

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ワーキンググループ
平成 28 年度活動の概要報告

1. 平成 28 年度の活動の背景

第 6 回核融合科学技術委員会において、同委員会資料 2 「『原型炉開発に向けたアクションプラン』のフォローアップについて（案）」に記載されたとおり、原型炉開発総合戦略タスクフォース（以下、原型炉 TF）の検討事項としてアクションプランの更新が指示された。さらに、その重要課題の一つとして、ダイバータが取り上げられ、核融合エネルギーフォーラムとの協力が指示された。それを受けて原型炉 TF から、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ワーキンググループ（以下、ダイバータ WG）に対して以下の依頼がなされた。

2. 原型炉 TF からの検討依頼内容とダイバータ WG の平成 28 年度の対応

- 原型炉開発マイルストーンにおけるダイバータ C&R 項目の検討
- アクションプランの具体化
 - ・高密度プラズマ実験装置の仕様策定
 - ・シミュレーション研究課題の精査とスパコンへの要求仕様
 - ・研究開発課題の具体化に関する検討
- ポスト W-Cu 合金-水冷却ダイバータ機器の検討

これらの検討依頼内容に対して、平成 28 年度は以下の対応を行った。

- (1) 原型炉開発マイルストーンにおけるダイバータの C&R 項目の記載案を提案した。
- (2) 高密度プラズマ実験装置の仕様策定に関しては、まず磁場閉じ込め実験装置や基礎実験装置（線型高密度プラズマ装置等）で研究すべきダイバータ物理課題の検討を行い、その検討結果を基に線型高密度プラズマ装置の概要を検討した。
- (3) シミュレーション研究課題の精査については、ダイバータプラズマ物理課題解決のための実験研究との連携について検討した。特に、具体的な装置として、JT-60SA を取り上げ、モデリング・シミュレーションとの連携の進め方を時系列的に検討した。
- (4) ダイバータ構造材料開発については、その研究開発のロードマップの基本方針を検討した。

なお、ポストW-Cu合金-水冷却ダイバータ機器の検討については、時間的な制約があり、来年度以降の課題とした。

3. 今年度の具体的な検討内容

3-1 ダイバータ C&R 案について

項目②（原型炉を見据えた高ベータ定常プラズマ運転技術の確立）に「JT-60SAによる原型炉プラズマ対向壁と整合した研究の開始」を付け加えること等を提案した。

3-2 ダイバータプラズマ物理課題の整理（図1-1、1-2、1-3）

ダイバータ開発研究を進めるにあたり、ダイバータプラズマを理解し、その適切な制御方法を確立する必要がある。このために、ダイバータプラズマ研究の物理課題について、磁場閉じ込め実機実験装置、及び基礎実験装置（線型高密度プラズマ実験装置）で研究すべき課題を整理し、シミュレーションとの連携のあり方を検討した。

3-3 線型高密度プラズマ実験装置の仕様策定（図2）

前項で検討した基礎実験装置で研究すべき課題について、その研究のため必要となる線型高密度プラズマ実験装置の仕様の検討を行った。特にイオン温度をダイバータ上流側の温度領域まで高めるためにある程度の閉じ込めが必要との認識から、ミラー配位をベースとした提案を行った。

3-4 JT-60SA 研究とシミュレーション研究の連携（図3）

JT-60SAによるダイバータプラズマ研究とシミュレーション研究の連携について、リサーチプランとの整合性を持たせた、具体的な研究計画の策定を行った。

3-5 ダイバータ構造材料開発計画と開発課題の整理（図4）

2020年までに、技術概念の具体化を行い、2027年までに要素技術開発が完了することを基本方針とし、具体的な研究開発課題を整理した。

以上

核融合炉ダイバータ物理課題

• 実機実験研究として

- ITER の運転領域を超える高密度 ($n_e/n_{GW} > 0.8$)、高放射損失領域 ($f_{rad} > 0.7$) でのプラズマ実験データベースの構築
- 非接触ダイバータの物理および制御
 - LHD や、JT-60SA 実験開始後において、高パワーでの非接触ダイバータ制御研究が必要
 - 開発・改良したシミュレーションの改善（拡散、ドリフト、SOL 流など）を進める
 - 核融合炉は金属壁（現時点ではタングステンを基本）であり、不純物ガスの選定・導入、W 不純物発生やコアへの蓄積制御、金属壁における非接触ダイバータの特性の解明が必要
 - トカマクにおいては、ダブル・ヌル、先進磁場配位ダイバータでの非接触プラズマ制御の検討
- トカマクにおいては、ELM の影響に関する検討
- ヘリウム、粒子排気の検討

核融合炉ダイバータ物理課題

• 基礎実験研究として

- 高密度（低温）領域での原子分子過程の理解（輻射捕獲、水素分子の効果（MAR））
- プラズマ対向材表面での粒子・エネルギー反射過程の理解
- 輻射輸送、中性粒子輸送（運動論的效果）が非接触プラズマ形成に与える影響の解明
- 同位体効果の理解
- 熱パルス印加時の非接触－接触遷移が熱負荷に与える影響の解明
- 磁場構造が非接触プラズマの位置安定性に与える影響の理解
- 非拡散的輸送現象の理解

• シミュレーション研究として

- コード改良による非接触プラズマ生成の再現
- 種々の素過程データ（粒子間衝突、粒子－壁間衝突過程）の改善
- SOL 領域プラズマ輸送モデルの検討
- 多様の磁場配位・幾何学的配位への対応
 - 予測性能を持つシミュレーションコードとして確立

図 1-1 ダイバータプラズマ物理課題のまとめ

ダイバータシミュレーションコード開発

- プラズマ輸送、中性粒子輸送、原子分子過程、不純物輸送等の非線形で複雑な相互作用。さらに、磁場・幾何形状、コパラメータ、壁材料に依存するため、理論的予測、スケーリングが困難。

→ 核融合炉におけるダイバータ特性の評価・熱制御シナリオ開発は数値シミュレーションによる

- プラズマ中の輸送（非拡散的輸送、ドリフトなど）の組み込みが必要→開発
- ダイバータシミュレーションでは、プラズマ・中性粒子・不純物・（壁）を扱う必要があるが、各々の特性・物理過程が大きく異なるため、単一モデルで扱うことは困難。

→ 各々に適したモデル化を行い、**統合モデリング**が必要。

- プラズマ 主に計算コストの観点から2次元流体モデルが主流
- 中性粒子 原子分子過程、幾何形状を考慮するため MC 法による粒子モデルが主流
- 不純物 流体モデル、MC 粒子モデル、簡易放射冷却モデル

これらを統合した、**統合ダイバータシミュレーションコードの開発**を進め、**予測精度を向上させていく**ことが重要

シミュレーションコード開発において不足している理解

非接触ダイバータの物理

- シミュレーションによる非接触ダイバータ再現の装置依存性
- 高熱負荷環境下での非接触ダイバータ（形成過程、不純物放射分布）
- 非接触ダイバータの動的特性（パルス熱負荷、長時間安定性、制御）

プラズマ

- 壁の表面状態とシース（コードの境界条件）
- 温度・密度・流速の磁力線方向の空間分布（コード比較、Super sonic flow）

原子分子過程

- 低温（<数 eV）におけるデータの信頼性確認
- 高密度環境の影響とエネルギーバランス
- 励起状態の寄与（壁からのリサイクリング、反射、等含む）
- 輻射輸送（不純物の寄与？）

壁

- 複数種イオン入射、壁表面状態、経年変化によるリサイクリング、スパッタリング、反射、吸蔵への影響（燃料、不純物）

図 1-2 ダイバータプラズマ物理課題のまとめ

非接触プラズマにおける課題

- 核融合炉（高密度、高熱流、金属壁環境下）での非接触プラズマの定常維持とダイバータ熱負荷低減

10eV 以下 10–100eV

- 高密度領域での原子分子過程
 - 電子–イオン再結合、分子活性化再結合
- 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解
 - 中性粒子温度、中性粒子輸送、輻射（光子）輸送の影響
- 非接触プラズマの動的応答
 - ELM 様熱負荷への応答、接触–非接触–再接触遷移過程
- 非接触プラズマの安定性
 - 熱的不安定性、2次元効果（部分非接触）
- 金属壁での非接触プラズマ生成
 - 適切な不純物ガスの選定、コアプラズマとの共存
- 非接触プラズマの動的制御手法の確立

原型炉設計のための非接触プラズマ研究の戦略

定常高密度ダイバータプラズマシミュレータによる基礎実験

- 高いプラズマパラメータ制御性
- 計測器の配置が容易
- 単純な幾何学的配位



核融合炉に相当する高密度領域での原子分子過程、熱流入過程（エネルギー反射など）、輻射輸送、中性粒子輸送（温度）に関する基礎データを取得



ダイバータシミュレーションコードの高精度化（予測性能の向上）

→ 非接触プラズマ実験の完全再現



LHD, JT-60SA や ITER における非接触ダイバータプラズマ実験

→ コードの信頼性の向上と検証

図 1–3 ダイバータ物理課題のまとめ

○線形高密度プラズマ装置の設計思想：

- ・ミラー配位（ミラー比 30）とすることで、閉じ込め性能を通常の線形装置に比べ向上させ、温度 100 eV を実現する。
- ・計測器を充実させ、プラズマ物理基礎過程を解明する。
- ・非接触プラズマ形成場所近傍の温度勾配のあるプラズマを実現でき、その物理過程を解明できる。

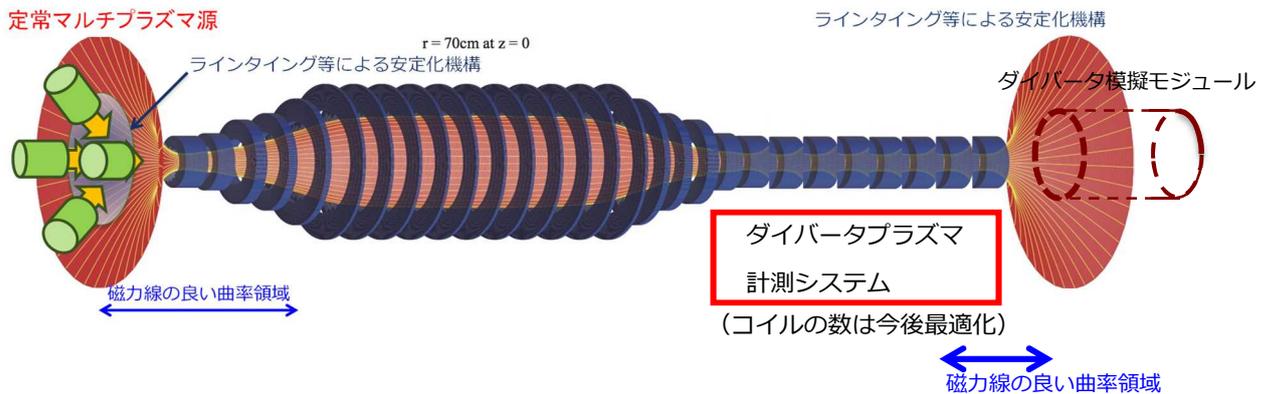
- プラズマパラメータ：高密度低温条件（密度 10^{20} m^{-3} 、温度 10e V 以下）
低密度高温条件（密度 10^{19} m^{-3} 台、温度 10e V-100 eV）
上記両条件での実験を可能とする（ハイブリッド型）

○プラズマ源：カスケードアークプラズマ源、ヘリコンプラズマ源

○プラズマ閉じ込め：単純ミラー配位（不安定性の対策有）

○プラズマ加熱：イオン加熱（ICH）
電子加熱（2 倍高調波 ECH、もしくは EBW）

磁場配位, コイルの設計 (例)



- 全長: ~20 m, ミラーズロット間: ~10 m
- セントラル部コイル内径: ~1.6 m
- セントラル部磁場: ~0.05 T
- ミラー比: ~30 (高プラズマ温度), 1 (低プラズマ温度)
- セントラル部プラズマ径: ~1 m
- エンド部プラズマ径: ~0.1 m

図2 線形高密度プラズマ装置の概要

2019

2027

初期研究期 I (1-2y)

初期研究期 II (2-3y)

統合研究期 I (2-3y)

動作ガス : H/He 放電

D 放電

D 放電

加熱パワー: 23 MW

33 MW

37 MW

ダイバータ : CFC タイル (10 MW/m² x 5s)

C モノブロック (15 MW/m² x 100s)

開発

- ✓ 中性粒子圧縮のシミュレーションによる再現
⇒ Ly 輸送・吸収(ゼーマン効果含む)コード
- ✓ 空間分布を IMPMC で再現(H, He, D 放電)
空間分布: 径方向輸送を含めた輸送の研究
形状効果(JT-60U との比較)
⇒ 現状の IMPMC (単種不純物)

開発

- ✓ Ne/Ar 入射実験のシミュレーション
⇒ 多種不純物 IMPMC (C+Ne/Ar)

開発

- ✓ Ne/Ar 入射量の実時間制御のシミュレーション
⇒ 非定常 IMPMC + Core 統合モデル(数 s~100s)

開発

- ✓ 高パワー(高放射)実験のシミュレーション
⇒ 不純物間衝突の実装

開発

- ✓ H/D~1 領域での H,D(及び T)輸送シミュレーション
⇒ SONIC(多種主イオン)+ Core 統合モデル

開発

- ✓ He 排気実験のシミュレーション
HeH 分子過程
He⁰ 準安定状態の独立粒子扱い
He 発光線吸収(ゼーマン効果含む)
He 弾性衝突効果
⇒ 多種不純物 IMPMC (He + C)

- ✓ Ne/Ar 入射した He 排気実験のシミュレーション
⇒ 多種不純物 IMPMC (He+C+Ne/Ar)

開発

- ✓ W ダイバータ検討
Ne/Ar 入射実験のシミュレーション
⇒ Ne/Ar 輸送 IMPMC + Core 統合モデル
⇒ W 輸送 IMPGYRO
W 発生量・再堆積量
⇒ EDDY / IMPGYRO 結合モデル

注:シミュレーション研究の対象はここに挙げた全ての項目において非接触プラズマ(研究期ごとのダイバータ性能(10 MW/m² または 15 MW/m²)に準ずる)である.

図3 JT-60SA 研究とシミュレーションコード開発の連携

2020 年 C&R までの実施項目

TRL2: 技術概念の具体化が完了していること

- ✓ 技術課題の洗い出しが完了し、概念選択(絞込)に要する材料技術情報が整備されていること。
- ✓ 開発の方向性を明確化して、要素技術開発項目を選定できること。

	対向材	冷却配管材料		接合部	
	W	Cu 合金	F82H	W-Cu	W-F82H
課題整理	設計要求の明確化 W 厚さの設定 各部位の負荷	設計要求の明確化	設計要求の明確化	現状技術の確認 負荷の評価	現状技術の確認 負荷の評価
非照射データ課題	W 品質に基づく<MPH/>データベース整備	設計要求に対応した MPH/>データベース整備	設計要求に対応した 管材 MPH/>データベース整備	設計要求データの特 定とデータ取得	設計要求データの特 定とデータ取得
照射データ課題	ITER-W ~3dpa 500~1200°C 高速炉照射	ITER-CuCrZr ~5dpa 250~400°C (高温側が未整備)	F82H 管材データ ~20dpa 300°C	過去データ調査 イオン照射評価	イオン照射評価
耐環境性データ	酸化挙動データの取得	腐食データ・流動腐食データの調査(含:T 水腐食)	腐食データ・流動腐食データの調査(含:T 水腐食)		

2027 年までの実施項目

TRL4: 要素技術開発が完了していること

- ✓ 原型炉ダイバータ概念を確定できるに足るデータベースを整備する。

	対向材	冷却配管材料		接合部	
	W	Cu 合金	F82H	W-Cu	W-F82H
課題整理	候補材として選定された W (W 合金) の使用限界条件の明確化	候補材として選定された Cu 合金の使用限界条件の明確化	使用限界(寿命判断)条件の明確化	選定された接合法の各システムでの、使用限界(寿命判断)条件の明確化	選定された接合法の各システムでの、使用限界(寿命判断)条件の明確化
非照射データ課題	候補材として選定された W (W 合金) のデータベース整備	候補材として選定された Cu 合金のデータベース整備	設計要求に対応した 管材データベースの整備	照射効果を考慮した	設計要求データの特 定とデータ取得
照射データ課題	~10dpa 500~1200°C 高速炉照射	~5dpa 250~400°C (高温側が未整備)	F82H 管材データの拡 充 ~20dpa/300°C	~5dpa 250~400°C 高速炉照射	~5dpa 500~600°C 高速炉照射
耐環境性データ	酸化、スパッタ特性のデータベース化	腐食データ・流動腐食データの整備(含:T 水腐食)	腐食データ・流動腐食データの整備(含:T 水腐食)		

図 4 ダイバータ構造材料開発計画