

ユニット構築会議／学術実験プラットフォーム検討会議（第14回）議事録

日時：2021年7月19日（月）13:15-15:40

場所：オンライン

議事：

- お知らせ
- 研究テーマ紹介
 - 激変環境の物理（陰山聡／神戸大学）
- プラットフォームに関する話題提供
 - Post LHD に関する可能性の論理的整理（所長）
 - LHD の常伝導運転に向けた検討 -2-（森崎友宏）
 - 0.5 T 運転 LHD の研究プラットフォーム化に対するコメント（東井和夫）
 - 常伝導 LHD における研究テーマについて（永岡賢一）
- 次回予定（2021年7月26日（月）13:15-15:15）

書記：田中，川手

以下：敬称略

研究テーマ紹介（質疑のみ記載）

◆ 激変環境の物理（陰山聡／神戸大学）

永岡：液体金属を対向流で回したときに、大規模な磁場の反転が観測される実験があったが、プラズマを用いるインパクトは？

陰山：液体金属は確かに逆転が起きているが、綺麗な逆転ではない。双極子磁場がある程度安定に存在して、それがひっくり返る地球磁場の逆転を見たい。液体金属を使った実験について概算すると、ガリウムが大量に必要であり、重くて支え切れる壁がないと思われる。プラズマは軽くて電気抵抗が低く、圧倒的に良い素材と考える。

永岡：プラズマでもなかなか難しいというウィスコンシンの実験の印象である。実験体系をみると回転をさせればよいという実験系に見えたが、それができればファーストステップになるのか。

陰山：液体金属と違い、装置全体を回転させるのではなくて、内部に角運動量を外から注入する。回転流を作ること、および斜め方向によりヘリシティを注入することがポイント。

柳：この1～2年の話になるが、4万2千万年前に地磁気0の時期1000～2000年があり、ネアンデルタール人の絶滅に関する議論がある。まさに環境の激変である。この研究も重要になると感じている。マグネットについて、参加できそうなポイントだが、大きさ、必要な磁場、固定方法などのイメージは？

陰山：定量評価がまだできていない。プラズマジェットのスPEEDと密度を想定し、それに対して必要となる磁場強度が計算できていない。運動量の力積から極大値は計算できるので、上限を考えればそれほど強い磁場はいらない。永久磁石でも可能。

吉田：テーマとして激変環境は大きなもの。ダイナモの極反転は未解決なもので、実験的に検証を行うのは重要だが、「激変環境」という大きなものに対する本質的な貢献の具体的な部分はどこか。ベーシックなサイエンスとして環境というキーワードは大きな関心を引くが、地磁気がいつか反転す

るというのは、キーワードから喚起されるイメージからちょっと遠いのでは。これをやると何か一般的な知見が得られるのか、というところの具体性は？

陰山: 直接は繋がっていない。「環境」という言葉を用いたのは、長期的な学門的、技術的な備えを核融合研に外部から期待しているため。「長期」というのも非常に大きなキーワードとして大事になっていくのではないか。ダイナモの逆転にこだわっているのではなく、激変というのが短期のものでも構わないと考える。現在のパンデミック（コロナ禍）も今回のモチベーション。人類や文明がいかに簡単に終わってしまうか、という可能性を感じる。学問として、基礎科学として何かできるかを考えた時に地磁気逆転を通じて物理のエッセンスを抜き出し、100年～200年程度の短期の激変に対する示唆を与えられれば良いと考える。間接的につながっていると思っている。

吉田: 学術研究機関に期待されているテーマと思われるので、さらにいくつか中身が充填されていくと非常によいテーマになると思う。

プラットフォームに関する話題提供

◆ Post LHD に関する可能性の論理的整理（所長）

◆ LHD の常伝導運転に向けた検討 -2-（森崎友宏）

鈴木(康): これまで通りのメーカーではコストが高いと考えられるが、その考えかたは？ また常伝導で LHD を動かす場合、新しい研究課題として磁場配位を高速掃引する、RMP を高周波でかける等が考えられると思うが、可能性は？

森崎: 常伝導化について技術部と相談中、かなりの部分を技術部と研究部の所員で行うことを考えている。安全等メーカーに任せなければならない部分以外は、所員で行うよう非公式で検討を進めている。装置の flexibility について、RMP 電源が使えることと RMP 電流値が下がるために安価な電源が利用可能。コイルの高速掃引は熱・力を考える必要があるが、コイルのつなぎ変えに関しても自由度があると考えられる。

横山: デコミ計画は常伝導運転が始まると、先送りか？同時並行か？また、今は六十数日となっている年間の実験スケジュールは拡大されるのか？

森崎: デコミは慎重に決められた通り行う。そのためには規制庁・地元との相談が必要であり、デコミはすでに始まっていると考えている。データを早めに外に随時発信する必要がある。実験スケジュールは予算次第。朝電源を入れて、夜電源を落として冷やすような運転になるため、柔軟性は高い。

田中(将): 排ガス処理装置は今後も動かし続けるのか？

森崎: 放射線管理についてはまずは所内で議論が必要。早めに止める方向にしたい。

田中(謙): 今後すべて自分たちがやっていくとなると、今でも所員が現状忙しすぎて考える時間がないうえに、さらに研究以外の負担が大きくなる。研究に対するコストパフォーマンスを考える必要がある。一方で、学生の教育を前面に出す、という可能性があるのではないか。人材供給という点では、0.5T の装置でも可能性があるのではないか。

森崎: そんな思いまでしてやりたくない、という人も出てくるだろう。GO がかった場合は、技術部・研究部で慎重に議論する必要がある。

柳（コメント） 超伝導で運転すると、高速磁場掃引時に交流損失が問題になる。常伝導だと交流損失の問題がないため、高速磁場配位変更等は楽になるのではないか。電圧のほとんどはコイルの常伝導抵抗による電圧降下分を補償するためとなり、高速でいろいろと変えられる余地はでてくる。

柳（コメント）:0.5Tの液体窒素温度での運転を考えたが、5億円くらいはかかり、捻出が難しい。常伝導化は当初改造が必要かとも思ったが、LHD本体の改造はそれほどないと理解している。一度大きな改造を行うと元に戻せなくなる可能性があるため、LHD本体の改造はしたくない。周辺の改造のみととらえており、実現可能性は高いのではないか。

今川（コメント）：電磁力支持構造に0.5秒くらいの時定数があるので、不整磁場ができてしまうので、そちらで決まる。

柳：フラットトップを何秒持つてくるかというところで検討が必要。

宮澤:0.5Tのために、細いヘリカルコイルに2kAの大電流をながせるのか？100sq（100mm²）くらいしかないところに可能か？

森崎:発熱する時間による。定常は流せない。10秒がMax。

今川: CHSは電流密度50A/mm²で矩形波換算2秒。それに対して温度上昇は十数K。ヘリカルコイルは銅に流れることになり200mm²くらい断面積があるので、10A/mm²となり、CHSより電流密度は1/5。温度上昇は電流密度の2乗で効くので、10秒流しても温度上昇は数°C。どのくらいの時間で冷やせるか、冷却が検討課題。

宮澤：コイルが長いので抵抗も大きくなる。絶縁は持つ？

今川：そこには電圧の上限がある。5秒かけてあげるとするのは電圧のリミットもある。

宮澤：0.5Tまで行けば高βプラズマの実験にはなるのではないか。

森崎:私も絶縁が一番気になり、ブロック間絶縁は回避できるような想定。

吉村(泰): 常伝導運転になると、本体室へのアクセスが楽になる、というのは、管理区域設定は今のままで、夜の入室が楽になるという意味か？

森崎:しかるべき手続きをとって、管理区域の設定を緩和させられないかという希望的観測。放射性物質は新たに発生しないということがある。

吉村(泰): 「予算が採択されれば」という予算は、大型プロジェクトではない別の予算？

吉田: フロンティア促進事業が2022で終了する。ロードマップに載っていないものをフロンティアに乗せることはできない。可能性があるのは、文科省が仮称として用意している学術研究基盤事業。研究のプラットフォームの整備を行うためのものであり、SINET(インフラ)を想定したもの。SINETは今までフロンティア促進事業で予算化されているが違和感があり、これを基盤のものに持って行こうというものであり、これの可能性を探っている。論理的には成立する。もしそれが獲得できれば、LHDを学術基盤として整備する。実験プロジェクトは大型科研費等の別予算を取ってきとうごく。数十億ごえはマスタープラン、ロードマップになる。そのための基盤を残しておく必要がある。そのためには大きなプロダクトを生むもので無いと根拠として成立しない。目的意識を切り替えていく必要がある。新しい目的を具体的に出していく。ユニットでは学術的な研究テーマを議論しており、プラットフォームの議論が表裏の関係となる。

吉村(泰): SINET の予算は減らずに、新たな増額として認められる可能性があるのか。

吉田: SINET はロードマップに載っている事業であり、フロンティアでも可能だが違和感があり、学術基盤のフレームワークに切り替えることが考えられている。LHD はロードマップから外れるが、ロードマップから外れたものは退場しないとイケない。フロンティアは無理だが、別の名目で予算獲得が可能かは極めて難しい。理論的には交渉可能であるが、予算のパイとしては難しい交渉を考えている。

中野: 超伝導棟、総工棟、スパコンなど様々なプラットフォームも基盤事業として扱えるか。

吉田: 基盤事業に新規のものを入れるのは無理。基盤事業に関するものは、フロンティア促進事業のマネジメントに関する文書が文科省のホームページで出ている。基本的に学術会議のマスタープランを通過して、大型事業のロードマップに記載されたものが対応。2020 まで LHD は記載されていたものであり、該当している。それ以外的大型機器は基盤事業に入ることはできない。

中野: 超伝導棟、スパコン、炉工設備などは LHD を支援する装置の一部という認識であったが、基盤事業の扱いにはならないのか

吉田: スパコンは運営費交付金。基本的に LHD、フロンティア促進事業にかかわるものに限られる。そのほかのものを Piggy-back で引っ掛ける事は不可能。実情は電気代に至るまで LHD に依存していた部分があるが、基本的にそこは 0 になる。唯一可能なのは、LHD を基盤化すること。

◆ 0.5 T 運転 LHD の研究プラットフォーム化に対するコメント (東井和夫)

田中(謙): 0.5T 以下の運転で、今まで行われていないけれど面白そうな実験のアイデアはあるか

東井: 今までの繰り返しではない、という議論については、前に経験があって、その時に解析ツールやシミュレーション結果が整っていないときに、こういったことが起きましたよ、観測しましたよ、という話だったが、それらをピシッとできれば、繰り返しではないのではないか。このようなプラズマができますよ、というのがあれば、そこに持ち込める可能性はある。

田中(謙): 同じような実験でも、計測を充実させるなり、理論の成果により検証するなどが考えられる。

東井: それをもう少し面白くするためには、電磁的な乱流などもある程度出てくれば、最先端の話。低磁場になって、今ある計測器で精度が落ちたり、使えないものがあるのではないかと議論が必要。

田中(謙): 以前の低磁場の実験は charge exchange は入っていなかった？イオン温度の精度はどの程度であった？

東井: 私はわからないが皆さんがそのあとでやっているのではないかと。

田中(謙): 理論計算との比較はイオン温度が必須なので。

東井: CXRS が 0.5T でも十分使えていますよというのは、あるのか？モーショナルシュタルクエフェクトでラインのシフトが小さくなるからオーバーラップして精度が落ちないか？

居田: MSE と charge exchange は全然原理が違う。

東井: $V \times B$ が小さくなるので、Line shift が小さくなって、どうだろうか？測れるなら非常に有効。

居田: 計測上問題ないが、低磁場の時には加熱には perpendicular が寄与しないため、あまり入れてこなかった。計測と割り切れれば入れてもよいと思う。Beta パワーが増えた分だけ confinement とし

ては悪くなるというのもあったので、あまり低磁場でショートパルスの charge exchange 入れた実験はあまりなかった。

東井: 逆に言うと加熱が無くて、ただビームが入ってくれて、計測につかえるというのは逆にメリットが出るのではないか。今まで使われてなかったら、だれかこのサイクルで使って、検証した方が良いのではないか。

居田: 計測用にショートパルスを入れるというのは最近 ECH プラズマでもやるようになったが、あまりやりたがらない。charge exchange は低磁場になったから測れないというのはない。High beta 実験として密度をあげると測りづらくなる。低磁場=high beta =高密度という流れで行くと、測りにくい、低磁場で測りにくくなるわけではない。

田中(謙): イオン温度として 500eV 以下くらいになるが、それも問題ないか?

居田: プラズマの周辺の低い温度も測れている。0.5T になっても密度を上げないといけないということはないと思うので、低磁場低密度であれば測れると思う。

東井: 低磁場計測用に CXRS がやれるということであればよいこと。ECE は周波数帯が違ってダメかなと思ったり、このあたりを洗い直せば、0.5T パルス運転に対してある程度のこととはできる。High beta と言わなくても 1% 以上になれば、電磁的な効果が乱流に現れるであろうから新しい領域にチャレンジできる。

居田: Energetic particle の実験を低磁場でやるときに、密度が上がるのが嫌で perpendicular を入れなかった人が多かった印象を持っている。

東井: アルヴェン固有モードの時は確かに low density にすることとビーム速度がアルヴェン速度くらいになるように、energy の高い接線ビームを使っていた。データがいるからと垂直ビームを入れた時もあるかもしれない。

長壁: 垂直ビームを入れるとプラズマ生成の歩留まりが悪かった。垂直ビームが持ち込むガスのせいで。

東井: 計測器としてどれが使える、使えないというのをやれば、装置の方はどうなるかはこれから検討すれば、シナリオはできてくるのではないか。

居田: 計測よりも運転のやりやすさを優先したという印象。

永岡: 揺動計測の進展等も新しい展開の切り口になるだろう。

今川コメント: LHD は 3T を 20 秒で遮断するというの厳しいというのはわかっている。3T からの 20 秒遮断よりは、磁場変化率が小さいので、0.5T、5s であれば、余裕があると考えられる。繰り返す回数が増えるため、改めて評価が必要。

吉田: 目的をずらせば、あたらしい価値のある実験が出てくる。温度や β 等のパラメータの追求とは違った、様々な学術テーマを通していけば、装置のポテンシャルを生かせるであろう。東井先生の有名な仕事として揺らぎのサイズモロロジーがあって、とりわけ 3次元系の中で particle の kinetic な効果が効いているような領域の揺らぎのスペクトルから内部を調べていく話があったと思うが、やり残した事、大きな課題として面白いことはあるか。

東井: 不安定性の関係と磁場の入れ物の健全性は 3次元プラズマでどうなるかというところが面白いが、理論ではいろいろ沢山出ているが、実験でどう見えるかというところ。最近、データ駆動サイエンスの話もある。いつでも新しいアイデアをテストできるという意味では非常に良い。トカマクより使いやすいと思う。

吉田: 理論やシミュレーションからもいろんなテーマ、乱流や wave-particle interaction や様々なプラズマ中の揺らぎに関する提案、最近のデータ駆動の話もある。サイズモロロジーといったが地震学も

いろいろやっているが、プラズマの場合ははるかに複雑な分散系の話をやっている。

東井: MHD モードの周波数スペクトルの様子から、プラズマの中身を知ろうというところで、少しずつ進歩している。トラスプラズマは非常にたくさんの不安定性があるので、それをうまく使うとプラズマの中身の情報が出るのではないかと考えたり、昔のデータを解析したりしている。

吉田: ぜひ積極的に参加してほしい。

◆ 常伝導 LHD における研究テーマについて (永岡賢一)

は来週に延期