

## 核融合工学の新展開とプラズマによる新機能材料の創生

### プラズマ真空工学分野

研究室人員：教官 3 名、技官 1 名、  
学部学生 4 名、修士課程 5 名、  
博士課程 1 名  
060 - 8628 札幌市北区北 13 西 8  
TEL: 011-706-7195 FAX: 011-709-6413  
URL: <http://apollo.qe.eng.hokudai.ac.jp/>

#### 研究室紹介

プラズマ真空工学分野は北大量子エネルギー工学専攻のプラズマ理工学講座に所属し、プラズマ対向壁理工学を中心にした核融合工学、及び新機能半導体等のプラズマプロセッシングの研究を展開している。当研究室には、日野友明教授、広畑優子助教授、山内有二助手、橋場正男技官の教職員スタッフと、博士後期課程 1 名、博士前期課程 5 名の大学院生と 4 名の学部 4 年生が所属している。

核融合工学関連の研究においては、各種プラズマ装置、イオン源を用いた実験研究を中心に行っており、プラズマとの相互作用の結果、表面特性がどのように変化していくのかを、種々の表面解析で調べている。また、LHD 対向壁とプラズマとの相互作用、JFT-2M でのプラズマ表面相互作用、DIID のマテリアルプローブ等に関して、研究機関と共同研究を行っている。

実験炉ではトリチウムインベントリーの評価、原型炉以降では低放射化材料の適合性の評価が重要であり、これらについて研究機関及び他大学と共同研究を実施している。

この他、プラズマ対向壁に関わる物理課題、即ち熱粒子制御、不純物輸送、アルファ粒子拳動等の理論研究も行っている。

プラズマプロセッシングの研究として、低温プラズマの計測、プラズマによる材料合成と特性評価が主要な課題である。特に、新機能半導体材料の作製と評価については企業とともに共同研究を実施している。シリコン半導体の光発光素子、信号高速化のための低誘電率化、エッチングの適正化等が現在の研究テーマである。

上記の研究活動の他、教育面では「プラズマ科学」、「核融合工学」、「真空工学」、「材料科学」、「核融合プラズマ物理特論」、「プラズマプロセス工学」等の講義を原子工学科及び量子エネルギー工学専攻において担当している。主要著書はこれらの講義で使用されているものである。

#### 研究テーマ

以下、具体例として核融合工学に関する研究の一部を紹介する。

##### (1) プラズマ対向壁の燃料水素及びアルファ粒子保持特性

核融合プラズマのエネルギー閉じ込めは燃料水素保持特性に強く依存している。種々のプラズマ対向材料に対して、重水素イオンを照射して、対向壁からの水素放出量と放出温度等を系統的に評価している。核融合反応によるアルファ粒子は燃料希釈

をもたらし、自己点火をさまたげる。この要因として壁からのアルファ粒子の再放出がある。ヘリウムイオン照射にて、ヘリウムの捕捉及び放出プロセスを解明している。

#### (2) 低放射化材料のプラズマ対向壁としての適合性評価

これまでの低放射化材料についての主要な研究は、中性子照射による脆化やスエリング、材料開発であった。代表的な低放射化材料は、フェライト鋼、バナジウム合金、SiC/SiC コンポジットである。これらの構造材料は第一壁、ダイバータ、真空容器に用いられるので、対向壁としての適性を評価しなければならない。真空容器としてのフェライト鋼のガス放出特性と壁調整法、水素脆化しやすいバナジウム合金に対して酸化膜による水素吸収の激減（原研 JFT-2M グループとの共同研究）、SiC/SiC のガス透過特性（京大との共同研究）に関して研究を展開している。

#### (3) 核融合装置のプラズマ壁相互作用

LHD の真空容器内壁にはマテリアルプローブが取り付けられており、各サイクル実験後に取り出して、放電ガス保持特性、不純物堆積、エロージョン等を調べている。この研究は核融合科学研との共同研究として実施されており、LHD プラズマと壁との相互作用を解明するとともに、適切な壁調整のための放電洗浄法を検討している。DIII-D のダイバータには DiMES といわれるマテリアルプローブが取り付けられている。GA との共同研究として、DIII-D ダイバータプラズマとダイバータ壁との相互作用を解明している。

#### (4) ITER の炉内トリチウムインベントリー

国際熱核融合実験炉 ITER の炉内トリチウムインベントリーの評価は、安全性の観点から最重要課題の一つになっている。炉内材料であるカーボンに多量に含まれ、特にコデポジション膜によるカーボ

ンダストに多く含まれる。原研の加熱工学グループと共同研究をしてきており、カーボンダストの水素保持量は水素イオン照射による保持量とほぼ同程度になることを示した。現在、より系統的な実験を行い、ITER の炉内トリチウムインベントリーをより正確に評価している。

### 主要著書

- [1] “プラズマ物理工学”、北海道大学図書刊行会(1999)
- [2] “核融合物理工学”、北海道大学図書刊行会(1999)
- [3] “真空工学”、共立出版(1991)

### 教官スタッフ

日野友明 (教授、工学博士)

1973年北海道大学工学研究科博士課程中退  
核融合工学、プラズマ対向壁工学、プラズマプロセッシング  
tomhino@qe.eng.hokudai.ac.jp

広畑優子 (助教授、工学博士)

1968年北海道教育大学卒業  
プラズマ対向壁工学、プラズマプロセッシング  
hirohata@qe.eng.hokudai.ac.jp

山内有三 (助手、工学博士)

1998年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了  
プラズマ応用、プラズマ対向壁工学  
yamauchi@qe.eng.hokudai.ac.jp

## 光と電磁波による プラズマ・量子ビーム計測

### プラズマ理工学講座 エネルギー変換工学分野

研究室人員: 教官 3, 技官 1,  
博士課程 3, 修士課程 9, 学部学生 4  
060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目  
TEL: 011-706-6654 FAX: 011-706-7128  
<http://tyche.qe.eng.hokudai.ac.jp/>

## 研究室紹介

本研究室は、北海道大学工学部原子工学科開設の翌年（昭和 43 年）にエネルギー変換工学講座として発足し、平成 8 年の大学院重点化と大講座制にともない、北海道大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻プラズマ理工学講座のエネルギー変換工学分野となった。現在、榎戸武揚教授、富岡智助教授、西山修輔助手、北川広貴技官のスタッフ 4 名と、博士後期課程 3 名、修士課程 8 名の大学院生、4 名の学部学生が所属している。

現在の主な研究テーマは、プラズマ計測に関する研究と加速器のビーム計測に関する研究であり、実験とともに数値解析にも力を入れている。

## 研究テーマ

### 超高速駒取りカメラの開発

レーザー核融合の爆縮プラズマ計測では、直径 1 mm 程度の燃料ペレットが 1 ns 以下の時間スケールで爆縮される様子を計測するために、空間分解能とともに非常に高い時間分解能を求められる。本研究室では、近接型光増幅素子に外部透明電極を付加したタイプの超高速駒取りカメラを開発し、高速シャッターリングの実験とシャッターリング特性の解析を行ってきた。現在は、シャッターリング電界の制御により視野内の同時刻性を改善し数十ピコ秒の時間分解能を得る方法や、強磁場下における空間解像度への影響を研究している。また、X 線画像も計測対象になるが、軟 X 線領域では解像度を測る標準的なテストチャートが使用できない。そのため、X 線領域でも容易に得られるナ

イフエッジ像から 3 本線テストチャートに相当する画像を求めて解像度を測定する方法を提案し、定量的な評価を行っている。

### 赤外線ホログラフィー干渉計測法における赤外線画像の可視化法と検出材料の開発

ホログラフィー干渉法は、プラズマの時間的・空間的電子密度分布計測法として多くの利点を有している。プラズマ計測に赤外から遠赤外の光を用いる場合、光源としては強力なレーザーが既に実用化されているが、現在の二次元赤外線記録素子は感度と解像度がホログラムを記録するためには不十分である。本研究室では、光源に炭酸ガスレーザーを用いたホログラフィー干渉法で、赤外光の干渉縞を可視光で読み取り、可視光のホログラムとして記録する二段ホログラフィー干渉法の開発を行っている。赤外光から可視光への変換には、熱レンズ効果を持つ有機材料を用いる方法と、コレステリック液晶を用いる方法を研究しており、前者は赤外光の吸収・熱化による可視光に対する屈折率の変化を利用し、後者は吸収・熱化による透過可視光に対する旋光能の変化を利用する。現在、熱レンズ効果材料を用いた実時間二段ホログラフィー干渉法の実験を行い、プラズマ密度測定への応用を予定している。また、コレステリック液晶は組成によって使用可能な温度範囲が大きく変化するため、適当な組成を探索している。

### 共振器法によるプラズマ密度測定の数値解析

実験室規模の比較的小型低密度のプラズマに対しては、マイクロ波共振器法による電子密度測定が用いら

れる。本研究室では、開放型共振器であるファブリ・ペロー共振器にプラズマを入れた場合の共振特性の変化を境界要素法を用いて解析し、電子密度の測定や密度分布の逆問題解析のシミュレーションを行っている。

## 加速器電子ビームの非破壊計測

シンクロトロン放射光や自由電子レーザーには、高輝度・低エミッタンスの安定した高エネルギー電子ビームが求められる。また、大強度中性子発生や TRU 消滅処理には大電流の陽子ビームが用いられる。これらのビームを発生する加速器では、ビームへの影響やモニタの損傷を避けるために非接触型のビームモニタが必要とされる。本研究室では、高エネルギーのパルス状ビームがその周辺に発生する電磁界をスロットアンテナで検出する非接触ビーム位置計測法を開発し、数値計算によるアンテナの設計とビームへの影響の評価、電子線形加速器による実験を行っている。また、マイクロ波によって加速されたビームは、幅が数十ピコ秒程度の微細構造パルスからなるが、そのパルス幅や波形を直接測定することは難しい。そのため、ビーム周辺の電磁界で定在波を形成させ、その空間分布からパルス幅や波形を測定する方法を提案し、実験と数値解析を行っている。そのほかにも、FD-TD 法によるビーム周辺電磁界の解析手法やビーム周辺電磁界から遺伝的アルゴリズムを用いてビームの断面プロフィールを逆問題推定する方法、共振器を用いたビームパルスのスペクトルの測定の研究を行っている。

## 置換ポリアセチレンの構造解析と放射線照射による構造変化

電子線リソグラフィのレジストや有機高分子半導体の材料として期待されている置換ポリアセチレンを Rh 錯体触媒で合成し、その構造や $\gamma$ 線、電子線の照射による構造変化を原子間力顕微鏡、核磁気共鳴、X 線回折、半経験的分子化学計算等で詳細に調査している。

## 主要論文

1. “Analysis for Improvement of Simultaneity of Shuttering in an Ultra High-Speed Framing Camera”, IEEE Trans. Mag. 36, 1774(2000)

2. “FD-TD Analysis of Scattered Fields Excited by a High Energy Pulsed Beam of Charged Particles Using Point Charge Responses”, IEEE Trans. Mag. 36, 888(2000)
3. “ニトロベンゼンを赤外線位相情報検出材料として用いた 2 段ホログラフィー干渉法”, 機能材料, 19, 39(1999)
4. “定在波測定を用いる電子ビーム微細構造パルス幅の計測”, プラズマ・核融合学会誌, 74, 29(1998)
5. “FD-TD 法による超高速カメラのシャッター特性の解析”, 電気学会論文誌, 117A, 22(1997)
6. “不均質媒質中のヘルムホルツ波動方程式への境界要素法の適用”, 電気学会論文誌, 115A, 1098(1995)

## スタッフ

榎戸 武揚 (教授: 工学博士)

1971 年 北海道大学大学院工学研究科博士課程修了  
プラズマ物理学、電子画像光学、エネルギー変換工学  
E-mail: ten@qe.eng.hokudai.ac.jp

富岡 智 (助教授: 博士(工学))

1988 年 北海道大学大学院工学研究科修士課程修了  
数値電磁界解析、プラズマ計測学  
E-mail: tom@qe.eng.hokudai.ac.jp

西山 修輔 (助手: 博士(工学))

2000 年 北海道大学大学院工学研究科博士課程修了  
加速器工学、数値電磁界解析  
E-mail: shu@qe.eng.hokudai.ac.jp

北川 広貴 (技官)

E-mail: kitagawa@qe.eng.hokudai.ac.jp

## 照射損傷による材料の微細構造変化と照射誘起拡散現象の研究

### 機能物性学分野

研究室人員：教官 3 名、学部学生 4 名  
修士課程 9 名、博士課程 4 名  
060-8278 札幌市北区北 13 条西 8 丁目  
TEL: 011-706-6769 FAX: 011-706-6772  
URL: <http://eng.hokudai.ac.jp>

### 研究室紹介

機能物性学分野は、北海道大学の大学院重点化によって 1994 年に発足した。現在は、大貫惣明教授、渡辺精一教授、須田孝徳助手の教官と秘書、博士後期課程 4 名、博士前期課程 9 名の大学院生と 4 名の学部生が所属し、機能性材料の微細構造変化に基づく発現機構の研究と高エネルギー粒子線の機能性材料への応用に関する研究を行っている。炉工学の中でも照射損傷に関わる基礎的な研究分野であり、照射欠陥のモデリングを含めて、大学らしい研究領域である。具体的には、照射欠陥と照射創生（電子線、イオンビーム、中性子線）、電子顕微鏡学、ナノ構造、非平衡相形成 機能性材料（水素吸蔵合金、核融合炉材料、半導体材料、形状記憶合金などがその対象である。

### 研究テーマ

本研究グループでは大別して 4 つの研究課題で活動を行っている。

#### (1) 核融合炉材料の照射損傷[1]

中性子や電子線によるフェライト系 ODS 鋼の損傷効果、特にポイド形成や分散粒子の安定性に関する研究。

バナジウム合金の核変換元素の効果、特に

#### 水素の挙動

照射欠陥形成のモデリングの研究

オーステナイトの溶接部の低温鋭敏化や中性子照射との複合効果

イオン注入によるステンレス鋼の構造変化と表面特性の改質、などが行われている。

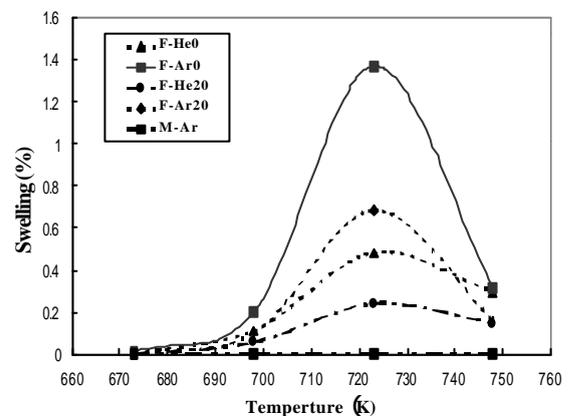


図 1 電子線照射による ODS フェライト鋼のスエリング。雰囲気制御と転位による改良効果

#### (2) 水素吸蔵合金の特性と微細構造変化[2]

水素吸蔵合金の微粉化機構の解明

水素吸蔵合金の中性子照射効果

吸蔵特性に及ぼすイオン注入およびイオンミキシングによる水素化特性の効果

Zr 系合金の水素化特性の解明と低エネルギー

ーイオン注入効果

バナジウム合金の機械的性質と微細組織に  
及ぼす高濃度水素の効果

(3) 金属間化合物の照射誘起非晶化の研究[3]

金属間化合物の照射誘起非晶質化現象の解  
明

金属間化合物の高速変形による組織変化  
NiTi 形状記憶合金のイオン照射による相変  
化

誘起非晶質化過程の電顕内動的観察

(4) 半導体材料のイオンビームによる組織変化に  
関する研究[4]

Poly-Si の照射誘起非晶質化

Mo/Si, Ti/Si のイオンミキシング効果

Si 剥離に及ぼす水素イオン低温注入効果

### 主要論文・著書

[1] S. Yamashita et. al., Effect of mechanical alloying parameters on irradiation damage in ODS ferritic steels, J. Nucl. Mater. 283-287 (2000)647-651

[2] K. Aoyagi et. al., Effect of hydrogen accumulation on mechanical property and microstructure in V-Cr-Ti alloys, J. Nucl. Mater., 283-287(2000)876-879.

[3] K.Tozawa, et. al., Nano-crystalline formation during stress-induced amorphization at crack tip in TiNi., J. Electron Microscopy Vol.48(5), 613-616(1999)

[4] T.Suda, Y.Yonezawa, H.Arashima, S.Ohnuki and T. Kabutomori: Improvement of Hydriding Property in ZrNi Alloy by means of H<sup>+</sup> Implantation, Atomistic Mechanisms in Beam Synthesis and Irradiation of Materials, by J.C. Barbour, S. Roorda, D. Ila, Vol. 504, MRS 227-231(1999)

### スタッフ

大貫 惣明 (教授, 工学博士)

1981 年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了  
合金の照射効果、電子顕微鏡学、結晶学

E-mail: ohnuki@loam-ms.eng.hokudai.ac.jp

渡辺 精一 (助教授, Ph.D)

1993 年ニューヨーク州立大学大学院博士課程修了  
照射誘起非平衡現象、電子顕微鏡学、統計物理

E-mail: watanabe@loam-ms.eng.hokudai.ac.jp

須田 孝徳 (助手, 工学士)

1987 年北見工業大学機械工学科卒業  
水素吸蔵合金、機能材料学

E-mail: suda@loam-ms.eng.hokudai.ac.jp

## 環境適合型エネルギーシステムを目指すプラズマ-電磁エネルギー変換

## エネルギー転換制御分野

研究室人員：教官4名，客員教官2名，学部学生3名，修士課程5名，博士課程1名  
060-8628 札幌市北区北13条西8丁目  
TEL: 011-706-6655 FAX: 011-706-7886  
URL: <http://www.caret.hokudai.ac.jp>

### 研究室紹介

本分野は，平成4年6月発足の北大エネルギー先端工学研究センターの一分野として，工学部付属先端電磁流体実験施設が改組改称されて発足した。分野には，粥川尚之教授，青木義明助教授，谷津茂男助手（工学研究科併任），沖中憲之助手（同併任）のスタッフ，博士後期課程1名，博士前期課程4名，学部生3名が所属しており，共通キーワードであるプラズマ物理の輪講が行われている[1]。他に，平成12年度は客員教官2名，研究推進員1名が配置されているが単年度更新のためスタッフ紹介では省かせていただく。研究は，核融合プラズマの非定常振動解析，燃焼プラズマの生成，計測，MHD発電，環境不適合人工物の燃焼処理，二酸化炭素無放出エネルギーシステムの設計と広い範囲に跨り，各教官の分担体勢で研究を進めている。

### 研究テーマ

(1) 環境適合型エネルギーシステムの設計と評価  
化石燃料は最大の環境負荷が懸念される資源であり今後もその使用量は増え続けると予想される。本テーマは，CO<sub>2</sub>抑制の鍵が酸素燃焼，高温燃焼ガスによる炭素系燃料の廃熱回収水素・一酸化炭素改質，水素・一酸化炭素・二酸化炭素の分離回収，分離した一酸化炭素のMHDへの再循環，水素の分散電源・自動車等への分配利用にあるとの考えから着想したものである。炭素資源の改質には

1200以上の高温を要し，このような高温廃熱が得られるトッパーとしてはMHD発電が唯一の候補である。研究が開始されて日が浅いが発電熱効率62～65%が試算されている。本テーマは粥川教授が分担している[2]。

(2) 石炭改質燃料プラズマのMHD3次元解析  
燃焼プラズマの導電率と電子の移動度が温度，圧力に強く依存するために必然的に3次元現象が顕著なプラズマの振る舞いを解析するために，本研究では米国ANLで開発された石炭燃焼プラズマコードを石炭ガス・純酸素燃焼プラズマコードに改良し，5MW級の小型MHD発電機も顕著な3次元現象が現れ発電性能が低下することを明らかにした[3]。今後は当研究室が提案する2成分印加磁場の下での現象と発電性能の改善効果を明らかにすることが狙いである。本テーマは粥川教授，沖中助手が担当している。

(3) 燃焼プラズマの生成と応用

将来のMHD発電機の動作プラズマは石炭改質一酸化炭素の純酸素燃焼が必要である。酸素は燃焼速度が速く均一燃焼が難しく，さらに高性能発電のためにはシード物質を均一に添加しかつ電離のために十分な滞留時間がとれる燃焼器である必要がある。燃焼温度は約3000，壁熱流束は3～5MW/m<sup>2</sup>になる。これらの条件を充たす燃焼器として本研究ではシード，酸素を多数のノズルから投入す

るマルチノズル高負荷燃焼器を設計し、モデル試験で良好な結果を得ている。今後は、高導電率プラズマを目指した試行実験と環境不適合人工物の高温燃焼処理の実験を行う予定である。本テーマは青木助教授が担当している。

#### (4) 燃焼プラズマの分光計測

多成分の燃焼プラズマの温度計測として単色輝線反転法が最も信頼性が高いが、MHDチャネル流の特徴として自己吸収と燃焼や乱流揺動が避けられない。本研究に関連して如何なる高速変動温度場をも計測できる偏光2光路ウイングスペクトル法を開発した。現在は、分光画像法を応用した温度とシード原子数密度分布の2次元高速測定への拡張研究を行っている[4]。担当は粥川教授、谷津助手である。

#### (5) 燃焼プラズマのMRI流速計測

高温でマッハ1程度的高速、しかも反応を伴う対象の流速計測法として磁気共鳴映像法の高速度化と検証実験を行っている。高速化法として在来のエコープラナー法(EPI)のパルス列改良した改良型エコープラナー法(MEPI)を提案し、衝撃波管で発生した $\sim 800$  m/sの流れの2次元可視化に成功している[5]。これは在来のEPIの適用限界を約1桁以上拡張したものである。本テーマは沖中助手が担当している。

#### (6) プラズマの非定常振動解析

核融合プラズマでは外力により誘起される強制振動と系の固有振動が混在している非定常な揺らぎや振動が普通であるが、共振系において両者を分離する解析手法やモードの性質については不明な点が多い。本研究によりウィグナー・ビレ分布関数により両者を分離抽出できることを明らかにし、さらに強制振動と外部振動の位相差の時間特性の普遍性を見いだすことを目的に、テータピンチプラズマやスフェロマクを入射したトカマクプラズマのデー

タ解析を行っている。担当者は谷津助手である。

### 主要論文・著書

- [1]粥川,青木,奥沢(訳),R.Dendy 著「プラズマダイナミクス」,講談社サイエンティフィック,(1996).
- [2]N.Kayukawa, Energy Conversion & Management 41(2000),1953-1974.
- [3]M.Kawamura, et.al., Proc. Int. Confer. MHD and High Temp. Technol., Beijing, 1,Oct.(1999),121.
- [4]大山,他,日本 AEM 学会誌, 7(1999),440-448.
- [5]菊池, 他,電気学会論文誌(B),118(1998),851.

### スタッフ



粥川尚之(教授,工学博士)  
1969年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了  
電磁流体力学,燃焼プラズマ計測,  
MHD発電,エネルギーシステム解析  
E-mail:kayukawa@qe.eng.hokudai.ac.jp



青木義明(助教授,工学博士)  
1970年北海道大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学  
MHD発電,コンピュータ工学,プラズマ工学,光計測工学  
E-mail:aoki@eng.hokudai.ac.jp



谷津茂男(助手,工学修士)  
1976年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了  
プラズマ工学,非線形振動論,画像処理計測  
E-mail:sy@eng.hokudai.ac.jp



沖中憲之(助手,博士(工学))  
1993年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了  
電磁流体力学,プラズマ工学,MHD発電  
E-mail:oki@qe.eng.hokudai.ac.jp