

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	権 暁星 (クオン ヒョセオン)
論文題目	Study on the Transport of High Heat Flux and the Thermal Mechanical Response in Fusion Reactor Divertor (核融合炉ダイバータにおける高熱流束輸送と熱構造応答特性の研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は核融合炉のダイバータにおける高熱流束の輸送現象とその熱機械的特性を、有限要素法モデルを用いた計算と模擬的な条件での実験により検討し、ダイバータの工学的限界を決定する要因を考察するとともに、核融合炉において高熱流粒子束を受けてそれを利用可能な熱エネルギーに変換するダイバータの概念を提示して、その成立可能性を論じたものであり、5章よりなる。 第1章は序論で、まず核融合炉工学の世界の研究開発の状況、特にプラズマからの熱流束を受容するダイバータにおけるエネルギー収支を国際熱核融合実験炉ITERのダイバータ形式である、タングステンのヒートシンク中に水冷配管を配したいわゆるモノブロック構造を例に分析している。すなわち、大きな熱流束を冷却する能力を沸騰尤度の大きな水によって得ており、これを熱利用可能な高温媒体で取り出す必要のある原型炉などに展開可能な技術ではなく、一方、高温化を指向した場合は冷却能力の限界とダイバータを構成する材料の使用温度、および高熱流束の輸送に伴う温度差で生じる応力によって、設計可能な領域が極めて限定されるという問題を指摘して、この高熱流束輸送問題の解明とダイバータの設計方法論の検討を本研究の目的として設定している。本研究はこの問題に対し、定常高熱流束の受容、熱エネルギーの利用のための移送経路の設計、および非定常熱負荷による負荷と影響の分析を特に解決すべき課題として摘出し、有限要素法による解析と、レーザーによる高熱流束負荷実験による影響評価を組み合わせ高効率なダイバータの設計方法論を構築することを意図している。 第2章では、ITERのタングステンモノブロックの定常熱負荷を解析し、その効果を実験的に検証してその比較を論じている。ITERでは通常時の性能が確認された10MW/m²に加えて、過渡的に20MW/m²が繰り返して局部的に与えられることが想定されており、表面は再結晶温度を超えると同時に、応力解析により冷却管部分に塑性変形を生じる応力が発生することを見出した。電子ビームによる実験では、170回の繰り返し負荷によりタングステン表面に亀裂の発生と冷却管の変形を確認したが、冷却性能は損なわれないことを示した。この結果より、ITER用タングステンモノブロックの性能を検証する一方、モノブロックダイバータにおける損傷のメカニズムを明らかにし、原型炉に向けたダイバータの課題として特に温度差と片側加熱による熱応力発生が問題であり、ターゲット構造における応力の緩和と、熱流束の分散を行うヒートシンク構造の改良が必要であることを指摘している。 第3章では、この問題の解決に向けて、2つの方法を提案し、その有効性を検証している。まず、ダイバータターゲットにおける熱応力の問題に関しては、熱流束の移送経路に沿って熱伝導度を向上するとともに、肉厚を減少して応力を減少することを検討し、そのための材料として高熱伝導度を持つ繊維材料を耐熱材料と複合することを提案している。具体的にはSiCセラミックに炭素繊維を熱流束方向に配向した複合材を開発してその合成熱伝導度を評価した結果、繊維方向に異方的にタングステンの2倍に相当する400W/mKレベルが得られること、熱伝導度が繊維方			

向によって大きく異なることを明らかにしている。繊維断面の形状、複合材中での分散の影響、パルス熱負荷に対する応答についても調べ、この複合材の非定常の熱伝導特性には、異種材料間での熱流束の移行が影響することを見出した。熱伝導度測定に一般的に使用されるレーザーフラッシュ法では、この過渡応答のために、温度上昇幅の $1/2$ に達するまでの時間を使用する従来法が適用できないことを示し、その問題を解決する新たな解析法を導いて、複合材などの不均一材料中の熱伝導度測定法を提案している。

一方ダイバータにおいて熱流束を冷却媒体に均一化して移送する効果を持つヒートシンクについては、液体金属の蒸発による熱サイフォン構造を提案し、その設計パラメータを検討して、流路断面積と蒸気圧、蒸気温度および壁面の面積で制限される熱移送特性から、従来の水やヘリウム冷却に比べて著しく大きな熱流束を、より小さな温度差で輸送できることを示している。また高温の熱媒体を取り出せることから、核融合炉全体のエネルギー利用率が大きく向上することを述べている。

第4章では、トカマク核融合装置で発生し、ダイバータの損傷要因として最近大きな問題となっているパルス状プラズマ揺動 **Edge Localized Mode (ELM)** の影響を温度と熱応力の観点で有限要素法により評価している。この熱負荷はミリ秒程度のパルスであり、ダイバータの受ける平均熱流束にほとんど影響しない大きさでも、タングステンの融解、再結晶により損傷しうること、その影響が単パルスのエネルギーに依存することを明らかにしている。また、タングステン再結晶温度以下でも、熱応力が材料の損傷を発生すること、その場合でもき裂が進展しないことを解析により示している。さらにこの条件を模擬したパルス熱負荷をレーザーで与えた実験により、解析で想定されたき裂、塑性変形の発生を確認している。また繰り返しパルスにより損傷が増加することを示し、これまで十分認識されていなかった非定常熱負荷の影響がダイバータの寿命と信頼性の評価において重要であることを指摘している。

第5章はまとめと結論であり、ダイバータの設計においては本研究で明らかにされた高熱流束の受容とその熱媒体までの輸送の全過程の整合が重要であることを、解析と実験の結果を総合して主張している。従来のダイバータ研究では、プラズマからの入熱に対するタングステンの損傷や耐久性、あるいは冷却性能の観点での検討は多いものの、高熱流束の輸送に伴う不均一な温度分布や大きな温度差が熱応力の問題を発生し、さらに利用の困難な比較的低温の低い熱媒体しか得られない問題を指摘している。一方、熱流束を適切に設計することで一様かつ定常に高温の熱媒体を取り出すことができ、それが核融合炉全体のエネルギー変換効率の向上に寄与することにより性能上の制約を緩和し、設計可能なパラメータ領域が拡大され、自由度が得られることを示している。

以上の結果を通じ、本論文は核融合炉工学研究において最大の課題のひとつである、ダイバータの工学的な成立性の確保において重要な指針を与え、エネルギー変換装置としての構成に独創的な知見をもって解決法を示唆している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合炉におけるエネルギー変換工学、特にプラズマからの高エネルギー束を受容するダイバータに着目し、限界領域での熱機械的挙動を解析し、実験的にその影響を評価して、利用可能な高温媒体としてエネルギーを取り出すための概念を提案し、一連の熱輸送過程として考察した研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 国際熱核融合実験炉 ITER 用のタングステンモノブロックの定常熱負荷として定格の 2 倍の $20\text{MW}/\text{m}^2$ では表面と冷却管周辺に発生する熱応力によって、き裂と共に塑性変形、再結晶が生じることを解析により明らかにし、実験により確認して限界領域の挙動を示した。

(2) モノブロック方式では除熱のためにサブクール水冷却と大きな温度差を利用しており、熱利用のためには、高い熱伝導度による熱応力の緩和と、低温度差で熱流束の均一、安定な熱出力の取り出しのために、ヒートシンク構造の整合性ある高熱流束の輸送経路の構築が必要であることを指摘し、熱移行経路に沿ってターゲットとヒートシンクについて 2 つの独創的対応策を提案した。

(3) 高熱伝導繊維により熱流束方向に異方的に熱移送を行う複合材のモデルを構築して、その熱伝導特性を評価し、従来測定に用いられるレーザーフラッシュ法の解析が不均質材料には適用できない範囲を明らかにし、代替法を提案するとともに、過渡応答の重要性を指摘した。

(4) ヒートシンクとして媒体の相変化により熱輸送を行う概念の特性を評価し、熱利用可能なダイバータとして、熱流束と温度帯で規定される設計ウィンドウを求め、核融合炉のエネルギー利用効率が大幅に向上することを示した。

(5) 従来知られていなかった、短パルス熱負荷がダイバータ最表面の損傷を起こしうることを見出し、解析と実験でその機構を明らかにするとともに、許容されるパラメータ範囲を示した。

以上の結果から、ダイバータ装置の熱移送過程を明らかにし、その損傷機構から設計可能なパラメータ領域の設定方法を示して、熱利用を可能とするエネルギー変換装置としての工学的設計方法を提示し、核融合エネルギーの利用技術としての成立可能性を論じ、その実現のための戦略の足掛かりを築いた。

以上の成果はその方法論と知見を通じて核融合工学とエネルギー科学に大きく貢献するものであり、得られた結果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 26 年 8 月 22 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 平成 年 月 日以降