Can Japan Make What They Have Planned ?

野尻 浩之
東北大学金属材料研究所

Can Japan Make What They Have Planned ?

Hiroyuki Nojiri
Institute for Materials Science Tohoku University

ABSTRACT

The proposal of “High Magnetic Field Neutron Scattering for J-PARC” has been presented. The present status and the future expectation for different types of high magnetic field generators have been examined. It is concluded that a pulsed field can be the cutting edge of such science. It might be the realistic “scientific case” for a steady field case.

Keywords: high magnetic field, spin science, pulsed magnetic field

1. はじめに

強磁場は電子のスピンや軌道運動に直接結合する制御性の高い外部場であり、今日では物性研究に不可欠になっている。しかしながら、ゼロ磁場で行われている高度の研究手法の展開と比べれば、強磁場中の実験には様々な制約があり、測定手法としての現状はまだ発展途上にあると言えるだろう。特に、超電導磁石では到達できない 20 T (テスラ) 以上の領域はパルス磁場という時間変化する強磁場を用いる事から、技術的にもフロンティアである。もし、現在ゼロ磁場で行われているような多様で精緻な実験手法が、非常に強い磁場の中でも同様の質を保ちながら出来るようになれば、研究の飛躍的な発展が期待できる。最近急速に進展しているパルス磁場と放射光 X 線を組み合わせた実験はその良い例である [1]。

では中性子散乱はどうであろうか？磁性研究の必須の道具である中性子散乱において強磁場の利用は X 線以上に強く求められているところである。現時点では、定常磁場を用いた実験ではハーンマイトナー研究所が一步抜きんでていると言えるだろう。パルス磁場に関しては、日本のグループは 1986 年頃から既に繰り返しパルス磁場を用いた実験をつくばの KENS で開始し、一定の成功を収めているが、ビームの強度が弱く、先駆的であっても行えることは初歩的な段階に止まるというのが客観的な評価ではないかと考えられる [2]。

しかしながら、誤解を恐れずに言えば、この現状は強磁場コミュニティの実力不足というわけではなく、日本の中性子源が ILL や ISIS といった世界のトップより劣っている事が主な原因である事も述べてきたい。少なくともパルス磁場と中性子や X 線の組み合わせにおいては、特に技術的な側面においては日本のグループは世界でトップの位置にいと評価されている。例えば、パルス磁場中の X 線実験は、ESRF の次期計画において重要

な位置づけをされているが、彼らが計画していることの多くを既に日本の強磁場グループは実際の実験として実現しており、その先駆性は高く評価されている。この 11 月に Grenoble で開催された “Workshop on Synchrotron Applications of High Magnetic Fields” において聞いた “Japan has done what we planned” という彼らの感想は、実感がこもっている。もちろんサイエンスは、多少の先行などすぐに逆転される世界であり、これからが本勝負であることはいままでのないが、世界の中での先駆性の貴重さは強調しておきたい。

これからの事に目を向けると、J-PARC のビーム供給が始まろうとするこの時期に、これまでの日本の資産と経験を生かして、どのように本格的な研究の展開を図るかがいよいよ問われている。強磁場中性子散乱に関連する磁場発生マグネットの現状や可能性に関しては、既に本誌において金道氏により詳細に述べられているが、本稿では、J-PARC に対して提案している強磁場中性子散乱装置提案に関して紹介し、実際に日本における強磁場中性子散乱実験に対して、この提案の代表者としてどのような戦略やロードマップを考えているのかを説明する事を主な目的としたい [3]。

2. 強磁場中性子散乱の意義

強磁場中性子散乱の意義に関しては、様々な所に述べられているので、ここではごく一般的にその意義を述べるにとどめたい。広い意味での磁性および関連現象をスピン科学と呼ぶとすると、その柱はスピンと物質機能の間の相関の解明、特にその基礎となる電子状態とスピン状態の間の相関の理解である。これを知ることによって電子状態をスピン制御する道が切りひらかれる。

通常ゼーマン効果は小さい摂動と考えられているが、磁場の物質への影響は、電子がひしめきあい互いに強く相互作用し合う強相関物質等では顕

著となり、電子のもつ電荷とスピンの自由度の強い結合が梃子となりスピン偏極の効果を数十倍に増大させる。スピン偏極で結晶構造まで改変される巨大磁気抵抗効果はその例である。このような物質では電子やスピンはもはやばらばらではなく、集団として新しい相を形成する。強磁場により誘起される様々な相の起源を解明し、その制御原理を確立することは物質科学の重要な課題である。これらの相の本質に迫るのには、超強磁場中性子散乱の実現が極めて有用である事は論をまたない。より具体的な研究の課題に関しては、提案書をご覧頂きたい [3]。

3. 様々な強磁場発生装置の比較

一言に強磁場中性子散乱装置といっても磁場の範囲や発生方法は多様である。基本的には、超電導磁石、ハイブリッド磁石、パルス磁石の三つに分類できる。以下ではこれに関して順次検討するが、ここで初めに断っておきたいのは、この三つはどれも必要なものであって、どれが最も適しているのかを選択する議論をする事はあまり賢明でない。むしろ、まず何から始めるのが良いのか、すなわち順番あるいは戦略を議論することが本稿の目的である。

3.1. 超電導磁石

現時点で強磁場下の中性子散乱といえば 99.9 % 超電導磁石の利用である。ソレノイド型に限ればオックスフォードや JASTEC が 20 T の磁石を販売しており、前者は経験に裏打ちされた取り扱い易さに、後者はコンパクトさと安定度に優れている。これらは液体ヘリウムを用いる通常型の超電導磁石であるが、最近では高温超伝導の電流リードを用いて熱流入を押さえることで、冷凍機で冷却できるクライオフリー超電導磁石が開発され、メンテナンスの容易さからあまり強くない磁場の実験において多用されている。原子力機構の JRR-3 では、10 T および 13 T のスプリット型磁石が導入されて多くの実験に使用されている。このタイプの磁石ではソレノイドで 18 T のものが試作されている。従って J-PARC で初期から使用するとすれば、15 T スプリット、18 T ソレノイドの冷凍機冷却磁石を用意するのが望まれる。

これより強い磁場に関して言えば、NMR 用に 20 T 以上のものが制作されているが、磁場を頻繁に掃引して実験を行うといった目的には適していない。25 T ~ 30 T の超電導磁石に関しては、まだ線材開発の段階であり、可否も含めて目処がつくのには最低でも 5 年程度の時間が必要である。現在このような認識の元に東北大学金属材料研究所と物質・材料機構の強磁場施設の間で覚え書きが取り交わされて、次世代の超電導磁石の線材開発が行われている。線材開発においては、単に臨界磁場や臨界電流だけでなく、非常に強い電磁力によるコイルのストレスやそれに起因する性能低下にどのように対処するのかといった事も問題になる。従って、20 T 以上の超電導磁石の導入は、J-

PARC の完成後の整備の中で検討をしてゆくべき事項である。しかしながら将来磁場を使用することを見込まれる分光器においては、超電導磁石の設置において問題となる漏洩磁場に関して予め考えておくことが望ましいと考えられる。また、今後より広い分野のユーザーを引きつけようとするならば、試料環境を統合的に扱う部署を施設として持つことは必須である事を付け加えておきたい。このような機能のあるなしは、直に競争力に影響してくる。

3.2. ハイブリッド磁石

超電導磁石は、現状では 20 T、今後 10 年を考えても 30 T 以下に止まることは明らかである。従ってこれ以上の定常磁場においては水冷磁石と組み合わせたハイブリッド磁石が必要となる。現在は水冷磁石単体で 33 T 程度が、ハイブリッド磁石で 45 T が世界記録であるが、そのためには 20 MW を上回る電力を必要とする。東北大の 30 T ハイブリッド磁石でも 8 MW であるので、その大きさは想像できるであろう。

現在ハイブリッド磁石の導入を具体的に進めているのはドイツのハーンマイトナー研究所であるが、彼らはハイブリッド磁石の超電導磁石と水冷磁石で電源を共用する直列方式の導入を計画している。この形のハイブリッド磁石はアメリカ国立強磁場研究所が設計したものであるが、その特徴は超電導磁石の電流が 20 kA という非常に高電流になることで、どこまで実現可能なかは未だ完全に確立したわけではない。ちなみにハーンマイトナー研究所の第一期計画では最高磁場 25 T、散乱角 30 度のソレノイド型のコイルが計画されており、8 MW の電力で 5000 時間の使用（うち 70 % が最高磁場）で、年間の冷却水と電気の運転コストは 2 億円程度と推測されている。建設費は 10 億円程度である。日本とは電力事情が異なるので簡単に比較はできないが、同様のスペックであれば、運転経費は 3 ~ 4 億程度、建設費は 13 億程度であろう。ただし、ハイブリッド磁石は巨大になるので、ガイドホールにそのまま設置するわけにはいかずビームラインの延長や専用の建家が必要になる。建設費をどう区面するかは大きな問題であるが、運転経費も少なくない。運転経費を減らす方法としてはマグネットのコンパクト化や通常は 10 T 以下の超電導磁石部で発生する磁場の割合を高くすることが考えられるが、磁場が 15 テスラ程度であっても、口径の大きなハイブリッド磁石では電磁力が大きくなるので容易ではない。どこまでコンパクトなハイブリッド磁石が実現できるかは、今後の超電導磁石の開発にかかっている。さらにこのようなハイブリッド磁石を幾つもの分光器に設置することは現実的でないので、どのような分光器にするのかの検討も必要である。また投資が巨額になるので、どのような成果が期待されるのかの検討も必要となる。これらの事を踏まえるとハイブリッド磁石は、30 T 以上の定常磁場としては唯一の選択肢であるが、どのような形で

Fig.1 Circuit and magnet for repeating pulsed magnetic fields.

実現するかを検討するにはまだ時間を要すると思われる。

3.3. パルス磁石

パルス磁石は、純粋に技術的に考えれば、ある程度確立しており、様々な R&D は必用とされるものの、現時点で直ぐに実験が出来る事、磁場としても 50 ~ 60 T という他の手法では不可能な領域が実現できることは大きな魅力である。

パルス磁石には通常の単発型のパルス磁石と水冷式の磁石により繰り返して磁場を発生する繰り返し型の 2 種類がある。後者は、つくばの KEK において 10 年以上前から実験が行われ、最高で 25 T までの実験が行われてきた。Fig.1 にこの方式の電源の回路図と磁石の図を示す。スペックとしては、パルス幅が 1 ms、繰り返しは磁場によるが 2 ~ 10 秒程度である。中性子散乱としてはパルス中性子であるので、いわゆる白色中性子を用いた飛行時間法で測定を行っている。KENS の場合はフラックスが弱いために一つのピークを一つの磁場で測定するのに必要な磁場の発生回数は典型的には 5000 ~ 10000 回程度である。一方、単発型のパルス磁場を定常炉の中性子を組み合わせて 30 ~ 40 T の測定を可能にする試みが最近行われている。10 ms 程度のパルス磁場とした場合 3 号炉で 100 発程度の積算回数が想定されている。これら 2 種類の方法はパルス磁場といえども、かなり異なっており、場合によって使い分けることが必用となる。目安としてデータ積算に必用となる磁場発生回数が 100 回程度までは単発パルス磁場が、それ以上の場合には繰り返しパルス磁場が適していると考えられる。

繰り返しパルス磁場の特徴は、水冷型の磁石を用いることで数秒の短い繰り返しが可能な点であ

るが、達成できる磁場の強さには限界がある。一般に強磁場コイルでは流れる電流とその電流が作る磁場の間の相互作用によりコイルを変形するマックスウェル応力が発生する。強い磁場を発生するためには、コイルを多層化して、内側のコイルの電流を減らすことで、発生する磁場を同じに保ちながらマックスウェル応力を線材の強度以下に抑えるように工夫する。これに対して 1 層式のコイルでは、作られる磁場は全て自分の電流で作るので、極めて大電流のコイルにならざるを得ない。具体的には 30 T の磁場を作るため 1 層式のコイルでは 30 kA 程度の大電流が必用とされる。KEK で実験に使用された磁石は Fig.1 のようにビッター板という径方向に肉厚の薄板を螺旋状に重ねたものであり、肉厚の金属で出来た螺旋であるので、多層化は困難である。その最大の理由はパルス磁場では表皮効果のために肉厚の金属の螺旋の外に加えた磁場はシールドされてしまうという事がある。繰り返しパルス磁場でより強い磁場を発生するためには、巻き線による薄肉の螺旋型単層ソレノイドを同心円状に多数配置して多層化する事が考えられるが、この場合それぞれのソレノイドを独立に支える方法や冷却の仕方など、様々な新しい要素の検討が必要となる。従って、これまでの繰り返しパルス磁場の技術は根本的な再検討が必用であると考えべきである。

これに対して単発型のパルス磁場発生技術はこれまでの長い経験でかなり完成されており、ソレノイドで 50 T であれば数千回の磁場発生が可能である。40 T 以下であれば、さらの多数回の磁場発生が可能である。既に金道らは X 線用のスプリット磁石で 40 T を超える磁場発生を可能にしており、中性子でも単結晶を用いた回折実験においては、この方式をそのまま使用することが出来る。

パルス幅は電源にもよるが、現在特定領域“強磁場スピン科学”で J-PARC 用に導入が予定されている電源においては 10 ~ 30 ms のパルス幅が可能であり、パルス中性子の繰り返し周波数を考えれば、多数のピークを同時に測定することが期待できる。実験に必用とされる磁場発生回数に関しては強度が KEK の 100 倍以上であることを、さらに磁気散乱に有利な冷中性子で有ることを考えれば (KEK の実験においては熱中性子が利用されていた)、強い散乱であれば 1 発での測定も可能である。この場合磁場領域としても 60 T を超える磁場の利用が可能になると考えられる。J-PARC のビーム強度が数年で最高値に至る計画であることを考慮すれば J-PARC の開始直後に出来る実験としては単発パルス磁場を用いた 50 ~ 60 T における回折実験というのが妥当なところであろう。そのための検出系としては、パルス中性子で用いられる PSD 等の分解可能なマルチ検出器が最も適している。TOF 方では一回の操作で ω と θ の両方を走査可能である事は大きな利点である。ただし、ビーム強度が最終スペック通りに強くなった場合、高効率に耐えられる検出器をどのように開

発するかという課題はある。しかしながら中性子の飛行時間が遅いことを考えれば例えば IP と機械的なストリーク装置を用いた時間分解測定なども可能であり、多少の不便さをいとわなければ当面測定を行うのには既存の技術で対応が可能である。

4. JRR-3 を用いた R&D の現状

最近我々は、X 線用に持ち運び可能なパルス磁場用コンデンサバンクとミニコイルを組み合わせることで簡便に実験をする手法を開発してきた。現在 JRR-3 の AKANE 分光器において、大山、加藤らとの協力の元にこのミニコイルを用いた実証実験を行っている。Fig.2 は、テスト実験で得られた結果を示す。定常磁場においては、積算されるカウント数は積算時間に比例するので、パルス幅が長い方が有利である。ミニコイルはインダクタンスが小さくてパルス幅が長くできないので、我々はミニコイルに直列に波形成型用のチョークコイルを回路に入れることでパルス幅を長くすることに成功した。Fig.2 に改良されたパルス磁場の波形を示す。約 100 回の磁場積算で実用的なデータを取ることに成功している [4]。また、この装置の利点として、通常のオレンジクライオに装着可能であり、高圧装置と同様なアタッチメントとしての利用が期待できる事もあげられる。定常炉では単色中性子を用いるので、TOF と同様の時間分解計測系を用いることである逆格子空間における回折強度の磁場依存性を一挙に測定することが可能である。さらに最近の結果では 27 T での中性子散乱実

験データの取得に成功しており、論文化にはまだデータの集積を必用とするが、従来の中性子散乱実験の世界記録 25 T を更新することに成功している。装置としては 40 T の磁場発生も可能であり、今後数ヶ月で従来の常識を破る強磁場中の中性子回折実験に関して出版を予定している。現在最も改良を迫られているのは、磁場発生間隔の短縮であり、現状で 12 ~ 15 分程度の間隔を 5 分程度まで短縮するための改良を施している。ビームの利用効率をさらに上げるためには、ビームの他の実験との共有や試料交換機を用いることなどが考えられる [2]。

5. まとめ

以上様々な装置に関して検討をしてきたが、現時点として単発パルス磁場ベースの中性子回折実験は、実用的な段階に達しており、技術的困難は基本的でない。定常磁場に関しては超電導磁石、ハイブリッド磁石とも技術的にも未知の要素が大きく、運営経費の問題も含めて J-PARC の初期に直ぐ実現する環境にはない。以上の二つが結論である。定常磁場は、高価であるので、当然緻密な “Scientific Case” の検討が求められるであろう。しかしながら、“Science” におけるブレークスルーが予測不可能なものであることを考えれば、そのような検討が容易でないこともまた事実である。この点を考えれば、定常磁場の可能性に留意しながら、まずパルス磁場を先に進めることで、そこで得られる成果を定常磁場の “Scientific Case” とすることが、最も妥当であるというのが私の現時点での結論である。

最後になるが、我々の J-PARC に対する強磁場中性子散乱装置提案はパルス磁場から定常磁場までを包括的に含み、全ての内外の関係者に対して開かれている。具体的な実験や装置の提案などを含めて多くの方の関心と参加を期待したい。

参考文献

- [1] 松田 他, 固体物理 40 巻, 11 号 (2005).
- [2] H. Nojiri, Neutron News, 12, 279 (2004).
- [3] <http://www.hfpm.imr.tohoku.ac.jp/>
- [4] K. Ohyama et al., Proceeding of RHMF2006 (to be published in IOP conference series, 2007, February)

Fig.2 Spectrum of MnF_2 , average of 100 shots. The intensity of antiferromagnetic (100) peak changes for the spin reorientation at spin flops indicated by dotted lines.