



Title	強磁場と低温と共同利用
Author(s)	鳴海, 康雄
Citation	大阪大学低温センターだより. 2018, 168, p. 23-28
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/70641
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

強磁場と低温と共同利用

先端強磁場科学研究センター 鳴海 康雄

E-mail: narumi@ahmf.sci.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

2016年4月、先端強磁場科学研究センター（以下、センターと略す）では、共同利用・共同研究拠点の一つである物性科学研究拠点に認定されている東京大学物性研究所（以下、東大物性研）に連携する施設として、全国からの研究者を受け入れる新体制が始まった。この連携を橋渡ししているのが、東大物性研の国際超強磁場科学研究施設（東大強磁場）とセンターが共同で設立したパルス強磁場コラボラトリー運営員会である。文部科学省が管轄する共同利用・共同研究拠点の認定制度は、個々の大学が保有する大型の研究設備や大量の資料・データ等を大学の枠組みを越えて全国の研究者が利用することによって日本の学術研究が大きく発展してきた、という背景をふまえて制定された制度で、センターの強磁場設備と研究体制がこの共同利用・共同研究に資するものとして、高く評価されたことを意味する。

2001年にセンターの前身である極限科学研究センターにてPh.D.を取得した筆者は、約2年間センターの助手を務めた後、東大強磁場および材料科学共同利用・共同研究拠点の東北大学金属材料研究所（以下、東北大金研）にて、強磁場実験のユーザー支援に携わってきた。そしてセンター新体制のスタートと時を同じくして、幸運にも再び大阪大学で強磁場の研究に携わる機会を得た。一方で筆者は、放射光実験施設SPring-8や中性子実験施設MLF/J-PARCなどの大型共同利用施設のユーザーとしても研究を行っている。そこで本稿では、強磁場と低温をキーワードとして、利用者サイド・支援者サイドの両面からみた先端強磁場科学研究センターが提供する共同研究・共同利用について、歴史的背景をふまえながら紹介する。

2. 先端強磁場科学研究センター

先端強磁場科学研究センターは、理学研究科に附属する新しいセンターとして2014年に誕生した。豊中福利会館から刀根山寮に向かう待兼山の丘の上に立つ第一実験施設（極限科学研究棟内）と低温センター北側に隣接する第二実験施設では後ほど解説するパルス磁場発生装置を、低温センター1Fの実験室では超伝導磁石を用いて研究を展開している。さて、センターの歴史を溯ると、1980年伊達教授（大阪大学名誉教授）が理学部に設置した超強磁場実験施設にたどり着く。その後、1986年に基礎工学部附属の超高圧実験施設および極限微細ビーム加工実験施設と連携する形で極限物質研究センターが設立され、超強磁場実験施設はそのセンターの研究部門の一つとなった。さらにその後、極限科学研究センター、そして極限量子科学研究センターと2度の改組が行われ、また超強磁場部門の運営が金道教授（1994～2004年、現東大物性研教授）、そして萩原教授（2004年～、現セ

ンター長)に引き継がれながらも、一貫して強磁場を柱とした研究が続けられてきた。つまり、本センターは古くて新しいセンターなのである。

3. パルス強磁場

センターの柱は、なんとと言っても非破壊で60 T以上の磁場を発生することができるパルス強磁場発生装置である。パルス強磁場とは、図1に示すようなコイルとコンデンサからなるLC回路において、一方向にしか電流を流さないサイリスタスイッチを介してコンデンサに蓄えられた電荷をコイルに放電することによって、図2に示す正弦波に似た形で時間変化する強い磁場を生み出す磁場発生法である。定常強磁場の世界では、フロリダ州タラハシーにある米国国立強磁場研究所(NHMFL)において、水冷常伝導磁石と超伝導磁石を組み合わせたハイブリッドマグネットを用いて定常強磁場世界最高となる45 Tを実現しているが、パルス強磁場はこの45 Tを越えることができる唯一の強磁場発生法である。非破壊パルス磁場の世界では、複数のコイルと複数の電源を組み合わせた多段式パルスマグネットを用いて100 Tの磁場発生を記録したニューメキシコ州ロスアラモスのNHMFLを筆頭に、世界的にも阪大を含めた僅か6つの研究施設においてのみ60 T以上の磁場を利用することが出来る。

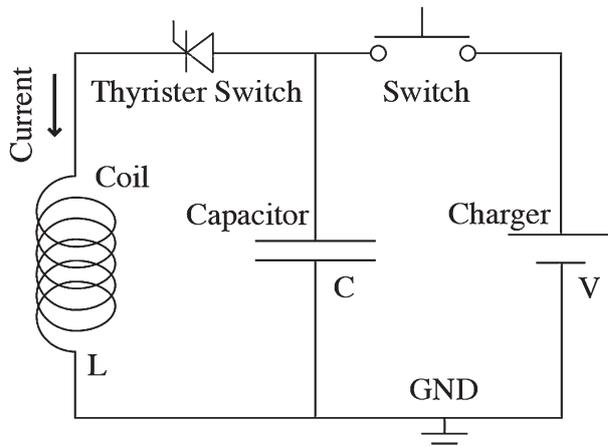


図1 パルス磁場発生回路の概略図。

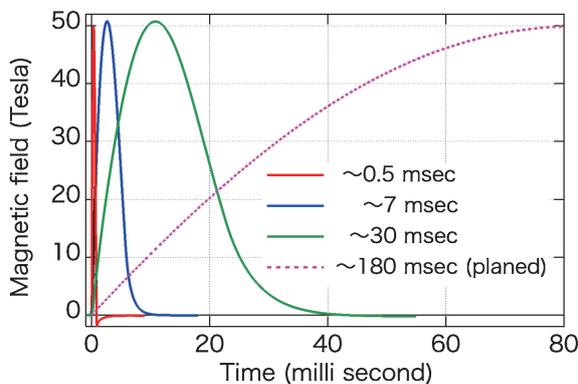


図2 種々のマグネットとコンデンサの容量の組み合わせによって発生する磁場の時間依存性。

2014年、センターの第一実験施設には、国内最大の蓄積エネルギー10 MJ (最大充電電圧 $V = 28$ kV, 静電容量 $C = 2.64 \times 10$ mF) を誇るパルス磁場発生用コンデンサ電源が導入された。この電源の特徴として、10分割されたユニットを必要な数だけ選択して利用できるようになっている。ここで、図2に示す単純なLC回路において、パルス幅と呼ばれる正弦波の半周期 $T/2$ に対応する時間が、コイルのインダクタンス L とコンデンサの静電容量 C を使って $T/2 = \pi (LC)^{1/2}$ で与えられることに注意すると、 L の異なるコイルとコンデンサのユニット数の組み合わせを変えることによって、ユーザーからの様々なニーズ、具体的には測定対象 (金属 or 絶縁体) や測定手法 (磁化測定、光測定、電気測定など) に応じたパルス幅のパルス磁場を発生する事ができるのである。

4. パルスマグネット

現在国内で運用されている60 T超級の非破壊型パルスマグネットの基礎は、阪大強磁場において金道教授によって確立された [1]。金道式と呼ばれるそのマグネットの構造は、高強度・高導電性

Cu-Ag合金線の多層巻線コイルと、それを外部から補強するガラス繊維、エポキシ樹脂、最外層の超高強度合金マルエージング鋼から成り立っている（図3）。現在、単独のコイルと単独の電源を用いたモノコイル方式によるパルス強磁場世界最高は、11層の金道式マグネットによる86 Tである。センターでは、東大強磁場との協力体制のもとパルスマグネットの開発を行っており、試料空間18φに最大60 Tの磁場を発生するマグネットを中心に、種々の実験に応じたマグネットをユーザーに供給している。

ところで、物性研究で実用的と呼べるには、試料をヘリウム温度に冷却できる、すなわちヘリウムクライオスタットが挿入できるだけの試料空間を確保できる事が、装置にとっての必要条件である。この条件を満たし、実際に60 Tの強磁場で磁気測定が可能なパルスマグネットが、1980年代に既に伊達教授によって実用化されている

[2]。伊達式と呼ばれるこのマグネットは、金道式では補強材として使用されていたマルエージング鋼それ自身を電流が流れるコイルに成形して、系の異なるそのコイルを複数層重ねた構造をしており、2層タイプの伊達式マグネットにおいて、室温空間に0.5ミリ秒のパルス幅で最大60 Tの磁場を発生する。図4は伊達式マグネットの概略図で、図5には伊達式、金道式それぞれのマグネットの写真を示している。伊達式マグネットの内部には液体窒素槽と液体ヘリウム槽を備えた4層構造の石英ガラス製デュワーを挿入可能で、液体ヘリウムを減圧することで1.3 Kの低温を得ることができる。2016年にノーベル

物理学賞を受賞したF. D. M. Haldaneの理論研究を実験的にサポートした低次元量子磁性体の磁化測定など[3]、数多くの成果がこの装置によって創出された。ただしこのマグネット、実際に運用する上で幾つか問題がある。伊達式マグネットでは、磁場発生に伴う金属疲労の回復と層間に挿入する絶縁物の交換のため、60 Tを4回発生する度に分解してオーバーホールする必要がある。例えば、磁化測定で1つのデータセットを得るためには最低限2回の磁場発生が必要で、事実上1つの試料の測定毎にマグネットを交換することになる。予め複数のマグネットセットを準備するにも限度があるため、現実一度のマシントイムで測定できる試料の数は限られる。この状況は、一度の来所で沢山の試料を測定したい外来研究者にとっては大きなフラストレーションであり、ユーザー支援者

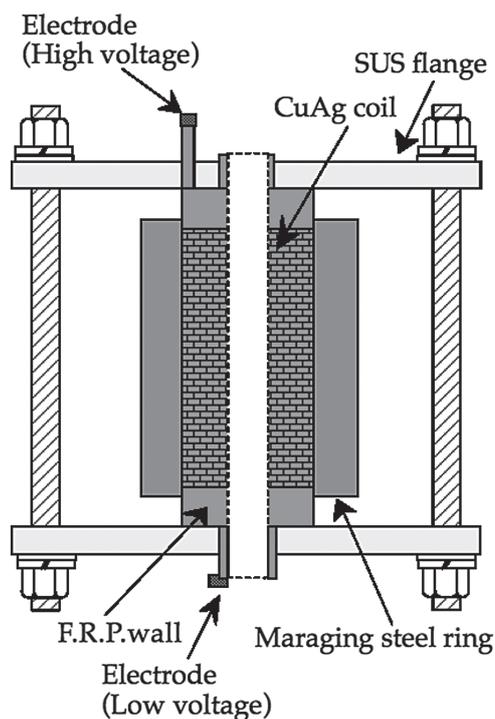


図3 金道式巻線型パルスマグネットの概略図。

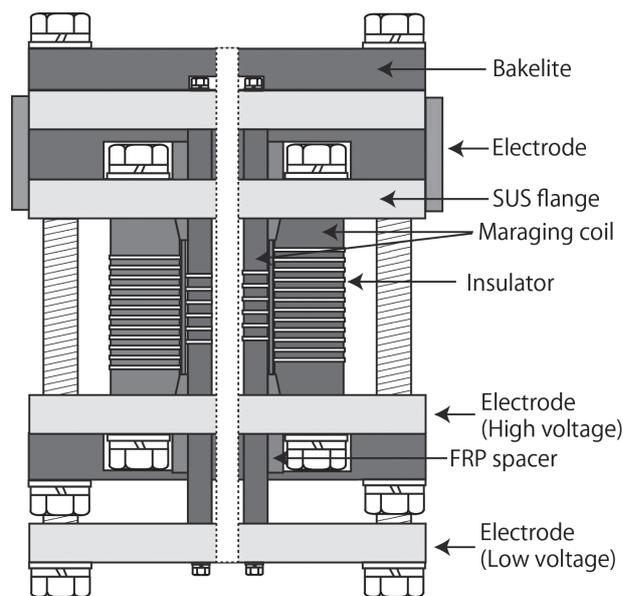


図4 伊達式パルスマグネットの概略図。

にとっての大きな負担ともなる。もう一つ別の問題として、0.5 ミリ秒という伊達式マグネットのパルス幅では金属に対する磁場進入深さが極めて短くなるため、金属試料に対する60 Tの実験は事実上行われていなかった。

90年代後半になってこの状況を変えたのが、金道式マグネットの登場である。このマグネット、非破壊型パルスマグネットによる100 Tの磁場発生という開発的性格がよく注目されるが、数百回の耐久性を備えた60 Tの磁場発生と金属試料の測定に必要な数十ミリ秒の長時間パルスを実現した点に実用性を見据えた重要な価値がある。筆者の学位論文研究の半分は伊達式マグネットによって行われ、残りの半分は金道式マグネットによって行われた。つまり、筆者は伊達式マグネットの最後のユーザーであり、また金道式マグネットの最初のユーザーでもあった。この当時の経験からも、金道式マグネットは共同利用に対応した真の実用パルスマグネットと断言できる。現在、当センターでは、毎週のように外来研究者による実験が行われ、また論文誌や学会等で日常的に60 T級の物性測定の結果を見ることができている。それを可能にしたのは、金道式マグネットなのである。



図5 左は製作途中の金道式マグネット。外部補強はまだ施されていない。右は2層タイプの伊達式マグネットの内コイル。

5. 低温

低温に話を移そう。超伝導マグネットとは異なって、金道式パルスマグネットは液体窒素に浸して運用する。一日に約100 Lと大量の液体窒素を消費するパルス強磁場の実験では、寒剤の供給体制も実験遂行の重要な要素である。低温センターに隣接した第二実験施設は、低温センター管理の窒素汲み出し場を学内で最も利用しやすい環境にある。低温センターから離れた第一実験施設がある極限科学研究棟には、常時汲み出し可能なコールドエバポレーター(CE)が屋外に設置されている。我々はここで100 Lベッセルに液体窒素を充填し、実験室内のパルスマグネット冷却容器に液体窒素を移送する。

現在、図2の破線で示すようなパルス幅100ミリ秒を超えるパルス磁場を発生するマグネットの開発が東大強磁場の協力のもと進められている。実は、10 MJ コンデンサ電源の全てのユニットが初めて同時にこのマグネットを使った実験に投入される予定になっている。ここで問題になってくるのが、このマグネットをどのようにして冷却するかである。マグネットやそれを支える構造物の重量は標準的なマグネットの10倍以上、約1トンに達する。そこから見積もられる液体窒素は初期冷却で1000 L以上となる。共用CEの容量は2000 Lであるため、一度に1000 Lの窒素を汲み出すことは原理的には可能であるが、磁場発生毎にさらに窒素の補充が必要で、なにより100 L容器で10往復するのは現実的では無い。そこで現在、マグネット容器に直結したCEの設置についての検討

が行われている。スケールの大きい磁場を生み出すには、同じくスケールの大きい低温設備が不可欠なのである。

パルス強磁場は、液体ヘリウムに関しては、多くの研究室と同様に低温センターで充填されたヘリウム容器をセンターまで運搬して利用している。低温センターから離れた第一実験施設においても、低温センターにつながるヘリウム回収配管が、テニスコートかららふおれに沿った道沿いに敷設されている。ただし、第一施設の回収ラインには一時貯蔵用のバルーンとコンプレッサーが特別に設置されており、ヘリウムガスを加圧することで長い回収ラインによるインピーダンスに負けることなく低温センターにガスを送り返している。パルス磁場の実験ではヘリウムは試料の冷却にのみ使用されるため、1日の実験で消費する液体ヘリウムの量は多くて5 L程度である。従って、大量に消費する液体窒素とは異なり、液体ヘリウムに関してはパルス強磁場は非常にエコロジーな実験なのである。

6. 大型研究施設における低温

筆者が過去に在籍していた東大物性研と東北大金研も、強磁場の実験室は低温センターに併設している。例えば、東北大の強磁場超伝導材料研究センターでは、ハイブリッドマグネットを筆頭にした多数の超伝導磁石を運転するために大量の液体ヘリウムを供給できる体制が整っている。普通の研究室では見ることの無い400 Lのヘリウム容器も隣接した施設でなければ運ぶこともできない。どちらも研究所でも、バーコード管理した液体窒素容器を使い、重量計と電磁弁を連動させた液体窒素自動充填装置で24時間液体窒素が利用できるのは、研究所ならではなのかもしれない。

筆者は近年、小型化したパルス強磁場発生装置を開発して、SPring-8やJ-PARCなどの大型研究施設において放射光や中性子をプローブとした強磁場物性研究を展開している [4]。その中で、大規模な研究施設とはいえ、物性研究を行う上で必ずしも十分な低温寒剤の供給体制が整っている訳では無い、ということを感じている。例えばJ-PARCでは、ニュートリノビームラインへの陽子軌道を制御するために28台の超伝導磁石が設置されており、その冷却専用のヘリウム液化機が整備されている。また、中性子を発生する物質生命科学研実験施設では液体水銀を冷却するためのヘリウム冷凍設備が整備されている。ただ幸いにして、それらの設備が存在することで実験ホール内にはヘリウムガス回収ラインが整備され、また低温に精通したスタッフがJ-PARC内に常駐していることから、どちらも低温物性研究を意図した低温設備ではないが、2次利用として中性子実験のユーザーも液体ヘリウムや液体窒素を無償で利用する事ができる。一方、SPring-8では電子シンクロトロン自体で液体ヘリウムを必要とすることが無いため、そのような低温設備も無い。そのため、ユーザーが液体ヘリウムを使うためには、外部から購入した液体ヘリウムを有償で利用することとなる。当然、ヘリウムガスを回収する設備も備わっていないため、使用したヘリウムガスは大気に放出される。大学で「ヘリウムの一滴は血の一滴」と教育された筆者にとっては、身を切るような思いである。ただ、液体窒素に関しては、実験棟内に数カ所充填所が設けられており、ユーザーは無償で利用することができることは、液体窒素を大量に使用するパルス磁場ユーザーとしては救いである。

最後に写真を一枚紹介する。図6は、英国Rutherford Appleton Laboratoryにある中性子実験施設

ISISの実験ホールを写した写真である。青く写っているのは昇降機で、左に見える2段の階段から想像できるように、その段差は20 cmほどしかない。ISISには液体ヘリウムなどの寒剤を専門に管理する低温部門が存在する。彼らはユーザーが寒剤のリクエストをすると、実験の進行状況を勘案しながら寒剤を実験サイトまで運搬して、時にはトランスファーまで行ってくれる。写真の昇降機は、そのヘリウム容器や窒素容器を運搬するために整備されたものである。日本の中性子施設

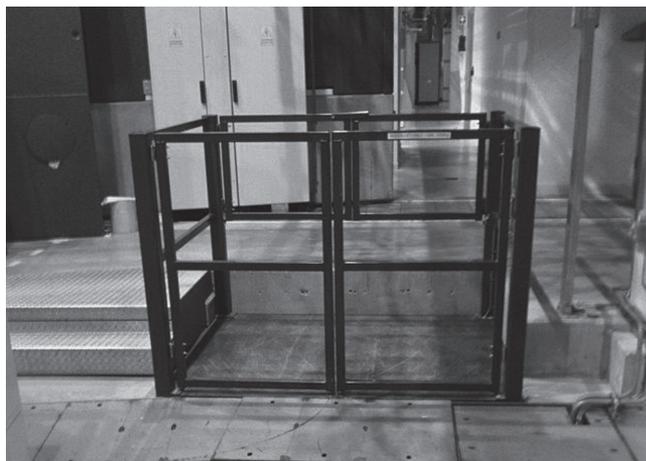


図6 RAL/ISISの実験ホールに設置されたベッセル運搬用昇降機。

J-PARCのMLFでは、ヘリウムの運搬に数十トンのクレーンが登場する。このクレーンはMLF職員しか運転できないため、利用には事前申請が必要である。さらに、施設外の運搬や各種アレンジはユーザーが個々に行う必要がある。この写真を見る度に、ユーザーファシリティーとしての成熟度の差を感じてしまう。

7. そして共同利用

今回、センターの共同利用・共同研究拠点への参画によって、学外のユーザーは旅費支援を受けて阪大強磁場を利用できるようになった。学内のユーザーにも恩恵はある。実験に必要な低温寒剤を無償で利用出来るからだ。本稿ではほとんど触れなかったが、数十ミリ秒のパルス幅を持つ60 T級のパルス磁場を繰り返し利用出来るようになったことで、この十年ほどの間にパルス強磁場下の物性計測技術は飛躍的に向上している。旧来の磁化や電気抵抗測定に加え、ホール効果、電気分極、テラヘルツ領域の磁気共鳴、磁歪、磁気熱量効果、比熱、NMRなど、これまでは考えられないような測定手法が現実のものとなっている。前節で触れたパルス強磁場中で放射光や中性子実験が可能になっているのもその一例である。実験手法以外では、100 mKを下回る極低温環境や、ダイヤモンドアンビルセルを用いた超高圧環境との組み合わせによる複合極限環境の整備も進んでいる。

本稿におつき合い頂いた読者の中で、超伝導磁石では磁場が届かなくてお困りの方は、一度、センターのスタッフにご相談頂いた上で、6月12月の年2回募集される共同利用・共同研究の申請にお申し込み頂ければ幸いです。詳しい情報はセンターホームページの共同利用に関するページ (<http://www.ahmf.sci.osaka-u.ac.jp/collabo.html>) をご参照頂きたい。

参考文献

- [1] 金道浩一、固体物理 **44**, 905 (2009).
- [2] 伊達宗行、山岸昭雄、日本物理学会誌 **37**, 808 (1982).
- [3] K. Katsumata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **63**, 86 (1989).
- [4] 鳴海康雄、固体物理 **44**, 589 (2009).