

## エネルギーの全て

--- 発生、輸送、貯蔵、有効利用 ---

### 嶋田・飯尾研究室

研究室人員：教官 4 名、学部学生 3 名  
修士課程 1 名、博士課程 2 名  
152-8550 東京都目黒区大岡山 2 1 2 1  
TEL: 03-5734-3328 FAX: 03-5734-2959  
URL: <http://www.nr.titech.ac.jp/>

#### 研究室紹介

当研究室は、電力・エネルギー・プラズマに関する新概念創出と、人類の究極エネルギー源である核融合のためのプラズマ磁気閉じ込め関連の技術開発を中心として研究活動を行っている。主な研究テーマを、以下に紹介する。

##### 1. 高機能な能動的電力蓄積輸送構想の実用化

現在、電力系統は需要の急増に加えて、瞬時停電の問題や電圧安定性の要求など様々な問題を抱えている。これに対して、パワーエレクトロニクスを応用して積極的かつ総合的に電力制御を行おうとする FACTS 構想が提案されている。我々はこの構想にエネルギー蓄積要素を加えて、可変速フライホイール発電機を分散配置し電力の制御を高速に行い送電容量を大幅にアップさせる研究、機械式移相器を用いた電力潮流制御に関する研究、瞬時の停電対策、系統の安定度向上等について、シミュレーションによる検討とモデル実験によって実証を行っている。また、パワーエレクトロニクス技術では、パワーMOSFET デバイスを用いた低損失変換器の開発を進めている。

##### 2. 自然エネルギー発電の電力安定化

回転型移相器と可変速フライホイール発電機を

風力発電機に接続することにより、高効率で発電電力の変動の少ない風力発電システムを構築する研究を、模擬システムを用いて行っている。

##### 3. 電磁力平衡コイルの開発と進化

超電導コイルによる電力貯蔵や磁場閉じ込め核融合装置への適用を目的として、電磁力平衡コイルを開発した。これはピッチ変調ヘリカルコイルを用いて、トロイダル磁場コイルで問題となる向心力を、トーラス外向きのフープ力と釣り合わせて、大半径方向の電磁力を著しく低減するものである。NbTi 線を GRFP 製巻棒に手巻きした浸漬冷却式小型電磁力平衡コイルを最大磁界 1.8 T まで励磁することに成功し、新コイル概念の有効性を実証した。電磁力平衡コイルは、ポロイダル磁束も供給するので、TF コイルと OH コイルの両方の機能を持たせることが可能であることを、大半径 30 cm の小型トカマク装置（図 1）の実験で示した。

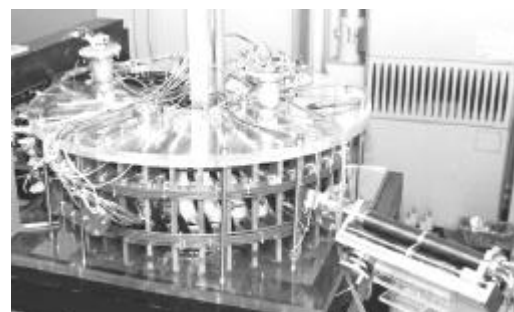


図 1. 電磁力平衡コイルを用いたトカマク装置「等々力1号」

第2世代の電磁力平衡コイルは、トロイダル方向の電流分布を最適化して転倒力をほぼゼロにした。第3世代として、アスペクト比の大きなコイルにおいて主応力となる小半径方向の力を低減する応力平衡コイルを考案した。この製作技術を確認するために、Bi系銀シース高温超電導線を用いた応力平衡コイルを製作・試験するとともに、可変ピッチヘリカル巻線機を開発した。

第4世代の現在、ピリアル定理から磁気エネルギー当たりの構造材質量を最小にするコイルができることを見だし、電磁力平衡コイルと応力平衡コイルの間に位置する概念として、応力均一化コイルの開発を進めている。

#### 4. 核融合中性子を用いた核変換の検討

核融合炉の実用化を早めるために、長寿命核分裂生成物の核変換を主目的とした中性子源としての核融合利用を検討している。その例として、半減期が1570万年であるI-129の実効半減期を1.0 MW/m<sup>2</sup>の中性子束で2年以下とし、トリチウムをほぼ自己供給可能なブランケット構造を、数値的に求めた。

#### 5. 長時間計測用レーザー偏光計の開発

磁場閉じ込め核融合装置の長時間運転に向けて、信頼性の高い電子密度計測と電流・磁場計測のためのレーザー偏光計を開発している。

電子密度計測に通常用いられる干渉計は、急速な変化時には位相周期の計数が追従できずに絶対値が分からなく問題がある。レーザー光のファラデー回転を測る偏光計は、補正が厄介な振動の影響を受けにくい上に位相変化が1周期未満であるため、電子密度を確実に計測できる特長がある。反面、計測精度が干渉計より劣るので、偏光面回転ヘテロダイン方式を採用し、デジタル位相検出により高

精度化を図っている。図2に示す核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の共同研究で開発したCO<sub>2</sub>レーザー偏光計は、時間分解能3msでファラデー回転角の分解能0.01度を達成した。

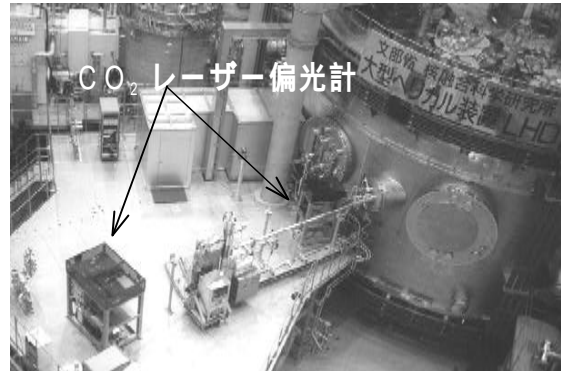


図2 LHDに設置したCO<sub>2</sub>レーザー偏光計

同じ計測手法を光学ガラスのファラデー効果に適用して、長時間計測用の電流・磁場偏光計の開発も並行して進めている。ロゴスキーコイルや磁気プローブを用いる従来の方法では、積分ドリフトのため数分を超えるとプラズマ制御やMHD平衡解析に必要な精度を十分に保つことができないことが課題となっている。

### スタッフ



嶋田 隆一 (教授、工学博士)  
1975年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了  
核融合炉工学、プラズマ制御の研究、大電力システム、電力工学、電力貯蔵、パワーエレクトロニクス  
E-mail: rshimada@nr.titech.ac.jp



飯尾 俊二 (助教授、理学博士)  
1983年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了  
プラズマ理工学、磁場閉じ込め核融合、レーザー計測、応用電磁気学  
E-mail: siio@nr.titech.ac.jp



筒井 広明 (助手、工学博士)  
1989年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了  
プラズマ物理、磁場閉じ込め核融合、電磁場解析、数値計算、超伝導工学  
E-mail: htsutsui@nr.titech.ac.jp

## 超高輝度光工学

# レーザー基礎・応用、シン クロトロン放射光と材料工学、 画像計測

## 高密度エネルギー

### (赤塚研究室)

研究室人員：教官 2 名、技官 1 名、学部学生 1 名、修士課程 4 名、博士課程 1 名

152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

TEL & FAX: 03-5734-3057

URL: <http://www2.nr.titech.ac.jp/~hakatsuk/>

### 研究室紹介

本研究室は、原子炉工学研究所の 3 つの大部門の内、エネルギー工学部門に属し、その中でも高密度エネルギーの分野を担当している。担当教官が、協力講座教官として、本学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻超高輝度光工学講座を担当していることもあり、特に光の高密度エネルギー状態に着目して研究を展開している。即ちレーザーやシンクロトロン放射光、それらの画像工学としての計測、それらの基礎・応用研究に取り組んでいる。赤塚洋助教授、松浦治明助手、松崎充男技官の職員スタッフと、博士後期課程 1 名、修士課程 4 名の大学院生と 1 名の学部生が所属している。職員スタッフはそれぞれ独自の研究フィールドを有しており、赤塚助教授は新型放電励起レーザーとその基礎となるプラズマ工学・分光学の基礎研究に、松浦助手は熔融塩化学とそのシンクロトロン放射光による XAFS、および構造解析のための分子動力学法シミュレーションに、松崎技官はレーザーや紫外線蛍光管・レーザー粒子などを応用し画像工学の手法により、原子

炉の熱水力不安定現象の解明を行っている。

### 研究テーマ

上述のように、物理学・化学・機械工学・材料工学等、一般には異なるとされる分野の研究者が既存の枠にとらわれず、協力し新たな視点から問題にアプローチするという方法により研究を行っているのが本研究室の一番の特徴である。以下、具体的な研究内容の例を述べる。

#### (1) プラズマジェットレーザーの研究開発

大気圧の直流アーク放電で生じたアークプラズマを、弱い磁場下の低気圧風洞に定常的に噴出する事により、低温高密度の再結合プラズマを定常発生することができる。こうした低温の再結合状態中では、低励起状態間で反転分布の生じることが理論的に示されており、反転分布の効果的生成、そのための電子温度低下のための効率的な方法について、実験・理論の両面から研究を行っている。水素・ヘリウムのプラズマ中では、効率よく反転が生じることを確認した。アルゴンプラズマ中では、電子冷却効率が

悪く、これを克服するべくラムザウアー効果のない標的気体との衝突により電子温度が低下し、反転分布が得られることを確認した。[1]

(2) 高輝度放射光を用いた高温融体の構造解析  
イオン性融体についてはこれまでその安定性、流動性、導電性を活かし、様々な技術応用研究がなされてきており、特に核燃料の乾式再処理や次世代核融合炉のブランケット材料として注目されている媒体である。しかし、いまだイオン性融体そのものの基礎物性が充分物理化学的に理解されているとはいえない。そこで我々は、融体の構造解析の手段として、高輝度放射光を利用した XAFS や、X 線回折、中性子回折実験とともに、計算機実験として分子動力学シミュレーション法を用い、種々の知見から複合的に構造を明らかにすることを試みている。また、平成 12 年度からは、将来の水素エネルギー利用を見据えた、新規の高温プロセス開発に着手した。[2]

(3) 気泡流の画像計測技術に関する開発研究  
自然循環型原子炉の軌道時に発生する不安定流動の原因となるスラグ気泡の流動機構解明のため、新たなる画像計測技術を開発した。これは、一般に市販されているデジタルカメラ(ビデオ)を用い、ストロボ、半導体レーザー、紫外線蛍光管などの照明とナイロン粒子、ポリスチレン蛍光粒子などのトレーサーとの組み合わせにより成り立っている。撮影された画像から画像計測ソフトによってデータをうることで、スラグ気泡による不安定流動の発生防止条件を見出すことができた。[3]

## 主要論文・著書

- [1] “磁場トラップ膨張プラズマジェット分光診断”, プラズマ核融合学会誌、**70**, 1196 (1994).
- [2] “The structure of rare earth chloride melts by XAFS analysis” Prog. Molten Salt Chem., **1**, 335 (2000).
- [3] “画像処理技術を用いたスラグ気泡流動特性の計測技術 “、可視化情報学会誌、**20**, 37 (2000).

## スタッフ

赤塚 洋(助教授、博士(工学))  
1987 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了  
レーザー理工学、プラズマ工学、原子分子分光学  
E-mail: hakatsuk@nr.titech.ac.jp

松浦 治明(助手、博士(理学))  
1992 年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了  
溶融塩化学、高温化学、電気化学  
E-mail: hmatsuur@nr.titech.ac.jp

松崎 充男(技官、工学士)  
1979 年日本大学理工学部機械工学科卒業  
画像処理、流体計測  
E-mail: mmatsuza@2phase.nr.titech.ac.jp

## 矢野研究室

研究室人員：教官 1 名、技官 1 名、  
非常勤研究員 1 名、学部学生 2 名  
修士課程 9 名、博士課程 2 名  
152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
TEL: 03-5734-3380 FAX: 03-5734-2959  
URL: <http://www.nr.titech.ac.jp/~tyano/>

# 材料が未来の技術を支える

## 研究室紹介

### 研究の特徴

高温ガス炉や高速増殖炉・核融合炉などで使用される材料は、高エネルギー中性子をはじめとする多量の粒子線に照射され、なおかつ高温、高熱勾配、腐食性雰囲気という過酷な環境で使用される。本研究室では、これらのエネルギーシステムが安全に機能するために必要となる、複合した苛酷環境におかれたときの材料の振る舞いを明らかにし、さらにそれらに耐える材料の開発を行っている。

### キーワード

原子炉・核融合炉材料、苛酷環境下の材料物性、欠陥と固体物性、セラミックスの中性子照射損傷、低放射化材料、材料科学

## 研究の概要

原子炉・核融合炉用セラミックスの中性子照射損傷の研究

セラミックスは発電用原子炉や高速増殖炉では核燃料をはじめ、制御材などに、また開発中の高温ガス炉では、燃料や燃料被覆材に使用されている。さらに夢のエネルギー源として 21 世

紀中旬以降の実現を目指して研究開発の進んでいる核融合炉においては、第一壁材料、トリチウム増殖材、各種電気絶縁材などにセラミックスが必要不可欠である。また、セラミックスは金属材料に比べて長寿命の放射性物質の生成が極めて少なく、この意味でも原子力分野へのセラミックスの適用が求められている。

セラミックスに限らないが、材料が高速中性子の照射を受けると、原子のはじき出しなどが起こり、微細構造が変化して種々の物性に大きな影響を与えるので、この変化をあらかじめ予測して制御する必要がある。この研究では、炭化ケイ素や、炭化ホウ素、窒化アルミニウム、スピネル、高温超伝導酸化物、ダイヤモンドなどの化合物を実際に中性子照射して、原子配列を直接みることのできる高分解能電子顕微鏡（写真 1）をはじめ、X 線回折などにより微構造の変化を明らかにし、さらに熱伝導率、電気抵抗、機械的強度などの物性変化との関連を調べている。写真 2 は、高分解能電子顕微鏡により世界で初めて観察された、型窒化ケイ素に中性子照射により導入された転位ループの写真であり、これを解析することにより、転位の中の原子配列を解明することができた。

耐苛酷環境材料の開発

放射線照射下をはじめ、ロケット、航空機エンジン部材、ガスタービン部材、MHD 発電機部材などの超高温、高熱勾配下あるいは腐食性環境で使用可能な新規材料の作製を目標に、いくつかの候補材を取り上げ、合成とその物性評価を行っている。この研究には、放射線照射によってその物性をより良くすること、あるいは新規な機能性を持たせる試みも含まれている。近年は、セラミックス長繊維や、微粒子分散、あるいは短繊維分散で強化したセラミックス複合材料の作製とその評価を中心に研究している。これらの研究では、耐熱性のセラミックスの特徴を維持しながら、脆性破壊をしない材料の開発を目指している。



写真 1 放射線管理区域に置かれた高分解能電子顕微鏡システム

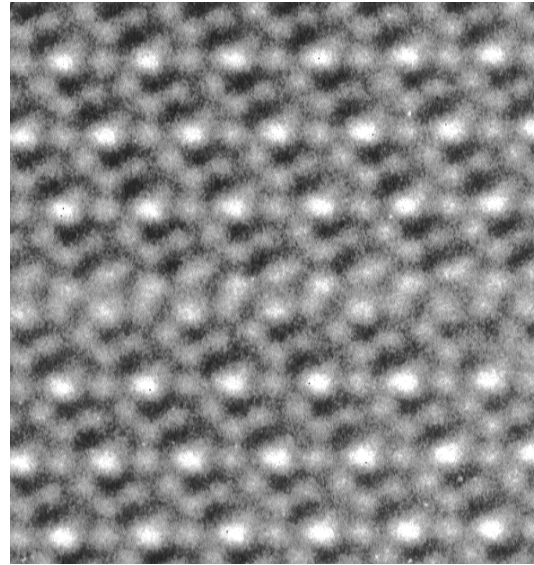


写真 2  $\beta$  型  $\text{Si}_3\text{N}_4$  に中性子照射により導入された転位ループ (スケールは約 1.5cm が 1nm)

### 主要論文・著書

- [1] A Structural Model of Defects in  $\beta$   $\text{Si}_3\text{N}_4$  Produced by Neutron-Irradiation, *Philos. Mag. A*, **81**[3], 6833-697 (2001).
- [2] Neutron Irradiation Damage in Aluminum Oxide and Nitride Ceramics up to a Fluence of  $4.2 \times 10^{26}$  n/m<sup>2</sup>, *J. Nuclear Materials*, **283-287**, 947-951 (2000).
- [3] Room and High-Temperature Mechanical and Thermal Properties of SiC Fiber-Reinforced SiC Composite Sintered under Pressure, *J. Nuclear Materials*, **283-287**, 560-564 (2000).

### スタッフ



矢野豊彦 (助教授,工学博士)

1980 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了  
セラミックス材料科学、複合材料  
セラミックスの中性子照射損傷  
E-mail: tyano@nr.titech.ac.jp



今井雅三 (技官、工学士)

1982 年工学院大学卒業  
放射能管理、セラミックス材料工学  
E-mail: mimai@nr.titech.ac.jp



秋吉優史 (非常勤研究員、工学博士)

2001 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了  
セラミックスの中性子照射損傷  
E-mail: makiyosh@nr.titech.ac.jp

## 高橋研究室

# 核融合炉の液体金属冷却と 原子炉の熱流動

研究室人員：教官 2 名、学部学生 1 名  
修士課程 4 名、博士課程 1 名  
152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
TEL: 03-5734-2957 FAX: 03-5734-2959  
URL: <http://www.nr.titech.ac.jp/~mtakahas/>

### 研究室紹介

原子力に関連した伝熱流動と液体金属 MHD および材料腐食について研究を行っています。対象とする原子炉システムは、液体金属リチウム冷却型核融合炉、鉛ビスマス冷却方式の小型高速炉と核変換用加速器駆動システム、高速中性子源液体金属ターゲット系、軽水炉です。

### 研究テーマ

#### 1. 液体金属冷却核融合炉とターゲット系

核融合炉の冷却と加速器の液体ターゲットで重要な液体金属リチウムの流動・伝熱について磁場下と非磁場下の基礎研究を行っています。

- (1) 液膜流の自由表面乱流
- (2) 液体金属の沸騰
- (3) 液体金属リチウム流とその二相流動・伝熱



写真1 鉛ビスマス循環実験装置

#### 2. 鉛ビスマス冷却原子炉

鉛ビスマスで冷却される小型高速炉と加速器駆動核変換炉に関する基礎研究を行っています。

- (1) 鉛ビスマス流れによる鋼材の腐食と熱伝達
- (2) 鉛ビスマス中の酸素濃度センサーと電磁流量計の開発

#### 3. 軽水炉の熱水力安全性

軽水炉の熱水力安全性に関する二相流流動・伝熱の基礎研究を行っています。

- (1) 空気 水層状流の自由表面乱流と蒸気水層状流の界面凝縮伝熱
- (2) 液体噴流とスプレーの流動と凝縮伝熱

### 主要論文

- (1) Takahashi, M., et al., "MHD Pressure Drop and Heat Transfer of Lithium Single-Phase Flow in a Rectangular Channel under Transverse Magnetic Field," Fusion Eng. Des., Vol.42, 365 (1998).

### スタッフ



高橋 実 (助教授, 工学博士)

1981 年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了  
原子力熱工学、二相流、液体金属 MHD  
E-mail: [mtakahas@nr.titech.ac.jp](mailto:mtakahas@nr.titech.ac.jp)

## 複雑系の解析と プラズマ応用

### 鈴木正昭研究室

研究室人員：教官 2 名、学部学生 3 名

修士課程 5 名、博士課程 2 名

UNESCO 研修生 1 名

152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

TEL & FAX :03-5734-2112

URL:<http://www.chemeng.titech.ac.jp>

#### 研究室紹介

本研究室は大学院化学工学専攻に属しており、鈴木正昭教授、後藤孝宣助手の教官スタッフ、博士後期課程 2 名、修士課程 5 名の大学院生（うち 2 名は原子核工学専攻所属）と 3 名の学部生及び 1 名の UNESCO 研修生により構成されている。本研究室では、基盤技術としてのプラズマの様々な可能性の追求を目指して、プラズマ内部およびプラズマと固、液、気相との相互作用の中で起こっている未解明の物理現象の基礎的研究と、化学工学、原子力工学分野へのプラズマの応用の研究を実験、数値計算の両面から行っている。また、海外の大学との交流も積極的に行っている。下は 2000 年 9 月に韓国に赴き、仁荷大学と研究交流セミナーを行ったときの写真である。



#### 研究テーマ

本研究室では、プラズマに関連する複雑系の数値解析とプラズマプロセスの基礎と応用の実験的研究を行っている。以下に具体的な研究内容について紹介する。

##### (1) 複雑系の解析

##### 1 - 1 高熱流束による第一壁損傷のシミュレーション

プラズマディスラプション時のプラズマ対向機器(PFC)における過渡的な高熱流束による伝熱現象には急激な加熱、輻射による加熱と冷却、溶融・凝固及び蒸発などが含まれる。これらの現象をモデル化し、境界積分方程式法を用いて解析を行い、PFC の蒸発量、損傷量の評価を行っている。

##### 1 - 2 蒸発・核生成のモデリング

核融合炉の内部、プラズマプロセスなどでは材料が高温にさらされ、材料の蒸発、微粒子の生成が安全上重要な課題となる。さまざまなプロセスに対応できるような蒸発・核生成のモデル化を行い、発生する微粒子の特性を予測し、安全評価に役立てる研究を行っている。



### 1 - 3 高シュミット数条件での対流物質移動の数值解析

高シュミット数条件での対流場における物質移動は対流移動の寄与が極めて大きく、同じ対流場での熱移動に比べて数值解析が困難である。そのような移動現象の解析に必要となる高精度で対流項の離散化から生ずる数值拡散の少ないスキームの開発とその応用を行っている。

### (2) プラズマ応用

#### 2 - 1 プラズマ化学反応を利用した同位体分離

核融合炉の内部、プラズマプロセスなどでは材料が高温にさらされ、材料の蒸発、微粒子の生成が安全上重要な課題となる。さまざまなプロセスに対応できるような蒸発・核生成のモデル化を行い、発生する微粒子の特性を予測し、安全評価に役立てる研究を行っている。

#### 2 - 2 酸素プラズマの利用

我々が提案する「塩化物廃棄物のプラズマ直接ガラス固化」は、マイクロ波加熱酸素プラズマの強い活性を利用し、塩化物を酸素化して直接ガラス中に溶解しようとするもので、ガラスとプラズマの相互作用の基礎、実際のガラス固化実験など、幅広く研究を行っている。

#### 2 - 3 フッ素プラズマの利用

プラズマ中でCF<sub>4</sub>ガスを分解して得られるフッ素の活性原子は極めて強い反応性に富み、金属・金属酸化物を容易にフッ素化できる。我々はこれを利用して、(1)原子炉内壁の酸化物、あるいは燃料クラッドの除染、(2)Zr-Nb合金の分離、について実験研究を行っている。前者は酸化物をフッ素化して、気化あるいは粉末にして、汚染物質を除去する方法であり、後者は各々の蒸気圧の差を利用して分離を行おうとする研究である。

## 主要論文

- [1] "A Boundary Integral Equation Method for Nonlinear Heat Conduction Problems with Temperature-Dependent Material Properties", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **39**, 823 (1996)
- [2] "Conversion of Chloride Waste into Oxide by Microwave Heated Oxygen Plasma", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **34**, 1159, (1997)
- [3] "BIE Analysis of Transient Heat Transfer Driven by High Heat Flux", *Fusion Eng. Des.*, **39-40**, 317, (1998)
- [4] "Measurements of Plasma Parameters in the DC Discharge for Isotope Separation", *Plasma Sources Sci. Technol.*, **7**, 136, (1998)
- [5] "Removal of Oxide Film Prepared under BWR Condition by Using Atmospheric CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> Plasma Decontamination Process", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **34**, (2000)

## スタッフ



鈴木 正昭 (教授、博士 (工学))  
1978 年東京工業大学院博士  
1978 年東京工業大学助手  
1991 年 同 助教授  
1998 年 同 教授  
原子力化学工学, プラズマ化学  
複雑系の数值解析

E-mail:masaaki@chemeng.titech.ac.jp



後藤 孝宣 (助手、博士 (工学))  
1989 年東京工業大学大学院博士  
後期課程中退  
熱と物質の移動現象の数值解析

E-mail:tgoto@chemeng.titech.ac.jp