

## 境界プラズマ、原子・分子過程、ブランケット、トリチウムダスト・微粒子、安全工学、界面表面科学

### 田中研究室

研究室人員：教官 4 名、技術官 1 名、  
博士課程 6 名、修士課程 8 名、  
学部学生 2 名

113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
TEL: 03-5841-6968 FAX: 03-5841-8625  
URL:<http://flanker.q.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

### 研究室紹介

田中研究室の研究課題は、大きくは核融合工学と廃棄物環境科学に分類される。いずれにおいても、高度な計測・分析手法と *an-initio* 量子化学計算に代表される先進の計算手法を組み合わせた研究に特徴を求めている。スタッフは教授 1、助教授 2、助手 1、技術官 1 で構成されており、うち助教授 2 は東京大学附属高温プラズマ研究センター、大学院新領域創成科学研究科に所属している。

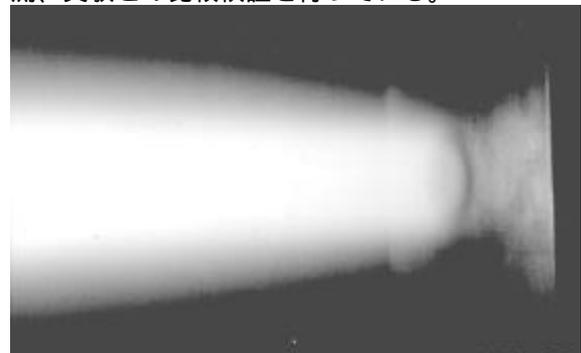
田中研究室は大学院では工学系研究科システム量子工学専攻に、学部教育は工学部システム創成学科に所属している。研究の中心は東京都文京区にある東大キャンパス内で行われているが、プラズマ発生装置や原子炉等やや大型の装置が必要な研究に茨城県東海村にある東京大学工学系研究科附属原子力工学研究施設の装置を用いている。また、核融合科学研究所や日本原子力研究所を始めとした国内外の多くの研究所との共同研究も精力的に行われている。

### 研究テーマ

#### < プラズマ素過程とプラズマ診断 >

核融合を目指したプラズマ閉じ込め装置では、プラズマ対向壁近傍の中性粒子と炉心から輸送されてきたプラズマとの相互作用が、炉心プラズマの閉じ込め性能にも、壁への熱負荷、損耗にも大きな影響を及ぼすことが指摘されている。トカマク装置のダイバータは燃焼炉におけるヘリウム灰の排気以外にも、プラズマと固体壁とが接触することによる不純物発生領域を局在化し、排気する役割、プラズマと中性粒子との相互作用（荷電交換、イオン化、再結合等）を誘発して熱負荷を低減する役割をはたしている。

そこで、これらの諸現象の背景にある物理過程を解明するための実験的アプローチでは、直線型境界プラズマシミュレータ (MAP) を用いてプラズマを生成し[下図]、分光、レーザー応用等様々な計測手法の開発適用をおこない、ダイバータや対向壁近傍の粒子の運動、量子状態、分子の解離、イオン化、不純物発生機構等の原子・分子過程の解明、及びそれら素過程と材料熱負荷との相関等多岐にわたるテーマを追求している。理論的アプローチでは境界領域の素過程モデリング、計算機シミュレーションによる現象の予測、実験との比較検証を行っている。



図：MAP-II プラズマと固体壁との接触部

#### < 核融合システム工学（トリチウム工学、ブランケット工学） >

核融合炉の中で起こる種々のプロセス（量子 / 古典、高エネルギー / 熱過程、マイクロ / マクロ、高速 / 経年）の学問的・体系的理解を目指している。最近では特に、核融合の燃料であると同時に放射性物質でもあるトリチウムに着目し、その放出過程、物質表面・界面における組成、物質中の輸送、化学反応性、ブランケットからの回収等に対する計算機シミュレーション結果を、実際の固体表面測定等によって検証し

ている。これは、材料表面及び欠陥と核同位体との相互作用の原理的理解という学術的意味、効率的な増殖、分離過程の解明という工学的意味に加え、環境への拡散防止、回収という地球の意味においても極めて重要なテーマである。

実験的アプローチでは、表面に吸着した分子、及び高エネルギー粒子照射による欠陥に対する光電子分光測定、同位体組成を変化させた材料の物性測定、界面における核種吸着の様子の観察等を行っている。理論的アプローチでは、これらの現象に量子化学計算や数値シミュレーションを適用し、物理モデルの構築、妥当性評価や実験事実との比較検討等を行っている。

#### < 核融合炉安全工学と環境影響 >

田中研究室においては核燃料サイクルにおける放射性廃棄物工学と環境安全工学に関する基礎的研究を幅広く展開してきた。そこで得られた知見、手法を核融合炉の安全工学や環境影響評価に展開している。具体的には、核融合炉の安全性や環境負荷評価において重要となる、放射化ダストの移行・付着、トリチウムの閉じ込め制御、環境中でのトリチウム挙動特に有機結合トリチウムの反応性、環境での光エネルギーの影響、放射性核種の表面付着機構、放射性廃棄物の処理処分に関する基礎的研究である。

### 主要論文・著書

- [1] 「レーザー位相差法(LPC)によるプラズマ密度揺動スペクトル計測の実際」、プラズマ・核融合学会誌 76, No.9, (2000) 889-902.
- [2] “XPS and UPS Studies on Electronic Structure of  $\text{Li}_2\text{O}$ ”, J. Nucl. Mater. 283-287 (2000) 1405-1408.
- [3] “ $\text{H}_2\text{O}$  Trapping on Various Materials Studied by AFM and XPS”, Fusion Eng. Des. 49-50 (2000) 791-797.
- [4] “Influence of Pseudocolloid Formation of Neptunium on Its Migration in Geosphere”, Colloids and Surfaces A, 155 (1999) 137-143.

### スタッフ



田中 知 (教授,工学博士)

1977 年東京大学工学部原子力工学科博士課程修了  
核融合工学、トリチウム工学、核燃料サイクル工学、表面科学

E-mail: chitanak@q.t.u-tokyo.ac.jp



長崎晋也 (助教授、博士(工学))

新領域創成科学研究科環境学専攻  
1990 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了  
廃棄物環境学

E-mail: nagasaki@k.u-tokyo.ac.jp



門 信一郎(助教授、博士(工学))  
高温プラズマ研究センター

1997 年九州大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了  
プラズマ計測、プラズマ理工学

E-mail: kado@q.t.u-tokyo.ac.jp



米岡俊明(助手、工学博士)  
1966 年愛媛大学工学部冶金学科卒業  
核融合炉材料学

E-mail: yoneoka@q.t.u-tokyo.ac.jp



佐藤留美(技術官、理学修士)  
1994 年立教大学大学院理学研究科修士課程修了

トリチウム吸着脱離

E-mail: rumi@q.t.u-tokyo.ac.jp

## 核融合炉燃料・材料の 界面をめぐって

### 山脇・寺井研究室

研究室人員: 教官 3 名、職員 1 名、学部  
生 2 名、修士課程 6 名、博士課程 10 名  
113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
TEL: 03-5841-7422 FAX: 03-5841-8633  
URL: <http://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/>

#### 研究室紹介

本研究室は、昭和 62 年から 10 年の時限で附属原子力工学研究施設に設置された核融合炉燃料工学研究部門に起源を求めることができる。研究室とスタッフはシステム量子工学専攻と附属原子力工学専攻にまたがっている。現在、山脇道夫教授、寺井隆幸教授、山口憲司助教授、小野双葉助手の教職員スタッフと、大学院生 16 名と 2 名の学部学生が所属し、原子力分野のみならず様々なエネルギー分野における燃料と材料の、とりわけ両者の界面に関する問題に関心をもって研究活動に取り組んでいる。

#### 研究テーマ

本研究室では大別すると 7 つの研究課題で活動を行っている。

- 量子エネルギー材料、環境効果材料の表面・バルク電子物性に関する研究
- エネルギー量子機能性材料の高温化学的特性
- 高エネルギー粒子プロセッシングによる材料改質と物性制御
- 核融合炉プラズマ - 材料相互作用(PMI)に関する研究
- 核融合炉燃料増殖材料の物理化学的特性とトリチウム挙動
- 核融合炉トリチウム燃料サイクル工学に関する研

#### 究

- アクチノイド等放射性核種の物理化学的特性と核燃料としての適性

以下に、核融合工学に関連する分野の研究内容について順次述べる。

#### 1. 核融合炉プラズマ - 材料相互作用(PMI)に関する研究

プラズマ - 材料相互作用(PMI)は、プラズマ対向材料への影響のみならず、プラズマの閉じ込めに対しても重大な影響を及ぼす。この問題に関して、当グループでは以下の研究を行っている[1]。

(1) 表面分析器付水素透過実験装置(HYPA-IV)を用いた、各種プラズマ対向材料における水素透過の素過程ならびに表面効果の解明、さらに、反射、捕獲、再放出等の PMI の基礎過程に関する研究。

(2) イオンビーム照射装置やプラズマ発生装置を用いた各種プラズマ対向材料の損耗・再付着に関する基礎的研究。

#### 2. 核融合炉燃料増殖材料の物理化学的特性とトリチウム挙動

核融合炉燃料として必須であるトリチウムを増殖するための材料(トリチウム増殖材料)の熱力学的特性、腐食特性、化学反応性などを、高温蒸発質量分析計(雰囲気制御式)や高温ケルビン計(図 1 参照)、ゼーバック装置等のユニークな実験装置を活用して解明しつつある [2]。固体酸化物増殖材料に関する

る長年にわたる研究に加え、最近では液体増殖材料にも注目している。金属リチウム、リチウム - 鉛共晶合金(Li17-Pb83)、リチウムベリリウムフッ化物溶融塩(Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>)などの熱力学データや物性データを整備するとともに、原子炉内実験や原子炉外実験により、これらの材料中のトリチウム拡散係数、これらの材料から気相へのトリチウム移行速度、これらの材料に接した構造材料壁中のトリチウム透過速度の測定を行いつつある。さらに、これらのデータをもとに、これらの液体増殖材料からのトリチウム回収方法について検討を行っている。また、これらの液体増殖材料体プランケット用として、耐食性、トリチウム不透過性、絶縁性セラミックコーティングの開発を行っている[3]。

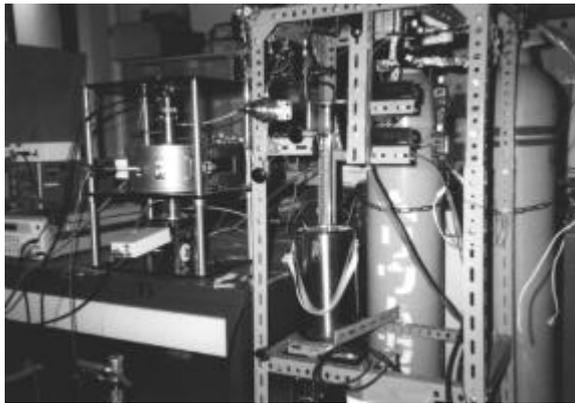


図 1: 高温ケルビン計: 測定が行われるプローブ部(左)ならびにガス導入部(右)。

### 3. 核融合炉トリチウム燃料サイクル工学に関する研究

核融合炉におけるトリチウム安全閉じこめ、プラズマ排気分離・精製について次のような要素技術開発に関する物理化学的、材料工学的研究を行っている。

(1) 原子状あるいはプラズマ状態にある水素を駆動源とする水素透過膜システムを製作し、プラズマ排ガスの精製を目的とした超透過膜の開発と応用に関する研究を行っている。

(2) トリチウムビーム試験装置(TBTS)により、トリチウ

ムと材料の相互作用をはじめ、トリチウムの供給、回収、排気などに関する研究を行っている。また、トリチウムの回収、移送、貯蔵を目的としたウラン合金・化合物の開発に関する研究を行っている。

(3) トリチウム取扱施設におけるトリチウムによる汚染とその除染の重要性に鑑み、耐 RI 用塗料に代表される有機化合物へのトリチウムのトラップ機構を FTIR 等を用いて解明しようとしている。

### 主要論文・著書

- [1] K. Ohkoshi, V. Alimov, K. Yamaguchi, M. Yamawaki, A. I. Livshits, "The ion- and atom-driven transport of deuterium in Nb under the influence of surface impurities", J. Nucl. Mater. 266-269 (1999) 1167.
- [2] A. Suzuki, K. Yamaguchi, T. Terai, M. Yamawaki, "Application of high temperature mass spectrometry and work function measurement to evaluation of thermochemical performance of ceramic breeders", Fusion Eng. Des. 49-50 (2000) 681.
- [3] A. Suzuki, T. Terai, S. Tanaka, "Tritium release behavior from Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub> molten salt by permeation through structural materials", Fusion Eng. Des. 51-52 (2000) 863.

### スタッフ



山脇 道夫 (教授,工学博士)

1969年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了  
専門分野: 量子システム材料科学  
E-mail: yamawaki@q.t.u-tokyo.ac.jp



寺井 隆幸 (教授,工学博士)

1983年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了  
専門分野: 量子エネルギー物性工学  
E-mail: tera@q.t.u-tokyo.ac.jp



山口 憲司 (助教授,工学博士)

1987年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了  
専門分野: 核融合炉燃料材料工学  
E-mail: yamag@tokai.t.u-tokyo.ac.jp



小野 双葉 (助手,工学博士)

1968年 日本大学文理学部卒業  
専門分野: トリチウム理工学  
E-mail: ono@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

## 核融合を中心とした 高温プラズマ研究

### 高温プラズマ科学部門

研究室人員：教官 3 名、  
修士課程 1 名  
113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16  
TEL: 03-5841-7008 FAX: 03-5800-6970  
URL: <http://fusion.t.u-tokyo.ac.jp/>

#### 研究室紹介

高温プラズマ研究センターは、平成11年4月に東京大学の学内共同教育研究施設として新設された。本センターは、高温プラズマ科学部門(教授1名、助教授1名)とプラズマ科学プロジェクト研究部門(外国人客員教授1名、助教授1名、助手1名)の2部門で構成されている。また平成13年度より大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻の協力講座を兼担している。ここでは小川雄一教授を中心とした研究グループを紹介する。本グループは、小川雄一教授、森川惇二助手(高温プラズマ研究センター)、二瓶仁助手(大学院工学系研究科)を中心として、主に核融合炉心プラズマを中心とした高温プラズマの物理に関する研究を進めている。

#### 研究テーマ

##### (1) 高ベータプラズマを目指して

より魅力的な核融合炉心プラズマを目指した研究として、「高ベータ化」が挙げられる。我々は様々な手法・アイデアで核融合炉心プラズマの高ベータ化を目指した研究を推進している。

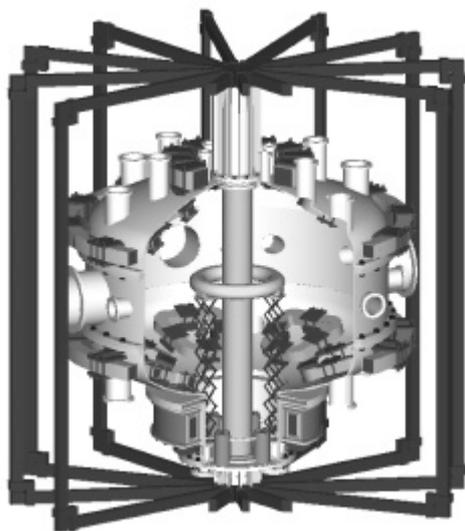
逆磁場ピンチトラス実験装置として建設された REPUTE-1 装置において、トカマクとRFPプラズマとの両者の特性を有する新たな緩和配位である

極低 $q$  (ULQ) プラズマが実験的に発見され広く研究されてきた。ULQ プラズマは、プラズマの安全係数 $q$ 値が1以下である準安定なプラズマ緩和配位である。ここでは、現在のトカマクで閉じ込め改善モードとして脚光を浴びている負磁気シアの磁場配位となっている。また電子温度(100~200eV)よりイオン温度(300~500eV)の方が高いという、イオン異常加熱や、プラズマの電気抵抗が Spitzer 抵抗より高いという異常抵抗、また数 keV まで延びる高エネルギー電子の生成などが実験的に観測されている。これらの現象は、トカマクや RFP プラズマ物理とも関連して大変興味ある物理テーマを提供してきた。

ULQ プラズマで発見された新たな緩和配位は、緩和現象の物理としてより一般的な学術的関心を呼び起こすと共に、様々な緩和配位の可能性を示唆している。1998年、S.M.Mahajan - Z.Yoshida は、高速のプラズマ流下でのプラズマ緩和配位の可能性を理論的に示した。これは電子流れ(プラズマ電流)とイオン流れ(プラズマ流)の両者を考慮した2流体緩和である。しかもこの新緩和配位では超高ベータプラズマ閉じ込めの可能性を秘めている。

この様な2流体緩和を実験的に検証し、高ベータプラズマ閉じ込めを目指した研究として、内部導体装置が適している。内部導体磁場により閉じ込められたプラズマに、何らかの方法で径電場を発生させ

それとポロイダル磁場による $E \times B$ ドリフトにより、トロイダル方向に高速のプラズマ流を誘起させるものである。この目的のために、我々は磁気浮上内部導体装置 S-RT(Superconducting Ring Trap)を計画している。



図：磁気浮上内部導体装置 S-RT の鳥瞰図

一方これに先立ち、高温超伝導コイルを用いた小型の磁気浮上内部導体装置 Mini-RT を現在建設中である。Mini-RT 装置は、直径 30cm の内部導体コイル(コイル電流 50kAT)を有しおり、2.45GHz のECHでプラズマ生成・加熱の予定である。高温超伝導線材としては、Bi-2223 ケーブルを用い、20K まで冷却し 40K までの温度上昇を許容範囲として、数時間以上にわたり連続的に浮上させ、プラズマ実験に供する。なお高温超伝導線材は、低温超伝導線材と比較して、熱容量がかなり大きいので、熱的安定性が高く、しかも高パワーや長時間プラズマ実験が可能となる。またコイル冷却等も比較的簡便であり、小型GM冷凍機での冷却で十分である。

コイル冷却は、着脱式の冷却パイプを用いて、真空容器内に磁気浮上内部導体コイルの内部に導くことにより行う。またコイル電流の誘起も、着脱式の電流導入端子により、直接通電する。従って電流導

入端子の着脱に伴う永久電流スイッチが必要となる。我々は高温超伝導線材による永久電流スイッチも開発している。

バルク材の高温超伝導磁気浮上実験は良く知られているが、コイルとしての磁気浮上は稀有である。我々は超小型(直径 8cm)の高温超伝導コイルを試作し、磁気浮上実験を行った。その結果、高温超伝導コイルを数十マイクロンの精度で制御させて磁気浮上させることに成功した。

過去においてスフェレータやレビトロンでは、低温超伝導コイルの磁気浮上プラズマ実験の例はあるが、本装置は高温超伝導コイルをプラズマ閉じ込め研究に応用した世界最初の装置である。

## (2) 核融合炉設計を中心として

核融合開発は、数十年におよぶ長期的研究である。我々は核融合エネルギーの実用化を目指して、核融合炉心プラズマ特性の評価、核融合炉の具体的な設計、核融合エネルギーの特徴の抽出と理解および社会受容性の向上、などについて研究している。

## スタッフ



小川 雄一 (教授、工学博士)

1981 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了

核融合炉心工学、高温プラズマ物理

E-mail: ogawa@plasma.q.t.u-tokyo.ac.jp



森川 惇二 (助手、工学士)

1974 年工学院大学工学部卒業

プラズマ工学、高電圧工学

E-mail: morikawa@plasma.q.t.u-tokyo.ac.jp



二瓶 仁 (助手、工学博士)

1966 年東北大学大学院理学系研究科修士課程修了

プラズマ工学、イオンビーム工学

E-mail: nihei@plasma.q.t.u-tokyo.ac.jp