

強磁場コラボトリー2030 構想書

2019. 09. 16 版

強磁場フォーラム

目次

I	強磁場コラボラトリーの形成と歴史	
I-1.	強磁場コラボラトリーの形成	3
I-2.	世界の強磁場施設の現状	6
I-2.	強磁場コラボラトリーの活動	9
I-4.	強磁場コラボラトリー2030	11
II	強磁場施設の現状と将来計画	
II-1.	電磁濃縮、一卷きコイルの現状と計画	15
II-2.	非破壊パルス磁場・準定常強磁場の現状と計画強磁場における磁性研究	19
II-3.	定常強磁場施設の現状と計画	22
II-4.	学際分野における強磁場環境の現状と将来構想	27
III	強磁場コラボラトリーの目指すサイエンス	
III-1.	磁性研究	30
III-2.	強相関電子系	33
III-3.	ディラック電子系	36
III-4.	超伝導材料研究	39
III-5.	量子ビーム応用研究	42
III-6.	基礎科学分野	46
III-7.	分子科学、錯体化学	49
III-8.	強磁場の生物学への応用	52
III-9.	磁気科学分野	55

執筆者

I 強磁場コラボラトリーの形成と歴史

I-1. 強磁場コラボラトリーの形成

1970年代以降、日本の強磁場三大拠点はそれぞれの特徴を活かし、世界でもっともアクティビティの高い研究活動を行なって来た。その特徴は、東北大学金属材料研究所においては定常強磁場を、東京大学物性研究所では破壊型パルス強磁場を、そして大阪大学理学部の強磁場施設（当時）では非破壊型パルス強磁場を用いることにより、各拠点において、それぞれの磁場領域で世界最先端の磁場発生と物性計測を行うことであった。金研の定常強磁場は、約30テスラ(T)を上限として、時間変動のない定常磁場を発生することができ、材料評価などに多く用いられていた。一方、物性研の破壊型パルス強磁場は、磁場発生時間は10 μ 秒と短いものの、600 T程度までの磁場を発生することが可能で、新しい現象の探索に用いられていた。阪大の非破壊型パルス強磁場はその中間に位置するもので、磁場発生時間が0.4ミリ秒、発生磁場は当時60 Tであり、精密な物性実験に用いられていた。

1990年代以降、海外では大型強磁場拠点が整備され、日本の強力なライバルとなったため、これに対抗して国内の強磁場施設間の連携を深める議論が始まった。これと並行して、日本学術会議・物理学研究連絡委員会（物研連）・物性物理専門委員会では、物性研究拠点整備計画が議論されており、その報告書の中では、中型設備の代表である強磁場設備については、既存の施設が互いに連携して全国の研究者に利用サービスを行う組織作りを行うよう提言がなされた。

これらの提言を受け、強磁場ユーザーと強磁場施設の研究者は、日本の強磁場の学術面での将来計画と研究者への利用サービスを実施する強磁場施設のネットワーク構築を議論するために、2001年3月と11月そして2002年5月に、物性研究所において研究会を開催し、その結果を受けて、2002年10月9日に強磁場ユーザーと施設関係者の双方を含む強磁場研究に関する全日本団体として強磁場フォーラムを設立した。設立趣意では、「学術情報の交換、共通の学術的・技術的問題の解決、若手研究者の育成、人事交流、国内外の関係諸団体との研究連絡、関連研究者の要望発信、強磁場科学の将来構想の構築、一般市民、学生への啓蒙活動などを目的とした研究連絡組織」として、その目的を規定している¹⁾。その後、強磁場フォーラムでの将来構想の継続的な検討により、強磁場の拠点間連携を進めた共同利用実施体制としての強磁場コラボラトリー計画が立案され、その最初の実施事業として、物性研究所に大型発電機を導入して長時間パルス強磁場を整備する計画が立案され、実施された。長時間パルス強磁場は、定常強磁場とパルス強磁場の磁場発生時間のギャップを埋めるためのものであり、強磁場ユーザーの利便性を高めると同時に、海外の施設群との競争には不可欠な整備事業であった。

このように、強磁場フォーラムの形成と強磁場コラボラトリー計画により、自発的で多面的な活動を基本とする物質科学・材料科学分野の研究においても、個々のグループの活動を越えたところにある施設整備に求められる戦略性と計画性を発揮することが可能になった。実際、本構想書で紹介されているように、その後の日本の強磁場分野の長期計画は、強磁場コラボラトリーを基軸として計画され、実施されてきた。強磁場コラボラトリー計画は、施設間の垣根を越えてユーザーが必要とする強磁場をワンストップで提供するサービスの実施体制を構築する計画であり、これは、物性科学の広範なコミュニティが要請する研究環境の整備に関わる全国的な計画を構想した物研連の提言に定めるものとなっている。強磁場コラボラトリー構想の下で、定常磁場、破壊型パルス磁場、量子ビーム施設との連携など、各拠点や関連研究者が進める施設整備や研究計画が全国的な整合性と連携性をもって進められるようになり、金研の25 T無冷媒超伝導磁石や阪大の大型コンデンサ電源などの整備が行われ、さらに、世界一の強磁場施設に強磁場コラボラトリーを発展させる計画が構想され、推進されている。本構想書は、2030年までの約10年間において、学術、施設整備、コミュニティの体制等の戦略的・長期的な計画を公開し、強磁場とそれに関わる幅広い物性・材料コミュニティにおいて、これを共有する目的で作製されたものである。

参考文献

1) 強磁場フォーラム設立趣意書 <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/mgsl/himag-forum/about.html>

強磁場コラボラトリーの形成

1970年—1990年

最先端の強磁場三拠点（東北大、東大、阪大）が世界をリード
定常強磁場30T（東北大）、破壊型パルス強磁場600T（東大）、非破壊型パルス強磁
場60T（阪大）

1990年以降

海外に大型強磁場施設が設立

NHMF（米）、ボルスゲン（独）、ナイメーヘン（蘭）、武漢（中）、合肥（中）

2000年

日本学術会議・物理学研究連絡委員会物性物理専門委員会の報告（物性研究拠点整備計
画の具体化に向けて）において、強磁場拠点間連携に関する提言がなされた。

「**中型設備の内、超強磁場設備は、その予算規模からみて、既存の施設が互いに連携し
て、先端的研究と共に、全国の研究者に施設の利用サービスを行う組織作りを行うよう
提言する。」**

2002年10月

学術情報の交換、共通の学術的・技術的問題の解決、若手研究者の育成、人事交流、国
内外の関係諸団体との研究連絡、関連研究者の要望発信、強磁場科学の将来構想の構築、
一般市民、学生への啓蒙活動などを目的とした研究連絡組織「強磁場フォーラム」が
設立された。

2006年4月

「強磁場フォーラム」での将来計画検討の結果、長時間パルス強磁場開発の必要性が認
められ、日本原子力研究所より世界最大直流発電機を4年計画で移設を概算要求事項
として採択された。→強磁場コラボラトリー計画の最初の予算化

強磁場コラボラトリー計画の歴史

創生期 2003-2005	1期 2006-2009	2期 2010-2015	3期 2016-2021	4期 2022-
<p>計画策定 研究者組織 強磁場フオー ラム 将来計画 強磁場コラボ ラトリー計画 策定</p> <p>国内の強磁場 施設の連携 強磁場科学の 格段の発展</p>	<p>設備予算化 特別教育研究 事業強磁場コ ラボラトリー の形成</p>  <p>世界最大の直流 発電機を移設 準定常磁場整備</p>	<p>事業化 特定事業先端施設を用い た共同利用・共同研究の推進</p> <p>最先端の強磁場環境による共 同利用・共同研究推進</p> <p>マスタープラン採択 強磁場コラボラトリー計画 重点課題採択 (2011)</p> <p>設備の予算化 文科省・最先端研究基盤事業 1000テスラ超強磁場発生装置 の整備 (~2013)</p>  <p>電磁濃縮用新電源装置</p> <p>金研：25T無冷媒超伝導磁石</p> <p>阪大：10MJコンデンサ電源</p>	<p>事業化 共同利用・共同研究事業パ ル又強磁場コラボラトリー 東大と阪大によるパルス強 磁場コラボラトリー運営</p> <p>国際展開 グローバル強磁場フオーラ ム発足</p> <p>強磁場施設の G6 米、仏、独、蘭、中、日 アジアの研究拠点形成 国際連携協定 アジアフオーラム</p> <p>1200テスラ発生 (2018)</p>	<p>事業化要求 共同利用・ 共同研究共 拠点連携 協定</p> <p>強磁場コ ラボラト リー運 営 物性研・金 研・阪大強 磁場</p> <p>30T無冷媒 超伝導磁石 ロンゲパル ス電源</p>
<p>世界最高の超伝導磁石を 共同利用に供用 (2016—) 阪大に西日本拠点開設 (2016—)</p>				

I-2. 世界の強磁場施設の現状

1. 世界の強磁場施設の概要

世界の大型強磁場施設は、日本以外では、アメリカ国立強磁場研究所、ヨーロッパのフランス国立強磁場研究所、ナイメーヘン大学の定常強磁場施設、ドレスデンのパルス強磁場施設、中国の武漢のパルス強磁場施設、中国の合肥の定常強磁場施設が主な施設であり、ヨーロッパではEUの下で上記のうち3研究施設がユーロ強磁場研究所として連携した共同利用等を行っている。国としては、アメリカ、フランス、ドイツ、オランダ、中国と日本の6カ所にしか大規模強磁場施設はなく、物質・材料科学分野の先進国のみが大規模強磁場施設を有している。その他の国でも、研究室レベルでの強磁場設備は存在する国はあるが、大規模なユーザー施設ではない。

アメリカ国立強磁場研究所は、定常とパルス強磁場の両方を備えた総合的な強磁場施設としては、世界で初めての施設であるが、ヨーロッパのユーロ強磁場研究所や日本の強磁場コラボラトリーのように、定常とパルス強磁場が連携した体制が目指されているのが、世界の動向である。

2. 各国の強磁場施設の現状

- 1) アメリカ国立強磁場研究所:アメリカは、MITの定常強磁場施設を廃止して、フロリダに定常強磁場施設を新たに建設し、ロスアラモスのパルス強磁場施設と低温強磁場環境に特化した研究所などを含めて、総合的な強磁場施設として運営している。予算は、NSFから支出されており、放射光施設等のエネルギー省傘下の大型施設とは異なる形の大型施設である。職員数は、500名を越え、年間予算は53億円である。設備としては、フロリダには、世界最大の56 MWの電源設備と45 Tが発生可能なハイブリッド磁石設備を始めとして、多数の水冷磁石等を有している。ロスアラモスでは、1.4 GWの発電機を電源とした100 Tの非破壊パルス磁場を中心とした設備が運用されている。年間の利用課題数は約500件であり、物性研究の他にイオンサイクロトロン質量分析設備や磁気共鳴施設など、多様な強磁場関連研究施設が集積され、利用が実施されている。
- 2) フランス国立強磁場研究所: フランス国立強磁場研究所は、グルノーブルにある定常強磁場施設とツールーズにあるパルス強磁場施設が合同して、CNRS傘下の研究所として、2拠点1研究所型の国立強磁場研究所を形成している。グルノーブルの定常強磁場施設は、近年24 MWの電源の更新が進んでおり、ポリヘリックス型と呼ばれる独自技術による水冷磁石で36 Tまでの定常磁場を運用している。ハイブリッド磁石については、超伝導部分の開発に関して紆余曲折があったが、現在、最終的な組立が行われており、近年中に運用開始が計画されている。グルノーブルのCNRSの研究所群は超伝導材料の研究でも連携しており、東北大学金属材料研究所との間で超伝導材料研究に関するJoint Laboratoryを2019年に発足させた。一方、ツールーズでは、コンデンサ電源の更新が終了し、99 Tのパルス磁場の発生に成功し、物性科学の広範な領域で研究を推進している。フンボルト大学から移設された、一巻きコイル装置も運用されている。また、ILL等において中性子回折用のパルス強磁場を運用している。
- 3) ナイメーヘン大学強磁場施設: オランダの強磁場施設は、元々アムステルダム大学のフラットトップ準定常磁場施設から始まったが、その後、研究の中心はナイメーヘン大学に移り、アメリカの支援の下で、定常強磁場施設が建設され、半導体分野等を中心に、定常強磁場を利用した研究が行われている。近年、20 MWの電源への更新が進められており、これを利用した40 T級のハイブリッド磁石の建設も進められている。オランダには、赤外・遠赤外領域の自由電子レーザーFELIXが先駆的な光ビーム施設として建設され運用されてきたが、その後、FELIXをナイメーヘン大学に移設して、強磁場施設と連携した研究を行うという戦略的な決定がなされ、2019年7月には、相互利用のための連結建家が竣工した。今後、40 T級の定常強磁場と赤外・遠赤外自由電子レーザーを用いた研究の推進が計画されている。
- 4) ドレスデン強磁場施設: ドレスデンの強磁場施設は2004年ごろから建設が始まった比較的新しい強磁場施設であり、ヘルムホルツ研究機構傘下のローゼンドルフ研究所の中に設置されており、IFWドレスデン等も協力機関となっている。主要な装置としては、50 MJの大型コンデンサ電源を用いた90 T非破壊パルス磁場があり、複数のマグネットを切り替えて運用出来

る体制となっている。研究所には ELVE という赤外自由電子レーザー施設もあり、相互利用研究も一部行われている。他施設との連携では、ハノーファーのヨーロッパ自由電子レーザー施設にパルス強磁場装置を導入を進めている。パルス磁場の外にも、大型の超伝導磁石等も有しており、パルス磁場と相補的な研究も行われている。

- 5) ユーロマグネット研究所：ヨーロッパにおける強磁場施設の共同利用は、EU の支援の下に行われており、上記の 3 施設の他に、イギリスやポーランド等の施設を始めとした、小規模の研究施設がパートナーとして参加して、バーチャルな汎ヨーロッパにおける強磁場施設を形成し、ユーザー課題への旅費の支援、研究交流や人材交流を行っている。
- 6) 華中科学技術大学パルス強磁場施設：電気工学に関する研究を背景に、武漢の華中科学技術大学にパルス強磁場施設が建設され、大型コンデンサ電源を用いて 91 T の非破壊パルス磁場が利用に提供されている。複数の計測ステーションを備えた施設の構成はドレスデンの強磁場施設と類似している。この施設は、中国の 10 大科学技術プロジェクトとして開始されたが、現在大型発電機を用いた多段型の構成による 100 T の非破壊磁場の発生が目指されている。
- 7) 合肥定常強磁場施設：合肥は、プラズマ関係の研究所があった中国における科学研究所の集積場所の 1 つであるが、フランスやアメリカの支援を得ながら、定常強磁場施設の建設を進めて来た。現在 28 MW の電源を運用し、アメリカと匹敵する 40 T 以上のハイブリッド磁石を運用している。研究内容は物質科学、材料科学全般にわたっているが、その研究内容は外の施設と大きく変わらない。現在、冷却施設等の整備を進めており、これが完成すると電源の能力を全て使用出来るようになる予定である。

4 まとめ

以上のように、日本以外では世界 5 カ所に、7 つの大型強磁場研究施設が存在しているが、近年の動向として、パルス磁場と定常磁場の区別を越えた総合的な強磁場施設としての連携が進んでいるのが特徴である。日本の強磁場施設を、世界と比較した場合、大電力利用の 30-45 T 領域の定常磁場施設の整備では遅れを取る一方で、破壊型のパルス磁場、準定常磁場、超伝導磁石等では、優位性を発揮している。これらを踏まえると、強磁場コラボラトリーとして、国内の 3 拠点機関が一体となって統合した強磁場施設を運用することが必用である。日本の強磁場コラボラトリーは、予算と人員では厳しい現状にあるが、その中でも世界 2 位の規模を保持しており、人員に比して効率的で質の高い共同研究と成果が出されている。弱点となっている 30-45 T 領域の設備を、超伝導磁石と準定常磁場の施設整備で克服することが出来れば、強磁場コラボラトリーの本格的な運用に伴って、世界をリードする地位を獲得することが期待出来る。

参考文献

- 1) National High Magnetic Field Laboratory, <https://nationalmaglab.org>
- 2) EUROPEAN MAGNETIC FIELD LABORATORY, <https://emfl.eu>
- 3) Le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, <http://lncmi.cnrs.fr>
- 4) Dresden High Magnetic Field Laboratory, <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=580>
- 5) High Field Magnet Laboratory, <https://www.ru.nl/hfml/>
- 6) Wuhan National High Magnetic Field Center, <http://whmfc.hust.edu.cn/english/index.htm>
- 7) High Magnetic Field Laboratory (HMFL), Chinese Academy of Sciences, <http://english.hf.cas.cn/r/ResearchDivisions/HFML/>
- 8) Global High Field Forum, <https://globalhiff.org>

世界の強磁場施設の現状

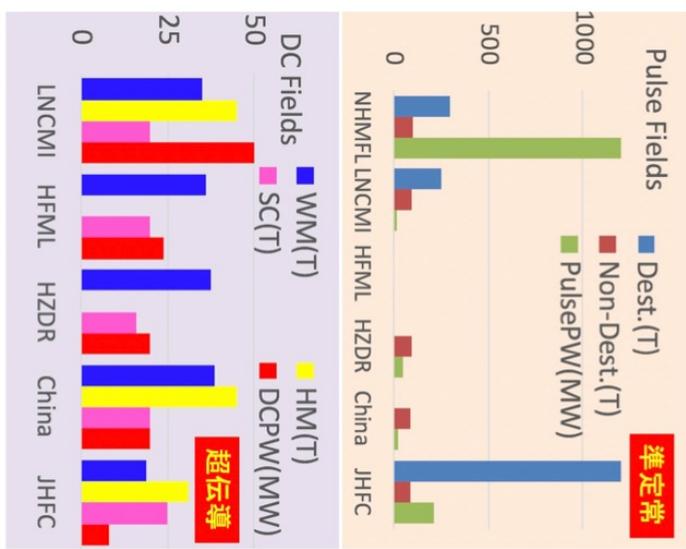
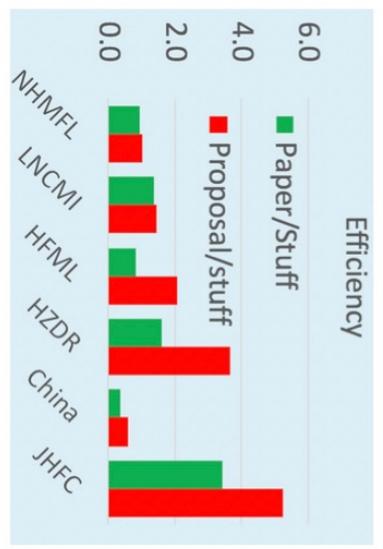
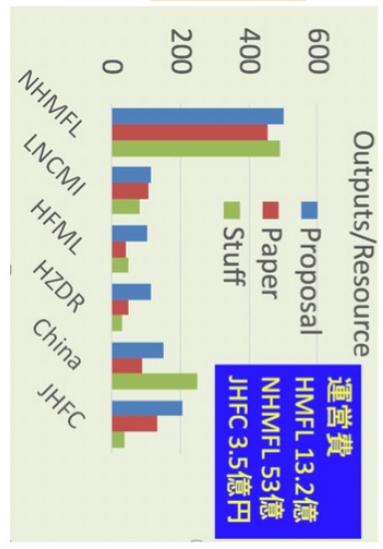


30-45Tの定常磁場は世界に後れ
超伝導磁石では世界最高
非破壊型では他にない成果を輩出
準定常磁場は世界最高レベル



JHFC: Japan High Magnetic Field Collaboratory

予算・人員は限られるが
課題数と成果論文世界2位
人数比成果は1位



I-3. 強磁場コラボラトリーの活動

2002年10月に発足した強磁場フォーラムでの議論により、強磁場コラボラトリー計画が策定された。その最初の整備事業として、長時間パルス強磁場の整備が提案され、「強磁場コラボラトリーの形成」という事業名で概算要求を行なった。事業は2006年度からの4年間で実施され、世界最大の直流発電機が移設され、日本の強磁場設備の整備における最大の懸案事項が解決した。2010年には日本学術会議が公募した「学術の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン2011」に強磁場コラボラトリー計画を提案し採択された。その結果、東北大学金属材料研究所に25 T 無冷媒超伝導磁石が大阪大学理学研究科に複合極限下の物質研究のための10 MJ 大型コンデンサ電源が導入された。25T 無冷媒超伝導磁石は2018年度から共同利用に供している。また阪大の電源は2016年度から共同利用に使用している。

その他の設備、後様々な形で予算化された。破壊型パルス強磁場については、世界最強の磁場発生を行うための電源整備は、文科省の最先端研究基盤事業の補助金として2010年交付された。その事業名は「1000 テスラ超強磁場発生装置の整備」であったが、物性研ではその後、電源の調整を進め、2018年に1200 テスラの発生に成功し、現在はこれを用いた物性測定を開始している。

パルス強磁場を用いた拠点である物性研と阪大は開発と並行してマグネットを共同利用に供することが可能なため、この二拠点が一体となって共同利用を実施する「パルス強磁場コラボラトリー」を開始した。具体的には、物性研が事業主体となって実施している物性科学研究拠点の枠内に阪大の強磁場センターを連携拠点として組み入れ、共同利用を協力して実施することで、現行のルールの下での運営が可能となった。これらの活動は、強磁場コラボラトリーの歴史としては、第1期の構想期、第2期の導入期に引き続いて、第3期である運用期に至ったものとして位置づけられている。しかしながら、2011年の強磁場コラボラトリー提案で、重要な柱の一つとしてされていた大電力水冷磁石・ハイブリッド磁石の整備は、この間進んでない状況であり、物質・材料研究機構は2019年度から、外部への共用を基本的に停止するに至っている。これらの状況変化を受けて、第4期の強磁場コラボラトリー2030では、日本の強磁場施設整備で空白となっている、30-45 T 領域を埋める戦略が検討され、1) 無冷媒超伝導磁石の発生磁場を50 T 級に高める、2) 準定常パルス強磁場を高度化し、大電力水冷磁石に置き換える、の2つの方法で、この空白を埋めるといった新戦略が提案されている。

強磁場コラボラトリーの運営面では、2019年3月に、3拠点間で、強磁場コラボラトリーの運営に関する協定が締結され、組織間の公式の合意として、強磁場コラボラトリーを運営組織とすることが決定された。現在、2020年度の共同利用から、統一課題申請の仕組みが開始する予定であり、これによって、定常とパルスを統合した強磁場コラボラトリーの運営が本格的に開始される。また、この間、国際共同利用・共同研究拠点として採択された金属材料研究所のGIMRTにおいては、国際的な共同利用に門戸が開かれると共に、異なる組織における研究を統合して行う”ブリッジ”という共同利用の仕組みが導入されており、拠点に属さない連携機関を含めた共同利用体制の構築のモデルとして期待されている。強磁場コラボラトリーでは、これらの運営の経験も踏まえて、2022年度から始まる次期中期計画ではより洗練された組織運営を提案することを構想している。

参考文献

- 1) 東京大学物性研究所国際超強磁場科学研究施設, <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/mgsl.html>
- 2) 東北大学 金属材料研究所 附属強磁場超伝導材料研究センター, <http://www.hflsm.imr.tohoku.ac.jp/cgi-bin/index.cgi>
- 3) 大阪大学理学研究科附属 先端強磁場科学研究センター, <http://www.ahmf.sci.osaka-u.ac.jp>
- 4) Global Institute for Materials Science Tohoku, <http://gimrt.www.imr.tohoku.ac.jp>

強磁場コラボラトリーの活動

2002年	強磁場フオーラム設立：強磁場コラボラトリー計画策定
2006年～2009年	特別教育研究事業「強磁場コラボラトリーの形成」（物性研）：ロングパルス強磁場用電源の移設
2010年	学術会議・大型計画マスタープラン2011に「強磁場コラボラトリー計画」が重点採択
2010年～2015年	共同利用・共同研究拠点プロジェクト（物性研）「先端実験施設を用いた共同利用・共同研究の推進」
2010年～2013年	最先端研究基盤事業（物性研）「1000テスラ超強磁場発生装置の整備」
2012年～2013年	補正予算（金研）「25T無冷媒超伝導磁石の整備」
2012年～2013年	補正予算（阪大）「10MJコンデンサ電源の整備」
2016年～2019年	共同利用・共同研究拠点事業（物性研） パルス強磁場コラボラトリー開始（物性研・阪大）
2019年	学術会議・大型計画マスタープランに「強磁場コラボラトリー計画2020」を申請
2020年～2021年	パルス強磁場コラボラトリーを強磁場コラボラトリーに拡大（金研・物性研・阪大）
2022年	強磁場コラボラトリーを共同利用・共同研究拠点に新規申請を検討

I-4. 強強磁場コラボトリー2030

1 強磁場コラボトリー2030の目標

強磁場コラボトリー2030では、マスタープラン2011から目指してきた強磁場コラボトリー形成を完成させ、1)無冷媒超伝導磁石、非破壊パルス磁場、1000T超の電磁濃縮装置を始めとした特色のある強磁場設備を統合した世界的に最高水準の強磁場研究施設を形成し、2)東北大学金属材料研究所、東京大学物性研究所、大阪大学理学研究科の3機関が全日本強磁場施設を共同運営する体制を確立する。このようにして形成された強磁場コラボトリーにおいては、3)未踏領域の物質科学や学際的科学の推進を通して、先端的な物質・材料科学研究を推進し、4)超伝導材料を始めとした基幹的な材料の開発と社会実装への寄与を通じて、先端産業育成の育成と持続可能な社会の構築に貢献する。さらには、5)強磁場コラボトリーを中心とした中小大学を含む協力機関との連携により、物質・材料科学研究のネットワーク形成と次世代人材の育成を図り、6)放射光や中性子等の他の大型研究施設との連携により、日本の研究の国際的な優位性の確立に貢献する。

2 強磁場コラボトリーの強磁場発生設備

- 1) 定常強磁場：定常強磁場においては、独創的な無冷媒超伝導磁石技術を発展させ、2020年代初頭に高温超伝導材料を駆使した33 T無冷媒超伝導磁石をユーザー利用設備として導入する。さらに、現在進めている50 T級の超伝導磁石技術開発を推進し、40-50 T級の超伝導磁石を順次開発し、導入する。また、大電力磁石を効率的に利用するためのエネルギー制御技術を探求する。
- 2) 準定常パルス磁場：現在の直流発電機に替えて、300 MJスーパーキャパシタ-等の新型電源を導入し、パルス幅の長時間化と高度の波形制御技術を駆使することで、水冷磁石を越える超高精度の物性測定が可能な準定常長時間パルス磁場装置を実現する。
- 3) 非破壊パルス磁場：高強度ワイヤーの開発と高度のコイル形成技術とを通して、安定的に100 Tまでの非破壊パルス磁場が発生出来るパルス磁場装置を確立する。大口径パルス磁石などを用いて、複合極限環境の研究が可能な設備を阪大を中心に確立する。
- 4) 一巻きコイル：一巻きコイルを用いた超強磁場の発生とその利用を安定的に持続可能な技術の確立を進め、高品質の磁場発生の鍵となる大電力のスイッチング方法の高度化や発生磁場の再現性の向上などを通して、多様な物性測定を可能にする。また、施設外の実験を行えるように小型装置を開発する。
- 5) 電磁濃縮：世界で唯一の電磁濃縮による1200 T超の超強磁場の発生技術を、さらに向上・安定させるとともに、コンパクトな電磁濃縮装置の開発を進めることで、1200 T級の超強磁場を利用出来る機会を飛躍的に増大し、未踏の超強磁場科学研究の基盤を確立する。

3 強磁場コラボトリーで目指す研究課題

- 1) 超1000 T強磁場による未踏領域の探索：電子のゼーマンエネルギーが、バンドエネルギーの10%にも迫るといふ、これまでにない強磁場環境を利用して、未踏領域の物質科学を推進する。具体的には、(1)磁場のエネルギーとファンデルワールス力が拮抗する状態において、分子構造や分子性の結晶の磁場による改変と制御を通して、新しい物質のかたちを探索し、化学反応の磁場制御を通して、革新的な物質合成方法を開拓する、(2)電子の波動関数がサブnmに閉じ込められる量子極限での物質の振る舞いを明らかにする、(3)室温においても還元温度が0.3以下となることを利用して、室温スケールのエネルギーで現れるマクロな量子現象を発見する、(4)物質内の数百Kの交換相互作用作用に匹敵する磁場を加えることで誘起される特異な強磁場相を探求する、(5)宇宙にしか存在しない超強磁場を実験室で発生出来ることを利用して、白色矮星等にあると考えられている超強磁場下の物質の状態を実験的に明らかにする超強磁場宇宙科学等の学際的な研究領域を開拓する。
- 2) 準定常長時間パルス磁場・非破壊パルス磁場を用いた超精密物性研究：これまでにない長時間のパルス磁場下における物性測定を通して、(1)超高精度測定、ビッグデータの取得、時間依存現象の探求など、探索的な物質科学研究を推進する、(2)高度な波形制御を通して、準平衡

状態の物質相図やエントロピーや熱制御による非平衡状態の利用など、強磁場熱科学を研究する、3) 高圧力、超低温、強電場を始めとして、複数の極限環境を利用して、1つの環境の操作では到達不可能な未知の物質相の探索や多自由度の相関などを探求する。

- 3) 無冷媒超伝導磁石による材料科学の推進：無冷媒超伝導磁石によって可能となる、発生時間の制約のない超高品質の強磁場環境を利用して、(1) 金属系超伝導材料の高度化と酸化物高温超伝導材料の本格的実用化技術を確立する、(2) 超伝導加速器や超強磁場 MRI など、加速器や医療器機の超伝導化・強磁場化技術を支援する、(3) 核融合炉のコンパクト化に寄与する強磁場磁石の開発などエネルギー問題の解決に寄与する、(4) 革新的な磁性材料や機能性材料の開発に貢献し、先進的な材料科学研究とその社会実装のために社会連携活動を推進する。また、超伝導材料の本格的な社会実装に必用な評価や認証のための施設形成に貢献する。
- 4) 他分野との連携による学際的科学の推進：物質科学の枠を越えて、他分野と連携することで、新しい学際的な研究分野を切り開く。具体的には、(1) 基礎科学分野において、真空の複屈折の検証やアクシオン等の新粒子の発見に向けて、連携を推進する、(2) 強磁場下のプラズマや流体の振る舞いに関する学際的な研究を推進し、プラズマ科学や宇宙科学等の研究に貢献する、(3) 放射光や中性子などの大型施設における強磁場の連携利用を推進し、独創的な高度な物質・材料探求手法を開発して、物質・材料科学研究に貢献する。
- 5) 強磁場コラボラトリーを中心とする研究ネットワーク形成：強磁場コラボラトリーが、他の大学や研究機関と連携する中心として機能することで、それぞれの持つ独創的な研究力の連携を通して、日本全体の物質・材料研究の高度化を推進する。これらの活動を通して、国内外の研究者の頭脳循環を実現し、次世代の研究人材を育成する場を形成する。強磁場コラボラトリーが、日本を代表する統合的な強磁場研究機関となることで、日本の研究力の国際的な発信力を強化するとともに、共同利用研究の国際化の推進により、世界的な COE としての機能を確立・向上させる。

4 まとめ

以上のように、2000 代年初頭から計画が開始された、統合された強磁場研究機関としての強磁場コラボラトリーは、2030 年までに、世界最先端の独創的な研究設備と研究環境を備えた施設として完成し、形成期から本格的な運用期へと移行し、日本の物質科学・材料科学とそれを基盤とする材料関連産業を牽引する研究機関となる事が期待される。

5 参考文献

- 1) 「強磁場物性の現状と将来展望：長時間パルス強磁場施設建設に向けた検討書」-平成 14 年度強磁場フォーラム
- 2) 「100 テスラ領域における強磁場スピン科学の構築」平成 16 年度基盤研究(C) (1) 研究成果報告
- 3) 強磁場コラボラトリー計画(次世代強磁場施設) 日本学術会議マスタープラン 2011
- 4) 強磁場コラボラトリー2020:次世代強磁場施設の整備 日本学術会議マスタープラン 2011
- 5) 「超強磁場中性子散乱提案書」 J-PARC における強磁場中性子散乱実験の提案

強磁場コラボラトリー統合された次世代全日本強磁場施設の形成 —材料・物質科学の革新を担う協同プラットフォーム

強磁場コラボラトリーの歴史

計画2003-2005	設備導入 2006-2009	事業化 2010-2015	事業化 2016-2021	発展 2022-
研究者組織強磁場 フォーラム発足 将来計画強磁場コ ラボラトリー計画 策定	物性研の準定常パ ールズ磁場整備開始 世界最大の直流発 電機移設	共同利用体制整備 物性研電磁濃縮装置整備 フスタープラン2011重点 金研25T無冷媒超伝導磁石 阪大10MJコンデンサ電源	東大と阪大—パールズ強磁場 コラボラトリー運営開始 グローバル強磁場フォーラ ム発足, アジアフォーラム 結成	物性研・金研・阪大強磁場 連携協定による強磁場コラ ボラトリー運営開始 33T無冷媒超伝導磁石 1秒準定常磁場導入

世界的流れ—複数の組織・国が連携した大型拠点の整備

30-45Tの大電力定常磁場は世界に立後れ
超伝導磁石では世界最高
非破壊型では他にない成果を輩出
準定常磁場は世界最高レベル



日本の対抗策 強磁場コラボラトリー(JHFC)

3機関が連携による全日本強磁場施設を形成
材料・物質科学の研究者と連携
限られた予算でも世界に対抗出来る設備を整備

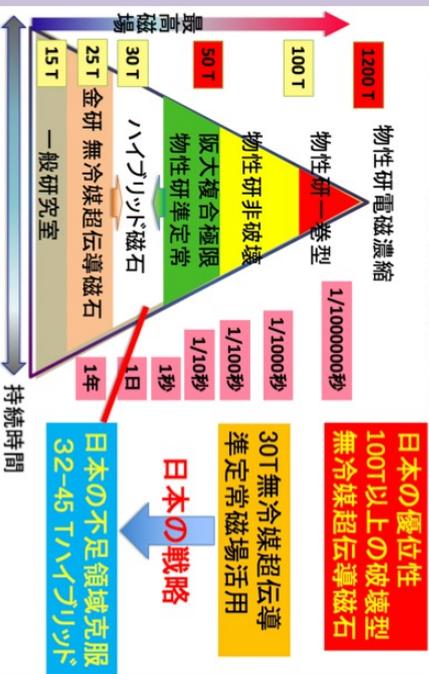
ユーロ強磁場研究所

中国IOA科学大型計画

米国立強磁場研究所



強磁場技術ピラミッド



強磁場コラボラトリーの成果



物性研・金研・阪大理の連携協定による全日本強磁場施設としての強磁場コラボトリー運営

先端的物質・材料科学研究の推進

1200 T超強磁場による未踏領域の探索

- ◆ 分子構造と分子結晶の磁場制御
- ◆ 磁場エネルギーとフアン・デル・ワールス力が拮抗
 ◆ サナnm閉じ込めによる量子極限相の探索
- ◆ 波動関数広がりⁿ数Å
- ◆ 室温スケールのマクロ量子現象の探索
- ◆ 室温で低温条件 T/H<1を達成
- ◆ 強相関磁性体の強磁場量子相の解明
- ◆ 数100 Kの交換相互作用に対応する磁場

1秒級準定常磁場下の超精密物性研究

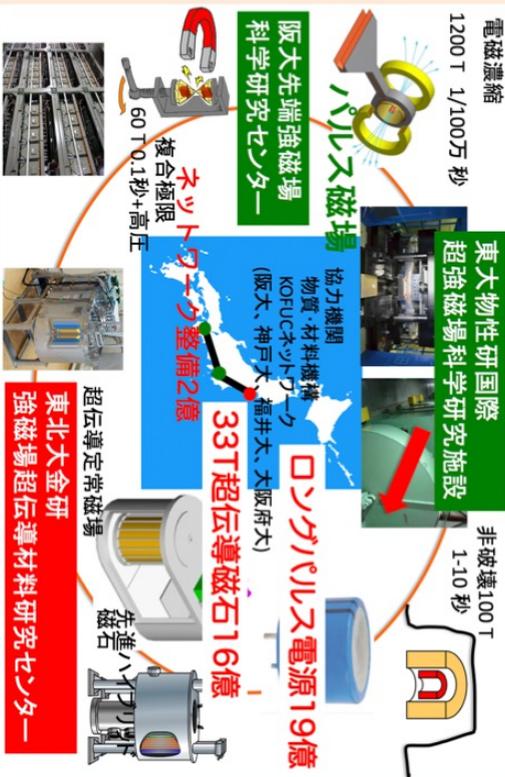
- ◆ 長時間パルスを用いた探索領域の革新
- ◆ ビッグデータ、超高精度測定&時間依存現象
- ◆ 高度波形制御による強磁場熱科学
- ◆ エントロピーによる平衡-非平衡状態の制御
- ◆ 複合的極限環境の利用
- ◆ 複数の極限により未知物質相を探索

他分野と連携した学際的科学の推進

- ◆ 基礎物理学との連携
- ◆ フォトオン探索、真空の複屈折検証
- ◆ プラズマ科学、宇宙科学
- ◆ プラズマ・流体科学、宇宙現象のモデル環境
- ◆ 放射光・中性子等の大型施設との連携
- ◆ 強磁場量子ビーム科学の推進

中小大学等含むネットワーク形成と人材育成

- ◆ 日本の国際競争力復活へ貢献
- ◆ 若手人材育成 強磁場2030年委員会結成



基幹的な材料科学開発と社会実装への貢献

次世代超伝導材料のキーパラメータが25-30 T領域に存在

Nb₃Sn 上部臨界磁場
REBCOの窒素温度での不可逆磁場

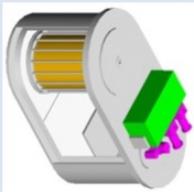
実用化

1.3-2GHz-NMR (30.5T-40T)
次世代加速器: 16TNb₃Sn, 20T-HTS
核融合: 21T-HTS

認証評価

33 T 無冷媒超伝導磁石を
産業界にも開放

社会実装のためには
国として評価認証施設が必要



II-1. 電磁濃縮、一卷きコイルの現状と計画

1. 概要

1) 意義 100 T を大きく超える強磁場は、磁気応力に対するマグネット材の機械的強度限界のため破壊的手法によってのみ得られる。電磁濃縮装置 (300 ~ 1000 T) は、東京大学物性研究所に設置されているものが世界唯一の装置であり、一卷きコイル装置 (100 ~ 300 T) についても同研究所に 2 台が設置されている他にはアメリカとフランスにそれぞれ 1 台ずつが設置されているのみである。これらの破壊型装置で実現できる超強磁場下では、スピンや軌道の量子化分裂エネルギーが室温のエネルギー程度に達するため、基礎科学研究に加えてデバイス応用も視野に入れた物質開発、材料研究に大きく貢献できる。

2) 現状 電磁濃縮装置は、2010 年-2011 年度の文部科学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」により整備され、室内世界最高磁場記録である 1200 T の発生に 2018 年 4 月に成功した。装置は主となる (I) 5 メガジュール (MJ) 電源と、副となる (II) 2 MJ 電源、種磁束発生用の (III) 種磁場 2 MJ 電源、の 3 つからなる。(III) は、(I) または (II) と組み合わせて運転する。5 MJ 装置 [(I)-(III) の組み合わせ] は、世界最高の頂点の磁場領域での研究に用い、1000 T 領域での物性研究が進行中である。一方、2 MJ 装置 [(II)-(III) の組み合わせ] は、開発時のプロトタイプとしての役割を終え、300 ~ 500 T までの研究に用いている。一卷きコイル装置は、電源エネルギーが 200 kJ であり、電磁濃縮装置と比較して小型である。物性研究所の 2000 年の東大柏キャンパスへの移転時に、縦型一卷きコイル、横型一卷きコイルの 2 台の装置が整備され、以降、順調に稼働している。ただし、設置から 19 年が経過しているためエアギャップスイッチなどの特殊構成部品の老朽化への対策が課題である。

2. 応用研究

(1) 電磁濃縮 2000 年に電源の更新が行われており、2010 年の新たな電源整備以前には 700 T までの磁場領域で研究が可能であった。2000 年以降に得られた主要な研究例は以下に示す通りである。

- (a) サイクロトロン共鳴による磁性半導体の電子状態の解明
- (b) カーボンナノチューブの磁気励起子スペクトルに現れる AB 効果の研究
- (c) クロムスピネルフラストレート磁性体の磁場誘起新規相の発見

これらの研究は、赤外から可視領域の磁気光学スペクトルの実験によって実現した。破壊的磁場発生手法では、数百万アンペア、数万ボルトの大電流・高電圧を用いる必要があるため、極めて過酷な電磁ノイズ環境下での測定には、光学的手法が精密測定に最も適しているためである。

(2) 一卷きコイル法 電源の規模および破壊の程度が電磁濃縮に比べて 1/10 程度であり、試料も破壊されないため実験が繰り返し容易に行える。測定技術についても近年大きく発展し、光学測定に加えてピックアップコイルによる直接的な磁化測定や、金属的試料の電気抵抗測定などが可能になっている。これまでに、100 ~ 200 T 領域において最近の主要な研究例を以下に示した。

- (d) 固体酸素の磁場誘起新規結晶の発見
- (e) 直交ダイマー量子スピン系の 1/2 プラトー相観測と交換間相互作用の決定
- (f) カゴメ格子フラストレートスピン系のマグノン結晶化状態の発見
- (g) コバルト酸化物の磁場誘起スピン状態秩序相の発見
- (h) 近藤絶縁体の磁場誘起絶縁体金属転移における近藤効果の解明

3. 運用計画および装置の更新・改良計画

(1) 電磁濃縮の運用

- ・ 5 MJ 装置： 1000 T 級実験の推進。極限的環境における画期的成果を得る。
- ・ 2 MJ 装置： 500 T 級実験の推進。実験準備プロセスを可能な限り簡略化し、一卷きコイルによる 100 T 級実験からの連続的展開研究を行う。

(2) 一卷きコイルの運用

・横型一巻きコイル装置： 磁場発生方向が床面に平行であり、幾何学的実験配置が電磁濃縮法と共通することから、電磁濃縮法の 500 T から 1000 T への研究へとスムーズに移行できる。この長所を活かし、様々な物質における多様な測定手段による研究テーマの開拓、新規測定技術開発のための主要装置として用いる。新規測定技術としては、X 線測定、超音波測定、熱測定などがあり、現在はそれぞれ要素技術開発を行っている段階である。

・縦型一巻きコイル装置： 床面に垂直方向に磁場発生が可能であり、ヘリウムため込み型の冷却装置と組み合わせた、安定した極低温環境に特徴がある。現状は 2 K までの温度を 0.5 K 以下の超低温を可能にし、超低還元温度(高 磁場/温度比-High B/T-環境)下による 100 T 領域における量子振動観測実験などに応用する。

(3) 電源の更新と改良

10~20 年程度の耐用年数と見込まれるギャップスイッチ、高速ヒューズなどの更新、改良を行い、装置の性能維持をはかるとともに、発生磁場の再現性および精度を向上させる。また、固体素子による新しい放電回路の開発を計画する。近年のパワー固体素子の発展によって、火花放電型ギャップスイッチの半導体素子への置き換えが現実的になっている。小型プロトタイプ装置での信頼性の検証などを経て、一巻きコイル装置において既存ギャップスイッチからの置き換えを行う。これにより、物性測定における最大の障害の 1 つであるギャップスイッチからの放電ノイズが無くなり、ほとんど全ての測定において実験結果の精度と信頼性が桁違いに向上する。また、費用と規模の観点から電磁濃縮装置への応用は現時点で考は現実的では無いが将来的な検討事項である。

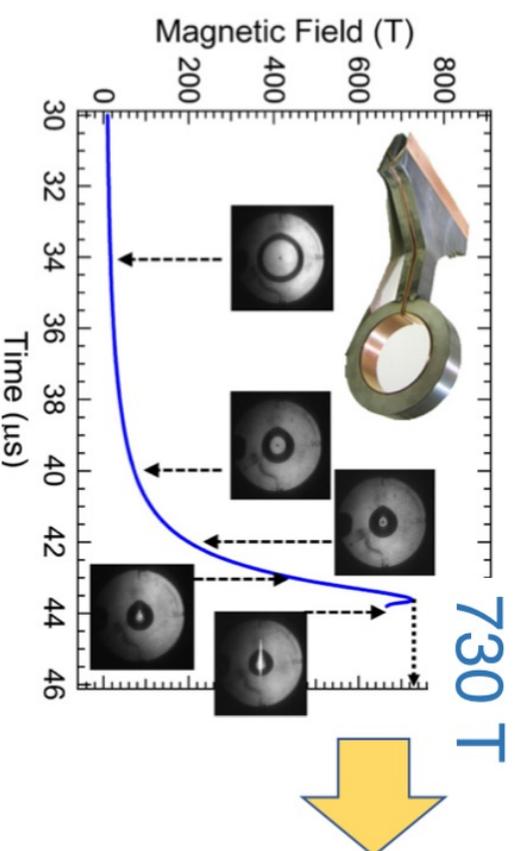
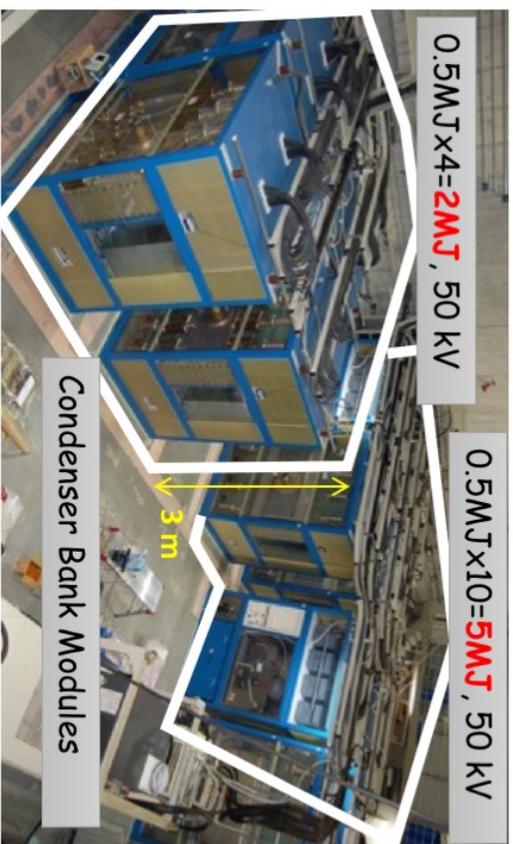
4. まとめ

電磁濃縮法による 1000 T 領域の超強磁場を用いた物性研究は現在日本でのみ可能であり、世界最先端の研究環境である。さらに、500 T 級小型電磁濃縮装置、100 T 級の 2 台の一巻きコイル装置を用いることで、数十テスラの汎用強磁場領域からの連続的な接続が可能となる。100 -1000 T の未踏磁場領域での新たなサイエンス構築のために、これらの装置の持続的な整備・改良が必要であり、また、超低温環境の構築や新しい測定技術開発が、そのさらなる発展のために必須となる。

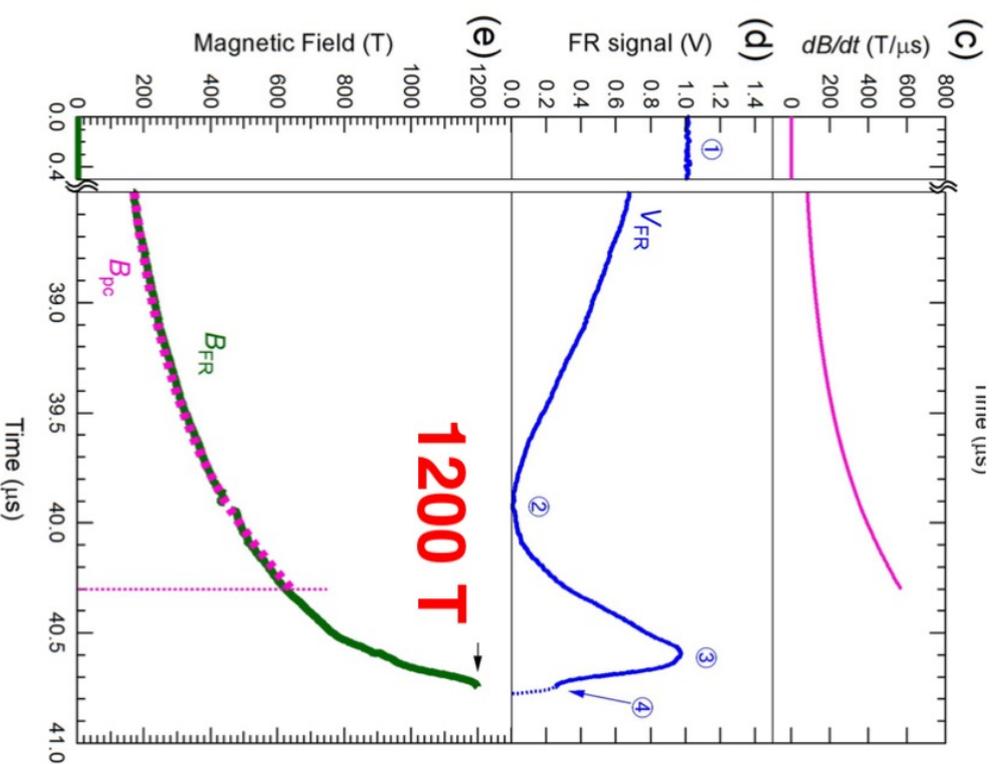
5. 参考文献

- 1) “Record indoor magnetic field of 1200 T generated by electromagnetic flux-compression”, D. Nakamura, A. Ikeda, H. Sawabe, Y. H. Matsuda, S. Takeyama, Review of Scientific Instruments **89**, 095106 1-7 (2018).
- 2) “Research in Super-High Pulsed Magnetic Fields at the Megagauss Laboratory of the University of Tokyo”, N. Miura, T. Osada, and S. Takeyama, Journal of Low Temperature Physics, **133**, 139 (2003).

電磁濃縮装置による未踏1200テスラの達成

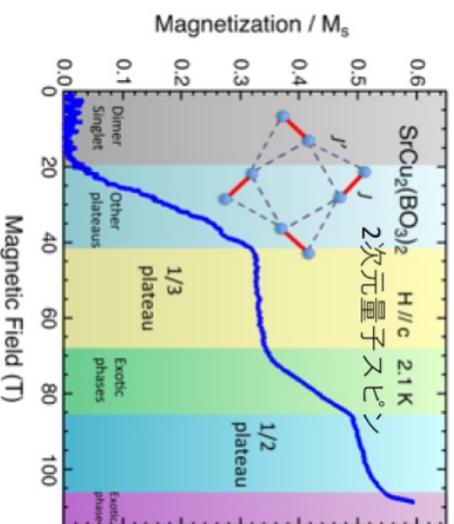


S. Takeyama et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 425003 (2011)



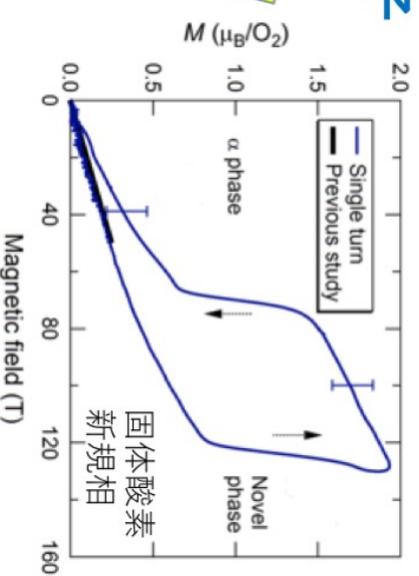
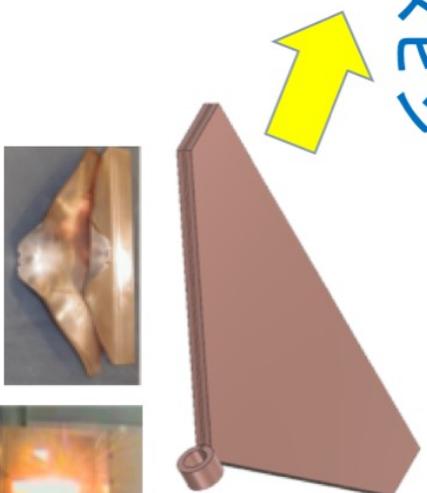
D. Nakamura et al.,
Rev. Sci. Instrum. **89**, 095106 (2018)

一巻きコイル法による強磁場新規相の探索



スピン

分子

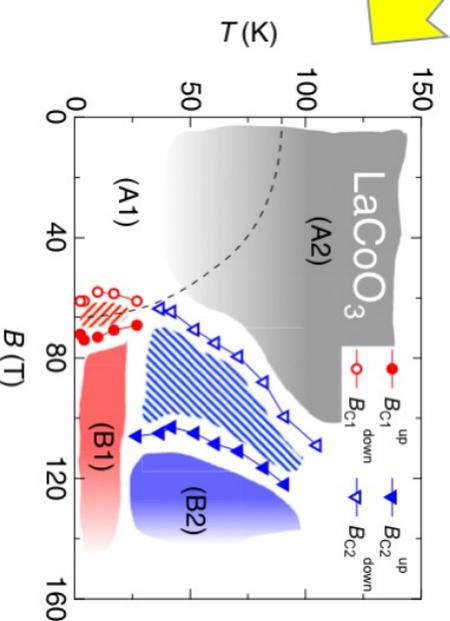
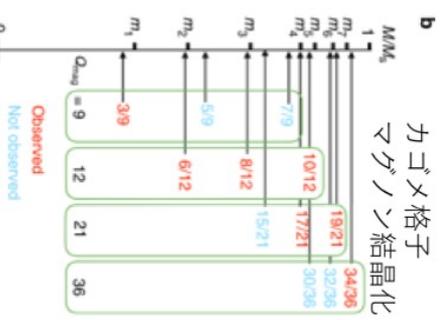
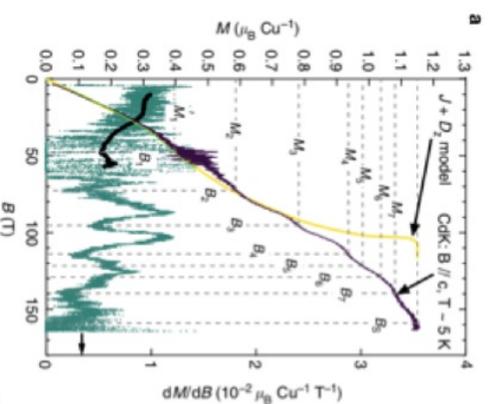


Y. H. Matsuda et al., PRL 111, 137204 (2013)

T. Nomura et al., PRL 112, 247201 (2014)

量子効果

電子相関



R. Okuma et al., Nat. Commun. 10, 1229 (2013)

II-2. 非破壊パルス磁場・準定常強磁場の現状と計画強磁場における磁性研究

1. 概要

非破壊パルス磁場・準定常磁場ではそれぞれ 100 T 及び 60 T までの強磁場を発生できる。これらの特徴は、それぞれ数ミリ秒および数秒という長時間にわたって磁場発生できることであり、これは前述した破壊型パルス磁場よりも 3 桁から 6 桁長い時間スケールである。破壊型パルス磁場と比べて発生磁場は低いものの、『1. 長い磁場発生時間を生かした精密測定』や『2. 測定に時間がかかるゆっくりとした現象の観測』に必須であり、定常磁場で行われるほとんど全ての物性測定手法が利用可能となる。このような測定の利便性から、世界のパルス強磁場施設で最も一般的な磁場発生手法は、非破壊パルス磁場・準定常強磁場に類するものである。パルス磁場の中で最も時間スケールが長く測定が簡単な準定常磁場は、NHMFL(米)、WHMFC(中)がそれぞれ 60 ± 0.2 T、 50 ± 0.2 T の準定常磁場の発生を行ってきた。日本の準定常磁場は、最高磁場は 43.5 T(物性研)とやや低いものの、磁場安定度が ± 0.005 テスラと海外施設よりも 2 桁ほど高く、比熱や NMR などの精密測定が可能である。

本計画では図に示すように、300 MJ スーパーキャパシタ電源を導入することで磁場強度を 60 T に引き上げ、そのうえで高い磁場安定度を保つことで、海外施設よりも精密な研究に適した磁場環境を整備する。また準定常強磁場と非破壊パルス磁場を組み合わせたマルチパルス方式によって、100 T 超の非破壊パルス磁場を発生する。これまでマルチパルス方式によって、NHMFL(米国)では 2012 年に 100 T の非破壊パルス磁場が発生され、これに続いて HLD(独)は 90 T、LNCMI(仏)は 99 T、WHMFC(中)は 91 T の非破壊パルス強磁場が達成された。一方日本では、物性測定が難しくなるマルチパルス方式に頼らない開発が進行しており、86 T (物性研)という非マルチパルス方式では世界最高磁場を記録している。本計画では図に示すように、8 MJ コンデンサ電源を導入し、60 T 準定常磁場と組み合わせることで 100 T を超えるマルチパルス磁場を開発する。ここでマルチパルス方式における物性測定の困難については、従来の非マルチパルス方式と組み合わせることで解決を目指す。

2. なぜ非破壊パルス磁場・準定常強磁場が必用か

非破壊パルス磁場・準定常強磁場は、磁気光学や磁化測定のみならず、電気抵抗や分極測定、そして熱測定や NMR、ESR に加え、X 線および中性子散乱など多種多様な測定手法が利用できる。また装置が磁場発生により壊れない為に極めてクリーンであること、磁石のカスタマイズも容易で 50 T 程度であれば比較的低コストで整備出来るというメリットを有している。これにより、SPRING8 や J-PARC など他の大型施設と組み合わせた研究が容易であり、事実かなりの研究が進行中である。他にも圧力セルを組み合わせた、強磁場、高圧、低温の多重極限環境における物性物理なども大阪大学を中心に進んでいる。このように多くの研究手法が利用できる為に、対象となる研究分野は非常に幅広い。このため非破壊パルス磁場・準定常強磁場の更なる整備は多くの研究者に広く望まれている。

3. 非破壊パルス磁場・準定常強磁場領域における研究の現状と応用が期待される研究分野

測定手法が多くカスタマイズされた磁場を発生できるため、研究分野は多岐にわたる。物性物理では、量子スピン系、マルチフェロイック物質、重い電子化合物などの金属間化合物、ディラック・ワイル半金属、2次元電子系やスピントロニクスなどが対象となる。素粒子物理学への応用も進んでいる¹⁾。

1) 量子スピン系では、磁化の量子化、フラストレーションの制御、スピン液晶などのトピックスが存在する。これらは非破壊パルス磁場・準定常磁場の更新により、より深い研究が進行する。例えば CdCr_2O_4 は古くから破壊型磁場を用いて磁化過程が調べられており、90 T 程度で磁化の飽和が起こる。この磁化が飽和手前の極めて強い磁場領域では、スピン液晶を始めとする新奇相が予想されるが、測定手法が限りある破壊型磁場のみではその同定は困難であった。100 T にせまる非破壊パルス磁場・準定常強磁場による熱測定や NMR、中性子散乱などの多彩な超精密測定が必須であり、これらによりフラストレーションにより引き起こされる物理の解明が期待される。

2) 超伝導体などの強相関係は強磁場で多くの未解明の現象が存在している。最近だと、単相 FeSe 膜や MoS₂ などの電界誘起超伝導などは、良いターゲットである。単相 FeSe 膜は 100 K を超える高い超伝導転移温度を持つため多くの注目を集めており、同様に 2 次元の超伝導体である電界誘起超伝導もその臨界磁場の挙動が興味深い[2]。このような物質群は、臨界磁場付近の強磁場領域では例えば FFL0 などの特異な相が現れたり、2 次元性に起因する大きな熱電効果が期待できる。このような物質群に、強磁場でのゼーベックやネルンスト係数の測定を組み合わせることで、その高い超伝導温度の起源に迫ることができ、応用で問題になっている廃熱の効率的回収にも繋がる知見が得られると期待できる。

3) ディラック・ワイル半金属は、磁気抵抗およびホール抵抗測定およびテラヘルツ分光を中心とした強磁場科学の展開が見込まれる。これらの物質はディラック型のバンド構造により極めて電子が動きやすく、通常の物質より大きなサイクロトロンエネルギーを獲得する。このため磁場効果が大きく、通常の金属では観測できない量子極限までの物理が解明できる。またディラック・ワイル半金属はゼーベック素子として有名な Bi₂Te₃ などが存在しており、一般社会への波及効果も大いに期待できる。

3 非破壊パルス磁場・準定常強磁場の将来構想—研究課題

非破壊パルス磁場の現状として、海外強磁場で主流となっているマルチパルス手法を取り入れず、90 T 近くの使いやすい強磁場を発生しているのは特筆すべきである。本計画で 8MJ コンデンサ電源を導入し、マルチパルス手法を適用することで磁場強度でも海外施設を凌ぐ『100 T 超級非破壊パルス磁場環境』を確立する。準定常強磁場は現状でも、パルス磁場の安定度は海外強磁場施設を大きく上回っている。電気二重層キャパシタを使った高エネルギー電源を整備することで、世界最高の磁場安定度を誇る『60 T 準定常強磁場』を発生することを目標とした。これらの 2 つのパルス磁場を重点整備していくことで、この 100 T までの磁場領域で更なる研究の広がりが期待できよう。前述した量子スピン、強相関係、ディラック・ワイル系のみならず、対象となる研究分野は列挙するといとまがない。これらの研究分野にあった、熱測定、NMR、テラヘルツ分光に加え、Spring8 や J-PARC などとも連携しつつ X 線および中性子散乱実験も整備していくことを将来構想としている。

4 まとめ

非破壊パルス磁場・準定常強磁場は国際的な競争が厳しいが、資金と人材が潤沢な海外強磁場施設と互角に渡り合っている。測定技術に寄り添ったパルス磁場を保持しているというアドバンテージを最大限に活用しつつ、多くの測定技術を育てていく。これに日本の得意とする多彩な測定サンプル、および対象となる系を適応させることで、極めて広い研究領域でさらなる成果が期待できる。

5 参考文献

- 1) T. Inada *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **118** 071803(1-6) (2017).
- 2) Y. Saito *et al.*, *Nature Phys.* **12** 144-150 (2015).

非破壊パルス磁場・準定常強磁場の現状と計画

準定常強磁場; 超安定磁場で60テスラを達成。超精密物性測定で物質科学を推進。
非破壊パルス磁場; 準定常磁場と組み合わせ、非破壊100テスラ達成

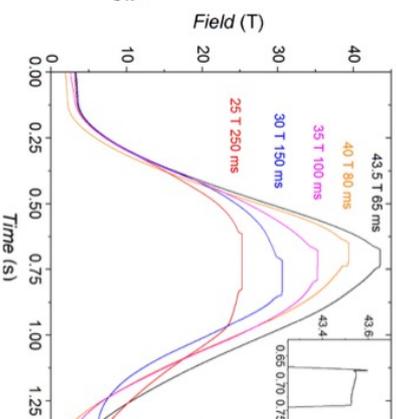


電源を300MJスーパーキャパシター化

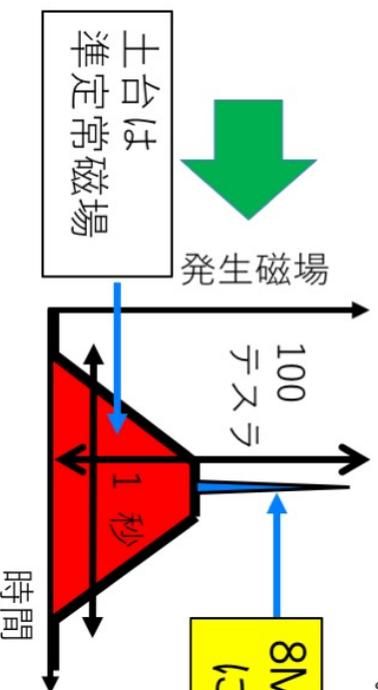


準定常磁場を60テスラにアップ
比熱、伝導、NMR、分光等
国際共同研究を推進

フライホイール付き直流発電機
(210MJ: 世界最大、現電源)



8MJコンデンサ電源導入
によりパルス磁場を重
畳



土台は
準定常磁場

非破壊100テスラ達成と精密測定

準定常強磁場電源の更新
によりパルス持続時間と
発生磁場の両方で先進的
なパルス強磁場利用が可
能となり、強磁場物性測
定で世界をリードする

II-3. 定常強磁場施設の現状と計画

1. 日本の定常強磁場の概要

世界的には、2000年にアメリカの強磁場研究所（NHMFL）が11T大口径超伝導磁石と30MW-34T大電力水冷銅磁石を組み合わせたハイブリッド磁石で45Tの世界記録を達成して以来、現在まで他の追従を許していない。世界的には、フランス、オランダ、中国で20MWの電源・冷却設備の導入が計画され、各国とも約10Tの大口径超伝導磁石と組み合わせたハイブリッド磁石の建設が行われ、大電力を用いた40T以上の定常強磁場が世界中のトレンドとなりつつある。中国ではすでに40Tの磁場発生に成功し、フランス、オランダも近く完成の予定である。一方で、電気料金の高い日本においては、1980年代に建設した8MWの電源・冷却設備を活用した東北大金研の30Tハイブリッド磁石と、その後、物材機構に建設された15MWの35Tハイブリッド磁石の2ヶ所で定常強磁場を担ってきたが、2019年度より物材機構の強磁場磁石は運転を停止したことにより、現在は東北大金研が日本唯一の定常強磁場施設となっている。東北大金研は、発足当初から超伝導材料開発に力を入れてきた経緯があり、1992年から液体ヘリウムを用いない無冷媒超伝導磁石の開発を精力的に実施し、その発生磁場の世界記録を更新してきた。

2016年には $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 高温超伝導コイルを用いた25T無冷媒超伝導磁石の開発に成功し、高温超伝導を用いた強磁場磁石の共同利用を世界に先駆けて実施しており、2018年には無冷媒超伝導磁石のメリットを生かして年間250日の運転実績を有する。上記のように現時点では世界的には、大電力を用いた40Tを超える定常強磁場磁石開発が主流であるが、高温超伝導材料の市販と磁石技術の発展により、オール超伝導で30T以上の強磁場磁石開発への転換が模索されており、技術的には可能になりつつある。この中で、超伝導材料技術と無冷媒超伝導磁石技術において優位な東北大金研は、将来的には超伝導磁石単体での50Tの定常強磁場を狙える位置にある。これは、ゲームのルール、あるいは、パラダイムシフトによる変革であり、これを主導できるかどうかで、世界の定常強磁場施設の次世代の覇権が決定する時期にあるという認識に基づいて、施設の将来構想を構築することが必要である。

2. 金属材料研究所の強磁場設備

金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターでは、現在25T無冷媒超伝導磁石を筆頭に8台の無冷媒超伝導磁石、3台の超伝導磁石、無冷媒ハイブリッド磁石と通常のハイブリッド磁石が運転されており、水冷磁石の電力は8MW、最高磁場は31Tとなっている。運営面では、運転経費で制約されているハイブリッド磁石を除けば、ほぼフル稼働状態であり、2019年度の共同利用課題数は120件を越えている。

25T無冷媒超伝導磁石は、現在ユーザー利用が可能な超伝導磁石としては、世界最高磁場を有している。その最大の特徴は、液体ヘリウムの補給を必要とせず長時間運転が可能な点にある。25Tの強磁場を提供出来る時間で考えた場合、ハイブリッド磁石に比べて約2桁の利用時間をユーザーに供与可能であり、1日1度はヘリウムを補給するために磁場を下げなければならない通常の超伝導磁石と比べて、数日から数十日の連続運転が可能で、ヘリウム補給のための停止がない事などは大きな利点である。運用コストについては、冷凍機の圧縮機の定期的なメンテナンスと冷凍機を24時間連続運転する電力を考慮してもハイブリッド磁石に比べて1/10以下となっており、限られた予算の中で運用が可能な点も大きな利点である。現在の25T無冷媒超伝導磁石室温で50mmの内径を有しており、He温度では最大44mmの空間を確保することが可能である。コイルは、金属系の超伝導体を用いた14Tの外コイルとビスマス系高温超伝導材料 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Bi2223)を用いた11Tの内コイルからなっており、合計で25Tを発生する。

3. 強磁場コラボラトリーの目指すサイエンス

これらの定常強磁場を用いた研究として以下のような研究課題が期待されている。

1) 超伝導材料研究

高温超伝導線材の超伝導特性を理解することは応用的に重要な研究課題であるだけでなく、基礎的な超伝導現象の理解としても引き続き中心的な学術課題である。例えば、鉄系超伝導材料を含めた高温超伝導材料の基礎的な物性の探究、さらには、実用的な線材として利用する際に鍵となる臨界電流を決定する機構である磁束ピンニング機構と、そのひずみ特性を解明を実施する必要

がある。

2) 応用超伝導研究

高温超伝導材料は、金属系の材料から、酸化物系の材料の本格利用への過渡期にある。酸化物材料としては、30T を超える強磁場まで高い臨界電流を示す希土類系高温超伝導材料 REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE は希土類元素)、ビスマス系高温超伝導材料 Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y (Bi2223)及び Bi₂Sr₂CaCu₂O_y (Bi2212)が市販されるようになり、世界中で高温超伝導材料を用いた応用超伝導機器開発が実施されている。これらは、エネルギーや医療分野での応用も期待されており、重要な研究課題である

3) 物質科学研究

物性物理学を始めとした物質科学分野では、トポロジカル超伝導や単層膜における2次元超伝導など、相対論効果を取り入れた電子論の構築が非常に重要な課題となっており、精度が高い強磁場下の輸送現象の測定が引き続き重要な課題である。また、マヨロナ粒子の探索なども引き続き活発な研究分野である。磁性分野では、マルチフェロイックに代表されるように、対称性や異なる自由度の結合を利用した、物質の新機能の開拓が探求されており、これらは高速通信や情報処理を支える機構として期待されている。また、強相関電子系においては、アクチノイド化合物における磁場誘起超伝導など、新奇超伝導の発見と機構解明が探求されており、アクチノイドの計測が可能になったことを生かして盛んに研究が行われている。

5) 材料科学研究

材料科学においては、多機能性材料の開発に加えて、引き続き磁性材料の開発が重要な課題となっている。磁石の保持力を向上させる研究やエネルギー変換効率において重要な軟磁性材料の開発においては、磁場中の熱処理、磁場による拡散の制御、粒界における磁性の解明や強磁場中における相図の質的变化を利用した結晶成長、無重力状態の利用、配向効果などの利用、超伝導バルク磁石の開発等が行われており、長時間安定した磁場を発生出来る無冷媒超伝導磁石の有用性が、これらの研究を支えている。

6) 学際分野の研究

これらに加えて、化学や基礎科学などの学際的な研究も推進されており、これまで利用出来る磁場や利用時間の制約からブレークスルーを得る事が難しかった研究において、大きな進展が期待されている。

4. 超伝導磁石の更新計画

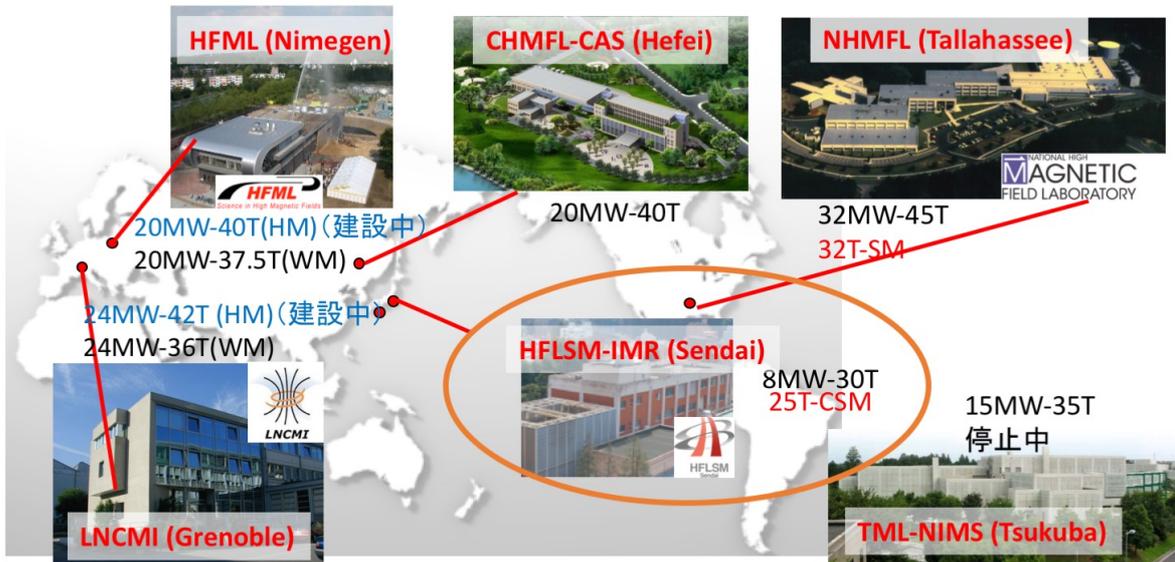
25 T 無冷媒超伝導磁石の成功を受けて、強磁場化が計画されている。1つめは、現状の25 T 磁石の内層コイルをビスマス系からイットリウム系に変更する事で、30 T 以上を発生させる計画であり、これが実現すると、速い掃引が必要な実験以外のハイブリッド磁石利用実験を、超伝導磁石を利用して行う事が可能となる。さらには、30 T を利用出来る時間が2桁増えるため、利用者にとってはそのメリットは計り知れない。その予算としては約3億円を想定している。

2つめの計画は、2台目の33 T 無冷媒超伝導磁石の導入である。2台目の無冷媒超伝導磁石超伝導磁石においては、将来的な50 T 級へのアップグレードを視野に入れて、外層コイルの設計含めてさらに高度な設計とする。必要経費としては16億円を想定しており、既に科研費等で、コイルモジュールの実証試験などを目指した開発を進めている。2台目の導入効果として、ユーザーの利用時間が増える事に加えて、冷凍機のメンテナンスによる停止期間を無くすこと、極めて長時間の利用が必要な課題と、一般の利用課題を両立させた施設運営が可能なが挙げられる。

5. 大電力磁石のエネルギー制御技術の開発

大電力水冷磁石等は、磁場掃引を必要とする実験では効率的に実験を行えるメリットがある。この特徴を生かしつつ、運用経費を下げるためには、エネルギーの利用効率を高めるための蓄電設備、新しい材料の開発などを引き続き行う事が必要である。また、無冷媒ハイブリッド磁石の外層コイル等は大口径の強磁場環境として、様々な評価試験等に利用出来るため、引き続き合理的な運用を行う事が期待されている。

世界の定常強磁場施設の動向



大電力による高磁場磁石開発から超伝導へのシフト。

米国：3種類の高温度超伝導磁石開発計画RE123をもちいら32Tは完了

仏国：30-40T高温超伝導超伝導磁石計画進行中

韓国：無絶縁高温超伝導で30T超をねらう

日本：東北大24.6T無冷媒，物材機構24T-NMRに成功，
理研30.5T-NMR永久電流磁石プロジェクト開始

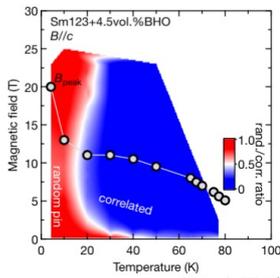
世界のハイブリッド磁石

場所	磁場(T)	バックアップ 磁場(T)	電力 (MW)	口径 (mm)	備考
東北大金研	31	12	8	32	液体ヘリウム 無冷媒
	28	9	8	32	
物材機構	37	15	15	32	液体ヘリウム
NHMFL (米国)	45	11.7	30	32	液体ヘリウム 高精度
	36	14	14	40	
ナイメーヘン(蘭 国)	44	11	25	32	液体ヘリウム
グルノーブル(仏 国)	43	8.5	22.5	34	液体ヘリウム
合肥(中国)	40	11	28	32	液体ヘリウム

赤：建設中

25T-CSMを用いた成果例

高温超伝導材料の特性向上の実証



名大吉田グループ

Tsuchiya et al, Supercond. Sci. Technol., 30 (2017) 10400.

Miura et al, Supercond. Sci. Technol., 30(2017)084009

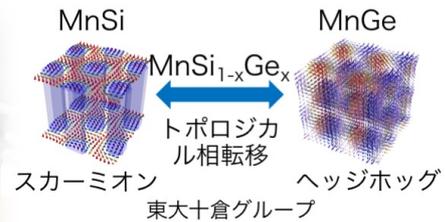
複合極限強条件による磁性体研究 海外からも利用応募



ドイツ Dresden 研究所



新トポロジカル物質の創成

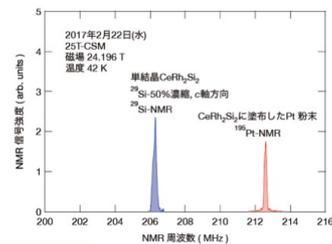


Fujishiro et al, Nature Communications, 9 (2018) 408.
プレスリリース「磁気構造のトポロジーを用いた熱から電気への高効率変換技術—固体中の磁気モノポールのゆらぎが生み出す巨大熱電効果—」



共同利用課題件数20%増大

高精度NMR実験



原研 酒井グループ

25Tの技術開発実績を生かして30Tへ

日本の定常強磁場戦略

無冷媒超伝導磁石技術

- ・ 利用時間がハイブリッド磁石の100倍, 維持費は1/10
- ・ 超高品質の磁場発生が長時間可能

日本の世界最先端高温超伝導材料
優れた超伝導磁石技術をもつ企業が存在

高温超伝導材料

(株)フジクラ, 古河電工SuperPower, 住友電工 (株)

高温超伝導マグネット技術

(株)東芝, JASTEC, 三菱, 日立

大規模電力磁石の次は高温超伝導磁石が中心となる

世界の現状

米国では32T超伝導磁石開発が完成

韓国・欧州でも高温超伝導磁石開発が進行

東北大では2-3年で30T無冷媒磁石を実現する

Phase I : 30T無冷媒超伝導磁石

Phase II : 超30T無冷媒超伝導磁石

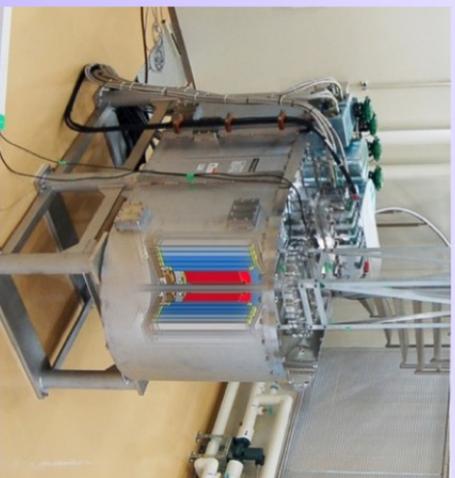
超30T無冷媒超伝導磁石計画

実績

現状

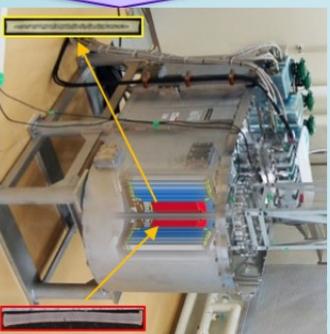
計画

世界最高の25T無冷媒超伝導磁石



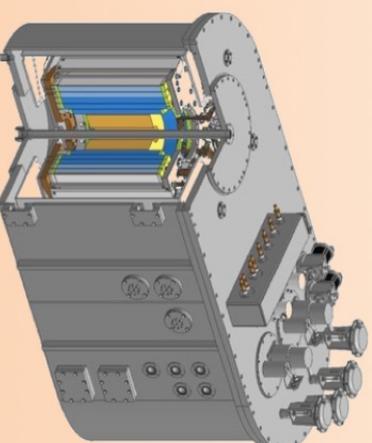
- 開発してきた高強度Nb₃Snと関連技術及び高温超伝導技術を集約して52mmの室温空間に24.6Tの磁場発生に成功。
- 運用中の実用超伝導磁石では世界一。高強度B系高温超伝導コイルを世界で初めて実用化。
- すでに2年以上、4500以上の共同利用1週間以上の磁場保持、高精度測定、NMR実験などの多数の実験に利用され、多くの成果が出ている。

30T無冷媒超伝導磁石へアップグレード（共同利用拠点整備, 科研費）



- 希土類系高温超伝導内層磁石の実証
- 超30T無冷媒超伝導磁石に向けた技術開発

33T無冷媒超伝導磁石開発（強磁場コラボラトリー計画）



- 25Tの技術を発展させて33Tを狙う。40T以上の強磁場磁石へ展開。
- 30T-HMを置き換えて、25T、20Tと共に金研強磁場センターの中核を担う。

II-4. 学際分野における強磁場環境の現状と将来構想

1 学際分野と強磁場環境

学際的研究の推進は、研究のフロンティアを広げる上で、今日ではあらゆる研究領域で必須となっており、強磁場関連分野でも既存の物質・材料科学を越えた研究が広がっている。強磁場コラボラトリーの形成は、このような学際的な研究の創生を容易にするとともに、単発的で点的な研究から、様々な分野の専門家が多面的に協力する広がりをもつ研究へと加速する効果を持つ。現在進められている学際的な研究としては 1) 化学や生物など従来の物性物理学・材料科学を越えた磁場効果に関する研究、2) 素粒子探索など基礎科学分野における強磁場利用研究、3) 強磁場施設と量子ビーム施設の連携など、異なる分野の大型施設の連携による研究、4) 強磁場施設外で使用出来る強磁場デバイスの開発とそれを応用した研究などに分けられる。

2 強磁場利用学際研究の現状

1) 化学や生物分野の磁場効果に関する研究

これらの研究の先例としては、シリコンの結晶成長における強磁場利用が既に産業利用として確立しているが、磁場により物質の流れや配向を制御することで新しい形質や反応を誘導する研究が行われており、磁場中結晶成長による核生成の制御、磁場配向技術を駆使した微少結晶試料の配向と利用、磁場による疑似無重力状態を利用した結晶成長や形態制御、磁場によるキラリティの誘導、化学反応の磁場効果などがある。

2) 粒子探索など基礎科学分野における強磁場利用研究

基礎科学分野では、(1) 素粒子検出器における強磁場が応用された例として、ヒッグス粒子の探索において、日本のメーカーにより開発された粒子の透過率が高い特殊な超伝導磁石が必須の貢献を果たした例が知られている。また、(2) 真空の性質を調べるための強磁場下の真空複屈折の精密測定がフランスや日本で実施され、(3) 宇宙の大半を占める暗黒物質の起源を探るためのアクシオン等の未知粒子の検出がアメリカ、ヨーロッパ、日本で進められている。また、フランスの強磁場施設では、天体等における粒子の流れのモデリングが強磁場を利用して研究した事例がある。

3) 強磁場施設と量子ビーム施設の連携

強磁場関連研究として、強磁場施設外において市販の強磁場装置で発生可能な十数テスラの磁場を越えた研究が近年推進されている。具体例として、ベルリンのヘルムホルツ研究所の原子炉施設への 26 T ハイブリッド磁石の導入がアメリカ国立強磁場研究所の協力により行われ、数年間成功裏に運用後 2019 年末の原子炉閉鎖により廃止の予定である。パルス磁場の利用としては、東北大を中心に J-PARC において 40 T までの中性子回折が実施され、また、小型のパルス強磁場装置の導入がオークリッジの SNS、フランスの ILL、イギリスの ISIS で行われ、30-40 T 領域の中性子回折が実施されている。放射光における強磁場利用研究としては、小型や中型のパルス磁場を用いた X 線回折実験が SPring8 や PF で行われ、磁場誘起相転移における構造変化が研究され、また、軟 X 線を利用した XMCD 分光が SPring8 の BL25SU で行われている。海外では、APS で X 線回折が、ESRF で XMCD や X 線分光が行われ、パルス磁場を利用した放射光実験は、実用的な研究として定着している。最近、数十 fs の強力な X 線を生成する X 線自由電子レーザーを単発のパルス磁場と組み合わせた研究が急速に発展しつつあり、従来の放射光実験では困難であった微弱な超格子反射の測定や発光分光などが可能になってきた。現在、LCLS、SALCA、SwissFEL で 30-50 T 領域での実験が行われ EuropeanXFEL でも同様の計画が進行中である。

4) 強磁場施設外で使用出来る強磁場デバイスの開発と応用研究

強磁場施設外における強磁場関連研究の普及には、無冷媒超伝導磁石と小型パルス磁場装置の普及が大きな役割を果たしているが、この他に、高温超伝導体を利用したバルク磁石により、数テスラから十数テスラの強磁場を利用するデバイスの開発が進められており、可換型の NMR 分析装置や放射光非弾性散乱への応用が行われている。また、テーブルトップ型のパルス磁場を用いたテラヘルツ分光等がライス大学やマンチェスター大学で行われている。

3. 学際分野における強磁場環境整備の将来構想

1) 無冷媒超伝導磁石を利用した化学や生物分野の磁場効果に関する研究

無冷媒超伝導磁石は、室温かつ大口径の強磁場環境を長時間安定的に提供出来る事から、化学や生物分野の利用に適している。この分野の研究を進めるためには、その場観察を始めとして、強磁場中における観測手法の高度化や熱分析などの材料計測手法が必用であり、また、これらの手法がだれでも利用出来るようなモジュラー化と標準化が求められる。強磁場コラボラトリーの下で、これらの分野の研究を行う体制を整え、磁気科学会等とも連携して、分野外の研究者が参入し易くすることが期待される。

2) パルス磁場を利用した化学反応の磁場効果に関する研究

化学反応等の磁場効果においては、より強い磁場を利用出来るパルス磁場は有効である。このために、室温で利用可能なパルス磁場を構築し、さらに、分光測定装置などの計測系の整備を行う。大量生産を前提としない希少物質の合成などでは、パルス磁場であっても実用性が期待される。

3) 基礎物理学分野

新粒子の探索や宇宙天文研究への応用などを推進する。これらの研究においては、数百日連続で磁場発生が可能な無冷媒超伝導磁石、小型で強磁場が得られるパルス強磁場装置に加えて、配置の自由度が大きい超伝導バルク磁石などを、それぞれの目的に即して最適化して用いる事が必用である。強磁場コラボラトリーでは、基礎物理学分野の研究者と強磁場関連研究者の連携を支援し、施設を利用した立ち上げ、装置開発、計測等を継続的に支援する。

4) 量子ビーム分野

X線分野では、パルス磁場の利用の普及と高度化を推進する。特に、X線自由電子レーザーは瞬時強度が高いため、長時間のデータ積算を必用とせず、単発ベースのパルス磁場との親和性が高いため、今後躍動的な研究の進展が期待される。放射光実験においては、はエネルギー分散型の測定など、測定の効率化を推進する。中性子回折においては、検出器の効率化とビーム強度の増強を通して、パルス磁場下の回折実験の効率を高める。磁場強度については、多段パルス磁場の利用により、従来40 T領域から60-70 T領域まで磁場範囲を広げ、自由電子レーザーでは小型の一巻きコイル装置を用いた100 T超の環境も開発する。ビーム強度の制約が大きな中性子非弾性散乱等では、20 Tを越える装置が2020年以降なくなる現状を打破するために、東北大学金属材料研究所が開発した25-30 T級の無冷媒超伝導磁石の導入計画を推進する。

5) 磁場施設外で使用出来る強磁場デバイスの開発と応用研究

小型パルス磁場装置の普及を進め、強磁場施設外で行われる強磁場利用研究の磁場範囲を30 T級まで広げることで、広範な分野での利用を拡大する。超伝導バルク磁石の開発を進めることで、通常の装置に数テスラの強磁場環境を組み込む手法を確立する。金属に比べて電流密度が格段に高く取れる高温超伝導材料を利用して、超小型で装置組み込みが可能な10テスラ級の超伝導磁石を開発し、応用研究を推進する。

4. まとめ

これらの学際的な強磁場研究の発展のためには、施設における強磁場利用時間を増大させ、利用者が研究に必要な装置を持ち込みやすくする環境整備などが求められる。また、課題の特性にあって、利用時間の配分や成果との関連づけ、施設としての長期的な課題としての扱いなど、研究マネジメントにおいても工夫が求められる。その一方、強磁場施設では実験出来ない実験に取り組みやすくするためには、メンテナンスが容易な無冷媒超伝導磁石の導入での協力、共用の強磁場施設の整備と利用方法の確立、小型のパルス磁場発生装置や超伝導バルク磁石の開発などを総合的に進める必要がある。また、磁場発生技術、計測技術、関連技術等に優れた研究グループや機関との連携体制の構築も重要な課題である。

物質フロンティアを拓く学際強磁場科学—材料 宇宙 生命へ

材料科学

強磁場コラポラトリーは、
物質・材料分野を越えて
学際研究のフロンティアを開拓

疑似無重力下の物質合成
強磁場相平衡制御



施設外の実験を容易に
共用強磁場装置:

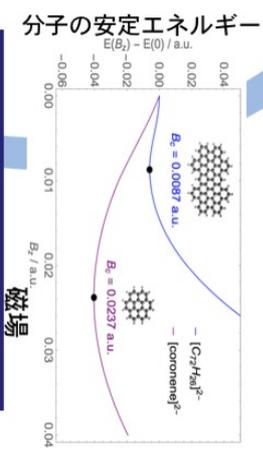


無冷媒超伝導磁石
普及の推進



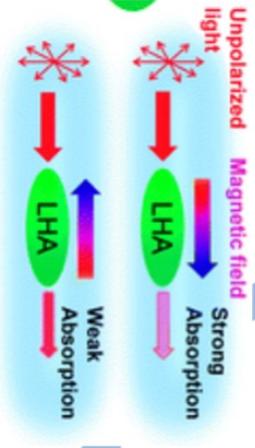
化学

分子の磁場乖離
分子形状の磁場制御



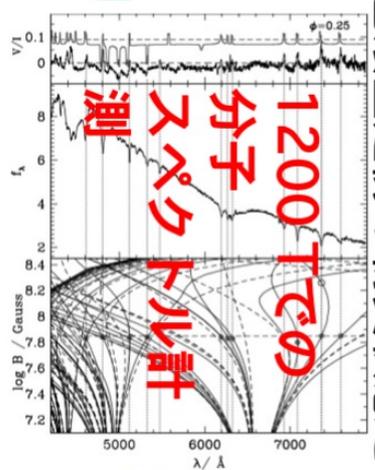
生物学

生命のキラルの起源説明



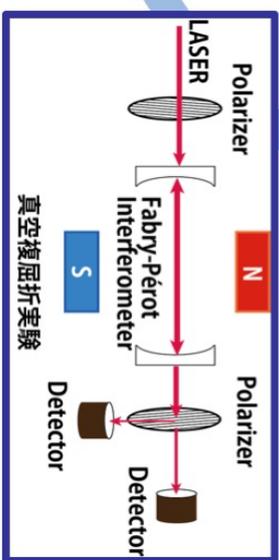
白色矮星近傍の物質状態を再現

宇宙科学



基礎物理学

超強磁場で真空を偏極
宇宙の隠れた質量の探索



III-1. 磁性研究

1 研究の意義と位置付け

物質の磁氣的性質-磁性-に関する研究対象は、スピンの集団で示す協同現象である相転移、スピン演算子の非可換性が顕在化する量子効果、マグノン・ソリトン・ボルテックス等のスピンドYNAMIXミックスなど、ここで主に取り上げる局在スピン系に限っても多岐にわたる。さらに近年では、スピンと結晶格子、軌道自由度、電荷自由度との結合による新奇物性が注目されている。Zeeman 相互作用を通じて電子のスピン角運動量と軌道角運動量に直接作用する強磁場は、磁性研究に不可欠な外場である。このため、磁性は強磁場を利用した凝縮系の研究対象として最も基本的な課題の1つである。

強磁場の効果としては、1) スピンの偏極を制御し、安定なスピン構造間の相転移を引き起こし、また、スピンと結合した格子、軌道、電荷自由度などの多重制御を可能にする、2) 熱揺らぎのない絶対零度に近い条件下で物質相を制御することが可能で、量子揺らぎが主役を演じる様々な量子相転移を発現させる、3) Zeeman エネルギーを物質内の磁気相互作用に拮抗させ隠れた性質や秩序を引き出す、等があり、磁性研究に極めて有効である。

1980年代から強磁場を用いた基礎的な磁性研究の対象となって来たのは、低次元量子スピン系とフラストレート磁性体である。80年代から90年代にかけてハルデン予想に端を発した次元反強磁性体の研究は、特にスピン量子数の小さな $S = 1/2$ や 1 の系において精力的に行われ、ハルデンギャップの存在を決定づけたモデル物質 NENP の磁化測定は、強磁場の重要性を多くの磁性研究者に認識させ、ノーベル物理学賞に繋がった。一方、フラストレート系では基底状態の非自明な縮退が、強磁場中で熱揺らぎや量子揺らぎまたは格子との結合によって解けることによる特異な磁場誘起相転移が三角格子反強磁性体やパイロクロア格子反強磁性体で観測されてきた。さらに量子スピンダイマーが直交して配列する $\text{SrCu}(\text{BO}_3)_2$ では、量子揺らぎと幾何学的フラストレーションが相まって、強磁場中でトリプレットが結晶化する逐次量子相転移が観測されている。さらには、実験手法の進歩の寄与も大きく、強磁場磁化、X線・中性子回折、比熱、ESR、NMRなどの多彩な測定技術の開発・精密化がこれら相転移の解明に大きく寄与している。

もう一つの研究の方向として、 TbMnO_3 で観測された磁場誘起による電気分極の 90° フロップが世界規模での研究の契機となったマルチフェロイック物質も強磁場の重要な研究対象である。電気-磁気-弾性の交差相関による新たな物性機能が、強磁場によって引き出されることが期待されている。その他、ホイスラー合金等の機能性金属間化合物、メタ磁性転移を示す金属磁性体、スピントロニクスなど強磁場が対象とする磁性研究の範囲は広い。

2 研究の現状と事例

- 1) 量子スピン系、フラストレート系では、強磁場中での磁化の量子化によるプラトートの発現や、フラストレーションの磁場制御による量子相転移が研究されている。その観測にはスピン間の交換相互作用エネルギーに匹敵する強磁場が必要である。電磁濃縮法による 600 T の磁場によるクロムスピネル酸化物 ZnCr_2O_4 の磁化プラトートを含む全磁化過程の観測はその顕著な例である¹⁾。近年、フラストレート系で特に注目されるのは、その飽和磁場直前に予想されるスピン液晶相である。一種の隠れた秩序相であるスピン液晶相は、通常磁気双極子の秩序とは異なる二体のスピンからなる四極子を秩序変数とする。さらに高次の磁気多極子による秩序も理論的に提案されている。有力な候補物質である擬次元フラストレート系 LiCuVO_4 では 40 T 以上の磁場領域でスピン液晶相の発現が期待されている²⁾。その実証には詳細な熱物性測定やNMRなどを行うための準定常強磁場が必要である。またフラストレート系では、磁場と併せて高圧を印加することにより現れる量子相はさらに多彩になる。この複合極限のためには定常磁場が必要であり、実際、 25 T の定常強磁場、 1.5 GPa の高圧下で三角格子反強磁性体 Cs_2CuCl_4 の新たな量子相が発見されている³⁾。
- 2) 磁気秩序と強誘電が共存したマルチフェロイック物質では、時間反転と空間反転対称性の破れに伴って様々な機能が発現する。磁場による電気分極の制御を実現する電気磁気効果は、強磁場が適用される一例である。最近では、磁気四極子による電気磁気効果が 60 T の強磁場下での電気分極測定から実証された⁴⁾。さらに、マルチフェロイック物質の機能は静的な電気磁気

効果に止まらず、光やマグノン、フォノンなどの伝搬特性がその進行方向の反転で変化する非相反応答が現れる。磁氣的基底状態を制御して、この非相反応答を巨大化するためには強磁場が必要である。

- 3) 結晶にカイラリティーを持つ磁性体に着目した研究も近年、盛んである。結晶カイラリティーに由来して、一次元系のカイラルソリトン格子⁵⁾、二次元系のスキルミオン格子⁶⁾、三次元系のホップフィオン格子⁷⁾と呼ばれるトポロジカルな構造を持つ磁気状態が現れる。これらの多くはベースとなるのが強磁性体であることから、従来、強磁場科学の対象にはなりにくかったが、最近では反強磁性相互作用をベースにしたカイラル磁性体も合成されるようになり、強磁場の必要性が生じつつある。また、もともと空間反転対称性を持たないカイラルな磁性体に強磁場を加えることにより時間反転対称性も破り、非相反応答を観測する試みも行われている。
- 4) エネルギー利用、特に交通に関わる部分の主流が電気に移行する事に対応して、運動と電気の変換に利用される永久磁石、軟磁性材料、磁気冷凍材料、マルテンサイト材料などの開発の推進が期待されており、強磁場を用いた精密な物性評価、材料特性の改善などに関わる研究が行われている。
- 5) 情報処理や量子情報の分野では、スピンという量子的な量とハミルトニアンレベルで直接共役な磁場の性質を利用した研究が期待されており、スピントロニクス、各種のパルス磁気共鳴を利用した量子スピン操作に加えて、断熱的なスピン操作を利用した量子情報関連の研究なども行われている。

3 強磁場コラボラトリーで目指す将来構想—研究課題

今後、研究の焦点となる分野としては、以下のような研究課題が考えられる。

- 1) フラストレート磁性体において予想されているスピン液晶相などの磁気多極子相を動的相関関数から検証できる強磁場NMRや中性子散乱、強磁場での熱測定による強磁場相の存在の実証。また高圧、極低温と組み合わせた極限条件下での量子相転移の研究。
- 2) マルチフェロイック物質やカイラル磁性体の強磁場光実験などによる非相反応答の巨大化の実現と機構の探求。
- 3) 反強磁性カイラル磁性体における強磁場下のトポロジカルな磁気状態の研究。また、それらのトポロジーによる特異な機能の実現。
- 4) フラストレート磁性体における磁化プラトーとその励起状態の解明、特に二次元系においては相互作用のブリージング性や磁気異方性との関係の解明。
- 5) 永久磁石の特性改善、特性向上のための評価法、新しい永久磁石材料の開発。
- 6) エネルギー変換に利用可能な軟磁性材料や磁気冷凍材料の開発。
- 7) 磁気機械システムに繋がるマルテンサイト物質の開発。
- 8) 量子計算に繋がるスピンの量子操作、強磁場を用いた計算アルゴリズムの開発。

4 まとめ

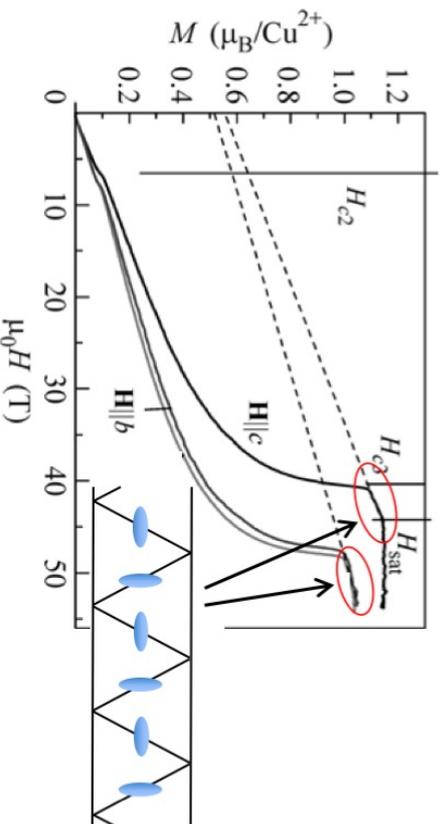
以上のように、磁性、スピン系に関する研究において強磁場は必須の環境である。低次元性やフラストレーションによって増強される量子揺らぎ・熱揺らぎと磁場との相乗効果により現れる凝縮相の発現、スピンと電荷、軌道、格子などの自由度との複合的な結合によって出現する量子相・新機能の強磁場下での発見が今後の強磁場科学を新しい展開に導くと期待される。

5 参考文献

- 1) A. Miyata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 207203 (2011).
- 2) L.E. Svistov *et al.*, JETP Lett. **93**, 24 (2011).
- 3) S. A. Zvyagin *et al.*, Nat. Commun. **10**, 1064 (2019).
- 4) K. Kimura *et al.*, Phys. Rev. Mater. **2**, 104415 (2018).
- 5) Y. Togawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 112001 (2016).
- 6) N. Nagaosa and Y. Tokura, Nat. NanoTech. **8**, 899 (2013).
- 7) P.J. Ackerman and I.I. Smalyukh, Phys. Rev. X **7**, 011006 (2017).

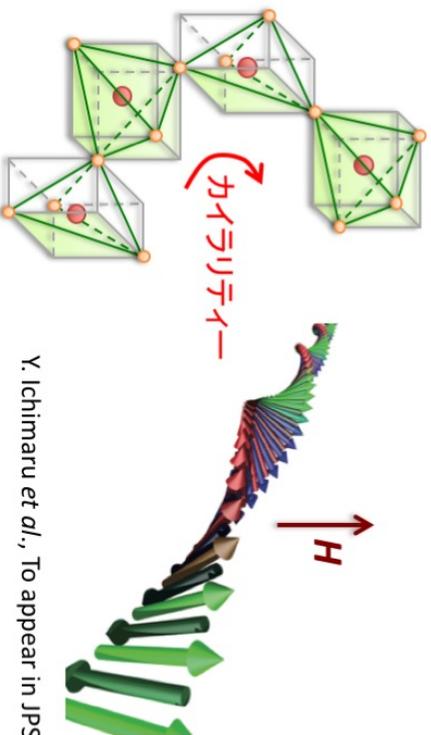
磁性研究

擬一次元フラストレート系 LiCuVO_4 で期待されるスピンの液晶相



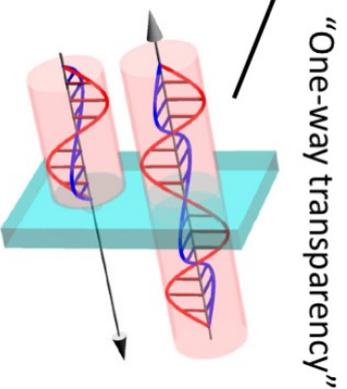
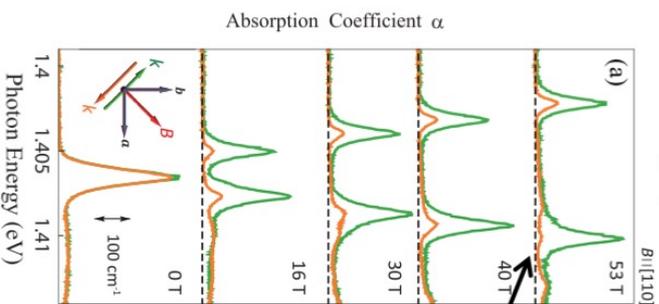
L.E. Svistov *et al.*, JETP Lett. **93**, 24 (2011).

反強磁性カイラル磁性体の磁気ソリトン格子



Y. Ichimaru *et al.*, To appear in JPSJ.

強磁場中でのスルチエロイック物質 CuB_2O_4 の巨大非相反光学応答



S. Toyoda *et al.*, PRL **115**, 267207 (2015).

- 量子揺らぎ・熱揺らぎと磁場との相乗効果により現れる凝縮相、トポロジカル状態
- スピンと電荷、軌道、格子などの自由度との結合によって出現する新機能の強磁場下での発現

III-2. 強相関電子系

1. 強相関電子系研究の意義と概要

20世紀の産業を支えた半導体科学ではバンド模型による一電子的な物質の理解が有効であった。前世紀後半からは電子相関の効果など一電子模型の枠を超えた新しい物理現象の発見・解明に多くの研究が向けられている。強相関電子系では、電荷、スピン、軌道などの自由度が複合的に絡み合って多彩な物理現象が実現している。磁場は電子の軌道運動、スピン、位相を連続的かつ精密に制御できる外場であり、こうした物質の研究に不可欠である。

超伝導状態に磁場を印加すると、電子の位相とスピンに対する磁場効果で超伝導が抑制される。高温超伝導体では、強磁場下で超伝導を取り除いた後に現れる異常な常伝導状態の性質が調べられてきた。二次元構造を持つ超伝導体では位相に対する磁場効果が抑制され、強磁場を用いた実験でスピンに対する磁場効果が主役となる現象を研究できる。超伝導電子対がスピン三重項を形成するトリプレット超伝導体ではスピンに対する対破壊効果が抑制される。このとき磁場中で超伝導の安定性が増強したリエントラント超伝導なども実現されている。

磁性体に強磁場を印加すると、多くの物質でスピンを完全に配向させた状態を実現できる。磁気励起を量子力学的粒子とみなせる量子スピン系物質では、磁場印加で粒子数を変化させたときに現れる量子多体系の相転移が基礎物理の研究対象となってきた。またスピン自由度と他の自由度が結合した系では、磁場印加によって物質の電気伝導性、誘電性、光物性、形状、温度など様々な物理量に変化する交差相関物性が現れる。特に最近では磁気秩序を持つトポロジーの変化に対応した電氣的・磁氣的応答の研究が活発になっている。

2. 研究の現状と実例

強磁場下における物性測定精度の飛躍的な向上の結果、高温超伝導体における明瞭な量子振動の観測が近年可能になっている。銅酸化物高温超伝導体では系統的な量子振動測定を通じて、超伝導相の背景に有効質量の発散で特徴付けられる量子臨界点が二つ存在することが示された¹⁾。また強磁場下におけるX線回折実験によって、二つの量子臨界点の間では電荷秩序相が安定化していることがわかっており²⁾、この電荷秩序の存在が銅酸化物超伝導体の背景にある異常な常伝導状態を理解する鍵として注目されている。この異常な常伝導状態を示す組成領域では、無磁場下の角度分解光電子分光で観測されたフェルミ面と強磁場下の量子振動測定で見積もられたフェルミ面の不一致が指摘されている³⁾。強磁場下における超音波測定では、磁場誘起電荷整列相の存在が指摘されており⁴⁾、この電荷秩序によるフェルミ面の再構成が不一致の原因として提案されている。

スピン三重項超伝導体としては異例の高い超伝導転移温度を持つ UTe_2 という物質の超伝導が最近発見された⁵⁾。日仏の共同研究グループは機動性を生かした研究で(1)磁場中で超伝導特性が増強されるリエントラント超伝導の観測⁶⁾、(2)リエントラント磁場付近におけるメタ磁性転移の発見⁷⁾、(3)メタ磁性転移近傍における電子状態の変化の熱的評価⁸⁾、などを実現しており、今後発展が期待されるこの物質において世界を主導する研究を推進している。

キラルな結晶構造を持つ MnGe ではヘッジホッグ型と呼ばれる特異な磁気秩序を示す。この磁気秩序を感じながら遍歴する伝導電子の位相が受ける効果は実効的な磁場（創発磁場）として表すことができる。ヘッジホッグ型磁気構造を持つ状態に強磁場を印加すると、創発磁場による磁気モノポールとアンチモノポールを対消滅させることができる。この対消滅過程における精密物性測定によってトポロジカルホール効果や巨大なゼーベック効果などを観測している⁹⁾。

3. 強磁場コラボラトリーで目指す将来構想—研究課題

今後考えられる具体的な研究として現時点で期待できる課題の例を以下に挙げる。

- 1) 高温超伝導の背景にある異常金属状態の解明。超100 T領域の実験で全組成域における量子振動測定を実現し、量子臨界現象の全貌を明らかにする。異常な金属相における電荷・軌道秩序状態を磁場で制御し、NMR、量子ビーム回折、超音波、偏光顕微鏡観察などの手段で検出し、これらの秩序と超伝導の相関を解明する。
- 2) 電子ドーパ型の銅酸化物超伝導体の研究は、ホールドーパ系に比べて、発展途上にあり、良

質な単結晶を用いた、高精度のホール効果測定など、強磁場下の輸送現象の研究が引き続き重要である。

- 3) 非従来型超伝導状態の実現。スピンへの磁場効果が主体となる時に期待される空間変調構造を持つ超伝導相 (FFLO 状態) や、トリプレット超伝導状態で期待される内部自由度を持った複数の超伝導相などを強磁場下で実現する。これらの研究において、薄膜、微細加工、電場によるキャリア制御などを駆使した超伝導デバイスを用いた研究は、今後の大きな進展が期待される。
- 4) 室温における巨大交差相関物性の実現。交差相関効果を示す物質の多くは磁気量子数の大きい物質であり、100 T 級の磁場効果は室温の熱エネルギーを凌駕する。強磁場下における多彩な測定手法を駆使して、実用温度域での交差相関物性の基礎学理を解明する。
- 5) 対称性・トポロジーの破れによる非従来の外場応答の探索。結晶や磁気秩序における反転対称性、回転対称性、トポロジーの変化が巨視的物性に異方的・非相対的な効果を与える現象が知られつつある。強磁場を用いた実験ではその効果を増幅することができる。
- 6) 超伝導とハーフメタルの接合などを利用した超伝導ゆらぎの近接効果やそれを利用したデバイス、スピントロニクスへの応用なども超伝導関連分野として重要な研究課題である。
- 7) 2次元超伝導体における新奇超伝導、電界効果を利用した2次元超伝導体では、超伝導面に平行に磁場を印加した場合、上部臨界磁場が非常に大きくなり特殊な振る舞いを示すが、高磁場領域では電子スピンのフラストレーションにより、30-50T の強磁場領域に FFLO やトリプレット超伝導などの新奇超伝導状態が出現すると予想されている。

4. まとめ

強相関電子系の主要テーマである高温超伝導の背景にある電子状態を調べるには 100 T クラスの磁場下における多角的な物性測定が不可欠である。世界唯一の 1200 T までの磁場発生環境も組み合わせた総合的な物性研究を行えば世界をリードする研究が展開できる。トポロジカル磁性体における電磁気応答は一般には非常に小さいため、無冷媒超伝導マグネットや長時間パルスマグネットが発生される強磁場下での精密物性測定が欠かせない。

強相関電子系ではここで紹介した以外にも様々なテーマがあり、新しいテーマに基づく新物質開発も日々行われている。UTe₂における国際連携研究を例として示したように、緊急性の高い課題に対して総合的な物性研究を迅速に実施できる研究体制の整備が重要である。測定対象に合わせた高精度の実験を機動的に行える体制を、より充実させていくことが望まれる。

5. 参考文献

- 1) B. J. Ramshaw *et al.*, *Science* 348 (2015) 317-320.
- 2) J. Chang *et al.*, *Nature Phys.* 8 (2019) 871-876.
- 3) S. E. Sebastian *et al.*, *Phil. Trans. R. Soc. A* 369 (2011) 1687-1711.
- 4) D. LeBoeuf *et al.*, *Nature Phys.* 9 (2013) 79-83.
- 5) S. Ran *et al.*, arXiv: 1811.11808
- 6) W. Knafo *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* 88 (2019) 063705/1-5.
- 7) A. Miyake *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* 88 (2019) 063706/1-5.
- 8) S. Imajo *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* 88 (2019) 083705/1-5.
- 9) Y. Fujishiro *et al.*, *Nature Comm.* 9 (2018) 408/1-7.

強相関電子系

強磁場実験によるこれまでの成果例

高温超伝導

量子振動による量子臨界特性の解明
常伝導状態における電荷・軌道秩序の
発見と磁場制御

二次元超伝導

スピン限界を超えた強磁場超伝導の実現

トリプレット超伝導

UTe₂におけるリエントラント超伝導

交差相関物性

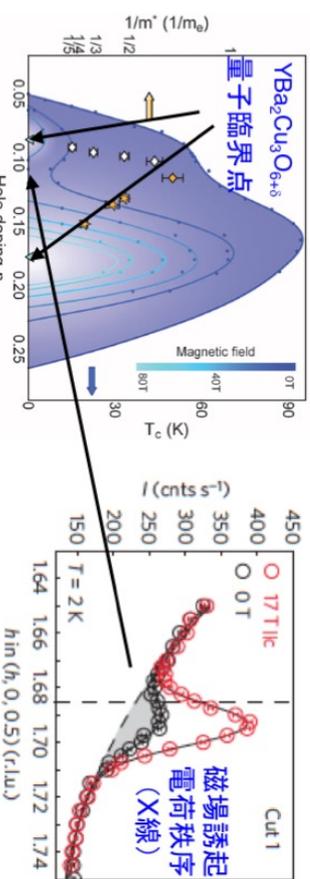
マルチフェロイック物質の電気磁気効果
スピン効果を超えた巨大な磁気熱量効果

トポロジカル磁性

創発磁場によるトポロジカルホール効果・
巨大熱電効果の観測

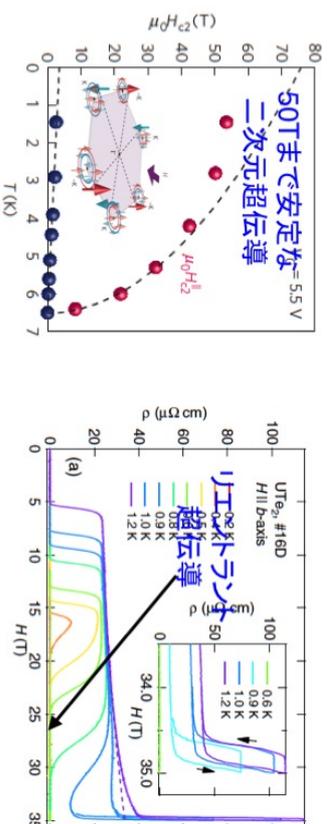
今後の課題

高温超伝導の背景にある異常金属相の解明
非従来型超伝導状態の実現
室温における巨大交差相関物性の実現
対称性・トポロジジーの破れによる異常外場応答



B. J. Ramshaw et al., Science 2015

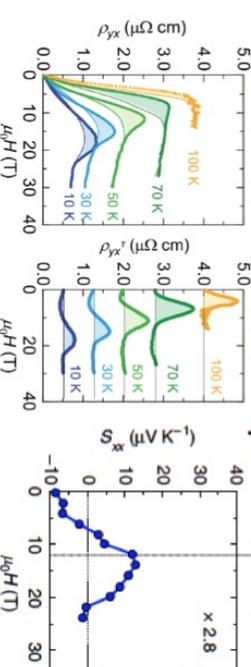
J. Chang et al., Nature Phys. 2012



Y. Saito et al., Nature Phys. 2015

G. Knebel et al., JPSSJ 2019

創発磁場によるトポロジカルホール効果と巨大熱電効果



Y. Fujishiro et al., Nature Comm. 2018 & 2019

III-3. ディラック電子系

1. 意義と概要

シュレーディンガー方程式にローレンツ不変性を持たせたディラック方程式は、高エネルギー粒子の運動の記述に用いられる。金属中を動き回る電子の典型的な速度は光速の0.5%程度であるため相対論的な効果は通常ほぼ無視できるが、ある種の金属では特殊なバンド構造のためキャリアの運動方程式がディラック方程式で表現される。このようなディラック電子系物質における“相対論的”なキャリアの運動に関する研究が活発に行われてきた。質量ゼロのディラック電子系において時間反転対称性と空間反転対称性のどちらかが破れるとスピン縮退が解けてワイル電子系になる。これらの系は顕著な外場応答を示す高易動度の電子系であり、低散逸のエレクトロニクス材料などへの応用も期待されている。相対論的な運動の効果は磁気輸送特性に現れることが理論的に示唆されている。特徴的な例として線形不飽和な正の横磁気抵抗効果や、カイラル異常と呼ばれる負の縦磁気抵抗効果などが挙げられるが、その前提となる理論では強磁場極限の状態が考えられている。相対論的な効果を正しく評価するには十分な強磁場下における実験が不可欠である。

2. 研究の現状と事例

トポロジカル半金属と呼ばれるこれらの物質群における強磁場の重要性は広く認識されており、これらの系に対する磁気輸送特性の研究は現在世界中の強磁場施設で精力的に行われている。国内では代表的な三次元ディラック半金属である Cd_3As_2 の高易動度薄膜に関する系統的な研究を通じて膜厚制御によるトポロジカル相転移の観察¹⁾、Zn置換によるトポロジー変化に対応したカイラル異常の変化を検証²⁾、表面状態に由来した特殊な量子振動の観測³⁾、などの成果が挙げられている。

ディラック電子系の物理をより弱磁場で制御するには、磁気秩序を持つディラック電子系が有効である。 EuMnBi_2 ではBi正方格子のネットワークが運ぶ二次元ディラック電子を、Euを含む磁気層が隔てている。磁場でEu層の磁気秩序を制御することで系の次元を制御し、多層ディラック系の特徴である半整数量子ホール効果の観測が実現されている⁴⁾。

二次元ディラック電子系物質の代表格であるグラフェンについては、高品質の積層構造が実現している。グラフェンを窒化ホウ素基板に対して少し傾けて設置してできる人工超格子系では、サイクロトロン軌道半径が格子周期より短くなる超強磁場下の電子状態が実現している⁵⁾。また絶縁層を挟んだ積層構造において量子ホール状態における励起子のボーズ凝縮状態も観測されている⁶⁾。

ゼロギャップのグラフェンに対し、ギャップを持つ半導体である原子層物質としては遷移金属ダイカルコゲナイドに関する研究が、応用上の期待に支えられて幅広く展開されている。空間反転対称性の破れた結晶構造とスピン軌道相互作用によってスピンとバレーの縮退が解けており、その電子状態の解明や電界効果で生じる二次元超伝導状態の特異性の評価に強磁場が利用されている^{7,8)}。

3. 強磁場コラボラトリーで目指す研究課題

今後、展開が期待される具体的な研究課題の例を以下に挙げる。

- 1) 相対論的電子状態の解明。トポロジカル半金属と呼ばれる系に関して膨大な数の実験報告があるが、実験データの再現性などに問題のあることも多く解釈が混沌とした状況にある。シンプルで系統的な制御のしやすい物質系に対して、十分な強磁場領域までの確かな実験をすることが、この混沌とした状況の中から本質を見極める上で不可欠である。これまで磁気輸送特性の研究が中心であった物性評価において、光学測定、核磁気共鳴、超音波などの手段の併用も重要である。対象となる物質は少数キャリア系であるため、元素置換による系統的な物性制御が難しい場合も多い。そうした場合、圧力印加によるバンド制御は一つの有力な手段になりうる。強磁場・高圧の多重極限環境を用いた実験も混沌とした状況を打開する有効な方法である。
- 2) 電子相関効果の研究。これまでトポロジカル半金属に関する研究の大半は一体問題であった

が、電子相関の効いた多体系としての振る舞いが、今後解決すべき重要な課題である。強磁場下では全てのキャリアが最低エネルギーを持つサイクロトロン軌道に閉じ込められた量子極限状態が実現できる。このとき磁場と垂直な方向の運動の自由度が抑制されるため、相対的にクーロン相互作用の影響が大きくなった強相関電子系となる。100 T級の強磁場があればトポロジカル半金属や原子層物質の多くで量子極限状態を実現できる。約半世紀前から理論的に提唱されている三次元系における励起子のボーズ凝縮相⁹⁾のような新しい量子凝縮相の実現などが期待される。こうした研究では電子数の精密な制御が重要になる。二次元系物質に対しては、無冷媒超伝導磁石や長時間パルス磁石で実現する一定磁場中で、ゲート電圧によるキャリア数変化に対応した物性評価が効果的である。

- 3) 極限的強磁場下の物質科学。上記で紹介した物質のほとんどは少数キャリア系であり、そのバンド構造に起因してキャリアの有効質量が小さく g 因子が大きいことが多い。代表的ディラック電子系物質であるビスマスの場合、 g 因子が最大で自由電子の約千倍、有効質量が約千分の一になるため、電子のスピンや軌道運動に対する磁場効果が約千倍になる。100 Tの磁場下では磁場効果が物質を支配する他のエネルギースケールを凌駕することになる。磁場効果がバンド幅に迫る領域では g 値や有効質量を用いた近似の範囲を逸脱しており、低エネルギー領域の物理の延長を超えた未知の物性が期待される。

4. まとめ

ディラック・ワイル半金属に対する強磁場物性研究は、現時点で混沌としている磁気輸送特性の本質を明らかにする。強磁場下で増強される電子相関の効果を用いれば、これまで一体問題として起こしてきた外場応答を劇的に変える協力現象が実現できるかもしれない。また磁場効果が増幅されて作用するこれらの物質系は、強磁場極限における物質の未知の姿を研究する舞台として今後も重要な研究対象であり続けると期待される。

5. 参考文献

- 1) M. Uchida *et al.*, Nat. Commun. 8 (2017) 2274/1-7.
- 2) S. Nishihaya *et al.*, Phys. Rev. B 97 (2018) 245103/1-7.
- 3) S. Nishihaya *et al.*, Nat. Commun. 10 (2019) 2564/1-7.
- 4) H. Masuda *et al.*, Sci. Adv. 2 (2016) e1501117/1-6.
- 5) L. A. Ponomarenko *et al.*, nature 497 (2013) 594-597.
- 6) X. Liu *et al.*, Nature Phys. 13 (2013) 746-751.
- 7) M. V. Gustafsson *et al.*, Nat. Mater. 17 (2018) 411-415.
- 8) Y. Saito *et al.*, Nat. Phys. 12 (2016) 144-150.
- 9) E. W. Fenton, Phys. Rev. 170 (1968) 816-821.

ディラック電子系

“相対論的”キャリアの運動の検証

強磁場領域までの磁気輸送特性評価

強磁場に関わる研究例

ディラック半金属： $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn})_3\text{As}_2$ 薄膜

膜厚制御でトポロジカル相転移

カイラル異常の消失

表面状態を介した量子振動の観測

EuMnBi_2

ディラック電子を制御できる磁性体発見

多層系における半整数量子ホール効果

単原子層物質の積層構造

強磁場極限の電子状態を再現

遷移金属ダイカルコゲナイドにおける

スピン・バレー自由度の評価

今後の課題

相対論的電子状態の解明

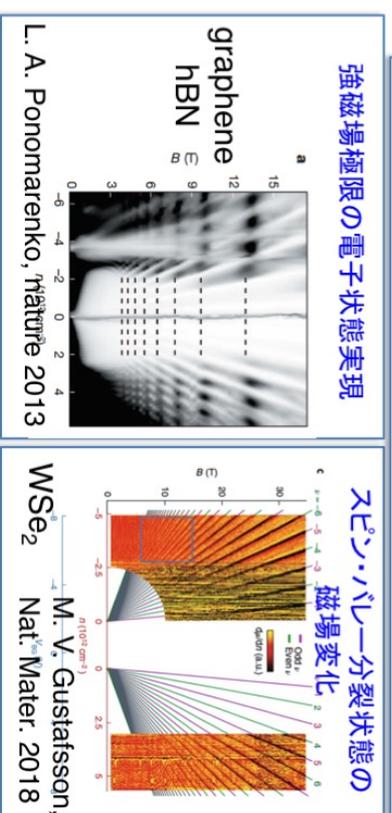
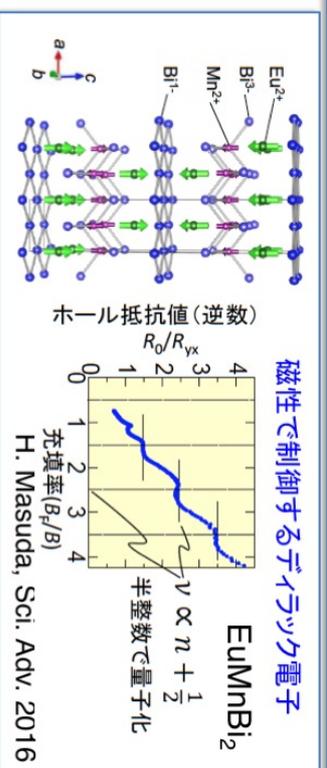
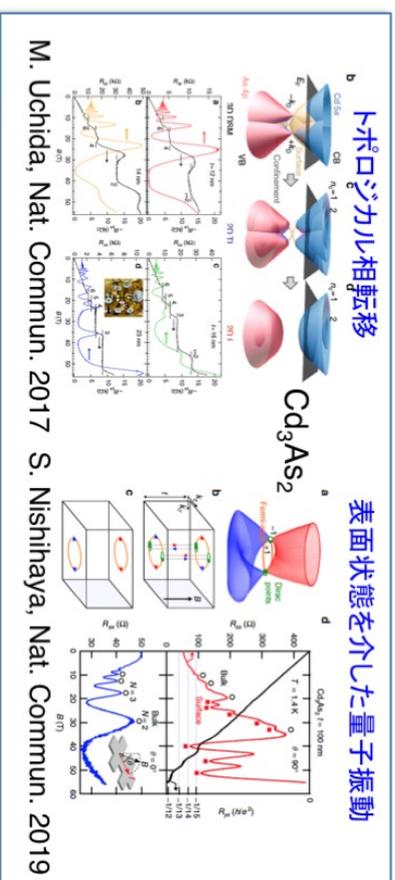
多重極限を用いた系統的物性測定

電子相関効果の研究

量子極限状態における電子相関の磁場制御

極限的強磁場下の物質科学

巨大g値、微小有効質量 → 巨大な磁場効果



III-4. 超伝導材料研究

1. 研究の概要

高温超伝導線材の超伝導特性を理解することは応用的も基礎的にも重要であるため、実用超伝導材料の基礎的理解を深める必要がある。このため、鉄系超伝導材料を含めた高温超伝導材料及び金属系超伝導材料である Nb₃Sn 線材における、臨界電流決定機構である磁束ピンニング機構と、そのひずみ特性を解明を実施する必要がある。後に述べる応用上の観点からもこれらの研究は、超伝導を活用した未来社会において重要となるからである。これまでに、Nb₃Sn 線材のひずみ効果を明かにし、これを利用することで実用 Nb₃Sn 線材の特性向上に成功してきた手法を高温超伝導材料にも拡張し、中性子や放射光も利用した総合的な研究を推進ことが求められている。一方で、基礎研究としては、トポロジカル超伝導や単層膜における 2 次元超伝導、アクチノイド化合物における新奇超伝導の発見と機構解明が行われており、前者は、超伝導を利用したデバイス開発を通して、後者は超伝導の機構解明を通して、超伝導材料研究と関わっている。

2. 応用超伝導における課題

1) 高温超伝導材料への研究と社会展開の展望

高温超伝導材料のうち、30 T を超える強磁場まで高い臨界電流を示す希土類系高温超伝導材料 REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE は希土類元素)、ビスマス系高温超伝導材料 Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y (Bi2223) 及び Bi₂Sr₂CaCu₂O_y (Bi2212) が市販されるようになり、世界中で高温超伝導材料を用いた応用超伝導機器開発が実施されている。その応用先は、高エネルギー次世代加速器、次世代コンパクト核融合を初めとして、がん治療用粒子加速器、創薬開発に必要な高分解能核磁気共鳴(NMR)装置、先端医療に不可欠な機能的磁気共鳴画像(fMRI)診断装置やコンパクト MRI 装置、高効率超伝導発電機やモーター、低損失超伝導ケーブルなど多岐に渡っている。

2) 超伝導材料評価の重要性

これらに用いる超伝導線材の特性として必要不可欠な強磁場中の臨界電流特性評価には、高精度かつ安定で長時間の実験時間が確保できる磁場が望まれ、現在東北大金研の 25T 無冷媒超伝導磁石がその重要な役割を担っている。実際、金研の強磁場精密臨界電流評価システムは、世界各国の大学や企業に利用され世界標準となりつつある。また、上記超伝導応用機器の多くは超伝導磁石をその基本としており、高温超伝導磁石技術は世界共通の基幹技術と位置づけられ、世界中で凌ぎを削っている。強磁場コラボラトリーの一環として東北大金研では、企業と共同して高強度ニオブ 3 スズ超伝導線材や、REBCO や Bi2223 線材の開発を実施し、25 T 無冷媒超伝導磁石の 30 T へのアップグレードと 33T 無冷媒超伝導磁石開発を、現在進めている仏国グルノーブル強磁場とのジョイントラボなどの国際連携を活用することで世界に先駆けて実施する。これによって高温超伝導磁石技術におけるイニシアチブを確保する。超伝導材料評価において、30 T の強磁場は Nb₃Sn の上部臨界磁場直上であると共に、REBCO 超伝導材料の液体窒素サブクール温度の不可逆磁場に相当し、これらの磁場領域までの評価が今後の超伝導応用において重要となる。

3) 鉄系超伝導線開発

鉄系超伝導材料は、その優れた強磁場特性が期待されている。この材料においても世界最先端の研究機関である中国電工研究所との共同研究などを通して、十分なコミットメントを行い、実用化等が見込まれる場合に、速やかな対応が取れるように研究を行って行く必要がある。

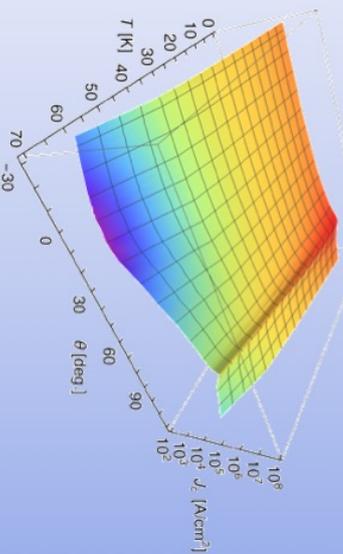
4) 加速器応用と国際連携

加速器の強磁場化に伴って、従来の常伝導磁石から超伝導磁石へのシフトに加え、超伝導材料の中でも金属系の材料と高温超伝導材料の両者が、候補と成り、これからの数年で、どちらが先行するか分かれ目があると考えられている。高温超伝導材料は、コストや加工性については、金属系材料には及ばないが、超伝導材料としての特性が極めて優れているため、電流密度を圧倒的に高く取れるなど、物質としての優位性は極めて高い。そのため、高エネルギー加速器科学研究機構(KEK)や欧州(CERN)、国際熱核融合実験炉(ITER)機構などとの共同研究をさらに発展させ、これらの研究機関における超伝導化に貢献する事で、超伝導材料分野での国際的な地位を一層向上させる必要がある。東北大金研は、国際共同利用共同研究拠点認定により、すでに米国・英国・仏国・独国・中国・

韓国など多くの国際共同研究の実績を有しており、応用超伝導分野の世界的拠点を目指す事が求められている。

先進的超伝導材料開発拠点

精密臨界電流評価技術



- 24T までの高精度臨界電流測定
- 27T までの大電流測定

無冷媒超伝導磁石技術



無冷媒超伝導磁石技術により世界最高磁場の実用超伝導磁石を実現

実用高温超伝導材料開発

フジクラ	九大	安東大 (韓)
古河-SP	名大	電工研 (中)
SuperOX	九工大	Durham Univ. (英)
住友電工	関学大	MIT (米)
古河電工	物材機構	KIT (独)
JASTEC	産総研	CERN (推)
	核融合研	
	KEK	

超伝導磁石開発

東芝
住友重機
中部電力
RIKEN
日本製鉄

LNCMI(仏)

高温超伝導加速器

(20T)
→ コソノバクト
重粒子線治療



高温超伝導核融合

(23T 大口径)
→ 実用核融合炉



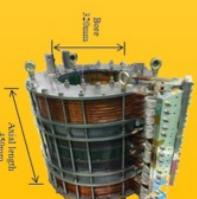
高温超伝導NMR

(30.5T)
→ 新薬開発



高温超伝導MRI

(3T 大口径)
→ コソノバクト
脳関連疾患治療



III-5. 量子ビーム応用研究

1. はじめに、研究の意義と位置付け

SPring-8（平成9年より共用開始）、J-PARC/物質・生命科学実験施設（平成20年より）、X線自由電子レーザー(XFEL)施設 SACLA（平成24年より）に代表される量子ビーム施設から得られる世界最高性能の量子ビームは、21世紀の日本の科学技術に欠くことのできない基盤技術である。量子ビームという呼称が平成に入る広く浸透する以前から、そのもとである粒子線や放射線を用いた物質計測は古くから行われていた。例えば、X線回折による構造解析の基礎が築かれたのは20世紀の初頭である。しかし、近年にみられる光源性能と検出技術の急激な技術革新によって、量子ビームとしての呼称に相応しい桁違いのエネルギー、空間、時間分解能が実現し、多種多様な計測手法が広く一般に利用される時代となった。角度分解光電子分光はその端的な例と言えよう。計測手法以外に忘れてはならない恩恵は、試料の形態や測定環境を選ばない実験が可能になったことである。中性子実験では常識であった大型単結晶の準備は必ずしも不可避ではなく、X線自由電子レーザーを利用することで結晶ですらない生体一分子の計測も可能になってきている。また、電池材料の反応プロセスなど化学反応におけるその場観察も重要な課題である。そして超高圧や超強磁場などの極限環境下の実験も量子ビームの発展の恩恵で成長してきた技術である。

極限環境下の厳しい測定条件において物性研究に利用可能なプローブは限られる。例えば、45 Tを越える超強磁場の発生が可能な技術は持続時間数ミリ秒のパルス磁場のみであり、物性測定の多くはマクロな物理量である磁化や電気抵抗の計測に限られる。そしてそれらの結果の多くは、分子場理論などの近似模型や数値計算によって解析が行われてきた。一方で、量子ビームを利用した計測手法はマクロな物理現象の理解に不可欠な微視的情報、例えば磁気モーメントの配列周期や電子の状態密度などの直接観測に威力を発揮する。すなわち、実験室系におけるマクロ物性測定と量子ビーム施設における微視的実験を相補的に推進することにより、極限環境下の研究に置いても物性現象の発見からその解明に至るまでの実験研究サイクルが実現する。

2. 研究の現状と研究例

磁場と量子ビームを組み合わせた研究は平成の初頭において既に各施設が整備した磁場発生装置を用いて行われていた。量子ビーム実験における当時の世界最高時は中性子散乱実験用に Helmholtz Centre Berlin(独)に導入された17.5 Tの縦磁場スプリット型マグネットである¹⁾。これはOxford Institute社製の15スプリット型マグネットの内部に試料を上下から挟む形でDy製ブースター（先端径を縮めたポールピース）を挿入することで、2.5 T増しの磁場を得ることが出来る構造になっている。同じ型式のマグネットはDy無しでSPring-8にも導入されており、これら2つのマグネットによって回折実験用としては最高の定常強磁場環境が提供された。その後、EU各地の中性子施設、放射光施設において標準的に利用可能な横磁場17 Tマグネットが導入され、広く普及している²⁾。定常強磁場マグネットの整備から少し遅れて、各々の国の放射光施設と強磁場施設と連携する形でパルス磁場の導入も進められた。国内のSPring-8では、原子力機構(当時)と東北大が共同で可搬型のコンデンサ電源と、試料と同時にクローズドサイクル冷凍機で冷却可能な非常に小型のパルス電磁石を開発し定常磁場では到達できなかった20 TでのX線回折実験を実現した³⁾。この可搬型磁場発生システムは、その後、国内の中性子施設JRR3やJ-PARC/MLF、国外の放射光施設APS(米)や中性子施設SNS(米)、ILL(仏)、ISIS(英)においても運用され、パルス磁場領域での量子ビーム実験が容易に手に届くことを世界に向けて実証することとなった。また、仏のEuropean Synchrotron Radiation Facility(ESRF)では仏Toulouseの強磁場グループと連携して30Tの横磁場中粉末回折装置⁴⁾を、SPring-8では理研グループが大阪大学・東京大学と共同で40 Tの縦磁場単結晶回折装置⁵⁾を開発し実験室系の強磁場装置に迫る磁場強度の増強が進められている。さらには、軟X線領域におけるパルス強磁場分光装置がSPring-8と東大・東北大によって開発され、現時点でも世界で唯一の超高真空を備えた強磁場装置となっている⁶⁾。最近では、超高輝度・超短パルスのX線源であるXFELを用いたパルス磁場中回折実験も、東北大で開発されたポータブル磁場発生装置との組み合わせることで、SLAC(米)⁷⁾やSALCA(日)において進められている。

3. 将来の方向性と研究課題、強磁場の役割、100 Tにおける研究課題など

量子ビーム実験における強磁場の重要性は世界的に益々高まっている。定常強磁場領域の拡張をめざし、強磁場施設外では初めてとなるハイブリッドマグネットシステムが NHMFL(米)の協力のもとで Helmholtz Centre Berlin(独) に導入され定常運転を開始している³⁾。専用のビームラインに設置されたこのマグネットは定常的に 26 T の磁場を発生し、0.1~12 Å⁻¹ の Q レンジをカバーする。また、最近運用を開始した European XFEL では 60 T の磁場発生を可能にする 1 MJ のコンデンサ電源の導入も検討されている。これらの例に見られるように、強磁場発生装置は実験室レベルで考えると大規模設備であるが、大型施設の規模と比較すると十分に後発で導入可能であることがわかる。ただし、日本国内に目を向けると、MW クラスの大電力を必要とするハイブリッドマグネットシステムの導入は、昨今の電力需要を鑑みると現実的では無い。昨今のヘリウム需給の不安定性も考慮すると、定常磁場環境では 20 T 級の無冷媒マグネットの導入は十分に検討に値する。一方で、パルス光源とパルス磁場の親和性は極めて高いと言える。既に導入されているコンパクトで非破壊のパルス磁場システムに加えて、十分な検討が必要ではあるが、マイクロ秒領域で 100 T 以上の磁場を発生する破壊型一巻きコイルと XFEL の組み合わせは将来検討すべき課題と言えよう。さらに、2023 年に運用が開始される次世代の放射光施設 SLiT-J に強磁場が果たす役割は大きい。SLiT-J が主にカバーする軟 X 線領域は遷移金属や希土類金属など主要な磁性の担い手となる元素の共鳴エネルギーに相当する。そのため、磁性研究における磁場の重要性を鑑みると、強磁場下の軟 X 線分光実験が簡便に行えるように整備しておくことは非常に重要である。

4. まとめ

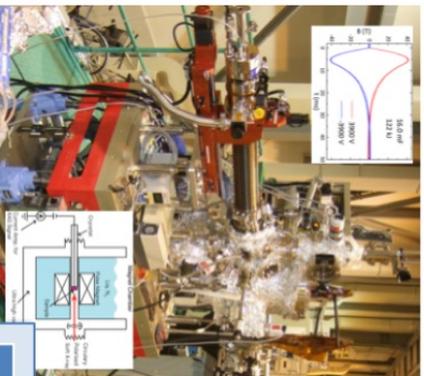
強磁場発生装置は高電圧・大電流を取り扱う装置であり、その安全な運用には熟練者による指導が不可欠である。そのためにも、強磁場量子ビーム実験は施設間の連携・協力無くして推進する事はできない。研究の現状を振り返ると、強磁場量子ビーム研究、特に黎明期のブレークスルーに国内研究者が果たしてきた役割は大きい。その成功の要因の一つは、比較的小規模グループにより提案された萌芽的アイデアが、大勢に埋もれることなく迅速に具現化された機動力にある。一方で、磁場発生装置自体は可搬仕様の装置もあるとは言え、技術継承も含めて一研究グループで長きにわたって運用していくことは難しい。そのため、長期にわたり科学研究に不可欠な基盤技術として運用していくためには、量子ビーム施設、強磁場施設双方が属するコミュニティー全体として当該分野の研究を支持し、人的なサポートも含めてその運営を担う体制構築が急務である。

5. 参考文献

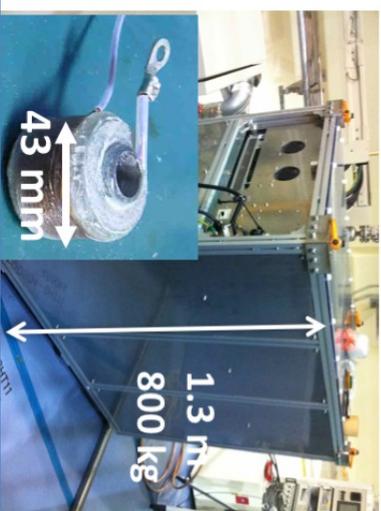
- 1) Michael Meissner, Peter Smeibidl, Neutron News, **12**, 12 (2001).
- 2) Alexander T. Holmes, Gary R. Walsh, Elizabeth Blackburn, Edward M. Forgan, and Marc Savey-Bennett, Rev. Sci. Instrum., **83**, 023904 (2012).
- 3) Y. H. Matsuda, Y. Ueda, H. Nojiri, T. Takahashi, T. Inami, K. Ohwada, Y. Murakami, T. Arima, Physica B, **346-347**, 519 (2004).
- 4) P. Frings, J. Vanacken, C. Detlefs, F. Duc, J. E. Lorenzo, M. Nardone, J. Billette, A. Zitouni, W. Bras, and G. L. J. A. Rikken, Rev. Sci. Instrum. **77**, 063903 (2006).
- 5) Y. Narumi, K. Kindo, K. Katsumata, M. Kawauchi, C. Broennimann, U. Staub, H. Toyokawa, Y. Tanaka, A. Kikkawa, T. Yamamoto, M. Hagiwara, T. Ishikawa, and H. Kitamura, J. Synchrotron Radiat. **13**, 271 (2006).
- 6) S. Gerber, H. Jang, H. Nojiri, S. Matsuzawa, H. Yasumura, D. A. Bonn, R. Liang, W. N. Hardy, Z. Islam, A. Mehta, S. Song, M. Sikorski, D. Stefanescu, Y. Feng, S. A. Kivelson, T. P. Devereaux, Z.-X. Shen, C.-C. Kao, W.-S. Lee, D. Zhu, J.-S. Lee, Science, **350**, 949 (2015).
- 7) Tetsuya Nakamura, Yasuo Narumi, Toko Hirono, Misaki Hayashi, Kenji Kodama, Masakiyo Tsunoda, Shinji Isogami, Hirokazu Takahashi, Toyohiko Kinoshita, Koichi Kindo, and Hiroyuki Nojiri, Appl. Phys. Express, **4**, 066602 (2011).
- 8) P. Smeibidl, A. Tennant, H. Ehmler, M. Bird, J. Low Temp. Phys., **159**, 402 (2010).

強磁場技術の量子ビームへの応用—現状と展望

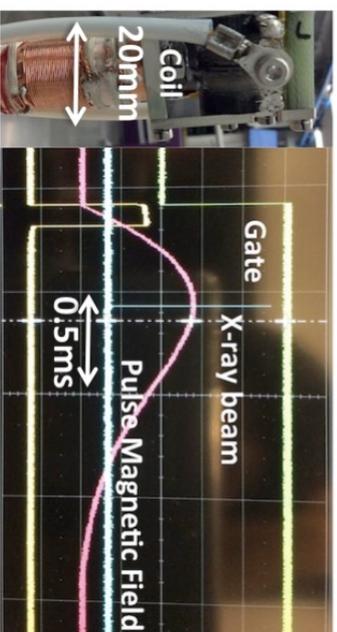
Spring-8:40T軟X線分光



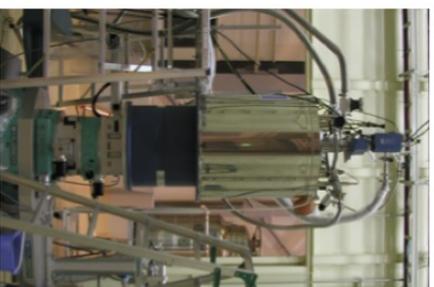
放射光/中性子:30Tモバイル強磁場



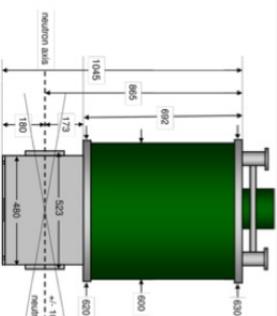
XFEL:パルス磁場超格子散乱実験



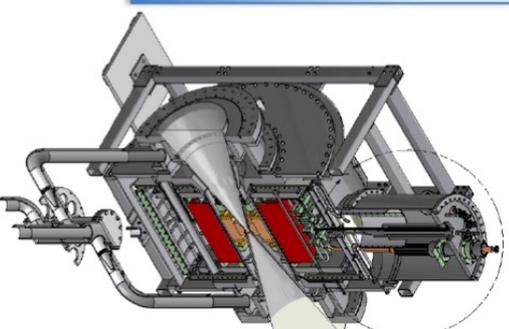
	放射光	中性子	XFEL
現状	$B_{\max}=40\text{T}$ 、硬X線 回折、共鳴・非共 鳴硬X線分光、軟X 線分光	$B_{\max}=40\text{T}$ 、単 色弾性散乱、 TOF弾性散乱	$B_{\max}=30\text{T}$ 、超格 子散乱、
計画	定常25T、軟X線回 折、超低温	偏極中性子、 非弾性散乱、	破壊100T、ポン プローブ、



Spring-8:定常15T
X線回折



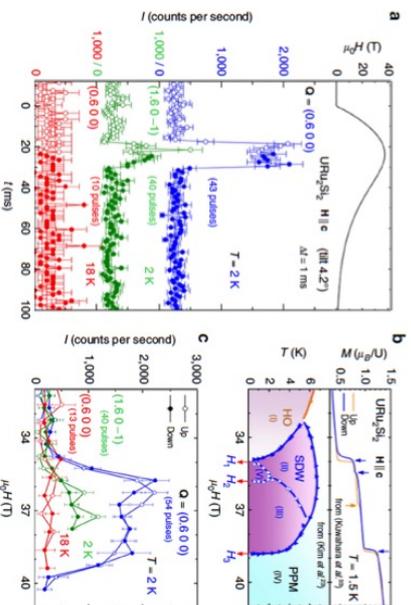
EPSRCの予算で整備された
17T-横磁場SCM。欧州各放射
光、中性子施設で利用可。
<https://www.ill.eu/users/>



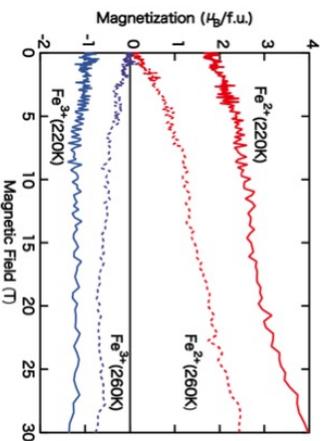
中性子(独):定常26T
P. Smeibidl, et al.

強磁場技術の量子ビームへの応用

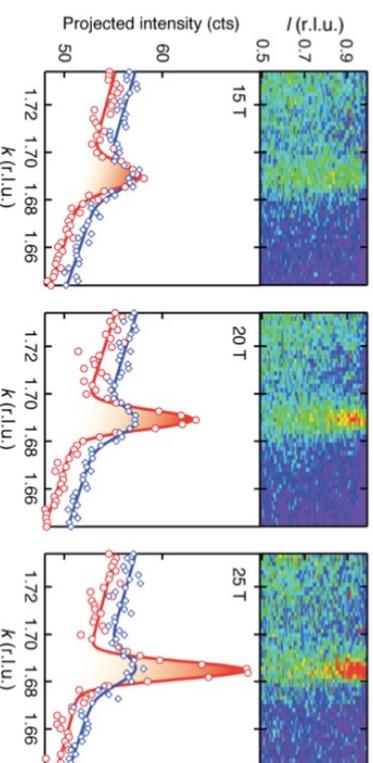
量子ビーム実験による研究成果



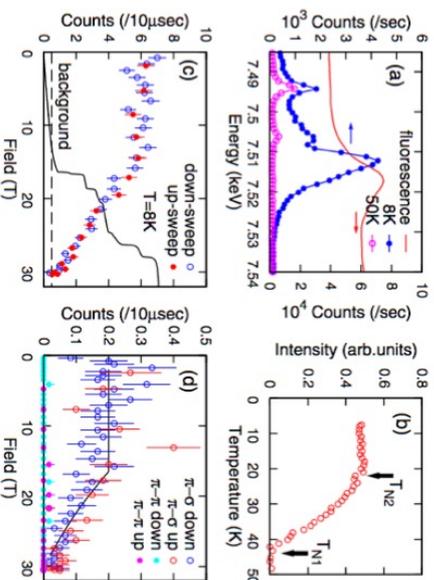
強磁場中性子回折：重い電子系化合物のメタ磁性転移。W. Knafu et al.



強磁場軟X線分光：電荷秩序型マルチフェロイック物質の価数選択磁化過程。Y. Narumi et al.



XFEIによる磁場中X線回折：高温超伝導体における電荷密度波の観測。S. Gerber et al.



強磁場共鳴磁気X線散乱：シヤストリー・サザーランド格子物質の多段メタ磁性。Inami et al.

III-6. 基礎科学

1. はじめに

古典電磁気学において、電荷を持たない光（光子）はお互いに相互作用することが無い。一方で、量子電磁気学(QED)では、真空とは仮想的な電子対が生成消滅を繰り返している場として記述される。その結果、光子はその仮想電子を媒介にして相互作用することが許される¹⁾。この仮想電子対に磁場を印加すると分極が起こり、真空に異方性が生じる。そして、偏光した光がこの真空中を通過すると、光の偏光に変化が生じる²⁾。この現象は真空複屈折と呼ばれる QED が予言する光の非線形効果であり、未だ実験によって観測されていない重要な課題として残されている。これとは別に、光子と相互作用する未知粒子が存在する場合も真空複屈折に影響を及ぼす³⁾。2012年に Higgs 粒子の発見が報告されてもなお、標準理論では説明する事ができない多くの謎が残されている。光子と弱い相互作用する質量の軽い Axion をはじめとする Axion-Like-Particle (ALP) は標準理論では説明出来ない強い CP 問題を解決するために導入される未知粒子で、暗黒物質の候補と考えられている。一般に、素粒子物理学実験と言えば、LHC などの大型加速器を用いる高エネルギー物理実験が注目されるが、光と真空を対象とし、そして後に述べる磁場を利用した比較的小規模な実験によって、物理学の本質に迫る真空複屈折の研究が益々重要になってきている。

2. 研究の現状と研究例

QED によって生じる真空複屈折も、標準理論を越えた ALP による真空複屈折への寄与のどちらも、印加される磁場の 2 乗に比例してその大きさは大きくなる。従って、実験による真空複屈折の観測をめざす上で、印加する磁場の大きさと繰り返し頻度が重要な要素となる。最近行われた代表的な研究としては、PVLAS (Polarisation of Vacuum with LASer) 実験⁴⁾では 2.5 T の永久磁石が使用され、BMV (Birefringence Magnetique du Vide) 実験⁵⁾ではパルス幅約 4 msec で最高 6.5 T のパルス磁場を 200 繰り返し測定が行われた。一方で、ALP を探索する手法として、磁場による光子→ALP、ALP→光子の 2 回の変換を壁越しに観察する Light Shining through a Wall (LSW)⁶⁾と呼ばれる手法が様々なエネルギー帯の光を用いて行われている。ここでは、X 線の波長領域における 2 種類の磁場を使った ALP 探索の実験例について詳しく紹介する。X 線領域における最初の LSW 実験は 2010 年に仏の European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) にて 50.2 keV と 90.7 keV の X 線と 3 T の超伝導磁石を組み合わせで行われた⁷⁾。さらに、エネルギー帯の異なる 9.5 keV の放射光と 9.5 T のパルス強磁場を利用した実験が、東大素粒子物理国際研究センターと東大/東北大の各強磁場施設が連携して行われた⁸⁾。ALP の観測には光子の磁場の強度に加えて磁場下での飛行距離の長さも重要な要素となる。そのため、一般的なパルス電磁石とは全く形状が異なる長く広がった磁場空間を生み出す長さ 20cm のレーストラック型の磁石が新たに開発された。同形状のこのレーストラック型マグネットを鉛の壁を挟んだ光軸上に各 2 台、合計 4 台配置し、さらに同じく新たに開発された 0.2Hz の高繰り返し可能なコンデンサ電源を組み合わせ、2 日間に 27676 ショットの磁場を発生して計測が行われた。この実験によって、ALP の質量 0.1 eV の領域に置いて ALP-2 光子結合定数に対する従来よりも約 5 倍厳しい制限を与えた。

3. 将来の方向性と研究課題

Fabry-Pérot 共振器と高繰り返しのパルスマグネットを組み合わせより高精度な真空複屈折の測定への取り組みが進められている⁹⁾。現状 QED による真空複屈折の理論値に対して 3.5 桁上の上限を与えるに留まっているが、Fabry-Pérot 共振器の安定化や最大磁場強度を上げることで、その理論値に到達出来ることが期待されている。観測される複屈折と理論値を精密に比較することで、標準理論を超えた未知粒子の検証にもつながる。最近の研究で、強力な磁場を持つ中性子星を筆頭にして、広く広がる銀河間宇宙のあらゆる空間にまで普遍的に磁場が存在する事が分かってきている。最近、非常に強い磁場を帯びた中性子星から届く光が直線偏光しているとの報告がなされ、真空複屈折の証拠として非常に注目されている¹⁰⁾。このようにして、光と磁場の作用の理解を通して物理法則の基本的理解から素粒子物理分野の開拓、そして宇宙物理学の研究まで、従来の物質科学に限られた磁場の基礎理学研究における重要性が非常に高まっていると言えよう。

4. まとめ

近年精力的に進められているスモールサイズの素粒子物理学実験を通して、基礎理学における磁場の重要性について概観した。科学研究に利用される様々な外場の中でも、統計量として定義される温度や圧力の他の外場と異なり、磁場は電磁気学によって一意に定義される特別な外場である。実は当たり前であるこの特殊性が、XFEL を筆頭とする光学実験技術の進展と相俟って、今まさに「光と磁場」という新しい研究分野として基礎理学研究の舞台となってきた。旧来、物質科学への適応を念頭にして長く発展してきた磁場発生技術は未だ発展途上にある。それ故、基礎科学分野への応用要請にも柔軟に対応出来るポテンシャルを有しており、「光と磁場」の融合研究が今後益々発展していくことが期待される。

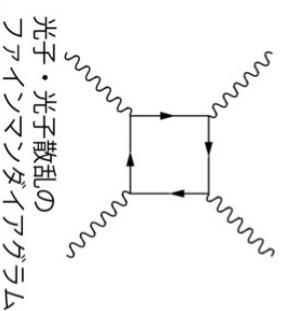
5. 参考文献

- 1) O. Halpern, Phys. Rev. **44**, 855 (1933).
- 2) Z. Bialynicka-Birula and I. Bialynicki-Birula. Phys. Rev. D, **2**, 2341 (1970).
- 3) K. Van Bibber, N. R. Dagdeviren, S. E. Koonin, A. K. Kerman, and H. N. Nelson, Phys. Rev. Lett. **59**, 759 (1987).
- 4) F. Della Valle, E. Milotti, A. Ejlli, G. Messineo, L. Piemontese, G. Zavattini, U. Gastaldi, R. Pengo, and G. Ruoso, Phys. Rev. D **90**, 092003 (2014).
- 5) A. Cadène, P. Berceau, M. Fouché, R. Battesti, and C. Rizzo, Eur. Phys. J. D **68**, 16 (2014).
- 6) J. Redondo and A. Ringwald, Comtemp. Phys. **52**, 211 (2011).
- 7) R. Battesti, M. Fouché, C. Detlefs, T. Roth, P. Berceau, F. Duc, P. Frings, G. L. J. A. Rikken, and C. Rizzo, Phys. Rev. Lett. **105**, 250405 (2010).
- 8) T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, Asai, T. Kobayashi, K. Tamasaku, Y. Tanaka, Y. Inubushi, K. Sawada, M. Yabashi, T. Ishikawa, A. Matsuo, K. Kawaguchi, K. Kindo, and H. Nojiri, Phys. Rev. Lett. **118**, 071803 (2017).
- 9) Xing Fan, Shusei Kamioka, Toshiaki Inada, Takayuki Yamazaki, Toshio Namba, Shoji Asai, Junko Omachi, Kosuke Yoshioka, Makoto Kuwata-Gonokami, Akira Matsuo, Koushi Kawaguchi, Koichi Kindo, Hiroyuki Nojiri, Eur. Phys. J. D, **71**, 308 (2017).
- 10) R. P. Magnani, V. Testa, D. González Caniulef, R. Taverna, R. Turolla, S. Zane, and K. Wu, Mon. Not. R. Astron. Soc. **465**, 492 (2017).

基礎科学と強磁場

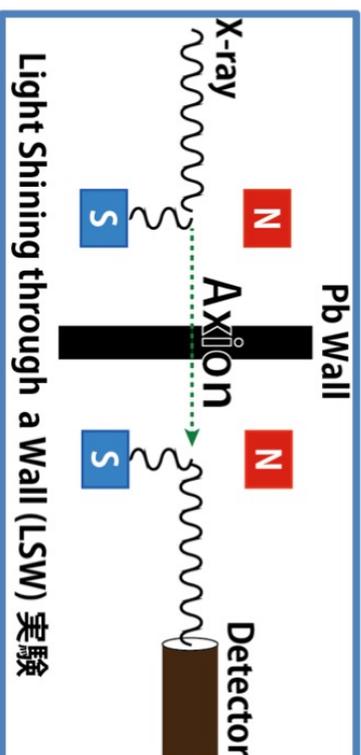
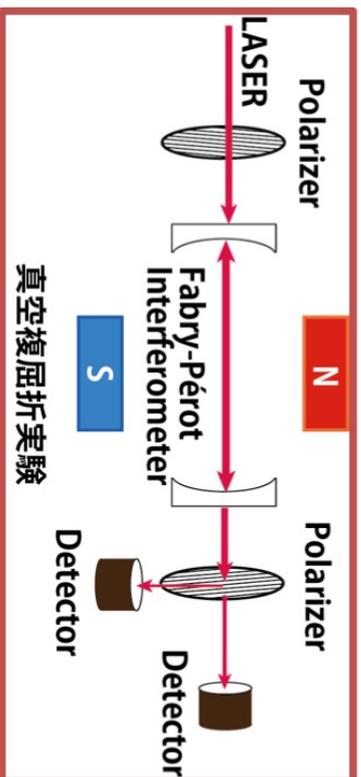
量子電磁気学QED→真空とは仮想電子対が生成消滅を繰り返している場
 真空中に磁場を印加→仮想電子対が分極し光の屈折率に異方性：真空複屈折

光と磁場を組み合わせた
 真空という場の探求



標準理論を超えた理論によって予言される光と弱い相互作用する粒子
 →Axion-Like Particle: 強い力のCP問題を解決する未知粒子

:暗黒物質の候補



III-7. 分子科学、錯体化学

1. 研究の意義

分子性結晶は分子や錯体がファンデルワールス力により凝集しており、結合エネルギーは 100 meV 程度である。これは 1000 T でのスピンゼーマンエネルギーと同程度であり、構造相転移などの劇的な磁場効果が期待される。また、分子性結晶は 1 次元や 2 次元の低次元スピン系の舞台としても重要であり、磁気異方性が小さく理想的なハイゼンベルグ系を形成する。一方、結晶を形成する分子や錯体は単体元素に比べて多様であり、バラエティに富んだ機能性物質が開発されている。特に単分子磁石と呼ばれる金属錯体は、量子トンネル過程によるスピンドイナミクスの観点から興味深く、量子磁気デバイスへの応用が期待される。極低温下での磁場によるスピン制御は、量子トンネル過程の解明とデバイス材料としての特性評価の両面において本質的に重要である。

2. 研究の現状

(1) 固体酸素： 酸素分子 (O_2) はスピン量子数 $S = 1$ の磁性分子である。100 T 磁場中での固体酸素の磁場誘起相の発見¹⁾は、分子性結晶の磁場による結晶制御の可能性をひらいた。固体酸素の結晶構造と磁気基底状態は密接に関係しており、常圧においても γ 、 β 、 α の 3 つの異なる結晶構造が降温とともに現れる。反強磁性相関が発達した低温の α 相において、 O_2 分子は格子点に分子軸が平行の配置をとるが、これは分子軌道の重なりを大きくして運動交換相互作用を大きくするためである。転移磁場以上では分子が大きくねじれ、分子軌道を互いに直交させて磁気エネルギーの利得を得ると期待される。この分子立体配置の再編成が、結晶構造を単斜晶から立方晶へと変化させると予想されており、仮定した Pa-3 の空間群が強磁場中で安定であることは第 1 原理計算から最近確かめられた²⁾。

(2) 有機分子低次元磁性体： π 電子がスピンを担うため、磁気異方性が殆ど無い理想的なハイゼンベルグ模型に近い系として注目される。一例として、BIP-BNO ($C_{20}H_{12}N_2O_2Br_{12}$)、BIP-TENO ($C_{28}H_{42}N_4O_4$) は、それぞれ $S=1/2$ 、 $S=1$ のスピンが梯子状に配置した結晶構造を持ち、1 次元と 2 次元の中間に位置するスピラダー物質として注目されている。最近、100 T 強磁場中で BIP-BNO の磁化過程が飽和まで観測され、量子モンテカルロ計算との整合性から 2 本足 $S=1/2$ スピラダー物質であることが確かめられた。³⁾ 一方で、 $S=1$ の 2 本足スピラダー物質として期待される類縁物質の BIP-TENO は、非自明な $1/4$ 磁化プラトーを示し、さらに最近、マイクロ秒の速い磁場掃引において、従来は $1/4$ プラトーが観測された磁場領域に新たな $1/3$ 磁化プラトーが観測された。磁歪測定から 1 ミリ秒という比較的長い時間スケールを境にスピン-格子分離が生じていることが明らかになり、 $1/3$ 磁化プラトーは準安定結晶状態でのスピン状態を反映していると理解されているが、微視的描像は未解明である。関連する研究として、量子スピン液体状態ではスピン系と格子系が分離することなど興味深い結果が三角格子有機磁性体で最近報告されている⁶⁾。

(3) 金属錯体、クラスター： 金属錯体やクラスターを基調とした分子性結晶では、 Mn_{12} などの単分子磁石の量子トンネル磁化過程に代表されるように、クラスターや錯体のもつ特徴的な磁気特性に興味を持たれている。磁場を掃引した際のエネルギー準位の混成から、磁化ダイナミクスに非自明な振る舞いが現れる。具体的な例として、 $\{Cu^3\}$ 三角クラスターの磁化過程において、大きな履歴や磁場反転時の非対称磁化過程が報告されている⁴⁾。さらに、多数の磁性イオンを含んだ $\{Mo_{72}V_{30}\}$ などのスピン多面体についても研究が進んでおり、 V^{4+} の球面的な 3 次元構造ネットワークがゼロ次元極限のカコメ格子と見なせることから、スピン液体などの観点からその磁気基底状態に関心が集まっている⁵⁾。シングレット基底状態について調べるには外部磁場によって磁気状態を誘起することが最も有効な手段であり、強磁場環境が研究の遂行に必須である。

3. 方向性と研究計画

分子や錯体を対象とした強磁場研究の方向性と計画について次に示す。

(1) 分子立体配置のスピン制御による磁場誘起結晶の探索

固体酸素で実現した磁場誘起新結晶は、スピンをもつ他の分子においても期待できる現象である。例えば、NO ($S=1/2$) は反応性が高く、凝縮相については不明な点も多いが、二量体化によるスピンシングレット形成が 121 K で起こることは知られている。磁場によって二量体の崩壊が 200 T までの磁場で期待され、磁化の急激な上昇と構造変化が期待できる。

(2) 様々な分子配列をもつ低次元スピン系における新規磁気量子相の探索

分子性結晶では、1次元系、三角格子やハニカム格子などの2次元系、スピンラダーのような1次元と2次元の中間の次元、と多彩な格子系を実現することが可能である。また、交換相互作用と分子の幾何学配置に密接な関係があるため、強いスピン格子結合となる。磁場によるスピン格子結合の制御の観点から、無機材料には無い多彩な系についてスピン液体などの量子現象の探索を行う。

(3) 強磁場を用いた実験宇宙学一星間物質の強磁場利用研究

生命や物質の起源を理解するために、遠方の星からの分子スペクトルの研究が行われている。白色矮星などでは、破壊的なパルス磁場を用いて地上で生成可能な1000 Tを越える磁場が存在しており、スペクトルの磁場分裂の計算と観測を比較する事で、物質の存在、集積や星の進化が議論されている。比較する理論は、非摂動的な領域になるため、比較可能な実験結果により検証する事が求められる。1200 Tの超強磁場下で分子のスペクトルを精度良く実験的に決定出来れば、計算の信頼性を向上させ、観測なら推定される星間物質の状態の理解を飛躍的に高める事が期待出来るため、これまでの常識を越えた新事実の発見も期待される。

(4) 錯体、クラスター系における量子磁性とダイナミクス

スピンのエネルギー準位を時間制御した外部磁場で直接制御し、量子トンネル過程を強く反映した磁化ダイナミクスの解明を行う。また、カゴメ格子ネットワークの様な幾何学的フラストレーションを生むような系に注目し、バルクとは異なるゼロ次元極限系でのスピン量子相の探索を行う。

4. まとめ

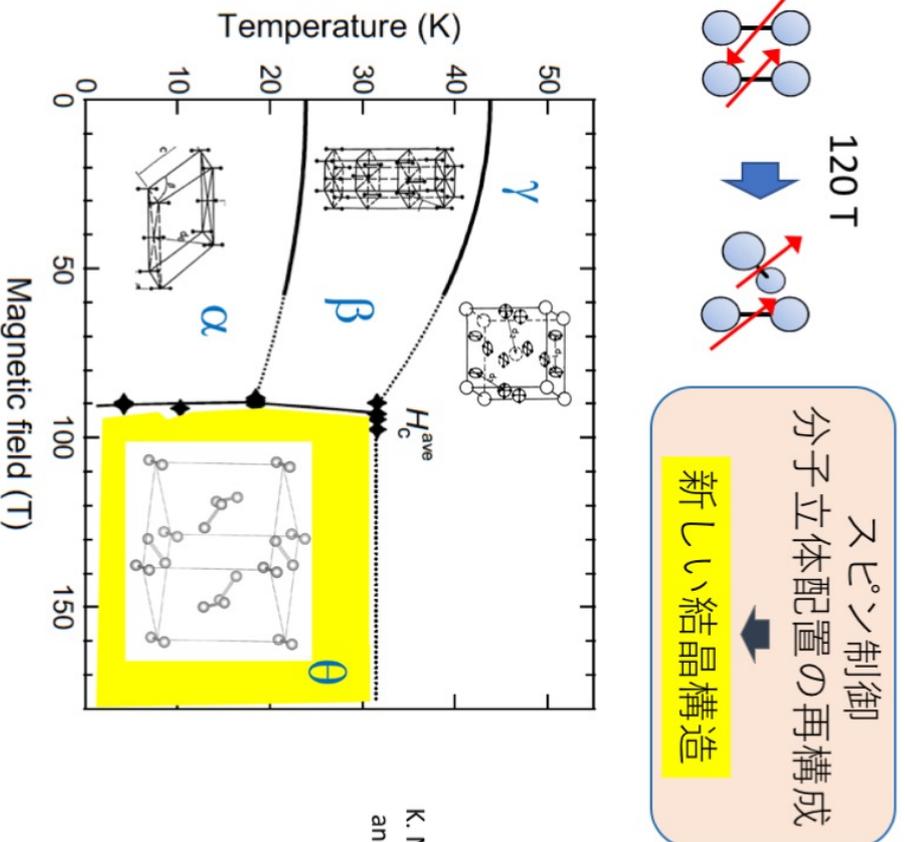
分子や錯体を基調としたファンデルワールス固体においては、強磁場中でスピン制御による新結晶が期待され、その探索と物性解明は分子性結晶の理解を深化させる。また、分子性結晶の多様性から、様々な低次元スピン系や、有限スピン数の多面体クラスターなどが合成可能であり、量子磁化ダイナミクスや、新規スピン量子相の研究が強磁場を有効に用いた研究として展開できる。

5. 参考文献

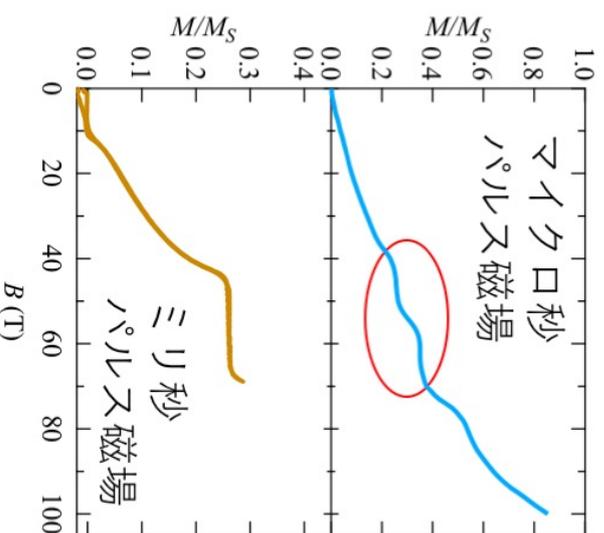
- 1) “Novel phase of solid oxygen induced by ultrahigh magnetic fields”, T. Nomura, Y. H. Matsuda, J. L. Her, S. Takeyama, A. Matsuo, K. Kindo, T. C. Kobayashi, Phys. Rev. Lett. **112**, 247201 (2014).
- 2) “First-principles description of van der Waals bonded spin-polarized systems using the vdW-DF + U method: Application to solid oxygen at low pressure”, S. Kasamatsu, T. Kato, and O. Sugino, Phys. Rev. B **95**, 235120 (2017).
- 3) “Magnetization Process of the $S = 1/2$ Two-Leg Organic Spin-Ladder Compound BIP-BNO”, K. Nomura, Y. H. Matsuda, Y. Narumi, K. Kindo, S. Takeyama, Y. Hosokoshi, T. Ono, N. Hasegawa, H. Suwa and S. Todo, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 104713 (2017).
- 4) “Observation of a Half Step Magnetization in the $\{Cu_3\}$ -Type Triangular Spin Ring”, K-Y. Choi, Y. H. Matsuda, H. Nojiri, U. Kortz, F. Hussain, A. C. Stowe, C. Ramsey, and N.S. Dalal, Phys. Rev. Lett. **96**, 107202 (2006).
- 5) “Evidence of low-energy singlet excited states in the spin-12 polyhedral clusters $\{Mo_{72}V_{30}\}$ and $\{W_{72}V_{30}\}$ with strongly frustrated kagome networks”, T. Kihara, H. Nojiri, Y. Narumi, Y. Oshima, K. Kindo, C. Heesing, J. Schnack, and A. Müller, Phys. Rev. B **99**, 064430 (2019).
- 6) “有機スピン液体物質における量子臨界現象とスピン-格子デカップリング現象の発見”, 磯野貴之, 宇治進也, 日本物理学会誌 第74巻第7号 p483 (2019).

分子、錯体における磁場誘起現象

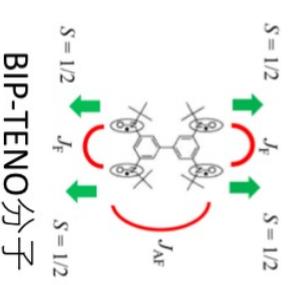
固体酸素の磁場誘起新結晶相 (θ 相)



T. Nomura et al., Phys. Rev. B 96, 054439 (2017)

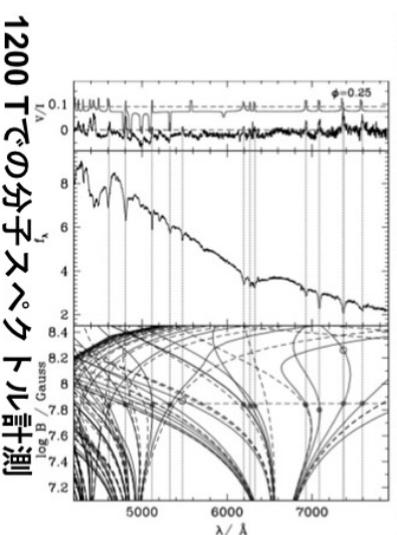


スピン格子分離と新規磁化プラトー



K. Nomura et al., 2018 16th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS)doi: 10.1109/MEGAGAUSS.2018.8722650

白色矮星近傍の物質状態を再現



1200 Tでの分子スペクトル計測

III-8. 強磁場の生物学への応用

1. 研究の意義と位置付け

強磁場の生物学研究への応用においては、強磁場が物質内のエネルギーや物質伝達に関与する電子に強く結合しながら、その一方で、生体のような外場に対して脆弱なシステムを破壊しないソフトさを持っていることを利用している。また、強磁場はX線や光に比べて、圧倒的に物質に対し侵入する度合いが高いため、水を含むような物質の内部を観測するのに適している。その一方、エネルギーが低いため、画像としてのコントラストを稼ぐためには様々な共鳴的な手法が用いられる。このような共鳴的な手法においては、強磁場化の長所は絶大で有り、感度、コントラスト、精度などを、生体に対する侵襲を起こすことなく飛躍的に向上させる事が期待出来る。また、強磁場は生命の起源に関わっているという主張もある。生物を構成するタンパク質やアミノ酸は、キラリ異方性があるが、その起源は未解明である。これを理解する仮説として、強磁場下の化学反応のキラリ依存性が関わっているという主張があり、これを強磁場下の化学反応の実験によって確認することは重要な課題とされている。

2. NMR 利用研究

上に述べたように、生物系における強磁場研究の多くは磁気共鳴に関係する。NMR と MRI が共にノーベル賞受賞にもつながったように、強磁場を利用し生物研究は歴史的にも重要な役割を果たしてきた。NMR はたんぱく質の構造解析の手法として確立していて、現在、より高い解像度を目指して高温超伝導体を用いた強磁場 NMR 装置の建設が行われてきている。現時点でプロトン NMR で 1020 MHz (24.0 T) が実現しており、1200 MHz (28.2 T) の開発が進められている。また、NMR シグナルの強度を上げるために電子スピンの偏極を核スピンの移動して核スピンの偏極を起こさせる動的核偏極法(DNP)が高強度マイクロ波光源であるジャイロトロン発振管を用いて行われている。(大阪大学タンパク研)

一方で、NMR の病理学への応用では、様々な核種(^{13}C , ^{17}O , ^{31}P など)での NMR スペクトロスコピーも病理研究(心臓病など)や代謝(脳の酸素の新陳代謝など)の医学研究に使われている。分解能は磁場強度に比例するので、より強磁場が求められており、30 T 超級の NMR が実現すれば、ノーベル賞級の研究成果が出ると期待されている。この領域の NMR 磁石を作製するには、高温超伝導材料の利用と高温超伝導材料における超伝導接合の実現という2つの技術が必要であるが、金属材料研究所は、高温超伝導材料を利用した強磁場磁石の開発に加えて、超伝導接合の研究においても、世界的な成果をあげている。これらの経験を生かして、さらに、広範な研究者の結集により、技術的なブレークスルーを世界に先駆けて行う事は、生物・生命研究分野における日本の競争力において、死活的な意味がある。

3. 磁場配向利用研究

たんぱく質構造解析のもう一つの手法である X 線回折を用いた手法で高品質で大型の単結晶試料が必要になる。強磁場を用いると、核生成が抑制され、良質の大きなたんぱく質結晶が得られる場合がある事が知られており、ここでも強磁場が利用されている。

4. ESR を用いた機能性タンパク質研究

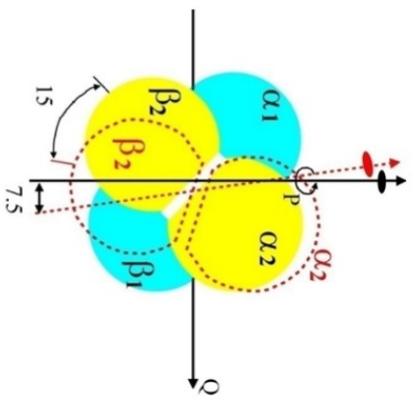
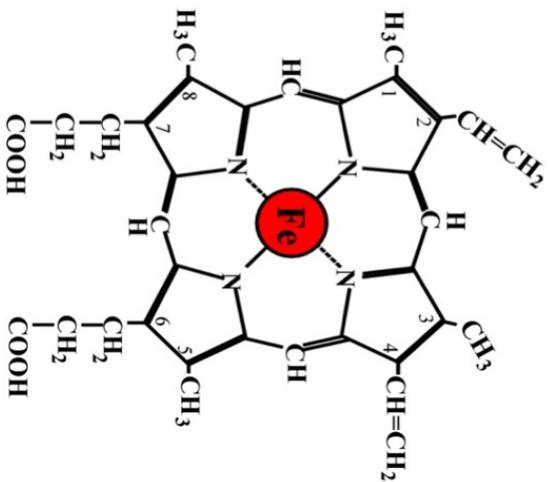
ESR はスピンラベル法を用いてたんぱく質の必要な個所にラベルし、そのターゲット間の距離(10-100 Å)を知るという手法から NMR の構造解析では扱えないような大きなたんぱく質の研究に利用されている。また、現在、競争が激化している光合成系の研究やヘム蛋白に関する研究においては、電子移動の機構に関わる金属イオンの状態を研究するために ESR が用いられている。これらの物質は、スピンの密度が極めて低く、対称性が低いために、結晶場が強い事も多いため、強磁場を利用した高周波 ESR、取りわけテラヘルツ領域の ESR の利用が期待されており、固体物理に用いられてきた ESR 分光器の高感度化が求められている。

5. MRI を用いた医療と脳科学研究

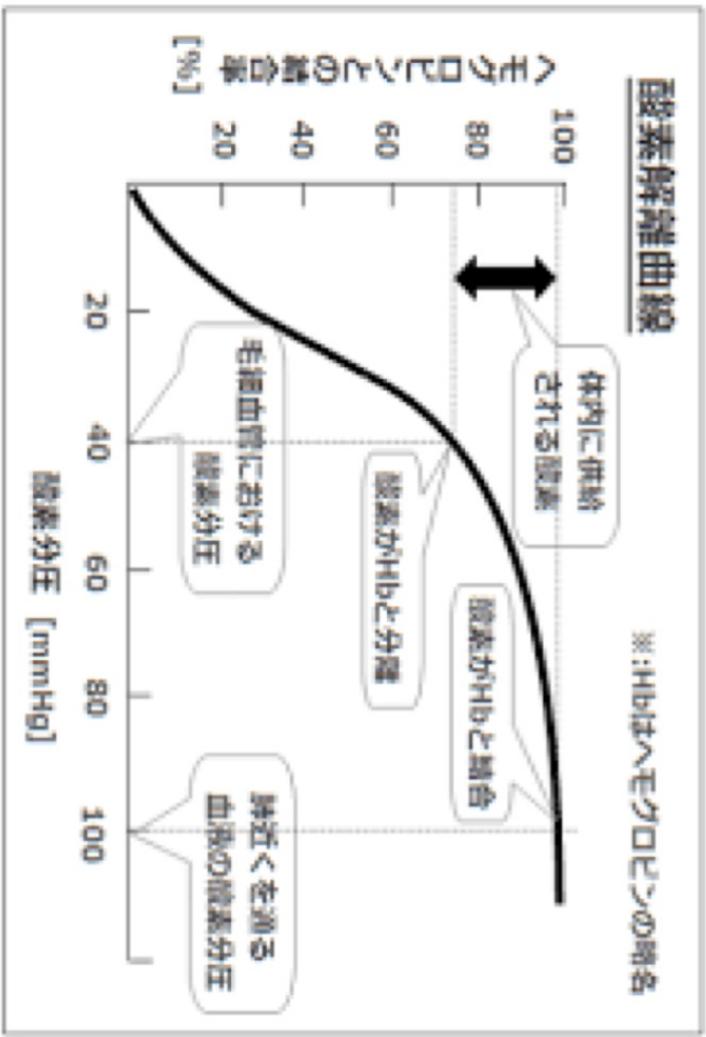
MRI は、生体で最もありふれた物質である水にあるプロトンの核磁気共鳴を利用したイメージング技術であり、X線 CT のように、放射線の照射などの問題がないため、強磁場化により、感度が向上すれば、その恩恵は計り知れない。現在、3 T の MRI が病院で用いられているが、生物研究では 20 T 級の MRI も開発されている。特に、医療用の MRI は、口径が大きいため、電磁力が強くなり、強磁場磁石の開発と技術的な問題が共通している。従って、さらなる強磁場化には、高温超伝導材料の利用が不可欠である。また、現在用いられている MRI 装置は、液体ヘリウムを利用するタイプのため、近年憂慮されているヘリウムの枯渇や高騰の問題により、医療活動が阻害されないためにも、高温超伝導を利用した無冷媒超伝導磁石の開発が求められており、この分野で世界一の技術をもつ東北大学金属材料研究所の役割が期待されている。

近年、AI や量子研究などにも大きな注目が集まっているが、機能性の強磁場 MRI は、脳のどの部分が活性化するのかを知る手法として極めて有効であり、量子研究の進展への貢献の期待は大きい。

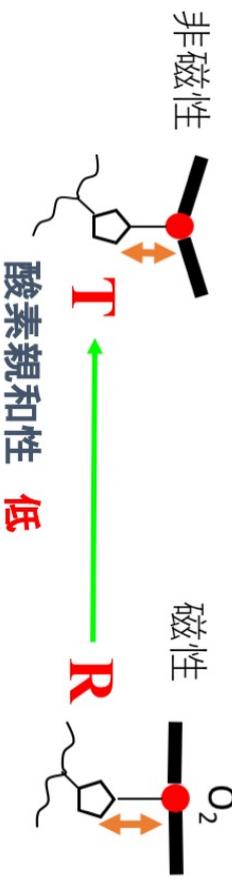
ヘモグロビン(Hb)の酸素結合機能



HbのR → T 転移
四次構造変化を伴う !!



圧力下で構造変化、磁性も変化 => 強磁場で調べる



III-9. 磁気科学分野

1. 概要

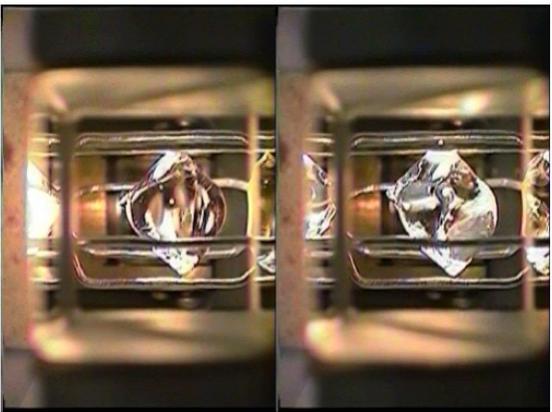
強磁場研究では通常磁気モーメントとの相互作用を用いるが、原子内の反磁性を用いる研究も行われている。その一例は、強磁場を用いた疑似無重力状態下の材料研究である。強磁場の効果は、単に重力のキャンセルに留まらず、対流の制御にも用いられる。対流の制御は、キラルなどの新しい機能の誘導や結晶成長の制御などの効果ももたらす。その他に、結晶の異方性を利用した、磁場配向なども様々な研究に取り入れられている。工業的な応用としては、磁気分離なども重要である。

2. 必要となるマグネット施設

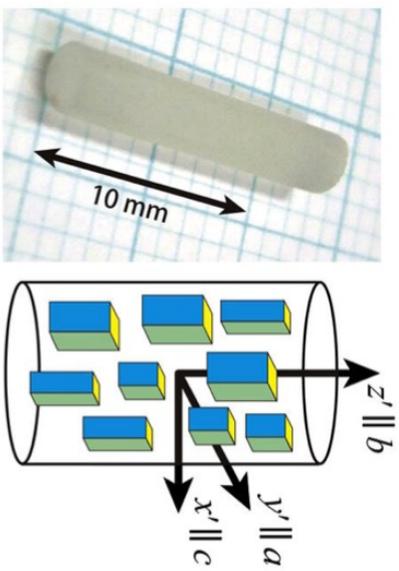
これらの研究に用いられる強磁場は、微少な反磁性を用いるので強度が強い事がまず求められる。また、実際に物質に働く力は、磁場と磁場勾配に依存するので、高磁場勾配の磁石が必要となる。例えば、水の磁気浮上に必要な磁気力場は $1360 \text{ T}^2/\text{m}$ なので、安定した実験を行うためには、可能であれば $2000\text{--}3000 \text{ T}^2/\text{m}$ の磁気力場を有する無冷媒超電導マグネットが必要となる。具体的には、中心磁場では $25\text{--}30\text{T}$ 、ボア空間が 5cm 以上が望まれる。また、磁気分離などの研究では、 5 T 程度の磁場を発生できるマグネットで、手軽に可動できるものが望まれ、超伝導バルク磁石などの利用が望まれている。

3. 研究課題

- 1) 重力制御による物質開発。重力に磁気力を重畳させ、対流制御と磁場配向により高品質の結晶を作成する。
- 2) 宇宙空間での物質制御に磁場効果を積極的に利用する。磁気力をはじめとする磁場効果は、重力の存在する環境では、重力効果に隠れて顕在化しにくい。しかし、微小重力環境では、物質制御の有効な手段になり、かつ、非接触な制御が可能になる。実際に微小重力環境で磁場効果の実験や、磁気浮上状態での磁場効果の研究を行う事が期待される。
- 3) 磁場配向による擬似単結晶の作製。すでにかなり確立された研究ではあるが、磁場が強くなるほど、サイズの小さな微小結晶や、異方性の小さな微小結晶を単結晶化することが可能になり、適用範囲が広がる。
- 4) 磁場配向の研究は数多くなされてきたが、磁場配向試料の機能性についてはあまり研究されていない。このため、磁場配向がどのような機能を材料にもたらすのかを見出す研究が必要である。異方的伝導度、光学的な異方性などの予想可能なもの以外に、触媒機能などの未知の機能発現を目指す研究が期待される。
- 5) 1000 T 以上のパルス強磁場を利用できるのであれば、弱い化学結合なら直接磁場により切断できる可能性があり、化学反応に及ぼす影響は計り知れない。新たな化学反応の探索、新物質合成などへの応用も多いに期待できる。
- 6) 磁気分離の実用化 高勾配磁場と強磁性フィルター、磁性粒子を利用した磁気分離の有用性は、様々な物質について確認されているが、超電導マグネットの利用が普及の妨げとなっている。運搬可能な強磁場デバイスの開発が待たれる。
- 7) 磁場の医療応用。薬剤を担持させた磁性微粒子を血管に入れて癌患部にピンポイントで薬を作用させる治療が考案されている。医療応用が可能な、運搬可能な強磁場デバイスの開発が待たれる。

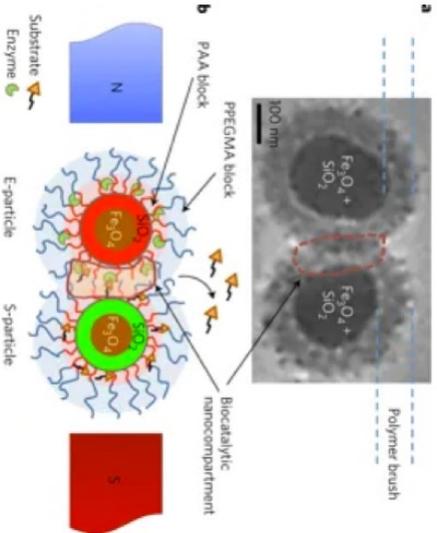


磁気浮上したガラスの
無容器溶融凝固



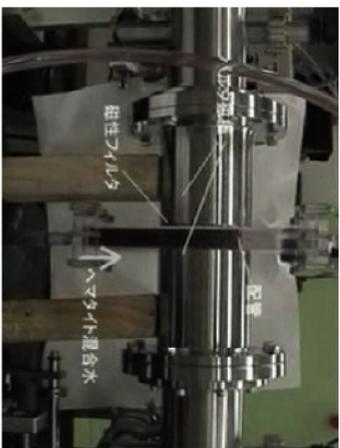
Magnetically oriented microcrystal array

微結晶の三次元配向に
よる擬単結晶作製
R. Kusumi *et al.*,
J. Magn. Reson. 223 (2012) 68.

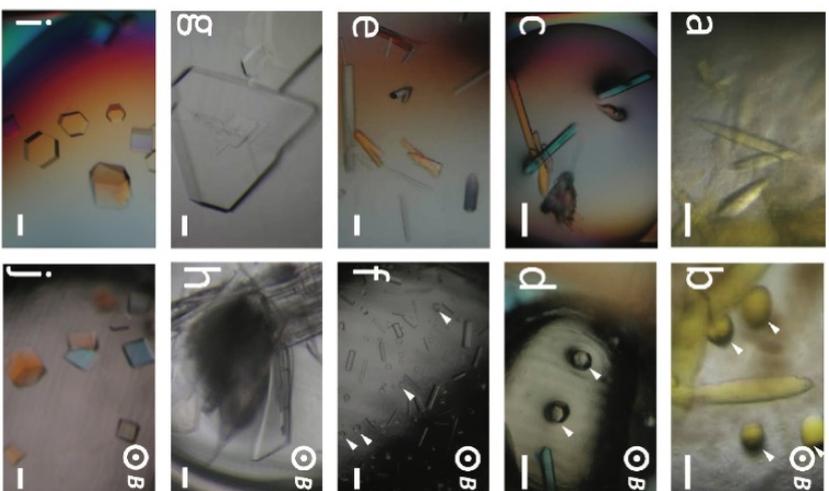


磁場による化学反応の遠隔制御

A. Zakharchenko *et al.*, Nature Catalysis 1 (2018) 73.



バルク磁石を使った磁気分離
足利工業大学 応用超伝導研究室
<http://www2.ashitech.ac.jp/elec/yokoyama/research.html>



磁気力場中のタンパク質
の結晶成長
A. Nakamura *et al.*, Cryst.
Growth Design 12 (2012) 1141.

本構想書の執筆に協力頂いた方々の氏名(順不同)

金道浩一(東京大学物性研究所)
松田康弘(東京大学物性研究所)
徳永将史(東京大学物性研究所)
小濱 芳允(東京大学物性研究所)
難波 俊雄(東京大学理学研究科)
萩原政幸(大阪大学理学研究科)
鳴海康雄(大阪大学理学研究科)
淡路智(東北大学金属材料研究所)
野尻浩之(東北大学金属材料研究所)
木村尚次郎(東北大学金属材料研究所)
茂木巖(東北大学金属材料研究所)
高橋弘紀(東北大学金属材料研究所)
植田浩明(京都大学 理学研究科)
黒江晴彦(上智大学 理工学研究科)
左近拓男(龍谷大学 理工学部)
竹端寛治(物質・材料研究機構)
中西良樹(岩手大学 工学研究科)