

氏 名 大森俊道

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1127 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 強磁場大型装置環境下における磁気遮蔽に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 金子 修  
教授 竹入 康彦  
教授 今川 信作  
教授 西村 清彦  
教授 吉岡 正和（高エネルギー  
加速器研究機構）

## 論文内容の要旨

本論文は、強磁場大型装置環境下で行われる磁気遮蔽に関して、材料科学の視点で行われた材料開発の研究、および電磁気学の視点で行われた性能予測と設計技術の研究、さらに工学の視点で行われた利用技術と最適化に関する研究についてとりまとめたものである。研究の内容は「磁気遮蔽材料」に関する検討と「磁気遮蔽の性能予測と設計技術」に関する検討に大別され、さらにこれらの研究成果による「実用化と応用」に関する検討により構成される。

第1章では、強磁場大型装置環境下での磁気遮蔽について概観した。核融合科学分野と加速器科学分野における物理科学実験を例に挙げ、磁気遮蔽の必要性を概説した。また、材料技術と磁気遮蔽性能の理論的扱いに関する現状を整理し、軟磁性材料を強磁場大型装置環境下の磁気遮蔽へ適用する上での研究課題を抽出し、論文の導入とした。

第2章では、磁気遮蔽用材料の研究開発について論じた。強磁場大型装置環境下で必要とされる磁気遮蔽は、限られた空間内で地磁気レベル以下の遮蔽が求められる場合が多い。そのため、遮蔽材料には、飽和しないための高磁束密度と、低磁場まで遮蔽するための軟磁性が求められる。これらの要求に答える軟磁性材料を量産プロセスで提供する手段を検討することが研究課題である。

軟磁性は構造敏感な性質であるため、歪による特性劣化が著しいことが知られている。強磁場大型装置環境下における磁気遮蔽は、巨大な実験設備に応じて大型化する場合が多く、慎重に据え付けられたとしても歪の導入を避けることが難しい。小型なものであっても、その製造、組立の過程で歪が導入される可能性がある。また、放射線による損傷、特に核融合では D+T 反応で生成される高速中性子による遮蔽材料へのダメージも懸念される。すなわち、強磁場大型装置環境下における磁気遮蔽では、遮蔽材料が必ずしも理想的な状態でないことを前提に設計しなければならない場合が多い。そこで、きわめて微小な歪が遮蔽材料の軟磁性におよぼす影響を系統的に調査するとともに、そのメカニズムを考察することを研究の対象に含めた。第2章で論じる磁気遮蔽材料に関する研究の成果は次のとおりである。

- ・ 純鉄厚板の製造プロセスに加工熱処理技術を適用し、結晶組織の大きさと軟磁性の関係に関する系統的なデータを収集した。あわせて、鉄の飽和磁化を損なうことなく、最大透磁率を2倍、保磁力を約半分に改善する手法を見出した。
- ・ 純鉄の結晶組織の粗大化は、上記の加工熱処理技術をもってしても Anneal 温度の上限( $A_3$  変態温度)に制約されるため、粗大化には限度があることを定量的に示した。
- ・ Al 添加による  $A_3$  変態制御と高温 Anneal の組み合わせにより結晶組織の粗大化を図り、軟磁性を向上させることを目的とする材料設計技術について検討した。その結果、Fe-1%Al 合金で最大透磁率を約5倍に、保磁力を約1/4に改善できることを見出した。磁束密度の低下は1mass%のAl添加分に相当する2%程度と非常に少なく、実用上問題にならない。
- ・ 微小な塑性歪による軟磁性の変化を系統的に調査した。結晶組織の粗大化により保磁力の歪による増加が緩和されることを示し、その理由について考察を加えた。

第3章では、磁気遮蔽の性能予測と設計技術に関する研究について論じた。ここでは、

遮蔽材料の磁性を踏まえた磁気遮蔽の取り扱いに関する検討を通じて、その最適設計と磁気遮蔽に望ましい材料特性の指針を示すことを目的とした。

磁気遮蔽性能は、遮蔽材料のヒステリシスの影響を受けることが明らかであるにもかかわらず、現状では、ヒステリシスの影響は考慮されていない。そこで、遮蔽性能にヒステリシスの影響が観測されることを実験的に示し、現象論的にこれを解析した。次に、ヒステリシスの影響を考慮したシミュレーション手法を提案し、実験結果と比較した。このシミュレーション手法から導かれる「前履歴によってヒステリシスの影響が最も大きく現れる漏洩磁場の最大値 (maximum leakage field)」を定義し、これを磁気遮蔽性能の指標として、性能予測と設計に用いることを提案した。また、歪による軟磁性の劣化が遮蔽性能にどのように影響するのかを明らかにするために、同様のシミュレーションを用いてヒステリシスを考慮することの有用性を明らかにした。

第3章で論じる磁気遮蔽の取扱いに関する研究の成果は次のとおりである。

- ・材料が理想的な状態、または歪の影響により劣化した状態のいずれの場合でも、遮蔽可能な磁場の限界は保磁力により支配される。従来の取扱い方法ではこのような結論は得られない。
- ・軟磁性の歪による劣化にともなう漏洩磁場の増加は、遮蔽構造の設計次第でその保磁力の増加分にまで緩和させることができる。従来の取扱い方法ではこのような結論は得られない。
- ・二重構造化された磁気遮蔽において、外層は、内層を最大限に活用するために重要な役割を担っていることを明確に示した。仮に歪による遮蔽性能の劣化が顕著に現れるような状況であっても、外層に適切な材料と形状を採用することにより、内層の歪による遮蔽性能の低下を最小限に抑えることができる。
- ・漏洩磁場の最大値を低減させるとの観点から、望ましい磁気遮蔽材料の特性として低保磁力と保磁力の歪による増加が少ないことを導いた。

第4章では、第2章の材料に関する成果と第2章および第3章の研究内容の応用について論じた。第2章で提案したFe-1%Al合金は、既にいくつかの物理科学実験の磁気遮蔽に採用され、それぞれの学術の発展のための手段として間接的に貢献している。また、Fe-1%Al合金の材料設計思想は粉末冶金技術にも応用され、磁気遮蔽用途に限らず、優れた軟磁性を実現する技術としても他の学術論文の引用を得ている。

はじめに、開発した材料の実績として、素粒子、原子核実験分野および核融合科学実験分野に適用された実例について概説した。次に、第2章と第3章の研究成果の応用として、二重構造の磁気遮蔽の最適設計の指針を示した。この検討では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置に設置されている中性粒子入射加熱装置の中性化セルの磁気遮蔽を題材とした。検討では、次に示すような、従来の考え方では導くことができない最適設計のための指針として、以下を提案した。

- ・外層への配慮を怠ると、内層に多大な設計上の負荷を強いる。このような状況が内層の厚肉化や過剰品質、あるいは磁束密度で不利な材料選択を促している。また極端なコストアップや性能面での制約をもたらす。
- ・外層の設計(性能と厚さ)を正しく行うことにより、内層の機能を十分に活かすことができる。たとえば、内層の減肉やより安価な材料選定が可能になる。

- ・ 第 3 章で論じた漏洩磁場の最大値を参照することにより、遮蔽空間の目標磁場に見合った材料選択が可能になる。

第 5 章では、今後の展望として、磁気遮蔽の設計の方向性とともな磁気遮蔽材料への要求性能について提案し、論文を総括した。

## 論文の審査結果の要旨

磁場閉じ込め方式核融合実験装置では、その方式故に強い漏れ磁場を装置周辺に発生するため、計測装置や制御装置の一部では磁気遮蔽が必須となる。この磁場は基本的に静磁場ではあるが実験条件に応じてその強度や方向が変化するという特徴を持つ。空間的な制約が強い実験環境下で  $10^{-2}$  テスラ台の強磁場を地磁気レベルまで遮蔽するためには高い飽和磁束密度と優れた軟磁性が求められる。また、現実の応用場面では磁氣的履歴を無視できないことと、軟磁性材料が構造敏感であるため機械歪による特性劣化とが問題となる。これらのことは定性的によく知られていることであるにもかかわらず、遮蔽材料の選択やその構造決定にあたっての具体的なガイドラインはこれまで存在しなかった。

出願者は民間企業に在職している社会人学生であり、高い飽和磁束密度を持つ材料である鉄の軟磁性を高める研究を行ってきたが、その具体的な応用分野である磁気遮蔽について系統的な研究が行われていないことに気づき、総研大において自ら研究することを決意した。そして材料の持つ磁気特性の非線形が問題となる環境下での磁気遮蔽解析を行い、遮蔽材の特性を評価する上では従来考えられていた透磁率だけではなく保磁力が重要であることを明らかにした。

論文は5章で構成されている。第1章の序論では核融合装置や加速器等の強磁場環境下での磁気遮蔽を行う上での課題を整理して論文の導入としている。

第2章は鉄の軟磁性を良くするための方法について論じている。出願者は鉄の加工熱処理により結晶構造が大きくなると軟磁性が良くなることに着目した。通常加工熱処理の温度には鉄の相転移により上限があるが、出願者はアルミニウムを1%添加することで相転移を避け、更なる高温での処理を行うことを可能にした。その結果、これまでに無い結晶粗大化を実現し予想通りの磁気特性改善に成功した。実際この材料は従来の鉄の飽和磁化をほとんど損なうことなく、最大透磁率は5倍、保磁力は1/4になっている。またいくつかの磁性材料に対して機械的な歪の及ぼす影響を調べた結果、軟磁性は極めて小さな塑性歪によっても劣化すること、特に透磁率だけではなく保磁力も変化し両者の変化の程度には差があることを明らかにした。

第3章では磁気遮蔽の性能予測について考察している。磁気遮蔽の原理は古くから知られているが、出願者は製作した磁気遮蔽体の遮蔽特性を調べることにより、材料の持つ磁氣的履歴が無視できない環境下で、材料がさまざまな履歴を持った状態で適用された場合でも保証できる最大の遮蔽性能を評価する時には、それが材料の保磁力で決まることを示した。このことは特に製作加工上の塑性歪を避けられない設置環境では重要な役割を果たす。第2章で明らかにされたように塑性歪による透磁率と保磁力の劣化は材料によって異なり、従って材料選択にあたっては塑性歪による保磁力の増加の少ないものを選択すべきであることが導かれるからである。これは従来なかった考え方であり、二重遮蔽における外層と内層の最適化にも活かされる。

第4章では印加磁場が逆転するような環境にある核融合科学研究所大型ヘリカル装置の加熱装置である中性粒子ビーム入射装置の大型磁気遮蔽について本研究の成果を基に再検討した。その結果、現設計の二重遮蔽の外層と内層の組み合わせは必ずしも最適ではなく、コスト面も含めより合理的な設計が可能であることを指摘している。

第5章は全体の総括である。

審査では提出された論文を基にその内容の正確さや新規性、学術的な価値を吟味した。その結果、上記の内容は博士論文に値する研究成果であると判断し、審査委員全員一致で合格とした。