

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20249056

研究課題名（和文） 高温超電導磁石を利用した重粒子線癌治療装置小型化の研究

研究課題名（英文） Compact particle cancer treatment system by utilizing high-temperature superconducting magnets.

## 研究代表者

畑中 吉治 (HATANAKA KICHIJI)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：50144530

研究成果の概要（和文）：高温超電導線材を利用して、3テスラの磁場を発生できる双極磁石を設計製作した。本磁石のヨークと磁極は積層構造をしており、交流励磁が可能である。磁気特性、線材の冷却、電磁気力に対する強度を計算プログラムで数値解析して基本設計を行った。コイルの冷却テスト、臨界電流値測定から仕様を満たす磁石が製作されたことを確認した。製作した高温超電導コイルは負極率を有する構造をしており、ガントリーの小型化に重要な知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：A 3-T dipole magnet was designed and constructed by utilizing high temperature superconducting (HTS) wires. Since its yoke and pole are laminated, the magnet can be excited by alternating currents. In the design, The Finite Element Method was applied to analyze magnetic fields, heat conductions and electromagnetic forces. The expected performance was realized in cooling tests and critical current measurements of fabricated coils. Coils have parts with negative curvature. We got an important knowledge to apply HTS magnets to compact gantries.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2009年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2010年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：粒子線治療、高温超電導、3テスラ双極磁石、交流磁石、交流励磁損失、有限要素法、ガントリー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 超高齢化社会（65歳以上の老人人口が全人口に占める率が21%超）の到来を間近に控え、癌罹患数の増加に歯止めのかからない現況で、現在年間600,000人が癌に罹患しており、2015年には850,000人に上ると予測されている。癌治療の3本柱のひとつである放射線治療の国内におけるカバー率は20%である

が、近年、特殊放射線治療の一つとして重粒子線治療の専用装置が国内外で建設されており、カバー率は上昇するものと予測されている。日本放射線腫瘍学会の2003年構造調査で新規放射線治療患者数の登録数は130,000人を数えている。その増加は過去10年の動向をもとにすると2010年には200,000人を超える勢いである。現在国内で稼動して

いる重粒子線癌治療施設は放射線医学総合研究所、国立がんセンター東病院、筑波大学陽子線医学利用研究センター、兵庫県立粒子線医療センター、静岡県立静岡がんセンター、若狭湾エネルギー研究センターの6施設であり、福井県立病院、総合南東北病院、群馬大学で専用施設の新たな建設が進んでいる。これらはいずれも大型施設であり、設置場所は一般的に都市郊外に集中している。現在、高度癌治療の全国普及を図るため、加速器、照射部を含む治療装置全体の小型化が強く望まれている。本研究計画の代表者(畑中)は、特定非営利活動法人・大阪粒子線癌治療研究会(井上俊彦理事長)の理事として、粒子線癌治療の周知および装置の調査・計画立案に参画してきた。

(2) 従来の照射野形成装置はワブラー電磁石、散乱体、コリメータ、リッジフィルターから構成されており、ワブラー電磁石および散乱体で粒子線の方向を発散させ、十分な飛行距離の後で強度分布の不均一部分をコリメータで除去している。この方式では装置が重くなるとともに、粒子線拡大のための飛行距離が必要であり小型化が困難である。さらに、コリメータ等の放射化廃棄物を生ずることにもなり、環境汚染、治療に携わるスタッフ等の被曝を招く恐れがある。

(3) このような状況を打破するべく、本研究代表者は科学研究費補助金(基盤研究(B)、平成18-19年)を受け「重粒子線癌治療照射野形成装置小型化の研究」を行った。大照射野を粒子線スキャニング法で実現することにより装置の短縮化・高効率化を図るとともに、コリメータを使用しないため放射化廃棄物を新たに生成することを避けることができる。粒子線のスキャニングに高温超電導線材を用いた空芯コイルを4台(x、y方向各2台)組み合わせることにより、照射野形成装置のさらなる小型化、軽量化が可能となる。「基盤研究(B)」は、以前に実施された科学研究費補助金(萌芽研究、平成14-15年)による「高温超電導電磁石を用いた偏極イオン源高輝度化の研究」で明らかになった、高温超電導線材を利用した電磁石の特性を最大限に応用するべく立案された。「萌芽研究」では鉄芯を有する電磁石を製作し、コイル冷却テスト、直流励磁特性測定を行うと共に、交流特性を調べた。1.8テスラの高磁場で0.05ヘルツの交流励磁に成功し、さらに、0.25ヘルツで0.5テスラ/秒の磁場変化率が達成された。コイル温度上昇は約2ケルビンであった。これらの結果は、低温超電導線材では実現不可能な性能である。以上の成果を

踏まえて、「基盤研究(B)」では、空芯コイルを10-21Hzでの交流損失の励磁周波数および励磁電流依存性を調べた。結果、高温超電導コイルでの交流損失はヒステリシス損失が主成分であることが明らかになった。

## 2. 研究の目的

(1) 重粒子線癌治療施設を市内の病院に設置し高度癌治療の全国普及を図るため、装置の小型化研究開発が世界的規模で進められている。しかし、これまでの研究は重粒子加速器本体の小型化に重点が置かれている。治療施設全体としては、粒子線照射方向を制御するガントリー、および癌組織をカバーするに十分な大きさの照射野を得るための照射野形成装置の小型化が重要である。本計画では、我々のこれまでの研究で得られた照射野形成装置小型化の成果をもとに、重粒子線癌治療装置の主要部分である回転ガントリーの小型化に向けた開発・実証研究を行う。

(2) 本研究では、これまでの照射野形成装置小型化研究の成果をもとに、高温超電導磁石を導入し重粒子線癌治療装置の主要部分である回転ガントリーの小型化に向けた実証研究を行う。ガントリーの小型化には超電導技術の導入が不可欠と考えられるが、低温超電導磁石の導入にはいくつかの困難が指摘されている。

①磁石はガントリーに搭載され回転や固定位置が変化するため冷却構造が複雑となり、またクエンチングの恐れがある。一旦クエンチングが起これると粒子線の停止、もしくは患者や周辺機器に粒子線が照射されることになり、治療装置としては致命的な欠陥となる。

②最近の高度粒子線治療では患部の断面に加え深さ方向を含む三次元スキャニングが求められている。深さ方向のスキャニングではガントリーに入る粒子線のエネルギーを時間的に変化させる必要があるが、低温超電導磁石の交流励磁には依然多くの技術的困難を伴う。

③日本はヘリウムを100%輸入しており、将来にわたる液体ヘリウム資源の確保には不安がある、と危惧されている。

本研究はこれらの諸問題を解決するとともに、省資源、地球温暖化防止にも資するものである。

## 3. 研究の方法

高温超電導線材を利用した高磁場交流双極磁石を製作し、冷却および磁気特性を調べた。

(1) 有限要素法電磁場解析プログラム

(TOSCA)を用いて偏向磁石発生磁場の数値解析を行った。最高磁束密度は3テスラ以上とした。三次元数値解析により、コイル及び鉄ヨークの幾何学的配置の最適化を行った。高温超電導線材の臨界電流は、コイル温度とともにコイル面垂直方向に加わる磁場強度に強く依存する。100A/mm<sup>2</sup>以上の臨界電流を確保するため、数値計算により詳細を検討した。偏向磁石はガントリーに搭載されるため、想定される患者や診断医療器具の位置での漏洩磁場を低くする必要もある。ペースメーカー等に対する磁場の影響を防ぐためである。

(2) 決定されたコイル及び鉄ヨーク形状から電磁気力を求め、コイル支持部の機械的設計を行った。機械構造を決めた段階で、クライオスタットの熱負荷を評価した。超電導磁石では、電流導入部からの熱流入を正確に評価する必要がある。本計画では、粒子線を三次元スキャンするために電磁石を0.1-2ヘルツで交流励磁する。コイルのヒステリシス損失、電磁誘導による発熱、コイル支持部および熱シールド部の金属表面での渦電流による発熱が熱負荷として加わる。クライオスタットの設計では、これらの熱負荷がある状態で高温超電導線材の臨界電流値が下がらず安定に動作するよう、コイル部の温度を20ケルビン以下に保持できる構造とした。

(3) 製作した各コイルはダブルパンケーキの3台積層型とし、冷却効率をよくするため、パンケーキ間に冷却板を挿入した。電磁氣的検討から最大励磁電流を300Aと想定し、本設計での動作温度とコイル位置での磁場強度を勘案し、線材としてBi2223系を採用した。コイルの内半径側は、負の曲率を有している。高温超電導線を負の曲率で成形する際には、コイルにかかる荷重の詳細な検討が求められる。励磁中の電磁力によりコイルが変形して発熱・超電導状態の破れが発生するのみならず、コイルの機械的破壊の恐れもある。負極率をもつコイル製作では、巻線過程で線材に加える張力、コイルへの圧力等の条件を試行錯誤で最適化した。

(4) 交流励磁を行う際に発生する渦電流を小さくするよう磁極とヨークは分割絶縁された構造とした。磁極とコイルを収納するクライオスタットを製作し、双極磁石を組み立てた。磁極とコイルは20Kまで冷却される。

#### 4. 研究成果

(1) Bi2223系高温超電導線材を用いて双極磁石用上下コイルを製作した。線材の液体窒素温度(77K)における臨界電流を全長にわたり測定し、160-180Aであった。各コイルは3台

のダブルパンケーキ (DP、各200ターン)を積層した。上コイルの設計図および製作したダブルパンケーキの写真を図1、2に示す。双極磁石の設計仕様を表1にまとめる。

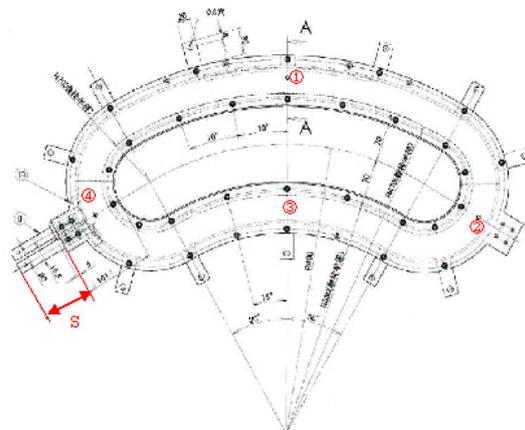


図1 上コイル製作図



図2 上コイル用ダブルパンケーキ

表1 双極磁石の仕様

双極磁石	中心軌道半径	400 mm
	偏向角度	60 deg.
	磁極間隙	30 mm
コイル	ターン数	300 ターン
	構成	3 DP
	コイル温度	20 K
	最大励磁電流	300 A

(2) 液体窒素温度において各ダブルパンケーキ (DP) および積層後の上下コイルの臨界電流を測定した。測定結果を表2にまとめる。

表2 測定された臨界電流値 (A)

	DPU	DPM	DPD	積層
上コイル	70.3	63.2	61.6	47.0
下コイル	62.9	69.0	69.4	51.3

測定された臨界電流値は理論的予測と無矛盾であった。これから、コイル製作加工の段階で線材の劣化が生じなかったことを示し

ている。図 1、2 のように負曲率を有する加工を安定に行う手順を確立できた。上コイルの通電試験結果を図 3 に示す。これから、臨界電流 ( $1\mu\text{V}/\text{cm}$ ) が  $47.0\text{A}$  と求まった。

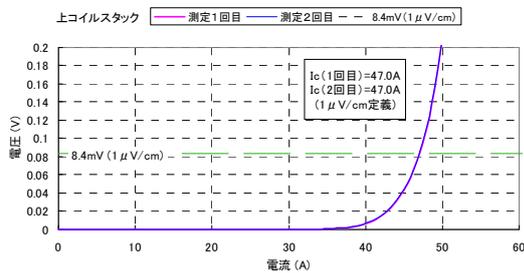


図 3 積層上コイルの通電試験結果

(3) 上下コイルを磁極に固定し双極磁石を組み立てた。各コイルの内周部と外周部の間には拡張方向に電磁力が働く。励磁によるコイル変形を防ぐためコイルを磁極に固定し、磁極はコイルとともに  $20\text{K}$  に冷却する構造とした (コールド・ポール)。数値解析に用いたコイル、磁極、ヨークの配置を図 4 に示す。

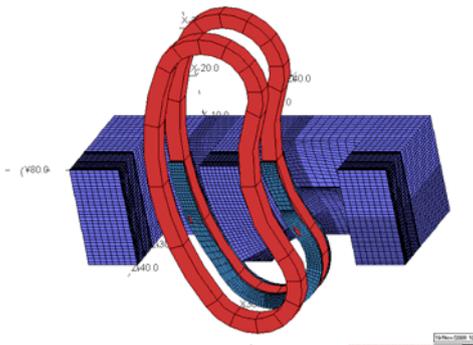


図 4 双極磁石の計算モデル(1/4)

(4) 上下コイルと磁極をクライオスタットに収納し、大気中のヨークと接続した。熱シールドの冷却は単独の小型冷凍機を使用した。図 5 に双極磁石の全体を示す。

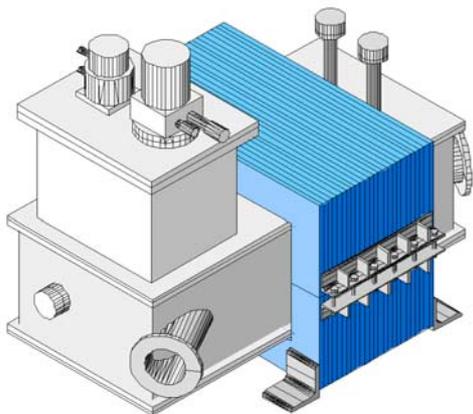


図 5 双極磁石とクライオスタット

(5) クライオスタットの真空テストは終了し、冷却試験を進めている。コイル臨界電流の温度および外部磁場依存データから励磁電流を評価した。 $77\text{K}$  における臨界電流の測定結果から、 $20\text{K}$  では  $300\text{A}$  以上の励磁電流通電が可能である。

(6) 直流および交流電流での励磁を行い、励起関数、磁場分布、時間応答性、交流損失の測定を行う。さらに、大阪大学核物理研究センター・サイクロトロン施設で加速される陽子ビームを入射し、磁石のイオン光学的特性を測定する。高温超電導線材を利用した磁石実機でのデータは世界的にもほとんど報告がされていない。特に、交流電流での励磁報告は無く、本研究の結果は非常に重要である。

(7) 製作した双極磁石はガントリーでの利用にとどまらず、シンクロトロン加速器用磁石の小型・省電力化への応用が期待される。本研究の成果に基づき、小型重粒子線癌治療装置システムを提案する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

① K. Hatanaka, J. Nakagawa, M. Fukuda, T. Yorita, T. Saito, Y. Sakemi, T. Kawaguchi, K. Noda, A HTS scanning magnet and AC operation, Nucl. Instr. & Methods in Physics Research, A 616, (2010) 16-20, 査読有

〔学会発表〕 (計 5 件)

① K. Hatanaka, Application of HTS Wire to Magnets, The 19th International Conference on Cyclotrons and their Applications, 2010.9.6-10, Lanzhou, China

② K. Hatanaka, A HTS Scanning Magnet and AC Operation, The First International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), 2010.5.23-26, Kyoto, Japan

③ K. Hatanaka, AC loss measurement of high temperature superconducting magnet, Third Joint Meeting of the Nuclear Divisions of the APS and JPS, 2009.10.17, Waikoloa, Hawaii

④ 畑中吉治、高温超電導スキャニング磁石と AC ロス測定、日本物理学会、2009.3.27、立教大学

〔産業財産権〕

○取得状況 (計 1 件)

名称：荷電粒子線偏向装置および荷電粒子線照射装置

発明者：土岐博、畑中吉治、川口武男

権利者：大阪大学、有限会社ケーティ・サイエンス

種類：特許  
番号：特許第 4716284 号  
取得年月日：平成 23 年 4 月 8 日  
国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

畑中 吉治 (HATANAKA KICHIJI)  
大阪大学・核物理研究センター・教授  
研究者番号：50144530

### (2) 研究分担者

福田 光宏 (FUKUDA MITSUHIRO)  
大阪大学・核物理研究センター・准教授  
研究者番号：60370467

依田 哲彦 (YORITA TETSUHIKO)  
大阪大学・核物理研究センター・助教  
研究者番号：30372147