



Title	トカマク型核融合炉におけるディスラプション及びELMによるタングステンダイバータの表面変動挙動特性の予測
Author(s)	浜口, 康平
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/89480">https://doi.org/10.18910/89480</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 浜 口 康 平 )	
論文題名	トカマク型核融合炉におけるディスラプション及びELMによるタングステンダイバータの表面変動挙動特性の予測
論文内容の要旨	
<p>ダイバータは磁場閉じ込め方式の核融合炉におけるプラズマ対向機器の一つであり、プラズマの純度維持や不純物除去の役割を持つ。プラズマは定常で安定を維持し続けることが難しく、一つに間欠的にディスラプション（崩壊）を起こす。また、トカマク型核融合炉の実験炉である国際熱核融合実験炉（ITER）での標準運転モードであるHモード（プラズマの閉じ込め状態を指す）では、周辺輸送障壁で発生する間欠的・周期的な熱や粒子の放出現象であるELMが発生する。これらディスラプションやELMが生じた際、ダイバータは非常に強い熱負荷にさらされる。この熱負荷からダイバータを守るために、計画当初はダイバータの表層に炭素系材料を用いることが検討されてきたが、コストの面からタングステンに変更された。タングステンは金属中で最も融点の高い材料であるが、それでもディスラプションやELMでの間欠的・周期的な高熱負荷により溶融・凝固を繰り返すことがこれまでの基礎実験により明らかにされてきた。加えて、溶融に至らなくても繰り返しの高熱負荷によってタングステン表面の粗面化や熱疲労による亀裂が発生することで、熱への耐性が低下し、ダイバータの破損につながる。そのため、高熱負荷を受けた時のタングステンの挙動を詳細に把握することは、寿命評価や改善策の検討の上で重要な課題となっていた。これまで実験的研究によってパルス熱負荷後のタングステン表面形状の評価が実施され、溶融、凝固後は中心が盛り上がり周辺にクレータを持つような形状になることが確認されているが、その詳細なメカニズムを把握するには至っていない。それをするためには、溶融したタングステンがどのような挙動をしているかを評価する必要があるが、この間欠的・周期的な熱負荷はmsオーダーであり、溶融金属は不可視の流体であるため、実験のみでその詳細を評価するのは非常に困難である。そのため、シミュレーションによる評価手法の確立が望まれてきた。これまで、相変化を伴った固気液が混在する多相シミュレーション手法を開発してきたが、タングステンの状態方程式データベースが不足していた。一方で、温度変化を伴う溶融金属の挙動に支配的な現象として、表面張力の温度依存性に起因して起こるマランゴニ対流があることが既往研究で指摘されてきた。これを考慮するためには界面接線方向成分を考慮した表面張力モデルの構築が必要だった。そこで本研究では、新たな状態方程式の構築と表面張力モデルの改良を行い、温度変化を伴う溶融タングステン挙動を詳細に把握し、実験で確認された熱負荷後の特徴的な表面形状の形成メカニズムを解明することでダイバータの設計・改良に必要な知見を提供することを目的とした。</p> <p>第1章では、背景、目的及び論文構成について述べた。</p> <p>第2章では、シミュレーション手法について述べた。圧縮・非圧縮性流体を同時に解くことができるC-CUP法をベースとした解法、温度依存性を考慮した表面張力モデル、同時陰解法及びタングステンの状態方程式について示し、使用する2種類のシミュレーションモデル及び条件に付いて示した。</p> <p>第3章では、シミュレーション結果との比較のためのデータを取得することを目的に本研究で実施した高熱負荷源にレーザー照射を用いた実験体系について述べた。</p> <p>第4章では、本研究で使用するシミュレーション手法の機能検証（キャビティー流れ、自然対流問題における解析）と実験結果とのデータ比較から妥当性検証を行った。また、溶融タングステンの表面と平行に温度勾配を課した時の溶融層内の流速分布結果を既往研究と比較し、モデルの妥当性検証をした。</p> <p>第5章では、壁面からの一様加熱により生じる表面の温度勾配によるマランゴニ対流の発達過程や表面流速の評価を行った。また、溶融タングステン層のサイズによる溶融層の内部対流及び表面流速に与える影響について述べ、溶融タングステんに核融合炉内で起こりうる高熱負荷を模した局所加熱シミュレーションについて示した。高熱負荷によって生じるタングステン表面挙動の評価、及び様々な熱負荷条件に対する表面挙動特性を評価した。</p> <p>第6章では、本研究で得られた結論について述べた。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 浜 口 康 平 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	准教授	帆足 英二
	副 査	教授	村田 勲
	副 査	教授	重森 啓介
	副 査	教授	上田 良夫

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、次世代原子力エネルギーであるトカマク型核融合炉の開発において重要となるプラズマ対向機器の一つであるダイバータの開発に資することを目的に、ダイバータの表層材料であるタングステンを対象として高熱負荷を受けるタングステンの挙動を評価するコードを構築、コードの妥当性を検証した上で、熔融タングステンの熱負荷時の挙動を評価することでタングステン熱負荷実験において確認された熱負荷後の特徴的な表面形状の形成メカニズムを明らかにするものである。本論文は6章で構成されている。

1章では、まず国際核融合実験炉であるITERとプラズマ対向機器の一つであるダイバータの概要を述べている。ダイバータは定常熱負荷に加え、プラズマディスラプションおよびELMからの粒子放出により間欠的に非定常なパルス熱負荷を受ける。既往研究においてタングステンはこれらの熱負荷により熔融、凝固の際に特徴的な形状になることが示されており、この表面変形が熱耐性を低下させ、ダイバータ寿命を短くすることが指摘されている。これを回避するためには熔融状態での挙動の解明が重要であることを述べ、熔融タングステンの挙動に寄与する一つの現象としてマランゴニ対流を挙げている。マランゴニ対流に関する研究について述べた後、表面形状変化のメカニズム解明は実験的な研究だけでは難しく、シミュレーションによる研究の重要性について論じている。

2章では、シミュレーション手法の詳細を述べている。まずベースとなるCIP法、それを用いたC-CUP法について触れ、支配方程式である連続の式、運動方程式、エネルギー方程式、状態方程式(EOS)を示している。高熱負荷を受ける物質は相変化を起こすため、その評価にはEOSが必要不可欠である。また、先に挙げたマランゴニ対流は表面張力の温度差に起因する表面力であり、それを考慮するための表面張力モデルについて説明し、本研究で開発した接線力の計算アルゴリズムについて解説している。計算安定化のために導入した同時陰解法、新たにタングステン向けに導入した状態方程式GRAY EOSの概略、パルス熱負荷モデルを示した後、シミュレーション体系や計算条件を示している。

3章では、コードの妥当性検証のために実施した実験体系について触れている。実験は短パルス熱負荷（ナノ秒オーダー）と超パルス熱負荷（ミリ秒オーダー）で実施しており、それぞれの体系、実験条件について示している。

4章では、まず基本機能の検証としてキャビティ内の強制対流と自然対流問題を扱い、既往研究と同様の結果が得られることを確認している。その後、短パルス熱負荷を対象として、従来のEOSを用いたアルミニウムとニッケルの挙動を評価し、3章の装置を用いた実験とよい一致を示すことを確認している。これにより、EOSを適切に整備すれば開発したコードは様々な物質の挙動を評価できることを示している。次に、GRAY EOSを用いた熔融タングステンを対象に、更に導入した表面張力モデルによりマランゴニ対流を再現できることを単純な一様加熱壁モデルにより確認、マランゴニ数を合わせた既往研究との比較を行い、導入したこれらのモデルが適切に機能していることを示している。また、熱負荷時の表面温度の上昇率がタングステンの熱負荷実験の結果とよく一致し、コードの妥当性を実証している。

5章では、まず溶融タングステン一様加熱シミュレーションにおいて、溶融層のアスペクト比と内部対流の関係について論じている。これは、実際に熱負荷を受けて形成されるタングステンの溶融層のサイズによって対流にどのような影響があるかを明らかにすることで、表面変形に影響の大きい溶融層サイズについて考察している。具体的には、アスペクト比が2だと内部に単一渦、3以上だと双子渦が形成され、その渦がタングステン表面の変動を引き起こすことを明らかにしており、アスペクト比が大きくなると渦は壁面近傍に寄ることで大きな表面変動の起点になりうることを明らかにしている。次に、実験と同様の体系・サイズにて溶融タングステン局所加熱シミュレーションを実施し、溶融タングステンの表面挙動について議論をしている。局所加熱では、一様加熱とは異なり、周辺から最も温度の高い中心方向に向かう流れがあることを示し、その表面変動周期は正弦波でよく近似できることを明らかにしている。加えて局所加熱シミュレーションでは熱負荷の強度とパルス幅をパラメータとして変化させることで表面最大温度と表面最大変動幅の強度とパルス幅への依存性を評価し、強度に対しては線形に、パルス幅に対しては飽和する挙動になることを明らかにしている。さらに、表面の接線方向速度と温度勾配の関係を明らかにすることで、実機体系において想定される温度勾配において溶融タングステンは100mm/s以上の速度を持つことを予測している。このことは、実機体系では対流がより大きくなり、表面変動もより大きくなることを示唆するものである。さらにここでは、熱負荷のパルス形状に対する表面温度への影響も評価している。その中で、初期に強く、徐々に負荷が減少するような形状や低い熱負荷が長く続くような形状で表面温度の上昇を抑制できることを示しており、非定常な熱負荷をトラップ等で制御することで溶融を抑制できる可能性を見出している。

6章では、研究成果を総括し、実機設計への展開について述べている。実機では溶融層のアスペクト比が大きくなることが予想されることから、本研究で示したように双子渦の影響を受けることを示唆している。また、表面速度が100mm/s以上となることが予測されることから、表面変動は数100 $\mu$ m以上に及ぶことも明らかにしている。加えて、プラズマディスラプションやELMにおける熱負荷のパルス形状の制御に対する提言を行っている。

以上のように、本論文はこれまでなされていなかった溶融タングステンの様々な熱負荷条件と溶融層サイズによる内部対流と表面変動の相関を解明しており、これまで実験的に明らかにできなかった現象を捉えることで実機での事象に対する提言を行っている。これらの本論文の成果は、ダイバータ実機における冷却構造の設計やプラズマからの熱負荷制御機構の考案に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。