

ITERのダイバータ戦略について Divertor Strategy in ITER

鎌田 裕

Yutaka Kamada

日本原子力開発機構
Japan Atomic Energy Agency

ITERにおけるトリチウム・重水素を用いる燃焼実験では、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。その前提の上で、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(W)材とする」か、「オプション2（ITER機構からの提案）：初期ダイバータからタングステン材とし、かつ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、本年10月の会合において、初期ダイバータを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。本報告では、この判断に至るまでの議論の概略を紹介し、今後重点的に実施すべき研究課題を述べる。

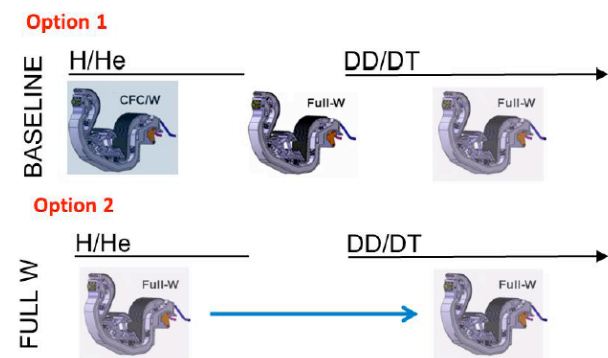


図1 ITERのダイバータ戦略オプション。下段のオプション2で進むことが想定される。

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(W)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、W

モノブロックの開発に必要なR&Dが欧州及び日本で開始され、その初期結果は良好であった。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なうこととし、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W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されること等が分ってきた。しかしながら、プラズマのエネルギ閉じ込め性能が1~2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出来ない場合、W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、W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。高Z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でこれを複合することで高Z不純物の蓄積を低減できると考えられる。この観点から、早期にECHを準備することを推奨する。炭素ダイバータと比較してWダイバータで明らかに失うのは、低密度/低リサイクリングシナリオである。ただし、Q=10の高ガスパフ/ペレット入射による低ダイバータ熱流/グリーンワルド密度近傍放電では、元来大きな差は生じない。He運転時に、軽水素ペレットに

よる ELM 周期制御を行なう場合、He プラズマではなくなり、H モード遷移しきい加熱パワーが上昇する問題が発生する。

<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、特段のショーストッパーは無い。JET の実験でも、ディスラプション頻度が上がることは無い。ただし、高 Z 不純物の蓄積が増える可能性が高まるのは事実である。初期の低プラズマ電流時点から、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。タングステンの発生を抑えるための ELM 制御手法が確立されていなければならない。

<ダイバータ熱流束、材料>：ダイバータ熱流束に関して、H/He 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、炭素よりも許容熱流が小さな W ダイバータでは、He 運転時の ELM も問題となる。従って、ELM 緩和に関する条件は、W 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デタッチ状態としていなければならない。炭素材の場合は C が放射源となるのでこれを行ない易いが、W ダイバータでは不純物注入を行なう必要がある。ただし、最終的に W ダイバータを行なうので、制御の確立を早期に行なうことができる。ダイバータのダメージ発生について、W (溶融)の方が炭素(エロージョン)よりもリスクは大きい。W ダイバータを選択する場合、過渡現象の緩和法とデタッチ状態の制御法は早期に確立していなければならない。材料の課題について、W に関しては、表面の変質が最大の研究課題である (H/D/T 衝突によるブリスタリング、He バブル・He 衝突での表明変質、材料混合 (特に、W と比べて融点の低い Be-W 合金の発生)、ELM 等の繰り返し熱衝撃によるダメージ (亀裂や溶融))。

<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 W ダイバータで開始することが有利である。W ダイバータでスタートする場合は、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時間が必要となること等を考えると、CFC 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 ITER の Q=10 を達成できると考えられるが、W ダイバータで開始の方がリスクは高まる。そのリスク低減のために、加熱パワーの早期増強、ディスラプション&ELM 緩和手法の早期確立、十分な視野を確保した計測による信頼性の高い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 は無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、及び JET 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 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、この戦略を十分に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 W 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、特に非放射化期間の各々の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を勧告した。STAC はまた、ITER 機構が、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 の研究計画を改訂することを勧告した。