



Title	核融合用超伝導磁石のためのCIC型超伝導導体の安定化設計：素線絶縁, 含浸および偏流防止による安定性余裕の向上
Author(s)	妹尾, 和威
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/41240">https://hdl.handle.net/11094/41240</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名	妹尾和威
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第14008号
学位授与年月日	平成10年4月3日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文名	核融合用超伝導磁石のためのCIC型超伝導導体の安定化設計 —素線絶縁、含浸および偏流防止による安定性余裕の向上—
論文審査委員	(主査) 教授 岡田 東一 (副査) 教授 宮崎 慶次 教授 山本 幸佳

### 論文内容の要旨

本論文は、変動磁場によりプラズマ閉じこめを実現するトカマク型核融合実験装置のための超伝導磁石の性能向上に主眼をおいた、CIC (Cable in Conduit) 型導体の安定性能向上を目的とした開発研究を、現用導体とは異なる基本設計指針に基づいてまとめ、有用性を検討したものであり、以下の7章から構成されている。

第1章においては、現用CIC型導体の設計基準と開発課題について言及している。CIC型導体を構成する多数の超伝導素線間の接触抵抗は、導体性能を決定する重要なパラメータである。現用導体においては、素線表面のクロムメッキなどで接触抵抗を制御することで、3つの安定性余裕、すなわち温度余裕、クエンチエネルギー余裕、電流余裕を並立させることを設計の基本にしている。それに対して、本研究では素線間絶縁を基本とした設計の可能性について検討している。

第2章においては、素線絶縁を有さない現用導体における素線間結合損失の問題を、実験および解析により評価している。素線間結合損失の増加は、導体の温度余裕の低下を引き起こすために、抑止されなければならない。現状では素線間接触抵抗を工学的に制御することは不可能であり、さらに経年変化により損失は増加する傾向にあるという問題について述べている。

第3章では、絶縁素線を適用することで損失を抑制した場合に、転流による安定化が図れないために、導体のクエンチエネルギー余裕が著しく低下する問題の発生機構について検討している。次に、応力分布と機械的擾乱エネルギーを関連付けることにより、CIC型導体における機械的擾乱の大きさを推定している。その結果、素線のMQE(最小クエンチエネルギー)に対して擾乱エネルギーは比較的小さいことを推測し、素線のMQEが十分に向上すれば、絶縁素線を用いたCIC型導体の実現が可能であることを確認している。また、4章以降においては、素線のMQE向上を試みるが、その準備として、超伝導素線のMQEを実験的に評価する新しい手法を考案している。

第4章においては、安定化銅、絶縁被覆、液体ヘリウム、および含浸材をパラメータとして、素線のMQEを向上させることを実験的に試みている。その結果、熱伝導率の小さい絶縁被覆と熱伝導率の大きい氷含浸の併用が、素線のMQE、言い換えれば素線絶縁されたCIC型導体のクエンチエネルギー余裕を確保するために有効であることを明らか

にしている。

第5章においては、文献値と実測結果をもとに氷がCIC型導体の素線バンドル部の含浸材として優れていることを述べている。次に、氷含浸CIC型導体試料の熱特性評価実験、および氷含浸された燃り線導体のクエンチ電流測定を行い、氷含浸により機械的擾乱が低減され、且つ擾乱発生時の温度上昇も抑制されるため、安定性が向上することを実証している。

第6章においては、素線絶縁された導体のもう一つの問題である偏流による電流余裕の低下に起因する不安定について検討し、解決策を考案している。はじめに、CIC型導体で構成された、超伝導コイルにおける偏流の発生機構を数値解析により解明することで、本質的に偏流を防止するための指針を得ている。次に、実際には素線の燃り乱れ等による偏流のおそれがあることから、素線バンドルの一部において超伝導特性を劣化させ、素線間を熱的に分離することを基本とした新しい偏流防止回路を考案し、数値解析による原理実証、および有用性の確認を行っている。第7章では、本研究で得られた主要な知見を総括することで、素線絶縁を基本とした新しいCIC型導体の安定化設計の有用性をまとめて結論としている。

## 論文審査の結果の要旨

トカマク型熱核融合実験装置においては、パルス磁場を発生する大型超伝導磁石を実現する必要がある。この種の超伝導磁石に適用されるCIC型導体の設計基準として、温度余裕、クエンチエネルギー余裕および電流余裕の確保が挙げられる。現用導体は、1) 機械的擾乱に対するクエンチエネルギー余裕あるいは2) 偏流発生時の電流余裕確保のために、素線表面に電気絶縁を施さない導体構造を基本としている。しかし、この様な場合、素線間結合損失が増加するために温度余裕の低下が問題となる。本研究は、素線間高接触抵抗を基本とした導体設計の実現性を検証したもので、考案した導体における課題であった、1) 擾乱の抑制およびクエンチエネルギー余裕の向上に関連する成果、および2) 偏流防止に関連する成果を要約すると以下の通りである。

- (1)素線バンドルを氷含浸することで、素線の動きによる機械的擾乱は抑制され、同時に擾乱に対するクエンチエネルギー余裕(素線の最小クエンチエネルギー(MQE))も向上することを明らかにしている。また、含浸により素線が動きにくいため、素線表面の磨耗が少なく、接触抵抗の経年劣化による素線間結合損失が抑制できる。さらに、交流損失があるCIC型導体は含浸不可能と考えられていたが、高い熱伝導率を有する氷ならば実現可能であることを明らかにしている。
- (2)擾乱の発生から超伝導素線のクエンチが決定するまでの時間(Quench Destining Time: QDT)の概念を導入し、QDTが大きい場合ほど素線周囲の材料の熱物性がMQE向上に大きく影響することを明らかにしている。有機系絶縁被覆は、持続時間数 $100\ \mu\text{s}$ の機械的擾乱に対して、有効な熱バリアとなりえる。絶縁被覆により、QDTを大きくし、素線周囲に高熱伝導材料である氷を配置することで、MQEが著しく向上することを明らかにしている。
- (3)超伝導素線のMQEを正確に評価する技術を確立している。従来の評価法が理論値に対して5倍以上過大評価しているのに対して、本手法では良い一致が確認されている。これにより、実際を模擬して、素線の周囲に様々な物質を配置した場合のMQEを実験的に評価することが可能としている。
- (4)CIC型導体を適用した超伝導コイルにおける偏流発生機構を、数値解析によりシミュレートしている。解析において、燃りピッチ、導体断面形状および巻線方法と偏流現象の相関を明らかにし、これらのパラメータを最適に設計することにより、本質的に偏流を生じにくい導体設計を考案している。
- (5)素線間が電気的に接触していない場合において、各素線に対して直列にインピーダンスを備えることで、偏流は防止可能である。超伝導素線の一部において臨界電流特性を劣化させ、且つ各線路を熱的に分離して配置することにより、わずかなジュール損失で偏流を防止可能な新しい偏流防止回路を考案し、数値解析により原理実証している。

以上の様に、本論文は、現用のCIC型導体とは全く異なる、核融合用超伝導磁石のための導体基本設計について研究し、その研究に基づき、安定な導体の一構成を確立することにおいて成果を挙げた先駆的研究として、核融合工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。