

核融合炉のアセスメントと 核融合エネルギー応用

原子エネルギー研究分野

研究室人員：教官 3 名、学部学生 2 名
修士課程 3 名、博士課程 1 名
611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
TEL: 0774-38-3433 FAX: 0774-38-3439
URL: <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/atomic/>

研究室紹介

現在本研究室は、井上信幸教授、山本靖助教授、竹内右人助手の教官スタッフと、博士後期課程 1 名、博士前期課程 3 名の大学院生と、2 名の学部生が所属しており、将来のエネルギー源としての核融合装置の実用化に向けた研究、核融合反応やプラズマの応用に関する研究を進めている。前者に関しては、主に国際熱核融合実験炉 (ITER) に関連した核融合炉システム設計や早期実現のための戦略的研究開発計画の検討評価を行っている。後者の核融合の応用に関しては、核融合中性子の中性子源としての利用を目的として、慣性静電閉じ込め核融合方式の主に円筒形装置について研究をしている。これまでのグロー放電による装置に比べ性能の向上すると考えられるイオン源を取り付けた装置の開発を行っている。また、トラス系での逃走電子の制御された取り出しによる大電流高エネルギービームとしての利用および外部ダイバータの可能性を研究している。

研究テーマ

(1) 核融合炉のアセスメント

磁気核融合実験炉としての国際協力で設計が進められている International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) について、その設計の

物理的・工学的妥当性についての評価を行っている。また、今後の核融合動力の開発戦略を考えるために、1) 核融合エネルギーの特徴を他のエネルギー源と比較検討して、エネルギー問題、資源問題、環境問題などの中での位置付けや、経済性、安全性、また核融合技術の波及効果の評価、2) 現在の知識基盤に基づき描くことのできる核融合動力炉について設計例の評価より、実現までに必要な技術や条件また実現時期についての評価を行っている。(図 1 参照)

(2) 慣性静電閉じ込め方式核融合の研究

球形容器において、球の中心に向けてイオン・電子ビームを入射することにより、中心において高密度のプラズマによるビーム衝突型核融合を起こさせることを目的とする慣性静電閉じ込め方式核融合に関して、当面の目標として、 10^7 n/s 程度の核融合中性子源としての応用を目標としている。本研究では、装置の簡便性と容易なプラズマ計測を目的として、形状を球形より円筒形とし、シミュレーション・実験ともに研究を行っており、現在イオン源の設置に向けて研究を行っている。(写真 1 参照)

(3) ヘリカル磁場からの逃走電子の引き出し

閉じた磁気面中で発生する逃走電子はトカマクなど、トロイダル電場が加わるプラズマ中で発生し、このときの逃走電子のエネルギー分布は低エネルギー

ギーから高エネルギーに広がっている。本研究では、ヘリカル系が構成する真空磁気面内を利用して、逃走電子の発生と引き出しなどの空間電荷に関する課題を追求している。ここでは純粋な電子ガスに電場を加えるため、高エネルギー電子ビームの発生が期待できる。こうした強力電子ビームは滅菌、有毒ガスの分析等、医療、農業、環境問題などで多くの利用が考えられている。研究内容としては、数値シミュレーションによる逃走電子の軌道計算、およびこの結果に基づき装置の製作・実験を計画している。(図2参照)

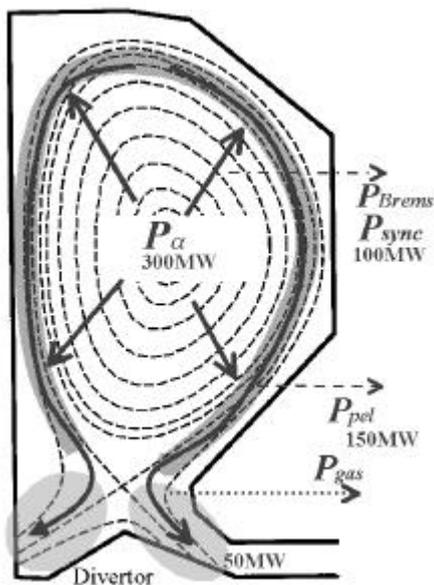


図.1 ダイバータ概念図



写真.1 実験装置

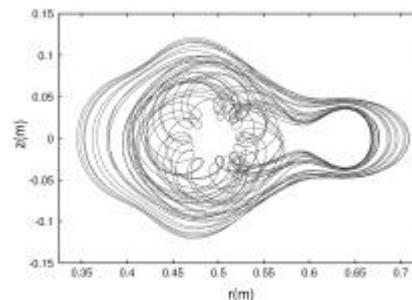


図.2 逃走電子の軌道計算結果

主要論文・著書

- [1] 核融合エネルギーの社会的受容性と科学的見通し III, プラズマ・核融合学会誌, 74 巻 (1998 年), 第 9 号, pp.957 ~ 966 .
- [2] "Design of a steady-state tokamak device with superconducting coils for a volumetric neutron source", Fusion Engineering and Design, 41(1998), pp.469-475.
- [3] "An Accelerated Beam-Plasma Neutron/Proton Source and Early Application of a Fusion Plasma", Fusion Energy 1998, Vol.4, pp.1173-1176, IAEA, Vienna, 1999.

スタッフ



井上 信幸 (教授,理学博士)

1963 年京都大学大学院理学研究科
修了
プラズマ理工学、核融合学
E-mail: inoue@iae.kyoto-u.ac.jp



山本 靖 (助教授,工学博士)

1984 年京都大学電気工学第二学科
卒業
核融合炉工学
E-mail:
y-yamamoto@iae.kyoto-u.ac.jp



竹内 右人 (助手,工学博士)

1985 年京都大学大学院工学研究科
博士課程修了
原子炉熱水力学、伝熱工学
E-mail: yuto@iae.kyoto-u.ac.jp

荷電粒子の高精緻制御による 高品位エネルギーの生成

粒子エネルギー研究分野

研究室人員：教官 4 名、学部学生 2 名
修士課程 3 名、博士課程 1 名
611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
TEL: 0774-38-3443 FAX: 0774-38-3449
URL: <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/>

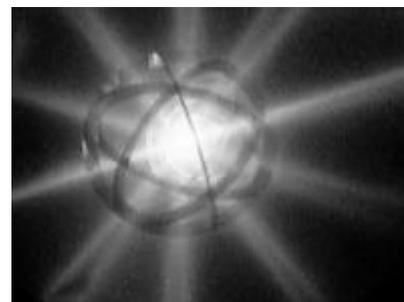
本研究室では荷電粒子の高度制御に関する創造的な研究に挑戦しており、現在、ビーム衝突核融合である静電慣性核融合や、電子サイクロトロン共鳴によるプラズマ生成・加熱、自由電子レーザー発生・応用、相対論的高輝度電子ビーム生成、核融合直接発電、先進核融合炉 ($D-^3He$) などの荷電粒子が関連する研究分野で内外の国立研究機関や大学等と共同研究を行っている。

に実験研究においては、平成 10 年度「原子力基礎研究」公募計画で認められたシュタルク効果を用いたレーザー誘起蛍光法による電界分布測定を行い、IECF 中心部の局所電位分布の直接的測定に世界で初めて成功し、さらにこの手法を用いて従来不明であった IECF の基本的メカニズムの解明研究を精力的に行っている。

慣性静電閉じ込め核融合の研究

慣性静電閉じ込め核融合(Inertial Electrostatic Confinement Fusion: IECF) は、球形真空容器とその中心に設置された透過率の高いメッシュ状球殻陰極との間のグロー放電で生じたイオンをメッシュ状陰極内中心部に集束・衝突させるもので、将来のエネルギー源としてはもちろんのこと、コンパクトで発生量可変な中性子・陽子源としての幅広い応用が期待されている。

本研究室では、直径 35 cm 程度のコンパクトな装置でこれまでに重水素核融合で毎秒 5 百万個の中性子を定常的に発生させることに成功した。一方、理論研究では大規模なシミュレーションでイオンや電子の挙動や核融合反応の特性を調べたり、あるいは将来の中性子を出さない $D-^3He$ 核融合に適用する高効率直接発電の研究などを行っている。特



IECF メッシュ状球殻陰極内の放電

電子サイクロトロン共鳴によるプラズマ生成・加熱の研究

電子サイクロトロンメーザ装置ジャイロトロンから放射される高パワーミリ波を用い、高温プラズマ生成・加熱のための高効率ミリ波伝送システム及び入射アンテナシステムの開発と構築、並びに、プラズマ閉じ込め装置に入射することによって生成・加熱された超高温無電流プラズマの閉じ込め・安定性・輸送、基本・第 2 高調波の正常波・異常波並びに静電波の伝搬・吸収に関する研究を進めている。

高周波電子銃による高輝度相対論的電子ビーム生成の研究

夢の光源と呼ばれる自由電子レーザーの極短波長での発振の実現など電子加速器を用いた物理研究の飛躍的な進展に向けて、相対論的電子ビームの高輝度化、すなわち空間電荷効果による反発力に抗して電子ビームの密度を極めて高くすることが強く求められている。本研究室では、高周波電界で電子ビームを引き出し加速する高周波電子銃について、大規模粒子シミュレーションによる最適設計、4.5空胴Sバンド高周波電子銃による電子ビーム生成実験、シミュレーション結果と測定結果の比較検証など、理論と実験の両面から研究を行っている。



高周波電子銃と電子ビーム診断装置

新型アンジュレータを用いた自由電子レーザーの高度化

自由電子レーザーは、相対論的電子ビームとの相互作用により利得を得ることから、波長連続可変性、高効率、高出力、という他のレーザーにない特長を持ち、様々な研究分野での応用が期待されている。本研究分野では、電子の軌道計算を基にしたレーザー発振の数値シミュレーションや、周期的な静磁場により電子を蛇行させ放射光を発生させる装置であるアンジュレータに関して、小型化、低廉化とともに高性能化が図れる新しい staggered-array 型アンジュレータについての設計研究を行っている。

主要論文

- [1] K. Yoshikawa, et al., "Real Time Measurements of Strongly Localized Potential Profile through Stark Effects in the Central Core Region of an Inertial-Electrostatic Fusion Device", 18th Symposium on Fusion Engineering, Albuquerque, NM, Oct. 25-29, pp. 27-30 (1999).
- [2] K. Nagasaki, et al., "Polarizer with Nonrectangular Grooves in the HE11 Mode Transmission Line", International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol.20, pp. 823-843 (1999)
- [3] K. Masuda, et al., "A Numerical Study of Emittance Growths in RF Guns", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A429, pp. 347-351 (1999).

スタッフ



吉川 潔 (教授、工学博士)

1974 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了
ビーム直接発電・慣性静電閉じ込め核融合・自由電子レーザー
E-mail: kiyoshi@iae.kyoto-u.ac.jp



長崎 百伸 (助教授、工学博士)

1992 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了
高周波プラズマ加熱・先進磁場配位プラズマ閉じ込め
E-mail: nagasaki@iae.kyoto-u.ac.jp



増田 開 (助手、工学博士)

1998 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了
自由電子レーザー・電子加速器
E-mail: masuda@iae.kyoto-u.ac.jp



督 壽之 (助手、工学士)

1966 年立命館大学工学部卒業
プラズマ制御・輸送
E-mail: toku@iae.kyoto-u.ac.jp

核融合炉用低放射化 構造材料の総合開発

複合機能変換過程研究分野

研究室人員：教官 3 名、研究員 3 名
修士課程 4 名、博士課程 9 名
611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
TEL: 0774-38-3464 FAX: 0774-38-3467
URL: <http://133.3.13.33>

研究室紹介

香山研究室は教官 3 名、研究員 3 名、秘書 3 名、博士課程 9 名、修士課程 4 名が所属する構成になっています。この中には留学生が 4 名含まれており、海外からの共同研究者の来訪も頻繁にあります。また、M2 以上の学生はほぼ年に 1 度は国際学会で発表を行っていることからかなり国際的な研究室だと言えます。

研究の特徴は、核融合炉用構造材料を中心に、その開発や設計の指針となる材料の強さや機能の物理を探求する研究分野です。具体的には、苛酷環境下で使用される低環境負荷型構造材料の開発や高度化、寿命予測などの基礎研究を行っています。研究の環境に関しては、加速器（図 1）をはじめ、電子顕微鏡類、強度試験機、大型焼成炉等と非常に充実しており、材料の合成から評価まで総合的な研究を行うことができます。また学生に対してもデスクトップコンピューターが 1 台ずつ与えられ研究するには申し分ない環境です。研究室のコアタイムは 9 時から 5 時で、仕事の内容も含めて大学の研究室というよりも企業的要素が強いのも特徴的です。

具体的な研究内容に関しては各人の主体性に任される部分が強く、基本的には学生は好きなように研究を進めています。そのためには責任感・主体

性・遂行能力といった研究者としての高い資質を要求されるわけですが、同時にそれらを培い、実践していくのに非常に良い環境だと言えます。



図 1 京都大学デュアルイオン加速器（DuET）施設

研究テーマ

核融合炉に代表される低環境負荷型のエネルギーシステムを実現するためには、実用条件として想定される（超）高温、高エネルギー粒子・量子場等の苛酷環境下で最大限の能力を発揮する材料を開発することが重要です。その際、安全性・経済性・環境親和性などが材料システムで決定されることから、極限環境下で安心して使える信頼性の高い材料を開発することが、近年におけるエネルギー材料工学の最も重要な課題です。以下主要となる三つの研究テーマについて順次説明します。

(1) 高エネルギー粒子・量子と材料の相互作用の研究

金属やセラミックスなどの材料は、中性子や加速イオンの照射により材料内部の原子レベルの構造が変化してその性質が変化します。照射による影響は電気特性、強度特性、結晶構造等広範囲に及び、また周囲の環境にも影響を及ぼします。高エネルギー粒子が材料に及ぼす影響を知る事は、様々な目的の為に材料特性をコントロールする事に直結しますが、原子レベルからの照射効果の知識の蓄積は依然不足しています。本研究室では材料への照射効果と、その活用法を中性子照射実験や加速器を用いたイオン照射実験等により研究しています。

(2) 核融合炉用低放射化鉄鋼材料の開発研究

核融合をクリーンエネルギーとして利用するには、そのブランケット構造材が、中性子照射下において低誘導放射化特性に優れる事が特に要求されます。本研究室が開発を進めている低放射化鉄鋼材料 JLF-1 は、従来の鉄鋼材料と比較しその特性を満たしつつも、強度特性に遜色なく中性子照射下における組織安定性も非常に優れている事が確認されました。また現在、JLF-1 をベースとした高温強度改良型の低放射化鉄鋼材料 (JLS - series, JLF-OD) の開発にも携わっており、JLF-1 よりも、その高温強度が確実に向上する事を確認しました。今後は、実際の核融合炉条件下での照射特性の評価のために、イオン照射を活用した研究を行う予定です。

(3) セラミックス系繊維強化複合材料の開発研究

SiC/SiC 複合材料は、超高温での使用に耐え、軽量高強度、低放射放射化特性などの優れた性質を有することから、核融合炉第一壁をはじめ多くのエネルギー関連構造材料として期待されています。特に近年における高結晶性繊維の開発、合成プロセスの高度化に伴い、耐照射特性の著しい改善が達成され、さらにその強度特性も従来のものと比較

して飛躍的に向上させることができました。本研究室では、SiC/SiC 複合材料の総合的な開発を進めるとともに、強化繊維・マトリックス・界面相等の各構成要素の特性や様々な試験環境によって複雑に変化する複合材料の特性について多角的に解析しています。

主要論文・著書

- [1] 香山晃 他, “先端材料シリーズ 照射効果と材料 日本材料科学会編”, 裳華房(1994).
- [2] A. Kohyama, M. Seki, K. Abe, T. Muroga, H. Matsui, S. Jitsukawa and S. Matsuda, “Interactions between Fusion Materials R&D and Other Technologies,” *Journal of Nuclear Materials*, 283-287, 20-27 (2000).
- [3] A. Kohyama, M. Kotani, Y. Katoh, T. Nakayasu, M. Sato, T. Yamamura and K. Okamura, “High-Performance SiC/SiC Composites by Improved PIP Processing with New Precursor Polymers,” *Journal of Nuclear Materials*, 283-287, 565-569 (2000).

スタッフ



香山 晃 (教授、工学博士)

1971 年東京大学大学院工学研究科
修士課程修了
材料物理学、核融合工学

E-mail: kohyama@iae.kyoto-u.ac.jp



加藤雄大 (助教授、工学博士)

1994 年東京大学大学院工学研究科
博士課程修了
エネルギー材料学、応用加速器科学

E-mail: katoh@iae.kyoto-u.ac.jp



神保光一 (助手、Ph.D.)

1982 年 Graduate School of
Engineering, University of California,
Berkeley
プラズマ物理学

E-mail: jimbo@iae.kyoto-u.ac.jp

核融合炉工学を支える 構造材料の開発研究 ~ 低放射化フェライト鋼 ~

機能エネルギー変換分野

研究室人員：教官 3 名，非常勤講師 1 名，
研究支援推進員 1 名，事務補佐員 1 名
博士課程 2 名，修士課程 4 名
住所：〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
TEL: 0774-38-3479 FAX: 0774-38-3479
URL: http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/storage/a-8_j.html

研究室紹介

核融合炉の成立性や，発電プラントにおけるエネルギー変換効率の向上を考慮した場合，核融合炉工学における「材料」の役割は極めて大きいと言えます．現在，本研究室には，教官 3 名，非常勤職員 2 名，秘書 1 名，博士課程 2 名，修士課程 4 名が所属し，核融合炉第一壁・ブランケット構造材料，プラズマ対向・高熱流束機器材料等のエネルギー変換機能材料の高機能・高性能化のための研究や，核融合炉プラント安全保守の判断基準にかかせない材料挙動の予測および理解を深めるための研究を理論及び実験の両面から行っています．

低放射化材料の照射下挙動評価・予測

本研究室では，核融合炉ブランケット第一壁の第一候補材料である「低放射化フェライト鋼」の照射下挙動の予測や，より高機能・高性能な材料開発を目的として，材料試験炉やイオン加速器等を用いた，材料の照射効果に関する研究を行っています．また，より高精度な材料挙動予測のために，計算機シミュレーション手法を用いた材料挙動モデリングの研究も行っています．

原子炉中性子照射効果

高エネルギー粒子線照射を受けた材料は，はじき出し損傷によって生じた格子欠陥の集合・離散に

よる微細組織変化 (例：図 1) を通して，材料の機械的特性が変化します．本研究室では，日米協力のもとで行われている米国の FFTF や HFIR 等の原子炉を用いた研究や，日本の JMTR などの材料試験炉を用いた研究を通して，内外の研究者たちと，時には協力しあいながら，時には競い合いながら，核融合炉材料の照射効果の評価に関する研究を行っています．

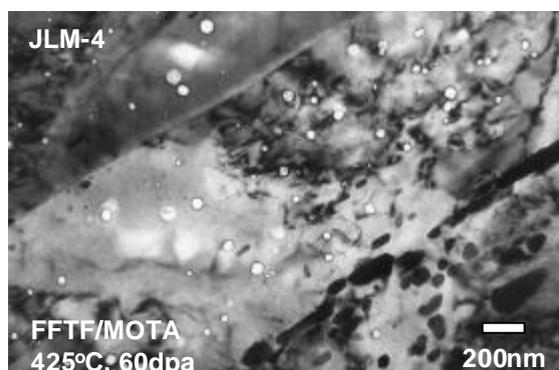


図1：原子炉中性子照射した低放射化フェライト鋼におけるポイド組織．

核変換ヘリウム効果

核融合中性子照射環境下では，材料内部に生じる多量の核変換ヘリウムや水素によって，材料特性が大きく変化することが懸念されています．本研究室においては，低放射化フェライト鋼の微細組織発達・機械的特性変化に及ぼす核変換ヘリウムや水素の影響を評価するために，サイクロトロン加速器や本研究所に設置された DuET (二重ビーム照射

装置)を用いた照射研究を行っています。低放射化フェライト鋼におけるヘリウムや水素の挙動に関しては、実験手法によってさまざまな異なる結果が得られています。そこで、本研究室では、分子動力学法によるシミュレーション研究(図2)とともに、昇温脱離測定装置(図3)を用いた研究を行うことによって、ヘリウムや水素の挙動、および弾き出し損傷欠陥との相互作用を調べ、ヘリウムや水素による材料特性変化を精度良く評価しています。

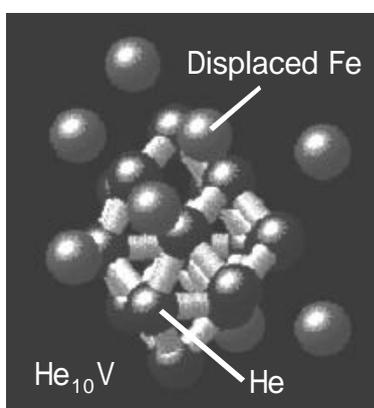


図2: Fe中に析出したヘリウムにより、周りのFe原子は押し出され、新たな格子間原子が形成される。

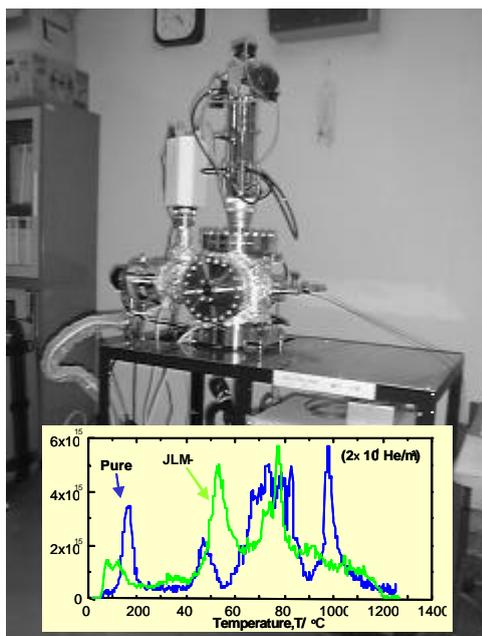


図3: 昇温脱離測定装置と得られたヘリウム脱離スペクトル

微小試験片技術・非破壊検査法の開発

微小試験片技術

照射環境下での材料挙動を調べる上で、限られた照射スペースを有効に使うためには、微小試験片技術の確立が不可欠です。照射脆化を調べるためのシャルピー衝撃試験用試験片や破壊靱性試験片を小型化することを目的として、試験片サイズ効果を実験的に明らかにすると共に、有限要素法を用いた応力分布解析を行い、サイズ効果のシミュレーション実験も行っています。

非破壊検査法

微細組織の照射による変化を非破壊的に調べる手法のひとつとして、陽電子寿命測定装置や電気・磁氣的性質測定による劣化評価法の確立を目指した研究も精力的に行っています。

スタッフ



木村晃彦
(教授,工学博士)
1982年東北大学大学院工学研究科
博士課程修了
原子力材料学,核融合材料学
E-mail: a-kimura@iae.kyoto-u.ac.jp



森下和功
(助教授,博士(工学))
1994年東京大学大学院工学系研究科
博士課程修了
エネルギー材料学,計算材料学
E-mail: k-morishita@iae.kyoto-u.ac.jp



笠田竜太
(助手,博士(エネルギー科学))
2001年京都大学大学院エネルギー
科学研究科博士課程修了
エネルギー材料学
E-mail: r-kasada@iae.kyoto-u.ac.jp

核融合炉燃料粒子と プラズマ対向壁との相互作用

核材料工学 (Aグループ)

研究室人員：教官 3 名、学部学生 4 名
修士課程 8 名、博士課程 1 名
606-8501 京都府京都市左京区吉田本町
TEL: 075-753-5838 FAX: 075-753-5845
URL: <http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp>

研究室紹介

私たちのグループの研究内容は、核燃料サイクル - 特に放射性廃棄物の深地層処分における核種の漏洩と移行 - に関する研究、軽水炉燃料被覆管の高燃焼度化に伴う安全性評価に関する研究、核融合炉水素プラズマ - 壁相互作用に関する研究などです。実験が主体の研究グループですので、体力を養うため(?)に各種リクレーションにも力を入れています。以下では核融合炉に関連するいくつかの研究テーマについて紹介します。

研究テーマ

(1) プラズマ対向壁中での燃料水素の動的挙動
核融合炉の燃料である三重水素(トリチウム)は天然に存在せず、放射性であるため、これを漏らすことなく無駄なく利用しなければなりません。ところが水素は固体中に容易に侵入するため、核融合プラズマに面している壁を透過したり、壁中に蓄積したりすることが予想されます。そこで、透過や蓄積のメカニズムを探り、有効で安全にトリチウムを利用できる方法について研究しています。

(2) 固体表面における水素粒子の反射

水素分子が壁に当たると、ほとんどが反射することは良く知られていますが、核融合炉の周辺プラズマのように、様々のエネルギーをもった水素原子が壁に当たった場合の反射挙動は、非常に複雑です。反射にどのような過程が関与しているかを、定量的に調べています。

(3) イオンビーム分析法の開発

固体の中や表面に存在する水素の量を測定することは容易ではありません。私たちは、非破壊的で定量性の優れた分析が可能なイオンビーム分析法に注目し、核反応や弾性散乱などを利用した手法を開発・改良しています。

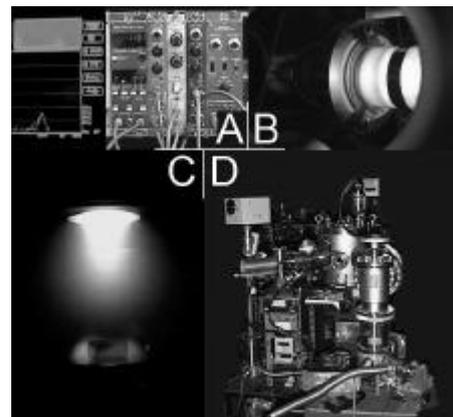


写真1 種々の実験装置

スタッフ

東 邦夫 (教授)

同位体の化学、放射性廃棄物処分、原子炉燃料
E-mail: higashi@nucleng.kyoto-u.ac.jp

高木 郁二 (助教授)

プラズマ - 壁相互作用、照射損傷、軽水炉材料
E-mail: takagi@nucleng.kyoto-u.ac.jp

藤田 治之 (助手)

金属材料中の水素挙動、イオンビーム分析
E-mail: fujita@nucleng.kyoto-u.ac.jp