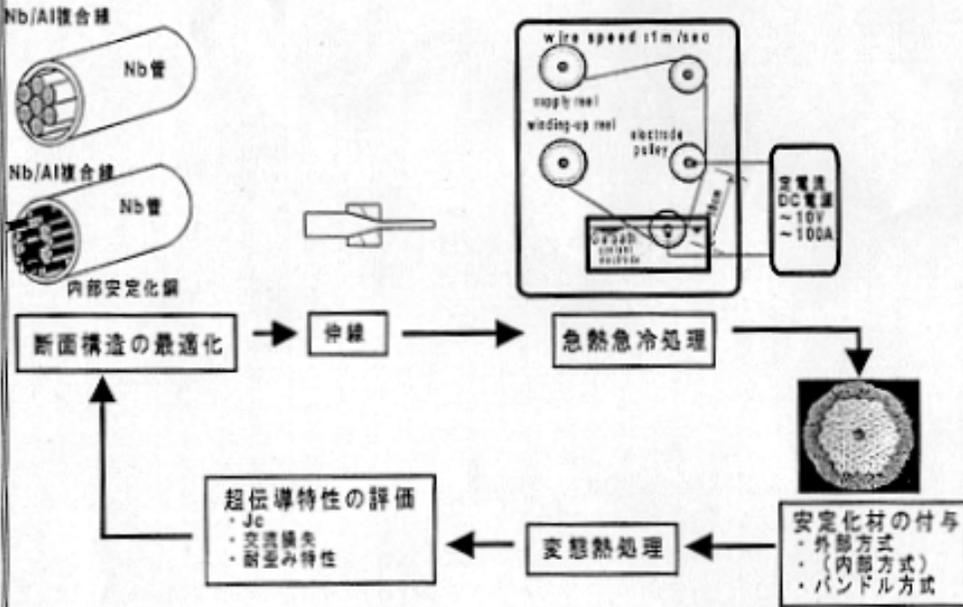
一方、低温拡散JR法とは全く異なるプロセスで製造される急熱急冷・変態法Nb3Al線材は、線材レベルで、Nb3Snを遙かに凌ぐ高い臨界電流密度を有し、また、低温拡散JR法Nb3Al線材に匹敵する極めて良好な耐歪み特性を示す。製造方法や機械的特性に未だ多くの問題を有する酸化物超伝導体の開発状況を考慮すると、変態法Nb3Al線材は20T級のトロイダルコイルを実現する可能性が最も大きな材料といえる。しかし、急熱急冷を施して過飽和固溶体である前駆体を作製する必要があるため、現状では、十分な冷却速度を確保するために線径が細く、素線の電流容量が小さい。また、2000℃付近の高温熱処理を必要とするため、従来のNb3Sn線材と違って最初から銅を安定化材として線材内部に含まない。急冷後、安定化材を付与した上でストランド・導体化する必要がある。さらに、変態熱処理条件等が従来の化合物線材の熱処理条件と異なることから、コイル化にも多くの開発要素がある。

したがって、本研究では、最大経路磁場が20T級のトロイダルコイル実現を目標として、この磁場領域で高い臨界電流密度を有し、大型機器化した場合にcriticalな耐力力望み特性が極めて良好な、急熱急冷・変態法Nb3Al線材について、その長尺化、高性能化、大電流容量化およびコイル化のための要素技術を開発する。

(「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」(平成6年6月 原子力委員会)において、新技術に関する先進的な研究開発、核融合炉の高性能化を図る炉工学技術の研究開発が要請されている。また、国立研究機関においてはその基礎的な研究開発が要請されている。)

3. 平成11年度の研究の概要
(1) 強磁場新超伝導材料の高性能・長尺化

変態法Nb3Al線材の断面構造を最適化し、安定化材を付与した高性能・長尺線を作製する。断面構造に関しては交流損失低減のためにフィラメントの縮径化をはかり、また J_c の増大のためにNbマトリックス比の低減をはかる。安定化に関しては、(a)急冷処理後に行う銅メッキ等による外部・安定化方式、(b)Nbで被覆した銅線をNb/Al複合体内に最初から均一に分散させる内部・安定化方式、(c)急冷処理した素線を銅線と一緒にバンドル加工する方法、などを実施する。



(2) コイル形状での性能実証
密巻き小コイルのための最適な含浸材や絶縁材を検討する。

(3) 核融合炉用導体化の検討
大電流容量導体化を目指した急冷材 (過飽和固溶体) のストランド化のために、曲げ試験、平角成形性等の塑性変形能を評価する。

・注) ポンチ絵を付けること

<p>1. 研究課題名 低放射化核融合炉構造材料における核変換元素の影響 (研究実施機関名) 金属材料技術研究所</p> <p>2. 目 的</p> <p>一般に、中性子照射環境下で使用される材料では、中性子と材料構成原子との核反応により核変換元素が生成され、様々な材料特性が変化(劣化)するとともに、材料の放射化が起こる。特に原型炉以降の核融合炉においては、第一壁やブランケットを構成する構造材料がプラズマからの高エネルギー中性子の重照射を受けるため、核変換の問題は極めて重要なものとして認識されており、このような重照射に耐え、かつ誘導放射能の小さい核融合炉構造材料を創製することが核融合炉の実用化に不可欠であると考えられている。</p> <p>本研究は核融合原型炉以降の構造材料として有望視されている低放射化フェライト鋼及びバナジウム合金等について、核変換元素が惹起する特性変化、とりわけ重要と考えられている核変換ガス元素(ヘリウム及び水素)の力学的特性への影響、に注目して、各種材料における影響の程度を比較・検討・評価し、原型炉用低放射化核融合炉構造材料の開発に寄与することを目的とする。加えて、将来の合金設計に有益な指針を得るために、特性変化が起こる機構の解明を目指す。このため本課題においては、以下の事項について研究を実施する。</p> <p>(1)【力学特性データの取得及び評価】：サイクロトロン照射により水素、ヘリウムを注入して核変換効果を模擬した試験片等について力学的特性を調べる。各種の材料について規格化された試験を行ってデータを取得し、それぞれの材料の性能を比較・評価する。照射材の試験に関しては、重要度が高いにも拘らず実施例が少ないクリープ試験に重点を置く。</p> <p>(2)【材料組織観察及び評価】：種々の顕微鏡、分析装置を用いて核変換効果を模擬した試験片の組織観察・解析を実施する。特性変化と密接な係わりのあるものに関しては定量データを取得して評価を行う。クリープ破断試験片等については、特に詳細に観察を実施し、力学的特性と微細組織の間の相関を明らかにする。</p> <p>(3)【特性変化機構の解明】：上記(1)、(2)で得られた結果をもとに、現象のモデル化を通して核変換元素による材料特性変化機構の解明を計る。</p> <p>このような研究の必要性は以下に示す報告書等に明記されており、本課題はこれらの要請に応えることを目標とするものである。</p> <p>(A) 核融合会議報告書[H4.5]では、構造材料について、装置の放射化の低減など安全性の一層の向上のため、低誘導放射化材料の開発を推進すべき旨が述べられている。</p> <p>(B) 原子力委員会報告書[H6.6:原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画]において原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎を形成する研究を、国研を含む各研究機関の連携・協力のもとで推進すべき旨が述べられている。</p> <p>(C) 核融合会議 計画推進小委員会報告[H7]で、核融合原型炉構造材料について産・学・官の協力のもとでの研究開発推進が謳われており、国研の研究分担が望まれている。</p>	<p>3. 平成11年度の研究の概要</p> <p>平成11年度も旧年度に引き続き、下記(1)~(3)の項目について、各種候補材料のデータ集積及び実験結果の検討・解析に努める。平成11年度に特に力を置く事項を_____で示す。</p> <p>(1) 力学特性データの取得及び評価</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">照射後試験</div> <div style="margin-right: 10px;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>・クリープ試験 引張試験</p> <p>↓</p> <p>・注入量依存性 温度依存性 応力依存性</p> </div> <div style="margin-left: 20px;"> </div> <div style="margin-left: 20px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; writing-mode: vertical-rl;">H, He感受性の比較</div> <div style="margin-left: 10px;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; writing-mode: vertical-rl;">供試材料の総合評価</div> </div> </div> <p>(2) 材料組織観察及び評価</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">組織観察・分析</div> <div style="margin-right: 10px;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>・電子顕微鏡(TEM, SEM) 光学顕微鏡</p> <p>・組織解析(画像解析) 元素分析(微小領域)</p> <p>↓</p> <p>・定量組織データ</p> </div> <div style="margin-left: 20px;"> </div> <div style="margin-left: 20px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; writing-mode: vertical-rl;">力学特性との相関</div> <div style="margin-left: 10px;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; writing-mode: vertical-rl;">核融合原型炉低放射化構造材料開発</div> </div> </div> <p>(3) 特性変化機構の解明</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">機構モデル構築</div> <div style="margin-right: 10px;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">機構の解明</div> <div style="margin-left: 10px;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">合金設計指針</div> </div> <div style="margin-left: 20px; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>・定量組織データの活用</p> <p>↓</p> <p>・核変換ガス気泡効果 原子状核変換元素効果</p> $i^+ = i_1(\phi) \frac{v_0}{kT\phi}$ $s = 1 - s$ $s = \frac{z_1^2 D_1 c_1 - z_2^2 D_2 c_2}{z_1^2 D_1 c_1}$ $i_1(\phi) = \sum_{j=1}^n b_j \phi^j$ </div> </div>
--	---

・注) ポンチ絵を付けること