

バルク超電導体を用いた小型無冷媒磁石の NMR/MRI 応用

NMR/MRI Application of Compact Cryogen-free Magnet using Bulk Superconductor

仲村 高志 (理研)

NAKAMURA Takashi (RIKEN)

E-mail: takashi.nakamura@riken.jp

1. はじめに

現在の NMR/MRI 用超電導磁石は液体ヘリウムが不可欠で、また、漏れ磁場の対策やクエンチに対する安全性の確保も重要となり、磁石設計に自由度をもたせるのが困難で縦型、横型ともに大型となる。さらに、必要とされる感度向上のための強磁場の要請で、いわゆる超強磁場の施設は一般的な装置のレベルではなくなった。一方、超電導の臨界温度(T_c)は 1986 年にベトノルツとミュラーによって発見された銅酸化物高温超電導体¹⁾で飛躍的に上昇した。このことは液体窒素や伝導冷却による超電導の維持を可能とし、新たな磁石の可能性を拓いた。本研究では線材とは別に高温超電導の発見によりもたらされた新しい応用形態であるバルク(Fig.1)をもちいた NMR/MRI 向けの磁石について論じる。

2. NMR/MRI 磁石の仕様

本研究で対象とする NMR は、高分解能 NMR として知られている物質の構造情報を解析する分析機器をさし、MRI は人体用ではなく、水の ^1H の信号を 2 次元あるいは 3 次元の密度分布に変換したものとす。高分解能 NMR は分子内の異なる環境で原子が生じるごくわずかの双極子磁場を化学シフトと呼ばれる差として検出するもので、その検出のためには対象試料空間で 10^{-9} を超える均一さを必要とし、磁場の変動も 10^{-6} 以下に抑えることが求められる。したがって時間変動のない均一な磁場空間を形成するという他の応用とは異なった設計が必要である。本研究では目標値として磁場強度を 4.7T、磁場安定度を $0.235 \mu\text{T}/\text{hour}$ 以下、試料の領域を 5mm 球体積とする高分解能 NMR および MRI を目標とする。

3. NMR/MRI 用磁石の設計・製作

従来の NMR 用超電導磁石を基本的にバルク体を用いた超伝導磁石を設計製作した。有限要素法による電磁界解析により、超電導バルクの形状、臨界電流密度 J_c 、磁化と磁場分布との関係をシミュレーションすることで、目的とする磁場均一性を得るバルク構成の最適化を行った²⁾。REBCO 系高温超電導体のうち比透磁率 μ 1.001 の Eu を素材として用いた EBCO バルク体で外周部分に応力対策として 5mm 厚のアルミのバンテージを配した直径 60mm、厚さ 20mm のディスク状のバルク体(Fig.1)の中心軸に内径 28mm の穴を開け、そのバルク体を 6 層積層する。それらをさらにアルミニウムのカバーでひとまとめにし、銅のコールドステージに接続する。それを GM 型パルスチューブ冷凍機による伝導冷却でバルク体を 40K に冷却し超電導状態を維持する構造とした。磁石は真空断熱するチャンバ内に納めればよく、均一磁場領域へはアルミニウム製の中空ボア(室温ボア内径 23mm)をバルク内部に差し込む形とした(Fig.2)。現行の液体ヘリウムに浸潤させる真空 2 重構造より簡易な構造となった。コイルの中心部分に均一磁場を発生させる NMR 用金属超電導磁石と同等の構造が実現した。

4. 実験

4.1 着磁

設計・製作でも述べたように NMR は他の応用にはない非常に均一な磁場空間を必要とする。これは磁石内部に磁化率をもった試料が挿入されることによっても変化が生じるため

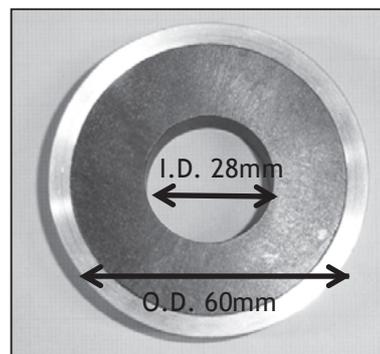


Fig.1 Photograph of EBCO Bulk Superconductor

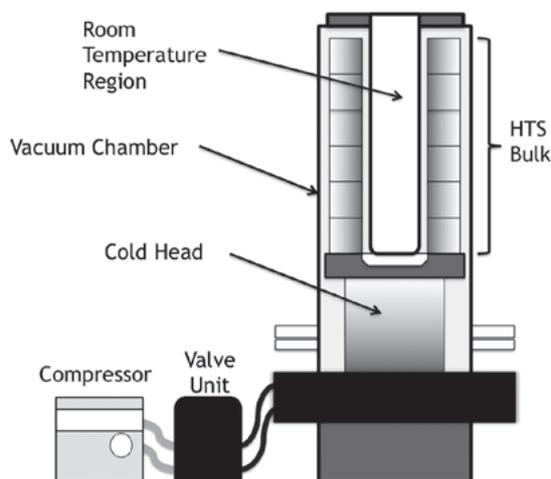


Fig.2 Schematic view of a superconducting Bulk magnet

NMR 装置には試料ごとに磁場均一度を補正するため室温シミングという装置が組み込まれている。また、共鳴信号の検出装置はラジオ波域での送受信なので共鳴周波数は装置固有のプロブで行い、磁場強度が着磁のたびに異なることは不都合である。これらの条件を充たすために、静磁場着磁法 (FC) を採用し、内径 89mm のワイドボア NMR 用超電導磁石 (JASTEC JRTC-300/89) にて着磁した。

最初に着磁用 SCM を目標の共鳴周波数 202MHz となるように磁場強度 4.747T に設定し、さらに SCM に付属している SC シミング機能で均一性を調整する。次に、冷凍機にて T_c 以上の温度 (ex. 100 K) のバルク磁石を SCM の均一磁場中心に正確に設置し、温度コントロールしながら 50K まで冷却する。バルクの温度が一定になるまで十分に時間 (6 時間程度) を待ち SCM の磁場を 0.3 A/min で消磁を行う。消磁後にバルクの温度コントロールを止め冷凍機の最大冷凍温度 (40 K) まで冷却する。バルクの温度が最低温度に到達後 1 時間以上経過した後には SCM からバルク磁石を取り出し着磁を完了させる。手順は一般的に知られている静磁場着磁法だが均一磁場を達成するため着磁側も NMR が観測できる磁石を用い、さいごにバルクの温度を下げることで磁場クリープを抑制した。

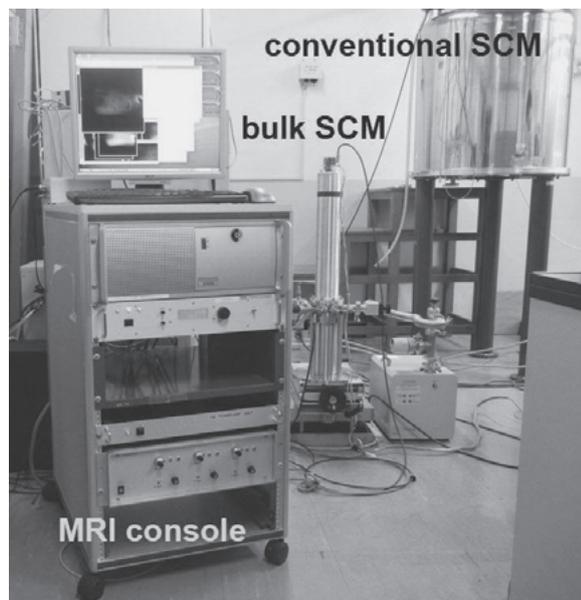


Fig.3 The MR microscope developed in this study. The superconducting bulk magnet is seen in the center of the figure. The conventional superconducting NMR magnet used for energizing the bulk magnet is seen behind the bulk magnet.³⁾

4.2 着磁過程のモニタリング

着磁過程で生じる均一度の変化をNMR信号で観測し、静磁場着磁の最適化を実施した²⁾。空間分布の変化を捉えるためにMRIを用いた実験ができるように装置を組み(Fig.3)、MR顕微による着磁過程のモニタリングを実施し、さらなる均一度の評価を実施した(詳細は講演にて報告する)。

4.3 NMR/MRI 結果

着磁後の磁石でのNMRおよびMRIの測定結果をそれぞれFig.4とFig.5に示す。NMRに関しては直径0.5mm長さ15mmのキャピラリーに長さ1mmのエチルアルコールを充填した試料を自作のプロープで日本電子製ECX400Pにて観測した共鳴周波数202MHzの¹HスペクトルでMRI用の傾斜磁場コイルをXYZの室温シミングとして用いて分解能を調整している(Fig.4)。MRIに関してはMRTe社製のコンソールに自作の傾斜磁場コイル(直径20mm長さ57mmのGolayコイル)、直径10mm鞍型のRF送受信コイルを用いたスピンエコー法で検出した。試料は妊娠14日目のマウス胚を化学固定したもので空間分解能 $50 \mu\text{m}^3$ での撮像に成功し、MR顕微画像として各器官の分化の様子を確認することができる(Fig.5)³⁾。

5. まとめ

バルク着磁は分析装置への応用のためにはパルス着磁が望ましい。しかし、6層のバルク体を同時に着磁すること。また、狙った磁場強度を得られないことなどの理由で静磁場着磁に限定される。このため製造元で着磁後に顧客先に輸送する方法が必要となる。より簡便な着磁法が期待される。

EBCOを用いた超電導バルク磁石は開発を始めた当初はこの素材の結晶成長における弱結合の問題で均一な磁場が形成できないのではとも考えたが、幸いにも静磁場着磁の最初の実験からブロードではあるが共鳴信号が確認できた⁴⁾。この信号をもとにバルク体の改良や着磁法を最適化することで現在の分解能まで到達した。均一性は応用には10倍程度が必要で、素材も着磁方法もさらに開発を進める。

MR顕微に関しては対象の試料空間が直径10mm長さ10mm程度と限定はされる空間だが実用化可能である。磁場空間分布の評価法により、着磁時の変化を詳細に観測することで着磁過程の理解をさらに深められる。NMRに関しては分析に必要なスピニングに関する分解能も認められると

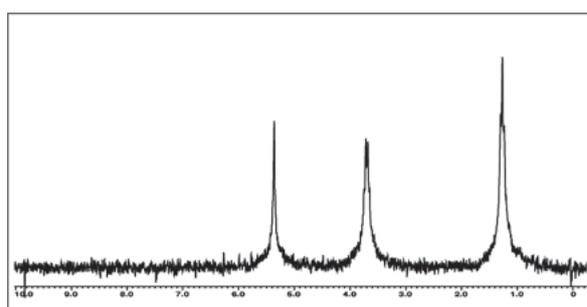


Fig.4 ¹H NMR Spectrum of Methyl Alcohol. Sample volume is 0.3 mm diameter X 1.0 mm length.

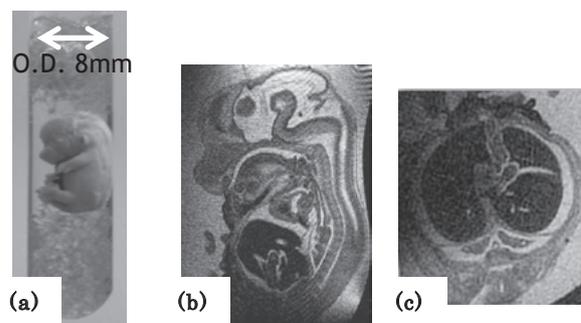


Fig.5 Photograph (a) of mouse embryo chemically fixed at 14 days postconception. The midsagittal (b) and horizontal (c) cross sections of measured using the MR microscope. The voxel size is $50 \mu\text{m}^3$.³⁾

ここまできている(Fig.4)。MRI手法を用いた各磁石固有の着磁後の分布を3次元分布のMRIデータに基づいた室温シミングを開発して高分解能NMRの実現を目指す。

バルク体は青山学院大学の秋光等のMgB₂や東京工業大学の細野等の鉄系高温超電導体など新たな素材が続々と登場している。これらを本研究のような応用に利用するためには20-30Kで効率の良いコンパクトな冷凍機の登場が望まれる。当然これはREBCO系の強磁場化にも資する技術でこれらをターゲットにした冷凍機の開発にも期待したい。

6. 謝辞

本研究は、2002-2004年度、2010-2011年度の理化学研究所産業界連携制度「高温超伝導バルク体を用いた卓上型核磁気共鳴装置の開発」(理化学研究所、イムラ材料開発研究所、JEOL RESONANCE)、2006-2007年度NEDOナノテク・先端部材実用化研究開発「ナノコンポジット超電導バルク材を用いたNMR用小型無冷媒超電導磁石の開発」(理化学研究所、イムラ材料開発研究所、ISTEC、日本電子)として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施した。また、新日本製鐵株式会社先端技術研究所の手嶋英一博士と森田充博士にはバルク体に関する有用な議論を得た。各機関並びに各位に深く感謝する。

参考文献

1. Bednorz JG, Muller Ka. : *Zeitschrift Fur Physik B-Condensed Matter* **64** (1986) 189-193
2. Nakamura T, Itoh Y, Yoshikawa M, Sakai N, Nariki S, Hirabayashi I, Utsumi H : *TEION KOGAKU* **46** (2011) 139-148
3. Ogawa K, Nakamura T, Terada Y, Kose K, Haishi T : *Appl. Phys. Lett.* **98** (2011) 234101
4. Nakamura T, Itoh Y, Yoshikawa M, Oka T, Uzawa J, : *Concepts in Mag. Res. Part B (Mag. Res. Eng.)* **31**(2007) 65-70

平泉庭園遺構群の東アジア庭園史における意義

藪 敏裕 (岩手大学平泉文化研究センター)
(E-mail: yabu@iwate-u.ac.jp)

概要

平泉の庭園遺構群は、その後の鎌倉・京都を中心とする文化的政治的中心から隔絶・忘却された結果、12世紀の状態が真空パックされた状態として残り、世界史的に見ても当時の仏国土（浄土）の理想郷を今日に伝える唯一の事例と評価されている。そのため、平泉を調査研究することは、いくつかの例外を除き未発掘のままである中国の漢代から唐代の庭園の実態解明、また変容してしまった京都等の平安期の庭園の実態解明など、東アジアにおける庭園遺構の空間構成を学術的に解明する上で独創的な観点を提供しうる絶好の素材である。

今回は、12世紀の状態をそのままにとどめる平泉の庭園遺構をとりあげ、従来仏教的な「浄土庭園」として扱われてきた庭園の苑池構成の深層に潜む儒教・神仙思想（道教的）文化の諸相に注目しつつ、平泉の文化的・思想的系譜を検討する。具体的には、まず中国等における苑池庭園と日本の古代庭園の変遷を比較・検討しつつ、平泉庭園遺構群の東アジアにおける意義について考察する。



写真1 毛越寺



写真2 蘇州留園冠雲峰