

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04235

研究課題名(和文) タングステン多価イオン可視禁制線のモデリングと核融合プラズマ計測への応用

研究課題名(英文) Modeling visible forbidden line emission of highly-charged tungsten ions and its application to fusion plasma measurements

研究代表者

加藤 太治 (KATO, DAIJI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：60370136

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：国際熱核融合実験炉(イーター)のプラズマ対向材料には高熱負荷への耐性に優れたタングステン材料が使用される。しかし、スパッタされたタングステン粒子の炉心プラズマへの蓄積によるプラズマの放射崩壊が懸念されており、磁場閉じ込めプラズマ中のタングステン輸送特性の理解が重要な課題となっている。我々は、大型磁場閉じ込めプラズマ装置では世界で初めて、近紫外～可視域の発光線を用いたタングステン多価イオン密度計測法を確立した。これにより、これまで軟X線領域で行われていた炉心プラズマのタングステン計測が、光ファイバーの使用により検出器の中性子遮蔽が不要になる長波長域においても可能になった。

研究成果の概要(英文)：Tungsten materials with excellent resistance to high heat load are used for plasma facing materials of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). However, there is a concern about radiation collapse of core plasmas due to accumulation of sputtered tungsten particles into the core plasmas. Thus, understanding of tungsten transport characteristics in magnetic-confinement plasmas is an important issue. For the first time in the world, we have established a method for measurements of highly-charged tungsten ions in magnetic-confinement fusion plasmas using emission lines in the near-ultraviolet-visible region. As a result, the tungsten measurement of the core plasma, which had been performed in the soft X-ray region up to now, became possible in the long-wavelength region where neutron shielding of detectors is not required by the use of optical fibers.

研究分野：プラズマ原子過程

キーワード：タングステン分光計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 国際熱核融合実験炉 (イーター) のダイバータ表面には、トリチウム滞留量が少なく、熱負荷に対してすぐれた性質 (高融点、高熱伝導度、低熱膨張率) をもつタングステン材料が使用される。ところが、イーターのプラズマ対向壁が受ける熱負荷はピーク時には 20 MW/m^2 にも達すると予測されており、タングステン材料表面が損傷する可能性が高い (核融合エネルギー国際会議、ロシア、2014年)。壁材料の損傷によりタングステンが不純物としてプラズマに放出され、炉心プラズマにタングステン多価イオンが蓄積した場合には、炉心プラズマの放射冷却を起し核融合反応効率が低下する。磁場閉じ込めプラズマ中のタングステン多価イオンの分布と輸送特性を解明することが、炉内でのタングステン材料使用と高性能核融合炉心プラズマの定常維持を両立させる方策の鍵となっている。世界の主要な磁場閉じ込めプラズマ実験装置 (日本 LHD JT60、英国 JET、米国 D -D、ドイツ ASDEX-U) では、様々なプラズマ条件でタングステン不純物イオンの発光スペクトルが計測され、その分布と輸送特性を理解し制御する方法の研究が行われている。

(2) これまで光学許容遷移による強い発光がみられる極端紫外 (EUV) での計測が主に行われてきたが、実際の核融合炉では中性子負荷が高いため、光ファイバーを用いたりリモート検出と高精度分光が容易な近紫外～可視域に現れる発光線の利用が望ましい。タングステン多価イオンの近紫外～可視発光線の探索が電子ビームイオントラップ (EBIT) 装置を用いて行われ、その結果 N 殻イオンの $4f^6$ 基底状態微細構造内の磁気双極子 (M1) 遷移による禁制線 (M1 線) が発見された (小松 他, 2011 年)。我々は、大型ヘリカル装置 (LHD) でも同 M1 線を同定し、近紫外～可視 M1 線を用いた磁場閉じ込めプラズマ中のタングステン分光研究が可能であることを初めて示した (加藤 他, 2013 年)。禁制線は発光スペクトルに孤立して現れるため、イオン価数を特定した計測が容易で、プラズマ中での電離 / 再結合および輸送の研究に利用できる。特に、30 価から低価数のタングステン多価イオン (電離エネルギー $< 1 \text{ keV}$) の価数選別は EUV 領域ではこれまで大変困難であったが、27 価イオンの M1 線の LHD プラズマ断面での発光強度分布が測定され、最新の電離 / 再結合速度係数データに基づいたモデルによって価数選別したタングステン多価イオン輸送特性の研究が可能となった (加藤 他, 2014 年)。

(3) このような近紫外～可視域の M1 線の利用によって、これまで不確定性の大きかった炉心プラズマに蓄積しているタングステン多価イオン密度の定量的な計測が初めて可能になると期待される。ところが、関連する原子過程データの正確な知見が不足してお

り、プラズマ中での多価イオン基底状態微細構造内の励起メカニズムも不明なため、近紫外～可視 M1 線の発光スペクトルの理論モデルが未開発で、核融合プラズマ研究への更なる応用を妨げていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、タングステン多価イオンの近紫外～可視 M1 線について、イオン衝突効果を正確に計算できる理論モデルを開発し、それに基づいて、ヘリカル磁場閉じ込めプラズマでのタングステン多価イオン分布・輸送特性、および蓄積密度を LHD での分光計測から明らかにすることである。さらに、将来の核融合生成 α 粒子計測や水素同位体効果の研究への応用を見込んで、近紫外～可視 M1 線の発光強度に現れる高エネルギーイオン衝突効果を定量的に検証する。

3. 研究の方法

本研究は、プラズマ中の原子過程に基づいた近紫外～可視 M1 線発光スペクトルの衝突・輻射モデルの開発、EBIT 装置を用いたタングステン多価イオン分光測定、および LHD におけるプラズマ分光実験から構成される。

(1) 近紫外～可視 M1 線発光スペクトルの衝突・輻射モデルの開発

隣り合う価数の電離 / 再結合、電子・イオン衝突励起 / 脱励起、光脱励起などの原子過程 (図 1) に基づいて、発光体 (タングステン多価イオン) の位置での背景プラズマの電子 / イオン温度・密度から M1 線発光スペクトルを計算するための衝突・輻射モデルを開発する。モデル構築に必要なタングステン多価イオンの原子過程データは、HULLAC (Hebrew University Lawrence Livermore Atomic Code) を用いた理論計算によって求める。EBIT 装置による発光線スペクトルの測定結果をベンチマークとしてモデルと原子過程データの検証を行う。

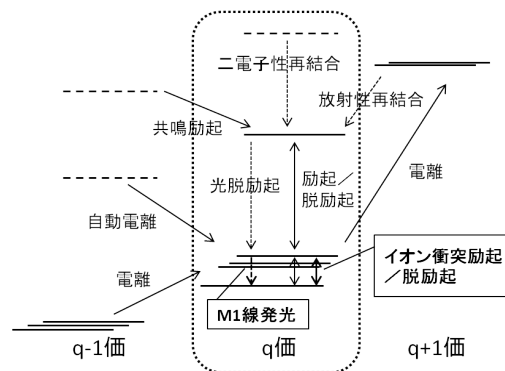


図 1 多価イオンの基底状態微細構造内遷移による M1 線発光の衝突・輻射モデル。

(2) EBIT 装置によるタングステン多価イオンの発光スペクトル測定

EBIT 装置は、ドリフトチューブの静電ポテンシャルに捕捉されたイオンを電子ビームで逐次電離し、価数選択的に多価イオンを生成・トラップして分光計測に供することができる装置である。電気通信大学と核融合科学研究所によって共同開発された低磁場(0.2 T)・低電子エネルギー(100 eV ~ 2 keV)の小型 EBIT (CoBIT) を用いて、装置内部で生成されたタングステン多価イオンからの近紫外～可視 M1 線波長を精密に測定し、理論計算と比較することによって M1 遷移の同定を行う。



図 2 CoBIT 装置の写真。

(3) LHD におけるプラズマ分光実験

LHD でのプラズマ分光実験は、既設の紫外～可視域分光システム、および固体ペレット入射装置を用いて行う。この分光システムでは、LHD の観測ポートに付設された光ファイバー列によって、ヘリカルプラズマの横長ポロイダル断面での発光強度分布が計測できる。タングステンはペレットに装填して圧搾ヘリウムガスにより水素プラズマに入射する。タングステンペレット入射前後の発

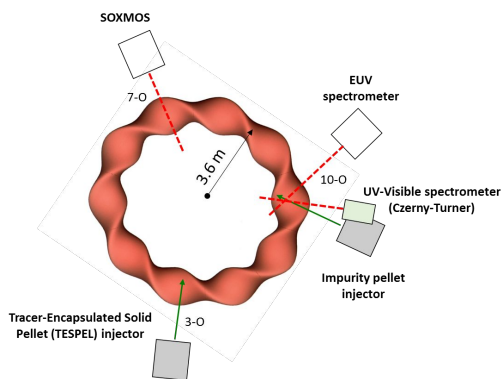


図 3 LHD の分光システムと固体ペレット入射システムの配置図。

光スペクトルを 100 ミリ秒間隔で連続的に分光測定し、ポロイダル断面での M1 線強度分布の時間発展を計測すると同時に、既設のトムソン散乱システムにより電子温度・密度のポロイダル断面径分布を計測する。ポロイダル断面での M1 線強度分布から発光体であるタングステン多価イオンの分布・輸送特性を研究する。また、平成 28 年度に開始される重水素プラズマ実験でも同様の測定を行い、M1 線発光過程における水素同位体効果の検証も行う。

4. 研究成果

本研究により、大型磁場閉じ込めプラズマ装置では世界で初めて、近紫外～可視 M1 線を用いたタングステン多価イオンの密度計測に成功した。この成果によって、これまで軟 X 線域で行われていた炉心プラズマのタングステン計測が、光ファイバーの使用により検出器の中性子遮蔽が不要になる長波長域でも実施できることが示された。核融合プラズマ計測技術における大変大きな進歩であり、国際熱核融合実験炉(イーター)でのタングステン計測への応用が考えられる。また、高エネルギーイオン衝突効果と禁制線強度の間の強い相関関係を明らかにできた。この成果はタングステン計測の高精度化に必要なばかりではなく、今後、新しい高エネルギー粒子計測法としての応用も考えられる。

(1) 高エネルギーイオン衝突効果を含めた衝突・輻射モデルの開発

本研究で対象としている、基底状態の重元素多価イオンからの M1 線発光スペクトルのモデリングに必要な、高エネルギーイオン衝突効果を取り入れた衝突・輻射モデルを開発した。衝突・輻射モデルとは、光学的に薄いプラズマ中の荷電粒子の衝突と発光過程の反応速度方程式に基づき、与えられたプラズマの温度・密度での平衡状態における多価イオンの励起状態の占有密度を与えるモデルである。タングステンのような重元素の多価イオンの励起状態は多数の近接したエネルギー準位(微細構造準位)をもち、高温プラズマ中の高エネルギー荷電粒子との相互作用によって微細構造準位間の占有密度分布に変化が生じ、結果として発光スペクトルのプロファイルが変化する。従来では、電子衝突のみ考慮される場合が多く、高エネルギーイオン衝突効果についての知見は限られていた。本研究では、電気四重極相互作用による高エネルギーイオン衝突効果を半古典的摂動理論に基づいて計算するプログラムコードを作成した。

本計算コードを用いて、1 keV のプラズマ中でのタングステン 27 価イオンの基底状態微細構造の上準位の占有密度を計算した結果、陽子との衝突効果によって占有密度が約 40 % も増加することが分かった。

(2) CoBIT 装置による可視域禁制線の同定

本研究により、これまで知られていなかったタングステン 12~14 価イオンの M1 線と考えられる近紫外~可視域の発光線が新たに多数同定された。これら低価数のイオンは 300 eV 程度のエネルギーで生成されるため、比較的低温の周辺プラズマでのタングステン計測に適している。また、タングステン 13 価イオンは基底状態の電子配置が $4f^{13}5s^2$ となることが理論的に予測されていたが、本研究によりこの電子配置が持つ微細構造準位間の M1 遷移による発光線が実験的に同定された。多配置ディラック・フォック法に基づく理論計算で得られた遷移波長(エネルギー)は約 1% の誤差で実験値と一致し、重元素多価イオン原子構造理論のベンチマークとなる成果が得られた。またより低価数の 7 価イオンの可視域禁制線の観測と波長測定も行われた。この遷移波長は極端紫外域の発光線スペクトルの分析から間接的に予測されていたが、初めて直接観測によって確認された。

(3) 可視禁制線を用いた LHD でのタングステン密度計測

LHD の放電開始後にタングステンペレット(直径 150 マイクロメートル、長さ 0.6 ミリメートルの固体タングステンをポリエチレン製チューブで覆ったもの)を入射し、入射前後の発光スペクトルを比較することによってタングステンの発光線を同定した。また、プラズマ断面での発光強度分布の形状から、高価数のタングステン多価イオンの M1 線を観測することに成功した。図 4 は、LHD で観測されたタングステン多価イオンの可

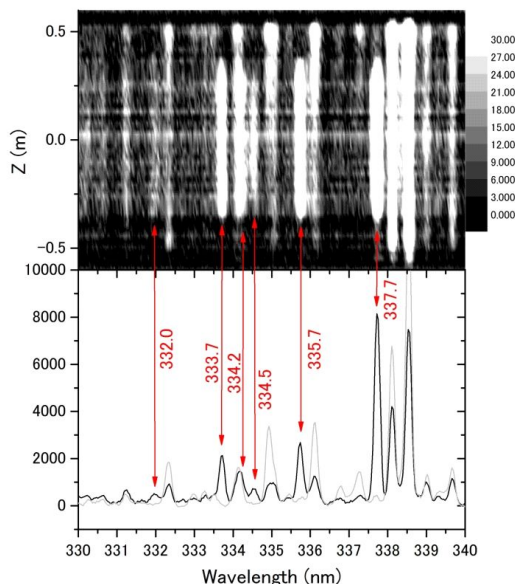


図 4 LHD 軽水素プラズマ実験で観測されたタングステン多価イオンの M1 線(赤矢印). 上図はプラズマ断面上の発光線強度の空間分布を表している.

視域禁制線の発光線スペクトルである。タングステンペレット入射直後だけに現れる発光線はいずれも高温のプラズマ中心部のみ強く光っており、タングステン多価イオンからの発光線であることを示している。

測定された M1 線発光強度と衝突・輻射モデルによる多価イオン 1 個当たりの発光強度の理論値から、光を放射しているタングステン多価イオン密度が求められる。発光線スペクトルデータと対応する電子温度プロファイルを同時に考慮することにより、推計統計学の方法を用いてそれぞれの発光線を放射しているタングステン多価イオンの価数が推定された。そのうちのいくつかは、電子ビームイオントラップで同定されている M1 線の価数と一致しており、更に、未知のタングステン多価イオンの発光線についても価数を推定することができた。このようにして推定された価数のイオン密度分布がピークとなる位置での電子温度を、電離平衡状態を仮定したいくつかの理論モデルと比較し、Pütterich のモデルと最も近いことが分かった。LHD プラズマ断面上の 27 価 / 26 価のタングステン多価イオン密度比も Pütterich の電離平衡モデルとよく一致することが分かった。同イオン密度比計測の基となる M1 線発光強度比は、プラズマ中の陽子との衝突効果によって有意な影響を受ける。陽子との衝突効果を考慮した M1 線発光強度比から得られるイオン密度比が、Pütterich の電離平衡モデルとより近く一致することが明らかになった。

本研究により、プラズマ断面上での M1 線発光強度の空間分布形状から推定されるタングステン多価イオン密度の空間分布形状がポロイダル非対称になることが示された。トカマク型装置ではポロイダル非対称性の報告例があるが、LHD のプラズマでタングステン多価イオン密度のポロイダル非対称性が観測されたのは初めてである。今後さらなる研究が注目される。

M1 線発光強度分布形状の時間分解測定から、LHD の中心プラズマでのタングステン密度分布形状の時間変化を明らかにした。ペレット入射後、300 ミリ秒程度でタングステンがプラズマ中心に蓄積し、その後周辺部へ拡散して密度が低下していくダイナミックな変化を観測することに成功した。さらに、タングステン密度分布の形状は各時間での電子温度分布の形状と強い相関があることを明らかにした。これはタングステン輸送モデルの研究において重要な発見であり、今後そのメカニズムの解明が求められる。

(4) LHD 重水素プラズマ実験での M1 線発光スペクトル測定

重水素プラズマにおけるタングステン多価イオンの可視域 M1 線を同定することができた。389.4 nm の波長をもつタングステン 26 価 ($4f^2$) イオンの M1 遷移による発光線

強度は、重水素プラズマ実験では軽水素プラズマ実験に比べて約 3 倍の強度が得られた。これはそれぞれの実験で入射ペレットに含まれるタングステン量の比(約 2 倍)よりも有意に大きな差である。水素イオン衝突効果を含めた衝突・輻射モデルにより、発光線強度の電子温度・密度依存性の計算を行った。その結果、発光領域での同 M1 線強度の電子温度・密度依存性は弱いことが分かった。したがって、この M1 線発光強度の増加は、中心プラズマでのタングステン蓄積量の増加に起因すると考えられる。このように、タングステン輸送における水素同位体効果の兆候を初めてとらえることができた。

<引用文献>

- 小松 他, Phys. Scr. T144, 014012, 2011 年
加藤 他, Phys. Scr. T156, 014081, 2013 年
加藤 他, 口頭発表 The 5th China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, 7/28-8/1, 2014 年, Lanzhou, China

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 19 件)

- X.-B. Ding, R. Sun, F. Koike, I. Murakami, D. Kato, H.A. Sakaue, N. Nakamura, C.-Z. Dong
“Energy levels, lifetimes and radiative data of W LV”, At. Data Nucl. Data Tables 119, 2018, 354-425, 査読有
DOI: 10.1016/j.adt.2017.02.002
X.-B. Ding, R. Sun, F. Koike, D. Kato, I. Murakami, H.A. Sakaue, C.-Z. Dong
“Correlation, Breit and Quantum Electrodynamics effects on energy level and transition properties of W⁵⁴⁺ ion”, Eur. Phys. J. D 71, 2017, 73_1-6, 査読有
DOI: 10.1140/epjd/e2017-70829-y
D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami, N. Nakamura
“Population trapping: The mechanism for the lost resonance lines in Pm-like ions”, Nucl. Instrum. Methods B 408, 2017, 16-20, 査読有
DOI: 10.1016/j.nimb.2017.05.029
M. Mita, H.A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, and N. Nakamura
“Direct Observation of the M1 Transition between the Ground Term Fine Structure Levels of W VIII”, Atoms 5, 2017, 13_1-5, 査読有
DOI: 10.3390/atoms5010013
X.-B. Ding, R. Sun, J.-X. Liu, F. Koike, I. Murakami, D. Kato, H.A. Sakaue, N. Nakamura, C.-Z. Dong

“E1, M1, E2 transition energies and probabilities of W⁵⁴⁺ ions”, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 50, 2017, 045004_1-9, 査読有

DOI: 10.1088/1361-6455/aa53ec

K. Fujii, D. Kato, N. Nakamura, M. Goto, S. Morita, M. Hasuo

“Experimental evaluation of fractional abundance data for W²³⁺ - W²⁸⁺”, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 50, 2017, 055004_1-11, 査読有

DOI: 10.1088/1361-6455/50/5/055004

X.-B. Ding, J.-X. Liu, F. Koike, I. Murakami, D. Kato, H.A. Sakaue, N. Nakamura, C.-Z. Dong

“Collisional-Radiative Model for the visible spectrum of W²⁶⁺ ions”, Phys. Lett. A 380, 2016, 874-877, 査読有

DOI: 10.1016/j.physleta.2015.12.034

Y. Kobayashi, K. Kubota, K. Omote, A. Komatsu, J. Sakoda, M. Minoshima, D. Kato, J. Li, H.A. Sakaue, I. Murakami, and N. Nakamura

“Extreme ultraviolet and visible spectroscopy of promethiumlike heavy ions”, Phys. Rev. A 92, 2015, 022510_1-9, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevA.92.022510

M. Shinohara, K. Fujii, D. Kato, N. Nakamura, M. Goto, S. Morita, M. Hasuo

“Visible emission spectroscopy of highly charged tungsten ions in the LHD I: Survey of New Visible Emission Lines”, Phys. Scr. 90, 2015, 125402_1-10, 査読有

DOI: 10.1088/0031-8949/90/12/125402

K. Fujii, Y. Takahashi, Y. Nakai, D. Kato, M. Goto, S. Morita, M. Hasuo

“Visible Emission Spectroscopy of Highly Charged Tungsten Ions in LHD II: Evaluation of Tungsten Ion Temperature”, Phys. Scr. 90, 2015, 125403_1-7, 査読有

DOI: 10.1088/0031-8949/90/12/125403

[学会発表](計 19 件)

D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami, M. Goto, T. Oishi, C. Suzuki, N. Tamura, S. Morita, N. Nakamura, K. Fujii

“Modeling of emission line spectra from tungsten highly charged ions and its applications to tungsten transport studies”, The 10th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing, 2017年12月4日~7日, 万国津梁館, 招待講演

D. Kato, K. Fujii, M. Goto, S. Morita, I. Murakami, N. Nakamura, T. Oishi, H.A. Sakaue

“Atomic processes and transport dynamics of tungsten highly charged ions in LHD plasmas elucidated by observing visible M1 Lines”, Plasma Conference 2017, 2017年11月20日～24日, 姫路商工会議所, 招待講演

D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami, M. Goto, T. Oishi, K. Fujii, N. Nakamura, S. Morita

“Observation of visible forbidden lines of tungsten highly charged ions in LHD core plasmas and its application to ion distribution analysis”, 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016年10月17日～22日, 国立京都国際会館, 京都

D. Kato, K. Fujii, M. Goto, I. Murakami, N. Nakamura, T. Oishi, H. A. Sakaue, N. Tamura, S. Morita

“ATOMIC DATA RESEARCH FOR VISIBLE M1 LINE EMISSION OF GROUND-STATE HIGHLY CHARGED TUNGSTEN IONS IN PLASMA”, 10th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, 2016年09月25日～29日, Gunsan Saemangeum Convention Center (GSCO), Gunsan, Republic of Korea, 招待講演

D. Kato and N. Nakamura

“Population trapping: the mechanism for the lost resonance lines in Pm-like ions”, 18th International Conference on Physics of Highly Charged Ions, 2016年09月11日～16日, the Jan Kochanowski University, Kielce, Poland, 招待講演

D. Kato

“Collisional-radiative models for ground-state M1 line emission of highly charged tungsten ions in the LHD”, 6th China-Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, 2016年07月26日～28日, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China

D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami

“Spectroscopic studies on tungsten highly charged ions in the LHD”, Physics at Electron Beam Ion Traps and Advanced Research Light Sources 2016, 2016年06月11日～13日, 復旦大学, 上海(中国), 招待講演

加藤太治, 坂上裕之, 村上泉, 後藤基志, 大石鉄太郎, 森田繁, 藤井恵介, 中村信行

“タングステン多価イオン可視禁制線の原子過程モデリング”, 第32回プラズマ・核融合学会年会, 2015年11月24日

～27日, 名古屋大学東山キャンパス
D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami, M. Goto, T. Oishi, S. Morita, K. Fujii, N. Nakamura, A. Sasaki, F. Koike, X.-B. Ding, and C.-Z. Dong

“Near UV-visible line emission of tungsten highly charged ions in fusion plasmas”, XXIX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 2015年07月22日～28日, トレド会議センター, トレド(スペイン)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

加藤 太治 (KATO, Daiji)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 60370136

(2)研究分担者

坂上 裕之 (SAKAUE, Hiroyuki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 40250112

中村 信行 (NAKAMURA, Nobuyuki)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号: 50361837

(3)連携研究者

村上 泉 (MURAKAMI, Izumi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 30290919

後藤 基志 (GOTO, Motoshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 00290916

森田 繁 (MORITA, Shigeru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 80174423

(4)研究協力者

丁 曉彬 (DING, Xiaobin)

西北師範大学(中国)・准教授