

極限環境物理の新展開

金道浩一 (東京大学物性研究所 kindo@issp.u-tokyo.ac.jp)

はじめに

物理には様々な極限環境が登場する。例えば、超高温、極低温、超高圧、超強磁場そして超高真空などを挙げることができる。なかでも、極低温、超高圧、超強磁場の精密制御は物性研究において有用で、平成の30年間での発展により新奇量子現象、相転移、エキゾチック超伝導の発見などの成果があった。本稿では筆者が専門とする強磁場にフォーカスして平成の30年間での変化を述べる。

平成時代は強磁場の世界的な発展期と重なる。日本もその一翼を担っていたが、バブル経済の崩壊とともに強磁場を取り巻く環境は厳しいものとなった。その現状を紹介することで次の時代への展望を考える材料としたい。

強磁場の発生

まず強磁場について説明する。極限環境としての強磁場を作り出すのが電磁石である。電磁石で強い磁場を発生するにはコイルに流れる電流密度を大きくすることが必要である。この時、大電流を発熱なしに流すことができるのが超伝導マグネットであり、今では市販品により研究者に身近な強磁場発生装置となっている。ただ、超伝導線材は臨界電流密度もしくは臨界磁場を超えると超伝導状態が壊れてしまうため、発生磁場に上限が存在する。超伝導マグネットよりも強い磁場を発生できるのが水冷マグネットであり、初めて作った人の名前からピッターマグネットと呼ばれている。これは常伝導マグネットに発生するジュール熱を強制水冷して大電流を流すことで強磁場発生を可能にするものであり、冷却に大きな設備が必要となるため限られた施設でのみ稼働できる。ピッターマグネットで発生できる磁場の上限は発熱などによって決まっている。それ以上の磁場を発生するにはピッターマグネットを超伝導マグネットの磁場中に配置して磁場を重畳する方法がある。この方法はハイブリッドマグネットと呼ばれており、ハイブリッドに用いられるピッターマグネットには単独時よりも大きな電磁応力が加わるため限界磁場は減少するが、超伝導マグネットによる磁場が加わることで単独時よりも強い磁場の発生が可能となる。ここまでのマグネットは磁場を定常的に発生しており、定常強磁場と呼ばれている。ハイブリッドマグネットは最も強い定常強磁場を発生することができるマグネットである。

定常強磁場では主に発熱と電磁応力により磁場の上限が決まっている。この上限を破る手法がパルス強磁場発生法である。これは、大電流を流すために時間を制限すること

により発熱を回避する方法で、パルスの磁場発生となることからパルス強磁場と呼ばれている。これに用いる電流源はコンデンサ電源が主流である。大電流を目的としたコンデンサは巨大設備となるためやはり限られた施設でのみ稼働できる。パルス強磁場は発生時間をうまく選択すれば発熱の問題を回避することができるが、電磁応力を回避することはできない。50 T程度の強磁場発生に伴う電磁応力はステンレス鋼の強度を超えるほどになるため、材料次第ではコイルが破壊してしまう。応力を分散させて破壊を伴わずに発生する磁場を非破壊型パルス強磁場と呼び、破壊を伴いながらももっと強い磁場発生を行うものを破壊型パルス強磁場と呼ぶ。

昭和から平成へ

このように、強磁場には様々な発生手法があるが、平成になる直前の国内外の状況を紹介します。先述した通り、超伝導マグネットを超える磁場を発生するには大型設備を備えた施設が必要であるが、日本には昭和の時代より三大施設があった。定常強磁場の東北大学金属材料研究所(金研)、非破壊パルス強磁場の大阪大学理学部附属強磁場実験施設(阪大)そして破壊型パルス強磁場の東京大学物性研究所(物性研)である。金研は30 T,¹⁾ 阪大は60 T,²⁾ そして物性研は300 T³⁾ を発生しており、これらはどれも世界最高レベルの磁場であった。当時、様々な世界レベルの強磁場発生装置が1つの国に整備された例はなく、日本は世界最先端の強磁場先進国であった。この時代の世界の強磁場施設をあげると、定常強磁場ではMIT(米)、グルノーブル(仏)、ナイメーヘン(蘭)があり、アムステルダム大学(蘭)には準定常強磁場があった。準定常強磁場とは秒程度で時間変動しない磁場を発生する方式である。非破壊型パルス強磁場ではツールーズ(仏)やルーベン(ベルギー)が代表的な施設であった。破壊型パルス強磁場については、ソ連に爆縮法と呼ばれる手法を実施する施設があった。爆縮法とは、磁場濃縮法の一つで、外部から爆薬の力により磁場を圧縮する方法であり、実験はシベリアの室外において行われていた。

平成の時代になり、最も大きな変化を見せたのが世界の動きであった。米国はMITの施設を廃止し、新たに国立強磁場研究所(NHMFL)を設立し、フロリダのタラハシーに定常強磁場施設とロスアラモスにパルス強磁場施設を整備して統一的な運営を始めた。この新たな投資によりハイブリッドマグネットは45 Tを、非破壊型パルス強磁

場は100 Tを発生することに成功し、これらはそれぞれが世界最高の発生磁場となっている。この他にも各国で強磁場への投資が行われ、ドイツのドレスデンや中国の武漢には巨大な非破壊型パルス強磁場施設が設立された。定常強磁場施設も整備が進み、オランダはアムステルダム大学の設備を廃止しナイメーヘンの設備を増強し、中国は合肥に巨大施設を新設した。また、フランスはグルノーブルとツールーズをそれぞれ増強して統一した運営を行うための再組織化を行った。

日本でも平成以降に各拠点の増強が行われた。金研は水冷マグネットの冷却設備が更新されたが、パワーは増強されなかった。一方で、新たな取り組みとして無冷媒の25 T級超伝導マグネットの開発が予算化され完成した。⁴⁾ 物性研では、ロングパルス磁場用電源としてフライホイール付き直流発電機が移設され、秒オーダーのパルス強磁場が発生され、破壊型パルス強磁場発生手法の1つである電磁濃縮法の電源が増強され、最近1,200 Tの磁場発生に成功した。⁵⁾ この磁場は、人工的に制御された発生磁場としては世界最高の値である。また、阪大強磁場では従来のコンデンサ電源の更新に加え、10 MJものエネルギーを蓄積できるコンデンサ電源が増強され、複合極限環境下での実験が行えるようになった。また、この三拠点の連携により強磁場施設の共同利用を推進するための「強磁場コラボラリー計画」も開始した。

強磁場を取り巻く環境

このように設備については、日本と諸外国の強磁場に大きな差異は見出せない。しかしながら強磁場を取り巻く環境には大きな違いがある。例えば定常強磁場を考えた時、ハイブリッドマグネットによる磁場発生は圧倒的に日本が不利である。これは設備面の問題が第一の原因ではあるが、もし冷却能力を同じにしても電気料金の高い日本ではハイブリッドマグネットの運転は難しい。特に、東日本震災後は電気料金が徐々に値上がりしているため、マグネットの冷却能力を上げて、ピーク電力を増やした契約を行うと年間の契約料金が数億円にものぼる。これは、強磁場研究にとって逆風である。しかし、逆風も見方を変えると追い風かもしれない。つまり、世界のどこであっても電気を湯水のごとく使った実験がいつまでも制限なく実施できることは考えられず、いつかは節度のある電力使用が求められるはずである。その問題にいち早く直面した日本は、その解答を出しつつある。それが無冷媒超伝導マグネットの開発である。現在は25 Tの強磁場を提供しており、次に30 Tへのバージョンアップが計画されている。今後の超伝導線材の開発次第ではハイブリッドマグネットに置き換わることも考えられ、環境に配慮した世界最先端の定常強磁場は日本から生まれるのではないだろうか。

パルス強磁場を取り巻く環境についても設備に関しては

大きく劣るとは考えられない。最も大きな問題はマグネット線材の開発・供給体制である。上述した通り、50 Tを超える強磁場を発生するコイルには大きな応力が加わる。マグネットデザインにより応力を分散するにしても線材の強度はアドバンテージになる。ただ、強度の高さに加えて高伝導度であることも求められる。このような線材開発は研究室レベルでは様々なものが作られているが、実際のコイルに必要な線材は限られている。海外の強磁場グループが主として使用しているのが銅とニオブの合金線であり、ロシアの会社が製造販売を行っている。日本においては、物質・材料研究機構で開発された銅銀合金線が使用されている。当初は銀濃度24%の線材が電線メーカーによって製造されていたため安定的に供給されていた。その後、バブル経済崩壊の影響から電線メーカーが2002年に製造を中止した。現在は銀濃度を低くした線材を研究者が中心となって電線メーカーの協力で製造した線材を使っているが、産業応用に繋がらない線材にメーカーは冷淡である。この時に大きな助けとなるのは、技術を持った中小企業である。日本のものづくり技術が令和の時代にまで受け継がれる限りは、強磁場の持続的な発展が期待できる。

おわりに

このように、日本の強磁場を取り巻く環境は決して楽観視できない状況ではあるが、先端的な計測方法には昭和の時代と比べて格段の進歩が見られる。磁場の値では、破壊型で世界記録となる1,200 Tの発生をはじめとして、非破壊型のパルス磁場では単パルスの85 Tを発生しており、無冷媒超伝導マグネットでは25 Tの提供が始まっている。測定手法も、1秒以上のロングパルス磁場によって比熱測定や超精密伝導測定が可能となり、破壊型磁場を用いた磁歪測定や電気抵抗測定なども始まっている。また、世界との連携も始まっており、グローバル強磁場フォーラムにより強磁場に関する学術問題を世界で協力しながら解決していく方針が定められている。上述した線材開発に関わる問題も共同で解決することが話し合われている。今後、各国の施設がそれぞれの特徴を活かしながら強磁場科学の発展に貢献する体制は整った。それでも日本の極限環境物理が令和の時代も独創的な成果を生み続けるためには、日本の企業が元気になってものづくりを協力してくれることと、産業応用に結びつかない研究にも研究費が配分される施策が望まれる。

参考文献

- 1) Y. Nakagawa et al., *Physica B* **155**, 69 (1989).
- 2) N. Miura et al., *Physica B* **155**, 23 (1989).
- 3) A. Yamagishi and M. Date, *Physica B* **155**, 91 (1989).
- 4) S. Awaji et al., *Supercond. Sci. Technol.* **30**, 065001 (2017).
- 5) D. Nakamura et al., *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 095106 (2018).

(2018年10月18日原稿受付)