



## プロジェクトレビュー

# 国際エネルギー機関 (IEA) PWI 協定に拠る国際共同研究 国際共同研究の入口として、そしてその成果

## International Collaborative Research under the IEA PWI TCP

増崎 貴<sup>1,2)</sup>, 杉本有隆<sup>3)</sup>, 林 祐貴<sup>4)</sup>, 矢嶋美幸<sup>1,2)</sup>, 浜地志憲<sup>1,2)</sup>, 東郷 訓<sup>5)</sup>,  
大野哲靖<sup>6)</sup>, 田中宏彦<sup>6)</sup>, 吉川正志<sup>5)</sup>, 梶田 信<sup>4)</sup>, 河村学志<sup>3)</sup>, 庄司 主<sup>1,2)</sup>,  
宮本光貴<sup>7)</sup>, 坂本隆一<sup>1,2)</sup>, リ ハンテ<sup>8)</sup>

MASUZAKI Suguru<sup>1,2)</sup>, SUGIMOTO Yutaka<sup>3)</sup>, HAYASHI Yuki<sup>4)</sup>, YAJIMA Miyuki<sup>1,2)</sup>, HAMAJI Yukinori<sup>1,2)</sup>,  
TOGO Satoshi<sup>5)</sup>, OHNO Noriyasu<sup>6)</sup>, TANAKA Hirohiko<sup>6)</sup>, YOSIKAWA Masashi<sup>5)</sup>, KAJITA Shin<sup>4)</sup>,  
KAWAMURA Gakushi<sup>3)</sup>, SHOJI Mamoru<sup>1,2)</sup>, MIYAMOTO Mitsutaka<sup>7)</sup>, SAKAMOTO Ryuichi<sup>1,2)</sup> and LEE Heun Tae<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup>核融合科学研究所, <sup>2)</sup>総合研究大学院大学, <sup>3)</sup>量子科学技術研究開発機構, <sup>4)</sup>東京大学,

<sup>5)</sup>筑波大学, <sup>6)</sup>名古屋大学, <sup>7)</sup>島根大学, <sup>8)</sup>大阪大学

(原稿受付: 2024年11月22日)

国際エネルギー機関 (IEA) の技術協力プログラム (TCP) の一つであるプラズマ・壁相互作用 (PWI) TCP (以後 PWI 協定) は、日本、欧州、米国、豪州、英国が参加する多国間協定であり、日本では核融合科学研究所が執行機関となっている。PWI 協定に拠る国際共同研究は、プラズマ・壁相互作用に関係する、材料分析、周辺・ダイバータプラズマ物理、プラズマ計測などの国際共同研究で多くの成果を挙げている。またこれらの国際共同研究は、学生・若手研究者が国際共同研究へ参加する入口ともなってきた。そこで本稿では、PWI 協定の概要、同協定に拠る国際共同研究の成果を紹介するとともに、特に、学生や若手研究者が、どのように国際共同研究を始めて、どのように外国研究機関で研究を行ったか、彼の地に滞在中にどのような経験をしたのか、も紹介する。

Keywords:

Plasma-wall interactions, linear plasma devices, international collaboration, IEA, young scientists

### 1. はじめに

海外の研究機関で実施する国際共同研究は国内共同研究と同様に他の研究機関の研究者と協力して研究を進めるものであるが、国内共同研究とは違って、文化が異なる他の国に赴き、現地の研究者と深く交流する楽しさがある。

国際共同研究を実施するためには、その共同研究が拠って立つ取り決め、例えば研究機関間の協定あるいは合意などが必要な場合がある。本稿で紹介する国際エネルギー機関プラズマ・壁相互作用に関する技術協力プログラム (International Energy Agency Plasma-Wall Interaction Technology Collaboration Programme: IEA PWI TCP: 以後 PWI 協定とする) は多国間の協定であり、国際共同研究を実施する際に依拠できる。PWI 協定は、現在 36 ある IEA TCP の一つである [1]。因みに、核融合に関係する IEA TCP には PWI の他に、環境・安全・経済性、核融合炉材料、核融合技術、逆磁場ピンチ、球状トーラス、ステラレータ・ヘリオトロン、トカマクの各 TCP がある。

本稿執筆時現在で PWI 協定に参加しているのは、日本、欧州、米国、豪州、英国の五カ国・地域であり、日本の研究者がこれらの加盟国・地域の研究機関で PWI 関係の国

際共同研究を実施する根拠とすることができる。PWI 協定の日本の執行機関は核融合科学研究所である。核融合科学研究所はこれまで、PWI 協定およびその前身である TEXTOR 協定 (後述) に拠る国際共同研究のための海外渡航の支援を行ってきた。この支援を受けて、初めて国際共同研究を実施した研究者も数多くいる。

本稿では、PWI 協定に拠る国際共同研究の成果を紹介するとともに、この枠組みで国際共同研究の第一歩を踏み出した若手研究者の体験記を紹介する。特に学生や若手研究者が国際共同研究を始めるための参考になれば幸甚である。

次章では PWI 協定の概要を、やや堅めに紹介する。3 章では若手研究者の体験記を、4 章では PWI 協定に拠る国際共同研究の成果を示す。最後に 5 章で本稿をまとめる。次章以降の構成は次の通りである。

第 2 章 IEA PWI 協定の概要

第 3 章 若手研究者による国際共同研究体験記

第 4 章 PWI 協定に拠る国際共同研究の成果

第 5 章 まとめと今後の展望

## 2. IEA PWI協定の概要[2]

プラズマと、プラズマに面する壁との間の相互作用は、核融合炉におけるプラズマ対向壁の損傷や損耗などによる寿命や、燃料粒子の壁中の蓄積と放出などに関わり、核融合炉の実現にとって重要な研究である。そこで1970年代から、高温のトカマクプラズマを用いたPWI研究が計画された。このためのトカマク装置はドイツのユーリッヒ研究所 (Forschungszentrum Jülich) に建設され、TEXTOR (Tokamak Experiment for Technology Oriented Research) と名付けられた。同装置の主半径は1.75 m、小半径は0.5 m、磁場強度は2.6 Tであった。1977年にIEAのTEXTOR協定 (IEA Implementing Agreement for a Program of Research and Development on Plasma-Wall Interaction in TEXTOR) が発効した。日本は、EU、米国、スイス、カナダ、トルコに続いて1978年にTEXTOR協定に加入し、TEXTORの国際共同建設にも加わった[3]。核融合科学研究所設立後は、同研究所がTEXTOR協定の国内執行機関となり、宮原昭氏 (1989)、黒田勉氏 (1990-1997)、野田信明氏 (1998-2007)、中村幸男氏 (2008-2013) が同協定執行委員会副議長としてTEXTORにおける国際共同実験計画立案に参加するとともに、大学、日本原子力研究所 (現QST)、核融合科学研究所の研究者から成るTEXTOR国内技術委員会を主催して、日本からのTEXTOR実験への提案を議論、立案し、国内研究者の実験参加の調整を行った。TEXTOR協定に拠る国際共同研究では、排気装置を備えるトロイダルリミタ (ALT-II) 実験、ポロニゼーション・カーボニゼーションなどの壁コンディショニング実験、高

周波リミタ実験、動的エルゴディックダイバータ (DED) 実験、高Zリミタ実験など、先駆的な実験が精力的に行われた。核融合実験装置の多くが炭素をプラズマ対向材として用いた時代に、将来の核融合炉を見据えた高Z金属のリミタ実験を実施し、その後のトカマク装置における高Zプラズマ対向壁実験の指針を示したことは特筆されよう。

TEXTOR協定は1977年以来幾度か更新され継続されてきたが、執行委員会では、核融合原型炉に向けて更にPWI研究を推進するため、直線型プラズマ装置におけるダイバータプラズマ模擬実験、プラズマ・壁相互作用実験、そして周辺・ダイバータプラズマおよびPWIに関する計算機シミュレーション研究等を中心とした協定に切り替えることが議論された。2013年にTEXTOR実験が終了し、同装置がシャットダウンすることから、この年に行われたTEXTOR協定の更新は、近く同協定が、直線型プラズマ装置におけるPWI研究協力を柱とするPWI協定として新たなスタートを切ることが前提とされた。PWI協定の目的は、プラズマ・壁相互作用研究施設間の協力を強化することにより、プラズマ・壁相互作用研究の物理学と技術を発展させ、核融合炉のプラズマ対向壁材料とプラズマ対向機器に関連する研究開発の有効性と生産性を高め、核融合発電の開発を成功させるための科学的・技術的基盤を提供する、ことである。このために、PWI実験装置の開発、プラズマ対向壁材料の評価、周辺・ダイバータプラズマ物理、プラズマ計測、材料分析、PWIに関する理論・モデリングなどに関する情報交換や、研究者、技術者らの派遣などを行うこととしている。各国・地域においてPWI協定に参加しているPWI実験装置を表1に示す。これらの

表1 各国・地域においてPWI協定に参加しているPWI実験装置 (2024年度)。

装置名	設置機関	特徴
MAGPIE	Australian National University (豪)	高周波 (RF) プラズマ源, magnetic focus[4]
GAMMA 10/PDX	筑波大学	世界最大のミラー装置でのダイバータ研究, 強磁場下での高イオンエネルギーフラックス, コア-エッジカップリング[5]
Pilot GAMMA PDX-SC	筑波大学	超伝導コイルを用いた強磁場, 高密度プラズマ生成, 電子・イオン加熱[6]
MAP-II	筑波大学	表面近傍プラズマと材料の高度な診断法[7]
NAGDIS-II	名古屋大学	高密度でのダイバータ研究, 非接触プラズマ研究[8]
QUEST	九州大学	球状トカマク, 高温壁PWI研究[9]
TPDsheet-U	東海大学	シート形状プラズマ生成[10]
PSI-2	Forschungszentrum Jülich (独)	高度なターゲット交換・分析チャンバーとプラズマ・マテリアル・インターフェース (PMI) 診断装置[11]
JULE-PSI	Forschungszentrum Jülich (独)	ホットセル内に設置, 中性子照射ターゲット, 高度なターゲット交換・分析チャンバー[12]
Magnum-PSI	DIFFER (蘭)	高粒子束・高熱流束密度, 原型炉ダイバータ条件, 高度なターゲット分析・交換チャンバー[13]
Upgraded Pilot-PSI (UPP)	DIFFER (蘭)	高粒子束・高熱流束密度, その場イオンビーム分析[14]
GyM	Istituto per la Scienza e Tecnologia dei Plasmi (伊)	電子サイクロトロン共鳴によるプラズマ生成[15]
PISCES-RF	UCSD (米)	ヘリコン波によるプラズマ生成, 重イオンビーム照射[16]
TPE	Idaho National Laboratory (米)	トリチウムプラズマ, 中程度に中性子照射されたターゲット[17]
MPEX	ORNL (米)	高粒子束・高熱流束密度, 高周波加熱, 核融合炉のダイバータ条件, 中性子照射されたターゲット[18]

一部は、現在も開発中である。

日本からは2014年より、核融合研の増崎と時谷政行氏が同協定の執行委員会に参加している。本協定に拠る国際共同研究の一部については、TEXTOR協定と同様に核融合研が国内研究者の派遣を支援しており、派遣の調整は核融合研が主催するPWI協定国内技術委員会（2024年度から、核融合科学研究所教育改善室研究協力委員会連携研究専門部会（PWI））において行われている。本協定ではTEXTOR協定とは異なり、加盟国・地域の複数の研究機関への研究者の派遣や日本への招へいが行われ、PWIに関する幅広い国際共同研究を展開している。

### 3. 若手研究者による国際共同研究体験記

この章では、PWI協定に拠る国際共同研究を実施した、実施当時学生あるいは若手だった研究者（杉本、林、矢嶋、浜地、東郷）が、それぞれの体験を記述する。どのような経緯で国際共同研究が始まったのか、どのように準備をしたのか、どのように研究は実施されたのか、現地での生活はどのようであったか、などが語られる。

#### 3.1 UCSDでの国際共同研究（材料へのプラズマ照射）

杉本有隆（QST）

私は、現在、量子科学技術開発研究機構の六ヶ所研究所に博士研究員として勤務している。私が、PWI協定に拠る国際共同研究の公募に応募したのは、島根大学工学部の博士後期課程在学中だったので、特に博士後期課程の皆様の参考になれば幸いである。

当時私は、低放射フェライト鋼（F82H鋼）を核融合炉の第一壁材料として用いることについて研究していた。第一壁には、プラズマから飛来するトリチウムやヘリウムが蓄積する。トリチウムは放射性物質であるため、第一壁材料としての安全性を評価するためにはF82Hの水素同位体の保持特性を調べる必要があった。そこで私は、核融合炉環境に近い高粒子束の重水素（D）およびヘリウム（He）プラズマ生成が可能で、照射中の試料温度の制御が可能なプラズマ装置での実験を希望していた。Heプラズマを含める理由は、材料中に形成されるHeバブル等の微細組織が水素同位体の保持特性に影響を及ぼす可能性があるためである。私は、プラズマ照射装置としてUCSD（カルフォルニア大学サンディエゴ校）にあるPISCES（Plasma Interaction Surface Component Experimental Station）

が最適だと考えた。そこで指導教員の宮本光貴先生を通してUCSDの研究者にコンタクトを取り、実験計画を提案した。その結果、興味を持ってくれたUCSDの研究者たちとの協力関係を築くことに成功した。

私は核融合研が公募していたPWI協定に拠る共同研究の公募に応募した。PWI協定国内技術委員会で、自身の立てた研究計画を発表し、その内容が評価されれば採択される。当時の私（D1）は、核融合炉分野の偉い先生方の前で自身の研究計画を発表することに緊張したが（今でも緊張するが）、事前に発表準備や研究計画の内容の精査をしていたおかげで採択に至った。初めて自分で提案した研究計画が採択された経験は、この先の博士後期課程や研究者人生において私を支える自信の一つとなっている。

研究計画実施のため現地入りした私にとって、一番の問題は言語の壁だった。私は英語が得意ではなかったため、現地の研究者に呆れられないかと心配していた。しかし、彼ら彼女らは、こちらが伝えようとする意志があれば耳を傾け、質問をしてくれた。私の印象であるが、UCSDには英語が母国語ではない人も多くいるためか、細かい英語表現の間違いを気にする人は多くないように思った。それよりもとにかく自分が伝えたいことを言葉として表現することが重要だと思う。もしも会話に不安がある人は、あまり怖がらずに挑戦してもよいのではないと思う。

国際共同研究の魅力の一つは、特に博士後期課程の若手の人には、海外にしかない実験装置や研究環境を知ることができ、何よりも海外の研究者との交流ができることであろう。実際に彼らの普段の研究生活を見ることは、彼らの人となりやわかり、親近感がわき、より深い関係性を作ることができる。私が訪れた際には、特定化学物質であるベリリウムにプラズマ照射することができるPISCES-B（現在は解体済みのようで非常に残念）で楽しそうに研究している研究者たちの姿を見ることができた。私たち研究者は研究室に閉じこもりがちになるが、現地で実際に研究に取り組む研究者の様子を見ると、さらに研究に励もうという気持ちになる。

次に実施した研究について紹介する。図1はPISCES-Aと生成されたプラズマの写真である。PISCES-Aを使い、F82HにDプラズマ照射とD + He混合プラズマ照射を実施した。照射したF82H試料の最表面を透過型電子顕微鏡で撮影した写真を図2に示す。D照射では、目立った微細

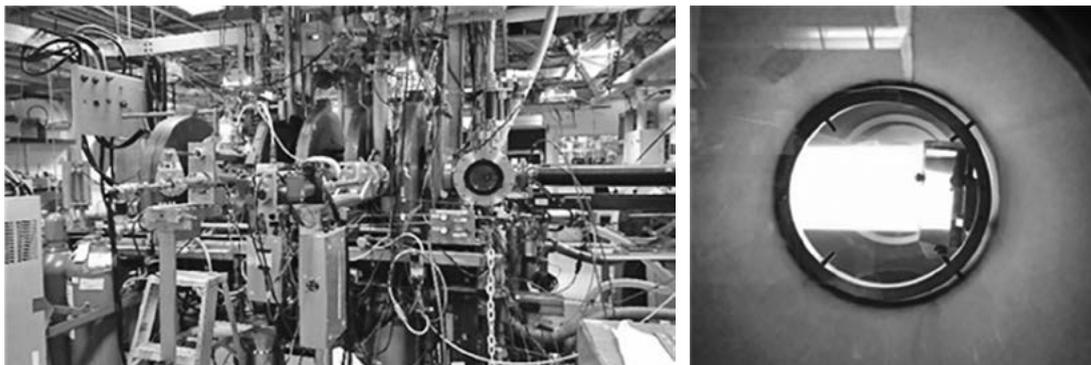


図1 (左) PISCES-Aの外観写真 (右) PISCES-Aのプラズマ。

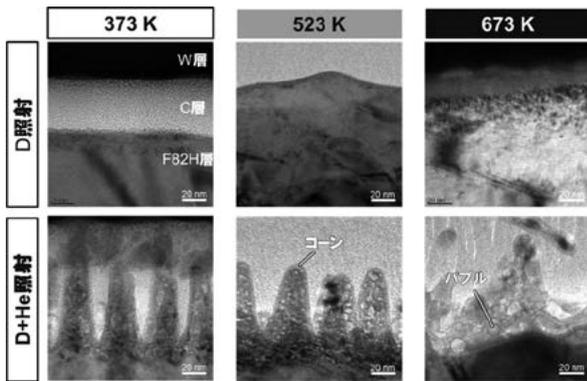


図2 照射温度373, 523, 673 Kで単独 D プラズマ照射および D+He プラズマ照射した F82H の最表面の TEM 写真。

組織の形成は見られないが、D + He照射した試料には、コーン組織とバブルの形成が見られる。このコーン組織やバブルはHeの影響によって形成されたと考えられる。また、照射温度が上昇するにつれてバブルが大きくなっていることがわかる。一方でF82Hの重水素ガス保持量を調べたところ、D + He照射した試料の方が重水素ガス保持量が少ない結果となった。これらの結果は既に学会では発表しているが、今後論文としてまとめる予定である。

最後に、研究とは別の楽しみを書こうと思う。共同研究実施中は、実験計画によっては一週間から1ヶ月と滞在する場合がある。私は3週間の滞在だったため、Airbnbを利用して、実際の家を借りた。そのため、実際に近い海外の暮らしや現地の人々との交流を経験することができた。サンディエゴの人たちはかなり気さくな人たちが多く、バスで隣になったら話しかけてくる人たちも多かった。今後海外で研究生活をめざしている人、海外に行ったことがない人には、おすすめだと思う。おかげで私はかなり海外への先入観が変わった。またサンディエゴでは、歴史的な航空母艦や公園など、見所がたくさんあった。私は休日を利用して、サンディエゴの港に停泊しているミッドウェイという航空母艦（博物館となっている）に行ってきた。空母内の見学では乗組員の生活などを見ることができ、また甲板にある戦闘機群はかなり見応えがあった。私が訪れた時には、アメリカ海軍の式典(?)があった。せっかくなので水兵さんに写真をお願いしたところ、快く了解していただき撮らせていただいた(図3)。他にもサンディエゴ



図3 サンディエゴでの休日。(左) ミッドウェイ航空母艦式典の水兵(右上) A-4 skyhawk(右下) スプリッケルズオルガンパビリオン。

にあるバルボアパーク内では、博物館、美術館、そして、日曜日には無料のパイプオルガンコンサートがあるので十分に楽しむことができた。こういったことも、長期滞在する共同研究での楽しみだと思う。サンディエゴでの共同研究は、研究だけでなく、文化を楽しむことができる貴重な経験であった。海外での生活や人々との交流を通して、自分の視野を広げることができたと思う。

私がこの国際共同研究を実施できたのは、いくつかの要因が重なった結果だった。まず、PWI協定に拠る国際共同研究の応募が、博士後期課程の学生でも挑戦可能であったこと、指導教員である宮本光貴先生のご指導やUCSDの研究者との縁があったこと、そして、「とりあえずやってみよう」という決意を固めたことが重要な要素だったと思う。不安なので完璧になってから行こう、と思う人がいると思うが、それだと一生進まないと思う。それよりも、この経験は自分にとって価値があるかを優先して動いた方がいいと思う(研究なので学術的価値等を考えることも必要であるが)。この記事が、研究者をめざす学生にとって、国際的に研究活動する手助けになれば嬉しく思う。

### 3.2 DIFFERでの国際共同研究(非接触プラズマ)

林 祐貴(東京大)

#### 3.2.1 共同研究のきっかけ

名古屋大学修士2年の年末、私は博士課程への進学を決め修士論文提出を控えていた。研究室では直線型プラズマ装置NAGDIS-IIのトムソン散乱計測の立ち上げを行っており、オランダDIFFER研究所からトムソン散乱計測に精通されているH. Meiden博士が来訪されていた。私は名古屋大学博士課程教育リーディングプログラムに参加していたが、本プログラムでは2ヶ月の海外研究インターシップが必修となっていた。トムソン散乱計測には関わっていなかったが、当時世界で最も高いイオン粒子束の定常プラズマを生成可能なPilot-PSIで実験できる好機と考え、指導教員に紹介していただく形で、H. Meiden博士に海外インターンの受け入れを持ちかけた。その後のDIFFER訪問時にわかったが、DIFFERはたくさんの留学生を受け入れており、私の2ヶ月の申し入れも快く受け入れてもらった。

#### 3.2.2 Pilot-PSIにおける静電プローブ計測

インターン受け入れの許可をいただいてから渡航までは3ヶ月ほどであった。その間、名大では多くの実績があるがDIFFERではあまり実施されていない静電プローブ計測を持ち込むため、急いで準備を行った。Pilot-PSIの図面を取り寄せ、フランジの取り合いや、取り付ける機器の周りとの干渉をメールで確認し、図面を描いた。技術補佐員の方のサポートを受けながら、なんとかモータ駆動のプローブ掃引システムを製作し、リーク試験も終え、出発日に間に合わせることができた。その頃のカレンダーを見返すと修論発表会や卒業旅行(北海道と台湾)があったようで、今考えるととても不安になるスケジュールである。プローブの駆動機構は分解しスーツケースに詰めたため、生活用品と合わせて2つのスーツケースを持って旅立った。

日本出発までは上記の通り慌ただしかったが、DIFFER

に着いてからも多難であった。到着1ヶ月後にマシンタイムをいただいたため、それまでに持ち込んだプローブを回路も含めて動く状態にする必要があった。Pilot-PSIは非常に優秀な装置でありたくさんの研究者・学生が使用するため、毎日のように実験スケジュールが組まれていた。そこで、照射試料交換や大気開放のタイミングなど、作業やプローブ試運転のために少しずつ時間をいただきながら準備を進めた。DIFFERの技術者からケーブルやADCを借りたが、そのための相談も苦労した。まず、相手はプローブ計測に馴染みがなかったため、プローブ回路を描き、なぜ絶縁アンプが必要なのか、なぜダブルプローブの電源は浮かせる必要があるか、などを説明した。この手順が全て英語であることも苦労する点であった。研究者にはありがちかもしれないが、英語で研究の話をしすぎて、日常単語より専門単語の方がすぐに口から出てくる状態である。このような準備期間、偶然フランスのCEAからプローブ計測を行っているK. Ješko氏(Ph.D.の学生)が来ており、準備を手伝ってくれた。当時のDIFFERは、プローブ計測という最も基礎的なプラズマ診断手法が珍しく、我々は「Probe guys」と呼ばれ、実験室を動き回っていた。彼の強い協力もあり、実験日までに計測系を準備することができた(図4)。しかし、どうしても解決できない問題が一点あった。プローブがモータ駆動であったため、強磁場環境下で動かなくなってしまうことであった。磁気シールドを作るにも間に合わないため、プローブが動く範囲まで磁場を落として実験を行った。駆動機構をモータにしてしまったことは反省点である。

実験は3日間であった。Pilot-PSIでは材料照射実験に比べると非接触プラズマに関する実験は少なかったようで、まずはプラズマの条件出しを行った。私がよく使っていたNAGDIS-IIとは異なり、Pilot-PSIには非接触プラズマを生成するためのターゲットガスを導入するポートがな

かった。そこで、ポンプの排気レートを下げてガス圧を増加させることで、非接触プラズマを作ることにした。排気レートを落とすと、ターゲットへの粒子束が減少するといった非接触プラズマの特性が得られた一方、排気レートを最大にしても電子温度は高々1 eV程度であり、ヘリウムプラズマでは常に体積再結合過程が支配的であった。Pilot-PSIのプラズマは、プラズマが再結合で消滅しつつも、高い密度によってターゲットへの粒子束は高いまま維持されるような特徴を持つプラズマであることがわかった。NAGDIS-II同様に5 eV程度の電離進行プラズマから1 eV以下の再結合プラズマの範囲でガス圧を制御できると考えていた私は、プラズマの性質の違いにどうすべきか悩んだ。データ無しで日本に帰ることはできないため、接触-非接触の遷移は諦め、非接触プラズマの度合いをガス圧で変化させるという認識で、再結合プラズマのみを対象として実験を行うこととした。この条件探しのために1日目を使い果たしてしまっていたが、そのおかげで、2日目以降はデータ取得に専念することができた。2日目にプローブ関連のデータを取り終え、3日目はプローブと比較するためのトムソン散乱計測を行った。再結合プラズマ中ではシングルプローブを用いて評価される電子温度の信頼性が低くなること(探針計測の異常性)が大型装置[19]や直線型装置[20-22]において観測されている。特に直線型装置では異常性の原因として電位揺動とプラズマ抵抗の増大が指摘されている[21]。これらの影響が抑えられるよう、本実験ではダブルプローブ計測も実施した。しかし、シングルプローブとダブルプローブから解析された電子温度はどちらもトムソン散乱計測と一致し、Pilot-PSIでは他の直線型装置で観測される異常性が現れなかった[23]。トムソン散乱計測を担当いただいたH. Meiden博士はプローブと一致したことを喜んでいて、こちらはトムソンと一致したことで安心しており、ここでも感覚が違うことを実感した。3日目の実験が終了したとき、「これで安心して日本に帰れるね」とK. Ješko氏がリュックからビールを取り出し一緒に飲んで帰ったことは今でもはっきり記憶している。

実験後は帰国まで3週間ほどあったが、ほとんどの時間を解析に充て、プローブも片付けた。向こうにとって珍しいプローブはそのまま残して欲しかったようだが、持って帰ることとした。本プローブは現在も名大のCo-NAGDISで活用されている。2ヶ月の渡航で得られたデータは帰国後も解析を続け、投稿論文としてまとめることができ[23]、博士論文の重要な1章分の成果になった。

### 3.2.3 海外での生活

研究所や宿泊施設は、今思えば幸いにも、日本人が一人もいない環境であった。研究所ではH. Meiden博士やプローブ計測の関係でK. Ješko氏と話すことが多かったが、ルームメイトも優しく、若手のメーリングリストに入れてもらい、マラソン大会や映画に誘ってもらったこともあった(映画は英語音声にオランダ語字幕だったため理解に苦しんだ)。オランダのみならず、他のヨーロッパの国やアジアからの訪問者も多く、会話の中で他国の習慣や思考と

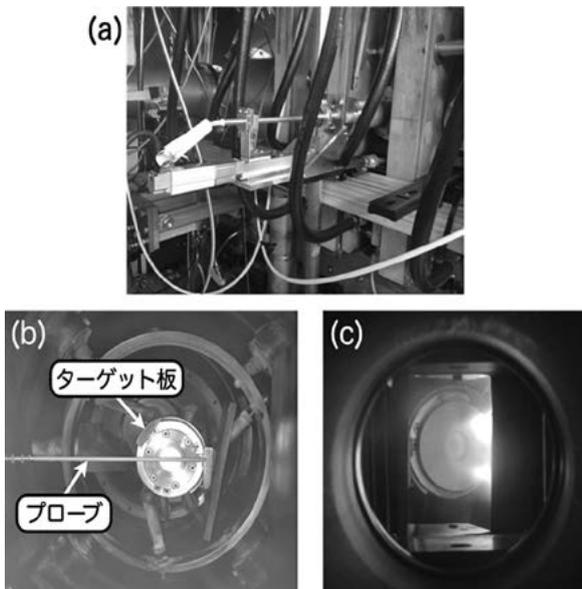


図4 (a) Pilot-PSIに取り付けたプローブ掃引機構, (b) 放電部から見たプローブと真空容器内部, (c) プラズマの写真.

いった生活の違いを直接体験するいい機会となった。滞在したのはユトレヒト市中心部のホテルであった。毎日のように人が入れ替わり、自分のように長期滞在の人は少なかったが、日々の簡単な英語会話を通してコミュニケーションを取ることができた。スタッフの方々とも仲良くなり、一人でホテルに泊まらず良かったと思った。こちらも様々な国から人が訪れていたが、その目的は勉強・仕事・旅行と多様で、研究所とはまた違った生活を送ることができた。

### 3.2.4 二回目の渡航

Pilot-PSIは同じくDIFFERの直線型装置Magnum-PSIのプロトタイプとして稼働していた。Magnum-PSIの立ち上げのため、Pilot-PSIは私の実験後すぐにシャットダウンとなり、研究所もNieuwegeinからEindhovenへ移動した。博士課程3年の秋、博士論文執筆開始直前ではあるがMagnum-PSIにおける実験のため再度DIFFERを訪問した。この実験でも同じくプローブを持ち込んだが、前回の反省からモータ駆動ではなく圧搾空気駆動を採用した。さらに、Magnum-PSIが有する超伝導コイルの狭いポートに設置可能なサイズとなるよう設計した。Pilot-PSIでの実験時は持参したプローブが取り付けられないと全てが終わり、という危険な道を行くが、今回は実験の2週間前にフランスのマルセイユで国際会議があり、その途中でDIFFERに立ち寄り現場の事前確認を行うなど、もう少し入念に準備を行った。

渡航期間は予算の都合上2週間であり、前半を準備、後半を実験および片付けとした。今回は日本から指導教員も訪問されたのだが、毎日夜遅くまで一緒に作業をしていただき、短い準備期間で急いで準備をした。その時に敷設したケーブルは今でも共同研究で役立っている。実験ではイオンセンシティブプローブを用いた高密度プラズマのイオン温度計測を実施した。高頻度の電子-イオンのクーロン衝突により、電子温度と同程度のイオン温度が得られた[24]。圧搾空気によるプローブ駆動機構はDIFFERに残

し、自分自身も含め日本の共同研究者、現地の研究者に引き続き活用していただいている(図5)。

### 3.2.5 まとめ

博士課程を修了し、社会人になってからもDIFFERとの共同研究は続いており、自分の重要な研究活動の一つになった。学生時代に知り合った海外の研究者は、社会人から関わり始めた方とはまた違う感覚があると感じている。

留学程度では人はそこまで成長できないという意見もある。しかし博士課程の若い時期に、目的を持って一人で海外へ行き研究をする経験は、自分の殻を破り大きな自信につながるはずである。海外での研究を検討している学生は怖がらずにぜひ挑戦をしてほしいと思う。

## 3.3 DIFFERでの国際共同研究(材料へのプラズマ照射)

矢嶋美幸(核融合研)

### 3.3.1 国際共同研究のきっかけ

私は大学院では、タングステン(W)の希ガスプラズマ照射による表面損傷およびトリチウム(T)を含むガス吸蔵特性に関する研究を行った[25, 26]。博士後期課程在学中、運良く日本学術振興会博士課程リーディングプログラム「フロンティア宇宙開拓リーダー養成プログラム」sRA枠に採用され、3ヶ月の海外渡航ができるチャンスに恵まれた。3ヶ月という短い期間で成果を出すため、訪問先、研究テーマ、渡航期間をよく検討する必要があり、当時指導教員であった名古屋大学の大野哲靖先生、梶田信先生(現東京大学所属)に相談にのっていただいた。訪問先の候補の一つがオランダのDIFFERであった。当時DIFFERでは定常・パルス複合照射装置Pilot-PSIが稼働しており、同装置を使用し、ヘリウムプラズマを予照射したW試料へのパルスの熱負荷印加実験を行うことを計画した。

### 3.3.2 渡航前の心配事

初めての長期海外出張で、一番の心配はお金の管理だった。現地での滞在先はDIFFERが管理していたゲストハウスだったが、滞在費は現金で支払う必要があった。数百ユーロという大金を持ち歩くのが嫌だったので色々調べた。当時シティバンク銀行では世界各国のATMで現金を引き出せるというサービスをしていたので、同銀行で口座を開いた。現在シティバンクは日本から撤退しているが、その事業は一部2015年から、SMBC信託銀行の「PRESTIA(プレスティア)」に引き継がれているようである。日本円を海外で両替するよりも得で、カード1枚あれば世界中で現金を引き出すことができる(現状は要確認)。

実験について心配な点は、当時のDIFFERには走査型電子顕微鏡が無く、表面状態を気軽に分析できないことであった。Pilot-PSIで照射した試料表面の観察は、日本に帰ってからしか行うことができなかったため、うまくパルス照射による照射損傷現象が現れるのか不安であった。対策として、Heプラズマ照射条件を変えた様々なW材料を用意し、さらに渡航を2回に分け、渡航1回目の実験結果を踏まえて渡航2回目のテーマを再検討することにした。

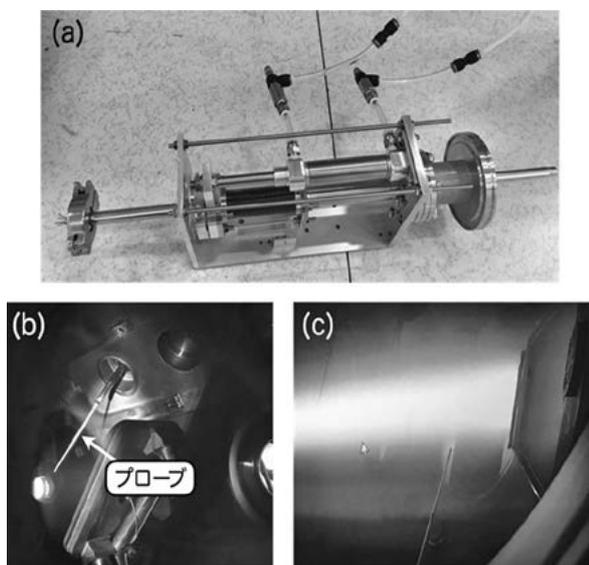


図5 (a) Magnum-PSIに取り付けたプローブ掃引機構, (b)真空容器内部の写真, (c)プラズマの写真。

### 3.3.3 現地での生活

1回目の渡航は2013年9月から約2か月、2回目は年が明けた2014年2月から1ヶ月であった。当時DIFFERはユトレヒト（『ミッフィー』作者出身地）の郊外にあった。オランダの緯度は北海道よりも高く、雨がとても多い印象である。渡航期間中は何度か、現地の気候に合わせて服を購入することになった。長期滞在する場合は、荷物は少ない目にして現地で調達する方が良いと思う。

DIFFERではGreg De Temmerman氏にお世話になった。初めての顔合わせの際に、今回の実験計画とこれまでの自分の研究を紹介することになった。当時自分が研究を進めていた、Heプラズマ照射によりW表面に形成されるフィラメント状のナノ構造（以下、ナノ構造が形成した試料を「ナノ構造W」と書く）の温度変化依存性[27]について発表したところ予想以上に興味を持ってもらい、後にGreg氏がITERに移られた後、参考文献に引用してもらったことで論文の知名度が上がったのか、ありがたいことに上記論文はTop 10%論文となった。初めて自分で考えて進めたテーマだったので、面白く思ってもらえて大変嬉しかった。国際学会では限られた時間しか研究のアピールタイムが無いので、今思うと大変貴重な時間であった。

DIFFERでは、週に1回のグループミーティングの他に、1日に2回のコーヒブレイクが10時と15時にあり、具体的な実験スケジュールや実験の打合せはコーヒブレイクの時間に行われていた。はじめはコーヒブレイクという習慣に馴染みが無かったので、「仕事の途中なのに休んでいいの？」と申し訳ないような、後ろめたい気持ちだったが、実際は気楽に意見交換ができる非常に素晴らしいシステムであった。技官と事前に実験内容についての詳細を話し合うことが出来たのもこのシステムのおかげだったと思う。具体的には、私の実験ではPilot-PSIで限界までパルス電圧をかけたかったので、他の実験スケジュールに影響が無いように日程の調整をしていただいた。また、装置に取り付けたい計測機器が複数あったので、その予約をお願いする等、色々と調整していただいた。事前に、希望する実験内容の詳細を文書で提出していたが、やはり現場の人と打ち合わせをしないとどこまでならいいのかということがわからなかったため、このコーヒブレイクに参加して良かったと思った。

また実験が始まってからも非常に参考になった点が多かった。特に興味深かったのは装置の情報をWikipediaで管理していたことである。Pilot-PSIのノウハウおよび情報がDIFFERで契約しているWikipedia上にアップロードされており、いつでも関係者が必要な情報を検索・修正できるようになっていた。具体的には、装置の運転マニュアルやメンテナンスマニュアル、装置を構成する各部品の図面や過去の実験履歴、装置改造履歴等が直ぐに検索できるようになっていた。当時私の実験を担当していただいた技官は、9月に大学院を卒業したばかりだったが、Wikipediaを上手く活用してスムーズに実験を進めてくれた。着任間もないメンバーでも、共有サーバやローカルのパソコン内などバラバラで保存されている情報を探すため

に時間を費やすことをしなくてもいいのはすごく良いシステムだと思った。また通常のWikipedia同様に文章内にリンクを張れるので、辞典のような使い方ができるのも大変魅力的だった。DIFFERが国内外からやってくる多くの共同研究者の実験に対応して成果を挙げているのも、このような丁寧な積み重ねによるものなのだろうと感じた。

### 3.3.4 実験結果について

先に述べたように、1回目の渡航ではまず様々なHeプラズマ照射済みW試料に定常・パルスプラズマ複合照射を実施することを予定していた。またその場計測用に高速カメラと分光カメラをセットして照射を行った。肉眼でも照射前後で変化が確認できることを期待しながら、Pilot-PSIの試料ホルダ（図6）[28]にナノ構造W試料をセットし、定常・パルスプラズマ複合照射を実施した。パルスプラズマ照射中、高速カメラの映像が映し出されたPC画面で試料表面を走る光の線が確認できた。逸る気持ちを押さえながらPilot-PSIの窓から試料を確認したところ、試料表面にアーク痕が形成されていた[28]（図7）。当時、ナノ構造W表面のアーク放電の着火についての研究が複数の研究機関で実施されていた。既にパルスプラズマガン[29, 30]やパルスレーザー[31, 32]によってアークが生じることは報告されていたが、直線型装置でのパルスプラズマ照射を用いた実験については報告されていなかった。世界で初めて、よりELMに近い環境でのアーク発生の瞬間に立ち会うことができたということで、非常に感動したことを覚

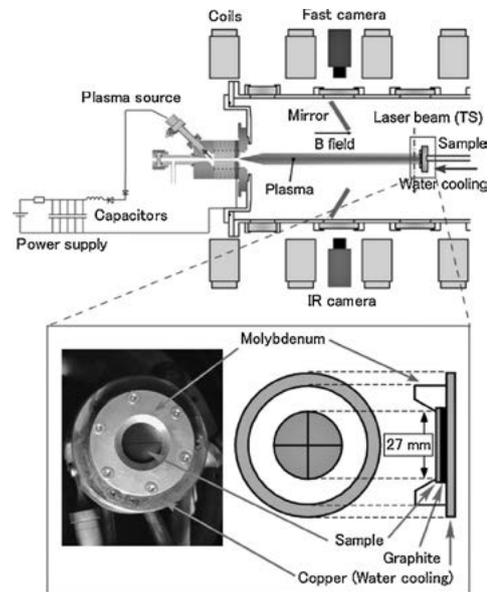


図6 Pilot-PSI装置概略図および試料ホルダー写真[27].

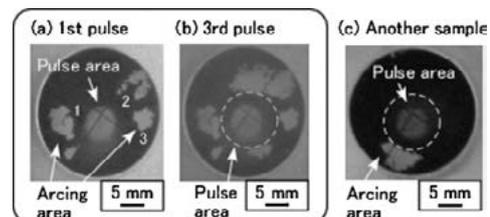


図7 パルスプラズマ照射後の照射面観察結果[27]. 中心の白い領域はパルスプラズマ照射領域。

えている。その後すぐに2度目のアーキングも確認することができたので、再現性があると判断し、その後の実験計画を定常・パルス複合照射によるアーク発生研究に切り替えて実験を進めた。

2回目の渡航では、試料の浮遊電位に依存してアークが発生することを観測した。また表面観察の結果、アークはパルスプラズマ柱の中心ではなく周辺で発生することがわかった。この結果はアークが熱流束とシースでの電位降下が十分に大きい位置で発生することを示唆した。3ヶ月間の渡航により得られた成果は、国際会議で発表するとともに国際共著論文として論文誌“Fusion Engineering and Design”に掲載された[28]。

そして核融合科学研究所に就職後、PWI協定に拠る国際共同研究公募に応募する機会を得た。アーク発生に伴うダスト放出について、十分に研究を進め切れていなかったため、この機会を利用して再びDIFFERに来訪し研究を進めた。その結果、アークによるダスト放出の様子を初めて確認することができた。得られた成果はPlasma and Fusion Research誌に発表した[33]。

### 3.3.5 まとめ

現在私は核融合科学研究所でイオンビーム解析装置や昇温脱離ガス分析装置を担当している。共同研究者を受け入れる際や装置の維持・管理をしている時など、DIFFERでの日々を思い出す。当時私の為にご尽力いただいた皆様に直接ご恩を返すことは難しいかもしれないが、得られた貴重な経験を次に繋げられるように引き続き精進したいと思う。

## 3.4 ユーリッヒ研究所での国際共同研究（材料へのプラズマ照射） 浜地志憲（核融合研）

本稿は核融合研からの派遣旅費支援を受け、2016年12月に一週間、ドイツのユーリッヒ総合研究機構（以下FZJ）に滞在し、直線型プラズマ装置PSI-2を用いたタングステンへのプラズマ照射を行った際の経験などについてまとめたものである。

### 3.4.1 PWI協定に拠る国際共研公募への応募の経緯

核融合研の、PWI協定に拠る国際共同研究公募に応募したのは2016年4月頃だった。当時の私は核融合研の2年契約のCOE研究員（いわゆるポスドク）の2年目で、なんとか常勤のポストを得ようと人事公募に申しこんで落ちたりしつつ、研究業績を作ろうと苦心していた頃だった。そんな中、長年ユーリッヒ研究所との共同研究を継続されていたとある先生に紹介されたのがPWI協定だった。最初は必ずしも乗り気ではなかったのが、考えてみると面白い研究ができそうであるし、業績を作ることができそうだと提案書を書いたのを覚えている。

### 3.4.2 研究テーマを探すポスドクの解決策としての派遣

2015年春に博士号を取得してポスドクとして核融合研で働き始めた私の仕事は、超高熱負荷試験装置ACT2の立ち上げとそれを用いた研究だった。ACT2は2014年に新しく設置された装置で、最大300 kWの電子銃を用いた、ダイバータ実規模試験体の熱負荷試験が可能で、当時は国際的にも貴重な装置（その後数年で海外にいくつも作られま

したが）で、2024年現在も複数の共同研究で実験研究が行われている。この素晴らしい装置の問題は、立ち上げにかなりの人的リソース（つまり私のマンパワー）が必要であったことと、その名の通り試験装置としての性格が強いため、ACT2単独での研究が難しい点であった。ダイバータやプラズマ対向機器それ自体や新規材料の研究開発を行う研究者にとっては有益なこの装置であるが、それらの分野についての専門性のない自分（博士論文は主に炭素堆積層の結晶構造と水素同位体蓄積を対象としていた）としては、「自分自身は何の研究をすれば良いのだろうか？」というのが大きな課題だった。このあたりは大型の実験設備に絡んでポスドクや研究員になった人には、ある程度の割合で起きる問題なのではないかと思う。そんな中で、ユーリッヒ研究所の直線型プラズマ装置PSI-2（図8）について調べて考えたのが、ACT2とPSI-2を組み合わせた研究だった。

### 3.4.3 研究テーマ：He照射誘起微細構造が短時間で変化するか？

本派遣を利用して私が行った研究は、簡単に言うと、He照射によって形成された表面微細構造や内部のHeバブルが、短時間のパルス熱負荷印加中に変化するか？というものだった。タングステンへのHe照射によって形成されるナノスケールのHeバブルは、Heが詰まったバブル表面のW原子が表面拡散することによって動くと考えられる。当時He照射によって形成されるこの類の構造について、実験的にはHe照射時の試料温度を変化させるなどの基礎研究が進められており、計算機分野では様々なモデル化研究や、スーパーコンピュータでのマイクロ秒スケールの第一原理計算が行われていた。実験研究で行われるHe照射は数百から数千秒のスケールで行われることが多いが、Heバブルなどがどの時間スケールで動くのかは難しい問題であった。（現在も難しいのではないかと思う）

ACT2では電子ビームを電磁コイルにより高速で位置制御することにより、ミリ秒オーダーの短時間、高温表面（1000℃程度）を作ることが可能である。これは短時間で表面に作られた高温部（深さ0.1 mmオーダー）が、熱負荷印加終了後に熱拡散によって急激に冷却されることによる。この時必要な熱負荷は数百MW/m<sup>2</sup>（本研究では約

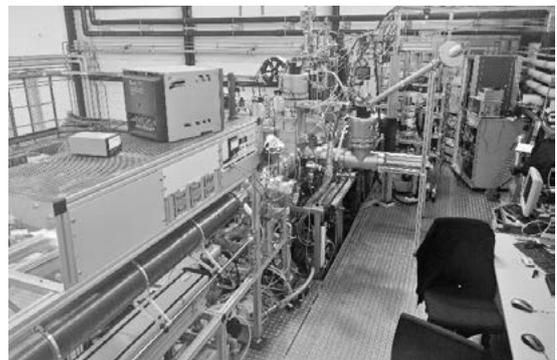


図8 PSI-2の装置写真、左手前に試料移送の長尺ベローズとその駆動部があり、ロードロックチャンバーから照射チャンバーへ移送が可能。

500 MW/m<sup>2</sup>, 0.5 ms) であり、これは核融合研究の文脈で言うと ELM (Edge Localized Mode) 規模の熱負荷だが、同時に第一原理計算と実験の間の空白となっている時間スケールでの挙動を調べるために適した条件でもある。

この研究テーマは、様々な研究テーマを検討しているいろいろな情報収集をしたり学生時代の学会等での発表などを思い出しながら考えていた沢山のテーマのうちの一つだったように思う。そういうテーマの大部分はそもそも間違っていたり諸々の事情でできなかつたりして捨てられるのだが、今回は PWI 協定での派遣が思いがけず実験機会を作ってくれたのだった。

#### 3.4.4 得られた結果の一例

図 9 にこの研究で得られた結果の一例を示す。これは、PSI-2 で He プラズマへのばく露を、温度 1050 K、フルエンス  $3 \times 10^{25}/\text{m}^2$ 、フラックス  $6.5 \times 10^{21}/\text{m}^2/\text{s}$  の条件で行ったタングステン試料の電子顕微鏡像である。プラズマばく露後、日本に持ち帰った試料に対して、ACT2 でピーク熱負荷約 500 MW/m<sup>2</sup>, 0.5 ミリ秒の熱パルスをも 10 回照射した。図 9 にはその前後の同一位置の像を示している。段差構造が、熱パルス後に多少“なまり”つつも、おおよその形状を変化させず維持している一方で、ホール (He バブルが表面に到達して He が抜けてできた構造だと思われる) の密度が上昇しているのが見て取れる。各図の右下に示した、まったく同じ位置をクローズアップしたものを見比べるとよりわかりやすいかと思う。ACT2 のビームは半値全幅約 11 mm のガウシアン分布に近いプロファイルを持っているが、このような特徴は中心から 0.8~1.5 mm 程度の領域で見られた。熱負荷実験側の精度に限界があるだが、電子ビームの照射中央から外に向かって連続的に特性が変わるなど、面白い点があったので、興味のある方は論文をご一読いただきたい [34]。このような実験は、試料照射のためのフルエンスが十分に稼げ、かつ水冷や加熱によって温度制御が可能な PSI-2 での実験でこそ可能な実験だった。PWI 協定の枠組みは、照射実験のための装置を持たないがプラズマ・材料相互作用を研究のバックグラウンドに持つ私のような研究者にとってありがたい枠組みだった。

#### 3.4.5 ユーリッヒ研究所で感じた日本との違い、装置運営体制

ユーリッヒ研究所での PSI-2 実験は、Arkadi Kreter 博士が受け入れ担当として種々の議論や準備をしてくれた。

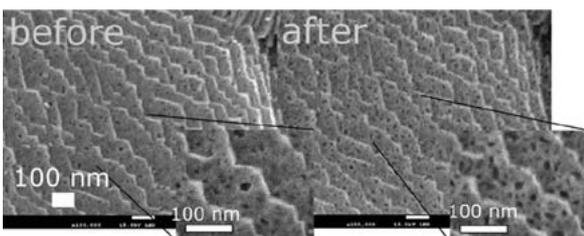


図 9 He 照射によってタングステン表面に形成された周期的段差構造とホール構造の電子顕微鏡像。左が 0.5 ms のパルス熱負荷を与える前、右が熱負荷後。段差構造には大きな変化がないが、新たなホールが出現している。

と同時に、PSI-2 については何名かの技術職員の方にも支援をいただいた。颯爽と現れて装置に材料試料を組付けて去っていった技術職員の方がいたのを覚えている。これに関して、PSI-2 のバイアス電源に関する少し面白いエピソードがある。試料へのプラズマ照射時に試料ホルダにバイアス電圧をかけるための電源があったが、なんらかの理由で電源の筐体のアースが取られておらず、Arkadi 博士がバイアス電源を触るたびにいわゆる“静電気”を受けてしまい、毎回「痛っ」と言いながら操作していたのである (試料へのバイアス電圧は正常にかかっていた)。私は毎回その様子をなんとも言えない面白味を感じながら眺めていた。これについて Arkadi 博士は「技術職員に依頼してそのうち直してもらおうよ」というようなことを言っていたが、私の感覚ではその場で適当な接地につなげば良さそうなもので、その時もそのようなことを言ったように思う。Arkadi 博士の返答がどうだったのか記憶があいまいなのだが、研究者と技術者の住み分けの問題なのか、接地系統が複雑なのか (複数の接地極があり変なものにつなぐと危ない、という事情もありそうなことである)、何かしら理由があったのだろう。PSI-2 がどうであったかわからないが、信頼できる技術者に装置の一部を任せることの副作用として、研究者が装置を自分で掌握しきれなくなることがあるのだろうと思う。核融合研でも技官と研究者は連携しているが、そのあたりの良いバランスを探るといのは普遍的な課題なのだと思う。

#### 3.4.6 海外の非観光地

ユーリッヒという町は、ドイツ西部の、人口 3 万人ほどの小さな町で、観光地ではない。お店や駅でのやり取りは、双方英語が上手くないこともあり、お互いにおっかなびっくりになりがちだったが、向こうに異邦人へのある種の警戒を感じるがあった。これについては、ヨーロッパやアメリカで良く見かける、店頭などでまずニコリと笑って見せてから話し始める、というのに倣うようになってから警戒レベルが下がったように思う (これはここで紹介した滞在以降のドイツ滞在やアメリカ滞在中で感じたことである)。日本で、店頭や駅の窓口でニコニコしていたらむしろ警戒される可能性すらあると思うが (私も学生時代にアルバイトしていた頃は、ニコニコしながらレジのものを持ってくる海外の人に違和感があったものである)、欧米圏では「敵意がないよ」と示すための文化的な習慣だという話もあるので、郷に入って郷に従うで、まず笑うところから始めても良いと思う。

#### 3.5 ユーリッヒ研究所での国際共同研究 (プラズマ流体シミュレーション) 東郷 訓 (筑波大)

##### 3.5.1 共同研究開始の背景

私が PWI 協定に拠る共同研究を実施したのは平成 28 年度から 30 年度にかけての 3 年間であった。その前年度 (平成 27 年度) に東京大学で博士課程を修了した後、3 年任期の研究者として筑波大学プラズマ研究センター (以下 PRC) に着任していた期間と重なるものであり、PRC 研究者時代は常にこの共同研究と共にあったと言っても過言ではない。

学生時代の研究は、ダイバータプラズマコードに用いられるプラズマ流体モデル (Braginskii モデル) に非等方イオン温度効果を実装するというものであった。計算コストや着目する物理を限定する観点から、既存の大規模なダイバータプラズマコードを編集するのではなく、オリジナルの二次元コード (以下 AIP モデル) を開発して研究を進めていた [35, 36]。一方 PRC では GAMMA 10/PDX タンデムミラー (以下 G10) でのミラー閉じ込め及び ICRF 加熱と西エンド部に実装されたダイバータ模擬実験モジュール (D-module) を活用した高イオン温度下でのダイバータ模擬実験が実施されていた [37]。G10 プラズマは ICRF 加熱と衝突度の低さから顕著なイオン温度非等方性が観測されており、AIP モデルの妥当性検証に適していると考えていた。しかし当時の AIP モデルは非一様磁場に対応しておらず、大規模なコード編集が必要な状況であった。平成 29 年度に開催の PET-16 会議 (フランス・マルセイユ) に向けてこの作業を進めていた。

PRC 着任直後、坂本瑞樹教授 (当時副センター長) から PWI 協定を紹介いただいた。学術交流協定を締結しているユーリッヒ研究所との共同研究で、電子とイオンの二次元流体コード B2 (Braginskii モデル) と原子分子を取り扱う二次元モンテカルロコード EIRENE から構成される B2-EIRENE コード [38] を使用したテーマを考えることになった。当時 G10 ではダイバータ模擬実験の理論的解析のために LINDA コード (Linear Divertor Analysis code) [39] が適用されていたが、Braginskii モデル且つ低衝突であるが故に、ミラー効果が正しく反映できていないことが懸念されていた。そこで AIP モデルの概念を B2 コードに取り込んで G10 に適用するという案になった。実際にはこの研究計画は詰めが甘く、渡航後に修正することとなった。

### 3.5.2 最初の渡航 (H. 29. 3. 19-25)

最初の渡航の具体的な日程はユーリッヒ研究所の Bernhard Unterberg 氏 (令和元年度より PRC 客員教授) との相談で決定した。またこの渡航には坂本教授も同行した。共同研究の作業協力者として Dirk Reiser 氏, Petra Böner 氏を、また結果の議論のため Vladislav Kotov 氏, Detlev Reiter 氏, Felix Reimold 氏, Mikhail Tokar 氏もご紹介いただいた。

最初の渡航の直前に PET-16 のアブストラクトの締切が迫っており、それまでに AIP モデルの非一様磁場対応を完了することができた [40]。その点と共に Reiser 氏に PWI 協定に拠る共同研究計画を伝えると、「AIP モデル単体で完結しそうな課題だが、あえて B2 でやる意義は？」と訊かれ、素朴な疑問であるにも関わらずうまく答えることができなかった。初めての国際共同研究であったこともあり、英語力が伴わなかったことも大きい。

Reiser 氏、坂本教授と共同研究の具体的方針を練り直す中で、i) そのままの B2 コードを単純ミラー系に適用すること (LINDA との直接比較と、当時設計段階であった Pilot GAMMA PDX-SC への展開を想定)、ii) AIP モデルと結果を比較することが決まった。B2 コードのグリッド

は Reiser 氏が開発したコードを用いて、G10 プラグ・バリア部からエンド部の磁場分布を模したものの他、収縮・発散のパターンを変えたものをいくつか作成いただいた。また Böner 氏にユーリッヒ研究所の計算サーバのアカウントを作ってもらい、B2 コードをそこで走らせることになった。

### 3.5.3 2 回目の渡航 (H. 29. 7. 2-30)

最初の渡航が 1 週間弱と比較的短期となったことを省み、2 回目の渡航は 11 日間で提案した。しかし PWI 国内技術委員会での提案時に委員の先生からより長い渡航期間を提案され、29 日間の計画に変更した。このときは依然としてこの国際共同研究の行先の不透明さや、苦手とする英語でのコミュニケーションから内心に畏れがあったことは否めない。

B2 コードと AIP モデルを比較するにあたり、最初の渡航の際にいただいた B2 コードのマニュアルを 2 回目の渡航前に熟読した。B2 コードは境界条件や輸送係数について様々な設定が可能であり、自由度が大きいことが特徴であった。系としてまずは LINDA [39] が対象としていた G10 プラグ・バリア部からエンド部にかけてを模した磁場分布を使用することにした。LINDA では上流境界を固定端条件で与えていたため、B2 でもその方法で計算することにして、初めて計算結果が得られた。しかし AIP モデルはその特性上、固定端条件を与えることができず、直接比較を困難にしていた。そこで B2 の上流境界を鏡対称条件 (フラックス流入なし) とし、体積ソースを与えることで対応した。AIP モデル側は B2 で言う上流境界の反対側に鏡対称の磁場配位・体積ソースを用意し、全体を解くという方法で対応した。下流側境界条件 (Bohm 条件) については、B2 では境界の平行方向流速を音速に一致させる方法と、境界の平行方向流速が超音速になる傾向がある場合には、それを外挿によって与える方法の 2 つから選択できる。使用した磁場分布では磁気ノズル効果によってエンド部で超音速流となる傾向があったため、後者の条件を用いることとした。一方で AIP モデルでは境界の平行方向流速を自己無撞着に求めるため、この点は B2 と完全に一致させることはできなかった。また輸送係数について、B2 ではイオンの heat flux limiter を実装していなかったため、AIP モデルでも使用しないことで合わせた。イオンの viscous flux limiter は B2 には実装されているが、AIP モデルはその特性上不要なので、この点が両者のプラズマ分布に違いをもたらすことを期待した。

可能な範囲で計算条件を一致させ、プラズマの衝突度 (系の長さ  $L$  をクーロン衝突平均自由行程  $\lambda_{mf}$  で割った値で評価) ごとに比較を行った。その結果、比較的衝突度が高い場合 ( $L/\lambda_{mf} \approx 30$ ) には極めて良い一致が得られ、衝突度が marginal に近い場合 ( $L/\lambda_{mf} \approx 0.3$ ) には密度分布と磁力線方向流速分布に定性的な違いが現れることがわかった [40-42]。本結果を中心に 7 月 27 日にセミナーを行い、ようやく何をやろうとしているのかを理解してもらえた感覚が得られた。

### 3.5.4 3回目の渡航 (H. 30. 7. 7-28)

3回目の渡航では、まずG10以外の様々な磁場分布のパターンやリサイクリング中性粒子が存在する状況におけるB2コードとAIPモデルの比較を行った。リサイクリング中性粒子のモデルはB2に実装されているminimal modelを使用した。最初、AIPモデルにもminimal modelを実装し、B2と同条件にて計算を行った。しかし2回目の渡航で明らかになった下流側境界条件を統一できない問題の影響により、両コードのプラズマ分布の違いの原因を流体モデル由来と中性粒子分布由来とに切り分けるのが難しくなることがわかった。そこでB2から出力される中性粒子由来の粒子ソース・エネルギーソース分布をAIPモデルで読み込むことで後者の影響を取り除き、流体モデルのみに起因する分布の違いに注目できるようにした。

発散磁場に続いて弱い収縮磁場が存在する場合や、エンドプレートの手前に弱いイオン化領域が存在する場合など、超音速流が減速する傾向にある場合には、B2では不自然な流速分布をとりながら超音速から音速に減速するのに対し、AIPモデルでは超音速流のまま緩やかに減速する様子が示された[43]。このことは衝突度に依らず観測されることもわかった。

### 3.5.5 ドイツ滞在中の生活

3度の滞在ではユーリッヒ市内の一般のホテルを利用した。市内から研究所までは路線バスで片道2ユーロで行くことができた。洗濯は市内のコインランドリーを利用した。ドイツ語の説明しかなかったため最初は全く使い方がわからなかったが、3回目の渡航では人に訊かれて教えることができるくらいにはなれた。

ユーリッヒ研究所のスタッフはお昼頃になると誰からともなく声を掛け合い、一緒にカフェテリアに向かうのが習慣のようであった。私もそこに混ぜてもらった。普段はドイツ語で会話するものと思われるが、私が居るときは皆英語で話してくれ、嬉しかった。2回目の渡航の際には研究所内のBBQイベントにも参加させていただいた(図10)。

普段の夕食は市内のレストランをローテーションした。もったいない気がして滞在中はほぼ毎晩ビールを飲んでいたが、今考えると不健康極まりない。

共同研究でお世話になったReiser氏や同世代で親しくしてくれたFriedrich Schluck氏には夕食や休日の小旅行にも誘ってもらい、楽しい滞在期間を過ごすことができた(図11)。



図10 研究所内で開催されたBBQイベントの様子。



図11 (a)D. Reiser氏との夕食(ユーリッヒ市内)、(b)F. Schluck氏との小旅行(デュッセルドルフ市内)。

### 3.5.6 おわりに

本共同研究の開始当初は非常に見通しが甘く、やや消極的な姿勢になっていた部分もあったが、共同研究者、ユーリッヒ研究所やPRCのスタッフ、PWI国内技術委員会の先生方をはじめ多くの方々の支えがあって何とか意味のある成果が得られたと同時に、研究の視野が広がった。また計2ヶ月間の滞在を経て研究者として最適限必要な英語力や海外で過ごす度胸を身に付けることができ、それが後のMonaco-ITERポストドクフェローシップ採択に繋がったことは確実である(体験記を本学会誌第97巻第1号「ITERだより」に掲載[44])。さらに本共同研究を介して得た成果はPRCで助教となった現在にも活用されている[45]。この場を借りて深く御礼を申し上げたい。

## 4. PWI協定に拠る国際共同研究の成果

ここでは、シニア研究者(大野・田中・林、吉川、梶田、河村・庄司、宮本、坂本、Lee)により実施されたPWI協定に拠る国際共同研究の成果と、その研究分野へのインパクトを紹介する。

### 4.1 DIFFERにおける非接触プラズマ実験

大野哲靖, 田中宏彦(名古屋大), 林 祐貴(東京大)

#### 4.1.1 直線型装置を用いた非接触プラズマ研究

核融合研究は科学的実証から工学的実証研究に移行しつつある。この中で重要なのは、プラズマを長時間・定常維持するための、核融合炉内の熱・粒子輸送の制御である。2011年、核融合エネルギーフォーラムのITER・BA技術委員会の下にダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価WGが設置され、ダイバータ研究開発の加速方策に関する議論が行われた。ダイバータの熱・粒子制御の方針としては、放射冷却、非接触プラズマ、周辺磁場配位制御、などの手法について検討を行い、実機での実験研究とシミュレーション研究が密接に連携して、現象の解明と原型炉における信頼性の高いダイバータ設計を行う必要があることが報告されている。

炉心から流失してくる膨大なプラズマ熱流を制御することが可能な(プラズマ熱流に耐えられる)ダイバータを設計することは重要な課題である。ダイバータ板への熱負荷は式(4.1-1)で表すことができる。

$$q_a = \Gamma_a [(\gamma + M_a^2) T_a + E_i] \quad (1)$$

ここで $\Gamma_a$ はダイバータ板への粒子束であり、 $M_a$ はプラズ

マ流のマッハ数である。γはシースにおけるエネルギー伝達係数を表す。また $E_d$ はイオンが持つ電離エネルギーである。さらに、 $T_a$ はダイバータプラズマ中の電子温度を表す。式(1)から、放射冷却により温度が低下しても、ダイバータ板表面での表面再結合過程に伴いイオンが持つ電離エネルギーが放出され壁に入る事がわかる。そのため、 $T_a$ が大きい核融合炉では単純なプラズマ冷却だけでは、ダイバータ板への熱負荷低減は不十分である。

電子温度 $T_e$ が1 eV程度まで低下すると、プラズマはダイバータ板へ到達する前に体積再結合過程(三体再結合、放射再結合)によりガス化し、ダイバータ板へのイオン粒子束が減少し、ダイバータ板への熱負荷が著しく低減する。これを、非接触ダイバータといい、このときのダイバータプラズマを非接触プラズマという。

直線型プラズマ装置は定常プラズマの生成が可能であり、環状プラズマ閉じ込め装置に比べて幾何学的配位、磁場配位が単純で、プラズマパラメータの制御性(電子密度)が高く、また計測器の設置が容易である。非接触ダイバータに関する先駆的な実験は米国プリンストン大学プラズマ物理研究所の直線型装置QEDにおいて行われた[46]。その後、表2に示す、PWI協定に参加している多くの直線型装置で基礎研究が行われ、非接触ダイバータの理解が進んだ。直線型装置を用いた非接触プラズマ研究の歴史についてはレビュー論文[47]としてまとめられているので参照されたい。

表2でわかるように、直線型装置の典型的プラズマパラメータは密度 $10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_e \sim 10 \text{ eV}$ 、イオン温度 $T_i \sim$ 数eVである。ITER及び原型炉においては、ダイバータ領域のプラズマ密度は $10^{20} \text{ m}^{-3}$ を超える。また、ELM (Edge Localized mode)に伴うパルス的な大きな熱負荷に対する非接触プラズマの安定性(動的応答)の解明も重要な課題である。このような高密度領域での非接触プラズマ特性や熱パルスに対する非接触プラズマの動的応答過程を系統的に研究可能な装置はオランダのDIFFERのMagnum-PSI(及びPilot-PSI)であり、Magnum-PSIのプラズマパラメータは他の装置とは一線を画している。

#### 4.1.2 Magnum-PSI (Pilot-PSI) の特徴

DIFFERが所有するMagnum-PSI装置はカスケードアーク放電システムと超伝導コイルを有する直線型装置である。Pilot-PSIはMagnum-PSIのプロトタイプモデルとして開発された装置である。現在はイオンビーム分析によるプラズマ照射中の材料表面のその場計測が可能な装置

(Upgraded Pilot-PSI, UPP)として、プラズマ-材料相互作用研究に利用されている。

Magnum-PSIのカスケードアーク放電システムはプラズマ密度 $10^{21} \text{ m}^{-3}$ を超える高密度プラズマが生成可能であり、超伝導コイルは定常で2.5 Tの磁場を発生することができ、ITER級のダイバータプラズマを模擬生成可能な装置として知られている[48]。さらに、コンデンサーバンクとIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)で構成された大電流電圧パルス電源により、ELMを模擬した繰り返し熱パルスを、定常プラズマに重畳することが可能である。

DIFFERは歴史的にレーザー計測に強く、Magnum-PSIでは優れたレーザートムソン散乱(Laser Thomson Scattering: LTS)計測装置が常時可動している。非接触プラズマ研究に必要な1 eVより低い $T_e$ の高精度計測が可能であり、また協同LTS計測による $T_i$ の評価も行われている。一方、面白いことに静電プローブなどの静電計測の経験は乏しく、林、田中が設計・製作して日本から移送した可動型静電プローブ(またイオンセンシティブプローブ)と計測回路・データ収集系がMagnum-PSIに設置され実験に供されている。これも本協定の成果の一つと言える。

図12はMagnum-PSIの制御室の写真である。大学の実験室規模の直線型装置とは違い、全て遠隔制御で制御室からの指令でプラズマ実験が可能となっている。実験日には、2交代制(午前・午後)で、通常はオペレータが1名つき、内製のGUIウィンドウを複数操作することで、ガス種、ガス流量、磁場、放電電圧、放電電流、真空ポンプ、ターゲット電圧、トリガ時刻などの各種条件を設定する。LTSで計測された電子密度、電子温度、プラズマ径は正面上部の液晶パネルに即座に表示される。実験の目的に応じて、数十秒~1時間程度の放電を繰り返し行い、実験ログに結果を集約する。さらに、装置運転、プラズマ計測、真空、電子回路などを専門とする優れた技術職員が多数配置されており、共同研究の実施に大きく貢献している。H.J. van der Meiden博士はDIFFER所属のレーザー計測に関する最も優れた技術職員の一人である。名古屋大学の直線型装置NAGDIS-IIにLTS計測システムを導入する際には、同博士が本協定の下に数回来日し、NAGDIS-IIで

表2 非接触プラズマ研究を行った直線型プラズマ装置[47].

Devices	Discharge	B [T]	L [m]	R [cm]	$n_e$ [ $\text{m}^{-3}$ ]	$T_e$ [eV]	$T_i$ [eV]
QED	DC arc	0.2	1.5	1.2	$5 \times 10^{19}$	5	
PISCES-A	DC arc (LaB <sub>6</sub> )	0.2	4.0	1.5	$1 \times 10^{19}$	20	2
PDS	LHWH	0.35	0.4	2.0	$7 \times 10^{19}$	5	
TPD-I	TPD-type (LaB <sub>6</sub> )	0.5	1.5	1.5	$6 \times 10^{19}$	10	
NAGDIS-II	Modified TPD (LaB <sub>6</sub> )	0.25	2.0	2.0	$1 \times 10^{20}$	10	1 ~ 5
NAGDIS-T	DC (LaB <sub>6</sub> )	0.1	40~300	4 (wide)	$1.5 \times 10^{19}$	4	
MAP-2	DC arc (LaB <sub>6</sub> )	0.02	1.5	5	$5 \times 10^{19}$	10	
TPD-Sheet IV	TPD-type (LaB <sub>6</sub> )	0.07	1.0	4 (wide)	$1 \times 10^{19}$	15	
ULS	Demirkhanov source	0.07	1.5	24	$1.3 \times 10^{18}$	15	
LENTA	Electron beam	0.5	150	1.5	$1 \times 10^{19}$	30	
PSI-2	DC arc (LaB <sub>6</sub> )	0.1	2.5	6	$1 \times 10^{19}$	20	
Pilot(MAGNUM)-PSI	Cascade arc	1.6(2.5)	1.0	0.5	$4 \times 10^{21}$	2	
GAMMA10/PDX	ECH ICRF NBI	1.5	27	10~100	$3 \times 10^{18}$	100 $\geq$	100 $\geq$



図12 Magnum-PSIの制御室の様子。

のLTS計測を可能とすることで、非接触プラズマ研究の進展に大きく貢献した。

これまでの日本とDIFFERとの本協定に拠る国際共同研究で多くの学術成果が公表されている。その成果が評価され、Magnum-PSIにおいては、年に2週間程度の日本人研究者向けの実験期間（Japanese Weeks と呼ばれる）が確保されていることを述べておきたい。次節に、DIFFERにおける非接触プラズマに関する共同研究成果を、林、田中の論文をベースに簡単に記述する。

#### 4.1.3 Pilot-PSIにおける非接触プラズマ実験[49]

Pilot-PSIにおいて、高密度ヘリウムプラズマの非接触プラズマの特性が調べられた。3.2節にもあるように、林は4探針プローブを設計・製作しPilot-PSIに設置し実験を行った。シングルプローブとダブルプローブで測定された $T_e$ はLTS測定と一致した。他の直線型装置で観測されたシングルプローブI-V特性の異常性（シングルプローブ計測で得られた $T_e$ がダブルプローブやLTSにより計測された値より高く評価される現象）は、Pilot-PSIでは観測されなかった（図13）。この原因は、各直線型装置での静電揺動の大きさの違いであることが明らかになった（装置間比較実験）。さらに、ITERのダイバータ領域で想定される高粒子束 $10^{24} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ かつ高中性ガス圧（ $\sim 10 \text{ Pa}$ ）条件下では、体積再結合の寄与により0.5 m程度のスケール長で熱流束が90%以上低減することが定量的に明らかになった。

#### 4.1.4 Magnum-PSIにおけるパルス印加実験[50]

定常的に形成している非接触プラズマへのパルスプラズマ印加の影響を明らかにするために、パルスプラズマ印加時にターゲット板に流入するイオン飽和電流の時間変化が詳細に調べられた（図14）。ターゲット板に流入するイオン飽和電流はガス圧力3.0 Paでピーク値を示し、圧力の増

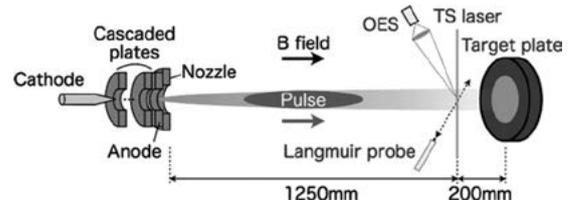


図14 パルスプラズマ印加実験の模式図[50].

加とともに単調減少した。興味深いことに、低いガス圧力の場合、パルス粒子束がパルスの終わりで減少することが明確に観測された。この減少効果は、パルス粒子束自身に起因するリサイクリング中性粒子束とパルスプラズマの後半部分の相互作用の過渡的な増大に起因することが、中性粒子輸送コードを用いた解析により明らかになった。この時、荷電交換反応の平均自由行程が中性粒子間弾性散乱の平均自由行程よりも短いことが必要である。一方、高い中性圧力領域ではパルスプラズマによるターゲット板へのイオン粒子束が減少しており、非接触プラズマ生成によってパルスプラズマによるターゲット板への粒子束増大が緩和されていることが示唆された。

#### 4.1.5 Magnum-PSI非接触プラズマにおける径方向輸送[51]

Magnum-PSIで生成された非接触ヘリウムプラズマ中の体積再結合領域近傍における径方向輸送の増大に関する実験が行われた。多芯静電プローブにより、イオン飽和電流および浮遊電位の揺動を高時空間分解能で計測した。データ解析により、非接触状態時のイオン粒子束分布の広がり、周方向に内部電場を持つプラズマ構造の存在が確認された。高速カメラで同時計測された発光強度の解析により、周方向モード数 $m=1$ の揺らぎが径方向へのプラズマ放出と関係していることを見出している。輸送発生時にはターゲット板へ流入するイオン粒子束の減少が見られており、ターゲット上の局所熱負荷を減少させる効果をもつことが示唆されている。

#### 4.2 DIFFERにおける周辺プラズマ・ダイバータ計測

吉川正志（筑波大）

核融合炉においては、高温・高密度の定常プラズマが生成されるため、ダイバータへの熱・粒子制御が重要であり、そのため周辺プラズマやダイバータ領域におけるプラズマ計測によるプラズマの理解が重要となる。特に、ダイバータ領域では、ダイバータ板への熱負荷を低減させるための非接触プラズマ生成が有効とされ、非接触プラズマの物理についての研究が、世界各国の直線型プラズマ実験装置を利用して盛んにおこなわれている。周辺プラズマ・ダイバータ計測の進展をめぐり、従来直線型プラズマ実験装置ではあまり使用されてこなかったマイクロ波計測を利用した、プラズマ密度、密度揺動計測に関する共同研究について報告する。

周辺プラズマやダイバータ・プラズマパラメータの測定は、主にプラズマ中に挿入する静電プローブを用いた測定が行われている。一方、プラズマ内部の計測にはトムソン散乱計測や分光測定が行われている。しかしながら、プラズマの電子密度の時間変化や密度揺動などを計測するマイ

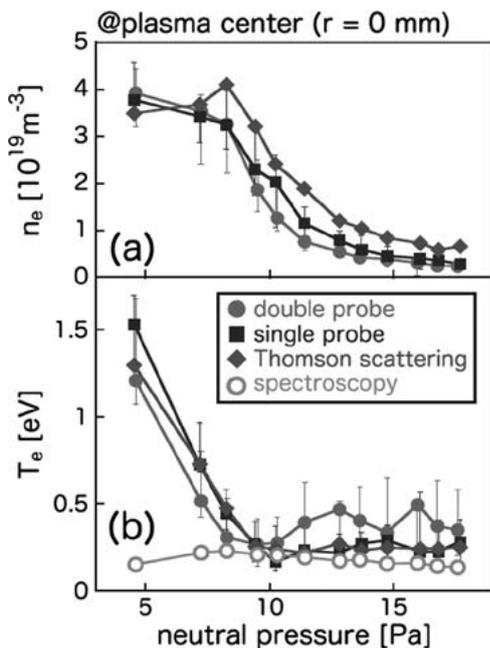


図13 Pilot-PSIでの各種計測によって評価された(a)電子密度、(b)電子温度[49].

クロ波診断は、これまでほとんど利用されていなかった。PWI協定に拠る共同研究では、DIFFERの直線型プラズマ装置 (Pilot-PSI, Magnum-PSI) におけるマイクロ波を用いたプラズマ計測に関する共同研究を行った。当該装置には、高精度トムソン散乱計測システム、高速カメラ、分光測定システム等は設置されているが、静電プローブ、マイクロ波干渉計、反射計等は整備されていなかった。本共同研究では、Pilot-PSI, Magnum-PSIにおいて、筑波大学プラズマ研究センターのGAMMA 10/PDXで開発したコンパクトな周波数通倍型マイクロ波干渉計を輸送して設置し、プラズマ特性及び計測に関する研究を行い、プラズマ計測の高精度化、核融合炉ダイバータ計測への展開に向けた研究を行うこととした。

共同研究を開始した2012年度は、DIFFER研究所は、まだオランダ王国ユトレヒト郊外の宮殿の中にあり、敷地内に野生のウサギや放し飼いの鶏がみられるのどかな環境にあった。そして、Pilot-PSIとMagnum-PSIの2台の直線型装置を使って実験が行われていた。このPilot-PSIは、近年の移転後のPilot-PSIとは別物で、Magnum-PSIの前身の装置で、長さ1.2 m、直径0.4 mのチャンバーにカスケードアークプラズマ源を持ち、磁場強度0.4~1.6 T、 $\sim 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の密度と0.1~10 eVの電子温度を持つプラズマを生成することができた。2013年3月当時、Magnum-PSIでの実験時間を確保することが難しかったため、比較的实验時間に余裕のあるPilot-PSIにおいて、GAMMA 10/PDXで開発した周波数通倍型1チャンネル70 GHzマイクロ波干渉計を設置し、電子線密度、及び揺動計測を行うことで合意した。実際に実験を開始したのは、2014年10月である。図15に周波数通倍型70 GHzマイクロ波干渉計を示す。本システムは、周波数安定性に優れた17.5 GHz発振器、37.5/150 MHz発振器をそれぞれミリ波源、IF信号源とするヘテロダイン型干渉計である。赤で囲まれた部分はシールドボックス (55×43×20 cm) を示し、プラズマ装置から検出部を離して同軸ケーブルで本体近くまでマイクロ波を伝送できるようになっており、非常に取り回しが容易で、いろいろな装置での計測にも利用可能である。実験では、水素プラズマを生成し、ガス圧、磁場強度、プラズマ源の放電電流を変えて、ターゲット板近傍で非接触プラズマ生成時の電子密度、温度の違いや、 $H\alpha$ 線放射、高速2次元画像、電子線密度、揺動の変化について調べた。本干渉計を用いた実験では、カットオフ周波数 ( $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ) よりも十分低いプラズマ密度となるようにガス圧、磁場、放電電流を調整して実験を

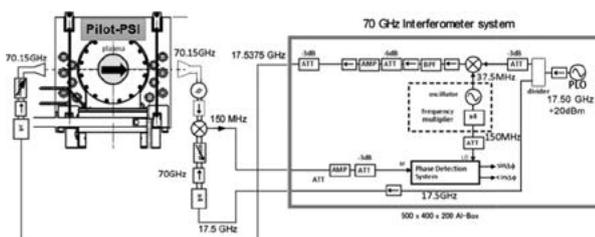


図15 周波数通倍型70 GHz マイクロ波干渉計。

行った。2014年度の実験においては、ターゲット板近傍の密度、密度揺動測定を試験的に行った。装置への干渉計の設置位置、ポートの取り合い、データ収集系への信号出力の確認等を行ったため、実際の実験に利用できる時間が少なくなった。あいにくと、高時間分解計測が可能な高速ADCはなかったため、干渉計の出力は高速オシロスコープ (Tektronix, DPO4034) で計測した。2015年度は、ターゲット板からプラズマ源側へ25 cm程度上流の位置での計測を行った。図16(a)に線密度の時間変化、図16(b)に電子線密度揺動のパワースペクトル密度の時間変化の例を示す。本実験によって、磁場強度0.8 Tのときに強い電子密度揺動が初めて観測され、その周波数が $\sim 13 \text{ kHz}$ であることがわかった。これは、 $E \times B$ ドリフトによるものと推測されている [52, 53]。よりプラズマ源に近い場所でのマイクロ波計測を行うため、干渉計からマイクロ波反射計に組み替えての実験を行った。その結果、軸方向に一樣な揺動が観測されていることが確認できた。この年の9月末にPilot-PSIはシャットダウンして移転することとなった。

DIFFERは、ユトレヒトからアイントホーヘンのアイントホーヘン工科大学敷地内へ移転したため、2016年度は共同研究に関しての打ち合わせのみとなった。移転後には、Pilot-PSIはまだ移転できておらず、Magnum-PSIのみが共同実験に利用できることと、同装置でのマイクロ波計測器の設置ポート、その他の計測器、生成するプラズマについて議論した。2017年1月からMagnum-PSIのプラズマ実験を開始し、9月に、新たに開発した3チャンネル70 GHzマイクロ波干渉計をMagnum-PSIに設置して実験を行った。しかしながら、高時間分解のデータ収集系が準備されていないため、マイクロ波干渉計、 $H\alpha$ 線計測器のデータ収集は、引き続き高速のオシロスコープにて行った。Magnum-PSIは、磁場、カソード電流、ガス圧、ターゲット位置を自由に变化させることが可であり、自由度の高い実験が可能であった。ガス圧、磁場、電流を変えることによって、20 kHz程度の揺動が電子密度、 $H\alpha$ 線計測器によって測定された。その他のプラズマパラメータと比較することにより、揺動の物理機構について調べた。この揺動は、非接触プラズマ生成時に強く観測されており、揺動の径方向分布、軸方向分布とあわせて議論する必要がある。Magnum-PSIにおいては、ユトレヒトからの移転後、初めての高速データ取り込みを用いたプラズマ実験となったため、使用可能なADCが無く、オシロスコープを使ってのデータ保存で揺動計測を行ったが、これまでの研究を踏まえて2019年度には新しい高速ADCが導入される

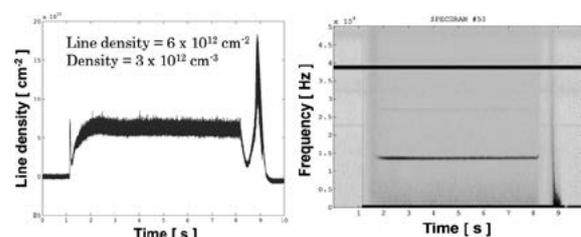


図16 (a)電子線密度の時間変化と(b)電子線密度揺動スペクトル。

ことになった。2019年9月には、田中(名古屋大), 梶田(東京大), 林(当時NIFS)のグループと同時期に実験することができ、高速駆動静電プローブも利用して、ターゲット板の位置、及び角度を変化させた場合の揺動の変化について調べた。図17に、Magnum-PSIにおける計測システムの配置図を示す。また、これまで使用していたマイクロ波干渉計をマイクロ波反射計として使用して、高密度プラズマに対応した計測も行った。プラズマ揺動計測においては、高速カメラを用いた2次元画像計測による揺動の2次元分布解析も重要である。図18に高速カメラを使用した2次元画像(a)、揺動スペクトル例(プラズマエッジ部(b)及びプラズマ中心部(c))をそれぞれ示す。静電プローブ計測によって、空間電位の情報を得ることで、E×Bドリフト周波数がマイクロ波反射計、光検出器や高速カメラで計測した揺動周波数と同等であることが示された。ターゲット板の角度変化による揺動強度の違いが初めて観測され、装置の軸に対して垂直にターゲットを設置した場合に揺動強度が一番強く、角度を付けていくにしたがって弱くなる傾向がみられた(図19)。これは、非接触プラズマ生成による再結合フロント近傍で揺動が強く観測されたが、ターゲット板の回転によってターゲット板近傍の電位分布が変わり、揺動強度が変化したものであることが示唆された[54]。

本共同研究により、欧州の拠点研究所での実験ができ、そこで研究する海外からの共同研究者との交流もできたこと、日本以外のプラズマ実験装置における研究方針の立て

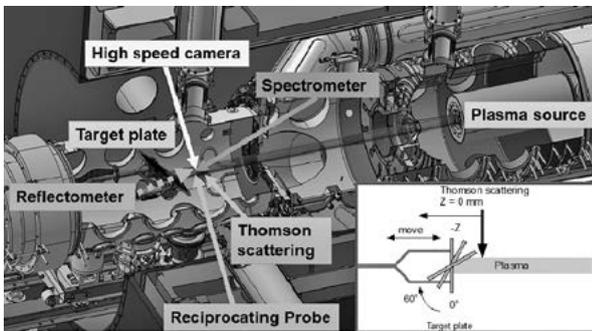


図17 Magnum-PSIにおけるプラズマ計測配置。

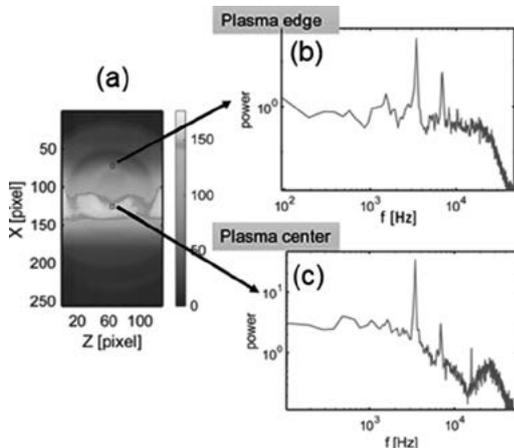


図18 高速カメラ画像(a)、プラズマエッジ(b)、およびプラズマ中心部(c)の揺動スペクトル。

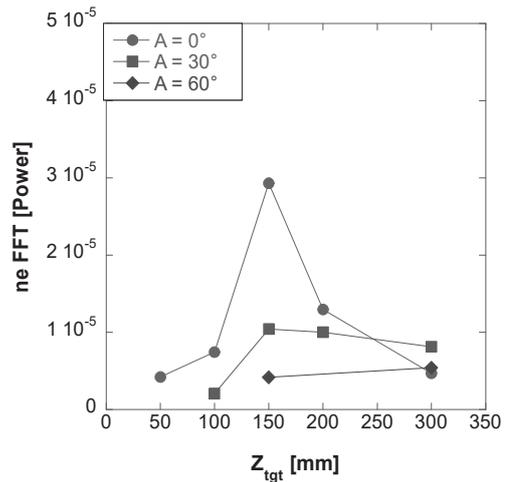


図19 ターゲット板の角度を変更した場合の密度揺動の軸方向分布。

方、管理運営方法が学べたことは非常に有意義であった。特に、電磁波等に対する安全管理に関して細かい規定があり、それを遵守すること、研究者や技術職員、また、インターンの学生も含めて全員が連携して実験を行っている状況は非常に良かったと感じた。この共同研究中は、毎週月曜日に行われているミーティングにおいて研究内容のプレゼンを行うことになっており、現在の研究から研究所で行う研究に関して説明し、実施に際しての議論が行われた。このプレゼンに先立って、出張前にネットミーティングで実験のプロポーザルを行うこともしており、現在では当たり前になったネットミーティングが共同研究初期のころからすでに行われていたことに驚いた記憶がある。ただ、予算や実験時期の関係で大体1週間程度しか出張できず、実験日が4日間しかとれないことで、後1日程度実験ができればということも多々あった。しかし、おおむね満足いく実験ができたと思う。若手の長期の共同研究がより盛んになっていくことを期待するが、PWI協定などの枠組みを有意義に利用して国際的に活躍していってほしいと思う。

4.3 DIFFERにおけるヘリウム発光線を用いたダイバータ計測 梶田 信(東京大)

これまで議論されてきたように、ダイバータ領域のプラズマ計測は重要である一方、今後の原型炉や実用炉での計測を考えると、装置へのアクセスビリティ等の観点から、限られた計測装置によってプラズマの状態を把握することが必要になる。おそらく、その中でも受動分光計測は、視線の制約は受けるが、最後まで重要な位置を占めるのではないだろうか。

ヘリウム線強度の発光分光法(Optical Emission Spectroscopy: OES)は、さまざまなプラズマ装置における電子密度 $n_e$ 、温度 $T_e$ の測定に用いられてきた。例えば、日米の研究者により、複数の直線型ダイバータ模擬装置(MAP-II, NAGDIS-II, PISCES-A)で検証がなされ、純ヘリウムプラズマでは、輻射捕獲の影響を考慮すると比較的良い精度で計測できることが明らかにされてきた[55-57]。ここで輻射捕獲とは、ヘリウムの基底準位へと脱励起する際の真空紫外光の再吸収のことを指している。しか

し、これらの検証は、主に $10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以下の比較的低密度領域で行われ、実際のダイバータ領域への適用のためには、高密度における検証が必要であった。そこで、PWI協定に抛り、 $10^{20} \text{ m}^{-3}$ を超えるプラズマが生成可能なオランダDIFFERのMagnum-PSIにおいて、分光計測とトムソン散乱計測の比較から検証を行ってきた。

通常、分光法では、衝突輻射モデルによるポピュレーション分布から得られる発光強度の予測値と実験で得られた発光強度が最もよく一致するような $n_e$ と $T_e$ の組み合わせを探すという手法をとる[58]。まず、直線型装置Magnum-PSIでOESの結果を用いて、衝突輻射モデルとの比較から $n_e$ と $T_e$ の評価を試みた。しかし、複数の条件でトムソン散乱計測と著しい差が生じ、その差は輻射捕獲の影響では説明がつかなかった[59]。そこで、発光を決める素過程を追うことを諦め、PISCES-Aで検証が行われていたヘリウム線強度比法と機械学習を組み合わせた手法[60]へと方針を転換した[61]。

図20(a)のように、5つの隠れ層を持つニューラルネットワーク(NN: Neural network)を構築し、Magnum-PSIにおけるレーザートムソン散乱で得られた $n_e$ や $T_e$ とOESデータとの関係を学習させた。入力パラメータ数 $N$ は、正規化された9個の発光強度(388.9, 402.6, 438.8, 447.1, 492.2, 501.6, 667.8, 706.5, and 728.1 nm)と半径方向の位置の10個である。NNは隠れ層が5層あり、隠れ層のニューロン数は入力側から256, 128, 64, 64, 16である。NNは $n_e$ と $T_e$ に対して2つ別々に用意した。第1隠れ層はReLU (rectified linear unit) 活性化関数を用い、他の隠れ層はシグモイド関数を用いている。この解析では、中性粒子密度や温度、準安定状態密度は隠れたパラメータであり、その影響は間接的に含まれることになる。

機械学習では、学習用とテスト用にデータを分割するこ

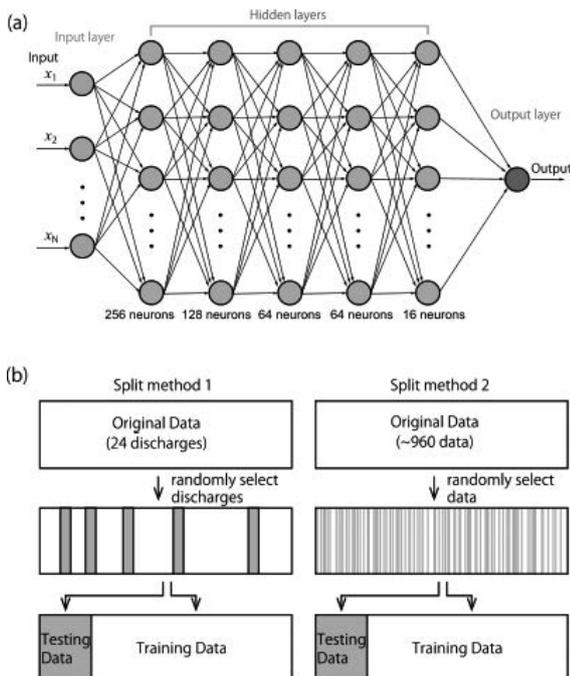


図20 (a)は解析に用いたNNの模式図、(b)はデータ分割法の模式図 (Reproduced with permission from [61]).

とが必要である。図20(b)に示すように、2つの方法でデータを分割した。最初の分割方法(分割法1)は、放電の単位でデータを分割する方法である。このデータセットには24種類の放電が含まれており、この24種類の放電を学習用に19個、テスト用に5個をランダムに分割した。もう一つの方法(分割法2)は、データポイントの単位でデータを分割するものである。各放電は異なる半径位置で40点のデータポイントを持つため、全データポイント数は960(40×24)となる。分割法2は、放電の情報を考慮せず、960個のデータポイントをそれぞれ80%と20%の割合でトレーニングデータとテストデータに分割する。

図21(a), (b)にはNNによる $n_e$ と $T_e$ の予測値を、トムソン散乱で測定した $n_e$ と $T_e$ に対して表示している。□と○のマーカはそれぞれ分割法1, 2を用いた結果を表し、中心からの距離をマーカの色で表している。重回帰分析では、 $n_e$ と $T_e$ に対して計測誤差がそれぞれ約65%, 30%程度であったが、それに対してNNではデータのばらつきが非常に小さくなり、NNによって予測の品質が大きく向上した。○マーカは□マーカに比べて散らばりが小さく、分割法2が分割法1よりも良い予測を推論していることが見てとれる。このモデルを新しいデータに適用する場合、現在のデータセットで学習させると、誤差は分割法1のものになる。しかし、学習用データ量を増やすと、誤差は分割法2に近づき $n_e$ と $T_e$ の両方で約10%の誤差で計測が可能になることが示唆されている。

これらの結果は、OESデータが $n_e$ と $T_e$ を高い精度で評

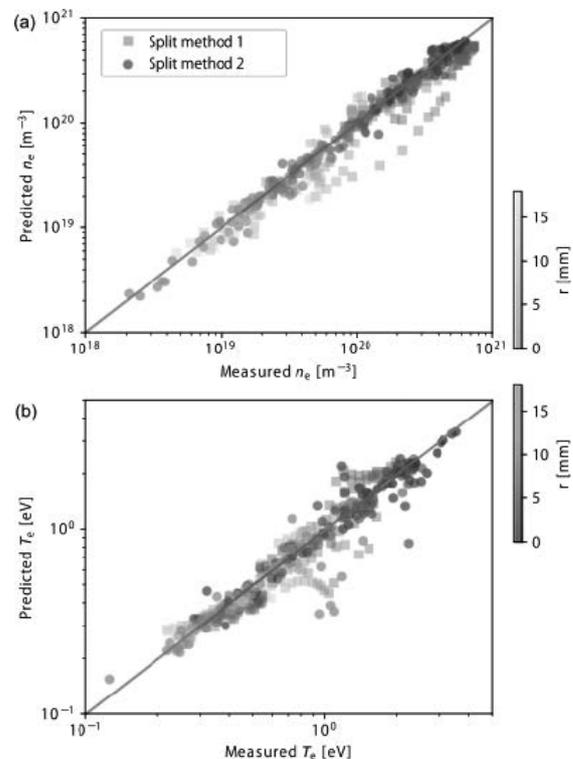


図21 NNによる(a) $n_e$ と(b) $T_e$ の予測値を、トムソン散乱で計測した $n_e$ と $T_e$ に対してプロット。□と○のマーカはそれぞれ分割法1, 2を用いた結果を表し、中心からの距離をマーカの色で表している (Reproduced with permission from [61]).

価するのに十分な情報を含んでいることを示している。そして、他の計測法が利用でき学習データを取得可能であれば、衝突輻射モデルを用いるよりも高い精度で計測が可能となることを示唆している。さらに、この方法は、レーザートムソン散乱が利用できない状況に測定領域を拡張することが可能である。例えば、より高速な検出器を用いれば、レーザーパルス周波数（現時点では10 Hz）で決まるトムソン散乱よりも高い時間分解能が得られ、またハイパースペクトルイメージング手法と組み合わせることで二次元計測も可能になる。今後、機械学習を用いた研究を進めることで、衝突輻射モデルで得られた分布からのずれを引き起こす過程を発見できる可能性がある。また、他の装置（NAGDIS-II）においても同様に $n_e$ と $T_e$ の計測に利用できることも確認されており[62]、装置を超えた手法へと展開できる可能性を示唆している。

ここまでの結果は純ヘリウムプラズマを利用してきたが、今後の検討課題の1つとして、水素・ヘリウム混合プラズマにおいて機械学習が適用できるかという点がある。水素・ヘリウム混合プラズマにおいては分子からの発光が含まれるなどの影響で、スペクトルが複雑となり発光強度をフィッティングで取得することも困難となる可能性がある。Magnum-PSIのデータを利用して、水素・ヘリウム混合プラズマにおいても、NNを用いた手法の検証を行い、純ヘリウムプラズマ同様に良い精度で $n_e$ と $T_e$ を計測することが確認され、今後実機での検証や装置間比較などの検証が期待される。

Magnum-PSIは高密度プラズマが安定して生成できるのに加えて、パルスプラズマの生成が可能であり、かつ精度が高いトムソン散乱計測装置が常に利用できるという特徴がある。研究者に加えて、優れた多くの技術者が装置を支えており、プラズマのオペレートから、計測装置のメンテナンスまでこなしている。技術職員が大きく減少している日本の大学では、なかなか考えにくい状況であり、学ぶところは多い。また、Magnum-PSIを有するDIFFER研究所は、核融合やプラズマだけではなく、エネルギーに関して幅広い研究者を擁しており、著者は他の分野の研究者との共同研究で極めて学ぶことが多かった。充実したコーヒーコーナーなど、オープンな雰囲気と交流が起こるような仕組みが作られているのも魅力的である。最近では、DIFFERの電気化学分野のBieberle-Hutter博士と議論を重ね、太陽光を利用した、水からの水素生成の光電極として着目されている酸化タングステンや酸化鉄 ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) に対する、ヘリウムプラズマ照射効果について検討してきた。タングステンにおいては、FUZZ形成による効率向上のメカニズム[63]、また酸化鉄に関してはプラズマ照射により、光電流が生じる開始電圧を大きく減少させることができることが明らかになった。その要因として表面凹凸に加えて、ヘリウムプラズマ照射が表面のヒドロキシル基もしくは酸素欠陥を減少させることに寄与していることがわかってきた[64]。このように、他の分野の研究者とも自由に共同研究が進めていくことができる環境を利用できる重要性とともに、世界が羨むような研究拠点の構築が日本で

も求められていると感じる。

#### 4.4 ドイツの研究所との周辺プラズマシミュレーション研究 河村学思 (QST), 庄司 主 (核融合研)

基礎となる物理過程がある程度絞り込める場合、数値計算コードによる研究によって装置や状況の制約をある程度外すことができ、実験と並行して数値計算研究が行われてきた。ここでは、プラズマと不純物の輸送を解いて定常状態を求めるコードの導入状況について述べる。

##### 4.4.1 周辺プラズマ輸送モデリング研究

プラズマ・核融合学会誌においてはこれまでに、二つの小特集[65, 66]でEMC3-EIRENEコードとそれを用いた研究について解説されている。詳細はそれらに譲ることにして、ここではその経緯や意義を中心に紹介する。

EMC3-EIRENEコードはMax-Planckプラズマ物理研究所で開発され、世界的に広く使われている非軸対称な磁場核融合装置に適用可能な輸送計算コードである。EMC3 (Edge Monte-Carlo 3D)[67, 68]がプラズマ、不純物イオンおよび不純物中性粒子を受け持ち、EIRENE[69]が水素分子や原子といった中性粒子を受け持つ。輸送モデルの基本となるプラズマは、水素イオン（軽水素・重水素・三重水素のいずれか一つ）と電子からなり、準中性条件が仮定されている。水素プラズマの輸送を記述する方程式系として、磁力線に沿う方向に二流体方程式（Braginskii方程式[70]の磁力線方向成分）が用いられ、磁力線を横切る方向は二流体方程式中の拡散項として現象論的にモデル化されている。

日本において初めてとなる同コードの導入は、核融合研の大型ヘリカル装置（LHD）の磁気島ダイバータ[71]やエルゴディック領域[72]の輸送解析のために行われた。その後、計算領域を拡大するグリッド開発[73]（[65]の詳しい解説参照）が行われ、ダイバータプラズマを含めた周辺領域全体の輸送解析が可能となり、開構造/閉構造ダイバータ構造の比較[73]が行われた。その結果、図22のように、実験と数値計算ガス圧が電子密度に対して同様のスケールリングを持つとともに、閉構造化で10–20倍増加することが確認された。LHDへの別の適用例としては、ネオンガスと窒素ガスを導入した放電で見られる非接触ダイバータ形成のトロイダル異方性の解析がある[74]（[65]の詳しい解説参照）。光線追跡法を用いた解析プログラムの開発によって、図23のような可視化が可能になったとともに、ポロメータや分光計測の数値合成データを生成する

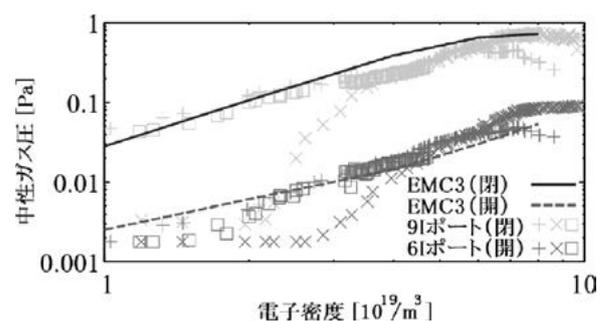


図22 炉心周辺の電子密度に対する中性ガス圧の依存性。

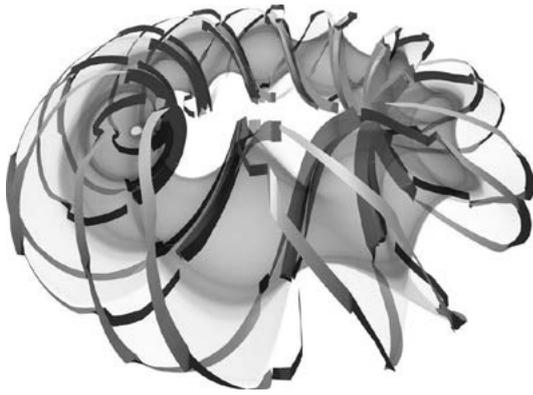


図23 不純物発光の可視化例。ネオン発光分布と帯状のダイバータ板列を示している。

ことも可能になった。

LHDの周辺領域全体の輸送計算が可能となったことで、様々な研究へのEMC3-EIRENEコードの応用が行われた。二次元炭素分光計測を模擬した計算による不純物輸送特性の研究[75]、空間的に不均一な拡散輸送係数が及ぼすダイバータフットプリントへの影響評価[76]、不純物フローの空間分布の炭素分光計測との比較研究[77]、液体ダイバータ概念REVOLVER-Dにおける液体金属の位置がプラズマへ及ぼす影響評価[78]、ダスト輸送コードDUSTTと結合した、ダスト由来の不純物輸送研究[79]、ダイバータ周辺部への不純物堆積分布評価[80]、ダイバータ板のタンゲステン化による不純物放射への影響評価[81]、水素分子の回転振動励起準位を含めた衝突輻射モデルを用いた輸送計算[82]、多数の計算結果に対してデータ科学的手法を用いてポロメータ計測から全放射パワーを推定する手法の開発[83]などの一連の研究が行われた。また、EMC3-EIRENEで計算されたプラズマ分布を背景として用いることで、LHD全体を計算領域とする粒子描像に基づく不純物輸送コードERO2.0の導入につながった。このコードについては次節で詳細に述べる。

LHD以外では、名古屋大学の直線装置NAGDIS-II[84]、量子科学技術研究開発機構のトカマク装置JT-60SA[85]、京都大学のヘリカル装置Heliotron J[86, 87]で適用された。最近では、筑波大学のGAMMA 10/PDX装置や、核融合科学研究所と西南交通大学の共同プロジェクトとして建設が進んでいるCFQS装置への適用が進められている。また、核融合科学研究所で準対称ステラレータ配位装置の検討が行われた際、補助コイルを用いてダイバータレグの長さを伸長する手法の研究が行われた[88]。

#### 4.4.2 プラズマ・壁相互作用シミュレーションコードによるLHD真空容器内部の炭素の移送解析

ユーリッヒ研究所で開発されたプラズマ・壁相互作用シミュレーションコードERO2.0をLHDに導入し、LHDの真空容器内部における不純物の移送過程の解析を行った。トラス内側のダイバータ領域に設置された方向性マテリアルプローブ(DMP[89])の計測結果と比較することによって、ダイバータ領域における炭素の損耗・堆積および移送過程を明らかにすることができたので、その詳細につ

いて報告する。

磁場プラズマ閉じ込め装置内部において、プラズマと対向壁面との相互作用(スパッタリング)によって不純物が発生する。その移送過程を明らかにすることは、核融合炉を実現するための重要な課題になっている。核融合の燃料の1つであるトリチウムは不純物の堆積層に滞留する性質があり、そのトリチウムの量と分布を予測し制御するためにも、不純物の移送過程の研究が不可欠である。また、堆積層がプラズマ放電中に剥がれるとダストになる。それがプラズマ中に侵入すると放射冷却が発生して、プラズマが消失する可能性がある[90]。このような事象を抑制するためには過度な堆積層の形成を抑制しなければならず、そのためにも不純物の移送過程を明らかにすることは重要である。LHDではプラズマ・壁相互作用シミュレーションコードERO2.0を用いて不純物の移送過程を解析した。

ERO2.0はドイツのユーリッヒ研究所によって開発されたコードであり、磁場プラズマ閉じ込め装置内の各種不純物の移送過程を解析することができる[91]。ERO2.0の前身となるEROは1990年代の中ごろから開発が進められ、TEXTORにおける可動リミター領域の解析に用いられた。これによりリミターから放出された各種不純物の移送過程を明らかにするなどの多くの研究成果が得られた[92]。LHDにおいても炭素再堆積研究に用いられた[93]。ただし、EROには解決すべき3つの制限があった。

1. 任意の3次元形状のプラズマ・真空容器壁等を考慮できない。
2. 1辺の長さが約0.2 mからなる立方体の中の領域しか扱えない。
3. 並列計算ができないため正確な結果を得るのに時間を要する。

上記の課題を解決するために、2010年代の終盤にERO2.0が開発された。このコードには大規模並列計算手法が取り入れられており、JETトカマク装置のフルトラス配位での真空容器壁表面等のベリリウムの損耗・堆積・移送過程の詳細な解析が可能となった。

ERO2.0コードをLHDのダイバータ領域における炭素の移送過程の解析に用いた。LHDではダイバータ板の材料として等方性黒鉛を用いており、炭素が主な不純物となっている。従来からLHDではDMPを真空容器内部の各所に設置している[89]。DMPは円盤とその中心から5.5 mm突き出た円筒の突起で構成されている(図24(a))。突起の周囲の円盤表面の炭素の堆積密度分布から、DMPが設置された場所の炭素の移送過程を調べることができる。これをプラズマ放電実験開始前に設置し、実験終了後

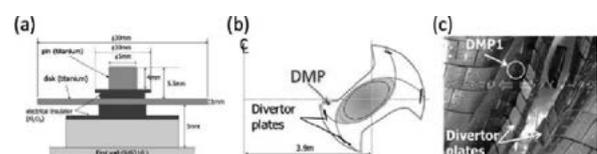


図24 (a) 方向性マテリアルプローブ(DMP)の断面図、(b) DMPの設置場所を示したポロイダル断面図、(c) LHDのトラス内側の真空容器内部に設定されたDMP写真。

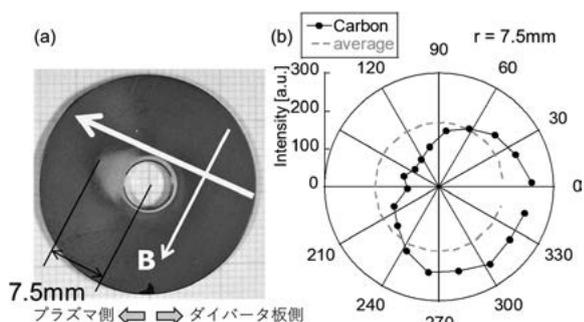


図25 (a)実験期間終了後に取り出されたDMPの円盤表面の写真, (b)突起の周囲の円盤上に堆積した炭素の表面密度分布の計測結果.

に取り出した. トーラス内側のダイバータ領域 (図24(b), (c)) に設置されたDMPの炭素の密度分布を調べたところ, 突起を中心とした周囲の分布が左右で非対称になっていた (図25(a), (b)). 突起付近の左上には炭素がほとんど堆積していなかった. また, 突起から離れた左上の広い領域で炭素が低密度で堆積していた.

左右非対称な分布が形成された理由を明らかにするためにERO2.0で炭素の移送過程を解析した[94]. 図26はこのために作成したトロイダル角36度分の3次元モデルである. トロイダル方向に領域を限定することによって短時間で計算を終了できるようにした (トロイダル両端部には周期的境界条件を設定). なお, EMC3-EIRENEによって求められたLHDのプラズマパラメータの3次元分布を背景プラズマ分布として用いた. 実験期間中のプラズマの密度と温度と磁場強度・向き・配位を考慮して各条件におけるプラズマパラメータの3次元分布を予め求めておき, 各条件でのDMPにおける炭素の正味の粒子束密度分布を計算した. 次に, 各条件の総放電時間を調べ, その総放電時間を各条件での粒子束密度に掛けることによって, 各条件の密度分布を求めた. そして, 全ての実験条件の密度分布を重ねることによって, 実験期間中の炭素の堆積密度分布を求めた. その結果を図27(a), (b)に示す. これは観測結果を良く再現している.

ERO2.0によって左右非対称な分布が形成された理由が明らかになったので, それについて説明する. 初めに, トー

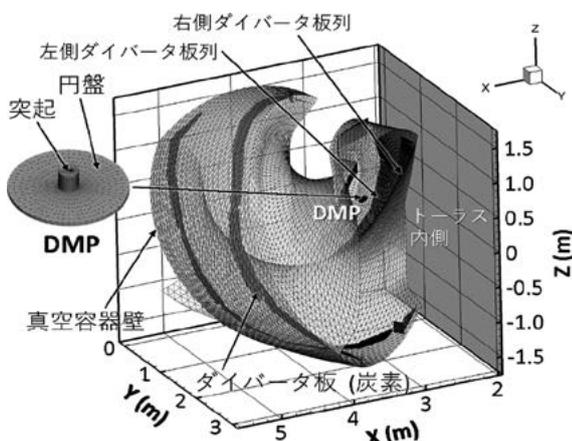


図26 ERO2.0コードで用いたLHDの3次元真空容器壁モデル (36度分).

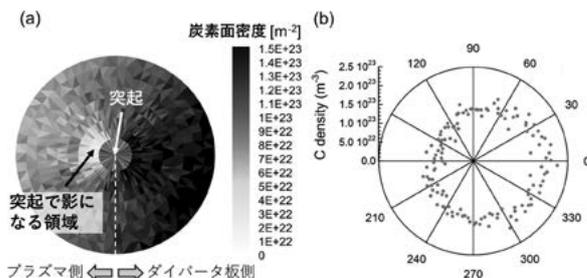


図27 (a)ERO2.0コードで計算されたDMPの円盤上に堆積した炭素の表面密度分布, (b)突起の周囲の円盤上に堆積した炭素の表面密度分布の計算結果.

ラス内側に設置されている左側ダイバータ板列上でのみスパッタリングによって炭素が放出されると仮定した. この場合のDMPの炭素の密度分布を計算した結果, 円盤右側 (ダイバータ側) の堆積密度は高い一方, 左上側 (プラズマ側) の広い領域で堆積密度は低いことがわかった. 次に, 右側ダイバータ板列上でのみ炭素が放出されると仮定した. この場合の密度分布を計算した結果, 突起付近の左上側以外でのみ炭素が堆積することがわかった. この結果を図示すると図28のようになる. トーラス内側の左側ダイバータ板列から放出された炭素の一部はDMPに到達する. ただし, 左側ダイバータ板列はDMPの近くにあるため, そこから見ると円盤の左上側の広い領域は突起によって隠れており, 炭素はそこに直接到達することはできない. 一方, 右側のダイバータ板列はDMPから離れて設置されている. そこから見ると円盤の左上側の領域しか隠れていないことから, 炭素はそこ以外の領域に到達できる. 以上のような理由によって, 実際に観測されたような左右非対称な分布が形成されたことがわかった.

DMPにおける炭素の堆積密度分布をERO2.0用いて解析することで, LHDのダイバータ領域における炭素の移送過程を明らかにすることができた. このコードは任意の3次元形状のプラズマ閉じ込め装置における不純物の移送過程を解析できる非常に強力なツールであることから, 今後様々な装置におけるプラズマ・壁相互作用の解析への適

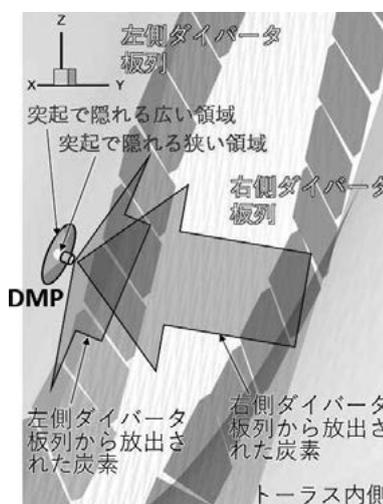


図28 ダイバータ板から放出された炭素がDMPの円盤上に堆積する過程を示した概念図.

用が期待される。

4.5 UCSDにおけるタングステンの高密度混合プラズマばく露実験 宮本光貴 (島根大)

4.5.1 PISCES装置を用いたプラズマばく露実験

タングステン中の水素同位体挙動の把握は、炉内トリチウムインベントリの安全性に関わる重要な課題であり、古くからイオン加速器や線形プラズマ装置を用いた照射実験が精力的に取り組まれてきた[95]。しかし、過去の実験の多くは、単一の水素同位体によるイオン照射やプラズマ照射によるものであり、実際の燃焼プラズマ下で予想されるヘリウムや他の不純物原子の影響に関しては考慮されていない。ITERでは、第一壁にベリリウムの使用が検討されていたこともあり、プラズマ中に混入したベリリウムがタングステン表面特性に少なからず影響することも予想されていた。こうした背景から、カリフォルニア大学サンディエゴ校UCSDのPISCES装置[96, 97]においては、ヘリウムやベリリウムを含む系統的な混合プラズマ照射実験に早くから取り組まれてきた。そこで、PWI協定に拠る共同研究で、ITERにおけるトリチウムインベントリの正確な予測のために、混合プラズマ照射下でヘリウムやベリリウムの不純物がタングステンの水素同位体挙動に与える影響を評価した。

4.5.2 PISCES-Bの特徴

本研究で用いたPISCES-Bは、ベリリウムを含む混合プラズマを用いた材料照射実験が可能な世界的にも類をみない特徴的な装置である。ベリリウムは、その粉塵やヒュームを吸入すると呼吸器の障害による人体への影響が生じることから(詳しくは、解説記事[98]など)、実験においては徹底した安全管理がなされ、入室を伴う作業は、全身密

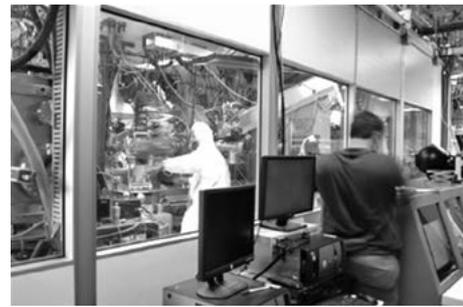


図29 PISCES-B での実験中の様子。

閉タイプの防護服とマスクを装着した実験室内の作業員2名と実験室外の監督者1名が常にグループになって行われている(図29)。照射実験中のプラズマパラメータは、試料の上流側に設置された可動式のラングミュアプローブにより計測され、入射イオンエネルギーは、試料に印加したバイアス電圧によって調整される。さらに、混合プラズマ照射におけるイオン密度比は、重水素とヘリウムはマスフローコントローラーにより、ベリリウムは真空蒸発法によりプラズマ中への流量が調整され、プラズマ発光分光により計測され[99]、試料への入射イオン線束比が一定となる様に制御されている。また、試料温度は、試料背面に直接接触した熱電対により計測されており、水冷あるいは空冷の流量を調整することにより制御される。プラズマばく露後の試料は、試料搬送機構の利用により、大気に曝すことなく別チャンバーへ移動後、AES、XPSおよびSIMS分析が可能となっている。

4.5.3 ヘリウム、ベリリウム混合の水素保持特性への影響

図30は、本PWI共同研究を通して得られた結果をまと

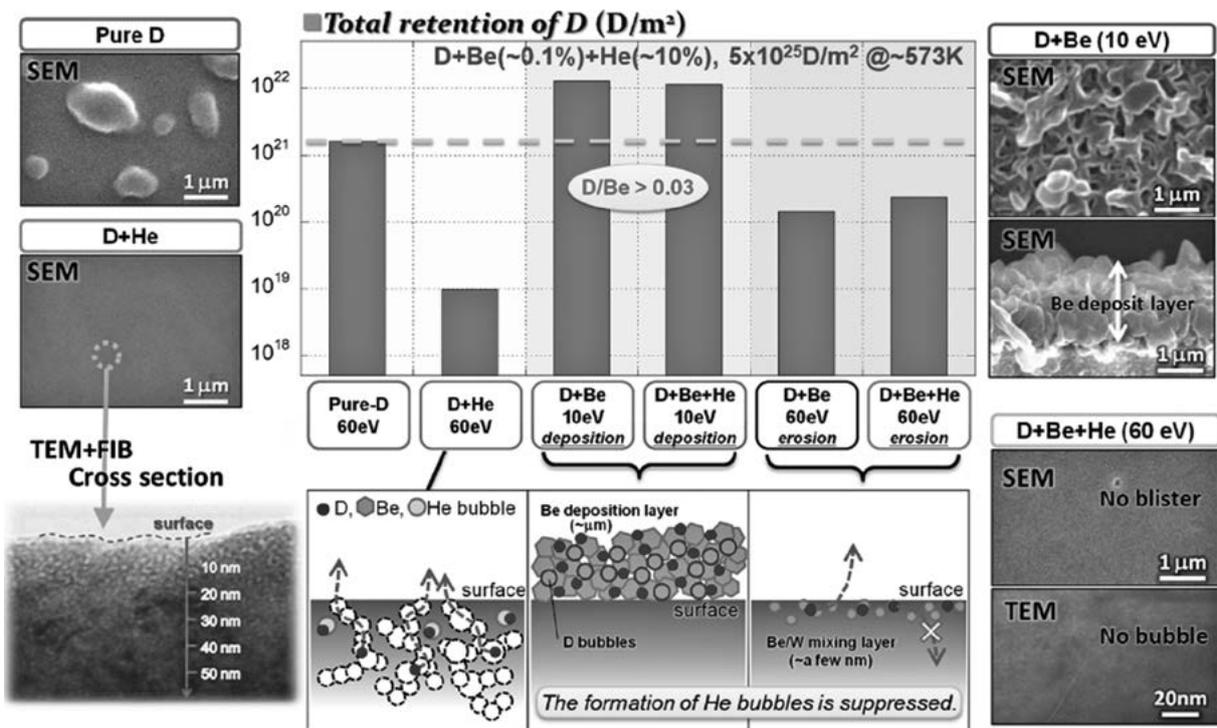


図30 PISCESの混合高密度プラズマに試料温度573 K でばく露したタングステンの微細組織や水素保持量に与えるヘリウムおよびベリリウム混合の影響[100, 101].

めている。試料温度573 Kにおいて混合プラズマ照射したタンゲステンの重水素保持特性や微細組織に与えるヘリウムおよびベリリウム混合の影響について概略を示している[100, 101]。

重水素プラズマへのヘリウム混合により、タンゲステン表面のプリスタリングの形成が抑制され、試料表面直下には高密度の微細なヘリウムバブルが形成する。さらにヘリウム混合により重水素保持量が2桁程度減少するが、これは高密度に形成したヘリウムバブルが互いに繋がり、重水素の拡散パスとして機能したためだと考えられた。

また、ベリリウム混合プラズマばく露においては、ヘリウムの有無にかかわらずイオンの入射エネルギーが低い場合 ( $E_i \sim 10$  eV) は、タンゲステン試料表面にベリリウムを主成分とする堆積層が形成し、高い場合 ( $E_i \sim 60$  eV) は、ベリリウムの堆積とスパッタリングによる損耗がほぼ平衡し、表面5 nm程度の領域にのみタンゲステンとベリリウムの混合層の形成が確認された。この結果、ベリリウム堆積条件では、ベリリウム重水素化物や重水素バブルを含む共堆積層が連続的に形成し、この堆積層の高い重水素濃度 ( $D/Be \sim 0.03$ ) により重水素保持量は大幅に増加した。一方、ベリリウム損耗条件では、重水素保持量は、重水素プラズマ照射時と比較して一桁程度減少した。試料表面に形成する僅かなBe/W混合層が、重水素の試料内部への拡散を阻害していると考えられるが、その機構は明らかになっていない。さらにBe/W混合層の形成により、ヘリウムバブルの形成が抑制され、ヘリウム混合による重水素捕捉量への影響はほぼ消失した。

これらの結果から、プラズマ中へのヘリウム混合は、プラズマ対向面の微細組織や重水素保持特性に著しい影響を及ぼすものの、さらなる不純物混合があると、堆積層の形成等により、ヘリウムの働きを抑制し、不純物がより支配的な影響を有する可能性が示された。これらの成果は、PWI協定を通じたユニークな装置の利用と日本国内の分析機器を相補的に用いることで得られたものであり、国際共同研究の意義を示すものである。

#### 4.5.4 国際共同研究を通して思うこと

UCSDのPISCESを用いた国際共同研究は、本PWI協定のみならず、日米科学技術協力事業でも幾度も実施の機会をいただいている。主に大学の授業のない夏季休業中の2週間から1ヶ月間程度の滞在になるが、私にとってはジメジメ猛暑の山陰を抜け出して1年を通して温暖で快適に過ごせるサンディエゴへの訪問は、否が応でも気持ちが華やぐものである。

UCSDの研究所内では、Russell Doerner博士（前PI）、Matthew Baldwin博士（現PI）、西島大輔博士をはじめ多くの研究者に実験にご協力いただいたほか、結果に関する議論や課題に関する新たなご提案をいただき、研究を進めることができた。また、滞在時に強く感じたのは、多くの優秀な技術スタッフが在籍しており、装置のオペレーションやメンテナンスを通して研究活動を共に担うパートナーとして欠かせない存在であるという認識が形成されているところである。わが国では一部の有力研究機関を除



図31 UCSD キャンパス構内のブリュワリー。

けば、力のある技術スタッフを確保することは難しい状況にあり、研究力強化のための大きな課題であると感じている。研究室の状況に依るものと思うが、PISCESグループでは、スタッフは総じて早朝から出勤されており、実験日は装置の立ち上げから、防護服の装着を伴う試料交換、実験目的に応じた装置のオペレーションなど、共同研究の実施に大きく貢献していただいた。予定の実験が早く終了した際には、日の高い時間からキャンパス構内のブリュワリーで歓談したのはいい思い出となっている（図31）。

なお、PISCES-Bは2021年にその役割を終えて、シャットダウンされた。一方で、新たな直線型プラズマ装置PISCES-RF[102]の運用が開始され、将来的には高エネルギー中性子照射模擬のためのタンデム加速器を導入することにより、高密度プラズマと高エネルギー重イオンビームの同時照射が予定されている。燃焼プラズマと材料との相互作用研究を牽引するいっそう魅力的な研究機関となることが期待される。

#### 4.6 ユーリッヒ研究所における材料へのプラズマ照射実験 坂本隆一（核融合研）

##### 4.6.1 PSI-2におけるヘリウム照射共同研究

ヘリウムは水素と比べて材料中の格子欠陥との相互作用が強く、高温環境下でも材料中に捕捉され損傷組織形成に大きな影響を及ぼすことが、照射実験や計算機シミュレーションによって示されており、ヘリウム灰が生じる核融合原型炉（DEMO）や、計画見直し前のITER計画でヘリウム放電実験を想定していた初期実験フェーズでは重要な課題である。これまで、LHDのヘリウム放電を用いて、高温環境下におかれたタンゲステンへのヘリウム照射実験を行い、(1)ヘリウム照射では弾き出し損傷が生じないような低エネルギー粒子の照射でもバブル等の損傷組織が形成され、(2)入射ヘリウムの飛程 ( $< 15$  nm) を超えた深部 (70–100 nm) までバブルが形成されることを明らかにした。さらに照射後焼鈍実験によって、(3)ヘリウムによる損傷組織のピニング効果が非常に強いことを示した[103, 104]。LHDを用いたプラズマ照射実験は粒子束が低く、実効放電時間が短いために照射量が $10^{23}$  / $m^2$ 程度にとどまるが、照射量が大きくなった場合の材料損傷への影響を知ることが、機器寿命への影響を調べる上で重要な情報になる。DEMO第一壁を想定した場合、タンゲステンの照射温度は低放射化フェライト鋼の使用温度 (550℃) 程度になるため、Fuzzが形成される温度領域よりも低い温度条件下におけるヘリウム照射実験を研究のターゲットとし、

PWI協定に拠る共同研究として、ユーリッヒ研究所の直線プラズマ装置 PSI-2 を用いて、高照射量領域のヘリウムプラズマ照射実験を行った。PSI-2 装置は(1)水冷却と電気ヒーター加熱を両備した試料台があるため、照射温度をプラズマからの粒子束とは独立に設定できること、(2)照射粒子束を  $10^{20}/\text{m}^2/\text{s}$  から  $10^{23}/\text{m}^2/\text{s}$  の広い範囲で設定でき、フルエンスが最大で  $10^{27}/\text{m}^2$  まで照射できることから、本研究に適した装置である。本研究は、ユーリッヒ研究所、フランスの CEA、および Aix-Marseille 大学と核融合科学研究所の共同研究として実施し、核融合科学研究所では、主に透過型電子顕微鏡を用いて、PSI-2 でプラズマ照射した試料表面の微細構造形成に関わる分析を行った。

#### 4.6.2 波状表面構造形成

温度制御したタングステン試料にヘリウムプラズマを照射し、照射損傷組織形成に及ぼす照射温度の影響を調べた。Fuzz 構造が形成されない 1000 K 以下の温度領域においては、照射量が  $10^{23}/\text{m}^2$  では直径 3–15 nm のホール構造が形成され、 $10^{26}/\text{m}^2$  ではナノスケールの波状表面構造が形成される [105]。波状表面構造は、図 32 に示すように結晶粒によって方向と間隔が異なる。電子線後方散乱回折法 (Electron BackScatter Diffraction, EBSD) による結晶方位同定を、透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy, TEM) による断面観察や走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM) による表面形状観察と比較することにより、図 33 に示すように照射後のタングステン表面は  $\{100\}$  面になる傾向があることを発

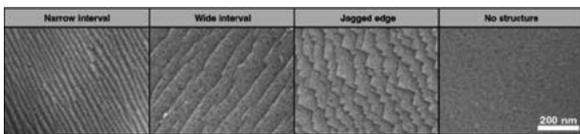


図32 ヘリウムプラズマ照射によって形成される典型的な4種類の波状表面構造のSEM像(照射温度473 K, 照射量  $1 \times 10^{26}/\text{m}^2$ ) [106].

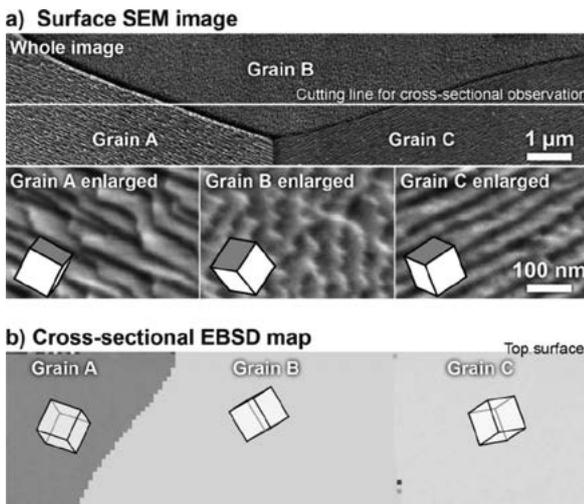


図33 a)ヘリウムプラズマを  $1 \times 10^{26}/\text{m}^2$  まで照射したタングステン表面のSEM像と各結晶粒の拡大SEM像。立方体はEBSDで同定した結晶方位。灰色で示した  $\{100\}$  面が波状表面構造の表面と一致している。b)白線に沿った断面のEBSDマップと結晶方位 [106].

見した [106]。  $\{100\}$  面からの回転角が大きい  $\{110\}$  面の時、波状構造の間隔は 40 nm 程度で最も狭くなり、材料表面が  $\{110\}$  面から傾くに従って間隔は広がり、  $\{100\}$  面では波状構造が形成されない。波頭は表面近傍に位置する  $\langle 100 \rangle$  方向に整列し、2つの直行する  $\langle 100 \rangle$  が表面近傍に位置する場合は、波頭が鋸歯状になる。波高は波状構造の間隔によらず 8 nm 程度であり、ヘリウム照射によって大きな損傷が導入されている深さに相当する。

このような波状表面構造は、図 34 に模式的に示すように、照射表面が  $\{100\}$  面になる傾向と、結晶粒本来の結晶方位との相違を緩和するために形成されると説明できるが、なぜ、照射表面が  $\{100\}$  面になるのかは、未解決である。一つの可能性としては、スパッタされた原子の再堆積やスパッタリング過程で表面から離脱されずに留まった表面吸着タングステン原子の拡散の結晶方位依存性により形成することが挙げられる。

また、この波状構造がヘリウムプラズマ照射特有の現象であることを示すために、水素/ヘリウム混合プラズマおよび水素プラズマによる照射実験も実施した。図 35 に示す通り、純粋な水素プラズマにおいては、バブルやホールは形成されない点でヘリウムプラズマ照射と大きな違いがあるものの、ヘリウムプラズマ、水素プラズマいずれでも波状表面構造が形成され、ヘリウムプラズマ特有の現象ではないことを明らかにした。

波状構造形成とともに、表面損耗にも結晶方位依存性があることが明らかになっている。共焦点レーザー顕微鏡で

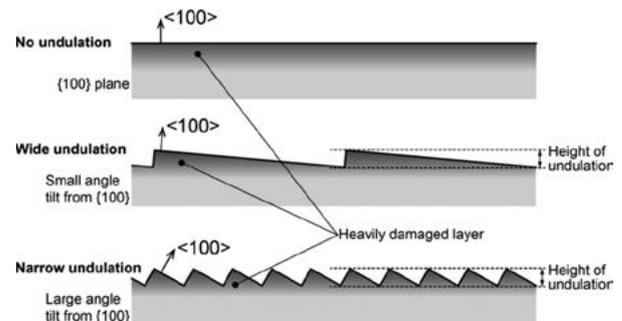


図34 波状表面構造の結晶方位依存性の模式図 [108].

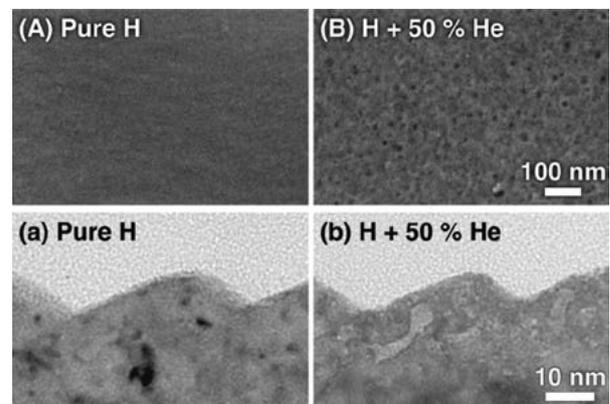


図35 純水素プラズマ及び水素/ヘリウム混合プラズマ照射 ( $1 \times 10^{26}/\text{m}^2$ ) による表面構造変化。(A, B)波状表面構造が形成されない  $\{110\}$  面のSEM像。(a, b)断面TEM像 [107].

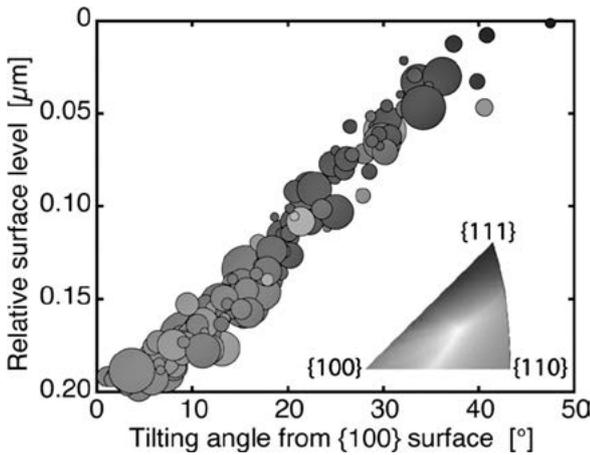


図36 ヘリウムプラズマを $1 \times 10^{26}/\text{m}^2$ まで照射したタングステン表面高さの結晶方位依存性[108]. シンボルの色と大きさは、結晶方位と結晶粒の面積を示す.

計測した各結晶粒の表面高さを、結晶方位の{110}面からの傾きに対してプロットすると、図36に示すように相対的な表面高さは{110}面からの傾き角に比例しており、波状表面構造が形成されない{110}面が最も損耗量が大きくなり、 $3 \times 10^{26}/\text{m}^2$ の照射量では、おおよそ100 nmの損耗差が観測されている[107].

#### 4.6.3 微量な不純物による材料損耗

プラズマ照射前後の試料の重量差から、グローバルな損耗特性を評価した結果を図37に示す。ヘリウムプラズマ照射、水素プラズマ照射いずれでもタングステン試料の損耗量は同一であり、スパッタリングの閾値エネルギー（水素：500 eV、ヘリウム：110 eV）よりも十分低いエネルギー領域でも有意な損耗が観測されている。これらのことから、主動作ガス以外に微量に含まれる不純物によって損耗が引き起こされていることが推測される。本研究の範囲では、プラズマ計測によってプラズマ中の不純物量を同定

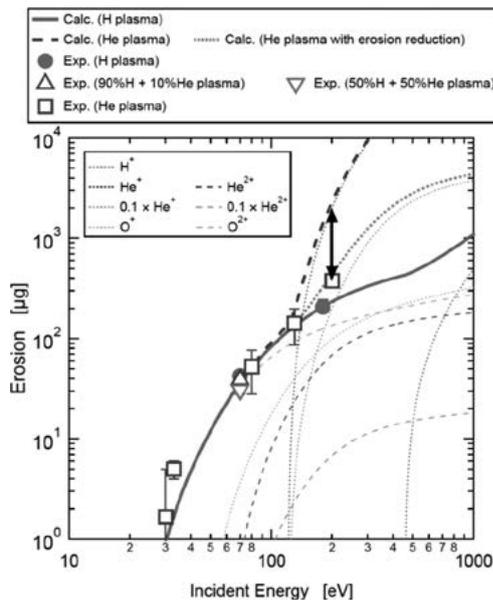


図37 プラズマ照射 ( $1 \times 10^{26}/\text{m}^2$ ) による実効損耗量の入射エネルギー依存性[108]. シンボルと線は実験値とスパッタリング率から計算した予測値を示す.

することはできなかったが、不純物が酸素であると仮定した場合、観測された損耗量とスパッタリング率[108]から推定される酸素不純物量は0.13%となる。周辺プラズマに相当する低エネルギー領域では、このように微量な不純物が損耗量を支配していることは、ダイバータ熱負荷低減のために積極的に不純物を導入することが想定される実機におけるプラズマ対向材料損耗評価において重要な意味を持つ。一方で、主動作ガスであるヘリウムによるスパッタリングが支配的になる高エネルギー領域 (200 eV) では、図に矢印で示した通り、おおよそ1桁の損耗量の低下が観測された。

この結果を説明する仮説としては、ヘリウムプラズマ照射によって表面下10 nm程度の領域に形成されるヘリウムバブル層と飛程が同程度になるヘリウムの場合は、バブルによって入射エネルギーが吸収され、スパッタリング率が低下することが挙げられる。対して、酸素の飛程は4 nm未満であり、バブル層に届かないためにスパッタリングの低下は生じない。ヘリウムプラズマ照射において、損耗量が低下する現象はPISCESでも観測されており[109]、普遍的な現象であることが示されている。

#### 4.7 DIFFER, ユーリッヒ研究所におけるタングステン中水素同位体の挙動の共同研究

リ ハンテ (大阪大学)

##### 4.7.1 はじめに

核融合装置のプラズマと壁の界面における水素同位体挙動は、核融合装置における主要な運転や物理学および工学的指標を支配する。プラズマ側には、スクレイプオフ層での運動量、エネルギー、粒子のバランスに影響を与え、材料側にはトリチウムの輸送、蓄積、および透過に影響を与える。このように本質的に結合した相互作用が存在するにもかかわらず、問題を扱いやすくするためにプラズマと材料の界面に境界条件が導入されている。したがって、材料側では、水素同位体の振る舞いは、適切な境界条件の下で欠陥におけるトラッピングを伴う拡散問題に単純化される。そのような系の拡散方程式は次式で表される：

$$(\partial C_L)/\partial t + (\partial C_T)/\partial t = D_L \nabla^2 C_L \quad (2)$$

ここで、 $C_L$ は格子中の水素濃度（溶質）、 $C_T$ は捕獲された水素の濃度、 $D_L$ は拡散係数である。通常、トラップモデルは、解を得るために関数形式として $C_T(C_L)$ で定義される。このようなモデルを用いることで、幅広く、実験室や核融合装置から得られるデータを解釈することに成功している。主要なプラズマ対向材料としてタングステンが台頭して以降、内在的または照射誘発欠陥のトラップ特性（すなわち、 $C_T$ )を理解するための取り組みが続いてきた。しかし表面近傍における特性変化が、水素輸送の境界条件 ( $C_L(x=0,t)$ )、すなわち蓄積および透過のダイナミクスにどのような影響を与えるかについてはあまり着目されてこなかった。以下に述べる共同研究の基礎となるのは、この後者の領域である。具体的には、混合材料表面層の形成をもたらす不純物の影響と、熱負荷による表面形状の変化について議論する。研究はダイバータに関連する条件に限定

される。

#### 4.7.2 研究の概要

水素同位体の蓄積と透過のダイナミクスは、トリチウムについて、自給率、増殖、発電所設計における安全性に関わる計算において重要な役割を果たす。水素輸送に対する不純物の影響は、境界条件の変化として拡散の枠組みで定量的に扱うことができる。これは、表面混合物質層が数十 nm オーダーの薄い層であることに起因する。必要とされるのは、拡散係数や再結合係数など、混合材料表面層における水素の挙動に関連する物理パラメータである。そこで課題となるのは、まずそのようなパラメータを決定し、次に核融合装置においてそれが正しいことを検証することである。これは、プラズマと材料の界面で起こる複雑な物理的・化学的反応から生じる表面層の動的状態のため、些細な課題ではない。更に、物理・化学反応と水素輸送のダイナミクスを制御する粒子流束が桁違いに大きいため、実験室スケールで決定された物理パラメータが核融合装置において適切であるかどうかは明らかでは無い。4.7.3節に示す我々の研究成果は、窒素不純物のケースで、実験室データからダイバータ関連条件へのスケージングが可能であることを示したものである。

一方、物理化学的特性の空間勾配を伴う表面形状の変化（融解、クラックなど）の熱負荷誘発効果は、拡散の枠組みに組み込むことがより困難である。改質層は異方的であり、マイクロメートルの深さまで広がっているため、定量的な計算には3次元的な取り扱いが必要となる。このような計算は確かに実現可能ではあるが、高い実験および計算コストがかかり、一般性も損なわれる。4.7.4節に示す我々の研究成果は、そのようなコストを払うことに妥当性のないことを実験的に示したものである。

ダイバータで予想される境界条件に近い溶質水素濃度に近づくには、線形プラズマ装置のみが提供できるような、高い粒子流束（ $\sim 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）が必要であり、PWI協定の枠組みに拠り、以下の直線型プラズマ装置を利用できることとなった：(1)オランダDIFFERのMagnum-PSI、(2)ドイツユーリッヒ研究所のPSI-2。加えてこの枠組みは、核反応分析による表面近傍状態の特性評価に必要なイオンビーム加速器へのアクセスを容易にした。

#### 4.7.3 Magnum-PSIにおける重水素・窒素実験[110]

タングステンダイバータ板に対する定常熱負荷を低減するため、不純物として窒素（N）、ネオン（Ne）、アルゴン（Ar）気体を導入する方法が提案されている。ITERダイバータ領域のプラズマにおいては、窒素が適切である[111]。しかし窒素は水素の蓄積とプリスタ形成を増加させることが報告されていた[112, 113]。この原因として、タングステン中の水素拡散を、表面近傍における変化（窒化物形成等）が増加することを透過実験により明らかにした[114]。

本課題に関しては、Magnum-PSIを用いて行う重水素・窒素（D + N）プラズマ暴露後の表面近傍（ $< 100 \text{ nm}$ ）の水素蓄積量と組成特性の温度依存性に着目し研究を進めた（図38）。多結晶タングステン試料をD + N混合プラズ

マ、またはDのみのプラズマに暴露した。Magnum-PSIにおける、初めてのD + N混合プラズマ実験であったため、プラズマ中の窒素濃度は評価できなかった。プラズマパラメータは密度 $\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_e \sim 1.5 \text{ eV}$ であった。試料温度はプラズマパラメータと試料ホルダの熱接触を変化させることで制御した。

D + N混合プラズマ暴露後の表面のD蓄積量は、Dの場合より10倍程度大きいことが明確に観測された。また、DはNと同様に蓄積されたことが図38からわかる。さらに、DとNの表面濃度の温度依存性が、阪大で行った透過実験と相関性があることが明らかになっている。

#### 4.7.4 PSI-2における熱負荷誘発効果実験[115]

本課題に関しては、電子ビームにより熱負荷を与えたタングステン試料を用意し、タングステンへの重水素の照射実験を行い、熱負荷が水素輸送と蓄積に及ぼす影響を調べた。従来このような巨視的な表面の変化が水素の輸送と蓄積に与える影響についてはあまり着目されてこなかった。

まず、核融合科学研究所の超高熱負荷試験装置ACT2を用いて溶融実験を行った。本実験での熱負荷はVDE（vertical displacement event）を模擬したものであり、吸収熱負荷は約 $190 \text{ MW/m}^2$ と $230 \text{ MW/m}^2$ の二種類、各熱負荷で照射時間を0.08、0.12、0.16 sの三種類で変化させた（図39）。その後、PSI-2装置を用いてDのみのプラズ

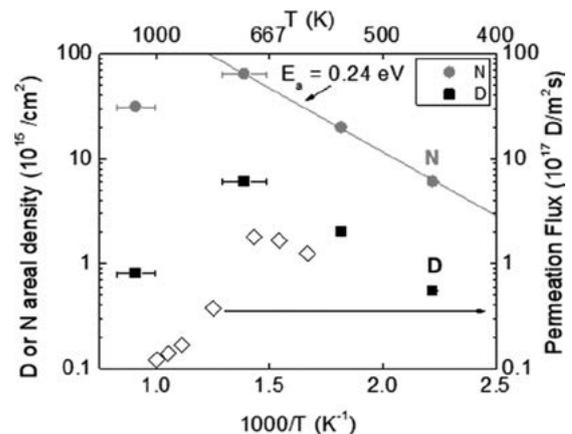


図38 D+N混合プラズマ暴露後のDとNの表面濃度[110]と阪大で行ったD+N照射時のD透過フラックス[114]の温度依存性。

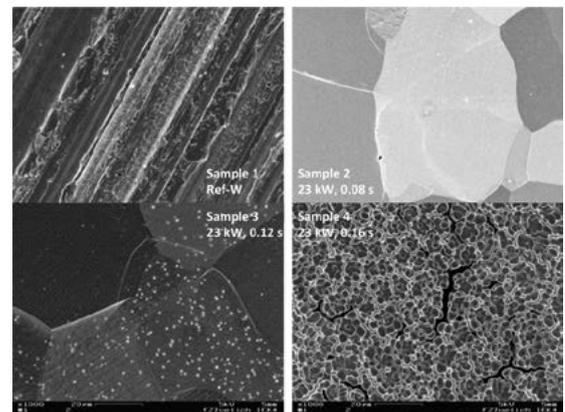


図39 熱負荷によるタングステンの表面変化。

マにタングステン試料を暴露した。プラズマ暴露時の温度は200°Cで固定した。表面の変化にかかわらず、Dの表面蓄積量はほぼ同じであることが明らかになった。このような成果は再結晶化されたタングステン試料と再結晶化されなかった試料の透過特性[116]と一致することがわかった。

#### 4.7.5 共同研究のインパクト

本共同研究の結果は、輸送の境界条件設定において不純物が果たす重要な役割と、そのような効果が熱負荷による効果よりも桁違いに大きいことを明確に示している。以上の結果は内外の他の研究グループによる新たな研究に波及した。例えばタングステンにおけるN, Ne, Ar不純物効果の詳細調査(例:参考文献[117]および参考文献[117]中の引用, 鋼材料[118]への拡張などである。また標準的な拡散トラッピング・モデル(式(2))を拡張する際にこのような不純物効果を含める必要があることも明らかになった[119]。対照的に、表面融解効果に対する関心は当然のことながら低い[120, 121]。すべての結果は~50%のオーダーの変化を示しており、N不純物の場合のように決して桁違いではない。

しかし、これらの結果は、ダイバータで働く二つの相反する力を端的に示している。注入された不純物は、水素輸送の境界条件に大きな影響を与えながら、表面近傍とその特性を連続的に変化させる。例えば、He, Ne, Arの混合層[122, 123]は内向きの輸送を減少させ、N[114]やC[124]の混合層は内向きの輸送を増加させる。一方、ELM (Edge Localized mode) やVDE (vertical displacement event) のような熱負荷事象は、大きな温度変化によって表面を「純粋な」タングステンに近い状態に戻す作用がある。また、表面近傍のトラップサイトをアニール除去するという利点もある。しかしながら、発電所の設計を考慮する上で、プラズマ対向材料のこのような動的な進化状態を定量的にモデル化することは、依然として未解決の課題である。

最後に、PWI協定に拠って、実験室で研究されてきた物理学の基礎を大規模な核融合装置に拡張、関連付けることができ、研究全体のインパクトを高めることが可能となった。また、国際的な共同研究者ネットワークを有機的に拡大するプラットフォームを提供した。ITERの運用開始や核融合スタートアップが台頭する時代においては、より基礎的な視点を持つ小規模なグループがもたらす重要性や潜在的な貢献が見過ごされがちである。しかし、今回のPWI協定が私たちの研究を支えてきたように、将来にわたり共同研究の枠組みがこのような小規模なグループを支え続けることを願っている。

## 5. まとめと今後の展望

本稿では、欧州、米国、豪州、英国、日本が参加しているIEA PWI協定と、初めての国際共同研究を本協定に拠り実施した若手研究者の体験、またシニア研究者が本協定に拠り実施した国際共同研究の成果を紹介した。本稿では紹介しきれなかったが、他にもプラズマ対向壁へのトリチウム蓄積に関する研究[125-128]や、タングステン合金開発[129]に関わる研究などが実施され成果を得てい

る。PWI協定に拠り、非接触プラズマ研究、プラズマ計測、プラズマ・壁相互作用、周辺プラズマシミュレーションなど、幅広い国際共同研究が行われていることがわかりいただけたかと思う。

PWI協定は、PWI実験装置、主として直線型プラズマ装置を用いた共同研究の枠組みである。このような装置は大型・中型核融合装置に比べて小回りが利き、計測系の設置も比較的容易であり、核融合研究開発状況の変化に応じて機動的に新たな研究を立ち上げることも、また新たなプラズマ対向材料や機器について、大型核融合装置で使用される前にその特性やプラズマとの相互作用の研究を進めることも、比較的単純な系であることから大型核融合装置では研究し難いプラズマ・壁相互作用の素過程を明らかにすることなどができる。第2章の表1に示したようにPWI実験装置は、それぞれに特徴のある装置である。日本の若手研究者や学生が、それらの特徴を活用した国際共同研究を推進すること、新たに国内に特徴ある装置を開発して国際共同研究を主導していくことを期待する。

最後に、核融合科学研究所は毎年、若干名ですが、PWI協定に拠る国際共同研究のための海外渡航助成を行っています。公募により助成を希望する人を募り、核融合科学研究所教育改善室研究協力委員会連携研究専門部会(PWI)(前PWI協定国内技術委員会)で採否を審議します。是非ご応募ください。特に、学生、若手の方々の応募をお待ちしています。PWI協定に拠る国際共同研究に関するご質問があれば、著者増崎までお問合せください。

## 謝辞

本稿をまとめるにあたってご助言、ご協力をいただいた、2023年度、2024年度PWI国内技術委員会委員の朝倉伸幸先生、上田良夫先生、利根川昭先生、花田和明先生、坂本瑞樹先生、波多野雄治先生、門信一郎先生、時谷政行先生に感謝申し上げます。また、これまでTEXTORおよびPWI協定国内技術委員を務めてくださった先生方、国際共同研究へのご尽力に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] <https://www.iea.org/programmes/technology-collaboration-programme>
- [2] 核融合科学研究所三十年史(核融合科学研究所, 2019).
- [3] 「核融合の歴史を遺す座談会 - 核融合研究と国際交流 -」プラズマ・核融合学会誌 84増刊(2008).
- [4] J.F. Caneses *et al.*, *Phys. Plasmas* **24**, 113513 (2017).
- [5] Y. Nakashima *et al.*, *Nucl. Fusion* **57**, 116033 (2017).
- [6] T. Seto *et al.*, *J. Plasma Phys.* **90**, 975900401 (2024).
- [7] S. Kado, *Plasma Fus. Res.* **14**, 1 (2019).
- [8] N. Ohno *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **19**, 458 (2019).
- [9] K. Hanada *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **27**, 101013 (2021).
- [10] T. Takimoto *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **19**, 352 (2019).
- [11] A. Kreter *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **68**, 8 (2015).
- [12] B. Unterberg *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **86**, 1797 (2011).
- [13] W. Ou *et al.*, *Nucl. Fusion* **62**, 076010 (2022).

- [14] <https://www.differ.nl/facilities/upgraded-pilot-psi>
- [15] A. Uccello *et al.*, *Front. Phys.* **11**, 1108175 (2023).
- [16] M.J. Baldwin *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **36**, 101477 (2023).
- [17] M. Shimada *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **71**, 310 (2017).
- [18] J. Rapp *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **156**, 111586 (2020).
- [19] R.D. Monk, *J. Nucl. Mater.* **241-243**, 396 (1997).
- [20] N. Ezumi *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **38**, 31 (1998).
- [21] N. Ohno *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **41**, 473 (2001).
- [22] A. Okamoto *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **46**, 416 (2006).
- [23] Y. Hayashi *et al.*, *Nucl. Fusion* **56**, 126006 (2016).
- [24] Y. Hayashi *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **14**, 1202135 (2019).
- [25] M. Yajima *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **438**, 1142 (2013).
- [26] M. Yajima *et al.*, *Plasma Sci. Technol.* **15**, 282 (2013).
- [27] M. Yajima *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **449**, 9 (2014).
- [28] M. Yajima *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **112**, 156 (2016).
- [29] D. Nishijima *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **60**, 1447 (2011).
- [30] S. Kajita *et al.*, *Nucl. Fusion* **54**, 033005 (2014).
- [31] D.U.B. Aussems *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **463**, 303 (2014).
- [32] S. Kajita *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **54**, 035009 (2012).
- [33] M. Yajima *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **15**, 1205061 (2020).
- [34] Y. Hamaji *et al.*, *Nucl. Mater. Energy*. **18**, 321 (2019). doi:10.1016/j.nme.2019.01.029.
- [35] S. Togo *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **463**, 502 (2015).
- [36] S. Togo *et al.*, *J. Comput. Phys.* **310**, 109 (2016).
- [37] Y. Nakashima *et al.*, *Nucl. Fusion* **57**, 116033 (2017).
- [38] R. Schneider *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **46**, 3 (2006).
- [39] M.S. Islam *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **59**, 125010 (2017).
- [40] S. Togo *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **58**, 556 (2018).
- [41] S. Togo *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **13**, 3403022 (2018).
- [42] S. Togo *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **19**, 149 (2019).
- [43] S. Togo *et al.*, *Nucl. Fusion* **59**, 076041 (2019).
- [44] S. Togo, *J. Plasma Fusion Res.* **97**, 32 (2021).
- [45] S. Togo *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **18**, 12030.
- [46] W.L. Hsu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1001 (1982).
- [47] N. Ohno, *Plasma Phys. Control. Fusion* **59**, 034007 (2017).
- [48] H.J.N. van Eck *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **142**, 26 (2019).
- [49] Y. Hayashi *et al.*, *Nucl. Fusion* **56**, 126006 (2016).
- [50] Y. Hayashi *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **64**, 105013 (2022).
- [51] H. Tanaka *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **62**, 115021 (2020).
- [52] M. Yoshikawa *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **10**, 1202088 (2015).
- [53] M. Yoshikawa *et al.*, *AIP Advances*, **9**, 085225 (2019).
- [54] M. Yoshikawa *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **17**, 1402100 (2022).
- [55] Y. Iida *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **438**, S1237 (2013).
- [56] S. Kajita *et al.*, *Phys. Plasmas* **13**, 013301 (2006).
- [57] D. Nishijima and E. M. Hollmann, *Plasma Phys. Control. Fusion* **49**, 791 (2007).
- [58] M. Goto, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Trans.* **76**, 331 (2003).
- [59] S. Kajita *et al.*, *AIP Adv.* **10**, 025225 (2020).
- [60] D. Nishijima *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 023505 (2021).
- [61] S. Kajita *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **63**, 055018 (2021).
- [62] S. Kajita *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **196**, 114012 (2023).
- [63] S. Feng *et al.*, *Applied Surface Science* **580**, 151979 (2022).
- [64] S. Kajita and A. Bieberle-Hutter, *Int. J. Hydrogen Energy* **57**, 118 (2024).
- [65] M. Kobayashi *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **97**, 433 (2021).
- [66] M. Hasuo *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **98**, 3 (2022).
- [67] Y. Feng *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **44**, 57 (2004).
- [68] Y. Feng *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **54**, 426 (2014).
- [69] D. Reiter *et al.*, *Nucl. Fusion* **47**, 172 (2005).
- [70] S.I. Braginskii, *Rev. Plasma Phys.* **1**, 205 (1965).
- [71] M. Kobayashi *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **46**, 527 (2006).
- [72] M. Kobayashi *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **363-365**, 294 (2007).
- [73] G. Kawamura *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **54**, 437 (2014).
- [74] G. Kawamura *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 084005 (2018).
- [75] S. Dai *et al.*, *Nucl. Fusion* **56**, 066005 (2016).
- [76] S. Dai *et al.*, *Plasma Phys. Contr. Fusion* **59**, 085013 (2017).
- [77] S. Dai *et al.*, *Nucl. Fusion* **58**, 096024 (2018).
- [78] G. Kawamura *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **13**, 3403034 (2018).
- [79] M. Shoji *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **12**, 779 (2017).
- [80] M. Shoji *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **56**, 651 (2016).
- [81] M. Shoji *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **17**, 188 (2018).
- [82] K. Sawada *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **60**, e201900153 (2020).
- [83] P.L. van de Giessen *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 033518 (2021).
- [84] T. Kuwabara *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **56**, 598 (2016).
- [85] H. Tanaka *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **60**, e201900114 (2020).
- [86] R. Matoike *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **14**, 3403127 (2019).
- [87] R. Matoike *et al.*, *Plasma Phys. Contr. Fusion* **63**, 115002 (2021).
- [88] G. Kawamura *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **62**, e202100196 (2022).
- [89] S. Masuzaki, *Plasma Fusion Res.* **8**, 1202110 (2013).
- [90] M. Shoji *et al.*, *Nuclear Fusion* **55**, 053014 (2015).
- [91] J. Romazanov *et al.*, *Rhys. Scr.* **T170**, 014018 (2017).
- [92] A. Kirschner *et al.*, *Nucl. Fusion* **40**, 989 (2000).
- [93] G. Kawamura *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **50**, 451 (2010).
- [94] M. Shoji *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **17**, 2403010 (2022).

- [95] 朝倉伸幸 他：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 575 (2001).
- [96] D.M. Goebel *et al.*, J. Nucl. Mater. **121**, 277 (1984).
- [97] R.P. Doerner *et al.*, Phys. Scripta **T111**, 75 (2004).
- [98] 柴山環樹他：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 259 (2011).
- [99] D. Nishijima *et al.*, J. Nucl. Mater. **438**, S1245 (2013).
- [100] 宮本光貴 他：プラズマ・核融合学会誌 **89**, 335 (2013).
- [101] M. Miyamoto *et al.*, Nucl. Mater. Ene. **12**, 633 (2017).
- [102] M.J. Baldwin *et al.*, Nucl. Mater. Ene. **36**, 101477 (2023).
- [103] E. Bernard *et al.*, J. Nucl. Mater. **463**, 316(2015).
- [104] E. Bernard *et al.*, J. Nucl. Mater. **484**, 24 (2017).
- [105] R. Sakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 016040 (2017).
- [106] R. Sakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **64**, 036008(2024).
- [107] R. Sakamoto *et al.*, Phys. Scr. **T170**, 014062 (2017).
- [108] R. Behrisch and W. Eckstein, Sputtering by Particle Bombardment(Springer, 2007).
- [109] R.P. Doerner *et al.*, Phys. Scr. **143**, 137 (2018).
- [110] H.T. Lee *et al.*, J. Nucl. Mater. **463**, 974 (2015).
- [111] A. Kallenbach *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **55**, 124041 (2013).
- [112] O.V. Ogorodnikova *et al.*, Phys. Scr. **T145**, 014034 (2011).
- [113] M. Oberkofler *et al.*, J. Nucl. Mater. **438**, S258 (2013).
- [114] H.T. Lee *et al.*, Phys. Scr. **T159**, 014021 (2014).
- [115] Y. Hamaji, H.T. Lee *et al.*, Nucl. Mater. Energy **12**, 1303 (2017).
- [116] H.T. Lee *et al.*, Phys. Scr. **T145**, 014045 (2011).
- [117] A. Kreter *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 086029 (2019).
- [118] M. Rasiński *et al.*, Phys. Scr. **T171**, 014071 (2020).
- [119] K. Schmid *et al.*, Phys. Scr. **T170**, 014037 (2017).
- [120] Y. Yuan *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 016022 (2019).
- [121] J.H. Yu *et al.*, Nucl. Mater. Energy **18**, 297 (2019).
- [122] H.T. Lee *et al.*, J. of Nucl. Mater. **415**, S696 (2011).
- [123] M. Ishida, H.T. Lee *et al.*, J. Nucl. Mater. **463**, 1062 (2015).
- [124] H.Y. Peng, H.T. Lee *et al.*, Phys. Scr. **T145**, 014046 (2011).
- [125] Y. Torikai *et al.*, Fusion Sci. Technol. **67**,619 (2015).
- [126] Y. Hatano *et al.*, Phys. Scr. **T170**, 014014 (2017).
- [127] Y. Hatano *et al.*, Nucl. Mater. Energy **18**, 258 (2019).
- [128] S.E. Lee *et al.*, Fus. Eng. Des. **160**, 111959 (2020).
- [129] S. Nogami *et al.*, Phys. Scr. **T171**, 014020 (2020).