

<特集 2>

実験炉・研究炉による炉物理研究の将来に関する企画セッション開催の報告

炉物理部会 学術交流小委員会

担当幹事(任期)

東北大学 相澤 直人 (2020-2021)

東芝エネルギーシステムズ 和田 怜志 (2021-2022)

炉物理部会では、今後の炉物理分野の人材育成・教育ならびに原子炉の研究開発を進める観点から、既存の炉物理実験施設の有効活用を推進する一方で、既存の炉物理実験施設の廃止・高経年化が進んでいる現状を踏まえ、将来にわたって持続可能な炉物理分野の人材育成・炉物理研究開発のための「次世代炉物理実験検討に関する提案」を令和2年9月に取りまとめた。

我が国では、平成28年12月に開催された原子力関係閣僚会議にて、「将来的にもんじゅサイトに新たな試験研究炉を設置し、我が国の今後の原子力研究や人材育成を支える基盤となる中核的拠点となるよう位置付ける」と政府方針が示された。これを受けて、文部科学省にて新たな試験研究炉の設置に関する検討が進められ、令和2年9月に文部科学省の原子力科学技術委員会原子力研究開発・基盤・人材作業部会において、「中性子ビーム利用を主目的とした中出力炉が最も適切」との方向性が示された。その後、もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉の概念設計および運営の在り方を検討する機関として、日本原子力研究開発機構、京都大学、福井大学で構成されるコンソーシアムが令和2年11月に選定され、コンソーシアムが中心となって令和2年度中に概念設計の着手、令和4年度中に詳細設計の開始が予定されている。

このような、もんじゅサイトへの新たな試験研究炉の設置に関する具体的な検討が開始されたことや、令和2年9月に炉物理部会で取りまとめた提案を踏まえ、炉物理部会では試験研究炉の設計への要望を取りまとめる「試験研究炉検討会」を令和3年3月に設置し、幅広く議論を実施した。

以上の取り組みを部会員と共有し、議論を深めるため、令和3年9月にオンラインで開催された原子力学会秋の大会において、学術交流小委員会は「実験炉・研究炉による炉物理研究の将来」(座長 原子力機構 郡司 智)と題するセッションを企画した。本セッションでは、上述の検討会における検討結果および取りまとめた要望を大阪大学 北田孝典教授および名古屋大学 遠藤知弘准教授からそれぞれシニアと若手の目線で紹介された。最後に、福井大学 Van Rooijen 准教授から試験研究炉をとりまく課題について問題提起された。それぞれの発表についてのショートディスカッションを行うとともに、全体ディスカッションで試験研究炉や炉物理研究をとりまく課題について議論を実施した。また、セッション中は Zoom チャット欄を活用し、上記課題に関して多様な議論がなされた。次項以降にて、企画セッションの議事内容を紹介する。

炉物理部会企画セッション議事録

全体概要

2021 年日本原子力学会秋の大会 炉物理部会企画セッションを「実験炉・研究炉による炉物理研究の将来」をテーマに開催。企画セッションに先立ち新設試験研究炉に対する要望を炉物理部会のシニアおよび若手の目線で取り纏めを実施し、その内容を大阪大学 北田教授、名古屋大学 遠藤准教授から報告。試験研究炉をとりまく課題について福井大学 Van Rooijen 准教授から問題提起。最後にディスカッションを実施。

・ シニアからの要望

初めに、もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉の現在のステータスを調査し前提条件を確認。主として「研究開発」「人材育成」の観点からの要望を取りまとめた。

◆ 「研究開発」の観点からの要望

シニア WG で上がった要望としては、以下が上がった。

1. 核燃料サイクルの課題を解決できる設備
2. 炉物理基礎基盤研究拠点として、臨界試験が実施可能であること

現在検討されている試験研究炉の条件を前提とし、上記要望を満たせる試験設備として、

1. 炉心内での自由な照射場 (20 x 20 cm の領域があればスペクトルも変更可能)
2. 中性子照射ポートの多目的利用
3. 反射体領域での照射場

があれば、目的に応じた中性子スペクトル照射場を設けることができ、MA 核変換や核燃料サンプルの昇温実験、RI 製造が可能と考えられる。

試験研究炉の運転・計測に対しては、

1. 出力運転状態での実験・リアルタイム計測機能
2. ゼロ出力運転および炉内計測機能
3. 未臨界状態での運転および炉内計測機能

があれば、出力炉でしか取得できない情報を活用した動特性実験やデジタルツイン技術の研究に活用できる。また、炉物理基礎研究にはゼロ出力や未臨界でのデータ取得が活用できる。

試験研究炉の付設設備の機能として、

1. ホットセルでの中性子照射機能

2. 燃料プールや燃料貯蔵施設での炉物理実験機能（例：Studsvik 社 R2 test reactor）があれば、それぞれ使用済み燃料に対する中性子照射や新燃料・使用済み燃料を用いた臨界・未臨界実験が可能となり炉物理基礎研究に活用できる。

◆「人材育成」の観点からの要望

試験研究炉の付設設備・運営として、

1. リモート（VR）での遠隔実験参加機能
2. シミュレータの併設
3. 教育実験用マシンタイムの確保（夏休み時期は教育用マシンタイム等）

が可能となれば、人材育成・教育に活用可能となる。また実験遠隔参加や教育利用のために活用な情報提供・公開の充実が必要。

◆その他の要望・提案

試験研究炉の炉心設計としては、過去に検討された京都大学2号炉 Kyoto University High Flux Reactor の様な2分割炉心が実現できれば、SMR や MMR の実証等、将来の原子力開発に寄与する炉心設計技術向上につながる可能性がある。

今後設計・設置される試験研究炉であれば、廃炉までを考えた設計、使用済み燃料処理処分を設計段階から考慮することが求められる。また、炉物理部会として要望を提出するだけでなく、実験支援を行える体制の検討も必要。原子炉のPRとして、施設見学の容易性やチェレンコフ光見学コースの設定も有意と考えられる。

ショートディスカッション

Q. 中出力炉での炉物理活用となると PIE 試験が考えられるが、そういったディスカッションはあったのか？

A. WG 内での PIE 試験に関するディスカッションは特に行わなかった。試験用燃料や炉心仕様がすでに固まっており燃料を新たにいじるのは難しいと考えている。PIE 試験を実施する場合、照射ポートに燃料物質を入れて、ホットセルで分析するという事は可能かもしれない。

C. 他の中出力炉の設備等との比較表があると、利用者が選びやすい。

C. 運転中の炉心の上部が解放であるとか、新たに設置される試験研究炉の独自性や実施可能な試験条件等のフレキシビリティがあると、世界中から人が集まる。

・ 若手の目線からの要望

若手の定義として 40 歳未満の学生、技術者、研究者、教育者とした。

手始めに、若手にポジティブ・ネガティブ問わないブレインストーミングを実施し、ネガティブな意見としては、若手が臨界実験を実施できていなかった時期の影響が見て取れ、ポジティブな意見としては、SMR に関するものが多くあった。

ここで、若手からの要望の議論においては、既に仕様が決まっている中出力炉に限定せず、炉物理分野にとってあるべき試験研究炉は何なのかを問う形で議論を進めることとした。改めて、若手からの要望をテキスト形式で取り纏め、さらに Google Form を活用したアンケート形式での若手の意識を調査した。

若手の意識として、試験研究炉建設に対して 9 割がポジティブな意見であった。今後の研究が必要な対象は SMR や高速炉があげられ、そのために必要な施設は臨界実験設備と考える意見が多かった。一方、試験条件を自由に決められた場合に実験を実施したい割合は 4 割であり、試験研究炉は必要と考えるが実験を実施したい割合が減少している。

現在計画されている中出力試験研究炉に対して実施したい試験に対してはポジティブな回答は 3 割にまで減少。アンケートの結果から中出力試験研究炉で実施可能な炉物理実験のイメージが若手の中で沸いていないと読み取られる。

ここまでのアンケートで得られた意見を踏まえ、若手 WG で自分たちが影響を及ぼすことが可能な影響の輪の形での取り纏めを行った。その内容は、以下 4 つ。

1. 世界の炉物理実験をリードできる研究拠点構築に向けた要望
 2. 試験研究炉において求める規制対応
 3. 情報公開に関する要望
 4. 技術伝承・人材育成
-
1. 世界の炉物理実験をリードできる研究拠点構築に向けた要望
 - 1.1. マルチフィジックス実験
 - ✓ 核熱カップリングや SMR 開発に貢献する実験
 - 1.2. 革新炉・ADS の設計向上に資する積分実験
 - ✓ 余剰 Pu・MA 消滅処理技術に貢献する実験
 - ここから国産の評価済み核データや計算コード開発、V&V を発展させる必要がある
 - 1.3. 炉物理以外の実験/多目的利用
 - ✓ γ 線・中性子照射試験、RI 製造、NRG や熱利用等
 - これらを実現するためにユーザのニーズを集約し、それに応じた設計に貢献する
 2. 試験研究炉において求める規制
 3. 情報公開に関する要望

4. 技術伝承・人材育成

<若手の意見を取りまとめて、遠藤准教授の所感>

アンケートの結果から、若手の中で炉物理実験の意義が薄まっていると感じた。課題解決型の炉物理実験を知ったり実施したりする機会が不足することで、炉物理実験の新たな課題を出せないようになってきているように思われ、答えありきの炉物理実験や院生実験から脱却する必要があるとも感じる。

若手への参考情報としては、LANL で実施された ARCHIMEDES 計画のような考え方を活用すれば、革新炉など新たな設計をする上で、数値計算による予測精度向上するのに必要となる試験研究炉の条件を分析できる方法論がある点を伝えたい。こういった既存知見を十分に踏まえた上で、日本で検討すべきテーマを考えていく必要がある。

ショートディスカッション

Q. 「核熱カップリング」について若手 WG から上がっていたが、ゼロ出力炉での「核熱カップリング」というのは期待できる成果も小さいのではないか？

A. 今後は理想的な実験施設(例:設計炉心とよく似たモックアップ炉心)を作れるような時代ではないと考えられるので、利用可能な実験施設において実施可能な実験(取得可能な試験データ)を上手く活用して、設計体系の核熱カップリングに絡んだ予測精度を改善する方法論(データ同化)に繋げていくことが重要と考えている。

・ 試験研究炉/炉物理研究に対する問題提起

現状、新設予定の試験研究炉「福井炉」の特徴・仕様はほぼ決定しており、これから炉物理部会として意見を出し、設計に反映される可能性が小さい。一方で、仕様がほぼ決まっているのに運転開始までに15年以上かかるということに疑問がある。

日本の原子力の将来は暗く、このままでは「福井炉」が日本最後の原子炉となる可能性がある。また、コンソーシアムには特有のリスクがある。

日本の原子力発電事業の現状・将来として規制コストが高く、新たに規制対応をすると電気代増加につながってしまう。そのため、電気新聞でも40年超運転による初期投資低減が示されている。

日本の商用炉の運転は今後60年運転が一般となると予想し、各電力会社が新設の予算を確保できない場合、2040~2060年の間に電力の原子力割合は減少する。一方、「福井炉」は2035年以降に運転開始となる見込みで、“原子力の下り坂の時代”に運転開始となる可能性が高い。

試験研究炉に対する規制コストは高く大学による運営管理は難しいため、「福井炉」は国が戦略的な研究施設として運用する必要がある。

政治的およびその他の境界条件によるリスクがあり、コンソーシアムで実施されるプロジェクトは高額な予算のわりに成功していない。長期的な目標に対してコンソーシアム式でプロジェクトを実施すると、成果がコミットされず、結果として失敗している例が多数ある。（“紙”としての成果が上がるばかりで、実機が建設されていない例がほとんど。）

ショートディスカッション

✓ すでに仕様等が決まってしまう状況だと、結論を補強する報告書を出すことしかできない。炉物理部会として意見を出しても意味がないように感じる。

Q. MYRRHAは論文も多数出ていて、そろそろ実現するののかという認識だったが、コンソーシアムのリスクで実現しないと考えているのか？

A. MYRRHAも紙の報告書だけが出ていて、何もできていない。コンソーシアム参加機関は自分たちの予算獲得にしか興味がなく、MYRRHAを成功させることをコミットしていないので成功しないと考える。

C. 将来的に役に立つ原子炉にするためには、若手WGでまとめた要望を出して行って、現在の仕様ありきでなく目的や活用方法を見据えた議論を行っていく必要があると思う。

・ 全体ディスカッション

「福井炉」がないと炉物理の仕事は成り立たないか？

> 「福井炉」が唯一無二であれば違うが、似た炉がどこかにあるうちは成り立つという感覚

> 「福井炉」じゃないとダメだということはない。ただ、こういった機会を活かせないと炉物理分野が終焉するのではないかという危機感を、個人的には感じている。

> 「福井炉」が炉物理として挑戦にならないと思う。「福井炉」が必要かは中性子ビーム利用に疎いのでわからないが、炉物理としては面白くない

現在、炉型については中出力炉で決定されている。最終候補に残ったスペクトルシフト炉は決定された炉に似通っているが落とされてしまっている。一方で、シニア要望では中間ぐらいの特性を持った炉が活用しやすいという意見もあった。炉型に対する意見は？

> スペクトルを自由に作れば、活用手段はある

> 炉物理としては臨界集合体が圧倒的に有利で、試験研究炉が出力を持ってしまうとアクセス性とフレキシビリティが下がってしまう。ターゲットがはっきりしていない状況では、オリジナリティとアクセス性とフレキシビリティを持たせることが重要

> 炉物理として中出力炉は難しく、炉物理として追求するなら臨界集合体がいい。一方で、中性子ビームを利用する分野のユーザにとって「福井炉」は必要だろうと思う。

“炉物理実験はこれから必要か”というもっと大きな課題があると思う。今の時代に合った炉物理実験が提案されないのであったら臨界集合体さえ必要ないと思う。一方で、原子力を日本が撤退するという方針を取ったとしても、商用炉を動かしているうちは臨界集合体で教育的意義は残ると感じている。

> 国内で技術を保つことや、環境因子で国外試験炉が利用できなくなるリスクを考えると試験炉は必要だと考える。一方で、中出力炉を前提とした議論には疑問がある。15年後に運転開始されるとして、15年後の課題は何なのか？それに対して必要な機能は何か？という議論がもっと必要だと思う。

>> 炉型は限定せずアプリケーションメインで議論していくのがよい

>> 付帯設備やアプリケーションについて、シニアや若手 WG でまとめられた内容を総意とする。

若手の意見の中に SMR に活用したいというものがあつたが、新しい炉で核熱カップリングの試験を実施することで SMR の課題が解決し、“SMR が成立する”といったロジックを示していく必要があるのでは？

チャットで話題となっている、マルチフィジックス・デジタルツイン等の研究ネタでもある。「福井炉」を前提としてもできることは多岐にわたっていると言える。

● 試験研究炉の「規制」に対する意見

規制は、安易に規制を緩めるというのではなく、目標を達成するために産業界と規制側で作っていく必要がある。

規制は、ものを作ろうとしたときにやっとな規制との折り合いが発生する。作る対象が決まらないと規制との話し合いは始まらない。

● 人材育成についての意見

炉物理 RM でも公衆理解を得ていくための人材育成が必要

● 今後について

継続的に“炉物理研究の課題と未来”について議論を実施していきたい。試験研究炉への要望は、今回の企画セッションで区切りとする。

継続的な議論では、Zoom のブレイクルームや夏期セミナーで活用した oVice といった全体だけでなく少人数で話す場がある方が、若手や学生が発言しやすくなる。

<企画セッション中のチャット欄_要約>

- 試験研究炉のドライビングフォースは何か、誰か、が重要
 - 過去十年間炉物理実験無しに、やってこれたという事実は大きい
 - 炉物理の実験が必要であれば、今の時代や原子力の将来を見据えた実験の提案が欲しい
 - 炉物理の実験をするのであれば、施設は臨界集合体がベスト
 - 試験研究炉の「既定路線」を決める人が、目的量を決め、それが建設・廃炉コストに見合うゲインがあるのであれば、新しい試験研究炉が炉物理研究にとって魅力的でなくとも、計画を推進すべき
 - その中で、炉物理としてスペクトルや照射量を評価し貢献していくことができる
 - 軽水ウラン燃料の炉物理で課題を創出するのは難しい。“何のために”は重要で、将来炉を考えた時の実証段階技術を1つの炉で代替できれば、ニーズがあると思う。その場合、必要な機能は、新燃料特性や材料照射だと考えられる。
 - 炉物理の観点で考えた場合、建設費や廃炉コストを考慮すると新設炉はいらぬのではないのか？教育の観点であれば、モックアップで十分であり、ウラン燃料に触れる機会も天然ウラン等の模擬燃料で十分。新たな試験研究炉があれば SMR の設計研究には活かせるが、既存のデータの活用と足りないデータは加速器で取得すれば十分と考える。
 - 既存のデータでは不十分で、新たに炉物理の研究をするための試験炉が必要とするのであれば、何を取得するために必要なのか？加速器でなく、試験炉でなければならない必要性は何かを明確にする必要がある。
- 人材育成の観点からは、モデリング&シミュレーションの研究開発にもっとリソースを割くべき。ハードだけでなく、人材育成を含めたソフトウェアへの投資をすべき。
 - ソフトウェアへの投資をすべきという意見に賛成。
 - コストの観点からも圧倒的に効率的であり、人材育成の観点からも有益
 - ソフトウェアへの投資が十分でない
 - モデリング&シミュレーションだと炉物理だけではニーズはあまりない。熱機械・材料物性と合わせたマルチフィジックスが大事になるか？
 - CASL を参考にするのか？
 - 炉物理だけでなく横の技術との連携が必要。
 - CASL を道標にするかは意見が分かれると思うが、日本はそのレベ

ルに至っていない。

- ソフトへの注力というのは、人件費を積むということか？
 - まずは人件費（人への投資）と考える。
 - 日本はソフト開発に投資しない。この点に欧米との差を感じる。
- マルチフィジックスは、エンジニアの学習や設計改善に役に立つ。一方で、Unknown unknown がある限りどこかで実証試験は求められると思う。
- ソフトへの投資が大きくなると、原子力が減少する
- 現状のソフトへの投資はどうなっているのか？
 - 厳しい状況
 - JAEA では人材育成を意識している人が勉強会ベースで教育している
 - そもそもコード開発に携わっている人はほとんどいない
- 日本の原子力のこれからを考えると、“照射炉の予算”の必要性を説明するのは困難
 - 既存の研究炉、臨界集合体も維持が困難
 - 存在意義を明確にする必要がある
 - 新しい技術の存在を意識する必要がある。

・ 資料

若手 WG 要望案：

https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/management/miniutes/55th_handout_r1.pdf#page=9

「もんじゅ」サイトを活用した新たな試験研究炉の調査・検討

https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/gensi/000005399_00001.htm

炉物理 RM2017：

https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/roadmap/rm/rpg_rm2017.pdf

CO₂ を原料とする完全リサイクル可能なカーボンニュートラルコンクリート：

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_202104151058544435600863.html