

原型炉研究開発共同研究の進展

5. ダイバータ共同研究の進展

Progress of collaborative research on DEMO

5. Progress of collaborative research on divertor system

増崎 貴

MASUZAKI Suguru

核融合研

NIFS

ダイバータ研究の位置付け

原型炉においてダイバータは、炉心プラズマから流出する熱の排出と、未反応の燃料粒子およびヘリウム灰の排気を担っている。大きな熱・粒子負荷に対するダイバータの健全性を確保しつつ、必要な機能を得ることが、ダイバータ研究の大目標である。

ダイバータへの熱・粒子負荷を低減し、ダイバータ板上のピーク熱流束を、工学的に決まる許容熱流束よりも下げるため、炉心プラズマからスクレープオフ層へ流出する熱の8割程度を不純物ガスパフにより放射損失として第一壁を含む広い範囲へ逃がし、さらにダイバータデタッチメントを得ることが考えられている。一方で、デタッチメントによりダイバータへの粒子負荷が低減した状態で、燃料粒子およびヘリウム灰の排気を確保する必要もある。

現時点では、原型炉の最初のダイバータ板は、ITERのダイバータ板と同様にタングステン (W) モノブロックと銅合金冷却管の組み合わせとし、熱負荷が比較的小さいバッフル部、リフレクタおよびドームには、Wモノブロックと低放射化フェライト鋼冷却管の組み合わせを用いることになっている。しかし銅合金は中性子照射による損傷の影響が大きく、機器の寿命の点で改善の余地がある。原型炉の後期運転ではダイバータ機器の寿命を延伸するため、ダイバータへの熱・粒子負荷低減運転が確立されているという前提で、ダイバータ板の冷却管材料を低放射化フェライト鋼とすることが考えられている。同様に、プラズマ対向材料であるWについても、中性子照射損傷による物理特性や燃料粒子吸蔵特性の変化、材料としての強度の変化を明らかにする必要がある。

このような背景の下、表1に示すように、ダイバータに関するアクションプランは幅広い分野にわたり、**ダイバータ開発目標の整合性確認と炉設計への適用、プラズマ運転シナリオ、材料・機器開発、粒子制御**の4項目が挙げられている。ここでは、QSTとNIFSの原型炉研究開発共同研究でそれぞれ進められているダイバータ関係の研究課題について紹介する。

ダイバータ開発目標の整合性確認と炉設計への適用に関しては、QST共同研究で、「原型炉タングステンドライバータへのパルス熱負荷による溶融挙動と蒸気遮蔽効果を含めた寿命評価」(★1 代表:大阪大・

伊庭野)が進められている。本研究では、原型炉において過渡的事象が発生し、ダイバータ板に対し大きなパルス熱負荷が加わった際に起こり得る炉壁損耗現象を、溶融層の挙動と蒸気遮蔽を含めて調べている。これまでに、電磁力の影響を受ける溶融層挙動の観察とモデル化のため、高磁場中でタングステン試料にレーザーを照射することにより発生させた溶融層のその場観察と事後観察、重み付きPIC法を用いたシミュレーションコードPIXY[1]を用いた蒸気遮蔽現象におけるプラズマと蒸気の相互作用のシミュレーション、プラズマ中でのWのレーザーアブレーションによる、Wとプラズマ粒子の共堆積層形成とその表面組成分析等を実施している。

また、QST共同研究で進められている「JET ILW実験におけるプラズマ対向機器表面およびダストのトリチウム蓄積特性研究」(★1 代表: NIFS・時谷)では、JT-60SA稼働前の現時点で世界最大のトカマク装置であるJETで実施されているITER-Like Wall (ILW)実験において使用後に、真空容器内から取り出されたWダイバータ板から切り出した試料について表面近傍の微細構造分析を行い、実機環境に曝露されたWの変質等を調べるなどしている。

プラズマ運転シナリオに関しては、原型炉の設計、運転シナリオの構築のために必要な、予測性能を有するダイバータシミュレーションの開発に向けて、「非接触プラズマにおける原子分子過程と粒子輸送に関する実験とモデリング」(★2 代表: 名古屋大・大野)が、NIFS共同研究で進められている。本研究では、名古屋大の直線型ダイバータプラズマ模擬装置NAGDIS-II等を用いた実験研究とシミュレーションとの系統的な比較研究によりダイバータデタッチメントシミュレーションを高度化し、予測性能を有するシミュレーションコードとして完成することを目的としている。シミュレーションでは、慶應義塾大学で開発された2次元流体コードLINDAコードに、信州大、NIFSで開発された電離・放射・再結合過程に関する高精度なシミュレーションコードを組み込んでいる。ヘリウムプラズマでのデタッチメント実験結果とシミュレーション結果を詳細に比較することにより、デタッチメント形成時の粒子・エネルギー輸送過程を明らかにする。さらに実験においては、高密度重水素プラズマ中でのデタッチメント形成を行い、中性原子温度が電子-イオン体積再結

合過程によるプラズマ粒子損失に与える影響、原子・分子イオン種効果及び水素分子の振動励起・回転励起温度が分子活性化体積再結合過程に与える影響を定量的に評価する。

材料・機器開発については、W合金開発、W材料の照射データベース構築、そしてダイバータ機器保全に関する共同研究が進められている。

NIFS共同研究で進めている「耐照射性および再結晶遅延性能の向上のためのタングステン合金の開発」(★3 代表：東北大・長谷川)では、Wをプラズマ対向材料として用いる際の課題である、低温脆性(室温以上で生じる脆性)、再結晶脆化(再結晶により脆性温度域が拡大)、中性子照射脆化(照射欠陥による脆化)の克服のため、異元素による合金化や、粒子やバブルの第二相分散を適用したW合金の開発を進めている。これまでに、合金元素としてレニウムを、第二相分散手法としてカリウムバブルの分散(Kドープ)やランタン酸化物粒子の分散をそれぞれ適用することで、低温脆性や再結晶の抑制と優れた耐照射性を実証してきたが、照射量が高くなるとレニウムに起因する脆化が生ずる。これは、レニウムは固溶限以下の濃度であってもW中で照射誘起の偏析や析出により硬く脆い金属間化合物が形成するためである。本研究では、Wと全率固溶し照射誘起析出の懸念が小さいタンタルによる合金化に着目し、タンタル添加とともにKドープやランタン酸化物粒子分散を同時に適用した、機械特性、耐照射性および再結晶遅延性能に優れたW合金を開発する。

また、QST共同研究で進められている「ダイバータへの適用をめざすタングステン材料の照射データベースの構築」(★3 代表：東北大・長谷川)では、

ダイバータの概念設計において、中性子照射下における材料の変質を精度よく予測するため、これまでに得られている様々な照射場におけるWの照射データを、材料製造と開発の観点から詳細に分析・再点検し、2025年頃に予定される中間チェックアンドレビューの際に提供可能なW材料と照射挙動のデータベースを構築し、運転温度や非定常熱負荷の許容温度決定に寄与することを目指している。

ダイバータ機器の保全において特に必要性が高い具体的な技術として、ダイバータの耐熱性・除熱性に大きな影響を与える冷却管の接合界面の健全性評価技術がある。NIFS共同研究で進めている「高周波超音波によるダイバータ冷却管接合界面の伝熱特性評価」(★4 代表：東北大・遊佐)では、数10MHz程度の超音波を用いることにより、厚さ1mm以下の薄い材料下の接合界面の熱的な接触状態を評価し得るとの知見に基づき、高周波超音波を用いたダイバータ冷却管接合界面の伝熱特性の非破壊的評価技術を開発している。実機当該部を模擬した接合試験体の界面に熱輸送を阻害するような欠陥を導入し、実機水冷管内面からの検査を想定した高周波超音波測定により、接合界面の機械的接触状態を2次元画像化する。併せてサーモグラフィにより接合界面の熱的な接触状態を2次元画像化し、両画像の相関の度合いを定量的に評価するとともに、試験体の接合界面を観察することにより、得られた結果の妥当性及び物理的根拠を確認する。最終的に、数値解析による実対象検査用の超音波プローブの概念設計及び期待される性能の定量化を行う。

[1] K. Ibano et al, 2019 Nucl. Fusion **59** 076001

表1. 2020年現在の原型炉開発に向けたアクションプラン(3. ダイバータ)より

開発項目	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	★1 タングステン水冷却ダイバータ機器の原型炉適用性の判断		ダイバータシステムの工学設計
	先進ダイバータの評価と開発推進の判断		
	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		
	中性子照射材料・機器の熱負荷特性データ取得		
(3-2) プラズマ運 転シナリオ	★2 ダイバータシミュレーション開発		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
		統合コードによるプラズマ運転シナリオ提示	
	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		
	デタッチメントプラズマの実時間制御法の開発		
		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	
		ITER/JT-60SAにおけるダイバータシステムの最適化	
(3-3) 材料・機器開発	★3 ダイバータ機器構成材料の中性子照射影響		
	★4 ダイバータ機器の保全や補修技術の評価と開発		
(3-4) 粒子制御	炉内粒子挙動シミュレーションコード		
		実機環境におけるトリチウム挙動シミュレーション	
	原型炉で使用可能な排気システムの検討		