

小特集

タングステンダイバータを用いて熱核融合実験を行う

Thermonuclear Fusion Experiment with Tungsten Divertor

1. はじめに

1. Introduction

鎌田 裕

KAMADA Yutaka

日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

(原稿受付：2015年1月26日)

国際熱核融合実験炉 ITER の初期ダイバータは、タングステン製とすることが決まった。炉心プラズマの性能や運転領域に関して多くの課題をもつタングステン製ダイバータで、我々は燃焼プラズマ実験に挑んでいく。その課題を抽出・理解し、それを克服する研究をどのように進めていくのか、その議論を行うことが、本小特集の目的である。タングステン材に係るプラズマ・壁相互作用や、タングステン不純物の振る舞いに関しては、本学会誌で既に優れた小特集が組まれている[1]ので、再読いただきたい。本小特集は、それを踏まえつつ、炉心プラズマの性能や運転の観点からタングステンダイバータを扱っていく。

ITER の運転は、軽水素(H)およびヘリウム(He)プラズマでの初期運転期(非放射化運転期)から始まり、重水素(D)・トリチウム(T)を用いる放射化運転期に移行していく。ITER のミッションである DT 燃焼実験では、元々、真空容器内のトリチウムの蓄積を許容値以下に抑えるために、ストライク点に近いダイバータ板もタングステン材とする「フルタングステンダイバータ」を採用することとなっている。その前提の下で、ITER における初期ダイバータ板の材料を、「オプション1(当初案):炭素材(CFC)で実験を開始して重水素実験時からタングステン材とする」か、「オプション2:初期ダイバータからタングステン材とし、かつ必要経費を削減すべく DT 運転までのダイバータ交換回数を減らして1回とする」かについて、議論が行われてきた(図1)。この判断に関して、ITER 科学技術諮問委員会(STAC)は、2013年10月に、初期ダイバータからフルタングステンとするオプション2を取ることを、必要なR&Dの実施とともにITER理事会に勧告した。本章では、この判断に至るまでの議論の概略を紹介することで、今後実施すべき研究課題をクローズアップ

してみたい。

ITER 理事会からの要請による STAC での詳細な評価は、2012年の春に開始された。Alcator C-Mod(米)、ASDEX-U(独)、JET(欧)の各装置でのタングステンダイバータに関する実験結果が明らかとなり、利点と欠点の評価が可能となってきた。また、タングステンモノブロックの開発に必要なR&Dが欧州および日本で開始され、その初期結果は良好であった。これを踏まえ、STACは、国際トカマク物理活動(ITPA)による分析や各極のR&Dを総合して、2013年後半に評価に基づく勧告を行うこととした。

ITPA は、この要請を受け、2013年前半までに両ダイバータの評価を総合的に行うこととし、全7専門グループ毎に所掌研究領域の観点から評価結果を纏めた。この間、欧州のJET装置で実施しているタングステンダイバータの実験で、期待通りに水素同位体の吸蔵量が炭素ダイバータに比べて1桁以上低いこと、また、ディスラプション後の状況も含めてプラズマ着火とプラズマ電流立ち上げが改善

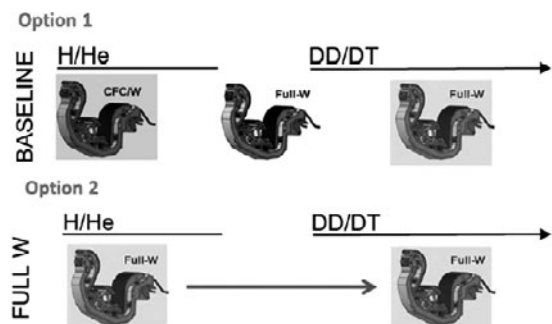


図1 ITERのダイバータ戦略オプション。下段のオプション2で進むことが決まった。

されること等がわかってきた。しかしながら、プラズマのエネルギー閉じ込め性能が約2割程度低下すること、ITERでの定格プラズマ電流15MAでのディスラプションでは、ディスラプションの緩和ができない場合、タングステンダイバータの表面が溶融する懸念が大きいこと等が課題として挙げられた。以下に、ITPAの評価の概要を評価項目毎に記す。

〈プラズマの閉じ込め・輸送〉：Hモード遷移しきい加熱パワーに関しては、タングステンダイバータは炭素ダイバータと同程度か若干低く、有利である。プラズマ内部でのタングステン不純物の蓄積低減に有効な運転手法は、中心局所加熱の最大化、ELM(周辺局在化モード)周期の制御による不純物侵入の抑制、重水素パフや不純物印加によるエロージョンの抑制であり、ITERではこれらを複合することでタングステン不純物の蓄積を低減できると考えられる。炭素ダイバータと比較してタングステンダイバータで明らかに失うのは、低密度/低リサイクリングの運転シナリオである。ただし、エネルギー増倍率(Q)=10の高密度放電では、大きな差は生じない。一方、初期のヘリウムでの運転時に、軽水素ベレットによるELM周期制御を行う場合、ヘリウムプラズマではなくなり、Hモードへの遷移しきい加熱パワーが上昇してしまう問題が発生する。

〈MHD安定性〉：タングステンで開始することに関して、MHD安定性の観点からは、特段のshow-stopperはない。JETの実験でも、ディスラプション頻度が上がることはない。ただし、高Z不純物(タングステン)の蓄積が増える可能性が高まる。初期の低プラズマ電流での運転期から、適切なディスラプション緩和システムが構築されていなければならない。プラズマ中心部への高Z不純物の蓄積を抑制するために、中心加熱(ECH/ICRH)を準備しなければならない。中心部でのタングステン量を測定する計測が不可欠である。

〈ダイバータ熱流束、材料〉：ダイバータ熱流束に関して、初期の軽水素/ヘリウム運転フェーズでの主要なリスクは、「習熟期」における緩和されていない過渡現象(特にディスラプション)である。加えて、タングステン材は炭素材よりも許容熱流束が小さいため、ELM緩和に関する条件は、タングステンダイバータでは一層厳しくなる。定常熱負荷に関しては、高加熱パワー時には常に「非接触ダイバータ」状態としていなければならない。炭素材の場合は炭素不純物が放射源となるのでこれを行いやすいが、タングステンダイバータでは別途不純物注入を行う必要がある。ただし、最終的にタングステンダイバータでDT実験を行うので、制御の確立を早期に行うことができる。ダメージ発生については、タングステン(溶融)の方が炭素(エロージョン)よりもリスクは大きい。タングステンを選択する場合、過渡現象の緩和法と非接触ダイバータ状態の制御法を早期に確立していなければならない。タングステン材料としては、表面の変質が最大の研究課題である(H/D/T衝突によるプリスタリング、Heパブル・He衝突での表面変質、材料混合、ELM等の繰り返し熱衝撃によるダメージ)。

〈統合運転シナリオ〉：DTに備えるという観点では、これを早期に開始できる利点があるので、総合的にはタングステンダイバータで開始することが有利である。ただし、初期運転領域が制限されること、溶融等が発生した場合の修復に時間を要すること等を考えると、炭素材に比べて「習熟期間」を長く取る必要がある。両オプションとも $Q=10$ を達成できると考えられるが、タングステンの方がリスクは高い。そのリスク低減のために、加熱パワーの段階的増強による運転領域の拡大、ディスラプションおよびELM緩和手法の早期確立、十分な視野をもつ計測による第一壁保護機能の早期確立、デタッチダイバータ制御手法の早期確立、適切なダイバータスペア機器の準備が必要である。

2013年5月、STACは、上記のITPAの評価に合意した。即ち、ITERの初期ダイバータを全タングステンとすることに関して明確なshow-stopperはないことが示されるとともに、その利点や懸念、R&Dの必要性が明示された。

上記を踏まえつつ、2013年10月、STACは、ITER機構によるタングステンダイバータの最終設計レビューの完結、日欧露によるタングステンプロトタイプモジュール試験の進展、およびJET装置におけるタングステン表面溶融実験の良好な結果(プラズマへの大きな影響はない)を留意した。一方、直線装置による最近の実験で明らかとなったヘリウム運転時のタングステンダイバータの潜在的リスク(表面変質によって溶融やダスト発生等が増長される)を含むタングステンの課題や、JET装置の実験で観測された溶融層の運動を説明できるようにモデリングを改善すべきであること等も留意した。以上から、STACは、ダイバータの選択に必要な科学技術基盤がITERの初期ダイバータを決定できるレベルに達したと判断し、ITER機構からの「ITERの初期ダイバータをタングステンダイバータとする基本計画」の提案をITER理事会が採択することを勧告した。ただし、この戦略を確固たるものにするために、i) ITER機構が研究コミュニティと協力しつつ継続してタングステンダイバータの科学技術に関するR&D(特にヘリウムに曝された際の変質や溶融層運動のモデリング)を早期に実施すること、ii) 真空容器内機器の保護に必要な計測やその他のシステムが、特に非放射化実験期の開始時までには機能試験を終えて準備されていること等を勧告した。STACはまた、真空容器内機器の損傷を回避するための運転手法や信頼性の高いディスラプションの検出・緩和手段を開発することに十分な期間を与えるようにITER研究計画を改訂することを勧告した。

現在、ITER機構、各極の実験装置やITPAはこれらの課題を解決すべく努力を続けている。次章からはそのような研究開発に関して、第2章ではトカマク装置での実験結果、第3章ではITERでの課題と対策、そして第4章では今後の研究の方向を議論する。

参考文献

- [1] 朝倉伸幸 他：小特集「核融合プラズマおよびダイバータにおけるタングステン研究の進展と課題」プラズマ・核融合学会誌 87, 575 (2011).