

# ダイバータ物理検討ワーキンググループ 報告書

## Working group report on the divertor physics researches

原型炉設計合同特別チーム

Joint Special Design Team for Fusion DEMO

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

**National Institutes for  
Quantum and Radiological Science and Technology**



ダイバータ物理検討ワーキンググループ  
報告書

平成 30 年 5 月

原型炉設計合同特別チーム



# 報 告 内 容

|     |                                                                          |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | はじめに：活動趣旨と概要                                                             | 1  |
| 2.  | 非接触ダイバータ発生機構の理解と制御に関する検討内容                                               | 2  |
| 2.1 | ダイバータ物理検討ワーキンググループ (WG) の役割                                              | 2  |
| 2.2 | 原型炉での非接触ダイバータの発生機構理解と制御設計への物理検討目標                                        | 3  |
| 2.3 | ダイバータ開発・プラズマ運転シナリオに関する具体的な研究計画の概要                                        | 7  |
| 2.4 | 「中間 C&R」および「移行判断」に向けたまとめと意見                                              | 10 |
|     | 添付 表 2-3 アクションプランを達成するための研究提案 (簡易版)                                      | 13 |
| 3.  | 非接触ダイバータ発生機構の理解と制御に向けたアクションプランへの寄与<br>--- 各研究機関からの報告                     | 16 |
| 3.1 | 非接触プラズマ・シミュレーションによる原型炉ダイバータ設計 (QST)                                      | 16 |
| 3.2 | JT-60U/SA/ITER における非接触ダイバータ実験・制御研究および開発計画 (QST)                          | 22 |
| 3.2 | シミュレーションコードと非接触ダイバータモデリングの開発計画 (QST)                                     | 26 |
| 3.4 | 非接触ダイバータ実験・制御研究およびシミュレーション開発にむけた LHD 研究計画 (NIFS)                         | 29 |
| 3.5 | 非接触ダイバータ実験研究およびシミュレーション開発にむけた GAMMA10-PDX とパイロット装置での研究計画 (筑波大プラズマ研究センター) | 32 |
| 3.6 | 直線装置における非接触ダイバータ実験研究、計測装置およびシミュレーション開発にむけた計画 (名大、東海大等)                   | 36 |

## 添付資料：

A-1 ダイバータ物理検討ワーキンググループ委員名簿、会合開催日程と議事

A-2 アクションプランを達成するための各研究機関による研究提案 (詳細版)



## 1. はじめに：活動趣旨と概要

ダイバータ物理検討ワーキング・グループ (WG) は、「原型炉開発総合戦略タスクフォース」により提案された原型炉アクションプランへの対応するために、原型炉設計合同特別チームにより設置された。活動内容としては、原型炉アクションプラン中の項目「3 ダイバータ」の実現に向けた具体的な物理課題を検討すると共に、どの国内研究施設・機関が、モデル開発や実証 R&D をどの程度可能であるか、について報告することを主な目的と考えている。特に、ダイバータ WG 報告書[1]に記述された物理研究・開発内容を具体化することに寄与する。

2017年度は、「3 ダイバータ」のアクション項目中、最も重要な物理課題である「非接触ダイバータの発生機構解明と制御手法」の解決に向け、現状の実験及びシミュレーション計画をベースに主な研究機関 (Q: QST, N: NIFS, 大: 大学, C3: 筑波大学プラズマ研究センター) から提案された研究・開発目標と手法 (モデリング開発と実験検証) を議論し整理した。非接触プラズマは、単純な直線磁場装置からトカマクやヘリカルなどの閉じ込め実験装置のダイバータに至るまで一般に発生が観測され、核融合装置ではダイバータ板への熱負荷および粒子負荷を低減するための手段として、その発生予測 (シミュレーション) と制御 (フィードバック) は不可欠である。しかしながら、実際のトカマク・ダイバータでの磁場形状および幾何形状ではプラズマ、水素の原子分子、および不純物原子やイオンの物理機構が絡み合い、複雑なポロイダルおよび径方向分布を持つ非接触プラズマが発生するため、現在の実験装置においてさえ測定結果を精度良くシミュレーションで再現するには至っていない。

本報告書では、「原型炉設計に向けた非接触ダイバータの発生・制御および熱負荷の低減」に必要な「実験研究とシミュレーション・モデリングの開発・実証計画」を、主要な要素 (物理分野) に整理した (第2章 2.2 節)。次に、ボトムアップ的に各研究機関から提案された具体的な計画が、アクションの「中間 C&R」および「移行判断 (原型炉段階への移行判断)」の際に、どの物理分野の目標達成に寄与するかについて整理し、それらの概要を第2章 2.3 節および章末の表 2-3 に、今回の検討から「中間 C&R」および「移行判断」に向け共通の意見を第2章 2.4 節に、まとめた。第3章には各研究機関から提案された計画の補足説明を示す。今回、国内のプロジェクト、基礎実験、およびモデリングやシミュレーション開発を進めている異なる研究機関が、原型炉のダイバータ設計に不可欠なシミュレーション開発のため、何の検討成果を、どの時期に寄与できうるかをまとめた意義は大きい。

一方、本報告書に記述された具体的な研究・開発案は、各物理分野の目標達成、すなわち、原型炉条件でのシミュレーションとダイバータ設計への信頼度を上げるためには十分とは考えていない。また、アクションプランの時間ステップを考慮すると優先的に進めるべき (加速が必要な) 研究開発の選択も必要である。今後は、各研究分野の目標に近づくために、基礎研究および閉じ込め装置実験で優先的に進めるべき (加速が必要な) 実験とシミュレーション開発について、さらに明確にする必要がある。

## 参考文献

- [1] 「ダイバータ研究開発の戦略的加速の方策に関する評価・検討報告書」  
平成 27 年 12 月核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会

## 2. 非接触ダイバータ発生機構の理解と制御に関する検討内容

### 2.1 ダイバータ物理検討ワーキンググループ (WG) の役割

特別チームで検討が進められている核融合出力：1.5-2GW、主半径：8-9m の定常運転トカマク炉 [1-4] を想定した原型炉の熱排出シナリオおよびダイバータ設計 [2] は、ITER のダイバータ設計概念に基づく一方、より大きな熱パワーに対処するため非接触プラズマの生成と制御を確実に行うことが最も重要な課題である。その手法としては、シミュレーションコードに予想される物理過程モデルを組み込み、現在の実験装置規模で得られる結果を反映するとともに、影響の大きな機構を見極め、高い精度の評価が可能となるまで改善することが不可欠である。

ダイバータ物理検討WGでは、「3ダイバータ」中のアクション項目（表2-1参照）について、具体的にどのような物理課題（目標・目的・段階）を、国内のどの研究施設・機関で、どのようなモデル開発や実証R&Dで達成可能か、をまとめることを目的と考えている。

| 3. ダイバータ開発                                       | 概念設計の基本設計（～2020年頃）                                                          | 概念設計（～2025年頃）                                     | 工学設計（～2035年頃）                                        |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| (3-1)ダイバータ開発目標の整合性確認と炉設計への適用<br>(ダイバータ方式の分類を簡易化) | (18)特/Q/N/大:W水冷却ダイバータ機器の原型炉適用性の判断(26)<br>(15)特/Q/N/大:先進ダイバータの評価と開発推進の判断(19) |                                                   | (27)特/産:ダイバータシステムの工学設計→(35)                          |
|                                                  | (16)Q/N/大/特:中性子照射材料・機器の熱負荷試験装置の開発とコールド試験(26)                                |                                                   |                                                      |
|                                                  | (16)Q/N/大/特:中性子照射材料・機器の熱負荷特性データ取得(35)                                       |                                                   |                                                      |
| (3-2)プラズマ運転シナリオ                                  | (16)Q/特/N/大:ダイバータプラズマシミュレーション開発(26)                                         | (24)Q/N/大:統合コードによるプラズマ運転シナリオ提示(35)                | (27)Q/特/N/大:ITER/JT-60SAダイバータプラズマのシミュレーションによる再現→(35) |
|                                                  | (16)Q/N/大/C3:ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置の開発と実験(26)                                  |                                                   |                                                      |
|                                                  | (16)Q/N/大:デタッチメントプラズマの実時間制御法の開発(26)                                         |                                                   |                                                      |
|                                                  |                                                                             | (20)Q/N/大:ITER/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(35) |                                                      |
|                                                  |                                                                             | (20)Q/N/大:ITER, JT-60SAにおけるダイバータシステムの最適化(35)      |                                                      |
| (3-3)材料・機器開発                                     | (15)Q/N/大:ダイバータ機器構成材料の中性子照射影響(35)                                           |                                                   |                                                      |
|                                                  | (16)特/Q/大/産:ダイバータ機器の保全や補修技術の評価と開発(26)                                       |                                                   |                                                      |
| (3-4)粒子制御                                        | (16)Q/N/大/特:炉内粒子挙動シミュレーションコード(35)                                           | (23)特/Q/N/大:実機環境におけるT挙動シミュレーション→(26)              |                                                      |
|                                                  | (16)特/Q/N/産:原型炉で使用可能な排気システムの検討(26)                                          |                                                   |                                                      |

表2-1：原型炉アクションプラン中の項目3ダイバータ（2017年度版）。2017年度にダイバータ物理検討WGでアクションを検討した課題を赤字で示す。

2017年の活動では、「3ダイバータ」の物理検討に関係する主な研究機関（Q：QST, N：NIFS, 大：大学, C3:筑波大学プラズマ研究センター）の代表研究者により、6回の会合(各半日)を持ち、「プラズマ運転シナリオ」において原型炉ダイバータ設計のため特に重要な物理課題(表2-1中の赤字項目：非接触ダイバータのダイバータシミュレーション開発と実験結果の再現、ダイバータ運転シナリオの提示、および非接触プラズマの実時間制御手法の開発と実証)の解決に向け、現状の実験及びシミュレーション研究計画をベースに各研究機関から提案された目標と手法（モデリング開発と実験）を整理した。国内のプロジェクト、基礎実験、およびモデリングやシミュレーション開発を進めている異なる研究機関が、核融合炉のダイバータ設計に不可欠なシミュレーション開発のため、どの時期に、何を寄与できるかをまとめたことに意義は大きい。



本年度は、「非接触ダイバータの発生・制御および熱負荷の低減」と「実験研究とシミュレーション・モデリング開発」についての開発・実証課題を、物理研究分野の観点からそれぞれの研究機関で共有できるように区分した。しなしながら、実際のダイバータ形状において複雑な物理機構が絡み合い発生する非接触プラズマ現象のシミュレーション開発と原型炉ダイバータ設計を行うために、十分なものではない。今後は、それぞれの物理研究分野で、開発・実証および基礎研究において何を優先的に解明するか整理・共有することが必要と考える。

核融合エネルギーフォーラムITER・BA技術推進委員会の下に設置されている「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」（ダイバータWG）では、ダイバータ研究開発の戦略的加速の方策を検討し報告（前節 [1]）しているが、その物理研究・開発を具体化するため本活動の結果を報告する。

## 2.2 原型炉での非接触ダイバータの発生機構理解と制御設計への物理検討目標

原型炉ダイバータにおける「非接触ダイバータの発生・制御および熱負荷の低減」と「実験研究とシミュレーション・モデリング開発」のため以下の検討目標を設定した。原型炉のダイバータプラズマにおいて、非接触プラズマ発生領域（イオン化フロントおよび放射損失ピーク）と近傍でのイオン・電子温度の評価、およびその下流で運動量およびイオン束が急激に減少する過程を解明し、それらをシミュレーションするコードをアクションプランの「工学設計」期間早期に完成を目指す。同時に、非接触プラズマを想定したプラズマシースでのダイバータ板への熱負荷評価（表面再結合過程や放射熱負荷を含め）の精度を高める。それにより、非接触プラズマ分布（幅）の制御や熱負荷の低減により効果的なダイバータ・サイズや形状を、「工学設計」に反映できるようにする。また、接触プラズマ領域での対向炉の実効的な損耗モデルを完成し、評価を行うとともに損耗率の低減を検討する。さらに、原型炉ダイバータにおいて大きな放射損失領域をダイバータレック上にて維持・制御し、コアプラズマに近いX点付近の高温プラズマを維持する手法を実験で「工学設計」時期に示すと共に、原型炉条件で使用可能な動的（非定常）シミュレーションを完成することが優先課題である。

検討目標を達成するため、磁場形状の異なる閉じ込め装置の研究とともに、磁場・対向機器の形状が単純で詳細計測が比較的容易な基礎実験からの寄与を分かりやすくするため、精度を高めるべき物理検討分野と物理機構を以下の様に2つの大項目とそれぞれ6および3つの小項目に区分した。シミュレーションコードの構成やダイバータ設計概念との対応を図2-1～図2-6に示す。

1. 原型炉ダイバータでの非接触プラズマの発生機構の解明・モデリングと熱・粒子負荷の評価
  - 1.1 非接触プラズマ発生における水素に関する原子・分子過程：  
体積再結合および分子再結合、弾性散乱、表面再結合・リサイクリング
  - 1.2 非接触プラズマ発生におけるプラズマ輸送：  
主に拡散とドリフト効果、プラズマ流の発生（SOLでの電場も含める）
  - 1.3 非接触ダイバータにおける放射損失とピーク位置：  
主に、放射損失制御に使用する不純物候補に対して、磁力線方向の輸送モデルと拡散の評価、イオン化と再結合過程、ダイバータおよびSOLでの不純物イオンの遮蔽効果

- 1.4 部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果の検証：
    - 特にダイバータ長、閉構造、傾斜角とVコーナーなど
  - 1.5 非接触プラズマでの熱負荷評価：
    - 輻射吸収、プラズマ対向条件、表面再結合などの評価
  - 1.6 部分非接触プラズマでのタングステン損耗評価（特に不純物イオンによる）
2. 原型炉ダイバータの非接触プラズマを維持・制御する実験と動的モデリングの開発：
- 2.1 (部分・完全) 非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置の制御：
    - ダイバータレッグでの放射損失の維持、トランジェント熱負荷への対処、制御用計測（分光、ボロメータ等）とアクチュエータ（ガス種、パフ位置、加熱）設計
  - 2.2 X点放射損失ピークにおけるダイバータとコアプラズマ特性
  - 2.3 (部分・完全) 非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気性能の検証

以下にそれぞれの項目を説明する：

- 1.1 非接触プラズマ発生における水素に関する原子・分子過程：
- 1.2 非接触プラズマ発生におけるプラズマ輸送：
- 1.3 非接触ダイバータにおける放射損失とピーク位置：

図2-1に示す様に、主に非接触プラズマの発生（放射損失の増加と共にプラズマ低温化による運動量およびイオン束の損失現象）に関する、それぞれ原子・分子再結合、プラズマ輸送、不純物イオンの輸送と放射損失、のモデリング（シミュレーションコード）を、実験研究をベースに原型炉 SOL・ダイバータ条件にも適応できるようにする。特に、図2-5に示す非接触プラズマの発生領域（イオン化フロントおよび放射損失ピーク）とその近傍でのイオン・電子温度の評価、および、その下流で運動量およびイオン束が急激に減少する過程を解明し、モデル化することを目指す。

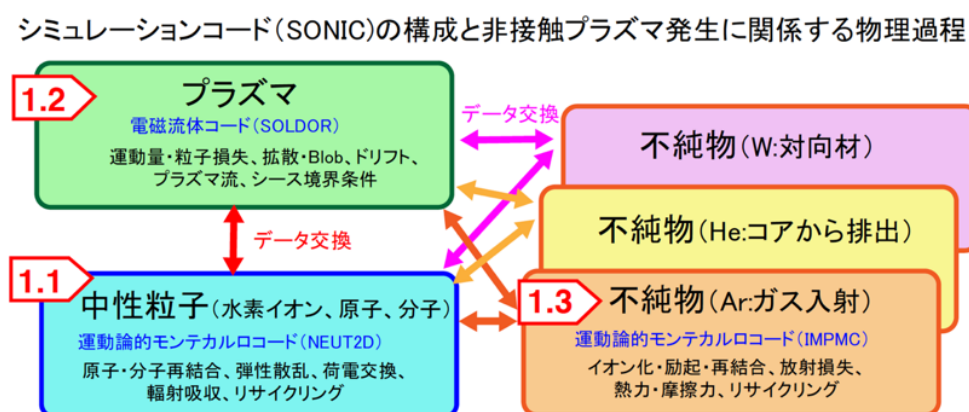


図2-1：QSTで開発しているダイバータシミュレーションコードSONIC [5,6]を構成するコード名(SOLDOR:プラズマ輸送、NEUT2D:中性粒子輸送、IMPMC:不純物輸送)と、モデリングが必要な主な物理過程。2017年より複数の不純物を計算（運動論的モンテカルロ計算）可能になった。

#### 1.4 部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果の検証：

図 2-2 で示す様な具体的なダイバータ形状にて、(外側) ストライク点付近が非接触プラズマとなる「部分非接触」状態 (図 2-3、2-4) のプラズマ分布 (非接触の幅など) が決まる要因 (および内側では完全非接触となる要因) を解明する。特に、非接触プラズマ発生領域の分布 (幅) がダイバータの磁場形状や幾何形状および排気などの設計要素によりどの程度制御できるかを評価し、ダイバータの形状を改善する。

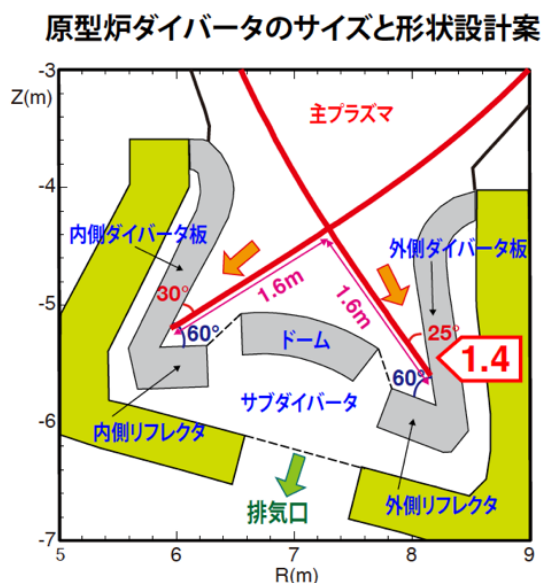


図 2-2：日本の原型炉のダイバータ形状 (2016 年案) [2]。

#### 1.5 非接触プラズマでの熱負荷評価：

図 2-3 で示す様な非接触プラズマを想定したプラズマシースでのダイバータ板への熱負荷評価 (表面再結合過程や放射熱負荷を含め) の精度を高める。

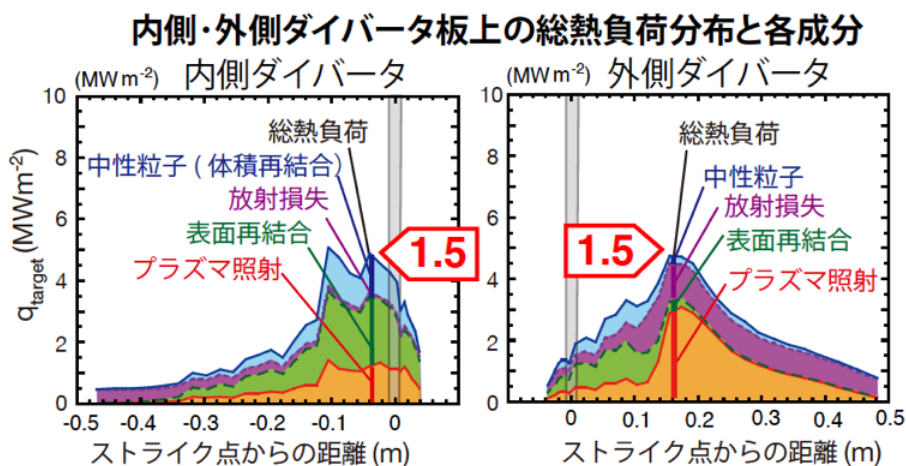


図 2-3：SOL への排出パワーを 250MW とし、周辺・SOL・ダイバータでの総放射損失パワーを 200MW としたときのシミュレーション結果：内側・外側ダイバータ板上での熱負荷成分と総熱負荷分布[2]。

## 1.6 部分非接触プラズマでのタングステン損耗評価：

図 2-4 で示す様に、特にプラズマ温度の高くなる接触プラズマ領域での対向材の実効的な損耗モデルを完成し、評価を行うとともに損耗率の低減を検討する。

### 部分非接触プラズマでの密度・温度分布

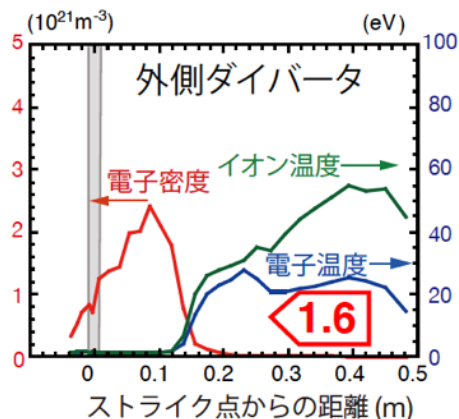


図 2-4: 図 2-3 の外側ダイバータ板における部分非接触プラズマの温度・密度分布[2]。

## 2.1 (部分・完全) 非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置の制御：

図 2-5 で示す様な原型炉ダイバータで大きな放射損失領域をダイバータレッグ上にて維持・制御し、コアプラズマに近い X 点付近の高温プラズマを維持する制御手法を実験で示すと共に、原型炉条件で使用可能な高精度の動的モデルを完成する。

### 長いレッグの原型炉ダイバータでの非接触プラズマ制御(シミュレーション)

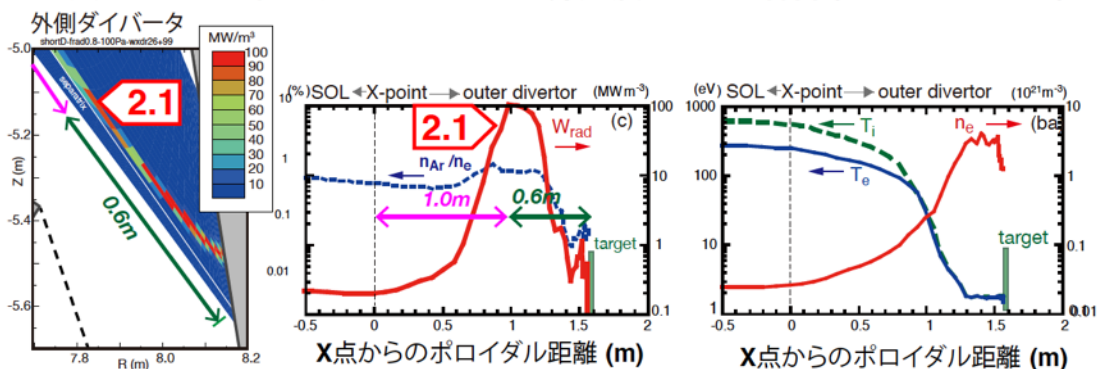


図 2-5： (左) SONIC シミュレーションによる 1.6m 長の外側ダイバータにおける 2次元放射損失パワー分布、およびセパトリス付近のポロイダル方向の (中) 放射損失パワー、(右) プラズマ温度・密度分布[2]。

## 2.2 X 点放射損失ピークにおけるダイバータとコアプラズマ特性：

炭素壁トカマクの実験のみで無く、不純物イオンによる高放射損失を得る際に、図 2-6 の様に金属壁トカマク実験でも X 点付近で放射損失が強まる挙動が ITER や原型炉ダイバータでも発生する場合には、その制御 (回避) 方法とともに、さらには、それに対応したダイバータ形状の修正や閉じ込め劣化なども考慮した主プラズマ運転シナリオが必要である。現在の「工学設計」時期は ITER でのダイバータ運転が見通せない時期から始まるため、オプションとして検討は必要である。



## 金属ダイバータ実験での最大放射損失パワー位置の例 (JETのスケールは約2倍大きい)

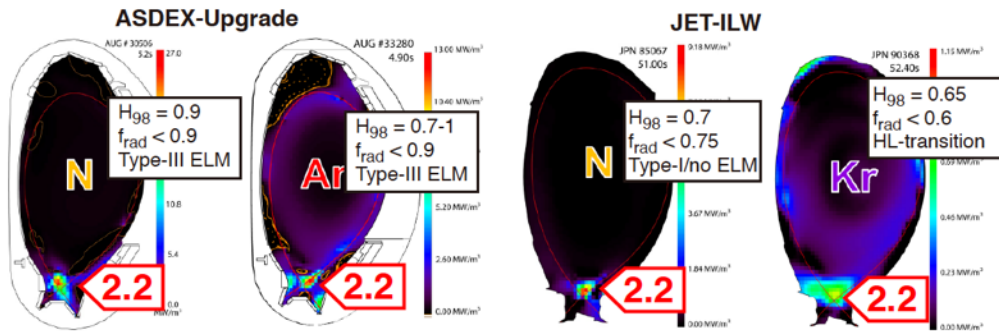


図 2-6：金属ダイバータおよび第一壁のトカマク装置(AUG と JET-ILW)での不純物ガス入射により高放射損失を増加する実験の際の放射損失パワー分布[7,8]。

### 2.3 (部分・完全) 非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気性能の検証：

熱負荷を低減できる完全あるいは部分非接触プラズマにおいて、粒子やヘリウム排気が両立できる様、設計を評価し修正を加えるアクションとした。十分な粒子およびヘリウム排気を行うことはダイバータの重要な機能であり、アクションプラン「3ダイバータ」の大項目 3-4 としても挙げられ、こちらで物理・工学設計アクションの総合的検討が必要。

### 2.3 ダイバータ開発・プラズマ運転シナリオに関する具体的な研究計画の概要

以上の重要な研究開発及び設計課題に対して、具体的に、国内のどの研究施設・機関で、どのようなモデル開発や実証 R&D を、どのようなステップで達成していくかを章末の表 2-3 にまとめた。これは、各研究機関 (QST, NIFS, 大学, C3:筑波大学プラズマ研究センター) からのアクションプラン (研究提案) をまとめたものである。その中から実験およびモデリング開発の計画を抜き出したものを下の表 2-2 に示す。議論点および注意点などを含めた詳細は最後の添付資料の表 A-2 に示す。

| 3. ダイバータ開発                                          | 概念設計の基本設計 (~2020年頃)                                          | 概念設計 (~2025年頃)                                                                     | 工学設計 (~2035年頃)                                               |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| (3-2)プラズマ運転シナリオ                                     | (16) Q/特/N/大: ダイバータプラズマシミュレーション開発 (26)                       | (24) Q/N/大: 統合コードによるプラズマ運転シナリオ提示 (35)                                              | (27) Q/特/N/大: ITER/JT-60SAダイバータプラズマのシミュレーションによる再現 (35)       |
|                                                     | (16) Q/N/大/C3: ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置の開発と実験 (26)                |                                                                                    |                                                              |
|                                                     | (16) Q/N/大: デタッチメントプラズマの実時間制御法の開発 (26)                       | (20) Q/N/大: ITER/JT-60SAIにおけるデタッチメントプラズマの制御手法の実証 (35)                              | (20) Q/N/大: ITER, JT-60SAIにおけるダイバータシステムの最適化 (35)             |
| 実験装置とコード開発                                          |                                                              |                                                                                    |                                                              |
| トカマク装置実験(非接触プラズマ制御)                                 | QST: JT-60Uデータベース                                            | JT-60SA(炭素壁)運転(28)                                                                 | (29)JT-60SA(金属壁)実験                                           |
| コード開発(2次元トラス磁場構造、原子分子データ改善、プラズマ流体コード更新、非定常化、統合コード化) | QST: 定常SONIC(複数不純物MC:MPMD)                                   | ・SONIC(プラズマ流体コード更新)<br>・非定常SONIC開発<br>・SONIC-IMPACT/TOPICS<br>*SONIC(直線装置用フレーム)を提供 | ・定常・非定常SONICによる非接触プラズマの模擬および統合コード開発・原型炉設計実用化                 |
| ヘリカル装置実験(非接触プラズマ制御)                                 | NIFS: LHD重水素実験                                               |                                                                                    |                                                              |
| コード開発(3次元磁場構造、非接触プラズマに対応)<br>プラズマ壁相互作用コードの開発        | NIFS: EMC3(接触プラズマでヘリカル・トカマク・直線装置へ)を3次元プラズマへの適応<br>分子動力学コード開発 | ・定常EMC3(非接触プラズマ対応)<br>・分子動力学コードによるPWIの再現、<br>原型炉条件での評価                             |                                                              |
| ミラー磁場閉じ込め(非接触プラズマ制御)                                | 筑波大: GAMMA10-PDX                                             | GAMMA10-Pilot                                                                      |                                                              |
| コード開発(非接触プラズマに対応、2次元軸対称化、非定常化?)                     | 筑波大: LINDA(接触プラズマ、直線装置)<br>SOLPS(トカマク・直線装置共用)                | ・LINDA(非接触プラズマ対応)                                                                  |                                                              |
| 直線基礎実験装置(非接触プラズマ制御)                                 | NAGDIS-III(名大)、TPD-Sheet(東海大)                                |                                                                                    |                                                              |
| コード開発(非接触プラズマに対応、2次元軸対称化、非定常化?)、<br>プラズマ壁相互作用コードの開発 | LINDA(接触プラズマで直線装置)<br>SOLPS(トカマク・直線装置共用)<br>分子動力学コード開発       | ・EMC3(非接触プラズマ対応)<br>・LINDA(非接触プラズマ対応)<br>・分子動力学コードPWIの再現、原型炉条件での評価                 |                                                              |
| トカマク、ITERおよび直線装置(海外)                                | ITPAデータ利用あるいは海外装置共同実験、ITER research plan 作成                  |                                                                                    | ITERリミター(Be)運転(25?)、非放射化(H, He)、放射化(D, DT)タンダステン・ダイバータ運転(後半) |
| コード利用によるモデル検証・改良(海外)                                | JET-ILWおよびITERにSONICを使用<br>SONICとSOLPSとのベンチマーク               | ・JET-ILWおよびITERにSONIC(プラズマ流体コード更新)を使用<br>・SONIC(プラズマ流体コード更新)とSOLPSとのベンチマーク         |                                                              |
| ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置                                 | 目的・仕様: 閉じ込め・線形部・照射部コンセプト、<br>建設場所・運営研究機関・国際協力の明確化?           | 設計と建設?                                                                             | 閉じ込め、制御、照射実験?                                                |

表 2-2：アクションプランの「(3-2)プラズマ運転シナリオ」に対応する各研究機関 (QST, NIFS, 大学、筑波大学プラズマ研究センター) による実験計画(赤字)及びシミュレーション開発計画(青字)の抜粋。ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置の目的、仕様、計画は、実施機関を含め検討が必要 (緑)。

- ・ (QST 主体、および大学の協力) ダイバータコード (SONIC) を構成する (1) プラズマ流体コードへのドリフト効果導入に伴う SOLDOR 改修、(2) ダイバータにおける中性粒子 (さらに He) による弾性散乱の導入と分子・原子再結合過程の再評価、(3) 不純物イオンの輸送と放射損失過程のモデル検討、さらにより実験プラズマを再現できる様に輸送係数などの調整も行い、「第 2 回中間 C&R」までに実験装置 (JT-60SA・炭素壁、国外の金属壁トカマク) での非接触ダイバータを再現すると共に、原型炉条件での非接触プラズマの再現に最も優先度の高いモデル・データベース開発およびパラメータ選択を明らかにする。  
同時に、不可欠な実験情報やベンチマーク(SOLPS 等)を行うのに適した国外の実験装置(ITER シミュレーションとの比較を含め)との協力研究を進める。
- ・ (QST、ITER 主体、および大学の協力) 「移行判断」までに、高加熱パワーでかつ ITER・原型炉のダイバータ概念を試験できる JT-60SA (金属壁) 実験、および、さらに長いレッグ長の ITER ダイバータの非放射化・放射化運転を利用して、ダイバータシミュレーションの実証及びさらに高精度なモデル開発を進める。  
ITER は原型炉ダイバータ設計を実験で確認が行える最終的なトカマク装置であり、「移行判断」時期までには、日本の原型炉プラズマ設計とダイバータでの非接触ダイバータ制御を模した実験が行えるよう、ITPA および ITER の Research plan などの研究活動に寄与する。  
平行して、非定常シミュレーションコード (非定常 SONIC や粒子 (PIC) コード) の開発を進め、非接触プラズマの安定な制御手法のシミュレーションと実証を行う。
- ・ (QST 主体、および大学の協力) 金属対向材を設置したトカマクでの非接触プラズマ生成、およびダイバータレッグで制御・維持を目指した研究を、「第 2 回中間 C&R」まで (国外装置、JT-60SA 炭素壁) および「工学設計」期間 (JT-60SA 炭素壁/金属壁) に優先的に進める。
- ・ (QST 主体、および大学の協力) 金属壁におけるトカマクでの非接触プラズマ生成と両立する主プラズマ、周辺および SOL プラズマ条件 (密度・温度分布) および不純物遮蔽性能の評価を実験で検証すると共に、コア・ダイバータ計算コード (SONIC-IMPACT/TOPICS) による再現を「第 2 回中間 C&R」まで (国外装置を想定) および「工学設計」期間 (JT-60SA、ITER) にて優先的に研究を進める。
- ・ (NIFS・大学主体) 基礎実験及び LHD などの異なる閉じ込め装置においても、「第 2 回中間 C&R」までに、非接触プラズマ発生・制御に関するモデル開発 (EMC3、LINDA) を実現し、実験プラズマの再現に最も優先度の高いモデル・データベース開発を明らかにする。  
一方、シミュレーションコードはトカマクで使用する SONIC コードなどのモデ

ルと容易に比較できるようなコード体系とすることが望まれる。また、SONIC コードのモデルを直線装置形状で実施できるよう開発段階で考慮する必要がある。

- (NIFS および大学主体) 基礎実験及び LHD などの異なる閉じ込め装置においても、長時間重水素放電などを行い非接触プラズマの安定な制御手法開発の基礎研究やトランジェント熱負荷に対する緩和研究を進める。同時に、非定常シミュレーションの開発を始め、非接触プラズマの安定な制御手法のシミュレーションと実証を検討する。
- (筑波大学および大学主体) GAMMA10-PDX および Pilot 装置 (高密度プラズマ源、高熱流・粒子流束) を利用して、多種・適切な計測装置を設置することにより、部分・完全非接触ダイバータが発生する際の SOL・ダイバータプラズマの優先度の高いモデリング検証を進める。  
同時に、非接触プラズマのモデリングコード (LINDA, EMC3) の開発とベンチマーク (SOLPS を想定) を行い、国内コードのモデル開発を進める。
- ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置は、主体となる検討機関が未設定で早急に候補を選定し指示する必要がある。上記の基礎実験では実現できないプラズマ条件および物理機構の検討を実現できるような設計案を「第1回中間 C&R」までに検討する。主要な物理データは「第2回中間 C&R」頃から、ITER あるいは JT-60SA の金属ダイバータ実験では測定や評価が難しい物理モデルや基礎データの構築に活用を期待する。また、「工学設計」に動的なダイバータ制御の実験およびモデリング開発のデータを提供すると共に、工学 R&D にも寄与できる設計が望ましい。
- (QST 主体) トカマク原型炉や ITER において、X 点よりも下のダイバータレック内で制御できない場合、プラズマおよびダイバータ設計も考え直す必要がある。最終的な工学概念設計の判断のため、X 点付近での放射損失ピークでの運転検討、およびダイバータ設計の修正案の検討もリスク回避 (主プラズマやダイバータの設計のやり直し) のため必要と思われる。  
特に、原型炉ダイバータ設計を「工学設計」のできるだけ早期に決められるよう、金属壁における JT-60SA および ITER の非接触ダイバータ制御の成果・実証を期待する。

今後は、それぞれの分野の開発・実証および基礎研究において何を優先的に解明するか整理・共有することが望まれる。さらに、「第1・2回中間 C&R」および「移行判断」における達成目標、ダイバータ研究機関への研究要望や加速提案 (資金、人材、協同研究)、工学分野や他のアクションプラン (炉設計やシミュレーションなど) への要望、について議論が進むことを望む。

## 2.4 「中間 C&R」および「移行判断」に向けたまとめと意見

2017年度のダイバータ物理検討WGでは、アクションプラン（ダイバータ）中の「プラズマ運転シナリオ」の具体化に向けて、原型炉ダイバータにおける「非接触ダイバータの発生・制御および熱負荷の低減」と「実験研究とシミュレーション・モデリング開発」のため検討目標を設定した。ここでは、磁場形状の異なる閉じ込め装置での研究とともに、プラズマ条件や磁場・対向機器の形状が単純で詳細計測が比較的容易な基礎実験からの寄与を分かりやすくするため、非接触ダイバータ物理設計に向けて優先度の高い物理検討分野を、2つの大項目とそれぞれ6および3つの小項目に区分し、明示した（2.2節）。

それらの研究開発及び設計課題に対して、各研究機関からの研究提案を基に、具体的に国内のどの研究施設・機関で、どのようなモデル開発や実証 R&D を、どのようなステップで達成していくかを共有できるようまとめた（2.3節）。

しなしながら、実際のダイバータ形状において複雑な物理機構が絡み合い発生する非接触プラズマ現象のシミュレーション開発とダイバータ設計を行うために、十分なものではない。今後は、それぞれの物理研究分野において、開発・実証および基礎研究において何を優先的に解明するか整理・共有することが必要である。

（1）今回の検討からの共通の意見として：

- ・シミュレーションコードに組み込まれた多くの物理モデルの内容を理解・発展するためには、日本でダイバータシミュレーションコードを開発する必要がある。輸送機構の主要なモデリング（プラズマ、中性粒子、不純物輸送と放射損失過程）は、より核融合炉に近い条件の実験結果に基づく実証と改善（あるいは再構築）が必要であり、国内活動の活性化（予算とリソースの増加）により分担は可能と思われる。
- ・一方、トカマクのダイバータコードである SONIC の非接触プラズマモデルの開発・改善を加速すると同時に、ITER 設計で使用されている SOLPS や実験データとの比較検討により信頼性を高めること、さらにはユーザーを増やすことが、アクションプランを実施するためには必要である。JT-60SA ダイバータ実験初期（「第2回中間 C&R」まで）を目標に開発・改善（SOLPS レベル程度まで）するには、海外実験（JET、AUG など）やコードベンチマーク（JET、AUG、ITER シミュレーション結果）を積極的に利用する必要がある。
- ・基本設計案として、トカマクでの非接触プラズマ生成およびダイバータレッグで維持する研究を、「第2回中間 C&R」まで（国外装置、JT-60SA 炭素壁）および「工学設計」期間（JT-60SA 炭素壁/金属壁）に優先的に進める。  
JT-60SA における金属壁（ダイバータ及び第一壁）の実験開始は、現在、アクションプランの「工学設計」後半であり、長いレッグのダイバータにおける非接触ダイバータの制御、金属壁におけるダイバータ・モデリングの完成、および（原型炉）ダイバータ形状の最適化は、「移行判断」までに完了できない可能性がある。日本の原型炉設計に適するダイバータ設計とともに、原型炉における高熱パワー排出と高閉じ込め運転シナリオを現状装置レベルで実証することを、アクションプランに従い「移行判断」までに行うためには、JT-60SA における金属壁実験を JT-60SA リサーチプランに従い着実に速やかに実施する必要がある。



また、「第2回中間 C&R」において不確定性が大きい場合は、主プラズマ周辺の放射損失の増加や閉じ込め劣化なども考慮した主プラズマやダイバータ設計オプションを検討するなど、工学設計のリスク軽減や対処が必要である。

- ・ 金属壁で長いレッグの閉型ダイバータを持つ ITER は、原型炉ダイバータ設計を実験で確認が行える最良で最終的なトカマク装置である。「移行判断」時期までには、DT 放電での非接触ダイバータの制御実験が可能であり、日本の原型炉プラズマ設計とダイバータでの非接触ダイバータ制御を模した実験が行えるよう、ITPA および ITER の Research plan などの研究活動に積極的に寄与する必要がある。JT-60SA 実験を着実に進めるとともに、海外実験やコードベンチマークを積極的に利用し、提案作成に協力することが重要である。
- ・ ダイバータ級定常高密度模擬装置の主体となる検討機関が未設定で早急に候補を選定し指示する必要がある。ITER あるいは JT-60SA の金属ダイバータ実験では測定や評価が難しい物理モデルや基礎データの構築と共に、工学設計にも活用する。目的・仕様・設計については、本年度は関連機関や研究者からの意見に留めたが、本年度の検討目的や優先課題を参考に、研究や開発の目的、仕様、計画などの議論が早急に必要と考える。
- ・ 直線装置などを利用した非接触ダイバータの基礎実験は、比較的簡単な磁場形状・幾何形状において、プラズマ輸送、原子分子過程および不純物輸送の素過程の検証を行い、それらのモデルの改善や開発に適する。直線装置における非接触プラズマのモデル化を急ぐとともに、開発の際にはトカマクなどの閉じ込めプラズマ装置でのシミュレーションコードとのモデル比較（ベンチマーク）や組み込みが可能な体系化が必要である。
- ・ 3次元のヘリカル磁場や単純な直線装置に対応した EMC3 および LINDA コードの非接触プラズマへの対応、および実験結果やモデル間の検証を「第2回中間 C&R」までに進め、国内の実験装置の成果をモデリング改善やデータ拡充に寄与できる様にする必要がある。
- ・ さらに、非接触ダイバータ制御に必要な計測器候補の選択、制御論理の検討、および動的シミュレーションコード（非定常 SONIC や粒子（PIC）コード）の用意を開始する必要がある。また、ダイバータ対向材の寿命には、非接触ダイバータプラズマへの（緩和・抑制された）ELM の影響評価は重要であり、プラズマ熱粒子負荷計算のため粒子（PIC）コード等の開発および導入が必要。
- ・ 国内ダイバータシミュレーションコードの開発と共に、損耗などプラズマ壁相互作用、粒子吸着・蓄積・再放出のを含めたモデル化（IMPGYRO コード、実験や分子動力学計算（MD）による PWI データベースの整備等）、熔融金属（プラズマ含む）のモデル化の準備あるいは既存コードの移植の判断を開始する必要がある。また、定常放電の部分非接触ダイバータにおける損耗の評価、および大きなパルス熱負荷重畳による寿命評価、および SOL ダイバータでの緩和・制御検討を開始する必要がある。

(2) 今後のダイバータ関係のアクションプランの具体化について、以下については他の専門家も含めた新たな WG の設定は必要と思われる：

- ・「粒子制御」：炉内粒子(トリチウム) シミュレーションの手法や目標の検討が必要。
- ・L-H/H-L モード遷移、ELM、ディスラプションなどによる「大きな熱粒子排出を緩和・抑制するシナリオ、およびそれらの評価と対処指針」は原型炉設計の重要課題であり、現在のアクションプランでは「(6)炉心プラズマ」により「工学設計」前期に提示されると思われる。一方、ダイバータの物理・工学・材料設計や機器寿命評価に大きく影響することから、ITER での対処手法と目標を考慮し、原型炉設計での制約・条件・目標をできるだけ早く検討することが必要。
- ・「先進ダイバータ」の評価と開発推進は、日本のアクションプランの検討範囲（磁場形状、液体金属、先進材料…）を明らかにすると共に、工学・材料分野およびモデリングや設計との共同検討が必要。
- ・工学・材料開発、R&D の課題（水冷却ダイバータ機器の原型炉適用性の判断、ダイバータ機器構成材料の中性子照射の影響、ダイバータ機器の保全や補修技術の評価と開発、原型炉で使用可能な排気システムの検討、中性子照射材料・機器の熱負荷試験装置の開発とコールド試験）の検討は新たな WG の設定が必要。

## 参考文献

- [1] Y. Sakamoto, et al 2014 DEMO concept development and assessment of relevant technologies Paper Presented at the 25th IAEA Int. Conf. on Fusion Energy (St. Petersburg, 13–18 October 2014) FIP/3-4Rb ([www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2014/fec2014-preprints/222\\_FIP34Rb.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2014/fec2014-preprints/222_FIP34Rb.pdf))
- [2] N. Asakura, et al., Nucl. Fusion **57** (2017) 126050.
- [3] Chapter 4 in the 2nd intermediate report of BA DEMO Design Activity (2017).
- [4] N. Asakura, K. Hoshino, J. Plasma Fusion Res. **92**, 12 (2016) 870-876.
- [5] K. Shimizu, et al., J. Nucl. Mater. **313–316** (2003) 1277
- [6] H. Kawashima, et al., J. Plasma Fusion Res. **1** (2006) 31
- [7] M. Bernert, et al., Nucl. Mater. Energy **87** (2017) 111.
- [8] M. Bernert, et al., “High radiation scenarios in pronounced detached divertor conditions at ASDEX Upgrade”, 1st IAEA TM on Divertor Concepts (Vienna, 2015) I-8.

表 2-3 (1/3) : アクションプランを達成するための研究提案 (簡易版)  
 研究施設・機関、モデル開発や実証実験、検討内容の概要

ダイバータ物理検討WG 2018年3月5日改訂 (中間1:第1回中間チェック&レビュー、中間2:第2回中間チェック&レビュー、移行判断:原型炉段階への移行判断)

| 項目  | 主要課題/研究機関                                                                 | 開発内容:実験装置、モデリング・コード名(コード名)                                                                                                                                                                                     | 開発内容および手法、段階(中間1&2、移行判断)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 原型炉ダイバータでの非接触プラズマの発生機構の解明・モデリングと熱・粒子負荷の評価 ⇒ トカマク磁場配位で原型炉プラズマ条件(高温SOL)での予測 |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 1.1 | 非接触プラズマ発生における水素に関する原子・分子過程(体積再結合、MAR、弾性散乱、表面再結合・リサイクング)                   |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|     | GST-Naka                                                                  | JT-60U&SA実験・計測とモデル検証(SONIC-NEUT2D)<br><br>金属壁実験装置(JET-ILW)でのモデル検証とITERでのベンチマーク:SONIC-SOLPS                                                                                                                     | ・(JT-60U)中性粒子の非接触プラズマ発生機構および不純物放射損失への影響(体積再結合などの素過程、不純物イオンの再結合)を評価(中間1)<br>・(JT-60SA)中性粒子の非接触発生機構および不純物放射損失への影響(体積再結合などの素過程、不純物イオンの再結合)を特定(中間2)<br>・非接触プラズマの対向面での計測評価と熱負荷モデルの検討(中間2)<br>・金属壁実験JET-ILWでの検討(複数材料からなる壁モデル:粒子・エネルギー反射モデル・スパッタ)(中間1)<br>・SOLPS-EIRENE等とのベンチマーク:原子・分子モデルの高度化および振動・回転励起、高エネルギー電子等の影響検討(中間2)<br>ITERでのSONIC-SOLPSベンチマークが必要(中間2)                                                           |
|     | GST-Naka&Rok                                                              | ダイバータモデル・シミュレーションSONIC-NEUT2D開発                                                                                                                                                                                | ・原子・分子モデルの高度化(ORモデル、MAR、中性粒子衝突モデル開発と実装)(中間1)<br>・振動・回転励起、高エネルギー電子等の影響検討(中間1)とモデル開発(中間2~移行判断)<br>・光輸送モデル(水素同位体)の改善と影響評価(中間2)                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|     | GST-Rok                                                                   | JA原型炉条件での非接触プラズマモデルSONIC-NEUT2D:中性粒子輸送と対向条件)検討と非接触プラズマ運転領域(シミュレーション)                                                                                                                                           | ・高密度条件における体積再結合と表面再結合モデルの再評価、および弾性散乱によるエネルギー散逸の検証(中間2)<br>・燃料同位体効果による非接触プラズマへの影響(中間2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | NIFS                                                                      | LHD磁場配位での非接触プラズマ計測とモデル(EMC3-EIRENE)検証・開発(中性粒子輸送と対向面条件)                                                                                                                                                         | ・中性粒子モデルへの体積再結合等の取り込み(EMC3-EIRENE、中間1-2)<br>・EMC3コードの非接触プラズマへの対応:体積再結合および圧力損失モデルの開発(中間2)<br>・高温プラズマ(100eV)が非接触化する過程を明らかにする:計測器の整備とMAR(1-10eV)による非接触の解明(中間1-2)                                                                                                                                                                                                                                                     |
|     | 筑波大                                                                       | ミラー配位のダイバータ模擬モジュール(GAMMA10-PDX)における高温プラズマによる非接触プラズマ基礎実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE)検証・開発(中性粒子輸送と対向面条件)、および計測器開発(MAP-IIを含め)<br><br>新装置(高温高密度パイロット装置)による高温高密度プラズマによる非接触プラズマ基礎実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE)検証・開発(中性粒子輸送と対向面条件) | ・LINDAコードの開発と非接触プラズマモデリング、および中性粒子コードのリンクによる体積再結合過程のモデル検証(中間2)<br>・B2-EIRENE(直線プラズマ近似)との実験とモデリングのベンチマーク(中間1-2)<br>・常直線装置MAP-IIを用いた非接触プラズマに対する計測手法の原理検証および高精度化(中間1-2)<br>・(GAMMA10-PDX)を超える高温高密度ダイバータで放射損失領域と三体再結合を伴う非接触プラズマが定常的に共存する状態を形成し、高温-低温プラズマ状態における原子分子過程の影響を明らかにする(中間2)。                                                                                                                                   |
|     | ?                                                                         | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                                                                              | ・パイロット装置を超える原型炉級高温高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|     | 名大                                                                        | 直線装置での非接触プラズマ基礎実験(中性原子・分子の温度の影響)と計測開発およびモデル(LINDA、EMC3-EIRENE)検証・開発(中性粒子輸送と対向面条件)                                                                                                                              | ・ダイバータプラズマ模擬試験装置NAGDIS-IIにおいて、中性原子温度が体積再結合過程によるプラズマ消滅に与える影響(減衰長など)を定量的に評価、および必要な計測機器と空間分布測定装置(中間2-移行判断)<br>・実験結果による非接触モデル(LINDA、EMC3-EIRENE)検証とモデル改善(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                                                                                                    |
|     | 東海大                                                                       | 直線装置での非接触プラズマ基礎実験(原子、原子、イオン種と水素分子の振動温度の影響)と計測開発                                                                                                                                                                | ・ダイバータプラズマ模擬試験装置TPD-Sheetを用いて、非接触プラズマでの原子・分子イオン種効果及び水素分子の振動温度が体積再結合過程(MAR)に与える影響を評価、および、必要な計測器開発(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 1.2 | 非接触プラズマ発生におけるプラズマ輸送(主に拡散とドリフト効果、およびプラズマ流の発生(SOLでの電場も含める))                 |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|     | GST-Naka                                                                  | JT-60U&SAでの実験・計測とモデル検証(SONIC-SOLDOR)                                                                                                                                                                           | ・(JT-60U)既存データ再検討:可動プローブデータに直しによるSOL熱流束評価(Eichスケールリングとの比較および低パワー・Hプラズマ)(中間1-2)<br>・(JT-60SA)SOL高精度温度・密度分布測定とダイバータ熱負荷分布計測による熱流束(SOLおよび非接触幅)の評価:SOL幅(Eichスケールリング、Sパラメータ)との比較と依存性解明(中間2)<br>・揺動計測および熱流・粒子束の内外非対称性、および それぞれでの非接触発生機構の解明(中間2-移行判断)<br>・非接触ダイバータでの不純物入射による放射損失増加と周辺閉じ込め性能(高閉じ込め運転領域の検証、中間2-移行判断)                                                                                                        |
|     | GST-Naka&Rok                                                              | ダイバータモデル・シミュレーションSOLDOR:SONIC)開発、運動論的効果の反映(近似式)や運動論計算コードの開発                                                                                                                                                    | ・SOLPS等による解析結果のベンチマーク:拡散係数の影響を評価し、拡散モデルのパラメータ依存性と2次元分布の必要性を検討(中間2)<br>・ITERでの非接触プラズマのコードベンチマークと非接触運転領域の検討(中間2)<br>・拡散モデル(径方向・ポロイダル方向)のパラメータ依存性と2次元分布の必要性を検討(中間2)<br>・運動論効果(Flux Limiter等)の検討(中間1、コード開発なら中間2-移行時期)<br>・ドリフトモデル(およびSOL流、粘性項の表現)を含む流体コードの開発、SONICへの組み込みと検証(中間2~移行判断)                                                                                                                                 |
|     | GST-Rok                                                                   | JA原型炉条件での非接触プラズマモデルSONIC-SOLDOR:プラズマ輸送)検討と非接触プラズマ運転領域(シミュレーション)                                                                                                                                                | ・ダイバータプラズマの輸送モデル検討(拡散、ドリフト効果など)とSパラメータの要因検証(中間2-移行判断)<br>・第一壁まで解くモデル(流体あるいは非流体)の開発と対向壁の粒子過程の反映:プライベートおよび周辺FarSOLモデル(中間2-移行判断)<br>・拡散係数の影響を評価(粒子デタッチの発生)によるダイバータ運転領域検討(形状・サイズ・熱放射変化等も行う)(中間1、中間2、移行時期)<br>・運動論効果の検討、高温SOLでのプラズマ数値解法(流体近似およびフラックスリミタの原型炉への外挿性検討など)、およびSOLDORへの実装(速度非等方性効果導入のための流体方程式開発及び数値解法開発)(中間2、移行時期)<br>・高密度の非接触ダイバータにおける境界条件(粒子・エネルギー輸送)検討(中間2、移行時期)<br>・燃料同位体効果(DとT)による非接触プラズマへの影響(中間2-移行時期) |
|     | NIFS                                                                      | LHD磁場配位での非接触プラズマ計測とモデル(EMC3-EIRENE)検証・開発(非接触プラズマでの輸送)                                                                                                                                                          | ・EMC3の非接触対応(中間2)<br>ダイバータ板上のプラズマ分布の変化の理解(拡散の評価と物理モデル化:例えばデタッチメント時のプライベート領域への粒子損失増大モデル化、ドリフトあるいは揺動拡散モデル導入、(中間2-移行判断)<br>・静電プローブによるドリフト効果の検討(モデリングによる評価、中間2)<br>・揺動計測および熱流・粒子束の内外非対称性と非接触発生について検討(中間2)<br>・不純物入射や揺動磁場による周辺部放射損失領域の運転と閉じ込め性能の検証(中間2)                                                                                                                                                                 |
|     | 筑波大                                                                       | ミラー配位のダイバータ模擬モジュール(GAMMA10-PDX)における高温プラズマによる非接触プラズマ基礎実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE)検証・開発(プラズマ輸送とシース研究)、および計測器開発(MAP-IIを含め)<br><br>新装置(高温高密度パイロット装置)による高温高密度プラズマによる非接触プラズマ基礎実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE)検証・開発(プラズマ輸送とシース研究) | ・GAMMA10-PDXにおいて、不純物ガス入射によるターゲット部の熱粒子束の変化、上流部プラズマへの影響の評価(中間1-2)<br>・B2-EIRENE(直線プラズマ近似)とLINDAコードのベンチマーク(中間1-2)<br>・LINDAコード(慶應大)の非接触プラズマへの適応と定量的評価(中間2)<br>・MAP-IIを用いた非接触プラズマに対する計測手法の原理検証および高精度化(中間1-2)<br>・(高密度ダイバータで)高温プラズマと非接触プラズマが定常的に共存する部分非接触状態を形成し、輻射輸送や不純物の高温プラズマ領域への影響を明らかにする(中間2)<br>・LINDAコード(慶應大)の非接触プラズマへの適応と定量的評価(中間2)<br>・非接触プラズマに伴うBblob発生と不安定性や拡散への影響を解明(中間2)                                   |
|     | ?                                                                         | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                                                                              | ・パイロット装置を超える原型炉級高温高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|     | 名大                                                                        | 直線装置での非接触プラズマ基礎実験(中性原子・分子の温度の影響)と計測開発およびモデル(LINDA、EMC3-EIRENE)検証・開発(プラズマ輸送とシース研究)                                                                                                                              | ・NAGDIS-IIにおいて、沿磁力線方向の磁場強度を変化させて、収縮磁場、発散磁場配位を模擬して、収縮磁場、発散磁場が非接触プラズマ生成に与える影響を明らかにする(中間1)。<br>・再結合フロント付近の揺動に起因する径方向拡散が非接触プラズマ形成に与える影響を定量的に評価(揺動やBblob発生、および非接触・接触共存時のシース電位差による電流など)<br>・LINDAコードおよびEMC3-EIRENEコードによる物理解とモデル改善(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                             |
|     | 東海大                                                                       | 直線装置での湾曲および発散磁場配位をとまなう非接触プラズマの計測と検証                                                                                                                                                                            | ・磁場形状変化(発散・湾曲磁場等)による非接触プラズマの形成過程を検証する(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |



表 2-3 (2/3) : アクションプランを達成するための研究提案 (簡易版)  
研究施設・機関、モデル開発や実証実験、検討内容の概要

| 項目  | 主要課題/研究機関                                                              | 開発内容:実験装置、モデリング・コード名(コード名)                                                                                                                             | 開発内容および手法、段階(中間1&2、移行判断)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.3 | 非接触ダイバータにおける放射損失とピーク位置 (特に入射不純物量と種類、ダイバータおよびSOLでの不純物イオンの遮蔽効果)          |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | QST-Naka                                                               | JT-60U&SAでの実験・計測&モデル検証(SONIC,IMPQ)                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・(JT-60U)ダイバータ・SOL・周辺部での入射不純物遮蔽効果の評価(ELM, L/Hモード)(中間1)</li> <li>・(JT-60U)複数不純物入射実験の結果(NeAr/He)の定量的な解析の継続(中間1-2)</li> <li>・(JT-60SA)非接触プラズマ発生機構への不純物イオン素過程・再結合・放射損失の寄与の評価(特に、高Z不純物(Ar以上のKr, Xe)について注目)(中間2)</li> <li>・複数の不純物の入射によりダイバータおよび主プラズマ周辺部まで放射領域を拡大(中間2)</li> <li>・ダイバータ・SOL・周辺部での入射不純物遮蔽効果の評価(ELM, L/Hモード)(中間2)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|     | QST-Naka+Rok                                                           | ダイバータモデル・シミュレーション(SONIC,IMPQ)開発                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・SOLPS等(EDGE2D, UEDGE)による解析結果とベンチマーク・Be存在条件下でモデリングとベンチマーク、N2, Ne等の軽Z不純物入射、および高Z不純物入射実験結果での検討</li> <li>・ITERでの非接触プラズマのコードベンチマークと不純物輸送・放射損失ピークの検討(中間2)</li> <li>・複数不純物入射に対する輸送コード(He輸送排気も含め)の開発(現在実施中⇒中間1)</li> <li>・不純物輸送モデルの検証(熱力と摩擦力、仮想プラズマ流を想定)(中間1)</li> <li>・不純物異質拡散輸送検証(拡散係数Dスキーム、中間1)とモデル開発(外挿性検討、中間2)</li> <li>・W発生と輸送モデル(まずは簡易モデルでも解析可)(中間1)</li> <li>・不純物の衝突・放射データの精度検証(特に低温でのAr, Wについて)</li> <li>・光輸送(不純物放射)の影響評価(He, Arの評価:連続光による光吸収の影響も評価、中間2)</li> <li>・ドリフトモデル(およびSOL流、粘性項の表現)を含む流体コード自身の開発後に、不純物イオンの輸送と高放射損失領域の検討(中間2以後→移行判断)</li> <li>・(拡散、ドリフト効果などによる)プライベート部での影響評価と不純物輸送のモデル化(中間2→移行判断)</li> </ul> |
|     | QST-Rok                                                                | JA原型炉条件下での不純物輸送モデル検討(SONIC,IMPQ) 不純物輸送と非接触プラズマ運転領域                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・不純物輸送及び放射損失分布への影響評価:コアから排出される熱流のポロイダル依存性導入と仮想プラズマ流の想定</li> <li>・非接触発生機構(素過程～不純物イオンの再結合)の特定、高Z不純物(Ar以上のKr, Xe)でも同じ素過程が主要機構か説明(中間2)</li> <li>・ダイバータ閉型化による非接触ダイバータ生成と3次元効果の評価とモデリングの検証と改善(中間2→移行判断)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|     | NIFS                                                                   | LHD磁場配位での非接触プラズマ計測とモデル EMCG3-EIRENE)検証・開発(非接触プラズマでの輸送)                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・GAMMA10-PDXにおいて、不純物ガス(Ar, Kr, Xe)入射による高速カメラによるプラズマ2次元分布観測、多点同時分光計測による不純物輸送機構の解明(中間1-2)</li> <li>・MAP-IIを用いた非接触プラズマに対する計測手法の原理検証および高精度化(中間1-2)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|     | 筑波大                                                                    | GAMMA10-PDXによる基礎実験(再結合・放射損失と不純物輸送)とモデル検証(LINDA, B2-EIRENE)および計測機器開発(MAP-IIを含め)<br>新装置(高温高密度バイロット装置)による高温高密度プラズマ基礎実験(ターゲット形状効果)&モデル検証(LINDA, B2-EIRENE) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・高温高密度バイロット装置において、高温プラズマと三休再結合を伴う非接触プラズマが定常的に共存する状態を形成し、放射損失分布計測、放射輸送の評価(中間1-2)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|     | ?                                                                      | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・バイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|     | 名大・東海大                                                                 | 直線装置実験での計測&モデル検証(東海大と連携して実施)                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・NAGDIS-IIおよびTPD-Sheetを使用して、特にHe混合時のMARの実験・モデルの検証</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1.4 | 部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果の検証 (特にダイバータ長、閉構造、傾斜角とVコーナーなど)                 |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | QST-Naka                                                               | JT-60U&SAでの実験・計測&モデル(SONIC)検証(部分非接触プラズマ幅の要因を検討)                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・(JT-60U)中性粒子圧力とデタッチメント発生領域の関係を排気速度を変化させた実験データからまとめる(中間1)</li> <li>・(JT-60SA)形状効果の定量評価(V形状とドーム、ストライク点位置と排気への影響)(中間2)</li> <li>・部分非接触ダイバータの運転領域(Psep, Praddiv, n_sol, n_imp等)の検討(中間2→移行判断)</li> <li>・非接触プラズマ領域が広い運転領域・手法の検討(不純物種、磁場反転、形状の影響)(中間2→移行判断)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|     | QST-Naka+Rok                                                           | ダイバータモデル・シミュレーション(SONIC)開発                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・SONICダブルスル配位対応(SAおよび原型炉オプションへの検討のため)(中間2を目指す)</li> <li>・部分(完全)非接触ダイバータを得やすい形状検討(ダイバータ長、閉構造、傾斜角、Vコーナーなど) ⇒ 原型炉における形状効果をまとめる(中間2)</li> <li>・粒子コンダクタンスに対する、ダイバータ圧力と非接触プラズマ発生との精度の向上(中間2)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|     | QST-Rok                                                                | JA原型炉条件下での非接触プラズマ分布のモデリング検討(SONIC)                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・GAMMA10-PDXにおいて、角度可変のV字ターゲット及び後方排気扉による閉構造の変化により部分非接触プラズマ生成への影響を評価(中間1)</li> <li>・LINDAコード(+Neutralコード)による形状効果のモデリングの精度を高める(中間2)</li> <li>・高温高密度バイロット装置において角度可変ターゲットにより傾斜およびVコーナー効果の評価(中間2)</li> <li>・LINDAコード形状効果のモデリングの精度を高める(中間2→移行判断)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|     | 筑波大                                                                    | GAMMA10-PDXによる形状効果の基礎実験&モデル検証(LINDA, B2-EIRENE)<br>新装置(高温高密度バイロット装置)による高温高密度プラズマ基礎実験(ターゲット形状効果)&モデル検証(LINDA, B2-EIRENE)                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>・高温高密度バイロット装置において角度可変ターゲットにより傾斜およびVコーナー効果の評価(中間2)</li> <li>・LINDAコード形状効果のモデリングの精度を高める(中間2→移行判断)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|     | ?                                                                      | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・バイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|     | 東海大                                                                    | 直線装置での非接触プラズマにおけるターゲット形状効果の検証                                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・TPD-Sheetの終端部ターゲットの形状の変化により、ダイバータ長、閉構造、傾斜角等に対する部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果について検証する</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 1.5 | 非接触プラズマでの熱負荷評価(放射吸収、プラズマ対向条件、表面再結合などの評価) (注)実機での検討は1.1.1, 1.1.2に記述     |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | QST-Naka+Rok                                                           | ダイバータモデル開発および原型炉やITER条件下での非接触プラズマ分布のモデリング検討(SONIC)                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ダイバータ素子条件および表面再結合熱負荷・放射熱負荷(反射)の検証とモデル改善(中間2→移行判断)</li> <li>・第一壁における放射、再結合、蓄積モデルの検証とモデル改善(中間2→移行判断)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|     | 名大                                                                     | 直線装置実験での計測&モデル検証(信州大と連携して実施)                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・NAGDIS-IIで発生した非接触プラズマにおいて計測結果と衝突放射コード、放射輸送コードによるシミュレーション結果とを比較し、放射吸収が非接触プラズマに与える影響を明らかにする(中間2→移行判断)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|     | ?                                                                      | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・バイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 1.6 | 部分非接触プラズマでのタングステン損耗評価とモデリング検証(特に不純物イオンによる影響) (注)実機での検討は1.1.3, 1.1.4に記述 |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | QST-Naka                                                               | JT-60SA実験・モデル(IMPQYRO,IMPQ)での制御・検証                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・IMPQYROモデル改善およびSONIC(プラズマ・不純物輸送)との同時計算開発</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|     | QST-Naka+Rok                                                           | ダイバータモデル・シミュレーション(IMPQYRO,SONIC)開発                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・損耗・堆積・反射モデルの高精度化(IMPQYROモデルと背景プラズマとのカップリング計算)</li> <li>・不純物輸送モデルの検討(トランジェント熱負荷、マグネティックプレシジョン、電場の考慮など)</li> <li>・再堆積W層の物性変化(スパッタ率、熱伝達など)による損耗評価</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|     | QST-Rok                                                                | JA原型炉条件下での非接触プラズマ分布のモデリング検討                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・分子動力学法による壁(炭素壁、金属壁)での粒子反射モデルの高精度化</li> <li>・水素分子との反応によるダイバータプラズマのエネルギー損失の定量化</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | 釧路高専                                                                   | 分子動力学法(QTシミュレーション)にもとづく水素プラズマ対向壁サイクリングモデルの構築                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・タングステンヘリウム共堆積層の水素吸蔵特性の評価</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|     | 名大・九大                                                                  | W再堆積層の特性研究(QUEST共同研究)                                                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・炭素またはステンレスを想定したPWI損耗研究</li> <li>・MDによるWの表面変化とスパッタリング・モデル</li> <li>・量子化学計算に基づく分子動力学ポテンシャルモデルと二休衝突近似モデルの高精度化</li> <li>・実験と比較可能な照射時間再現のための長時間照射シミュレーションの達成</li> <li>・イオン粒子入射と中性粒子入射が壁へ与える影響の違いを明確化</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|     | LHD/NIFS                                                               | LHDのPWI損耗研究と評価、および PWI MDシミュレーション研究                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | 筑波大、阪大                                                                 |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | 京都大学                                                                   | プラズマイオン・不純物イオン分光                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | ?                                                                      | MDモデリング開発とデータベースの整備が必要                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・100eV程度までを分子動力学シミュレーションでデータベース化を行う計画を加速する</li> <li>(1)水素同位体や入射不純物以外にself-sputteringも必要、(2)バルクおよびVPS-W以外にC、SUS等も必要</li> <li>・ダイバータ中での損耗・再堆積モデリングの開発(あるいは導入)は必要</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|     | ?                                                                      | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・バイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

表 2-3 (3/3) : アクションプランを達成するための研究提案 (簡易版)  
 研究施設・機関、モデル開発や実証実験、検討内容の概要

| 項目  | 主要課題/ 研究機関                          | 開発内容:実験装置、モデリング・コード名(コード名)                                                                                                                                               | 開発内容および手法、段階(中間1&2、移行判断)                                                                                                                                                                                                                   |
|-----|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2   |                                     | 原型炉ダイバータの非接触プラズマを維持・制御する実験と動的モデリングの開発                                                                                                                                    | ⇒ 目標: 部分非接触プラズマ(外側)を標準とし、ダイバータレグで維持                                                                                                                                                                                                        |
| 2.1 |                                     | 部分非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置制御とモデリング検証<br>非接触プラズマ制御のための計測(分光、ボロメータ、トムソン)とアクチュエータ(不純物ガス種、パフ位置、加熱?)比較、完全非接触ダイバータ生成に新たなダイバータ形状、不純物種の選択など手法が必要か?、トランジェント熱負荷増による接触プラズマへの対処手法とモデリング検証 | ⇒                                                                                                                                                                                                                                          |
|     | GST-Naka                            | JT-60SA実験・モデル(SONIC/非定常SONIC)での制御と検証<br>金属壁実験装置(JET-ILW)でのモデル検証とITERでのベンチマーク: SONIC-SOLPS                                                                                | ・複数の不純物の入射によりダイバータに加えて主プラズマ周辺部まで放射領域を拡大(中間2/移行判断)<br>・部分および完全非接触ダイバータにおける運転領域パラメータ検討、粒子排気性能および高低Z不純物のダイバータ遮蔽性能の評価(中間2/移行判断)<br>・金属壁でBe, N等軽不純物の制御モデリングのベンチマーク検証(中間2-移行判断)                                                                  |
|     | GST-Naka+Rok                        | ダイバータモデル・動的シミュレーション(非定常SONIC)開発                                                                                                                                          | ・非定常SONICモデルの開発(中間2)<br>・計測器モデルと制御モデル(制御要素: 時間応答やロジックの追加)(移行判断)<br>・(新古典輸送)異常輸送・電場ドリフトを考慮した総合的輸送シミュレーション開発(移行判断)<br>・ELM、プラズマ立上げ、立下げなどを含む、非定常トランジェント熱負荷を予測できるシミュレーションコード開発(移行判断)                                                           |
|     | GST-Rok                             | JA原型炉条件での非接触プラズマ制御ロジックを検討:<br>詳しい物理計算ができるSONICを基に非定常SONICの改善                                                                                                             | ・不純物放射位置の予測と制御研究(中間2)<br>・不純物のコア蓄積・侵入防止条件の検討と制御(中間2-移行判断)<br>・WF82HS排気・リネンション要素モデル(第一壁に限らない)                                                                                                                                               |
|     | NIFS                                | LHD磁場配位での制御と検証<br>異なる磁場配位での発光分布の計測、RMP印加による発光分布変化の計測、およびその時のデタッチメント維持時間(制御性)との関係を実験で調べる。EMC3-EIRENEとの比較。動的モデルの開発                                                         | ・ダイバータ熱・粒子負荷分布、および発光分布の実験とモデリングとの比較(中間1-2)<br>・不純物種(Ne, Ar, Kr, Xe)による熱排出とガス入射・排気制御モデル(中間1-2)<br>・磁場形状(あるいは摂動磁場、磁気島)による不純物制御の物理モデルの高精度化(中間1-2)<br>・放射損失測定およびガスパフ・排気による非接触プラズマ制御の検討                                                         |
|     | 筑波大                                 | GAMMA10-PDXによる形状効果の基礎実験&モデル検証(LINDA, B2-EIRENE)<br>新装置(高温高密度パイロット装置)による高温高密度プラズマ基礎実験(動的制御)&モデル検証(LINDA)、動的モデル(非定常LINDA)の開発                                               | ・GAMMA10/PDXのダイバータ模擬モジュールにおいて、不純物ガス(Ar, Kr, Xe)パフに対する動的応答、排気制御によるその制御方法の検証(中間1-2)<br>・新たに建設する高温高密度パイロット装置において、GAMMA10を超える高密度領域での放射損失分布計測と安定性の評価、輻射輸送の評価、ガスパフに対する応答(中間2-移行判断)                                                               |
|     | ?                                   | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                                        | ・パイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                                                               |
|     | 名大・東海大・慶應大・信州大                      | シミュレーションコード(LINDA)の非接触モデル導入と動的モデル(非定常LINDA)の開発                                                                                                                           | ・直線装置の非接触プラズマ制御を時系列的に理解するため、非接触プラズマ・モデリングの導入と動的シミュレーション化を進める。<br>・原子分子データベース(信州大)も国内整備で導入する<br>・輻射輸送はプラズマ運転領域が十分でないと思われるまだ考慮しない。                                                                                                           |
| 2.2 |                                     | X点での放射損失の際、ダイバータとコアプラズマ特性とモデリング検証                                                                                                                                        | ⇒ X点付近で非接触を維持するならコアプラズマとダイバータ設計の修正が必要                                                                                                                                                                                                      |
|     | GST-Naka<br>GST-Naka+Rok<br>GST-Rok | ・X点付近で放射損失ピークを維持する高放射損失運転での設計オプションを検討<br>・主プラズマとダイバータプラズマコードの結合<br>・ヘリウム・不純物排気との整合                                                                                       | ・不純物種(複数も含め)による運転領域(高閉じ込め運転、不純物希釈、非接触維持)の検討<br>・ダイバータコードと主プラズマ輸送(不純物)コード(IMPAQT)との結合<br>・定常シミュレーション(SONIC)から非定常ダイバータコード(非定常SONIC)への検討<br>・実験による検証とモデルの改善                                                                                   |
| 2.3 |                                     | 部分・完全非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気性能 (注: 他のアクション項目でも粒子・ヘリウム排気性能検討は議論)                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                            |
|     | GST-Naka                            | JT-60U&SA実験・モデルでの排気検証                                                                                                                                                    | ・(JT-60U)ヘリウム排気特性の検証、非接触ダイバータの違いを評価(中間1)<br>・(JT-60SA)ヘリウム特性の検証、非接触ダイバータの違いを調べる(中間2)<br>・形状効果(スロット位置、V字型コーナー、JT-60Uとの比較)を調べる(中間2)                                                                                                          |
|     | GST-Naka+Rok                        | ダイバータモデル・シミュレーション(SONIC)開発                                                                                                                                               | ・中性粒子間衝突、He輸送モデル(HeH分子、準安定状態、He-D+衝突、He-He衝突等)の開発                                                                                                                                                                                          |
|     | GST-Rok                             | JA原型炉条件での排気モデル検証                                                                                                                                                         | ・SONIC(MPMD)による非接触プラズマにおけるヘリウム排気性能の評価(中間1)<br>・ダイバータ設計条件(排気速度、形状効果)によるヘリウム排気性能の評価(中間2)<br>・He弾性散乱およびDD弾性散乱効果による排気性能への影響評価(散乱モデルの作成)(中間2)                                                                                                   |
|     | NIFS                                | LHD排気付きダイバータにおける排気モデル検証                                                                                                                                                  | ・ダイバータクライオ排気と共に(アタッチ、デタッチ)ダイバータ部の中性粒子圧力計測<br>・EMC3-EIRENEシミュレーションによる排気性能の検証                                                                                                                                                                |
|     | 筑波大                                 | GAMMA10-PDXによる排気検証<br>新装置(高温高密度パイロット装置)による高温高密度プラズマにおける排気検証                                                                                                              | ・GAMMA10-PDXにおいて、角度可変のV字ターゲット及び後方排気扉により閉構造を変化させ、粒子排気特性を変えた際の非接触プラズマ生成への影響を評価<br>・LINDAコード(+Neutralコード)による形状効果を含めたモデリングとの比較<br>・高温高密度パイロット装置において角度可変ターゲットにより傾斜およびVコーナ効果の評価。<br>・差動排気系の制御による粒子排気方法の差異の検証<br>・LINDAコードによる形状効果を含めたモデリングの精度を高める |
|     | 東海大                                 | 直線装置での部分・完全非接触プラズマ生成におけるダイバータ形状とヘリウム排気特性の検討                                                                                                                              | ・終端部に排気速度可変のポンプを設置し、ターゲットの形状変化に対する非接触プラズマ生成過程とヘリウム排気性能を検証する。                                                                                                                                                                               |

### 3. 非接触ダイバータ発生機構の理解と制御に向けたアクションプランへの寄与 --- 各研究機関からの報告

#### 3.1 非接触プラズマ・シミュレーションによる原型炉ダイバータ設計 (QST)

##### (1) 原型炉ダイバータ設計の現状

原型炉の核燃焼プラズマから排出される熱流とプラズマ粒子の処理を行うダイバータの設計は、核融合炉の実現に向けた重要課題である。現在 1.5 GW レベルの核融合出力で定常運転を目指す日本の原型炉 (表 3-1-1) において、ITER の物理・工学概念の延長として検討が進められているダイバータ設計の現状は、すでに核融合学会誌および Nucl. Fusion 誌に掲載された[1-3]。熱排出シナリオでは、主プラズマとダイバータの両方において ITER より大きな放射損失 (3-4 倍) を行う必要がある。定常運転を目指す日本のプラズマ設計提案では安全係数を高く設定するため、ITER よりもプラズマ電流は低く低密度となり、ダイバータの非接触プラズマ制御と同時に不純物ガス入射による燃料希釈も課題となり不純物イオン密度の制限はより厳しくなる。従って、現在、ダイバータ設計では熱処理パラメータ ( $P_{sep}/R_p$ ) を 25-33 MW/m と考えており、この値は ITER の 1.6-2 倍に相当する。そのため ITER より 1.6 倍大きなダイバータ (第 2 章図 2-2) を想定してシミュレーションによる検討を行っている。

非接触プラズマの発生とダイバータ板への熱負荷の評価には、SONIC (第 2 章図 2-1) [4-6] が使用され、主プラズマの周辺部から排出されるパワーとプラズマ粒子を設定し、プラズマ・中性粒子・不純物イオンの輸送計算をそれぞれ繰り返し、得られた自己無撞着な定常解を基に放射損失分布やダイバータ板への熱負荷が評価される (第 2 章図 2-3)。ITER よりもサイズが大きく、SOL からダイバータにかけての温度差も大きく、ダイバータ密度も高い原型炉ダイバータ環境のため、メッシュ点を増やし高速で同時計算を繰り返すことが要求される。

表 3-1-1: 原型炉概念設計パラメータ

(2014 年設計案、非円形度と放射損失を増加した修正案、ITER)。

| Parameters                             | JA DEMO2014 (steady-state) | JA DEMO increasing $\kappa_{95}$ and seeding | ITER (Q=10 inductive)      |
|----------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
| $R_p/a_n$ (m)                          | 8.5/ 2.42                  | 8.5/ 2.42                                    | 6.2/ 2.0                   |
| $A$                                    | 3.5                        | 3.5                                          | 3.1                        |
| $\kappa_{95}$                          | 1.65                       | 1.75                                         | 1.70                       |
| $q_{95}$                               | 4.1                        | 4.1                                          | 3                          |
| $I_p$ (MA)                             | 12.3                       | 13.5                                         | 14                         |
| $B_T / B_T^{max}$ (T)                  | 5.94/ 12.1                 | 5.94/ 12.1                                   | 5.3/ 12                    |
| $P_{fusion} / P_{nrec}$ (MW)           | 1462/ 507                  | 1694/ 588                                    | 500/ --                    |
| $Q$                                    | 17.5                       | 17.7                                         | 10                         |
| $P_{aux}$ (MW)                         | 83.7                       | 95.6                                         | 73                         |
| $\langle n_e \rangle (10^{19} m^{-3})$ | 6.6                        | 7.2                                          | ~10                        |
| $H_{98}(v_{21}) / \beta_N$             | 1.31/ 3.4                  | 1.32/ 3.4                                    | 1.0/ 1.8                   |
| $f_{BS}$                               | 0.61                       | 0.61                                         | 0.15                       |
| $n_e / n_e^{GW}$                       | 1.2                        | 1.2                                          | ~0.9                       |
| $n_{He} / n_e$ (%)                     | 7                          | 7                                            | < 5                        |
| $n_{imp} / n_e$ (%)                    | 0.25 (Ar)                  | 0.60 (Ar)                                    | N <sub>2</sub> , Ne, Ar... |
| $P_\alpha + P_{aux} (=P_{heat}, MW)$   | 376                        | 435                                          | 173                        |
| $P_{rad}^{main}$ (MW)                  | 82                         | 177                                          | ~70                        |
| $P_{rad}^{main} / P_{heat}$            | 0.22                       | 0.41                                         | 0.40                       |
| $P_{sep}$ (MW)                         | 294                        | 258                                          | ~100                       |
| $P_{sep} / R_p$ (MWm <sup>-1</sup> )   | 34.5                       | 30.4                                         | ~16                        |

power exhaust concept by Ar seeding ( $f_{rad}=0.84$ )

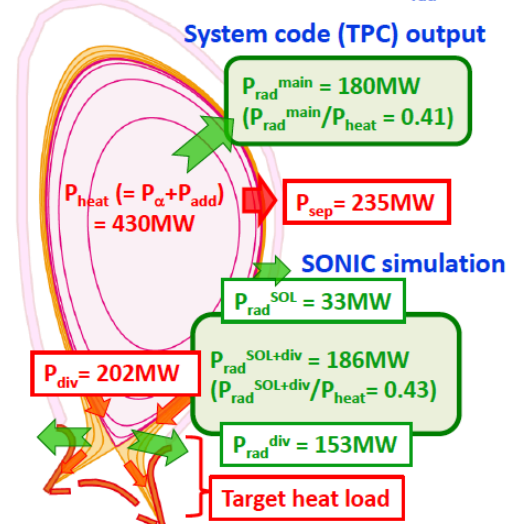


図 3-1-1: 修正案でのプラズマからの排出パワーとアルゴンガスパフによる放射損失パワーの配分。



また、原型炉の中性子照射環境においては、ITER ダイバータの工学設計をベースにした高熱負荷用(定常熱負荷:10MWm<sup>2</sup>)のダイバータ冷却ユニット(CuCrZr冷却配管)を原型炉の運転開始当初は使用するとして検討を進めている。Ar ガスの入射による熱排出シナリオをシステムコード(TPC)とダイバータ・シミュレーションコード(SONIC)で検討した結果、放射損失割合が高い運転 ( $f_{\text{rad}}^{\text{tot}} = (P_{\text{rad}}^{\text{main}} + P_{\text{rad}}^{\text{sol}} + P_{\text{rad}}^{\text{div}}) / P_{\text{heat}} = 0.84$ 、図 3-1-1) ではダイバータ板での熱負荷ピークが5MWm<sup>2</sup>程度まで低下することから、 $P_{\text{fusion}}$  の増加や  $f_{\text{rad}}^{\text{tot}}$  を低下した運転あるいは若干小型化したダイバータも可能と思われる。一方、CuCrZr 冷却配管を使用するため1-2年毎に遠隔保守が必要な設計案に代わる、原型炉後期および商用炉に向けた物理と工学および対向・構造材料の開発も原型炉計画では不可欠である。

## (2) 原型炉ダイバータ設計における非接触ダイバータ制御とアクションプラン

放射損失の増加によるプラズマの低温・高密度化(1eV以下)により、ダイバータ板へ向かうプラズマ粒子束の再結合(中性粒子化)が進むとともに、運動エネルギーがイオンや中性粒子との弾性散乱により散逸(分散)され、ダイバータ板へのプラズマ粒子束と熱負荷は急激に減少する。この非接触プラズマ発生の原理は、直線装置などの基礎実験では一般的であるが[7]、磁場形状(磁力線ピッチ)が変化し、温度・密度勾配等により磁場を横切る方向へ非拡散過程輸送やドリフトが発生するトカマク装置のダイバータではストライク点へ向かうプラズマ粒子束の分布はさらに影響を受けると考えられる[8]。それに加え、原型炉サイズの高密度プラズマでは、局所的に水素放射線の吸収によるイオン化(光輸送)[9]や不純物イオンの再結合などの原子・分子過程[10]、弾性散乱、水素プラズマから不純物イオンへの熱力や摩擦力が顕著[4,11]になり、放射損失のピークやイオン化フロント位置の予測や制御にかかわる要因は複雑に絡み合う。

アクションプランの「プラズマ運転シナリオ」では、ダイバータシミュレーションコード(SONIC)と非接触プラズマモデリングの開発・改善を行うとともに、原型炉ダイバータの基本形状の設計とプラズマおよび放射や中性粒子エネルギーを含めた総熱負荷ピークが10MWm<sup>2</sup>程度以下となる運転領域の評価が求められる。シミュレーションには以下に示す各種のモデリングを組み込むとともに、実験結果や同種あるいは他解法のコードとの比較を行い、アクションプランの「工学設計」期間早期には原型炉ダイバータ設計の根拠となる程度まで完成することを目指している。また、本ワーキンググループでは検討していないが、主プラズマとダイバータプラズマコードの結合:ダイバータコード(SONIC)と主プラズマ輸送コード(TOPICS・IMPACT)による原型炉プラズマ設計は、「第2回中間C&R」から「移行判断時期」に最優先で進めるべきアクションである。それらへの計算資源や人材の加速投入によりシミュレーション・コードの開発を早めることで、総合的な設計の完成度と信頼度を高めることが必要である。

ここでは、第2章の原型炉ダイバータの概念設計の概要に対して、「第1、第2回中間C&R」および「移行判断」に向け、QSTの原型炉設計(合同特別チーム)を中心に、現在検討している主要な研究開発内容をアクション項目順にまとめる。原型炉設計では、主プラズマからの熱排出シナリオの検討を含め、非接触ダイバータを維持できる具体的なダイバータ形状および実験経験に基づいた運転可能な主要パラメータ範囲を示すことが望まれる。第2章の表2-3(QST-RokおよびQST-Naka&Rok)にはその要約を、添付表A-2にはその詳細と制約などを記した。

## 1. 非接触プラズマ発生機構の理解とモデリング（シミュレーション）の改善

目標：トカマク磁場配位の原型炉条件（高パワー排出、高温・低密度 SOL）でのダイバータ形状設計と非接触プラズマと熱負荷分布の予測を行う。

### 1.1 非接触プラズマ発生における水素原子・分子のモデル改善と設計へ反映

- ・低温・高密度条件 ( $T_e < 1\text{eV}$ 、 $n_e \sim 10^{21} - 10^{22} \text{m}^{-3}$  程度) における体積再結合と表面再結合モデルの再評価、および、水素イオンと中性原子・分子との弾性散乱によるエネルギー散逸（クヌーセン数やプラントル数などを用いた理論との妥当性）の評価を高める（第2回中間 C&R）。
- ・水素同位体効果による非接触プラズマへの影響について、プラズマ流体を含め重水素(D)とトリチウム(T)混合の有効原子数を 2.5 として評価する（第2回中間 C&R）。詳細な影響評価が必要な場合には、DT 混合モンテカルロ計算のために T を含む原子・分子データベースの整備が必要（移行判断）。
- ・光輸送の非接触プラズマへの影響は近似モデルにより評価し、イオン化が進むが中性粒子分布も変化し、ダイバータ板では 20% 程度の密度変化に留まる結果となった。原子励起モデルで新たな知見があれば再評価する。

### 1.2 非接触プラズマ発生におけるプラズマ輸送モデル改善と設計への反映

QST ではプラズマ流体コード(SOLDOR)へドリフト項を導入するとともに解法を含め新規に作成する計画（3年程度）であり、それを組み込んだ SONIC による以下に示すような検証が「第2回中間 C&R」の目標である。その際、非対称なダブルヌル形状での SOL プラズマ輸送を検証する計画もある。

現在は、主プラズマからの熱排出及び SOL・ダイバータでの放射損失パワー、入射不純物種および拡散係数など、原型炉での非接触プラズマ生成に大きく影響しうるパラメータを検証している。新 SOLDOR 完成後は、実験データ比較によるモデルの改善を行いつつ、「移行判断」をめざしてダイバータ運転の予測精度を上げる。計算資源や人材の加速投入により本開発を早めることはアクションプラン「ダイバータ」全体の進展に不可欠である。

- ・拡散係数（値と径方向分布）およびプラズマ排出の内外非対称性による非接触発生への影響を検討し、総熱負荷  $10\text{MWm}^{-2}$  以下でのダイバータ運転領域を評価する（第1および第2回中間 C&R、移行判断）：その際、熱負荷ピーク以外に、（形状・サイズ・放射損失について）プラズマ温度・密度分布と熱負荷分布の半値幅( $\lambda_q$ )と非接触プラズマ幅(S)との関係性を評価し、簡易モデル化を目指す。
- ・ドリフト輸送の導入および拡散係数の分布が、内外ダイバータでの非接触プラズマの非対称性、および熱負荷ピークへの影響を明らかにし、モデルや入力パラメータの改善を進める（第2回中間 C&R、移行判断）。
- ・高温 SOL（低衝突周波数）での数値解法(流体近似およびフラックスリミタ等の外挿性)を検討し、修正必要なら SOLDOR へ実装する（第2回中間 C&R、移行判断）
- ・速度非等方性効果を検討し、流体方程式への導入を進める。一方、粒子コードの開発を流体コードにおける運動論効果および非定常化モデルの検証のため進める（移行判断及びその後）



### 1.3 非接触ダイバータにおける放射損失と不純物輸送モデル改善と設計へ反映

(入射不純物量と種類、ダイバータおよび SOL での不純物イオンの遮蔽効果) 並列計算機の高性能化に対応できるよう MPMD(Multiple Program Multiple Data)化が行われた SONIC を使用して複数の不純物の計算が可能になった。平行して、高 Z イオン (タングステン) の発生・輸送について運動論効果を取り入れ(IMPGYRO コード)検討する。

- ・複数不純物入射に対する輸送コードを開発・改善中であり、不純物入射による非接触ダイバータでの He 排気の評価 (第 1 回中間 C&R) と共に、単独および複数不純物入射による周辺及びダイバータ放射損失の増加と非接触プラズマへの影響を検討する (第 2 回中間 C&R)。
- ・原型炉ダイバータのプラズマモデルの改善に対して、不純物輸送及び放射損失分布への影響を評価: 具体的には、高温 SOL (低衝突周波数) における (磁力線に沿う) 不純物輸送モデルの検証と改善 (熱力と摩擦力) を行う (第 1-2 回中間 C&R)。コアから排出される熱流のポロイダル非対称分布の導入と仮想的なプラズマ流の想定 (第 2 回中間 C&R)。ドリフト導入 (および SOL 流、粘性項) を含む新 SONIC 開発後に不純物イオン輸送と高放射損失を再評価 (移行判断)。
- ・(拡散係数の分布、ドリフト効果などによる) プライベート部での影響評価と不純物輸送のモデル化 (第 2 回中間 C&R~移行判断)
- ・不純物イオンの異常拡散輸送 (拡散係数の増加) を検証し (第 1 回中間 C&R)、必要ならモデル開発を行う (原型炉条件への外挿性や不純物種依存性、第 2 回中間 C&R)。
- ・原型炉 SOL とダイバータにおける高 Z イオン (タングステン) の輸送における運動論効果(IMPGYRO)の検討 (第 1 および第 2 回中間 C&R、移行判断)
- ・不純物の衝突・放射データの精度 (特に低温での Ne/Ar/Kr、W)、光輸送 (He, Ar 等の評価: 連続光による光吸収も含め) の影響を評価 (第 2 回中間 C&R)。

### 1.4 部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果の検証と設計へ反映

日本のダイバータ熱排出シナリオを満たす、非接触プラズマ生成・維持に適切なダイバータ形状 (レッグ長、閉構造、ダイバータ板の傾斜角、ドーム形状、および排気口サイズと位置) をシミュレーションにより設計する。

- ・部分 (および完全) 非接触ダイバータを得やすい形状 (特にレッグ長) に対する効果を設計ベース化し (非接触ダイバータでの熱負荷分布: 半値幅、非接触プラズマの幅および接触部でのプラズマ温度・密度)、工学設計の基本案、必要ならオプション案を示す (第 2 回中間 C&R)。
- ・原子・分子の衝突モデルの導入(1.1)と共に、ダイバータ圧力、非接触プラズマ発生予測の精度を向上し、排気量の評価と排気口位置を定める (第 2 回中間 C&R)。
- ・ITER や JT-60SA 等の形状効果と SONIC 中のモデルを改善した結果を踏まえ、粒子および He 排気の向上に適するようダイバータ形状 (ダイバータ板角度、ドーム、リフレクター、排気口位置) を修正する (第 2 回中間 C&R~移行判断)。

### 1.5 非接触プラズマでの熱負荷評価の検証と設計へ反映

プラズマシース境界条件、放射損失の反射・吸収（熱負荷）、表面再結合などの評価を改善し、非接触プラズマ分布（幅）の制御やピーク熱負荷の低減に有利なダイバータ・サイズや形状を、「工学設計」に反映できるようにする。

- ・高密度の非接触ダイバータにおけるシース境界条件(粒子・エネルギー輸送) [12]を実験研究やモデル検討から判断し、ダイバータシミュレーションに組み込み、熱負荷評価の精度を改善し(第2回中間 C&R)、ダイバータ運転のパラメータ領域の再評価を行う（移行判断）。

### 1.6 部分非接触プラズマでのタングステン(W)損耗評価とモデリング検証

原型炉の SOL・ダイバータにおける非接触プラズマのモデリングおよび不純物輸送モデルの改善を反映した、接触ダイバータ領域の温度・密度と不純物イオンによる W 損耗への影響と損耗率を評価する。

- ・接触ダイバータ領域の温度・密度分布の精度を高めるとともに（SOL 外側の拡散係数の温度・密度分布への影響を評価し、blob による非拡散モデルを検討）、不純物による W 損耗・堆積・反射（IMPGYRO と SONIC との反復計算）の評価を行う（第2回中間 C&R、移行判断）。
- ・W 不純物輸送モデル（IMPGYRO と SONIC）における過渡的な高熱負荷、プレシース、電場の影響などを検討する（第2回中間 C&R、移行判断）
- ・再堆積 W 層の物性変化（スパッタ率、熱伝達など）による損耗・再堆積のデータを収集し、接触プラズマ領域での実効損耗率を評価する（第2回中間 C&R、移行判断）

## 2. 原型炉ダイバータの非接触プラズマを制御する実験と動的モデリングの開発

目標：原型炉条件での部分非接触プラズマを標準とし、非接触プラズマをダイバータレッグで維持する制御手法を開発する。特に原型炉ダイバータ設計では、詳しい物理計算可能な定常 SONIC を基に、制御手法を模擬する動的シミュレーション（非定常 SONIC）を開発し、その実用的な設定案を検討する。

### 2.1 部分非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置の制御とモデリング検証

- ・非接触プラズマ制御のための計測（分光、ボロメータ、トムソン等）とアクチュエータ（不純物ガス種、パフ位置、追加熱等）を比較し、基本的な制御手法案を設計する（第2回中間 C&R、移行判断）
- ・（オプションとして）完全非接触ダイバータの生成・維持に適した新たなダイバータ形状、不純物種の選択などを検討する（第2回中間 C&R、移行判断）
- ・不純物イオンの主プラズマへの蓄積防止の検討と制御（第2回中間 C&R～移行判断）
- ・過渡的な高熱負荷による接触プラズマへの対処手法とモデリング検証
- ・W および F82H 第一壁材の損耗・輸送・主プラズマ輸送の検討とモデルの開発（第2回中間 C&R～移行判断）

### 2.2 X 点での放射損失の際、ダイバータとコアプラズマ特性とモデリング検証

- ・X 点付近で放射損失ピーク（非接触フロント）を維持する運転を視野に入れる場合、主プラズマパラメータとダイバータ設計の修正が必要：工学設計期間

以前に実験による検証が必要であるが、JT-60SA 等や ITER での確証がない場合は設計オプションとして検討を進める必要がある。そうした運転条件での主プラズマとダイバータコード (SONIC と TOPICS・IMPACT)による JT-60SA 等や ITER での実験結果との検証を行う。さらに、不純物種(複数も含め)による運転領域の検討(高閉じ込め運転、不純物希釈、非接触維持)は必要となる(第2回中間 C&R~移行判断)。

- ・さらに、ヘリウム・不純物排気との整合の評価、および X 点付近とダイバータレック間で放射損失ピークの制御のため、非定常ダイバータコード(非定常 SONIC)による検討も必要となる。

### 2.3 部分・完全非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気性能の評価と設計へ反映(他のアクションプラン項目でも粒子・ヘリウム排気性能は含まれる)

MPMD した SONIC を利用して複数不純物の輸送が可能になった。現状の原型炉ダイバータでの Ar 入射による非接触ダイバータ生成と He 排気モデル計算を開始し、ダイバータ運転の制約を検討する(第2回中間 C&R を目標)。

- ・非接触プラズマにおける He 排気性能のシミュレーション評価(第1回中間 C&R)、設計改善(散乱モデル、排気速度、形状効果)による排気性能の再評価(第2回中間 C&R)。
- ・He-D および D-D (T) 弾性散乱効果による排気性能への影響評価(第2回中間 C&R)。
- ・主プラズマとダイバータコードの結合による He 排気シナリオ検討(移行判断)

#### 参考文献：

- [1] N. Asakura, K. Hoshino, J. Plasma Fusion Res. **92**, 12 (2016) 870-876.
- [2] S. Suzuki, N. Asakura, J. Plasma Fusion Res. **92**, 12 (2016) 886-890.
- [3] N. Asakura, et al., Nucl. Fusion **57** (2017) 126050.
- [4] K. Shimizu, et al., J. Nucl. Mater. **313-316** (2003) 1277.
- [5] H. Kawashima, et al., J. Plasma Fusion Res. **1** (2006) 31.
- [6] K. Hoshino, et al., J. Plasma Fusion Res. **86**, 12 (2010) 681-684.
- [7] N. Ohno, J. Plasma Fusion Res. **80**, 3 (2004) 212-216.
- [8] N. Asakura, J. Plasma Fusion Res. **80**, 3 (2004) 190-200.
- [9] N. Ohno, J. Plasma Fusion Res. **75**, 10 (1999) 1162-1167.
- [10] T. Nakano, et al., J. Nucl. Mater. **438** (2013) S291-S296.
- [11] M. Toma, et al., J. Plasma Fusion Res. **86**, 12 (2010) 685-689.
- [12] Y. Kikuchi, et al., J. Plasma Fusion Res. **90**, 8 (2014) 480-488.



## 3.2 JT-60U/SA/ITER における非接触ダイバータ実験・制御研究および開発計画 (QST)

原型炉ダイバータのアクションプラン「中間チェック&レビュー（第1、2回中間C&R）」および「移行判断」に向けたJT-60SA（QST、那珂研）の「非接触ダイバータ実験・制御研究」について、アクション項目順にまとめる。JT-60SA リサーチプランでは、大きな熱パワー排出に対して、ITER を模した垂直ダイバータ板形状において非接触ダイバータを維持・制御する実験成果とシミュレーション・モデリングの改善が望まれる。また、JT-60U の炭素対向材で半開放（セミクロズ）形状（W 型）のダイバータにおいても非接触ダイバータの生成・制御実験とモデリング研究が行われており、その結果はアクションプランに寄与する。第2章の表2-3（JT-60U&JT-60SA、QST-Naka）にはその要約を、添付表A-2には詳細や制約などを記した。

### 1 非接触プラズマ発生機構の理解とモデリング（シミュレーション）の改善

#### 1.1 非接触プラズマ発生における水素原子・分子のモデル改善と設計へ反映

ダイバータ・ターゲット板への熱負荷を低減するには非接触状態のプラズマを生成・維持することが重要である。非接触状態プラズマの生成には水素イオンが中性化することによりダイバータ・ターゲット板への水素イオン束を減少させることが本質である。水素イオンの中性化には主に以下の2種の素過程が主要であると考えられている：

1. 水素イオンが電子と結びつく、すなわち電子と再結合する過程[1]、および
2. 水素イオンが水素分子や不純物分子と荷電交換する（その後、水素または不純物分子イオンは電子と解離性再結合する）過程、いわゆる分子活性化再結合過程。

JT-60U での実験では1. 電子・再結合過程による水素イオン束の減少と2. 分子活性化再結合による水素イオン束の減少はほぼ同程度であると見積もられた[2]。ただし、解析に用いた衝突放射モデルに組み込まれた原子・分子データは現在までに大幅に改善されたため再解析の必要がある。これを【第1回中間C&R】までに行う。

さらに原型炉ダイバータのように中性粒子圧力が高い場合では2. 分子活性化再結合の効果とともに中性粒子同士の衝突の効果や輻射吸収の効果が顕在化する可能性がある。JT-60SA では V 字型コーナーによる中性粒子圧力の高い非接触プラズマで追実験を行い、最新の衝突放射モデルで解析する計画である。これを【第2回中間C&R】までに行う。

ITER も同様に V 字型コーナーを持つため、さらに高い中性粒子圧力領域の非接触プラズマで水素イオン中性化に関する追実験を行う。これによって、JT-60U/SA 及び ITER で蓄積された知見により原型炉ダイバータの非接触プラズマにおける主要素過程の効果を高い精度で予測可能にする。

#### 1.2 非接触プラズマ発生におけるプラズマ輸送モデル改善と設計へ反映

ダイバータ・ターゲット板上のストライク点付近への熱負荷の集中を防ぐには熱負荷を広く分散させることが本質的である。一方、熱負荷分布の幅はポロイダル磁場の $-1.19$ 乗に比例することが国際トカマク物理活動（ITPA）による共同研究で示され[3]、ITER でのそれは設計時にシミュレーションで使用された値（拡散係数 $\chi$ を与えることにより決まり約3mm程度）よりも厳しい値（約1mm程度）であった。このスケーリングは赤外カメラによるダイバータ・ターゲット板上の熱負荷分

布のデータベースをもとに構築されたが、非接触ダイバータにおける散逸効果に関するデータベースのスケージングはまだ確立されていない。

JT-60Uでは可動静電プローブによる豊富な実験データベースがあり、Lモードおよび比較的低密度のHモードに限られるが、これをもとに粒子束分布の幅の密度依存性を調べ上記スケージングとの比較を行う。これを【第1～第2回中間C&R】までに行う。

JT-60SAの高プラズマ電流運転ではポロイダル磁場がITPAスケージング構築時の最大値である0.8 Tを越える可能性があり、原型炉に向けてスケージングの外挿性を検証できる可能性がある。この検証実験を【第2回中間C&R】までに行う。

ITERでは原型炉に相当するポロイダル磁場1.3 Tでの実験が可能であるため、このスケージングの最終的な検証を行うとともに、原型炉での熱負荷分布の幅を高い精度で予測する。

また、JT-60UとJT-60SAにおいては、電場や磁場勾配が関係するドリフト運動やSOLへのプラズマ排出の内外非対称性が原因で発生すると考えられている熱・粒子束の内・外ダイバータ非対称性や、非接触プラズマ発生機構と揺動との関連を固定静電プローブ（ポロイダル及びトロイダル分布）及びAXUVなどの高速サンプリングが可能な計測器とモデリングを使用して調べる計画である（【第2回中間C&R】まで予定）。

### 1.3 非接触ダイバータにおける放射損失と不純物輸送モデル改善と設計へ反映

ダイバータ・プラズマの非接触化には、まず、主プラズマから排出された高温のプラズマをSOL及びダイバータ領域で十分に冷却し、その後、水素イオンを中性化させることが重要である。プラズマの冷却に本質的な役割を果たすのは不純物イオンによる光の放射である。

JT-60Uでは、電子と不純物イオンの再結合が放射を増大させる本質的な素過程であることを炭素イオンとネオンイオンに対して明らかにした[4,5]。原型炉ダイバータ・プラズマの冷却に向けて、更に放射パワー効率の高いアルゴンやクリプトンなどを用いる場合や、例えばネオンとアルゴンを同時に入射する場合などでも、これら不純物イオンと電子の再結合が本質的な役割を果たすかどうかを調べる必要がある。同時に、主プラズマへの不純物イオンの混入量は最低限に抑制する必要がある。すなわち、不純物圧縮率（ダイバータ・プラズマ中の不純物密度の主プラズマ中の不純物密度に対する比）の定量的な評価が重要である。この観点からJT-60Uでの実験データの解析を【第2回中間C&R】までに行う。

JT-60SAでは、ネオンやアルゴンに加えて、特に窒素やクリプトン、キセノンなどの冷却特性を明らかにする計画である。さらに、加熱パワー（Hモード遷移パワーの1.5倍以上）とプラズマ密度一定の条件下でダイバータ・プラズマの非接触化に必要な不純物量の原子番号依存性（窒素、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン）、及びこれの加熱パワー依存性、閉じ込め性能との関連、ELM特性との関連などJT-60Uでは取得されていない系統的なデータの取得を行う。以上を【第2回中間C&R】までに実施する。

ITERでは更に高いパワーがダイバータに流入する。そのようなダイバータにおいて、プラズマを適切に冷却する運転方法を確立する。これによって、それまでに理解された不純物の冷却特性（再結合の効果、圧縮率など）がどの程度の外挿性を

持つかを検証し、原型炉への見通しを得る。

#### 1.4 部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果の検証と設計へ反映 (特にダイバータ長、閉構造、傾斜角とVコーナーなど)

JT-60SAでは、ダイバータ開口部を絞りV字型コーナーによって中性粒子圧力を高めてダイバータ・プラズマを低温・高密度化させ、非接触プラズマが発生する運転領域の拡大を目指す。半開放形状のJT-60Uの非接触プラズマ発生運転領域との比較によりV字型コーナーの効果を検証し、原型炉ダイバータ形状の決定に資する。これはJT-60SAダイバータ研究の最も重要な課題の一つである。また、JT-60SAでは排気速度を変更することができるため、排気速度と非接触プラズマ発生運転領域の関係を定量的に調べ、JT-60Uの同様の実験結果[6]と比較を行う。これを【第2回中間C&R】までに行う。

ITERも同様にV字型コーナーを持つため、JT-60SAの非接触プラズマ発生運転領域とITERのそれをあわせて検討し、原型炉ダイバータでのV字型コーナーを用いた非接触プラズマ発生運転領域の同定に役立てる。

## 2 原型炉ダイバータの非接触プラズマを制御する実験と動的モデリングの開発

### 2.1 部分非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置の制御とモデリング検証

JT-60SAでは、特に金属壁への換装後では原型炉で要求されるプラズマ冷却性能を達成するために、不純物による放射冷却領域をダイバータに加えて主プラズマ周辺部まで拡大する運転を目指す。特に、複数不純物を同時に入射し、原子番号の小さい不純物はダイバータで、及び原子番号の大きい不純物は主プラズマ周辺部で放射させるように実時間で制御する実験を行う。実験では、部分及び完全非接触ダイバータ・プラズマ状態において、不純物の圧縮率や粒子排気効率などのデータを定量的にまとめる。これを【移行判断】までに完了する。

ITERでは、JT-60SAでの不純物制御に関する知見を基に、主プラズマ周辺部まで放射領域を拡大しつつ、一方でコア部への不純物の進入を低減し、燃焼性能と整合する運転手法を開発する。

### 2.2 X点での放射損失の際、ダイバータとコアプラズマ特性とモデリング検証

上述の2.1部分非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置の制御とモデリング検証において、放射損失ピーク位置がX点にある場合の閉じ込め性能とX点でない場合の閉じ込め性能を比較し、放射損失ピーク位置がX点にあることを許容できるかどうかの判断を行い、原型炉の運転領域を見通す。これを【移行判断】までに完了する。

ITERにおいてもX点に放射損失ピークがある場合に燃焼性能と整合する運転領域を同定する。

### 2.3 部分・完全非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気性能の評価と設計へ反映(他のアクション項目でも粒子・ヘリウム排気性能は含まれる)

重水素・三重水素の核融合燃焼反応で発生するヘリウムはダイバータ排気によって排出され、適切な密度まで減少させる必要がある。さらに、このような適切なヘリウム排気効率は原型炉で要求される高ベータ・定常・高密度かつ非接触ダイバータ・プラズマ運転と整合する必要がある。

JT-60Uでは定常 ELMyH モード放電（ただしダイバータは非接触ではない）でヘリウム密度を一定に保つ運転法が開発済みであり[7]、さらにダイバータに輸送されたヘリウムは重水素イオンとの弾性衝突により運動量を得て一部のヘリウム原子が排気スロットへ導かれることが明らかにされた[8]。弾性衝突によってヘリウムが得た運動量（運動の方向）と排気スロットの幾何学的な配置がヘリウム排気効率に大きな影響を与えることが予想される。

JT-60SAでは JT-60U よりもダイバータは閉型でレグが長い形状を持つことから、JT-60SA で同様の実験を行い、結果を比較することによって原型炉ダイバータ形状の決定に資する。また、JT-60SA の高ベータ・定常・高密度かつ非接触ダイバータ・プラズマ運転において、主プラズマにおけるヘリウム密度を一定値以下に維持できることを示し、原型炉の定常運転に見通しを得る。これを【第2回中間C&R】までに実施する。

ITERでは、燃焼プラズマから実際に発生するヘリウム灰を、JT-60SA で開発する非接触プラズマにおけるヘリウム排出方法を基に、非接触プラズマと整合する定常的なヘリウム排出方法を開発する。

参照文献：

- [1] K. Fujimoto, T. Nakano, et al., Plasma and Fusion Res. **4** (2009) 025.
- [2] H. Kubo, H. Takenaga, et al., J. Nucl. Mater. **337** (2005) 161.
- [3] T. Eich, A.W. Leonard, et al., Nucl. Fusion **53** (2013) 093031.
- [4] T. Nakano, H. Kubo, et al., J. Nucl. Mater. **390-391** (2009) 255.
- [5] T. Nakano, N. Asakura and H. Kubo, J. Nucl. Mater. **438**, (2013) Sup. S291.
- [6] T. Nakano, H. Kubo, et al., Nucl. Fusion **48** (2008) 085002.
- [7] A. Sakasai, H. Takenaga, et al., J. Nucl. Mater. **290-293** (2001) 957.
- [8] H. Kubo, H. Takenaga, et al., Plasma Phys. Contr. Fusion **41** (1999) 747.



### 3.3 シミュレーションコードと非接触ダイバータモデリングの開発計画(QST)

原型炉のダイバータプラズマ性能を予測するために、ダイバータシミュレーションコードにより実験で観測される非接触ダイバータを再現し、原型炉へ向けて信頼性・予測精度を向上させることが必要不可欠である。

QSTでは、原型炉や JT-60SA、ITER に向けて、ダイバータシミュレーションコード SONIC の開発を継続しており、第 3.1 節に記した特別チームでの原型炉ダイバータの検討や第 3.2 節に記した JT-60SA の運転シナリオ解析等に適用してきた。SONIC コードを用いた JT-60U の非接触ダイバータシミュレーションの例[1]を以下に示す。図 3-3-1 に示すように、赤道面密度の増加に伴い、ダイバータへのイオン粒子束が増加していくが、 $0.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  あたりを境にロールオーバーが起これ、粒子束が減少していくという非接触ダイバータの傾向を再現することができている。一方、実験結果と比べた場合、絶対値の違いは壁排気効果等の影響が大きいと考えられるが、特に、非接触プラズマが発生・進行する際に見られるロールオーバー後の粒子束の減少度が相対的に小さい。また、非接触ダイバータの内外ダイバータ非対称性が小さい等、定量的な予測には課題が残る。海外のダイバータコード (SOLPS、EDGE2D 等) でも同様な結果が報告されており[2]、非接触ダイバータ、特に粒子束減少の再現は、世界的な課題となっている。

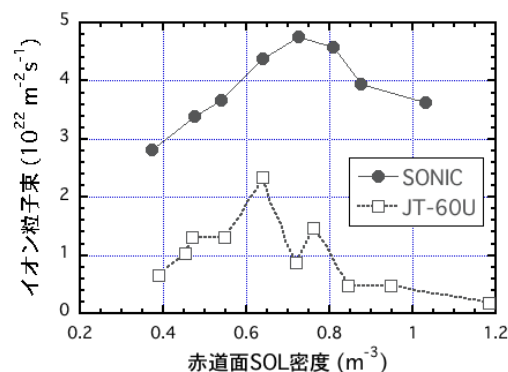


図 3-3-1 SONIC コードによる JT-60U シミュレーション例。

以下、非接触プラズマの発生機構解明及びシミュレーションによる再現に向けて必要と考えられる主な開発内容についてまとめる。ただし、ここであげる開発項目については、現時点で必要と考えているものの一例である。非接触プラズマシミュレーションに向けては、多くの物理モデルの開発に加え、まだ未解明な物理機構があると考えられ、実験的研究によりその物理機構の理解を進め、コード開発へ反映していく必要がある。

ここでは、「第 1 および第 2 回中間 C&R」および「移行判断」に向け、QST のシミュレーション開発 (那珂および六ヶ所) において、現在検討している主要な研究開発内容をアクション項目順にまとめる。第 2 章の表 2-3 (QST-Naka&Rok) にはその要約を、添付表 A-2 には詳細や制約などを記した。

#### 1. 非接触プラズマ発生機構の理解とモデリング (シミュレーション) の改善

##### 1.1 非接触プラズマ発生における水素に関する原子・分子過程

非接触プラズマ発生には、原子・分子過程が本質的である。特に原型炉では、高い熱流を処理するためにダイバータにおける中性粒子密度が高くなるため、原子・分子モデルの更なる高精度の評価が必要と考えられる。例えば、CR モデルを用い



た高精度な分子反応データの実装、分子活性化再結合反応 (MAR) モデルの実装、中性粒子間衝突モデルの開発等により、基本モデルの高度化を「第 1 回中間 C&R」へ向けて進め、非接触プラズマ発生への影響を明らかにする必要がある。

また、原子・分子過程に対する振動・回転励起の重要性が実験的・理論的に指摘されている。さらに、現在のモデルでは中性粒子が壁で反射すると基底状態で放出しているが、励起状態で放出されれば、原子・分子過程を通して非接触プラズマ発生に大きな影響を与える可能性がある。これまでのダイバータシミュレーションではこのような扱いが不十分であり、モデル開発・実装と影響評価を「第 2 回中間 C&R」を目標に進める必要がある。

## 1.2 非接触プラズマ発生におけるプラズマ輸送

一般に、磁力線を横切る輸送については異常拡散を仮定し、実験データとの比較に基づき、その拡散係数をパラメータとして与えるが、プラズマパラメータに対する依存性はほとんど考慮されていない。プラズマ分布およびシミュレーションにおける非接触プラズマの再現には磁力線垂直方向の輸送の役割は大きく、空間構造を含むプラズマパラメータ依存性について検討を行い、「第 1 回中間 C&R」を目標にモデル化・実装を進め、非接触プラズマを再現し、原型炉へ向けた外挿性を高める必要がある。

また、内外ダイバータにおける非接触プラズマの非対称性の再現や 1.3 に述べる不純物輸送には、SOL プラズマ流が重要な役割をもつが、現在のシミュレーションでは実験に比べて SOL 流速が低いと考えられている。SOL 流形成にはドリフトや運動論的效果の重要性が指摘されており、海外コード(SOLPS、UEDGE)ではドリフト効果の実装が進んでいるが、必ずしもその効果が明らかになっているとは言えない。現在、QST では、このようなドリフト効果や、未実装の運動論的效果のモデル化等を含むプラズマ流体コードの開発を計画しており、「第 1 回中間 C&R」を目標に SONIC へ組み込み、非接触プラズマへの影響について検証を進める必要がある。

## 1.3 非接触プラズマにおける放射損失とピーク位置

不純物輸送には磁力線方向の摩擦力と熱力のバランスが重要である。摩擦力の評価には、前項で述べた SOL 流の再現が重要である。また、熱力については、既存モデルでは衝突度依存性を含んでいないため熱力を過大評価しており、不自然に不純物イオンを SOL 領域の上流へ逆流させる傾向にある。衝突度依存性を含む熱力モデルの開発（「第 1 回中間 C&R」までに）、さらには異常拡散過程、ドリフト効果等を含む不純物輸送モデルの改良と原型炉への外挿性の検証（「第 2 回中間 C&R」までに）を進めることが必要である。

SONIC では、不純物の電離・再結合、放射データについては、Open-ADAS のデータベースを利用している。実験との比較等に基づき、より高精度なデータベースに更新していく必要（特にタングステン）がある。

また、非接触プラズマの発生、安定維持の検討を進めるためには、壁材料不純物の発生量の精度の高い評価が必要である。SONIC では、半実験式を用いてスパッタリング率を求め、発生量（損耗量）及び堆積量を評価している。入射角度依存性や反射の影響を考慮し、発生量評価の信頼性を高めるため、2 体衝突近似モデルの結合や分子動力学シミュレーションに基づくデータベースの利用等、壁モデルの高

度化を進める必要がある。

## 1.5 非接触プラズマでの熱負荷評価

ダイバータ熱負荷の評価には、プラズマの熱輸送に加えて、イオン粒子束による表面再結合、不純物放射、中性粒子負荷を考慮する必要がある。SONIC ではこれらの寄与を考慮しているが、熱輸送については境界条件（シースモデル）によるところが大きく、非接触プラズマ条件や対向壁の表面状態を考慮したシースモデルの検討が必要である。また、表面再結合や不純物放射についても、これらが対向壁への熱負荷となる物理機構の検討を進め、モデルの予測精度を高める必要がある。

## 2. 原型炉ダイバータの非接触プラズマを制御する実験と動的モデリングの開発

### 2.1 部分非接触ダイバータでの放射損失の制御とモデリング検証

ダイバータレック中での放射損失および非接触プラズマの制御手法の検討には、上記のようなダイバータモデルの開発に加えて、SONIC コードの非定常化（非定常 SONIC）による動的シミュレーションが必要となる。さらに、コアプラズマ性能を維持したまま非接触プラズマの制御が必要となるため、不純物を含むコアプラズマ輸送コード（IMPACT&TOPICS）との統合化を進め、総合的な評価を「第2回中間 C&R」から「移行判断」の時期までに進める必要がある。

### 2.2 X 点での放射損失の増加と制御

X 点付近での放射損失の増加は、基本的に JT-60U の炭素不純物イオンによる放射損失の増加の際に SONIC によるシミュレーションが行われた。Ne、Ar 等の入射不純物イオンによる検討は、2.1 のダイバータレック上での維持制御を含め、JT-60U と JT-60SA 実験結果を再現できるようシミュレーションとモデルの開発と改良を行う必要がある（「第2回中間 C&R」および「移行判断」）。

### 2.3 部分・完全非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気性能の評価

粒子制御の観点では、排気過程の精度の高いシミュレーションが必要であり、前述した中性粒子間衝突や He 輸送モデルの開発を進める必要がある。

これらのモデル開発に加えて、コードの信頼性を向上させるためには SONIC と SOLPS（および UEDGE）コード間とのベンチマーク及び既存実験データとの比較が必須である。先に述べたように、非接触プラズマの発生機構にはまだ未解明な物理機構があると考えられ、この点でも実験結果と比較を行い、それを再現するために重要なモデルの改善や機構の理解が必要となる。現在、QST では JT-60U や JET-ILW を対象としたシミュレーションを行い、実験データとの比較、コード間ベンチマークを進めているが、このような解析・比較をより加速すると共に、解析対象装置（JT-60SA、ITER を含む）・比較対象コードを広げ、コードの信頼性向上、非接触プラズマ発生機構の解明を進める必要がある。

参考文献：

- [1] K. Hoshino, et al., J. Nucl. Mater. **463** (2015) 573.
- [2] M. Wischmeier, et al., J. Nucl. Mater. **390-391** (2009) 250.

### 3.4 非接触ダイバータ実験・制御研究およびシミュレーション開発にむけた LHD 研究計画(NIFS)

LHD では、①高密度放電、②外部からの不純物入射、③RMP 印加、の 3 つの手法による非接触ダイバータ実験を実施している。さらに、2017 年度から重水素を動作ガスとして用いる実験を開始しており、これまでも行ってきたヘリウムを動作ガスとして用いる実験と合わせて、動作ガスによる非接触ダイバータ形成・特性の違いを観測している。EMC3-EIRENE コードを用いたシミュレーションにより、これらの実験結果を再現できるようシミュレーションの高精度化を進めている。

以下に、「第 1、第 2 回中間 C&R」および「移行判断」に向け、核融合科学研究所 (LHD 実験およびシミュレーション研究) において、現在検討している主要な研究開発内容をアクション項目順にまとめる。第 2 章の表 2-3 (NIFS) にはその要約を、添付表 A-2 には詳細や制約などを記した。

#### 1. 非接触プラズマ発生機構の理解とモデリング (シミュレーション) の改善

##### 1.1 粒子・運動量非接触プラズマ発生とモデリング検証 (原子分子再結合・MAR・衝突過程)

現状では、EMC3-EIRENE を用いた数値シミュレーションは、非接触プラズマ発生時に実験で観測されるダイバータ粒子束の減少を定量的には再現できていない。また、放射損失についても非接触前と後でモデリングのほうが実験結果よりも、それぞれ 2 倍程度の大きい [1]。これらの違いについて、さらに検討を進める。周辺部イメージング分光[2]、ポロメータを用いて非接触時の不純物・水素発光分布の計測を行う。ダイバータ熱・粒子負荷についてはダイバータプローブ、赤外線カメラを用いて分布計測を行う。これらの実験結果とモデル (EMC3-EIRENE) によるシミュレーション結果との比較を行い、現状モデルの再現性を検証する。これらのデータの測定位置に対応する周辺部ストキャスティック領域からダイバータ板上のフットプリントを結ぶ磁力線接続長の分布を考慮して、LHD 磁場構造での非接触プラズマ発生機構を明らかにする。プラズマ輸送における磁力線構造 (磁力線接続長の長短、空間領域の大小・形状) の影響にも着目し、モデルの検証を行う。

シミュレーション EMC3-EIRENE の改良としては、EIRENE の体積再結合・MAR およびそれに伴うプラズマの圧力損失モデルの導入が挙げられる。これらの開発を試みることにより、モデルの精度向上と実験計測との比較による検証を進める。

##### 1.2 非接触プラズマ発生とモデリング検証 (主に拡散とドリフト)

ダイバータ板上の粒子・熱負荷およびプラズマパラメータ分布については、実験計測結果と EMC3-EIRENE による計算との違いが見られている。この違いは磁力線に垂直方向の拡散係数の変化だけでは説明できてない[3]。

非接触プラズマ発生時には、プライベート領域およびダイバータ以外の第一壁への粒子負荷の増大が観測されている。さらに、ダイバータ粒子負荷の上下非対称性も観測されているが[4]、現状のモデルでは再現できていない。これらの輸送現象の理解と再現には、非拡散的な輸送、およびドリフトの効果をモデルに取り入れる必要があると思われる。この点に着目し、実験計測を再現できるよう EMC3 中のプラズマ輸送モデルの開発を行う。

計測としては、前節で挙げたイメージング分光、ポロメータ、ダイバータプロー



ブに加えて、揺動計測も行う（ダイバータプローブ、反射計、干渉計など）。揺動・blobによる輸送研究及び寄与について、トカマクと同様に EMC3 における拡散係数 $\chi/D$ の評価を行う。また、3次元磁場構造（ストキャスティック磁場）の影響についても考察する。

特に、不純物入射や摂動磁場印加による周辺部の放射損失分布の制御と非接触プラズマへの影響を調べる。その際、閉じ込め性能の評価を不純物種・密度、摂動磁場の強度などに着目して進める。

### 1.3 非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置とモデリング検証（特に入射不純物量と種類）

LHD では、摂動磁場印加、および  $N_2$ 、Ne、Ar、Kr、Xe を用いた不純物入射による非接触ダイバータ実験を行っている。放射損失分布は、主としてイメージングボロメータを用いて計測している[1、5]。トラス上部から真下にプラズマを見込む視野での計測では、Ne と Kr の場合、非接触ダイバータ形成時に、前者は X 点近傍で、後者は主プラズマ中で大きな放射損失が起きていることが観測されている。Ne の場合の X 点近傍の放射損失は、EMC3-EIRENE による計算でも定性的に再現されている[5]が、3次元構造を評価するためにはボロメータアレイによる計測や、複数のイメージングボロメータデータをトモグラフィによる再構成が必要となる。さらに高 Z 不純物による主プラズマ中での放射損失分布のシミュレーションのために、EMC3-EIERNE と不純物輸送計算を組み合わせた計算が必要である。

$N_2$  のように軽い不純物の入射の場合は、ダイバータプローブアレイによる計測で、非接触ダイバータ形成にトロイダル異方性が観測されている[6]。 $N_2$  の電離平均自由行程が短いことと LHD の 3次元周辺磁場構造によるものであり、EMC3-EIRENE でも定性的に再現されている。Ne 入射ではトロイダル異方性は観測されていない。不純物による放射損失で電子温度が低下し、非接触に至る過程の計算を、さらに妥当性・定量性をもって行うためには、不純物原子・分子データのアップデートが必要である。

### 1.6 部分非接触プラズマでのタングステン損耗評価とモデリング検証（特に不純物イオンによる影響について）

LHD のダイバータ板は炭素材、第一壁は SUS316L である。不純物 Ne 入射による非接触ダイバータ実験時にマニピュレータを使用して炭素堆積物付き試料をダイバータ部へ挿入し、試料の損耗が低減した結果を得たが、その物理機構はモデル化できていない。Ne による物理スパッタリング、動作ガスである軽水素による物理および化学スパッタリング、炭素による自己スパッタリングを、電子温度の低下を考慮して定量的に評価する必要がある。タングステンターゲットの損耗過程についても、マニピュレータを用いたプラズマ照射実験を進める。

一方、NIFS では、タングステンなどのプラズマ対向材料損耗について、量子化学計算に基づく分子動力学ポテンシャルモデルと二体衝突近似モデルの高精度化を進めていく予定である。(1)実験結果と比較可能な長照射時間のシミュレーションを進めること、(2)イオン入射と中性粒子入射が対向壁に与える影響を明確化すること、を目指している。

## 2. 非接触プラズマを制御する実験と動的モデリングの開発

### 2.1 部分非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置制御とモデリング検証

LHD ダイバータで観測されている非接触プラズマでは、熱・粒子束分布のピーク値が低下する一方、その裾野部の熱・粒子束は、接触時と同程度であり、トカマクにおける部分非接触プラズマ分布炭素堆積に近いと思われる[7]。

LHD では、不純物入射、RMP 印加、ペレット入射による SDC(Super Dense Core) 運転により非接触プラズマは発生するが、その制御には放射損失測定の実験が必要である。1.3 で述べたように不純物ガス種により放射損失分布に違いが観測されている。N<sub>2</sub>、Ne では X 点近傍に放射損失のピークがあり、Kr では主プラズマ中にピークがある。3次元磁場構造の放射損失分布を得るために、今後、放射損失計測の拡充が必要である。また、LHD では多数の視線をもつ VUV 分光計測と EMC3-EIRENE 計算の比較から、周辺プラズマ中の炭素不純物輸送研究を行っている[8]が、今後、入射不純物の輸送解析も進めていく。

周辺磁場構造が入射不純物による放射損失分布やデタッチメント維持時間(制御性)へ与える影響を調べるために、RMP 印加により周辺磁場構造の変化を与え、放射損失分布の応答を調べる実験、および EMC3-EIRENE 計算を今後実施していく。

LHD では、連続ペレット入射により中心に強い密度・圧力分布のピークをもつ SDC(Super Dense Core)運転がある[9]。この運転では、CDC(Core Density Collapse)という、蓄積エネルギーの30%以上が吐き出され、ダイバータに ELM のようなトランジェント熱負荷が印加される現象がある[10]。SDC と非接触ダイバータを両立することは未だ試みていないが、この運転を維持・制御し、トランジェント熱負荷による非接触から接触プラズマへの遷移の研究が今後可能と思われる。

### 2.3 部分・完全非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気

LHD では、排気装置を備える閉構造ダイバータを用いた粒子制御実験を行っている[11]。ダイバータ部の中性粒子圧力を ASDEX 型の高速度イオンゲージにより測定し、EMC3-EIRENE コードを用いた排気モデルの検証を進めている。さらに、非接触ダイバータ形成へのダイバータ排気の効果を一層明らかにしていく。

LHD のダイバータ部排気装置は吸着型クライオポンプであり、Ar フロストを用いたヘリウム排気ができないため、ヘリウム排気の効果については LHD では十分な検証は難しい。

#### 参考文献：

- [1] S.N. Pandya et al, Nucl. Fusion **56** (2016) 046002.
- [2] M. Kobayashi et al, Nucl. Materials and Energy **12** (2017) 1043-1048.
- [3] S. Dai et al, Plasma Physics and Controlled Fusion **59** (2017) 085013.
- [4] S. Masuzaki et al, Fusion Sci. Technol. **50** (2006) 361-371.
- [5] K. Mukai et al, Nucl. Fusion **55** (2015) 083016.
- [6] H. Tanaka et al, Nucl. Materials and Energy **12** (2017) 241-246.
- [7] S. Masuzaki et al, J. Nucl. Mater. **438** (2013) S133-S138.
- [8] T. Oishi et al, Nucl. Fusion **58** (2018) 016040.
- [9] R. Sakamoto et al, Fusion Sci. Technol. **58** (2010) 53-60.
- [10] S. Ohdachi et al, Nucl. Fusion **57** (2017) 066042.
- [11] G. Motojima et al, Nucl. Fusion **58** (2018) 014005.

### 3.5 非接触ダイバータ実験研究およびシミュレーション開発にむけた GAMMA10-PDX とパイロット装置での研究計画(筑波大プラズマ研究センター)

「第1、第2回中間C&R」および「移行判断」に向け、筑波大学プラズマ研究センター（タンデムミラー装置 GAMMA10/PDX、直線型定常プラズマ装置 MAP-II、およびシミュレーション研究）において、現在検討している主要な研究開発内容をアクション項目順にまとめる。次に、タンデムミラー装置 GAMMA10 パイロット装置計画と研究開発の概要を説明する。第2章の表 2-2 (GAMMA10/PDX、Pilot) にはその要約を、添付表 A-2 には詳細や制約などを記した。

#### (1) GAMMA10/PDX 装置

非接触プラズマ発生機構の理解とモデリングの改善に向けて、筑波大学プラズマ研究センターでは、図 3-5-1 に示すタンデムミラー装置 GAMMA10/PDX の開放端磁場配位を活用したダイバータ模擬モジュールにおける高温プラズマを用いた非接触プラズマ生成・制御実験とモデル (LINDA、B2-EIRENE、中性粒子輸送) 検証・開発を進めている。

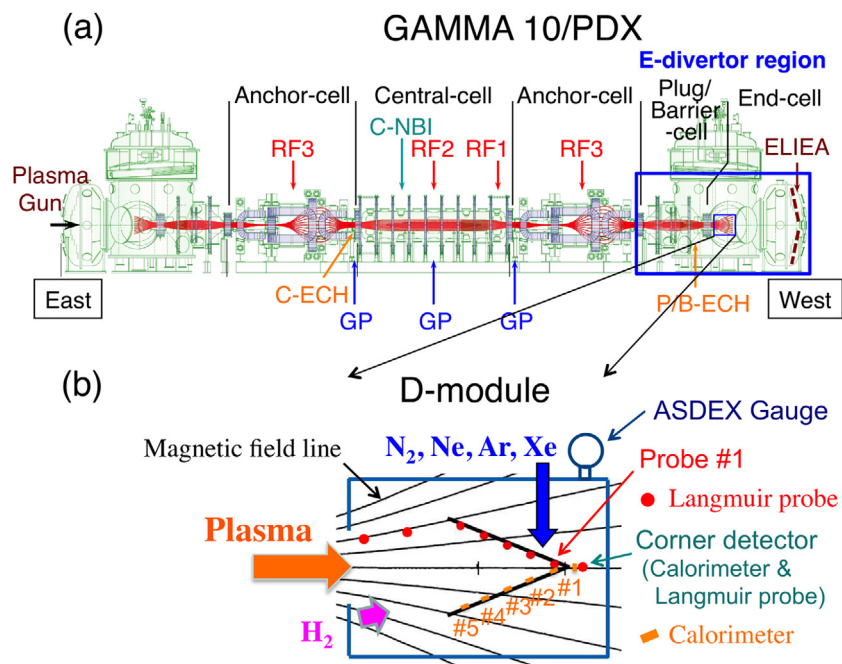


図 3-5-1 (a) GAMMA 10/PDX 概要図と (b) ダイバータ模擬実験モジュール[1].

#### 1. 非接触プラズマ発生機構の理解とモデリング (シミュレーション) の改善

##### 1.1 粒子・運動量非接触プラズマ発生とモデリング検証 (原子分子再結合・MAR・衝突過程)

これまで、GAMMA10/PDX における非接触ダイバータ実験では、数 100eV のイオン温度を有する高温水素プラズマに対して、ダイバータ模擬実験モジュール (D-module) 内への水素ガス、不純物ガスパフによって、ターゲット板前面に非接触プラズマの形成が確認されている。D-module 内に設置した静電プローブ群、発光分光計測、高速カメラ等による V 字ターゲット板近傍の詳細な観測から、水



素ガスパフ時の非接触プラズマ発生機構としては、水素分子が介在する再結合過程である分子活性化再結合(MAR)の重要性が明らかとなった [2]。図 3-5-2 に示す高速カメラ撮影では、水素ガス圧力の上昇とともに、 $H\alpha$  強度の上昇、 $H\beta$  強度の低下がみられ、MAR 発生の指標となる  $H\alpha / H\beta$  強度比の高い領域が上流へと広がっていく様子が観測され、ターゲット板近傍における MAR 発生領域の水素ガス圧力に対する変化が明らかになった [3]。また、水素分子 Fulcher 帯発光の観測と衝突輻射モデルを用いた解析も進めており、非接触プラズマ形成過程における振動・回転励起状態の影響についての詳細な解明に取り組んでいる。

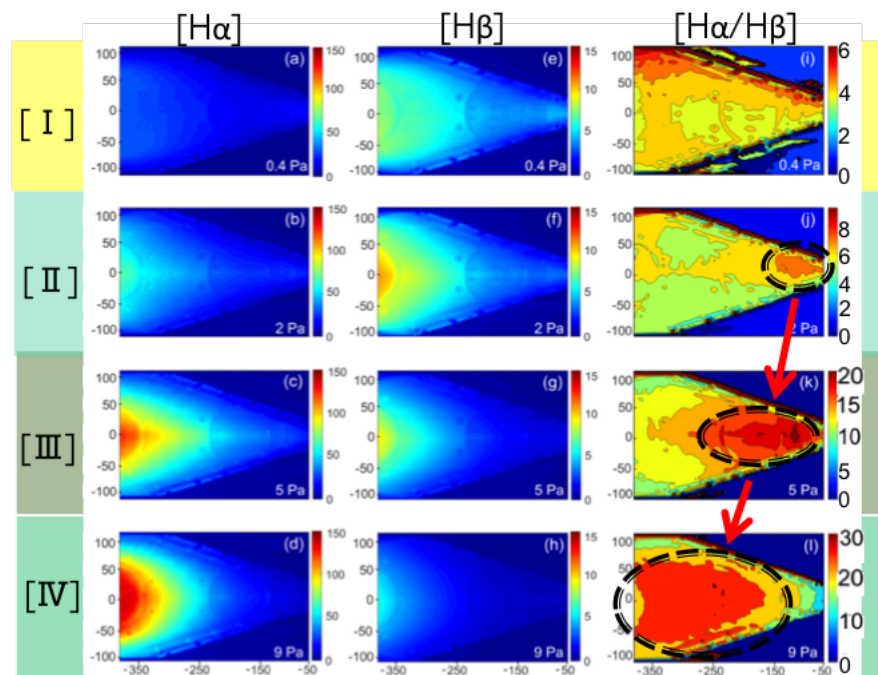


図 3-5-2 高速カメラで撮影した V 字ターゲット近傍における  $H\alpha$  (左)、 $H\beta$  発光 (中) およびそれら強度比 (右) の空間分布の水素ガス圧力による変化 [3]。

### 1.3 非接触ダイバータでの放射損失位置とモデリング検証 (入射不純物量と種類)

不純物ガス (Ne, Ar, Kr, Xe,  $N_2$ ) 入射実験においては、静電プローブおよびカロリメータを用いたターゲット板への熱粒子束測定から、不純物粒子種の違いによる熱粒子束低減効果の違いを評価し、電子温度の冷却、熱流束、イオン粒子束の低減において Xe が最も高い効果が見られている [1]。不純物ガス入射時の高速カメラによる二次元放射分布計測や磁力線に沿った多点同時分光計測による不純物粒子の上流プラズマへ影響を評価するなど、高温プラズマ中の不純物輸送機構の解明を行なっている。

### 1.4 部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果の検証

ダイバータ形状効果の検証および粒子排気性能の評価に関連して、ダイバータ模擬モジュールに設置された角度可変の V 字ターゲット及び後方排気扉により閉構造を変化させ、粒子排気特性の非接触プラズマ生成への影響、タングステンターゲット板の温度制御による、ターゲット板温度の水素リサイクリングへの影響について評価を行っており、ターゲット板温度の上昇により  $H\alpha$  線強度が高くなる結果を得ている。

モデリング検証において重要となる詳細な空間構造を把握するため、多点同時計測系の拡充、また、非接触プラズマの安定性の評価と制御において不可欠な、放射損失量とその空間分布を把握するため、ボロメータ計測の準備を進めている。また、これら非接触プラズマに対する計測手法の原理検証および高精度化を支援するため、直線型定常プラズマ装置 MAP-II の整備を進めている。

モデリングコードに関しては、慶応大学との共同で二次元流体コード LINDA の GAMMA10/PDX への適用を進めており、磁力線構造を反映した計算メッシュの作成と解析的な中性粒子の導入により、非接触プラズマのモデリングを行っている[4]。また、B2-EIRENE のミラー磁場配位への適用に向けた準備も進めており、実験ならびに LINDA コードとのベンチマークも計画している。LINDA コードについては、GAMMA10/PDX の V 字ターゲット幾何学構造の取り込み、中性粒子のモンテカルロ的な取り扱い、衝突輻射モデルとの連携を進めている。

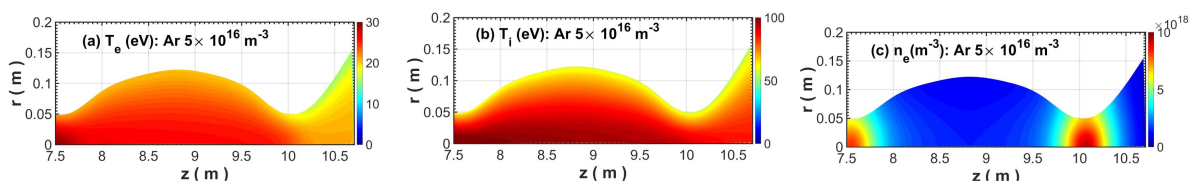


図 3-5-3 LINDA コードによる GAMMA10/PDX 開放端磁場領域への Ar ガス入射時の(a) 電子温度、(b)イオン温度、(c)電子密度の二次元空間分布[4]。

## 2. 非接触プラズマを制御する実験と動的モデリングの開発

### 2.1 非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置制御とモデリング検証

動的モデリング開発に向けて、不純物ガスパフ、ECH、ICRF によるパルスの加熱による ELM 模擬熱粒子束変化に対する非接触プラズマの過渡的応答特性の実験的な評価、詳細な揺動計測を行っている。これまでに熱流束としては高パワー ECH のパルス入射により  $30\text{MW/m}^2$ 、イオン粒子束としては、RF と ECH の重畳により、 $3.3 \times 10^{23}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  を実現している[1]。

### (2) パイロット装置

現在、プラズマ研究センターでは、既存装置である GAMMA10/PDX で培った知見に基づいて、原型炉ダイバータ級定常高密度プラズマ装置の実現に向けて必要となる外挿性の高いデータベースを得ることを目標として、新たな装置（パイロット装置：Pilot GAMMA PDX-SC [仮称]）の建設に向けた準備を進めている。表 3-5-1 に現行の GAMMA10/PDX およびパイロット装置、原型炉級定常高温高密度ダイバータ模擬装置のパラメータを示すとともに、パイロット装置の磁場構造の素案を図 3-5-4 に示す。

パイロット装置では、原型炉級定常高温高密度ダイバータ模擬装置の開発に向けた高密度プラズマ源とイオン加熱、粒子排気の両立、高イオン温度プラズマの実現と維持の為に加熱・閉じ込め手法、加熱パルスを利用した ELM 様の過渡的熱流束の発生手法の確立を目指した装置として位置付けている。本装置は、定常プラズマ源と単純ミラー配位を組み合わせ、定常プラズマ源から高密度プラズマをミラー部へ供給し、ミラー閉じ込め部でプラズマ加熱を行うことにより、既存の直線型装置と同程度の高いプラズマ密度でありながら、数十から 100eV 程度の高



温プラズマを準定常的に生成する装置である。高温プラズマから三体再結合を伴う非接触プラズマが形成される過程を詳細に明らかにできると期待できる。原型炉で想定されるダイバータに近いパラメータ領域での原子分子過程や輻射輸送、不純物の高温プラズマ領域への影響等、これまでの装置では達成が困難な物理・工学的課題に取り組むことが可能となり、モデリング検証・開発へも大きく貢献できるものと考えられる。現在、年次計画に基づき、本装置パラメータの実現に向けて、閉じ込め加熱領域の安定性の評価、パワーバランス評価を行い、既存の電源設備も活用した装置建設に向けた準備を進めている。

表 3-5-1 装置のパラメータ比較

| 実験装置           | GAMMA10/PDX    | Pilot GAMMA PDX-SC | 定常高密度プラズマ実験装置  |
|----------------|----------------|--------------------|----------------|
| 全長(m)          | 27             | $\leq 10$          | $\geq 20$      |
| 密度( $m^{-3}$ ) | $\sim 10^{18}$ | $> 10^{19}$        | $\sim 10^{20}$ |
| 温度(eV)         | 400            | 数10 ~ 100          | 数10 ~ 100      |
| 生成時間(sec)      | 0.4            | 10 ~ 100秒          | 定常             |
| 磁場強度(T)        | $\sim 1$       | 1.5                | 2              |

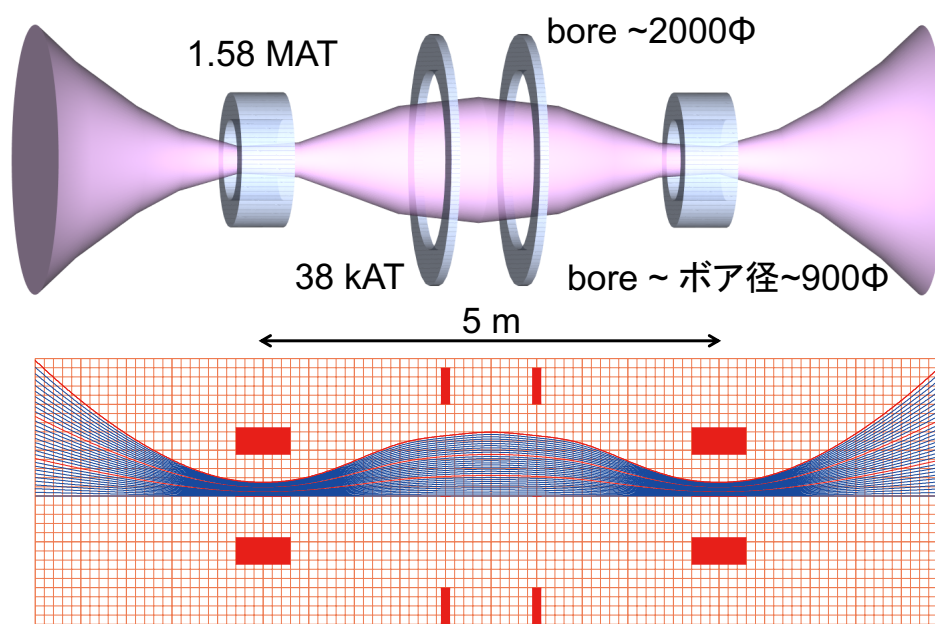


図 3-5-4 超伝導コイルを用いたパイロット装置の磁場構造 (案)

参考文献：

- [1] Y. Nakashima, et al., Nucl. Fusion **57** (2017) 116033.
- [2] M. Sakamoto, et al., Nucl. Mater. Energy **12** (2017) 1004.
- [3] A. Terakado, et al., AIP Conf. Proc. **1771** (2016) 050008.
- [4] M.S. Islam, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **59** (2017) 125010.

### 3.6 直線装置における非接触ダイバータ実験研究、計測装置およびシミュレーション開発にむけた計画（名大、東海大等）

ここで対象とする直線型装置 (NAGDIS-II(名古屋大学)、TPD-Sheet IV(東海大学) など) は、電子温度 10 eV 以下、電子密度  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  以上の定常プラズマが生成可能な装置である[1]。不純物に起因する放射冷却により温度が低下したダイバータ板近傍のプラズマを対象としている (図 3-6-1)。これらの直線型装置は多様な計測器の設置が容易で、プラズマの制御性と再現性が高いという特徴を有している。図 3-6-2 は、直線型装置を用いた非接触プラズマ研究の戦略を示している。直線型装置の基礎研究により、非接触プラズマに関する原子・分子過程、輻射・中性粒子輸送などに関する基礎データを取得し、ダイバータシミュレーションコードの予測性能の向上に貢献する。開発されたコードを JT-60SA などの実機に適用することによりコードの信頼性を向上し、原型炉ダイバータ設計に資する。

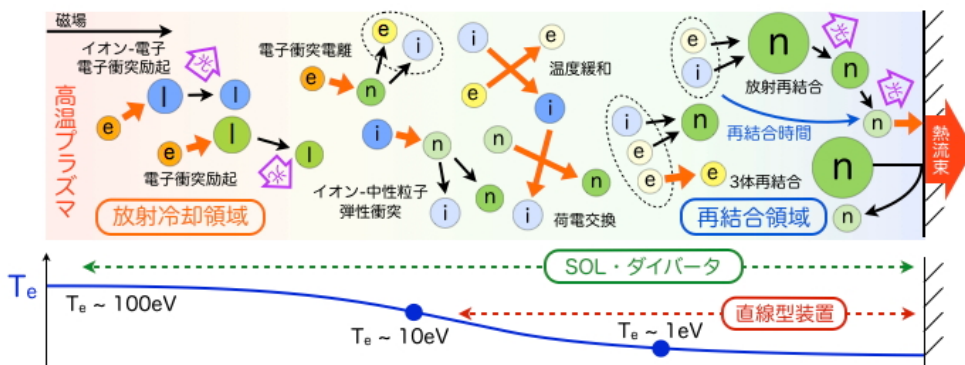


図 3-6-1 直線型装置が対象とする研究領域

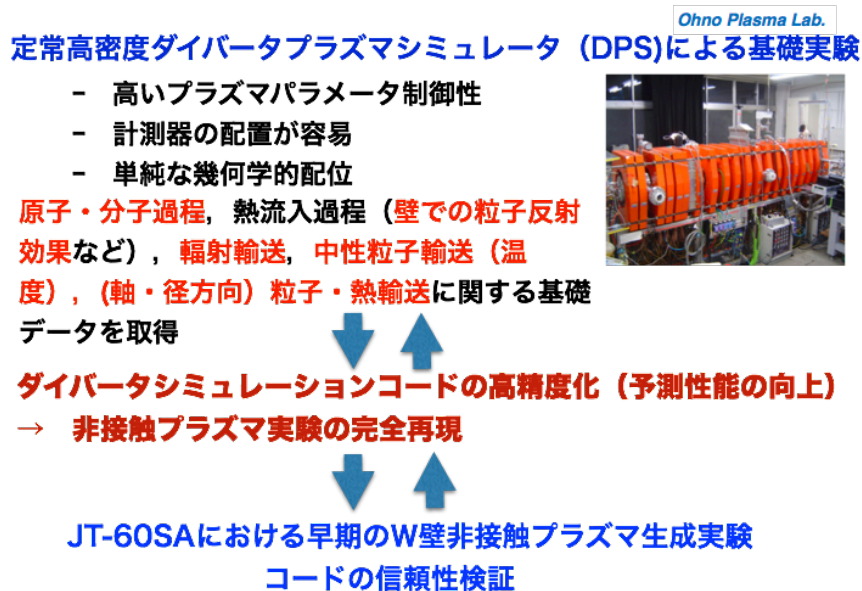


図 3-6-2 直線型装置を用いた原型炉設計のための非接触プラズマ研究の戦略

「第1、第2回中間C&R」および「移行判断」に向け、直線装置とその実験結果を反映するシミュレーション研究 (名大、東海大等) において、現在検討している主要な研究内容をアクション項目順にまとめる。第2章の表2-3 (名大、東海大等)

にはその要約を、添付表 A には詳細や制約などを記した。

## 1. 非接触プラズマ発生機構の理解とモデリング (シミュレーション) の改善

### 1.1 非接触プラズマ形成に重要な体積再結合を含む原子・分子過程の検証

中性原子温度が体積再結合過程によるプラズマ消失に与える影響 (減衰長など)、原子・分子イオン種効果及び水素分子の振動温度が分子活性化体積再結合過程 (Molecular Activated Recombination: MAR) [2]に与える影響を定量評価する。体積再結合過程は電子温度・電子密度に非常に強い依存性を持つので、レーザートムソン散乱(LTS)計測により、低電子温度 (1eV 以下) 高密度プラズマのプラズマパラメータの高精度計測を実現する[3]。さらに、MAR 過程に重要な役割を果たす水素分子イオン ( $H_2^+$ ,  $H_3^+$ )などのイオン種をオメガトロン質量分析器で計測を行い[4]、さらに水素分子の振動励起・回転励起温度を真空紫外分光器により計測する。図 3-6-3 に非接触プラズマの LTS 計測の初期的な結果を示す。0.3 eV という低電子温度が明瞭に計測されており、さらに 1 eV 程度の高電子成分が存在することが観測されている。

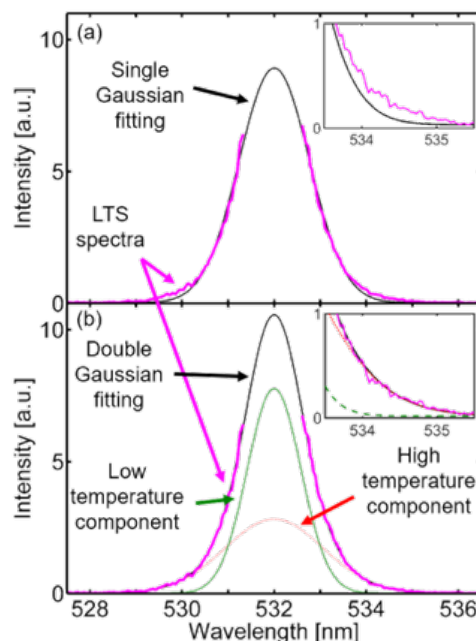


図 3-6-3 非接触プラズマの LTS スペクトル

また、波長可変の半導体レーザーを用いたレーザー吸収分光により中性原子温度を計測する。中性粒子の給排気速度を変化させることで中性ガス温度を制御し、中性ガス温度の変化が電子-イオン再結合過程に与える影響を明らかにする[5]。NAGDIS-II での予備的な実験において、給排気速度を大きくした場合にダイバータ板への全イオン粒子束が減少し、電子-イオン再結合の促進が示唆された。これは、給排気速度増加により中性粒子の冷却過程が促進し、中性ガス温度が減少したためであると考えられる。中性ガス温度制御による非接触プラズマ制御の可能性を明らかにする。

### 1.2 非接触プラズマ中のプラズマ輸送

Super X などの先進ダイバータ配位の基礎実験として、沿磁力線方向の磁場強度を変化させて収縮磁場・発散磁場配位を模擬するとともに[6]、磁場コイルの配置を変更し湾曲磁場を模擬することにより[7]、磁場形状変化が非接触プラズマ生成に与える影響を定量的に評価する。図 3-6-4 は局所的に磁場強度を変化させたときの、ターゲット板へのイオン粒子束の変化を表している。局所発散磁場の場合、再結合過程が弱まり、ターゲットへのイオン粒子束が増大していることが観測されている。再結合フロントの位置との関連を今後詳細に調べる予定である。

再結合フロント付近の揺動に起因する対流的な径方向プラズマ輸送 (Blob 輸送) が非接触プラズマ形成に与える影響を明らかにする。特に、局所的な径方向輸送増大が、ダイバータ板への熱負荷分布に与える影響、またダイバータ領域のプラズマ流分布に与える影響について詳細に調べる[8]。非接触・接触プラズマ共存下での Blob 輸送の変化に関しても、シース電位差による電流に着目して、その特性を明

らかにする。さらに PIC(Particle in Cell)コードを用いたシミュレーションを行い、物理機構を明らかにする。

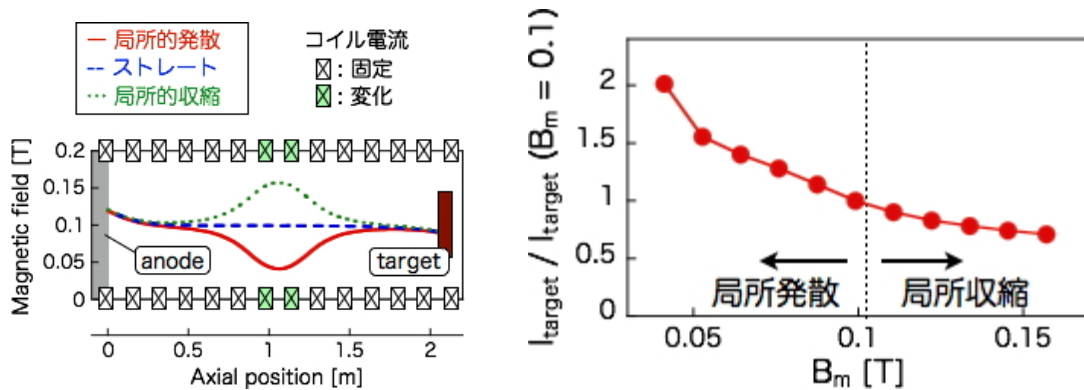


図 3-6-4 局所磁場構造変化による非接触プラズマ特性の変化

## 1.5 輻射吸収、壁での粒子反射過程（エネルギー反射係数、振動励起分子の形成）が非接触プラズマ形成に与える影響評価

輻射輸送コード、中性粒子輸送コード、衝突輻射コード(信州大学)、プラズマ輸送コード LINDA(慶応大学) を統合した直線型装置の配位を模擬したシミュレーションコードを開発する。直線型装置において高精度の真空紫外ならびに可視分光計測、密度・温度の 2 次元計測に加え、プラズマ電位の空間分布の計測を実施する。ガス圧を変化させた場合の実験結果や壁材料を換えた実験結果とシミュレーションコードによる計算結果と詳細に比較することにより、上記素過程が非接触プラズマ形成に与える影響を定量的に評価する。さらに実機環境を模擬するために、タングステンとヘリウムとの共堆積層の水素吸蔵特性を照射材の温度制御が可能な小型直線型装置を用いて実験的に調べ（名古屋大学-九州大学との共同研究）、データベースとしてまとめる。また、トロイダルプラズマ装置の周辺プラズマ解析に用いられている 3 次元プラズマ輸送コード EMC3-EIRENE コードを直線型装置に適用し(図 3-6-5)、開発した LINDA コードとの比較を行い、コード間のベンチマークテストを実施する。

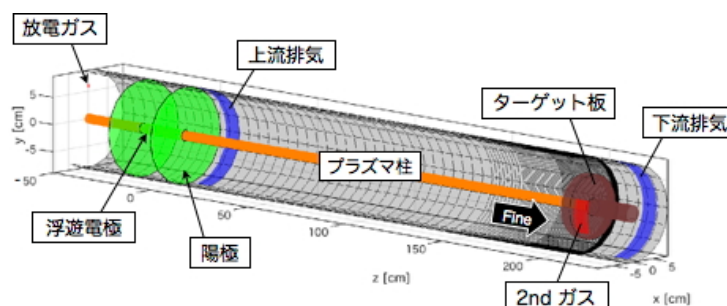


図 3-6-5 EMC3-EIRENE コード用計算メッシュ

## 2. 非接触プラズマを制御する実験と動的モデリングの開発

### 2.1 過渡的な熱負荷増による非接触プラズマの動的挙動の理解と制御手法

プラズマ輸送コード LINDA に動的モデルを組み込み、非定常計算を可能とする。非接触プラズマへの過渡的な熱負荷印加実験に関しては、日欧協力を活用し、オラ



ンダ DIFFER 研究所の MAGNUM-PSI 装置を用いて実施する。

### 2.3 部分・完全非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気性能評価

ターゲットと排気速度を制御可能なバタフライバルブ付ポンプを TPD-Sheet IV 終端部に設置し、ヘリウム及び水素-ヘリウム混合プラズマにて、部分・完全非接触プラズマに対してターゲット形状を変化させて、ヘリウム粒子の排気特性を検証する。

参考文献：

- [1] N. Ohno: Plasma Physics and Controlled Fusion **59** (2017) 034007.
- [2] N. Ohno, N. Ezumi, S. Takamura, I. Krasheninnikov, S and P. A. Yu: Phys. Rev. Lett. **81**(1998) 818.
- [3] H. Ohshima, S. Kajita, H. Tanaka, H. Ohno, H. J. Meiden, to be submitted in Plasma and Fus. Res.
- [4] M. Ono, A. Tonegawa, K. Kumita, H. Yazawa, T. Shibuya, K. Kawamura, J. Plasma Fus. Res. SERIES, **7** (2006)50-53.
- [5] M. Aramaki, T. Tsujihara, S. Kajita, H. Tanaka, N. Ohno, AIP Advances **8** (2018) 015308
- [6] Y. Hayashi, N. Ohno, S. Kajita, and H. Tanaka, Physics of Plasmas **24** (2017) 062509.
- [7] T. Takimoto, F. Ishikawa, T. Iijima, A. Tonegawa, K. Sato, K. Kawamura, Fusion Engineering and Design. 124.10.1016/j.fusengdes.2017.05.063 (2017).
- [8] Y. Hayashi, N. Ohno, S. Kajita, and H. Tanaka, Physics of Plasmas **23** (2016) 012511.

添付資料 A-1: ダイバータ物理検討ワーキンググループ委員名簿、会合開催日程と議事

原型炉設計合同特別チーム ダイバータ物理検討ワーキンググループ  
2016 年度および 2017 年度 委員名簿(敬称略、順不同)

主査 朝倉伸幸(QST)

委員 大西 直文(東北大学)

委員 澤田 圭司(信州大学)

委員 坂本 瑞樹(筑波大学)

委員 江角 直道(筑波大学)

委員 池添 竜也(筑波大学)

委員 荒巻 光利(日本大学)

委員 利根川 昭(東海大学)

委員 増崎 貴(NIFS)

委員 小林 政弘(NIFS)

委員 大野 哲靖(名古屋大学)

委員 岡本 敦(名古屋大学)

委員 田中 宏彦(名古屋大学)

委員 門 信一郎(京都大学)

委員 上田 良夫(大阪大学)

委員 菊池 祐介(兵庫県立大学)

委員 仲野 友英(QST)

委員 星野 一生(QST)

委員 坂本 宜照(QST)

幹事 本間裕貴(QST)

## 2016年度および2017年度 会合開催日程と議事

### 第1回会合(予備会合)

日時:2016年12月19日 13:00 - 17:00

場所:筑波大学プラズマ研究センター

議事:

- ① ダイバータ物理検討WGの趣旨説明。
- ② 各機関(大学・NIFS・QST)における非接触ダイバータプラズマに関する研究の現状について各委員より報告1(トカマク実験、ヘリカル実験、直線型プラズマ装置実験、シミュレーション、原型炉高密度ダイバータ模擬装置の構想)。

参加者(敬称略、順不同):中嶋(筑波大)、坂本瑞樹(筑波大)、江角(筑波大)、池添(筑波大)、大野(名大)、岡本(名大)、上田(阪大)、菊池(兵庫県立大)、井手(QST)、朝倉(QST)、坂本宜照(QST)、星野(QST)

現地参加12名、TV参加0名、計12名。

### 第2回会合

日時:2017年06月15日 13:30~17:30

場所:〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号

富国生命ビル17階 QST 東京事務所

議事:

- ① 各機関(大学・NIFS・QST)における非接触ダイバータプラズマに関する研究の現状について各委員より報告2(トカマク実験、ヘリカル実験、直線型プラズマ装置実験、シミュレーション、原型炉高密度ダイバータ模擬装置の構想)。
- ② 「非接触ダイバータの物理理解と制御」に関する物理検討分野を大項目に分け(原型炉条件における原子分子過程、プラズマ輸送モデリング、不純物輸送と放射損失評価、ダイバータ磁場・形状効果、シース熱負荷評価、ターゲット熱負荷損耗評価、非接触プラズマ制御と計測、ヘリウム排気など)、各機関で貢献が期待できる課題をリストアップする作業を委員に依頼。

参加者(敬称略、順不同):澤田(信州大)、江角(筑波大)、池添(筑波大)、利根川(東海大)、大野(名大)、田中(名大)、増崎(NIFS)、小林(NIFS)、門(京大)、上田(阪大)、菊池(兵庫県立大)、朝倉(QST)、坂本(QST)、星野(QST)、本間(QST)、岡本(TV接続、名大)、仲野(TV接続、QST)

現地参加 15 名、TV 参加 2 名、計 17 名。

### 第 3 回会合

日時:2017 年 08 月 28 日 13:00~17:30

場所:〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2 丁目 2 番 2 号

富国生命ビル 17 階 QST 東京事務所

議事:

- ① 第2回会合で依頼した、各機関で貢献が期待できるダイバータ物理課題の整理と内容に関する議論(項目 1.1 水素同位体輸送と原子分子過程、1.2 プラズマ輸送)。
- ② 非接触ダイバータプラズマに関する研究の現状について各委員より報告3(直線型プラズマ装置のモデリング研究、トカマク実験における不純物挙動)。

参加者(敬称略、順不同):江角(筑波大)、荒巻(日大)、増崎(NIFS)、小林(NIFS)、大野(名大)、岡本(名大)、門(京大)、仲野(QST)、星野(QST)、朝倉(QST)、坂本(QST)、本間(QST)

現地参加 12 名、TV 参加 0 名、計 12 名。

### 第 4 回会合

日時:2017 年 10 月 16 日 12:45~17:00

場所:ビジョンセンター東京7階705会議室

(〒104-0028 東京都中央区八重洲 2-3-14 ケイアイ興産東京ビル)

議事:

- ① 非接触ダイバータ物理検討課題の整理と内容に関する議論の継続(項目 1.3 不純物輸送や放射損失関連、1.4 ダイバータ磁場・形状効果、1.5 シース熱負荷評価、1.6 ターゲット熱負荷損耗評価)。
- ② トカマク実験・ヘリカル実験・シミュレーション開発の観点から、線型プラズマ装置実験とそのシミュレーション・モデル開発への期待と提案。

参加者(敬称略、順不同):江角(筑波大)、大野(名大)、田中(名大)、小林(NIFS)、増崎(NIFS)、門(京大)、仲野(QST)、星野(QST)、朝倉(QST)、坂本(QST)、岡本(TV、名大)、本間(QST)

現地参加11名、TV参加1名、計12名。



## 第5回会合

日時:2017年12月14日 09:30~16:30

場所:京都大学宇治キャンパス 京大宇治キャンパス北4号棟4階大会議室  
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

議事:

- ① 非接触ダイバータ物理検討課題の整理と内容に関する議論の継続(項目2. 非接触プラズマ制御と計測、ヘリウム排気、その他)。
- ② 非接触ダイバータの発生機構の理解と制御開発に向けたアクションプランを達成するため、各研究機関による研究提案をまとめた表の完成。
- ③ ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置構想について意見交換。
- ④ ダイバータ物理検討WG 報告書の執筆担当の割り振り。

参加者(敬称略、順不同):江角(筑波大)、大野(名大)、小林(NIFS)、増崎(NIFS)、門(京大)、朝倉(QST)、飛田(QST)、仲野(QST)、星野(QST)、坂本(QST)、岡本(TV、名大)、田中(TV 名大)、荒巻(TV 日本大)、本間(QST)

現地参加11名、TV参加3名、計14名。

## 第6回会合

日時:2018年02月21日 13:00~17:30

場所:QST 東京事務所 第1会議室

議事:

- ① WG 報告書の第2章ドラフト(趣旨、課題項目分け、研究機関からの提案概要)への意見、および第3章(各研究機関からの提案説明)の内容調整。

参加者(敬称略、順不同):江角(筑波大)、利根川(東海大)、大野(名大)、田中(名大)、増崎(NIFS)、門(京大)、朝倉(QST)、仲野(QST)、星野(QST)、坂本(QST)、本間(QST)

現地参加11名、TV参加0名、計11名。

A-2 アクションプランを達成するための各研究機関による研究提案 (詳細版)

注: 中間1:第1回中間チェック&レビュー、中間2:第2回中間チェック&レビュー、移行判断:原型炉段階への移行判断

ダイバータ物理検討WG 2018年3月5日改訂

| 項目  | 主要物理課題                                    | 研究機関/施設      | 装置、開発内容および手法(項目)                                                                                                   | 開発内容および手法、段階(中間1&2、移行判断)を記述                                                                                                                                                                                                                                                                      | 物理検討課題(追加)                                                                                                                                                                                                                    | 検証手法、計測機の候補                                                                                                                                                | 実施条件や達成懸念など                                                                                                                                                            |  |
|-----|-------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|     | <b>原型炉における非接触プラズマ発生と制御</b>                |              |                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                        |  |
| 1   | 非接触プラズマ発生機構の理解とモデリング(シミュレーション)の改善         |              |                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                        |  |
|     | ⇒トカマク磁場配位で原型炉プラズマ条件(高温・比較的低温度SOL)での予測     |              |                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                        |  |
| 1.1 | 粒子・運動量非接触プラズマ発生とモデリング検証(原子分子再結合・MAR・衝突過程) |              |                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                        |  |
|     |                                           | GST-Naka     | JT-60Uでの実験・計測とモデル検証(SONIC/NEUT2D)                                                                                  | ・中性粒子の非接触プラズマ発生機構および不純物放射損失への影響(体積再結合などの素過程、不純物イオンの再結合)を評価(中間1)                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            | ・炭素壁(壁温150-300C実験)・入射不純物はNe&Ar                                                                                                                                         |  |
|     |                                           | GST-Naka     | JT-60SAでの実験・計測とモデル検証(SONIC/NEUT2D)                                                                                 | ・中性粒子の非接触発生機構および不純物放射損失への影響(体積再結合などの素過程、不純物イオンの再結合)を評価(中間2)<br>・非接触プラズマの対向面での計測評価と熱負荷モデルの検討(中間2)                                                                                                                                                                                                 | (1)体積再結合(非接触)位置および温度評価が必要<br>⇒ 2次元計測法を予定(密度測定は計画していない)<br>(2)ソース条件と熱輸送、および表面再結合による熱負荷評価<br>⇒ 現状のソース条件が非接触プラズマで使用できるか課題(トランスミッション)係数は熱負荷評価に影響。表面再結合による熱負荷評価には、粒子の反射・吸着・再結合モデルの評価が必要<br>(3)高密度での弾性散乱の評価(中性粒子密度、速度計測)            | (1)トムソン散乱や干渉計(計画なし)<br>(2)熱電子放出プローブ(計画なし)<br>(3)エネルギー測定は必要(水素イオン温度は不純物イオン広がりから可能)                                                                          | ・炭素壁実験は2020-2028、金属壁実験は2029年予定<br>・高2不純物(Ar以上)および複合パブを検計<br>・高密度・非接触となる実験条件が必要(粒子・運動量損失のため実現できるか)                                                                      |  |
|     |                                           | GST-Naka&Rok | ダイバータモデル・シミュレーション(SONIC/NEUT2D)開発                                                                                  | ・原子・分子モデルの高度化(ORモデル、MAR、中性粒子間衝突モデル開発と実装)(中間1)<br>・振動・回転励起、高エネルギー電子等の影響検討(中間1)とモデル開発(中間2~移行判断)<br>・光輸送モデル(水素同位体)の改善と影響評価(中間2)                                                                                                                                                                     | ・原子・分子モデルの高度化(ORモデル、MAR、中性粒子間衝突モデル開発と実装)(中間1)<br>・振動・回転励起、高エネルギー電子等の影響検討(中間1)とモデル開発(中間2~移行判断)<br>・光輸送モデル(水素同位体)の改善と影響評価(中間2)                                                                                                  | (1)実験装置レベル・ITERレベル・原型炉レベルで再結合が顕著な条件下で温度が下がらない要因の検証が必要<br>(2)分子の回転・振動・励起の速いにより光輸送の反応係数は大きく変化 ⇒ 実験装置での分光情報が必要(光輸送モデルの評価では現状は最大20%程度)                         | (1)同じコードでサイズ・パワー・密度を変えて比較<br>(2)広波長・高解像スペクトラム計測が必要                                                                                                                     |  |
|     |                                           | GST-Naka     | 金属壁実験装置(JET-ILW)でのモデル検証とITERでのベンチマーク SONIC-SOLPS                                                                   | ・金属壁実験JET-ILWでの検討(複数材料からなる壁モデル、粒子・エネルギー反射モデル・バック)(中間1)<br>・SOLPS-EIRENE等とのベンチマーク、原子・分子モデルの高度化および振動・回転励起、高エネルギー電子等の影響検討(中間2)<br>・ITERでのSONIC-SOLPSベンチマークが必要(中間2)                                                                                                                                  | SOLPS-ITERを使用して、ITERレベルでの非接触プラズマ・不純物輸送結果の検証が必要(JET実験との優先度を考える必要がある)                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                            | ・実験結果(金属壁)と比較:共通使用可能データの解析を利用                                                                                                                                          |  |
|     |                                           | GST-Rok      | 原型炉条件での非接触プラズマモデル(SONIC-NEUT2D、中性粒子輸送と対向条件)検討と非接触プラズマ運転領域(シミュレーション)                                                | ・高密度条件における体積再結合と表面再結合モデルの再評価、および弾性散乱によるエネルギー散逸の検証(中間2)<br>・燃料同位体効果による非接触プラズマへの影響(中間2)                                                                                                                                                                                                            | (1)実験装置レベル・ITERレベル・原型炉レベルで再結合が顕著な条件下で温度が下がらない要因の検証が必要<br>(2)密度(10 <sup>22</sup> m <sup>-3</sup> )・温度1-2eVでの実験検証<br>(3)弾性散乱の既存理論モデルの検証(クォンセン数やプラントル数などを用いた理論との比較で妥当性を検討)<br>(4)燃料同位体効果はMAR-25として実施、DT混合MCのために17-テータベスの検証が必要    | (1)超伝導磁場MAGNUM(数)トラスでも難しい(1eV-1002m-3程度、上流は10eV程度)<br>(4)SONICのMPMD化により水素同位体効果も検討(優先順位は低くて良さそう)                                                            | ・非接触プラズマ条件:密度(10 <sup>22</sup> m <sup>-3</sup> )および温度1-2eVから低下しない(イオン・運動量損失が小さい)                                                                                       |  |
|     |                                           | NIFS         | LHD磁場配位での非接触プラズマ計測とモデル(EMC3-EIRENE)検証・開発(中性粒子輸送と対向条件)                                                              | ・中性粒子モデルへの体積再結合等の取り込み(EMC3-EIRENE、中間1-2)<br>・EMC3コードの非接触プラズマへの対応、体積再結合および圧力損失モデルの開発(中間2)                                                                                                                                                                                                         | (1)周辺イメージング分光・ポロメータによる発光計測、ダイバータプラズマ密度・温度の3次元計測と非接触モデリング<br>(2)EMC3-EIRENEによる非接触プラズマモデリング                                                                                                                                     | (2)体積再結合等はEIRENEモデルを参考導入し比較検証する                                                                                                                            | ・重水素プラズマ実験開始<br>・横気付き閉ダイバータ実験開始                                                                                                                                        |  |
|     |                                           | 筑波大          | GAMMA10ミラー配位のダイバータ模擬モジュール(PDX)における高温プラズマによる非接触プラズマ基礎実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE)検証・開発(中性粒子輸送と対向条件)、および計測機器開発(MAP-IIを含め) | ・高温プラズマ(100eV)が非接触化する過程を明らかにする、計測器の整備とMAR(1-10eV)による非接触の解明(中間1-2)、<br>・LINDAコードの開発と非接触プラズマモデリング、および中性粒子コードのリンクによる体積再結合過程のモデル検証(中間2)<br>・B2-EIRENE(重水素プラズマ)との実験とモデリングのベンチマーク(中間1-2)<br>・定常直線装置MAP-IIを用いた非接触プラズマに対する計測手法の原理検証および高精度化(中間1-2)                                                        | (1)分子の振動・回転励起準位・エネルギー分布により反応係数が大きく変化 ⇒ 分光測定・評価を改善する必要がある<br>(2)LINDAコード(高圧度大径線装置に開発)の適応:非接触プラズマへの対応が現状の課題                                                                                                                     | (1)超伝導磁場MAGNUM(数)トラスでも難しい(1eV-1002m-3程度、上流は10eV程度)<br>(4)SONICのMPMD化により水素同位体効果も検討(優先順位は低くて良さそう)                                                            | ・PDX内のプラズマ:電子温度 数10eV、イオン温度100eV、低圧直線装置10 <sup>17</sup> -10 <sup>18</sup> m <sup>-3</sup> が課題。<br>・モデル検討:LINDAコード(Neutralコード)、B2-EIRENEを整備中。具体的な結果は2018年度トラス形状への発展は未検証 |  |
|     |                                           | 筑波大          | 新装置(高温高密度ハイロット装置)による高温高密度プラズマによる非接触プラズマ基礎実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE)検証・開発(中性粒子輸送と対向条件)                                 | ・(GAMMA10-PDXを超える高密度ダイバータ)放射損失領域と三体再結合を伴う非接触プラズマが定常的に共存する状態を形成し、高温・低温プラズマ状態における原子分子過程の影響を明らかにする(中間2)                                                                                                                                                                                             | (1)PDXでのMAR、三体再結合の発生条件はトカマク・LHD実験と何が違うか理解するための計測器の検討とモデリング<br>(2)三体再結合発生は高密度が条件⇒可能性評価の必要                                                                                                                                      |                                                                                                                                                            | ・定常高温高密度、上流プラズマ温度10 <sup>18</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti 数10eV、Te 数10eV、最大磁場1.5T                                                                                          |  |
|     |                                           | ?            | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                  | ・ハイロット装置を超える原型炉高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            | 定常高温高密度10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti100eV、Te100eV、最大磁場 2T                                                                                                       |  |
|     |                                           | 名大           | 直線装置での非接触プラズマ基礎実験(中性原子・分子の温度の影響)と計測開発およびモデル(LINDA、EMC3-EIRENE)検証・開発(中性粒子輸送と対向条件)                                   | ・ダイバータプラズマ模擬試験装置NAGDIS-IIにおいて、中性原子温度が体積再結合過程によるプラズマ損失に与える影響(減衰長など)を定量的に評価、および必要な計測機器と空間分布測定装置(中間2-移行判断)<br>・実験結果による非接触モデル(LINDA、EMC3-EIRENE)検証とモデル改善(中間2-移行判断)                                                                                                                                   | ・NAGDIS-IIの役割:プラズマおよび中性粒子の空間分布の定常・動的挙動を計測<br>(注)直線装置側へのアクションプランは研究方針となじまない                                                                                                                                                    | ・レーザー吸収分光により中性原子温度、トムソン散乱計測により、低電子温度・高電子密度計測を計画<br>・東海大と連携して実施                                                                                             | プラズマ源、数・10eV程度、中性分子温度は室温程度、また電子温度は0.1eV程度の下限まで計測可能。                                                                                                                    |  |
|     |                                           | 東海大          | 直線装置での非接触プラズマ基礎実験(原子、分子、イオン種と水素分子の振動温度の影響)と計測開発                                                                    | ・ダイバータプラズマ模擬試験装置TPD-Sheetを用いて、非接触プラズマでの原子・分子イオン種効果及び水素分子の振動温度が体積再結合過程(LMAR)に与える影響を評価、および、必要な計測器開発(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                                      | ・TPD-Sheetの役割:水素プラズマ系での体積再結合・MAR・負イオンの役割を検討                                                                                                                                                                                   | ・原子・分子イオン種をオメガトロ質量分析器で、水素分子の振動温度計測をVUV分光により計測<br>・名大と連携して実施                                                                                                | ガス種(H <sub>2</sub> ,D <sub>2</sub> ,He混合)、密度10 <sup>18</sup> -10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup>                                                                         |  |
| 1.2 | 非接触プラズマ発生とモデリング検証(プラズマ輸送:主に拡散とドリフト)       |              |                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                        |  |
|     |                                           | GST-Naka     | JT-60Uでの実験・計測とモデル検証(SONIC/SOLDOR)                                                                                  | ・既存データ再検討:可動プローブデータに直しによるSOL熱流束評価(Eich スケーリング)との比較および低パワー(L-Hプラズマ)(中間1-2)                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            | ・IRカメラが不調でダイバータ熱負荷分布がない<br>・プローブデータは空間分布は良いがHモードは低パワー限定                                                                                                                |  |
|     |                                           | GST-Naka     | JT-60SAでの実験・計測とモデル検証(SOLDOR/SONIC)                                                                                 | ・SOLの高精度温度・密度分布測定とダイバータでの熱負荷分布計測による熱流束(SOLおよび非接触)の評価: SOL Flux (Eich スケーリング、Sパラメータ)との比較と依存性説明(中間2)<br>・振動計測および熱流・粒子束の内外非対称性、および それぞれでの非接触発生機構の解明(中間2-移行判断)<br>・非接触ダイバータでの不純物入射による放射損失増大と周辺閉じ込め性能・閉じ込め運転領域の検証、中間2-移行判断                                                                            | (1)非接触プラズマでのSダイバータ製造、および非接触)パラメータの検討は重要(物理理解と外推スケーリング検討)<br>(2)振動・blob測定(高密度では注目が必要)<br>(3)内外ダイバータ非対称性と非接触発生時の変化(ロールオーバーと非接触)とプライベートプラズマの役割(拡散とドリフト)<br>(4)逆転磁場運転でのダイバータプラズマのモデリング(ドリフト効果の再現化)                                | (1)上流SOLではトムソンによる温度密度(mm単位)と不純物イオン温度分布(7mm程度)計測、ダイバータ熱負荷は赤外TV、プラズマパラメータはプローブ<br>(2)SOLおよびベータスタでの密度振動計測の検討が必要(Blob等) (3,4)熱流:粒子束の内外非対称性と非接触発生⇒モデリングおよび定量的検証 | ・拡散モデルは可能、ドリフト・SOL流は計測開発が必要<br>・ソースでのイオン温度測定(設置が難しい、基礎物理研究で行う)                                                                                                         |  |
|     |                                           | GST-Naka&Rok | ダイバータモデル・シミュレーション(SOLDOR/SONIC)開発、運動論的効果の反映(近似式)や運動論計算コードの開発                                                       | ・拡散モデル(径方向・ポロイダル方向)のパラメータ依存性と2次元分布の必要性を検討(中間2)<br>・運動論効果(Flux Limiter等)の検討(中間1、コード開発なら中間2-移行時期)<br>・ドリフトモデル(およびSOL流、粘性項の表現)を含む流体コードの開発、SONICへの組み込みと検証(中間2-移行判断)<br>・プラズマプラズマの輸送モデル検討(拡散、ドリフト効果など)とSパラメータの要因検証(中間2-移行判断)<br>・第一壁まで解くモデル(流体あるいは非流体)の開発と対向面の粒子過程の反映:プライベートおよび周辺far SOLモデル(中間2-移行判断) | (1)SOL拡散係数(χ)分布の検討と高温SOLへの外挿性の検討が優先<br>(2)内外非対称性の再現、プライベートでの輸送、高放射損失プラズマ不安定性などの検証(ドリフト効果の検証)<br>(3)拡散・ドリフト効果の非接触プラズマ発生への影響評価(ELMによる引き出し効果の評価:高温プラズマ成分や動的効果)<br>(2) (3)について運動論効果(有限磁場)の検証も必要<br>(4)境界条件(エネルギー・粒子排出、外側SOL境界)の検討 | (2)ドリフトを含む新流体コードの開発(2018年から開始:初期モデル完成まで3年必要、実験との比較は中間2を目標)<br>(3) 粒子吸収・排出など挙動の反映、運動論計算コードの検証も必要<br>(4)Far SOLモデルは粒子モデルの方が早いと思われる                           |                                                                                                                                                                        |  |
|     |                                           | GST-Naka     | 金属壁実験装置(JET-ILW)でのモデル検証とITERでのベンチマーク SONIC-SOLPS                                                                   | ・SOLPS等による解析結果のベンチマーク:拡散係数の影響を評価し、拡散モデルのパラメータ依存性と2次元分布の必要性を検討(中間2)<br>・ITERでの非接触プラズマのコードベンチマークと非接触運転領域の検討(中間2)                                                                                                                                                                                   | (1)SOLPS-ITERとITERレベルでの非接触プラズマ・不純物輸送結果を検証予定(JET実験との優先度を考える必要がある)                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                        |  |
|     |                                           | GST-Rok      | 原型炉条件での非接触プラズマモデル(SONIC/SOLDOR:プラズマ輸送)検討と非接触プラズマ運転領域(シミュレーション)                                                     | ・拡散係数の影響を評価(粒子デタッチの発生)によるダイバータ運転領域検討(形状・サイズ・熱放射変化等も行う)(中間1、中間2、移行時期)<br>・運動論効果の検討、高温SOLでのプラズマ数値解法(流体近似およびフラククスミタの原型炉への外挿性検証など)、およびSOLDORへの実装(速度非等方性効果導入のための流体方程式開発及び数値法開発)(中間2、移行時期)<br>・高密度の非接触ダイバータにおける境界条件(粒子・エネルギー輸送)検討(中間2、移行時期)<br>・燃料同位体効果(DとT)による非接触プラズマへの影響(中間2-移行時期)                   | (1)中間1、中間2、移行時期それぞれで内外ダイバータ非対称性およびプラズマ不安定性を設計にどう反映するか方針の検討が必要(プラズマ流なども含む)、例えばエネルギー、粒子排出を非対称性として態度を見る。<br>(2)新流体コードを含むSONICの初期結果は中間2が目標、移行時期までにモデル改善とパラメータ選択し、予測精度を上げる。                                                        |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                        |  |
|     |                                           | NIFS         | LHD磁場配位での非接触プラズマ計測とモデル(EMC3-EIRENE)検証・開発(非接触プラズマでの輸送)                                                              | ・EMC3の非接触対応(中間2)<br>・ダイバータ板上のプラズマ分布の変化の理解(拡散の評価と物理モデル化:例えばデタッチメント時のプラズマ領域への粒子損失増大モデル化、ドリフトあるいは揺動拡散モデル導入、中間2-移行判断)<br>・静電プローブによるドリフト効果の検討(モデリング)による評価、中間2)<br>・振動計測および熱流・粒子束の内外非対称性と非接触発生について検討(中間2)<br>・不純物入射や磁場による周辺部放射損失領域の運転と閉じ込め性能の検証(中間2)                                                   | (1)EMC3の非接触対応(流体含め)は中間2を目指す<br>(2)拡散の物理理解(3次元、エネルギー・ストカスティック)、および揺動・blobによる輸送研究及び寄与(トカマク)と同様に揺動やBlobの寄与を値、χ/Dに反映する。<br>(3)3次元構造とエネルギー輸送・バラン                                                                                   |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                        |  |

|    |                                                               |              |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|----|---------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                                               | 筑波大          | GAMMA10ミラー配位のダイバータ模擬モジュール(PDX)における高温プラズマによる非接触プラズマ基礎実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE)検証・開発(プラズマ輸送とシース研究)、および計測機器開発(MAP-IIを含め) | ・GAMMA10-PDXにおいて、不純物ガス入射によるターゲット部への熱粒子束の変化、上流部プラズマへの影響の評価(中間1-2)<br>・B2-EIRENE(直線プラズマ近似)とLINDAコードのベンチマーク(中間1-2)<br>・LINDAコード(慶大)の非接触プラズマへの適応と定量評価(中間2)<br>・MAP-IIを用いた非接触プラズマに対する計測手法の原理検証および高精度化(中間1-2)                                                               | (1)高速カメラによるプラズマ2次元分布変動、分光器を用いた非接触プラズマ生成(密度、運動量減少)の定量評価<br>(2)非接触プラズマへの対応が現状の課題(部分非接触の再現? 非定常化? トーラス形状への発展可能?)                                                                                                                             | (2)モデル検討・LINDAコード(+Neutralコード)、B2-EIRENEを評価中。具体的な結果は2018頃 | ・低衝突周波数領域でのイオンエネルギーの非等方性のモデル化と影響、原型炉プラズマとの対応は課題                                                                                                                         |
|    |                                                               | 筑波大          | 新装置(高温高密度パイロット装置)による高温高密度プラズマによる非接触プラズマ基礎実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE)検証・開発(プラズマ輸送とシース研究)                                 | ・高温高密度パイロット装置と非接触プラズマが定量的に共存する部分非接触状態を形成し、輻射輸送や不純物の高温プラズマ領域への影響を明らかにする(中間2)<br>・LINDAコード(慶大)の非接触プラズマへの適応と定量評価(中間2)<br>・非接触プラズマに伴うBiob発生と不安定性や拡散への影響を解明(中間2)                                                                                                           | (1)非接触プラズマ発生原因の検討を小型直線装置と共に検討<br>部分非接触プラズマの生成は模擬装置として必要<br>(2)Biob発生と伝搬機構(トラス実験・共通・相違点を検討)<br>(3)シース・プレシース研究                                                                                                                              | 詳細な発光、粒子束分布計測の整備が必要                                       | ・定常高温中密度<br>10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti 数10eV、Te 数10eV、最大磁場15T                                                                                                 |
|    |                                                               | ?            | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                   | ・パイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           | 定常高温高密度10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti100eV、Te100eV、最大磁場2T                                                                                                         |
|    |                                                               | 名大           | 直線装置での非接触プラズマ基礎実験(中性原子・分子の温度の影響)と計測開発およびモデル(LINDA、EMC3-EIRENE)検証・開発(プラズマ輸送とシース研究)                                   | ・NAGDIS-IIにおいて、沿磁力線方向の磁場強度を変化させて、収縮磁場、発散磁場配置を模擬して、収縮磁場、発散磁場が非接触プラズマ生成に与える影響を明らかにする(中間1)<br>・再結合フロント付の磁場(特に放射拡散が非接触プラズマ形成に与える影響を定量的に評価(拡散)やBiob発生、および非接触・接触共存時でのシース電位差による電流など)<br>・LINDAコードおよびEMC3-EIRENEコードによる物理理解とモデル改善(中間2-移行判断)                                    | (1)ラーマ-運動変化と磁力線長変化の効果について物理検討が必要<br>・再結合フロント付の磁場(特に放射拡散が非接触プラズマ形成に与える影響を定量的に評価(拡散)やBiob発生、および非接触・接触共存時でのシース電位差による電流など)<br>(2)LINDAおよびEMC3-EIRENEの非接触対応は中間2を目指す                                                                            | (1)揺動Biobは非接触フロントの直ぐ下流でZ方向温度・電場・密度勾配により発生。                | 磁場強度最大0.25T (最小0.05T)。                                                                                                                                                  |
|    |                                                               | 東海大          | 直線装置での発光および発散磁場配置をともなう非接触プラズマの計測と検証                                                                                 | ・TPD-Sheetを用いて、磁場形状変化(発散・発散磁場等)による非接触プラズマの形成過程を検証する(中間2-移行判断)。                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           | Ar、N <sub>2</sub> 等の希ガスの不純物導入、又は磁場形状による非接触プラズマの生成過程と粒子輸送の検証。ガス種(H <sub>2</sub> D <sub>2</sub> He混合)、密度10 <sup>18</sup> -10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> 、最大磁場強度は0.1T程度 |
| 13 | 非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置とモデリング検証(特に入射不純物と種類)                       |              |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | GST-Naka     | JT-60Uでの実験・計測&モデル検証(SONIC/IMPIC)                                                                                    | ・ダイバータ・SOL-周辺部での入射不純物遮蔽効果の評価(ELM、L/Hモード)(中間1)<br>・複数不純物入射実験の結果(Ne/Ar/He)の定量的な解析の継続(中間1-2)<br>・非接触プラズマ発生機構への不純物イオン素過程・再結合・放射損失の寄与の評価(特に、高Z不純物(Ar以上のKr, Xe)について注目)(中間2)<br>・複数の不純物の入射によりダイバータおよび主プラズマ周辺部まで放射領域を拡大(中間2)<br>・ダイバータ・SOL-周辺部での入射不純物遮蔽効果の評価(ELM、L/Hモード)(中間2) |                                                                                                                                                                                                                                           | 複数不純物の計算可能(2017-)                                         | ・炭素壁(壁温1500-3000実験)・入射不純物はNe&Ar                                                                                                                                         |
|    |                                                               | GST-Naka     | JT-60SAでの実験・計測&モデル検証(SONIC/IMPIC)                                                                                   | ・不純物輸送モデルに対する輸送コード(He輸送排気も含め)の開発(現在実施中⇒中間1)<br>・不純物発生機構(素過程・不純物イオンの再結合)の特定、高Z不純物(Ar以上のKr, Xe)でも非接触プラズマ領域が広い運転領域・手法の検討(不純物輸送、磁場反転、形状の影響)(中間2-移行判断)                                                                                                                     | (1)非接触ダイバータにおける高Z不純物のダイバータでの遮蔽性能(炭素壁時)は改善が混入を伴う<br>(2)接・非接触での損耗評価(後述: gross vs netの物理過程)                                                                                                                                                  | 複数不純物の計算可能(2017-)                                         | ・炭素壁実験は2020-2028、金属壁実験は2029予定<br>高Z不純物(Ar以上)および複合ハーフを検討<br>非接触ダイバータにおける高Z不純物のダイバータでの遮蔽性能・Wダイバータ実験は2030年をを目指す                                                            |
|    |                                                               | GST-Naka+Rok | ダイバータモデル・シミュレーション(SONIC/IMPIC)開発                                                                                    | ・不純物輸送モデルに対する輸送コード(He輸送排気も含め)の開発(現在実施中⇒中間1)<br>・不純物発生機構(素過程・不純物イオンの再結合)の特定、高Z不純物(Ar以上のKr, Xe)でも非接触プラズマ領域が広い運転領域・手法の検討(不純物輸送、磁場反転、形状の影響)(中間2-移行判断)                                                                                                                     | (1)高温(低衝突周波数)における熱力モデル検討・検証と原型炉SOLへの補完<br>(2)SOLフローの視程と乱雑性の検討(ドリフト効果および拡散・ピンチ効果の反映、磁場反転による影響はプラズマ流のみ?)<br>(3)非接触プラズマでの不純物拡散係数の感度、および不純物種(低高Z)で相違<br>(4)光輸送(不純物イオン)の開発は必要か?<br>(5) プライベートプラズマの役割(ドリフト、拡散)<br>(6)損耗モデルの改善は必要?(MD利用?)(1.1.6) |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | GST-Naka     | 金属壁実験装置(JET-ILW)でのモデル検証とITERでのベンチマーク SONIC-SOLPS                                                                    | ・SOLPS等(EDGE2D、UEDGE)による解析結果とベンチマーク・Be存在条件下でのモデリングとベンチマーク、N <sub>2</sub> 、Ne等の軽Z不純物入射、および高Z不純物入射実験結果での検討<br>・ITERでの非接触プラズマのコードベンチマークと不純物輸送・放射損失ピークの検討(中間2)                                                                                                            | (1)NおよびBe不純物存在下での実験結果(金属壁)と比較<br>(2)SOLPS-ITERITERレベルでの非接触プラズマ・不純物輸送結果を検証予定(JET実験との優先度考える必要がある)                                                                                                                                           |                                                           | 必要ならNHx系(吸着や解離)の効果について検討                                                                                                                                                |
|    |                                                               | GST-Rok      | 原型炉条件下での不純物輸送モデル検討(SONIC/IMPIC) 不純物輸送と非接触プラズマ運転領域                                                                   | ・不純物輸送及び放射損失分布への影響評価: コアから排出される熱流のポロイダル依存性導入と仮定プラズマ流の想定<br>・非接触発生機構(素過程・不純物イオンの再結合)の特定、高Z不純物(Ar以上のKr, Xe)でも非接触プラズマ領域が広い運転領域・手法の検討(不純物輸送、磁場反転、形状の影響)(中間2)                                                                                                              | (1)中間1、中間2、移行時期それぞれでコードとモデルの開発過程ごと検討                                                                                                                                                                                                      |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | NIFS         | LHD磁場配位での非接触プラズマ計測とモデル(EMC3-EIRENE)検証・開発(非接触プラズマでの輸送)                                                               | ・ダイバータ閉型化による非接触ダイバータ生成と3次元効果の評価とモデリングの検証と改善(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | 筑波大          | ミラー配位高温プラズマによる基礎実験(再結合・放射損失と不純物輸送)とモデル検証(LINDA、B2-EIRENE)、および計測機器開発(MAP-IIを含め)                                      | ・GAMMA10-PDXにおいて、不純物ガス(Ar, Kr, Xe)入射による高速カメラによるプラズマ2次元分布観測、多点同時分光計測による不純物輸送機構の解明(中間1-2)<br>・定常直線装置MAP-IIを用いた非接触プラズマに対する計測手法の原理検証および高精度化(中間1-2)<br>・MAP-IIを用いた非接触プラズマに対する計測手法の原理検証および高精度化(中間1-2)                                                                       | ・不純物およびプラズマのフロー計測に関する点も追記予定?<br>・非接触プラズマでの不純物輸送コードの検討?                                                                                                                                                                                    |                                                           | ・入射不純物ガス(Ar, Kr, Xe)                                                                                                                                                    |
|    |                                                               | 筑波大          | 新装置(高温高密度パイロット装置)による高温高密度プラズマ基礎実験(再結合・放射損失と不純物輸送)とモデル検証(LINDA、B2-EIRENE)                                            | ・高温高密度パイロット装置において、高温プラズマと三体再結合を伴う非接触プラズマが定量的に共存する状態を形成し、放射損失分布(計測、輻射輸送)の評価(中間1-2)<br>・LINDAコード(+Neutralコード)による形状効果のモデリングの精度を高める(中間2)                                                                                                                                  | ・熱力とプラズマ流の実験と不純物輸送モデルの開発<br>・接触・非接触領域における損耗過程(GrossNet検証)(1.1.6)                                                                                                                                                                          |                                                           | ・定常高温中密度・温度差の大きなSOL輸送を検討(熱力とプラズマ流の実験とモデルの開発)<br>・10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti 数10eV、Te 数10eV、最大磁場15T                                                            |
|    |                                                               | ?            | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                   | ・パイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           | 定常高温高密度10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti100eV、Te100eV、最大磁場2T                                                                                                         |
|    |                                                               | 名大・東海大       | 基礎実験での計測&モデル検証(東海大と連携して実施)                                                                                          | ・NAGDIS-IIおよびTPD-Sheetを使用して、特にHe混合時のMARの実験・モデルの検証                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
| 14 | 部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果についてモデリング検証(特にダイバータ長、閉構造、傾斜角とVコーナーなど) |              |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | GST-Naka     | JT-60Uでの実験・計測&モデル(SONIC)検証(部分非接触プラズマの要因を検討)                                                                         | ・中性粒子圧力とデタッチメント発生領域の関係は排気速度を変化させた実験データからまとめる(中間1)                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | GST-Naka     | JT-60SAでの実験・計測&モデル(SONIC)検証(部分非接触プラズマの要因を検討)                                                                        | ・形状効果の定量評価(V形状とドーム、ストライク点位置と排気への影響)(中間2)<br>・部分非接触ダイバータの運転領域(Pasp, Pradiv, n_sol, n_imp等)の検討(中間2-移行判断)<br>・非接触プラズマ領域が広い運転領域・手法の検討(不純物輸送、磁場反転、形状の影響)(中間2-移行判断)                                                                                                         | (1)直垂ターゲットとVコーナーの非接触プラズマ幅への影響評価<br>(2)非接触プラズマでのSダイバータ散逸、および非接触幅)パラメータの検討も必要(1.1.2)<br>(3)接触領域における損耗率の磁場ピッチやターゲット形状効果(1.1.6)                                                                                                               |                                                           | ・炭素壁実験は2020-2028、金属壁実験は2029予定<br>・直垂ダイバータ以外のフラットダイバータとパフリングも注目されている(DIIIなど)<br>・中性粒子圧と非接触ダイバータ発生との関係が注目されている(AUGなど)                                                     |
|    |                                                               | GST-Naka+Rok | ダイバータモデル・シミュレーション(SONIC)開発                                                                                          | ・SONICダブル配位対応(SAおよび原型炉オプション)の検討のため(中間2を目指す)                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           | ・SONICの新流体コード開発の際に組み込む                                                                                                                                                  |
|    |                                                               | GST-Rok      | 原型炉条件下での非接触プラズマ分布のモデリング検討(SONIC)                                                                                    | ・部分(完全)非接触ダイバータを得やすい形状検討(ダイバータ長、閉構造、傾斜角、Vコーナーなど) ⇒ 原型炉における形状効果をまとめる(中間2)<br>・粒子コンダクタンスに対する、ダイバータ圧力と非接触プラズマ発生との精度の向上(中間2)                                                                                                                                              | (1)非接触プラズマでのSダイバータ散逸、および非接触幅)パラメータの外挿性の評価(シミュレーション)、およびダイバータレット長およびサイズの評価                                                                                                                                                                 |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | 筑波大          | ミラー配位高温プラズマによる形状効果の基礎実験&モデル検証(LINDA、B2-EIRENE)                                                                      | ・GAMMA10-PDXにおいて、角度可変のVターゲット及び後方排気扇による閉構造の変化により部分非接触プラズマ生成への影響を評価(中間1)<br>・LINDAコード(+Neutralコード)による形状効果のモデリングの精度を高める(中間2)                                                                                                                                             | ・高速カメラでプラズマ2次元分布計測<br>・分光で中性粒子温度、分子の振動・回転温度計測により明らかにする                                                                                                                                                                                    |                                                           | ・モデル検討・LINDAコード(+Neutralコード)、B2-EIRENEを評価中。具体的な結果は2018頃                                                                                                                 |
|    |                                                               | 筑波大          | 新装置(高温高密度パイロット装置)による高温高密度プラズマ基礎実験(ターゲット形状効果)とモデル検証(LINDA、B2-EIRENE)                                                 | ・高温高密度パイロット装置において角度可変ターゲットにより傾斜およびVコーナー効果の評価(中間2)<br>・LINDAコード形状効果のモデリングの精度を高める(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                             | (1)トカマクダイバータと直線装置での磁場形状の違いは磁力線長ve磁場強度が増減)をどのように外挿するか課題<br>(2)接触領域における損耗率の磁場やターゲット形状効果の評価(1.1.6)                                                                                                                                           |                                                           | ・角度可変ターゲットの設置を検討<br>・定常高温中密度<br>10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti 数10eV、Te 数10eV、最大磁場15T                                                                             |
|    |                                                               | ?            | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                   | ・パイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           | 定常高温高密度10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti100eV、Te100eV、最大磁場2T                                                                                                         |
|    |                                                               | 東海大          | 直線装置での非接触プラズマにおけるターゲット形状効果の検証                                                                                       | ・TPD-Sheetの終端部ターゲットの形状の変化により、ダイバータ長、閉構造、傾斜角等に対する部分非接触プラズマの生成要因とダイバータ形状効果について検証する                                                                                                                                                                                      | ・プローブ計測、オメガatron質量分析、ガス圧力等により測定する<br>・モデル計算で原子・分子過程を調べる                                                                                                                                                                                   |                                                           | ポロイダル方向の影響のみ検証。ガス種(H <sub>2</sub> D <sub>2</sub> He混合)、密度10 <sup>18</sup> -10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> 、最大磁場強度は0.1T程度                                              |
| 15 | 非接触プラズマでの熱負荷評価とモデリング検証(輻射収収、プラズマ対向条件、表面再結合などの評価)              |              |                                                                                                                     | (注)実験での検討は1.1.1, 1.1.2に記述                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | GST-Naka+Rok | ダイバータモデル開発および原型炉やITER条件下での非接触プラズマ分布のモデリング検討(SONIC)                                                                  | ・ダイバータシース条件および表面再結合熱負荷・放射熱負荷(反射)の検証とモデル改善(中間2-移行判断)<br>・第一壁における放射、再結合、蓄積モデルの検証とモデル改善(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                        | (1)部分非接触・完全非接触プラズマとダイバータターゲット境界条件検討(デタッチ再現にあたって、ボーム条件・熱伝導境界条件は今までの良いかという問題提起)<br>(2)粒子の完全放射モデルが非接触ダイバータ生成に及ぼす影響の評価とモデル改善                                                                                                                  |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | 名大           | 基礎実験での計測&モデル検証(信州大と連携して実施)                                                                                          | ・NAGDIS-IIで発生した非接触プラズマにおいて計測結果と衝突輻射コード、輻射輸送コードによるシミュレーション結果と比較し、輻射収収が非接触プラズマに与える影響を明らかにする(中間2-移行判断)                                                                                                                                                                   | (1)NAGDIS-IIを活用したシース条件研究は重要: 基礎過程研究課題と原型炉条件下の外挿性検討はブレークダウンが必要                                                                                                                                                                             |                                                           | 高精度の真空紫外ならびに可視分光計測を計画<br>・温度、密度だけでなくポテンシャルの計測も必要                                                                                                                        |
|    |                                                               | ?            | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                   | ・パイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           | 定常高温高密度10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup> 、Ti100eV、Te100eV、最大磁場2T                                                                                                         |
| 16 | 部分非接触プラズマでのタンクシステム損耗評価とモデリング検証(特に不純物イオンによる影響について)             |              |                                                                                                                     | 実験での検討は1.1.3, 1.1.4に記述                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | GST-Naka     | JT-60SA実験・モデル(IMPYGYRO/IMPIC)での制御・検証                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |
|    |                                                               | GST-Naka+Rok | 非接触プラズマ分布のモデリング検討(IMPYGYRO/SONIC)                                                                                   | ・IMPYGYROモデル改善およびSONIC(プラズマ・不純物輸送)との同時計算開発                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |                                                                                                                                                                         |

|    |                                     |         |                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|----|-------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                     | GST-Rok | 原型炉条件での非接触プラズマ分布のモデリング検討                                                                                                                                                             | ・損耗・増積・反射モデルの高精細化 (Impyroモデルと背景プラズマとのカップリング計算)<br>・不純物輸送モデルの検討 (トランジェント熱負荷、マグネティックリリース、電場の考慮など)<br>・再堆積層の物理変化 (スパッタ率、熱伝達など) による損耗評価                                                                   |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | 創路高専                                |         | 分子動力学 (ACTシミュレーション) にもとづく水素プラズマ対向壁リサイクリングモデルの構築                                                                                                                                      | ・分子動力学法による壁 (炭素壁、金属壁) での粒子反射モデルの高度化<br>・水素分子との反応によるダイバータプラズマのエネルギー損失の定量化                                                                                                                              | 壁から発生する粒子の舞いを扱うための計算時間の短縮モデルの開発                                                                                                                                | 分子動力学法と拡散方程式とのハイブリッド化モデルの開発                                                                                           | ガス種 (H、D、T原子)、壁 (C、Fe、W)、MDコードはNIFS (伊藤) コードに、拡散方程式を開発しハイブリッド化。                                                  |
|    | 名大・九大                               |         | W再堆積層の特性研究 (QUEST共同研究)                                                                                                                                                               | ・タングステンヘリウム共堆積層の水素吸蔵特性の評価<br>・炭素またはステンレスを想定したPWI損耗研究<br>・MDによるWの表面変化とスパッタリング・モデル<br>・量子化学計算に基づく分子動力学ポテンシャルモデルと二体衝突近似モデルの高精細化<br>・実験と比較可能な照射時間再照射を目的とした照射シミュレーションの達成<br>・イオン粒子入射と中性粒子入射が壁へ与える影響の違いを明確化 |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | LHD/NIFS                            |         | LHDのPWI損耗研究と評価、および PWI MDシミュレーション研究                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | 筑波大、阪大<br>京都大学                      |         | プラズマイオン・不純物イオン分光                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | ?                                   |         | MDモデリング開発とデータベースの整備が必要                                                                                                                                                               | ・100eV程度まで分子動力学シミュレーションでデータベース化を行う計画を加速する<br>・水素原子種や入射不純物以外にself-sputteringも必要、(2)バルクおよびVPS-W以外にC、SUS等も必要<br>・ダイバータ中での損耗・再堆積モデリングの開発 (あるいは導入) は必要                                                     |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | ?                                   |         | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                                                    | ・パイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       | 定常高温高密度 $10^{20}m^{-3}$ 、Ti100eV、Te100eV、最大磁場 2T                                                                 |
| 2  |                                     |         | 非接触プラズマの制御手法 (維持手法と必要な計測):<br>・自種: 部分非接触プラズマ (外側) を標準とし、ダイバータレック上での維持。<br>・スル点付近で非接触を維持するならコアプラズマとダイバータ設計の修正が必要。                                                                     |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
| 21 |                                     |         | 部分非接触ダイバータでの放射損失ピーク位置制御とモデリング検証<br>・完全非接触ダイバータ生成に新たなダイバータ形状、不純物種の選択など手法が必要か<br>・非接触プラズマ制御のための計測 (分光、ポロメータ、トムソン) とアクチュエータ (不純物ガス種、ハフ位置、加熱?) 比較<br>・トランジェント熱負荷増による接触プラズマへの対処手法とモデリング検証 |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | GST-Naka                            |         | JT-60SA実験・モデル (SONIC/非定常SONIC) での制御と検証                                                                                                                                               | ・複数の不純物の入射によりダイバータに加え主プラズマ周辺部まで放射領域を拡大 (中間2/移行判断)<br>・部分および完全非接触ダイバータにおける運転領域パラメータ検討、粒子排気性能および高低Z不純物のダイバータ遮蔽性能の評価 (中間2/移行判断)                                                                          | (1) 複数不純物の制御手法 (ハフ位置、計測)<br>(2) 閉じ込め性能と両立の検討<br>(3) 部分 (完全) 非接触ダイバータにおける高低Z不純物のダイバータ遮蔽性能の評価<br>(4) 排気性能と非接触プラズマ制御性能の評価<br>(5) 接触領域における損耗評価と低減手法の開発 (1.1.6でも記述) | ・ダイバータ板上流およびX点近傍の構造計測が特に重要<br>・FB制御として、ポロメータアレイによりダイバータでの放射損失ピークの測定が優先するか? レッグ上の温度測定は可能か? ダイバータ上の非接触プラズマの計測は可能か?      | ・炭素壁実験は2020-2028、金属壁実験は2029予定<br>・高Z不純物 (Ar以上) および混合ハフを検討<br>・非接触ダイバータにおける高低不純物のダイバータでの遮蔽性能: Wダイバータ実験は2030年位を目指す |
|    | GST-Naka                            |         | 金属壁実験装置 (JET-HLW) でのモデル検証とTERでのベンチマーク、SONIC-SOLPS                                                                                                                                    | ・金属壁でB <sub>e</sub> 、N等軽不純物の制御モデリングのベンチマーク検証 (中間2-移行判断)                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | GST-Naka+Rok                        |         | ダイバータモデル・動的シミュレーション (非定常SONIC) 開発                                                                                                                                                    | ・非定常SONICモデルの開発 (中間2)<br>・計測器モデルと制御モデル (制御要素: 時間応答やロジックの追加) (移行判断)<br>・(新古典論) 異常輸送・電場ドリフトを考慮した総合シミュレーション開発 (移行判断)<br>・ELM、プラズマ上げ、立下げなどを含む、非定常・トランジェント熱負荷を予測できるシミュレーションコード開発 (移行判断)                    | (1) 非定常SONICのみで十分か? 運動論粒子コードも必要?<br>(2) ELMなどの短時間高熱負荷輸送モデル検討では運動論計算コードが必要<br>(3) 制御手法検討のためには非定常SONICの物理モデルの簡易化も必要                                              |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | GST-Rok                             |         | 原型炉条件での非接触プラズマ制御ロジックを検討: 詳細な物理計算ができるSONICを基に非定常SONICの改善                                                                                                                              | ・不純物放射位置の予測と制御研究 (中間2)<br>・不純物のコア蓄積・侵入防止条件の検討と制御 (中間2-移行判断)<br>・WF92H、SAS壁排気・リテンション要素モデル (第一壁に限らない)                                                                                                   | ・ダイバータサイズの評価及び形状の最適化 (低温の非接触ダイバータのためにより良い形状があるか検討)                                                                                                             |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | NIFS                                |         | LHD磁場配位での制御と検証<br>・異なる磁場配位での発光分布の計測、RMPD加による発光分布変化の計測、およびその時のデタッチメント維持時間 (制御性) との関係を実験で調べる。EMC3-EIRENEとの比較。                                                                          | ・ダイバータ熱・粒子負荷分布、および発光分布の実験とモデリングとの比較 (中間1-2)<br>・不純物種 (Ne, Ar, Kr, Xe) による熱排出とガス入射・排気制御モデル (中間1-2)<br>・磁場形状 (あるいは異動磁場、磁気島) による不純物制御の物理モデルの高精細化 (中間1-2)<br>・放射損失測定およびガスパフ・排気による非接触プラズマ制御の検討             |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | 筑波大                                 |         | ミラー配位高温プラズマによる形状効果の基礎実験&モデル検証 (LINDA、R2-EIRENE)                                                                                                                                      | ・GAMMA10/POXのダイバータ模擬モジュールにおいて、不純物ガス (Ar, Kr, Xe) ハフに対する動的応答、排気制御によるその制御方法の検証 (中間1-2)                                                                                                                  |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | 筑波大                                 |         | 新装置 (高温高密度パイロット装置) による高温高密度プラズマ基礎実験 (動的制御) & モデル検証 (LINDA)、動的モデル (非定常LINDA) の開発                                                                                                      | ・新たに建設する高温高密度パイロット装置において、GAMMA10を超える高密度領域での放射損失分布計測と安定性の評価、輻射輸送の評価、ガスハフに対する応答 (中間2-移行判断)                                                                                                              | ・接触・非接触領域における損耗制御の検討                                                                                                                                           | ・制御のためにポロメータ設置が必要                                                                                                     | 定常高温高密度 $10^{19}m^{-3}$ 、Ti 数10eV、Te 数10eV、最大磁場1.5T 変動排気系による排気制御                                                 |
|    | ?                                   |         | 高温高密度原型炉ダイバータ模擬装置                                                                                                                                                                    | ・パイロット装置を超える原型炉級高密度プラズマによる実験                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       | 定常高温高密度 $10^{20}m^{-3}$ 、Ti100eV、Te100eV、最大磁場 2T                                                                 |
|    | 名大・東海大・慶應大・信州大                      |         | シミュレーションコード (LINDA) の非接触モデル導入と動的モデル (非定常LINDA) の開発                                                                                                                                   | ・直接装置の非接触プラズマ制御を時系列的に理解するため、非接触プラズマ・モデリングの導入と動的シミュレーション化を進める。<br>・原子分子データベース (信州大) も国内整備で導入する<br>・輻射輸送はプラズマ運転領域が十分でないと思われるまで考慮しない。                                                                    |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
| 22 |                                     |         | X点放射損失ピークにおけるダイバータとコアプラズマ特性とモデリング検証                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | GST-Naka<br>GST-Naka+Rok<br>GST-Rok |         | X点付近で放射損失ピークを維持する高放射損失運転での設計オプションを検討<br>・主プラズマとダイバータプラズマコードの統合                                                                                                                       | ・不純物種 (複数も含め) による運転領域 (高閉じ込め運転、不純物希釈、非接触維持) の検討<br>・ダイバータコードと主プラズマ輸送 (不純物) コード (IMPACT) との統合<br>・定常シミュレーション (SONIC) から非定常ダイバータコード (非定常SONIC) への検討<br>・実験による検証とモデルの改善                                  | (1) X点放射損失運転パラメータ (主に不純物選択によるパワー、密度、放射損失割合、制御時定数など)、周辺プラズマ閉じ込めおよび不純物運搬への影響<br>(2) 実験実験の外挿性の検討<br>(3) 適切なモデリング修正 (拡散係数、ドリフト、不純物滞留など) が必要                        |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
| 23 |                                     |         | 部分・完全非接触ダイバータにおける粒子およびヘリウム排気性能                                                                                                                                                       | 注: 大項目でも粒子・ヘリウム排気性能検討は議論                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | GST-Naka                            |         | JT-60U実験・モデルでの排気性能の検証                                                                                                                                                                | ・ヘリウム排気特性の検証、非接触ダイバータの違いを評価 (中間1)                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | GST-Naka                            |         | JT-60SA実験・モデルでの排気性能の検証                                                                                                                                                               | ・ヘリウム排気特性の検証、非接触ダイバータの違いを調べる (中間2)<br>・形状効果 (スロット位置、V型コーナ、JT-60Uとの比較) を調べる (中間2)                                                                                                                      |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | GST-Naka+Rok                        |         | ダイバータモデル・シミュレーション (SONIC) 開発                                                                                                                                                         | ・中性粒子間衝突、He輸送モデル (HeH分子、準安定状態、He-D+衝突、He-He衝突等) の開発                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | GST-Rok                             |         | 原型炉条件での排気性能のモデル検証                                                                                                                                                                    | ・SONIC (MPMD) による非接触プラズマにおけるヘリウム排気性能の評価 (中間1)<br>・ダイバータ設計条件 (排気速度、形状効果) によるヘリウム排気性能の評価 (中間2)<br>・He弾性散乱およびD <sup>0</sup> 弾性散乱効果による排気性能への影響評価 (散乱モデルの作成) (中間2)                                         | ・非接触プラズマ状態の変化 (放射損失、ガス量、密度) による排気性能の評価<br>・ドーム、リフレクタ形状と排気口の位置大きさによる排気性能評価、カセット排気口位置とダイバータカセット形状検討<br>・弾性散乱 (He, D) の効果を検討                                      |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | NIFS                                |         | LHD排気付きダイバータにおける排気性能のモデル (EMC3-EIRENE) 検証                                                                                                                                            | ・ダイバータクライオ排気と共に (アタッチ、デタッチ) ダイバータ部の中性粒子圧力計測<br>・EMC3-EIRENEシミュレーションによる排気性能の検証                                                                                                                         | ・実験での粒子排気性能をモデリングで検証<br>・He排気はモデリングにより検討                                                                                                                       | ・クライオによるHe吸着 (Arフロスト) は難しいため排気量の評価に限られる                                                                               |                                                                                                                  |
|    | 筑波大                                 |         | ミラー配位高温プラズマによる排気性能の検証                                                                                                                                                                | ・高温高密度パイロット装置において角度可変ターゲットにより傾斜およびVコーナ効果の評価<br>・変動排気系の制御による粒子排気方法の差の検証<br>・LINDAコードによる形状効果を含めたモデリングの精度を高める                                                                                            |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | 筑波大                                 |         | 新装置 (高温高密度パイロット装置) による高温高密度プラズマにおける排気性能の検証                                                                                                                                           | ・終端部に排気速度可変のポンプを設置し、ターゲットの形状変化に対する非接触プラズマ生成過程とヘリウム排気性能を検証する。                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                |                                                                                                                       |                                                                                                                  |
|    | 東海大                                 |         | 直接装置での部分・完全非接触プラズマ生成におけるダイバータ形状とヘリウム排気性能の検証                                                                                                                                          | ・TPD-Sheet 終端部に排気速度可変のポンプを設置し、ターゲットの形状変化に対する非接触プラズマ生成過程とヘリウム排気性能を検証する。                                                                                                                                | ・ターゲットと排気速度を制御可能なバタフライバルブ付ポンプをTPD-Sheet IV 終端部に設置し、ヘリウム及び水素・ヘリウム混合プラズマにて、部分・完全非接触プラズマをターゲット形状を変化させて、ヘリウム粒子の排気特性を検証する。                                          | ・各位置でのガス圧特性、Q <sub>max</sub> 等の中性粒子質量分析、電子温度・密度特性 (高密度のヘリウムプラズマではプラズマにて、部分・完全非接触プラズマをターゲット形状を変化させて、ヘリウム粒子の排気特性を検証する。) |                                                                                                                  |





---

<http://www.qst.go.jp>