

世界最高水準の遠赤外ジャイロトロン

赤外領域開発研究センターは、独自に開発した世界最高水準の遠赤外高出力光源「ジャイロトロン」を武器に、電波と光の間に位置し、電磁波の「未踏領域」と言われている遠赤外(テラヘルツ)領域の総合的な開発・研究を行っています。

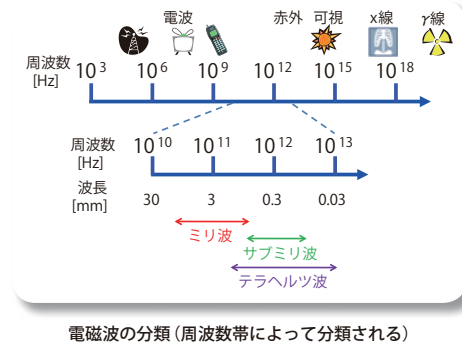
■ 遠赤外(テラヘルツ)領域の世界的拠点／センターは、国内外多数の研究機関と学术交流協定や共同研究覚書を締結し、グローバルな共同研究と学术交流を展開し、遠赤外(テラヘルツ)領域研究の世界的な拠点として注目されています。

////// センターの概要

本センターが研究している遠赤外領域とは、きわめて広範な波長領域にわたる電磁波の内、可視光から見て赤外の次に波長が長く、およそ1mmから数10ミクロンの、電波と光の間に位置する電磁波領域を指します。遠赤外領域はテラヘルツ領域と呼ばれることもあります。テラヘルツは周波数の単位で、テラヘルツ波の周波数は、携帯電話等の通信に用いられている電磁波(ギガヘルツ)の1000倍にあたります。

遠赤外(テラヘルツ)領域の電磁波は、光の直進性と電波の透過特性の両方を持ち、21世紀が必要とする画期的な新技術の宝庫です。

この電磁波領域は有効な光源の欠如のため、長年電磁波の未踏領域と呼ばれてきました。このことは逆に、この分野がこれから飛躍的に発展する可能性を秘めていることを意味します。センターでは、独自に開発した高出力遠赤外光源「ジャイロトロン」をさらに高度化する研究開発とともに、高出力遠赤外光源を用いて初めて可能になる遠赤外領域の先進的・先導的研究を行っています。

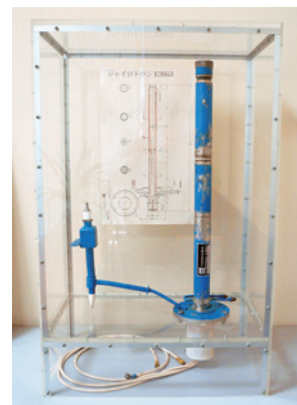


さらにレーザー光を利用した高いピーク強度のパルステラヘルツ波技術と分光技術を組み合わせ合わせたテラヘルツ科学の研究も推進しています。これにより、センターは高出力遠赤外／テラヘルツ波分野の我が国数々の研究拠点となっています。

また、センターは国内外の研究機関とグローバルなネットワークを構築して、研究を推進しており、高出力遠赤外／テラヘルツ波分野における研究開発の世界的拠点としての役割が期待されています。

////// 年表／福井大学における高周波ジャイロトロン開発とセンターの沿革

- 1980年代初期 研究開始
- 1984年…… 70 GHz、100 GHzの発振に成功(高周波ジャイロトロンとして世界的に注目される)
- 1989年…… 380 GHz(サブミリ波ジャイロトロンの実現)
- 1991年…… 636 GHzを達成(周波数を向上させていく)
- 1992年…… 工学部附属超伝導磁場応用実験施設を学内措置により設立
- 1993年…… 837 GHzを達成
- 1997年…… 889 GHzを達成(世界最高周波数記録を保持)
- 1999年…… 工学部附属超伝導磁場応用実験施設を発展的に解消し「遠赤外領域開発研究センター」を文部省令に基づく学内共同教育研究施設として設立
- 2005年…… 1013 GHzを達成(1テラヘルツのブレイクスルー)
- 2006年…… 超低温物性実験施設を機能統合
- 2008年…… テラヘルツ科学分野の組織強化
- 2011年…… センターの公募型共同研究を開始
- 2013年…… 「遠赤外領域」が工学系ミッション再定義により福井大学において強く推進すべき分野に指定される
- 2016年…… 助教1名の増員による組織強化
改組による部門再編および国際研究部門の創設
- 2017年…… 助教1名の増員による組織強化



Gyrottron FU I



センター長 立松 芳典

////// センターにおける研究開発目標

■ 電磁波の未踏領域を解消するために：

- 高出力遠赤外(テラヘルツ)光源「ジャイロトロン」のさらなる高性能化を目指す。
- 高効率伝送系・高感度検出器等、遠赤外(テラヘルツ)の基礎・基盤技術の研究開発を推進する。

■ 高周波ジャイロトロンの応用研究：

- パルスESR、非線形テラヘルツ波分光などの先進・先導的な計測応用研究を実施する。
- ジャイロトロンによる高出力遠赤外光(テラヘルツ波)を物質の反応／プロセス制御、機能性材料開発等に利用するパワー応用研究を実施する。

■ テラヘルツ波科学の推進：

- 新方式のテラヘルツ波発生・検出法、テラヘルツ分光法(THz-TDS)の開発により、生体分子や薬剤の計測・イメージング、テラヘルツ波環境計測や不規則凝縮相(溶液等)の超高速ダイナミクス等の研究を推進する。

■ 新学術分野の創成：

- 上記の先導的研究を通じ、基礎物理学、物質・材料科学、エネルギー科学、生命科学等の領域にまたがる高出力遠赤外光(テラヘルツ波)利用による新学術分野の創成を目指す。

////// 福井大学中期目標・中期計画におけるセンターの位置づけ

遠赤外領域の研究は、福井大学の重点研究分野として指定されており、第4期中期目標・中期計画にも挙げられています。

I 教育研究の質の向上に関する事項

3 研究に関する目標を達成するための措置

- (8) 地域から地球規模に至る社会課題を解決し、より良い社会の実現に寄与するため、研究により得られた科学的理論や基礎的知見の現実社会での実践に向けた研究開発を進め、社会変革につながるイノベーションの創出を目指す。
- (8)-1 コア技術である高出力遠赤外光源及び遠赤外領域計測技術の更なる先進化と分野融合型の共同研究開発を推進するため、社会問題解決につながる技術のイノベーションを目指し、第3期において実施した遠赤外領域の公募型国内共同研究を継続しつつ、新分野開拓及び分野融合研究を行うとともに、遠赤外領域における国際連携研究ネットワークを拡大・強化する。

対応する中期計画

評価指標(8)-1-A 遠赤外領域研究に関する国内・国際共同研究の新規実施件数：第3期(206件)より10%以上増加(第4期の合計)

////// 工学系ミッション再定義における位置づけ

本センターが「我が国唯一で世界最高水準のジャイロトロン」により先進的な研究実績を上げている「遠赤外領域」は、福井大学の工学系(工学分野)のミッション再定義において強く推進すべき研究分野として指定されています。



//// 研究組織

- センター長(併) / 立松 芳典 (教授)
- 副センター長(併) / 藤井 裕 (教授)

//// 遠赤外領域開発研究センターの研究部門

■ 基幹研究部門 Core Research Division / Group for Development of fundamental far-infrared technologies

遠赤外基礎技術グループ // 教授：立松 芳典 講師：福成 雅史

- 高出力遠赤外光源の開発
 - ジャイロトロンの高効率化、高安定化、高周波数化研究
- ▶▶▶ P5, 6



立松 芳典



福成 雅史

■ 基幹研究部門 Core Research Division / Group for Applications of terahertz technology to research for material science and sensing

遠赤外応用技術グループ // 教授：谷 正彦 准教授：牧野 哲征 講師：古屋 岳

- 新規なテラヘルツ波発生・検出法の開発
 - 広帯域テラヘルツ波を用いた光学・分光研究
 - 超短パルスレーザーを用いた創エネルギー材料の動的物性の解明
- ▶▶▶ P9, 10



谷 正彦



牧野 哲征



古屋 岳

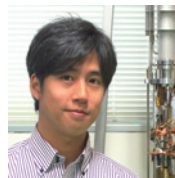
■ 基幹研究部門 Core Research Division / Group for Low-Temperature Quantum Physics

低温量子物性研究グループ // 教授：藤井 裕 講師：石川 裕也 特命助教：仲川 晃平

- サブミリ波帯の電子スピン共鳴分光
 - ミリ波・サブミリ波によるマテリアル・プロセッシング
 - 動的核スピン偏極(DNP)による高感度NMRの開発と応用
- ▶▶▶ P7, 8



藤井 裕



石川 裕也

■ 国際研究部門 International Research Division

准教授：山口 裕資 准教授：Mary Clare Sison ESCAÑO 特命助教：北原 英明
クロス・アポイントメント制度、及び招聘制度による海外の研究者(特命教授・准教授)数名

- Gyrotron FU CW シリーズを光源とする高出力テラヘルツ技術の開発
- 国内外研究機関との連携によるテラヘルツ新技術の開発と実用化



山口 裕資



Mary Clare Sison ESCAÑO

■ 客員研究部門 Visiting Professor's Division / Domestic visitor and research adviser

国内招聘/リサーチアドバイザー // 遠赤外領域の研究における国内の先端的研究者を、客員教授・准教授として招いています。

- 高感度遠赤外分光技術の開発・高出力テラヘルツ波の応用
- 新方式テラヘルツ波分光法の開発と応用
- 電磁波照射によるハイパーサーミア効果の研究
- 電磁波照射による生体・生体分子への影響評価

■ 協力研究部門 Cooperative Research Division / Material physics in far-infrared region

遠赤外応用 // 教授：光藤 誠太郎 教授：浅野 貴行

- サブミリ波ジャイロトロンを用いたESRとNMRの結合・相互作用の研究
- サブミリ波領域におけるESR分光測定

■ 協力研究部門 Cooperative Research Division / THz spectroscopy and sensing / Millimeter wave communications / Optoelectronics

分光計測/テラヘルツ分光/ミリ波通信 // 教授：栗原 一嘉 / 教授：山本 晃司 准教授：守安 毅 / 教授：藤元 美俊

- プラズモニクスのテラヘルツ分光計測への応用研究
- 光励起した半導体におけるテラヘルツパルスの伝播に関する研究
- ミリ波帯高性能アンテナの研究
- テラヘルツ分光による物質科学研究

■ 協力研究部門 Cooperative Research Division / Material evaluation in far-infrared region

遠赤外素材評価 // 教授：本田 知巳

- 高品質セラミックスの機械的特性の評価
- 高出力遠赤外光を用いて開発した新材料の表面機能評価

■ 協力研究部門 Cooperative Research Division / Biological application of far-infrared technologies

生物応用 // 教授：沖 昌也、小西 慶幸 准教授：鈴木 悠

- 電磁波照射による天然・生体試料への影響評価

研究支援組織

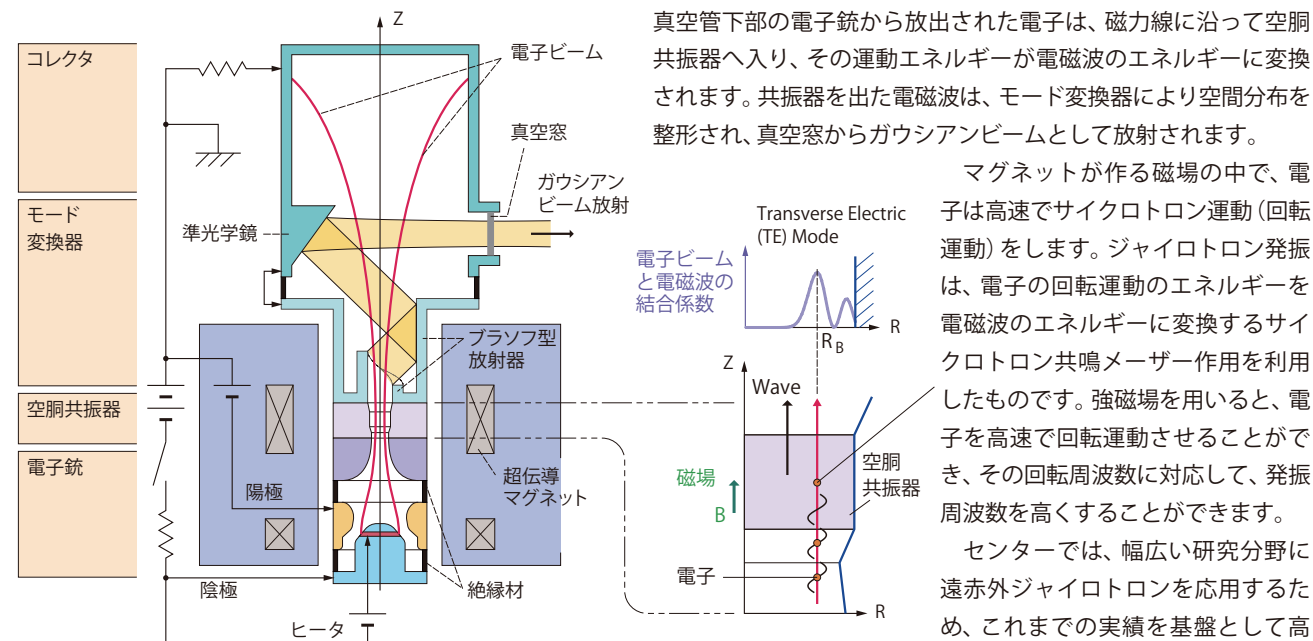
- 派遣技術職員……………小林 英一、戸澤 理詞
- 寒剤供給……………寒剤供給セクション長：藤井 裕 (教授、兼任)
- 事務支援組織……………森戸 みゆき、山田麻美 (教務補佐員)
柴島 資子 (事務補佐員)
福井大学研究・地域連携推進部研究推進課

//// 研究内容・研究成果

1 ジャイロトロン的高度化研究

ジャイロトロンは、数十 GHz から数百 GHz (遠赤外/テラヘルツ) 領域で動作する電磁波源です。この周波数帯において、ジャイロトロンを超える高出力の装置は他に無く、様々な研究分野での応用が期待されています。

(1) ジャイロトロンの概要



(2) モード変換器内蔵ジャイロトロン FU CW G Series

ガウスビームへの変換器を内蔵する連続動作ジャイロトロン(Gyrotron FU CW G Series)の開発を開始しました。これにより、ジャイロトロンを幅広く応用研究に用いることができるようになります。

- FU CW GI**
 - 組立管
 - 基本波発振 203 GHz (0.5 kW)
 - ポジトロニウムの超微細構造測定に利用
- FU CW GII**
 - 組立管
 - 2次高調波発振 395 GHz
 - DNP/NMR 計測に利用

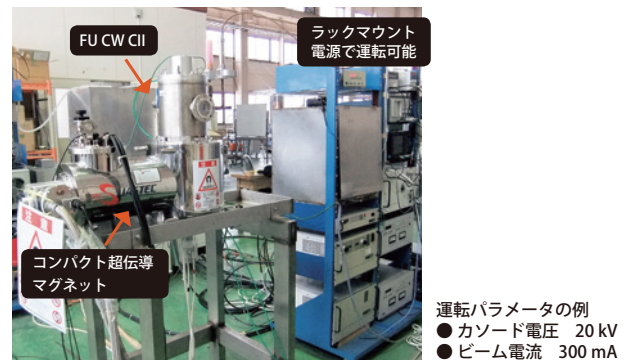
- Gyrotron FU CW GV**
 - 封切管
 - 2次高調波発振で4%の発振効率を達成
 - 10時間を超える連続発振を実現
 - パルス ESR 用の光源として利用予定

- FU CW GIV**
 - 封切管
 - 2次高調波発振 ~ 395 GHz 周波数連続可変

- Gyrotron FU CW GI からの放射ビームによる温度上昇の赤外線画像**
- ガウスビーム出力の実証**
- FU CW GV**
 - 封切管
 - 基本波 多周波数発振 160 ~ 270 GHz (1 kW)
 - 汎用

(3) コンパクトジャイロトロン Gyrotron FU CW C Series

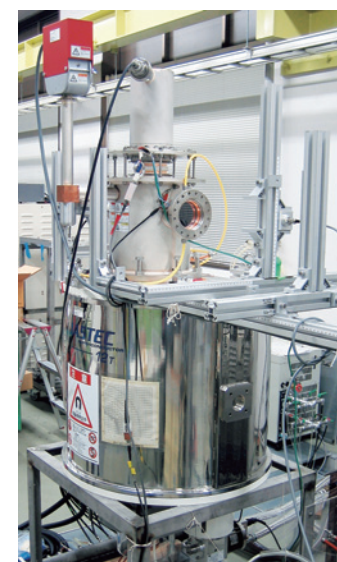
ジャイロトロン管、マグネットおよび電源のコンパクト化により、ジャイロトロンのコンパクト化に成功しました。床面積: 3 m², 高さ: 1.5 m に設置可能です。



- FU CW CI**
 - 組立管
 - 基本波 107 ~ 205 GHz (150 ~ 320 W)
 - 2次高調波 290 ~ 396 GHz (10 ~ 30 W)
 - 磁気共鳴測定、DNP/NMR

- FU CW CII**
 - 封切管
 - 基本波発振 203 GHz (0.8 kW)
 - モード変換器内蔵

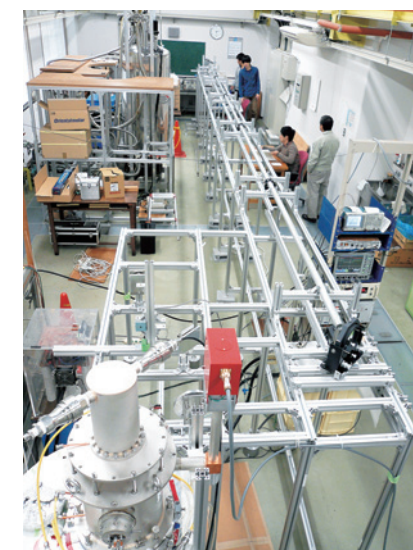
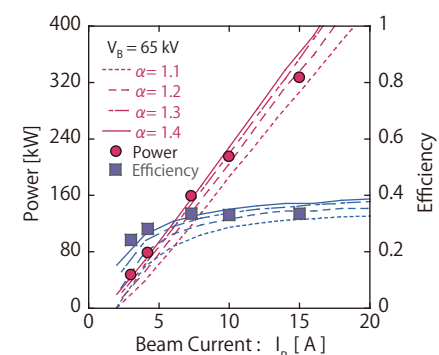
(4) 高出力パルスジャイロトロンの開発



12 T の超伝導マグネットに搭載された高出力パルスジャイロトロン。大型ヘリカル装置 LHD (核融合科学研究所) への適用を目標に開発中

ジャイロトロンを用いて、1億度にもなる核融合プラズマのイオン温度を計測することができます。しかし、100 kW を超える高出力が必要です。

高出力パルスジャイロトロン開発目標
→ 300 ~ 400 GHz の周波数が最適
→ 300 kW の高出力が必要



ジャイロトロン出力の長距離伝送実験の様子

(5) 発振出力の安定化

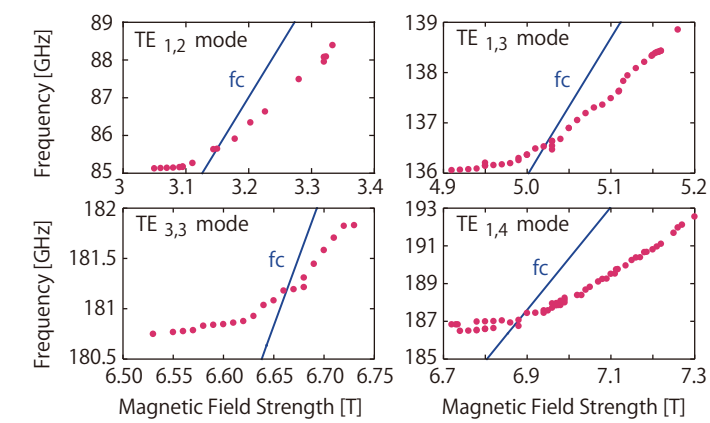
ジャイロトロンでの発振出力の長時間安定性が必要です。センターでは、PID 制御法によるフィードバック操作によって、出力の変動幅 0.6% 以下の高安定化を実現しました。また、コンピュータ制御でジャイロトロンを運転する装置を開発しています。



コンピュータ制御によるジャイロトロン運転装置

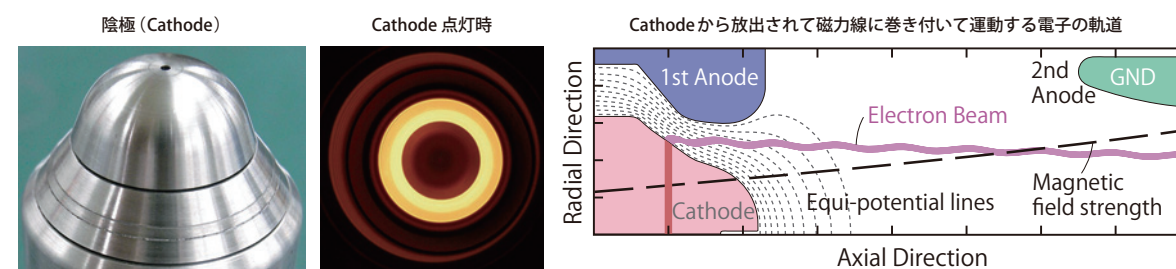
(6) 周波数連続可変性の付与

周波数の連続可変性も応用上重要です。後進波発振機構により、磁場強度の調整等で周波数を連続的に変えることができます。センターでは、異なる複数の周波数帯で発振周波数を連続的に調節する事のできる、多機能ジャイロトロン開発に成功しました。



(7) 高性能電子銃の開発

ジャイロトロン的高度化には、電磁波を発生する基になる電子を放出する電子銃の高性能化が重要です。当センターでは、独自の設計手法により高性能電子銃を開発しました。



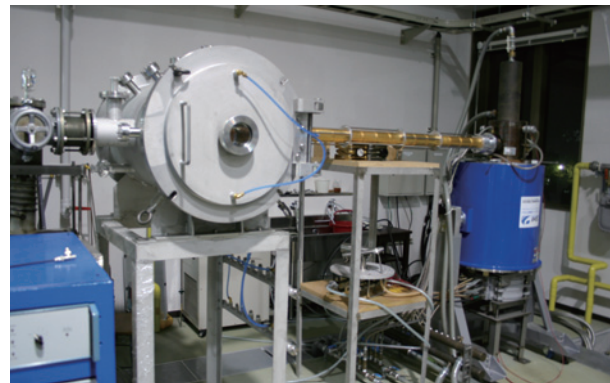
2 高出力遠赤外領域の材料・物性研究

センターではジャイロトロンの開発と同時に、ジャイロトロンの特性を生かした応用研究に取り組んでいます。世界で初めてジャイロトロンを用いた電子スピン共鳴に成功し、物性研究を行うと共に、これらの新技術開発はジャイロトロンの高周波にフィードバックされ、さらに前述の色々な分野での応用研究につながっています。また、世界最高周波数 (300 GHz) の電磁波による材料プロセッシング装置を独自に開発し、高周波電磁波による材料開発研究を進めるなど、高出力遠赤外領域の新技術・新学術領域の開拓に取り組んでいます。

(1) ジャイロトロンを用いた材料プロセッシングの研究

2.45 GHz の電磁波による加熱は電子レンジとして一般にも普及している技術です。センターではジャイロトロンの高周波・高出力の電磁波を用いることにより電子レンジの 100 倍に及ぶ高周波数の電磁波による加熱実験を行うことができます。電磁波による加熱は、従来の加熱と異なり、物質を構成する分子に、直接エネルギーを注入します。そのため、用いる電磁波の周波数や出力を上手く選ぶと、材料の機能が向上したり、新しい機能を付加することができます。

ジャイロトロンを用いた材料プロセッシング装置①



世界初の 300 GHz/2.3 kW 高出力電磁波照射装置

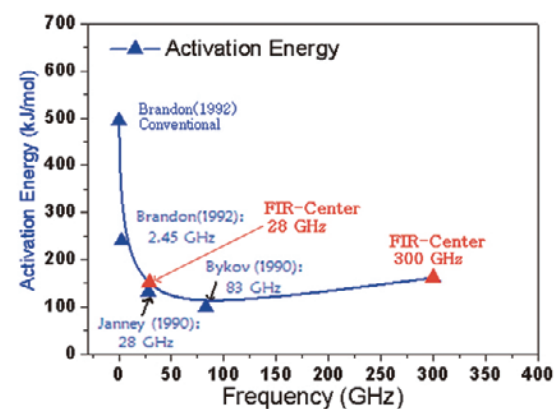
ジャイロトロンを用いた材料プロセッシング装置②



28 GHz/15 kW 高出力電磁波照射装置

電磁波材料プロセッシングの特徴

- 焼結対象のセラミックス自身が発熱する
 - 高いエネルギーの利用効率 (体積加熱方式)
 - 急速加熱 (熱伝導を利用しない体積加熱)
 - 粉体の粒成長を抑えた加熱
 - 熱ひずみの少ない、試料の均一加熱 (損傷が起らない)
 - 精密な温度調整
 - 超高温加熱が容易に実現
- 電磁波吸収特性の異なる材料を用いることにより熱平衡にとられない反応プロセスが実現できる (選択加熱の効果)
- 特殊効果 (非熱的効果や電磁波効果と呼ばれる) を利用した革新的材料開発が行える
 - 低温での緻密化の促進
 - 酸化の抑制
 - 難焼結材料の緻密化の促進

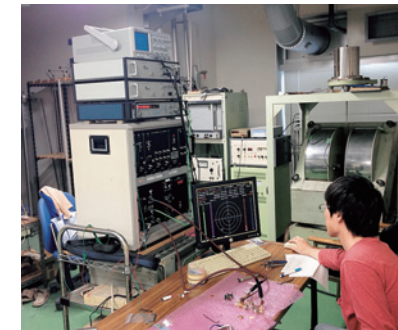


28 GHz、300 GHz の電磁波焼結実験を行い明らかになった高純度アルミナセラミックスの見かけの活性化エネルギーの周波数依存性

(2) 強磁場磁気共鳴測定装置の開発と応用

物質の性質 (特に磁気的性質) を、強磁場・超低温の極限環境において調べることで、物質を支配する物理的法則がわかります。その際、高周波電磁波を用いた磁気共鳴法を用いることで、物質内部のミクロな観点からの情報をこれまで調べられなかった領域まで観測することができ、新しい発見が期待されます。

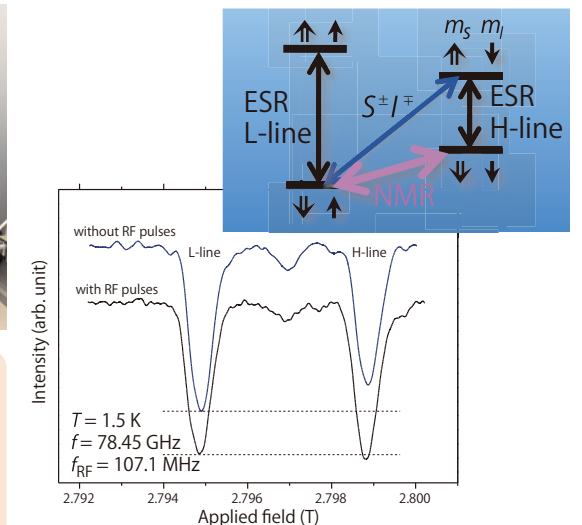
mm-wave vector network analyzer (MVNA)



フーリエ変換 NMR スペクトロメータ



ESR/NMR 二重共鳴法による測定例



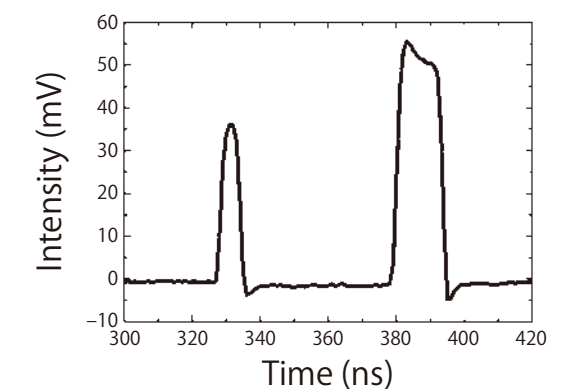
ESR によるシリコン中のリン原子の動的核偏極 (DNP) 効果の観測と NMR 遷移の誘起による核偏極のコントロール (Y. Fujii et al., J. Phys.: Conf. Ser. 568 (14) 042005)

(3) 高周波電子スピンエコー測定装置の開発

電子は電気と磁気的性質を持っています。その磁気的性質はもっぱら磁石として利用されてきました。量子力学の発展にともない、新しく電子の持つミクロな磁気的性質 (スピン) の量子論的性質を利用する、スピネレクトロニクスや量子コンピューターの実現が注目されています。ジャイロトロンの高周波・高出力の電磁波を数ナノ秒 (10 億分の 1 秒) 程度照射し測定することで、これらの実現に必要な電子スピンの動的な特性を知ると共に電子スピンを電磁波により制御することができるようになります。



開発中の高周波電子スピンエコー測定装置



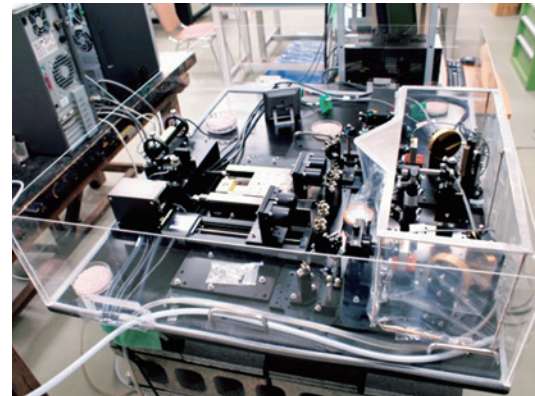
光駆動半導体スイッチングデバイスによりコヒーレンスを保ったまま 10 ns、20 ns に超短パルス化された 154 GHz ジャイロトロン出力

3 テラヘルツ波を用いた分光・応用研究

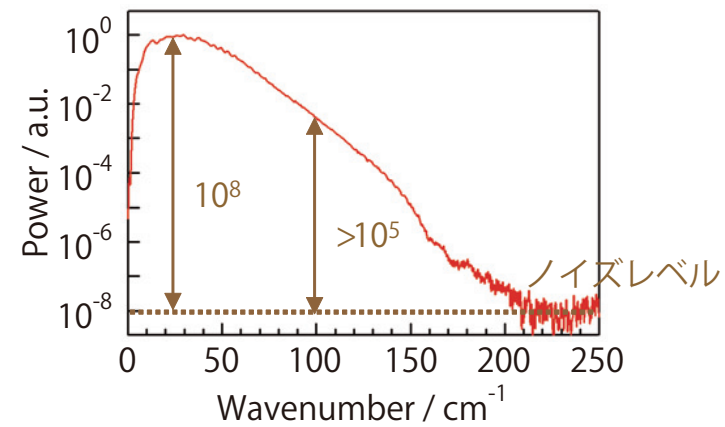
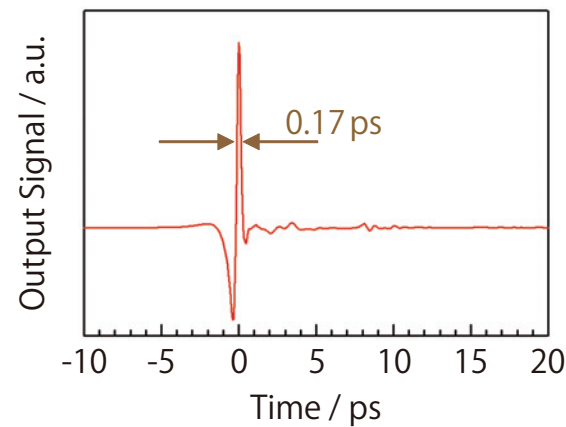
遠赤外応用技術グループでは、テラヘルツ領域の分光研究とその応用研究を行っています。

- 新規なテラヘルツ波発生・検出法の開発
- 広帯域テラヘルツ波を用いた光学・分光研究
- 新規なラマン分光法によるテラヘルツ分光法の開発

テラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz-Time Domain Spectroscopy, THz-TDS) では、フェムト秒の時間分解で広帯域テラヘルツ波の時間波形の測定を行い、0.1 ~ 5 THz のスペクトルを測定することができます。このような実験を行うために、フェムト秒パルスレーザーや光伝導スイッチ素子 (THz 波の発生および検出のための素子) を用いています。



テラヘルツ時間領域分光装置

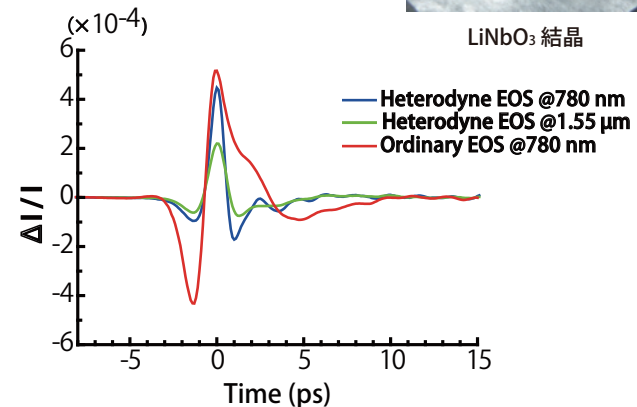
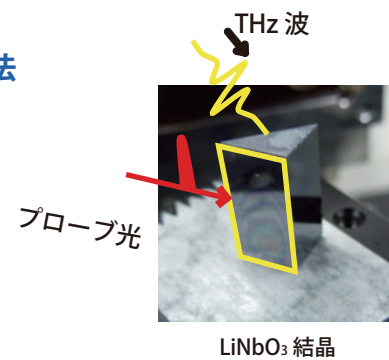


(1) 新規なテラヘルツ波発生・検出法の開発

— チェレンコフ位相整合を用いたテラヘルツ波の電気光学検出法

新規なテラヘルツ波の検出法としてチェレンコフ位相整合という方法を用いた電気光学 (EO) サンプリング (注) 検出法を開発しました。この方法ではテラヘルツ波とプローブ光が交差する角度を調整することで、どのような波長のプローブ光も利用できるという利点があります。さらに従来のように偏光変化を検出するのではなく、強度変化のみを検出するヘテロダイン EO サンプリング法の研究も行っています。

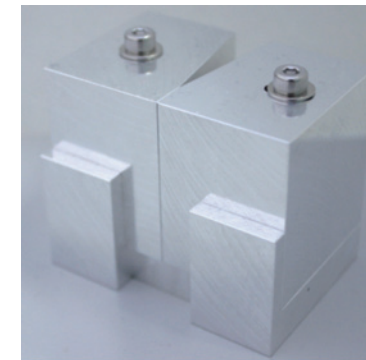
注：電気光学サンプリングとは、電場により特定の結晶 (非線形光学結晶) の屈折率が非等方的に変化することを利用して、電磁波の波形をパルスレーザーを用いて時間分解検出する計測手法です。



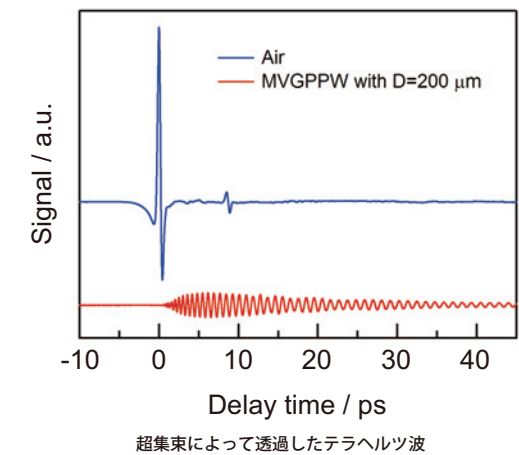
Si プリズム結合 LiNbO₃ 結晶 (上図) を用いた THz 波のチェレンコフ位相整合 & ヘテロダイン EO サンプリング検出波形

(2) テラヘルツ波の超集束効果研究

自由空間を伝搬するテラヘルツ波は、回折限界によってサブミリメートル以下に集光することは困難なこと (集光限界) が知られています。しかし、写真のような金属テーパと金属平行平板を合わせた金属導波路を用いることによって、簡単にテラヘルツ波を波長よりも小さい領域に集めることが可能となります。これをテラヘルツ波の超集束効果といいます。右図は導波路を透過する前と透過後の THz 時間波形です。テラヘルツ波の超集束効果を達成することによって、薄膜や微量サイズの試料に対するテラヘルツ波検査への応用へ展開することが可能となります。われわれは、超集束効果が起こる原因を調べる基礎研究から、テラヘルツ波による薄膜・微量検出の応用研究を行っています。



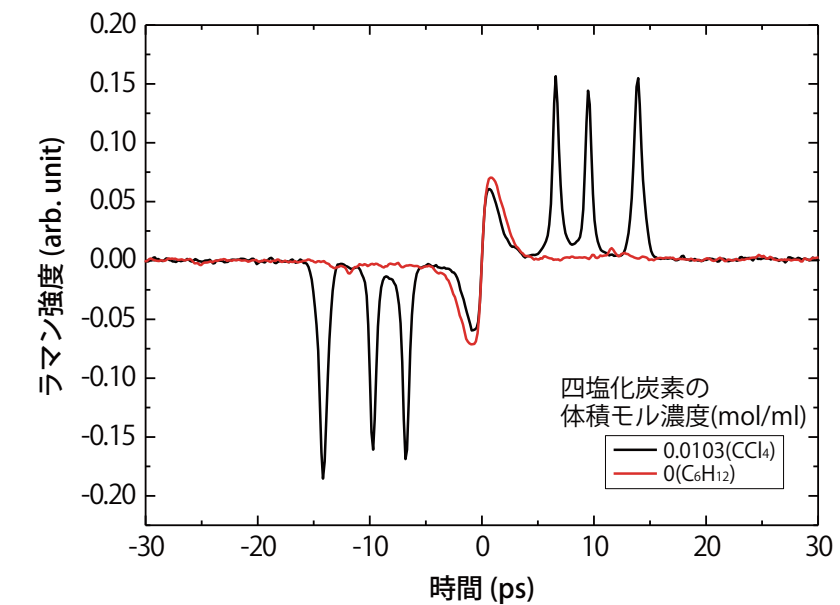
金属導波路



超集束によって透過したテラヘルツ波

(3) 新規なテラヘルツ帯ラマン分光法の開発 — 時間領域コヒーレントラマン分光法の開発

テラヘルツ帯の分子振動を調べる新規手法として、時間領域で信号検出を行う「時間領域コヒーレントラマン分光法」の開発を進めています。従来の方法ではテラヘルツ帯の差周波数を持つ、2 台の周波数制御された励起レーザーが必要でしたが、新しく開発した手法では、パルスレーザーの周波数分散をうまく制御することで 1 台のレーザーで励起可能で、数 10 GHz の低振動数領域まで観測することが可能です。



時間領域コヒーレントラマン分光法を用いた四塩化炭素のラマンスペクトル例

国内共同研究 (公募型)

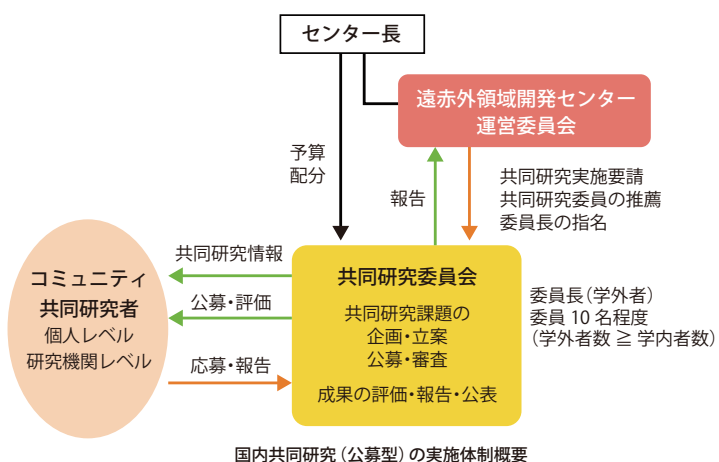
センターはすでに、国際コンソーシアムを主宰する中核としての役割を担うなど、高出力遠赤外/テラヘルツ波技術の開発を推進する世界的な拠点の一つとして機能しています (→ 13 ページ)。国内諸機関との連携についても、センターは、開発した高性能遠赤外ジャイロトロン幅広い研究課題への応用やテラヘルツ波科学の推進のために、一層の組織強化を図っています。これは、コミュニティ研究者の要望に応えることでもあります。

この状況を踏まえ、センターは、高出力遠赤外領域研究における国内共同研究拠点としての機能強化に向けて、学内措置により、公募による国内共同研究を平成 23 年度から開始しています。この共同研究制度は、従来個人レベルで行われてきた共同研究を強化するとともに、センター自体の研究活力の向上にも寄与しています。これは、センターが目指す遠赤外光・テラヘルツ波光源の開発・学術応用において新分野の創成につながると期待されます。

実施体制概要

国内共同研究を公正かつ円滑に実施するため、センター運営委員会のもとに、センター外の研究者を含む委員により構成される共同研究委員会が設置されています。この共同研究委員会が共同研究の公募や審査、成果報告会の開催などを担います。

このような共同研究の情報は研究者コミュニティ等にも広く開示されており、新たな共同研究の応募を喚起しています。積極的な共同研究のご提案をお待ちしています。詳しくはセンターホームページ内の国内共同研究のページをご覧ください。



共同研究実施の推移

公募型国内共同研究は、平成 23 年度に採択課題 20 件でスタートしました。その後、採択数は増加し、共同研究の規模は年々拡大する傾向にあります。この共同研究には、約 50 の機関に所属する研究者約 80 人が参加し、年間のセンター来訪延べ人数は数百人・日に達しています。

共同研究の実績

毎年、学術雑誌論文および国際会議論文の発表がそれぞれ数件以上、国際会議発表と国内学会発表は各々数十件を越えており、高出力遠赤外領域における研究アクティビティの向上に寄与しています。

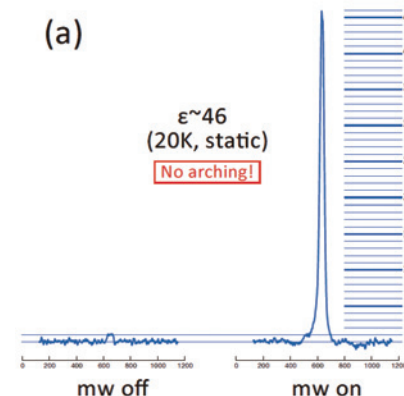
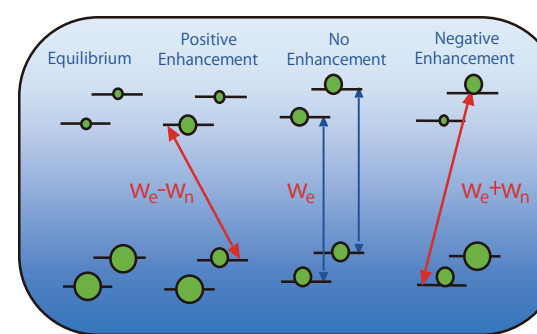
また、共同研究の分野は、生命科学や物質科学へのジャイロトロンの応用を目指した DNP-NMR 分光法、ジャイロトロンを用いたポジトロニウムの超微細構造準位間の誘導遷移の実証といった基礎物理学の領域、エネルギー科学の領域に関わる核融合プラズマ計測法、新素材開発からテラヘルツ波科学の展開のための要素技術開発、磁気共鳴法による物性研究など広範囲にわたっています。

国内共同研究の成果トピック

国内の研究機関との共同研究により、生命科学・物質科学・基礎物理学等、幅広い分野の画期的科学技術開発に取り組んでいます。

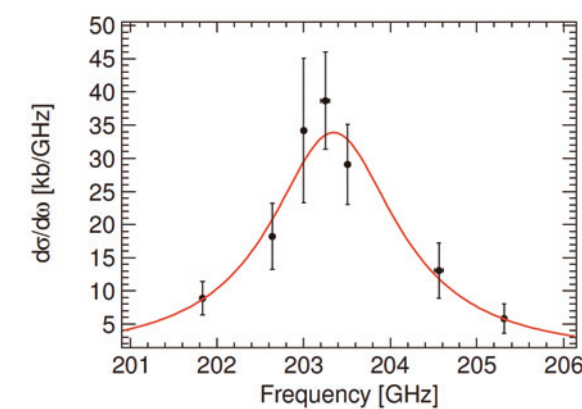
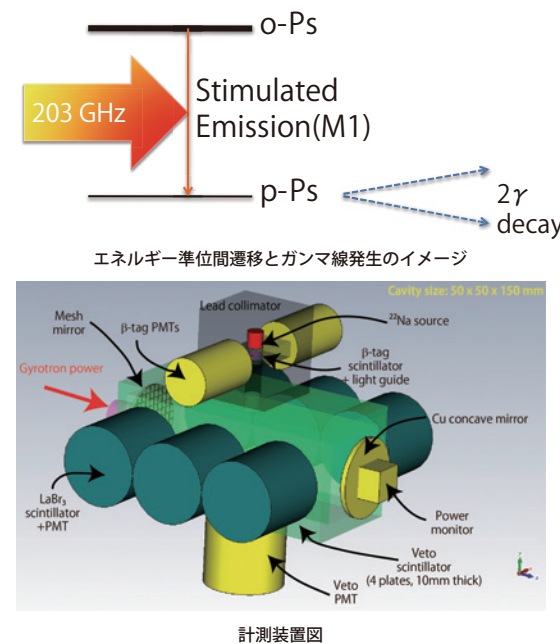
(1) DNP-NMR 分光による蛋白質分子の解析 — NMR 分光の高性能化 (大阪大学蛋白質研究所、Warwick 大学 (英国) との共同研究)

- ジャイロトロンからの高出力遠赤外光を試料に照射して電子の高磁化を原子核に移すこと (DNP、動的核偏極) により、NMR 分光の感度が飛躍的に向上します (DNP-NMR 分光)。この手法は、蛋白質分子等、複雑分子の構造解析への応用が期待されています。
- ジャイロトロンを用いた Warwick 大学の実験では、ジャイロトロン出力の照射により NMR 分光の感度が約 60 倍向上しました。
- 大阪大学蛋白質研究所の 600 MHz-NMR 装置では、395 GHz 帯のジャイロトロンを用いることにより、46 倍の感度向上を達成しました。



(2) ポジトロニウムの超微細構造の直接計測 — 素粒子物理学の課題解明 (東京大学素粒子物理国際研究センターとの共同研究)

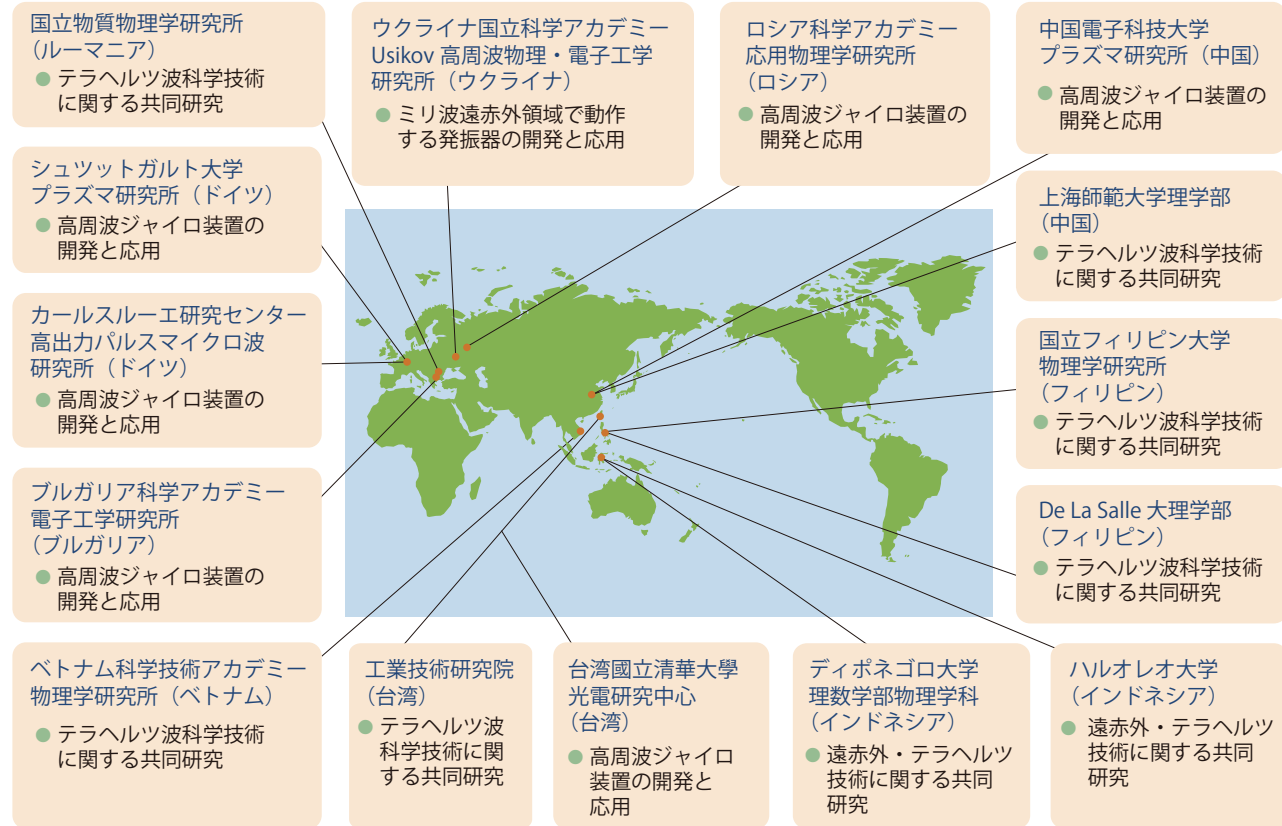
- ジャイロトロンからの高出力遠赤外光は、素粒子物理学の研究にも応用されています。
- 高出力遠赤外光を照射しながら、エネルギー準位の遷移に伴って発生するガンマ線を計測することにより、ポジトロニウムのエネルギー準位差を直接測定する実験に世界で初めて成功しました。



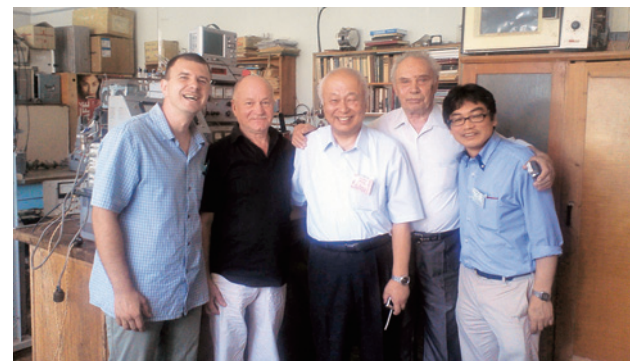
//// 国際的な研究推進

- センターは、海外および国内の機関との間に 10 件程度の学術交流協定および 10 件程度の共同研究覚書を締結し、共同研究を展開しています。
- センターは、10 年間にわたり推進してきた国際コンソーシアムを見直し、2015 年度に新たな枠組みのもとに「高出力テラヘルツ領域開発研究推進のための国際コンソーシアム」を立ち上げ、10 機関程度の海外機関・数機関程度の国内機関が連携しています。センターはコンソーシアムの中心的役割 (facilitator) を担っています。
- 招へい教授の制度により、常時 1 名の外国人研究者を招聘し、国際交流を展開しています。

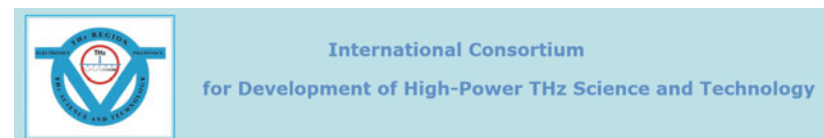
■これまで学術交流協定および共同研究覚書を交わした実績のある研究機関



招へい教授の Santos 教授 (フィリピンのデ・ラ・サル大学より)



ウクライナ科学アカデミー Usikov 高周波物理・電子工学研究所における共同研究

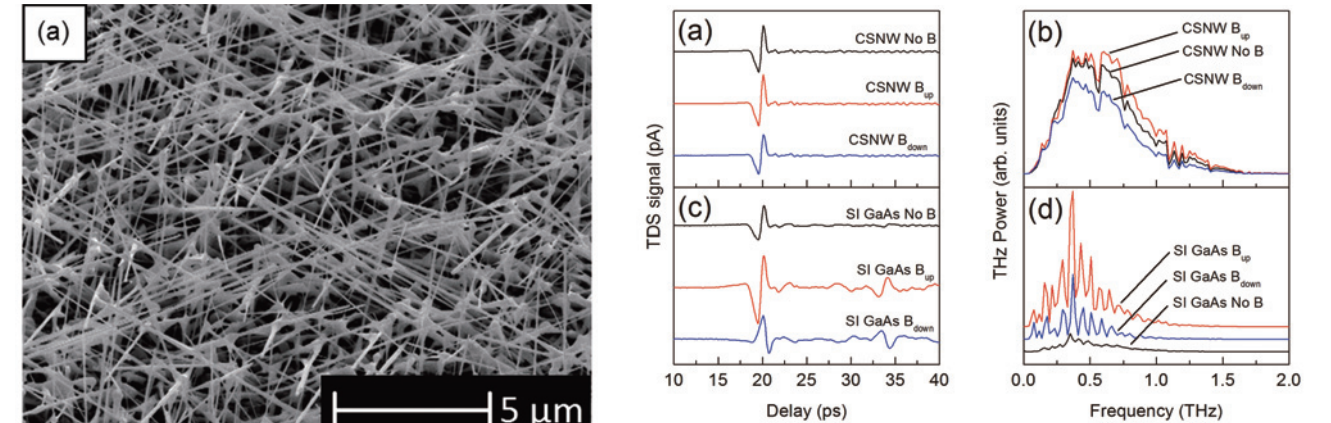


国際コンソーシアムの WEB ページ
http://fir.u-fukui.ac.jp/Website_Consortium/index.html

//// 国際共同研究の成果トピック

(1) テラヘルツ波を用いた半導体ナノ構造の研究 — 半導体ナノ構造からのテラヘルツ波放射 (国立フィリピン大学物理学研究所との共同研究)

- ナノワイヤなどの半導体ナノ構造にフェムト秒レーザーを照射するとテラヘルツ波が構造に依存して放射されます。そのメカニズムはまだ十分解明されていませんが、この現象を利用して、ナノ構造の評価やナノ構造を利用した高効率なテラヘルツ波発生素子の実現が期待されます。

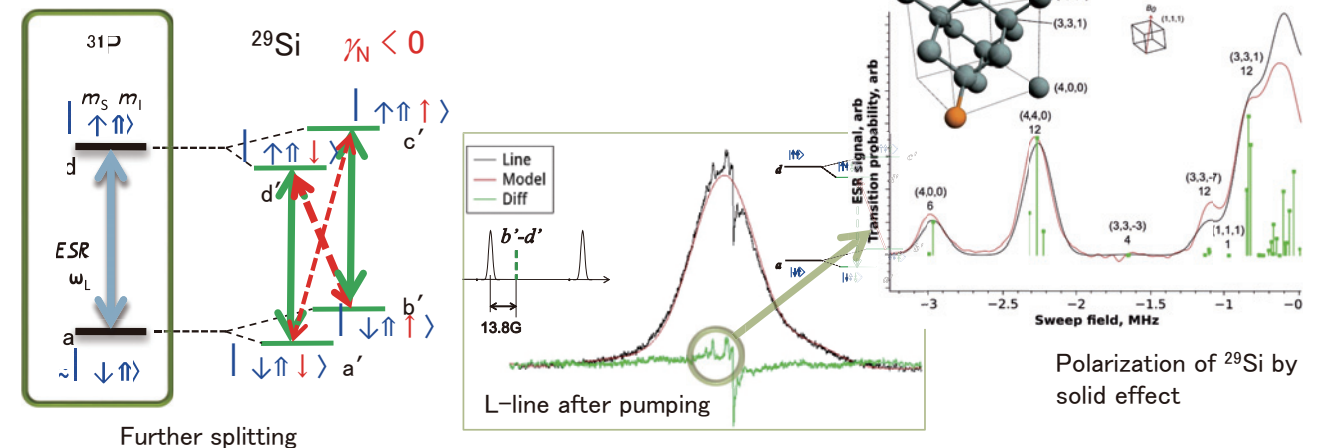


Si 基板上に成長させた GaAs-AlGaAs のコアシェル構造ナノワイヤの走査型電子顕微鏡写真

上向き、下向き磁場を印加したとき、および磁場を印加しないときの GaAs-AlGaAs のコアシェル構造ナノワイヤと半絶縁性 GaAs (参照用) からのテラヘルツ放射波形 (左) そのパワースペクトル (右)
 ※ Appl. Phys. Lett. 102 (2013) 063101 より抜粋

(2) 量子コンピュータ候補デバイスであるシリコン半導体に関する基礎研究 — 超低温・強磁場中の磁気共鳴法 (フィンランド (Turku 大学) および韓国 (KAIST, KBSI) との共同研究)

- 量子コンピュータ (QC) の有力な候補デバイスであるリンを希薄にドーピングした純良なシリコン結晶 (Si:P) について、QC 実現に必要とされる極限条件 (0.2 K までの超低温域かつ 4.6 テスラの強磁場中) での磁気共鳴測定による研究を行いました。
- 通常 1 本の ESR 共鳴線が、シリコン同位体 ²⁹Si (I=1/2, 天然存在比 4.7%) の結晶学的な位置によって微細に分解されることを実験的に示し、²⁹Si への個別アクセスの可能性を示唆しました。
- さらに、²⁹Si-³¹P 核スピンペアの禁制遷移の励起により、固体効果 (solid-effect) 動的核偏極 (DNP) を引き起こし、ペアのスピン状態を制御できることを初めて示しました。



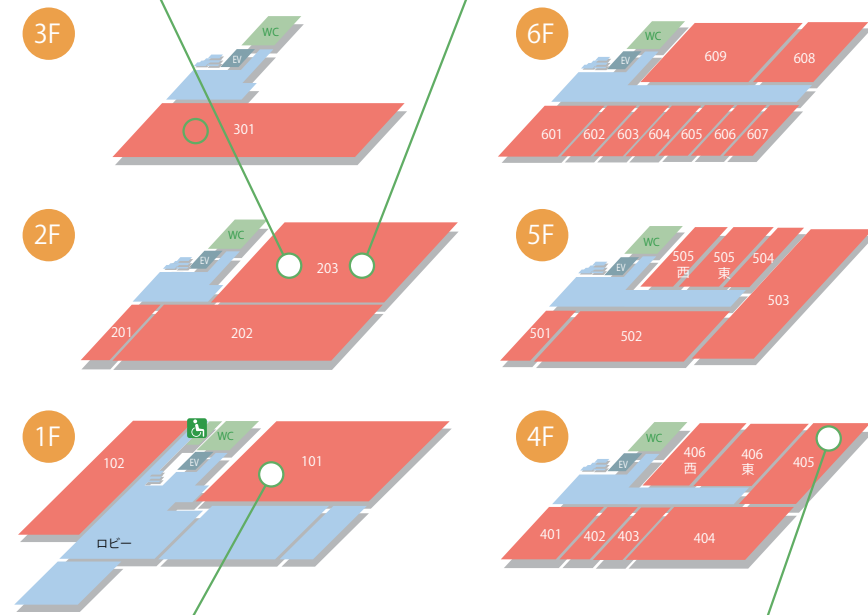
関連論文 J. Järvinen et al.: Phys. Rev. B 90 (2014) 214401
 J. Järvinen et al.: Phys. Rev. B 92 (2015) 121202(R)

//// センターの基盤装置

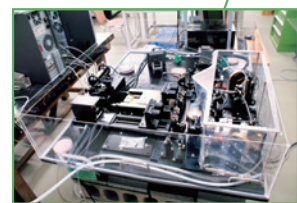
遠赤外分子レーザー装置



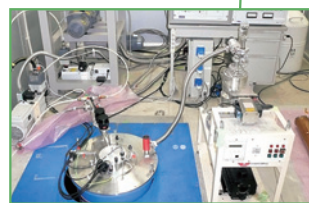
モード変換器内蔵
多周波数発振ジャイロトロン
FU CW GV



28 GHz セラミック焼結装置

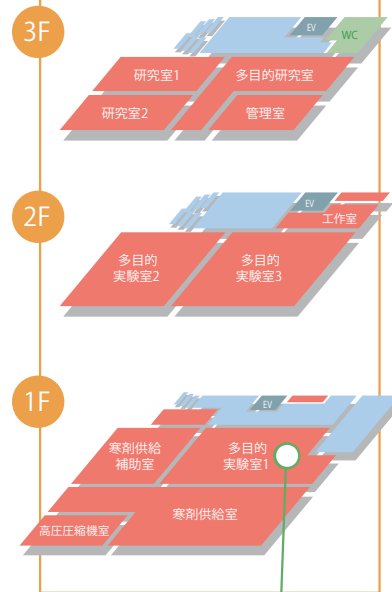


THz-TDS 装置



THz ESR 装置

超低温物性実験施設



- ジャイロトロン FU CW GI
- ジャイロトロン FU CW GIII
- ジャイロトロン FU CW GV (203 室)
- ジャイロトロン FU CW GVIB
- ジャイロトロン FU CW GVII
- ジャイロトロン FU CW X
- ジャイロトロン FU CW VIIB
- ジャイロトロン FU CW CI
- ジャイロトロン FU CW CII
- パルスジャイロトロン
- 遠赤外分子レーザー装置 (203 室)
- BWO 光源システム
- ミリ波オロトロン発振器
- ジャイロトロンセラミックス焼結装置 (28 GHz) (101 室)
- ジャイロトロンセラミックス焼結装置 (24 GHz)
- テラヘルツ時間領域分光装置 (THz-TDS) (405 室)
- フェムト秒レーザー再生増幅器
- 原子間力顕微鏡 (AFM)
- キャピティブーダンパー
- 光パラメトリック型 フェムト秒パルス波長変換器
- 自己モード同期
- テラヘルツ ESR 装置 (下の 2 つを組み合わせ使用) (超低温施設)
- 18 T 超伝導マグネット (温度可変インサートまたは希釈冷凍機を付けて使用)
- テラヘルツ・ベクトルネットワークアナライザ
- 電波暗室
- サブミリ波帯プラズマ散乱装置

- 印: 写真付きで紹介した装置
- 印: 国内共同研究で利用可能な装置
- 印: その他の基盤的装置

//// トピックス

Jバトン賞の受賞

故 出原敏孝 元教授は、41th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016) において Kenneth J. Button Prize を受賞しました。同賞は、「遠赤外、ミリ波、テラヘルツ波学会」の国際組織委員会が毎年一人に贈るもので、日本人の受賞は 4 人目です。高出力のテラヘルツ電磁波源であるジャイロトロンの開発と、その分光計測への応用に対する傑出した貢献が認められ、同賞の受賞に至りました。



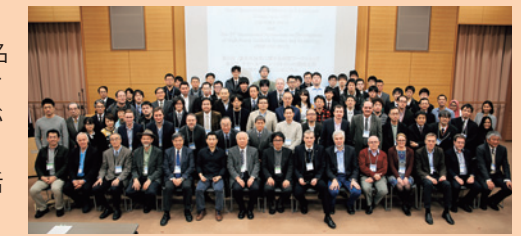
日本赤外線学会 業績賞の受賞



齊藤輝雄 元教授は、日本赤外線学会、第2回(平成29年度)業績賞を受賞しました。同賞は、赤外線分野の研究開発を通して科学技術、産業、ならびに社会生活の発展に貢献した者へ贈られます。「遠赤外領域高出力光源の開発および応用研究」に対する貢献が認められ、受賞に至りました。

遠赤外技術に関する国際ワークショップおよびテラヘルツジャイロトロンの開発応用に関する国際シンポジウムの開催

隔年にて、遠赤外技術に関する国際ワークショップ International Workshop on Far Infrared Technologies (IW-FIRT) およびテラヘルツジャイロトロンの開発応用に関する国際シンポジウム International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (DHP-TST) を開催しています。国内外から 100 名を超える参加者を得て、ワークショップでは口頭講演およびポスター発表にて遠赤外技術に関する最新の研究成果が報告されるとともに、活発な議論が展開されます。国際シンポジウムでは、国際コンソーシアム参加機関に限らず、サブテラヘルツからテラヘルツ帯の光源開発および応用に関して活発な議論が行われます。



西日本パルス強磁場研究拠点 KOFUC ネットワーク

西日本における強磁場研究拠点強化に向けて、大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター、神戸大学分子フォトサイエンスセンター、大阪府立大学研究推進機構強磁場環境利用研究センターとの間で相互に連携・協力に関する協定を結びました。4 大学の地名と University の Center がネットワークを形成することから、「KOFUC ネットワーク」と名付けました。この協定の下、パルス強磁場等を用いた研究協力・共同研究を行うとともに、強磁場科学分野の人材育成を図ります。これにより日本の強磁場物性研究ネットワーク「強磁場コラボラトリー」計画の推進に寄与します。



文部科学省エントランスにおける文部科学行政に関する展示と情報発信

平成 28 年 9 月 1 日から 10 月 24 日まで、福井大学と東京大学の共同研究の成果が展示されました。「たたみ一畳分の装置で迫る素粒子物理学 (福井大学・東京大学)」

福井大学遠赤外領域開発研究センターと東京大学理学系研究科は、福井大学が開発した高出力テラヘルツ波光源「ジャイロトロン」と東京大学の「電磁波共振器とポジトロニウムの発生装置」を組み合わせた装置を用いて、「ポジトロニウム」と呼ばれる自然界で最も軽い“原子”の状態間のエネルギー差の直接測定に世界で初めて成功しました。

(文部科学広報 No.202 平成 28 年 9 月号 P25「情報ひろば」より)
<http://www.mext.go.jp/joho-hiroba/>

素粒子物理学の実験には、欧州合同原子核研究機関 (CERN) のような大型加速器が用いられることが通例ですが、今回の研究は、たたみ一畳分のコンパクトな装置で実現しました。その大きさは、山手線一周分に相当する全長 27 キロの CERN の加速器に対し、約 3,500 万分の 1 サイズです。素粒子研究を展開する“たたみ一畳分”のユニークな実験装置を御紹介します。



////// 共用利用

■ ふくい産学官共同研究拠点

ふくい産学官共同研究拠点（ふくいグリーンイノベーションセンター）は、低炭素社会やエネルギー源の多様化の実現と地域産業の持続的な発展を結びつけるため、産学官の力を合わせて福井が有するユニークな技術を活かした共同研究を行っています。次世代の技術開発シーズを創出・育成し、技術移転を進めることで地域にスマートエネルギーデバイス産業の集積地を形成することを目指します。

■ センターにおける共用利用設備

- ジャイロトロン(周波数 160 GHz ~ 460 GHz, 出力10 W ~ 1kW)
- 極低温ミリ波電子スピン共鳴(ESR)測定装置(CW法)
- 極低温ミリ波電子スピン共鳴(ESR)測定装置(パルス法)
- 28 GHz 焼結炉 (Gycom GS-PM28-5)
- テラヘルツ分光器 (Aispec J-Spec 2001)
- ミリ波ベクトルネットワークアナライザ (AB Millimetre ABmm-0818)
- 電波暗室
- テラヘルツ波キャリア寿命測定システム (スペクトラフィジックス Spitfire, TOPAS)

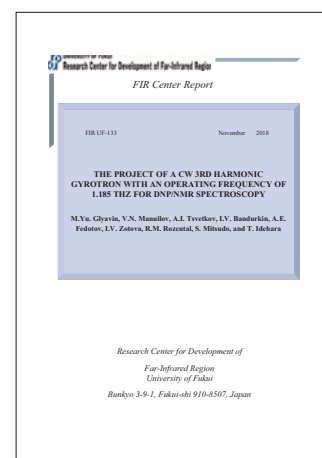
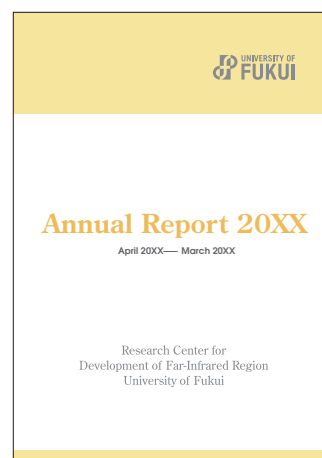
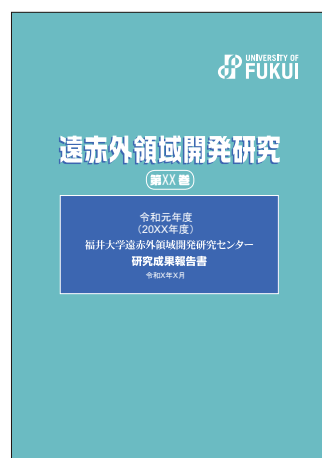
■ 拠点地用申込先

福井大学連携本部 II 号棟 3 階
 ふくい産学官共同研究拠点管理室
 TEL : 0776-27-9795
 e-mail : kyoten*hisac.u-fukui.ac.jp (*を@に変更してください)

////// センターの研究成果と情報発信

● 研究成果の発信・公開

センターにおける研究成果は、一般の学術誌、学会等において発表されるもののほか、年度ごと発行される研究成果報告書「遠赤外領域研究」とセンター英語論文集「Annual Report」においても公開しています。また、一般学術誌に掲載される前の研究成果をいち早く公開するために、論文の速報版として「遠赤センターレポート (FIR Center Report)」も発行しています。



● 公開セミナー

センターではおよそ月 1 回の割合で遠赤外、テラヘルツ領域の研究で著名な研究者を招き、公開セミナー（参加費無料、事前登録不要）を開催しています。開催スケジュール、その他の詳細についてはセンターの Web ページ (<http://fir.u-fukui.ac.jp/>) に掲載しています。

////// 教育

遠赤センターで学ぶには？

センターでは工学部、工学研究科と連携し、学部の 4 年生および大学院生を受け入れ、卒業研究、博士前期課程（修士課程）および博士後期課程（博士課程）の研究指導を行っています。センターにおいて卒業研究、修士および博士課程の課題研究を行うためには、以下の学科または専攻に在籍し、4 年生、および博士前後期課程に進級・進学時に遠赤センターの教員が属する研究グループに配属されることが必要です。



- **工学部** (2016 年 4 月に改組・再編されました。)
 2015 年度以前
 ● 物理工学科
 ● 電気・電子工学科
 2016 年度以降
 ● 応用物理学科
 ● 電気電子情報工学科
- **工学研究科博士前期課程** (2020 年 4 月に改組・再編されました。)
 2019 年度以前
 ● 物理学専攻
 ● 電気・電子工学専攻
 2020 年度以降
 ● 知識社会基礎工学専攻 電磁工学コース、電子物性コース
- **工学研究科博士後期課程** (2018 年 4 月に改組・再編されました。)
 2017 年度以前
 ● 総合創成工学専攻 物理学講座
 ● 総合創成工学専攻 電子システム講座
 2018 年度以降
 ● 総合創成工学専攻 物理学分野
 ● 総合創成工学専攻 電子システム分野

工学部および工学研究科 Web ページ
 → <http://www.eng.u-fukui.ac.jp/>

各学科、専攻の入試情報については福井大学の入試情報 Web ページ (http://www.u-fukui.ac.jp/~nyushi/admission_sect/eng/index.html) をご参照いただくか、学務部入試課 (TEL : 0776-27-9927 平日 8 : 30 ~ 17 : 15) にお問い合わせください。

活躍する学生たち

センターで研究する学生は国内、海外で開催される学会・研究会等で研究成果を発表したり、海外へ短期留学したりして活躍しています。

● 学会賞の受賞等

- 日本分光学会国際シンポジウム・年次講演会若手講演賞
- 日本電磁波エネルギー応用学会 (JEMEA) シンポジウム、JEMEA ベストポスター賞
- 日本物理学会領域 2 学生優秀発表賞
- International Photonics Conference 2011、Student Paper Award
- 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会発表奨励賞
- 国際シンポジウム最優秀学生ポスター賞
- 福井大学工学研究科大学院優秀学生
- 2014 年度
- 電子スピンサイエンス学会年会合同国際会議 (APES-IES-SEST)・SEST 学生優秀研究賞
- 2015 年度
- 応用物理学会講演奨励賞
- 日本電磁波エネルギー応用学会 (JEMEA) シンポジウム・JEMEA ベストポスター賞
- 2016 年度
- 第 55 回電子スピンサイエンス学会年会 (SEST2016) 学生優秀ポスター賞
- 第 26 回日本赤外線学会研究発表会優秀発表賞

● 短期海外留学した学生の感想

約 2 週間フィリピン大学に滞在し、実験を行いました。私たちが持ち込んだ実験装置はフィリピン大学の学生にとってどれも初めて見るものばかりで、とても興味をもっていました。フィリピン大の学生は学ぼうとする意欲がとても高く、私も負けていけないと感じました。短期海外留学という他の研究室では経験できないことをさせていただきました。



短期海外留学時の様子