

核融合エネルギーフォーラムITER・BA技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価WGの 検討状況について

ワーキンググループ 座長: 上田良夫

第6回核融合科学技術委員会原型炉開発総合戦略タスクフォース

委員構成

座長	上田 良夫	大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 教授
専門委員	朝倉 信幸	日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門 核融合炉システム研究グループ研究主幹
専門委員	今川 信作	核融合科学研究核融合工学研究プロジェクト 研究統括主幹
専門委員	大野 哲靖	名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻 教授
専門委員	坂本 瑞樹	筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻 教授
専門委員	鈴木 哲	日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門 プラズマ対向機器開発グループリーダー
専門委員	谷川 博康	日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門 核融合炉構造材料開発グループリーダー
専門委員	中島 徳嘉	核融合科学研究所ヘリカル研究部 教授
専門委員	長谷川 晃	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授
専門委員	増崎 貴	核融合科学研究所研究力強化戦略室 教授

本ワーキンググループの目的

1. 「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告－原型炉技術基盤構築チャート－（平成27年1月19日）」におけるダイバータ開発に係る指摘及びチャート図について、
 - ①海外動向を含めた現状認識から適切な計画となり得るか、
 - ②報告書記載の時系列展開自身が適切な計画となり得るか、
の評価と必要に応じた改善点の指摘。
 2. 「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告（平成26年7月18日）」において整理・指摘された、ダイバータ開発に関わる課題及びその解決に向けて求められる取組・体制等について、研究開発を戦略的に加速するという観点から、以下の点を検討
 - ①国内外との連携協力を視野に、国内の研究の担い手（原型炉設計合同特別チームなど組織としての担い手及び個々の研究者・技術者等）が最適な課題設定とその選択をし得るよう、目標への近接度がわかる課題設定の在り方。
 - ②特別チームや各種研究開発プロジェクトチーム（組織）、個々の研究者・技術者等を横断して課題や問題意識を共有し、かつ課題解決に向けて検討や議論を収束するための方策及び運営の在り方。
-

評価の視点(1)

- ダイバータ開発においては、機器への熱負荷と機器の除熱能力のギャップを埋める方策が必要である。このためには、炉心プラズマからエッジプラズマに至るプラズマ全体を俯瞰した熱排出の制御と、ダイバータ機器の除熱性能の向上という両面からの開発が求められる。
 - 上記のダイバータ開発の特徴を十分に把握した上で、現状の技術レベルから想定可能な技術と、原型炉のあるべき姿から求められる技術のギャップを認識し、その解決策を見いだすための取り組むべき課題や解決に必要な資源、さらに、それらの課題を解決する時期やその時系列の展開について検討した。なお検討にあたっては、合同コアチーム報告書を出発点とした。
 - 本報告書では、熱負荷等の数値目標については特に挙げていないが、機器開発など工学的な観点からは目指すべき特性を数値的に与えることは重要で、どのような手順を踏んで数値目標を与えるかについては、今後の課題である。
-

評価の視点(2)

- 実際の検討作業においては、核融合エネルギーフォーラム提言「原型炉に向けた核融合研究開発の具体化について」(平成23年1月)を踏まえた。そこでは、原型炉の熱負荷と中性子負荷を並行して試験できる装置は現在存在しないこと、及びITERでも原型炉相当のフルエンスを得ることは難しいと考えられることから、原型炉運転の初期段階では、ダイバータとブランケットを定期的に交換することや、必要な改良を行うことを前提として、原型炉の製造設計・建設段階に進むことになるとしている。本検討においてもこのことを前提とした。
 - ITERのダイバータ機器開発において実績のあるタングステンプラズマ対向材料－銅合金冷却管－水冷却を原型炉開発でも主案として、加速方策の検討を行った。
 - 一方、現在行われている様々な先進的概念・材料の研究についても、今後の研究の進展によっては有力なバックアップ候補になり得ると考えられるが、時間の制約等から、今回は研究の現状や今後の課題等について十分に検討を行っておらず、今後詳細に検討を要する。
 - さらに、ダイバータ機器と他の機器(特に炉外機器)との整合性や、ダイバータの熱利用など原型炉設計全体で考えるべき課題も残されているが、詳細検討は今後の課題とした。
-

ダイバータ研究開発の戦略的加速方策の考え方

- ダイバータを開発するに当たって重要となる様々な課題を抽出し、それをアクションプランという形で時系列で示した。
 - アクションプランを作成する際には、研究開発をスムーズに無駄なく進めることを念頭に置き、ダイバータ開発にクリティカルな課題や、重要ではあるが解決に時間がかかりそうな課題を抽出し、そこに優先的に資源を投入して、戦略的に加速することを考えた。
 - 時系列を考える際は、重要性や緊急性が高く短期間で解決すべき課題を、主に中間C&Rまでのアクションプランに入れた。
 - 重要ではあるが時間がかかる課題、新たな装置による実験が必要な課題、中間C&Rにおける研究開発状況をベースに開発戦略を立てて進めるべき課題等については、移行判断を目途に行うものと位置づけた。
-

ダイバータ研究開発に係る評価(1)

□ 海外動向等を含めた評価と提案

- 原型炉基盤構築チャートは、EU等の原型炉開発ロードマップ等を勘案して評価した結果、大筋では妥当な計画である。
- 今後解決すべき課題の詳細、具体的な方法や時期、研究の担い手や新たに必要となる研究施設・装置等については、拡充・改訂することを提案する。

□ 時系列展開に関する評価と提案

時系列展開も大筋で妥当であるが、ダイバータ開発をさらに効率的に進めるに当たり、以下の修正を提案する。

- 研究開発項目に、「ダイバータ開発目標の整合性確認と炉設計への適用」を新たに追加した。この項目では、主プラズマにおける放射損失の増加によるSOLへ排出されるエネルギーの低減、ダイバータプラズマのデタッチ化による低温化および熱負荷低減や、ダイバータ機器の除熱能力改善の成果を勘案しながら、整合性のある開発目標を設定すると共に、具体的な炉概念をとりまとめる。
 - コアチーム報告書では、中間C&Rまでに「ダイバータの使用環境を支配する物理現象を明らかにすること」と書かれている。一方で、今回の報告書では、中間C&Rでは原型炉物理概念設計が可能なレベルまで物理現象の解明を行い、移行判断までにさらに研究の高度化をはかる、というように、中間C&R以降も物理研究は進める必要があることを指摘した。
-

ダイバータ研究開発に係る評価(2)

□ 時系列展開に関する評価と提案(続き)

- ダイバータシミュレーション研究については、中間C&Rまでに、原型炉の物理概念設計に使用できるレベルのダイバータのシミュレーションコードの整備と検証(実機実験のデタッチプラズマの再現)を行い、移行判断までは、精度の高い予測を行うこと、と記述し、中間C&R時と移行判断時の目標を明確化した。
 - デタッチメントプラズマ実証については、中間C&Rでは、海外の磁場閉じ込め装置や基礎実験装置での実証を行い、その後の移行判断で、JT-60SAやITER、及びダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置(新設)での実証が必要、というように時系列を詳細に検討した結果を新たに記述した。
 - ELM様繰り返しパルス熱負荷限界を評価し、ELM制御に関する指針を中間C&Rまでに示すこと、を新たに記述した。
 - トリチウム粒子挙動のモデル構築とシミュレーションコードの作成の必要性についてはコアチーム報告書では触れられておらず、本報告書で新たに指摘した。
 - 新たな研究プラットフォームとして、ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置、中性子照射材・機器用の熱負荷試験装置の建設の必要性を指摘した。
 - 先進概念研究については、中間C&Rで「機器の成立性や適合性について中間的な評価を行うことが望ましく、開発を推進する場合は、開発戦略の策定を行う。」と記した。
-

ダイバータ研究開発の課題設定と課題解決に必要な取組・体制等に係る検討 9

- 目標への近接度がわかる課題設定の在り方の検討と提案
 - 近接度が明瞭となるような課題設定のためには、研究者や技術者が直接関わられるようなレベルまで課題をブレイクダウンし、さらにその課題がどのように原型炉開発につながるか、を具体的に示すことが必要と考えられる。本報告書では、ブレイクダウンした課題と、その中間C&Rや移行判断までに必要な成果を表にまとめ、さらにチャート図として示した。
 - 課題解決に向けた横断的な意識共有と議論・検討の収束方策及び運営の在り方の検討と提案
 - オールジャパンで活動するために、組織横断的な司令塔が必要で、原型炉設計合同特別チームの総合調整グループが体制の検討をすることが適当である。
 - 最新の情報交換や詳細な議論を行う研究会や作業会の開催には、核融合研の共同研究の枠組みを利用することが効果的である。
 - 国際協力のためには、既存の協定に基づく枠組みの利用が効率的で、多くの研究者がそれらの枠組みに参加するための制度を具体的に検討する必要がある。
 - 日本として国際協力の枠組みを総合的に利用して、原型炉開発研究を戦略的に進めるための方策を検討する必要がある。
 - 海外共同研究で日本の研究者が主導的に研究を進められるようにするためには、国内研究開発を活性化させて国外における発言力を増やすことが必要である。
-

WGが重要と判断した研究加速方策(1)

□ 海外における実機実験装置の積極的な利用

- 中間C&Rまでは、実機実験装置として、外国の大型トカマク装置の成果を最大限に活用する。これらの装置で原型炉ダイバータ設計に必要な実験を提案して共同研究を行い、ダイバータプラズマにおける物理現象の理解やダイバータプラズマシミュレーションの検証に資する実験データを取得することが必要である。

□ 海外共同研究への研究者参加促進策の整備

- 海外で必要な研究に多くの研究者・技術者が参加できるような施策が必要である。特に、JT-60SAやITERでのダイバータ研究を担う若手人材育成の観点から、海外で若手研究者がポストドクやクロスアポイントメント等を活用して研究を行える様な環境整備が必要である。

□ ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置の建設

- 原型炉の高密度ダイバータプラズマにおける物理過程を模擬できる定常高密度プラズマ装置(プラズマ密度: $\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度: $\sim 100 \text{ eV}$ 、イオン温度: $\sim 100 \text{ eV}$ 、磁場(1~2 T以上))が必要である。このようにダイバータプラズマに匹敵する高密度プラズマを、定常に生成できる装置は存在しない。この装置を国内に建設することで、ダイバータプラズマ研究の加速が見込まれる。これまで国内には、線型の大型プラズマ装置を有する研究施設などが存在し、これまでの研究開発経験を生かして建設する素地がある。
-

WGが重要と判断した研究加速方策(2)

- 中性子照射実験環境の整備と中性子照射材・機器の熱負荷試験装置の建設
 - 中性子照射装置として、当面は重照射が可能な国内外の原子炉の活用が重要で、その活用を促進するための施策が必要である。さらに、原型炉ダイバータ設計のためには、核融合炉環境を模擬するエネルギースペクトルを持つ中性子場での材料基礎データを取得する必要があり、移行判断前に核融合中性子源を利用したダイバータ機器構成材料に対する照射実験が必要である。さらに、中性子照射材料・機器の定常・非定常の熱負荷影響を調べるための熱負荷試験用装置(電子ビーム装置など)の建設が必要である。国際的に見た場合には欧州に類似の熱負荷試験装置があるが、照射材料の熱負荷実験を国内で迅速に行うためには、核融合中性子源に併設することが必要である。
- ダイバータプラズマシミュレーション研究推進のための研究資源の整備
 - 中間C&Rまでに実験で得られたデタッチダイバータプラズマのモデリングを進め、原型炉に向けて予測性能向上のための開発要素を判断するためには、現在不足している物理機構のモデリングおよびコード開発に必要な研究資源(開発者、研究者、計算機)の追加確保が必要である。また、シミュレーション用の大型計算機については、2016年末に六ヶ所のHeliosが停止するため、それに代る大型計算機の早急な導入が必要である。また、Helios停止後、新しい大型計算機を導入するまでの間の計算機能力を確保する方策を早急に検討する必要がある。
 - 人的資源として、(専門家4 - 5名 + 技術支援要員3名 + 役務発注)、計算機資源として、(2-3PF、200-300TB程度(現在のHeliosの2倍程度)、数PBの高速磁気ディスク、10PB程度の磁気ディスク、10PB程度のテープライブラリ)が必要である(運用期間を2019年-2022年と仮定、ダイバータ研究以外の活用分も考慮)。

中間C&Rまでのアクションプラン(1)

- ダイバータシミュレーションコードのSensitivity Analysis
 - ダイバータプラズマの基礎物理過程解明
 - 早期に開始するが移行判断へ向けて継続
 - ダイバータシミュレーションコードの改良
 - 早期に開始するが移行判断へ向けて継続
 - 海外大型トカマク実験への実験提案と共同研究参加
 - 基礎実験装置でのデタッチメントプラズマのシミュレーションによる再現
 - 大型トカマクにおけるダイバータプラズマのシミュレーションによる再現
 - 信頼性を高める改良は、移行判断へ向けて継続
 - ダイバータプラズマシミュレーションコードを利用した原型炉の概念設計
 - デタッチメントプラズマのリスク評価とダイバータ機器設計やプラズマ運転シナリオへの反映
 - 早期に開始するが移行判断へ向けて継続
 - タングステン-銅合金-水冷却ダイバータ機器の特性評価
 - タングステン-低放射化フェライト鋼-水冷却ダイバータ機器の特性評価
 - ダイバータ機器構成材料の中性子照射実験開始
 - 早期に開始するが移行判断へ向けて継続
-

中間C&Rまでのアクションプラン(2)

- 炭素系プラズマ対向材料の使用可能性の判断
 - 中性子照射場確保の方策の検討
 - 先進ダイバータ概念の評価と開発推進の判断
 - 先進ダイバータ材料の評価と開発推進の判断
 - 先進的磁場構造等の評価
 - 炉内粒子挙動シミュレーションコードの整備
 - 熱パルス(繰り返し熱負荷(ELM)、単パルス熱負荷(ディスラプション))のタンゲステン対向材料への影響評価
 - 原型炉で使用可能な排気装置の検討
 - 原型炉ダイバータ機器の安全性の検討と機器設計への適用
 - 早期に開始するが原型炉建設まで継続
 - 原型炉のダイバータプラズマ計測に必要な計測機器候補の選定
 - 早期に開始するが原型炉建設まで継続
-

移行判断までのアクションプラン(1)

- ダイバータ機器の保全や補修技術の評価と開発
 - 原型炉建設中も継続
 - ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置の建設と運用
 - JT-60SAにおけるデタッチメントプラズマの制御手法の実証
 - ITERにおけるデタッチメントプラズマの制御手法の実証
 - 高い信頼性を有するダイバータプラズマシミュレーションコードの作成
 - 統合コードによるプラズマ運転シナリオ提示
 - 炉内粒子挙動シミュレーションコードの高度化
 - 実機環境におけるトリチウム挙動のシミュレーションによる再現と原型炉設計への適用
 - 中性子照射材料・機器の熱負荷試験装置の建設と運用
 - ダイバータ機器特性評価のための中性子照射データ整備と材料・機器開発
 - タングステン-銅合金-水冷却ダイバータ機器の原型炉適用性の判断
 - タングステン-低放射化フェライト鋼-水冷却ダイバータ機器の原型炉適用性の判断
 - 先進ダイバータ概念の使用可能性の明確化
 - 原型炉初期におけるダイバータ機器の決定
-

移行判断までのアクションプラン(2)

- 制御・緩和法が確立したディスラプション影響を反映したダイバータ設計
 - 緩和法が確立したELM影響を反映したダイバータ設計
 - デタッチメントプラズマの実時間制御法の開発
 - 原型炉建設まで継続
 - 原型炉で使用する排気装置の決定
-

