## 室内発生世界最高磁場 1200 テスラの記録

## 国際超強磁場科学研究施設 嶽山 正二郎

電磁濃縮法による超強磁場発生法は半世紀にわたり物性研強磁場研究室が取り組んできた、いわば物性研強磁場のお家芸の一つである。この電磁濃縮法を用いて、ついに1000 テスラを優に超える磁場発生に成功した。

1980 年初頭の物性研極限プロジェクトによる近角・三浦等による 1000 テスラ電磁濃縮超強磁場計画が開始されて以来、3 世代の所員により継承されて、実に半世紀が経って遂に目標に達成したことで感慨深い。電磁濃縮法による超強磁場発生は、クネール(E. Cnare、1966 年)により提案されたもので、当時 136 kJ のコンデンサを用いて 210 T の超強磁場の発生が報告されたのが最初である。近角聡信氏が 1970 年初頭に、この方法に目を着けたのは今や先見の明があったというほか無い。

原理は極めて簡単で、ライナーと呼ばれる金属円筒リングをその円周方向に流れる電流の電磁応力を使って高速に圧縮し、比較的大きな空間(直径 10-20 cm)に予め発生させておいた数テスラの磁束を濃縮することにより、最終的に小さな空間に超強磁場を発生させる。これを信頼性と精度の高い物性計測に適用するには最低数ミリ、できれば10 mm 程度の直径及び長さ方向の磁場発生空間と磁場均一性が必要となる。磁場発生空間の大きさとその中での磁場均一性、パルス時間の制御は必須となる。電磁濃縮法の実質的な開発と展開は世界で唯一物性研究所でのみ、超強磁場発生とこれを用いた極限的環境での物性物理学への応用研究に向けた開発を行って今日に至っている。

物性研嶽山研では、2003 年より電磁濃縮による超強磁場発生の技術開発に注力し、極めて効率のよいコイル(銅内張りコイル、以下 CL コイルという)の開発に成功した。その結果、730 Tという室内発生最高磁場を大幅に記録更新した[1]。これにより、クロミウムスピネルの 600 Tまでの磁化過程を5Kという極低温で精密に測定することに成功した[2]。その後、2010 年に始まった文科省最先端研究基盤事業「次世代パルス最強磁場発生装置の整備」の補助金獲得を行い、1000 テスラ級電磁濃縮超強磁場発生装置を新規導入した。その後、装置の調整と整備、開発を継続し、2018 年 1 月に全システムをほぼ完成に導くことができた。

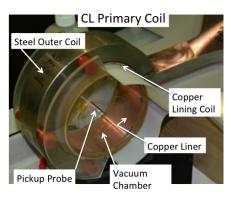


図 1. 電磁濃縮用 CL コイルとそのセッティングの様子. 外枠の鉄コイルを基準にライナー、測定プローブが高い精度で取り付けられる.

新装置では、瞬間的放電能力を引き上げるべくコンデンサ電源を刷新し、主コンデンサバンクの最大充電電圧を、旧装置の 40 kV から 50kV に引き上げた。また、コンデンサ電源と負荷である磁場発生コイルとのインピーダンス整合を最適化することで、全系のエネルギー伝達効率を改善し、大きな空間を占めるコンデンサ電源に蓄積した電気エ

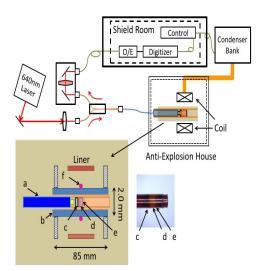


図 2. 電磁濃縮超強磁場発生時の磁場値の計測用に開発した 反射型のファラデー回転プローブ. a:光ファイバー、b:FRP チューブ、c:偏光板、d:ファラデー素子(石英の直径 1 mm のロッド)e:アルミミラー、f:ピックアップコイル. 640 nm 波長の半導体レーザーは、一本の光ファイバーで入射、ファラデー素子を通過反射した帰りの光は光分岐を通して検知器 へ導かれる.

ネルギーを最終端である主コイル内の数センチ程度の小さな超強磁場発生空間へと有効にエネルギー伝達できるよう工夫した。

今回の濃縮実験には前記の CL コイルを用いた。CL コイルは従来物性研で採用してきたコイルに比べ主コイルからライナーへのエネルギー伝達効率が格段に高い。更に、磁場発生の再現性が極めて高いだけでなく、磁場最高値をはじき出すライナーの終着点での位置が 1mm 以下という高精度で制御可能である。図1で見てとれるように測定プローブのセッテイング方法も従来の方法とは全く発想が異なる。図1の様に CL コイルの外側の最終的に破壊してしまうコイルの一番外側の鉄部を基準として全てを固定する。これにより、磁場中心位置への高精度のセッティングが可能となり、収縮ライナーがギリギリ(1mm 以下)近づくまで測定ができる [2]。この高精度 CL コイルでなければ1000 Tまでの磁場計測は不可能である。

本実験では、主コンデンサバンクの充電エネルギーは 3.2 MJ (8 ユニット、45 kV)で、初期磁場の大きさは 3.2 テスラとした。発生した磁場強度は、ピックアップコイルによる電気的計測とファラデー回転法による光学的計測を同時に行なった。これまでの詳細な研究からピックアップコイルでは 600 T までが測定限界であることが分かっている。そこで、1000 T 領域での精密物性計測に於いてピックアップコイルに代わるものとして、光学ファイバーによ

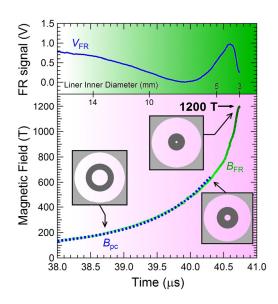


図 3. 上図:磁場発生とともに測定されたファラデー回転角の時間発展、下図:点線はピックアップコイルで測定された磁場値、緑の実線が上図のファラデー回転角から換算された磁場値. 黒い陰はライナーの断面の時間変化を予測するイラスト. 1200 T は直径 3 mm の空間に発生できたと見積もられた.

る反射型のファラデー回転磁場プローブを考案してセット した(図 2)。この方法は将来 1000 T 領域での物性計測に おいてピックアップコイルに代わるものとして活用できる。

得られた磁場値の時間発展を図 3 に示す。ライナーの収縮に伴って、放電開始から  $40.3\mu$  秒後に 600 テスラを超える。そこで、予測通りピックアップコイルの信号は切れ、その後は、ファラデー回転による光学検出で磁場増大が追跡され、遂に、 $40.7\mu$  秒後あたりで 1200 テスラに達しているのが明確に捕えられた。詳しい解析の結果、ライナーの収縮速度が 5 km/秒以上にも達していること、また、1200 テスラが発生できた磁場空間のボーア径は 3 mm 程度と推定された。

旧電源装置を用いて達成した 985 T を得た実験にも同形のコイルを使用していたので[4]、この実験に比べ装置全体が最適化された設計により、コンデンサ電源からコイルへのエネルギー伝達効率が上がり、コイル電流の立ち上がり速度が大幅に改善された。このことで 1000 T を優に超える発生磁場の最高値の 1200 T という大幅な記録更新が実現できたと言える[5]。

これまで、1000 テスラ以上の磁場は、複雑な構造で構成され大掛かりな野外実験となる「爆縮法」でしか達成できていなかった。爆縮法では再現性や磁場発生の制御性などに問題がある。この度完成させた次世代型超強磁場発生装置により、磁場発生効率が格段に改善され、1000 テスラ以上の超強力な磁場を安定して発生できるようになった。今後、1000 テスラ領域での極限的な超強磁場環境での精密で信頼性のある物性計測が安定して実現可能となるであるう。

本装置で創られる 1000 テスラの磁場は発生時間および 磁場空間を制御できるため、さまざまな物理計測への適用 が広がる。1000 テスラでは物質の中の電子の運動を 1 ナノメートルスケールに閉じ込めたり、非常に重たい電子の 運動量(角運動量:スピン)を磁場で制御できるため、物質 の新規な機能の解明に貢献することが期待される。半導体、ナノマテリアル、有機物質、超伝導体、磁性体、生体物質 などで未解明の固体物理量子現象の解明に、より強力な手段となり、いよいよ 1000 テスラ超強磁場科学の次世代に向けた新しい第一歩を踏み出したと実感する。

## 謝辞

本研究は、2010年および2011年度の文部科学省最先端 基盤事業「次世代最強磁場発生装置の整備」による補助金 と、中村大輔助教、澤部博信技術専門職員はじめ松田康弘 准教授、池田暁彦助教の忍耐強い共同作業と協力の下で達成された。これまでの電磁濃縮超強磁場発生技術開発には小嶋映二元嶽山研助教の貢献も大きいことを添えたい。

最先端事業においては、東大本部、柏地区共通事務センター、物性研事務部の多くの方々による多大な尽力に支えられた。

## 参考文献

- [1] S. Takeyama, et al., J. Phys. D <u>44</u>, 425003 (2011).
- [2] A. Miyata, et al., Phys. Rev. Lett. <u>107</u>, 2072031 (2011).
- [3] D. Nakamura, et al., Rev. Sci. Instrum. <u>84</u>, 044702 (2013).
- [4] D. Nakamura, et al., Rev. Sci. Instrum. <u>89</u>, 016106 (2018).
- [5] D. Nakamura, et al., Rev. Sci. Instrum. <u>89</u>, 095106 (2018).