

電総研ニュース

平沼赳夫通商産業大臣来訪

半導体基板上に磁気光学導波路を実現

超偏極希ガス磁気共鳴イメージング(MRI)の開発

伊藤達也通商産業政務次官来訪

その他

2000.9 vol.608

平沼 赳夫 通商産業大臣 来訪

2000.8.25



8月25日、平沼 赳夫 通商産業大臣が当所を視察されました。

所長から当所の沿革および研究概要等について説明を聞かれた後、最新の研究成果の中から、「フラットパネルディスプレイ」(電子デバイス部：伊藤 順司 主任研究官)、「バイオインフォマティクス」(知能情報部：秋山 泰 主任研究官)、「ウェアラブルビジョン」(知能情報部：坂上 勝彦 主任研究官)の研究について各担当者から説明を聞かれました。

平沼大臣は、産業競争力強化の観点から国研の役割にご関心を示されると共に、技術的にもポイントを突いた議論をされました。特にフラットパネルディスプレイに関しては、プラズマディスプレイとの長所・短所の比較や、1枚のシリコンウェハ上にコンピュータと共にディスプレイを作り込んでしまうi-FED(intelligent Field Emission Display)構想について質問されました。また、バイオインフォマティクスに関しては、研究の先進性に理解を示されると共に、計算機の能力について質問されました。



フラットパネルディスプレイについて質問される平沼大臣



ウェアラブルビジョンによる情報が提示される腕時計型ディスプレイをご覧になる平沼大臣

半導体基板上に磁気光学導波路を実現

- 高速大容量光ネットワークのための高度光集積回路実現に道を拓く -

Magneto-optical Waveguide on Semiconductor Substrate

- a New Method to Realize Optical Integrated Circuits for High-speed Optical Network -

材料科学部 スピントロニクスラボ
Materials Science Division, Spintronics Lab.

Magneto-optical TE-TM mode conversion was achieved in a waveguide of diluted magnetic semiconductor $Cd_{1-x}Mn_xTe$ grown on GaAs substrate. Mode conversion ratio up to 34% under magnetic field of 5.5kG was obtained. $Cd_{1-x}Mn_xTe$ waveguide showed low optical loss and high magneto-optical figure-of-merit. This result shows the feasibility of monolithic integration of an optical isolator with semiconductor optoelectronic devices.


1 .はじめに

電子のもつスピン自由度を利用して、半導体の電子・光機能の更なる向上を目指す試みが世界的に活発化している。半導体スピントロニクスとよばれるこの分野では、現在、新物質の開発やその物性評価などの基礎的な研究が中心的なトピックとなっているが、当所ではスピンの機能を利用した具体的なデバイスへの応用を通じて、その可能性を明らかにしようとしている。その一環として、今回、磁性イオンを大量に含む新しい半導体材料である希薄磁性半導体 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ の大きな磁気光学効果を利用して、従来不可能とされてきた磁気光学素子と半導体光素子の一体的な集積化を可能とする技術を開発した。

透明な磁性体中を通過する光の偏光面が回転する現象はファラデー効果として知られている。ファラデー効果による偏光面の回転方向は、光の進行方向の反転に対して非対称となる特徴を持っている。この非相反性と呼ばれる性質は磁気光学効果に特有のものであり、この性質を用いて物質中の光の伝搬を一方に限定したり、伝搬方向を変えたりすることができる。すなわち非相反効果を用いることにより光の入出力分離が可能となる。光回路における入出力分離の重要性は、電子回路において入出力分離ができないダイオードではなく、入出力が分離されたトランジスタが圧倒的に重要な役割を果たしていることから推察できる。光回路に入出力分離機能をもたらすためには磁気光学効果の使用が不可欠である。そのため、非相反機能を持つ光アイソレータや光サーキュレータなどの磁気光学素子はGbit/s以上の高速大容量光ネットワークシステムの構築にとって不

可欠なものとなっている。現在、磁気光学材料として酸化物磁性ガーネット単結晶が用いられている。しかし酸化物結晶の成長温度が900°C程度と非常に高いこと、その結晶構造が半導体系物質のそれと全く異なることなどの理由により、酸化物結晶を用いた磁気光学素子を光ネットワーク部品の中心である半導体系光素子と一体的に集積化することは出来ない。今後、各家庭までに高速大容量光ネットワークを供給していくためには、高信頼で低コストな半導体系光集積回路への磁気光学素子の組み込み手法の開発が不可欠であるため、この点の解決策が求められている。今回我々は、磁気光学材料として希薄磁性半導体 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ を用いた高品質磁気光学導波路をGaAs半導体基板上に成長させ、その大きな磁気光学効果を利用した導波路モード変換の実証に初めて成功した。

2 .希薄磁性半導体 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 薄膜の成長

希薄磁性半導体 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ では Mn^{2+} イオンのスピン偏極した d 電子と、ホスト半導体の sp バンド電子がお互いに非常に強く影響を及ぼしあっている。そのため、外部から磁場をかけて d 電子のスピンの向きを揃えてやると、半導体のバンド構造が sp 電子のスピンの方向に依存して大きく分裂する。これにより  1 に示すようにバンド端付近で非常に大きな磁気光学効果が発現する。一方 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ は代表的なオプトエレクトロニクス用半導体材料であるGaAsと同じ結晶構造(閃亜鉛鉱型)をもっているために、分子線エピタキシー法を用いてGaAs基板上にその薄膜を成長させることが出来る。これらの特長を利用すれば、レーザーなどの他の半導体光部品と一緒に単一基板

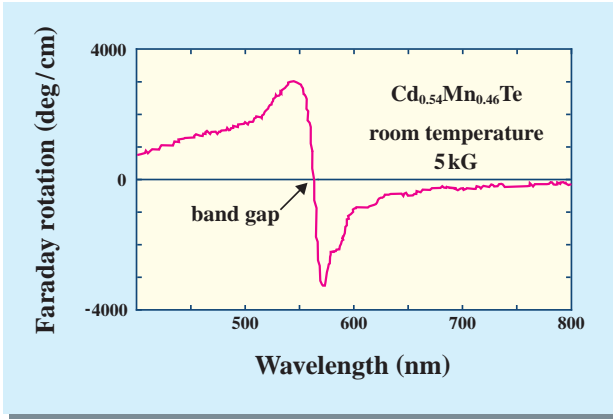


図1 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ の巨大磁気光学効果

上に一体的に集積することが可能となるはずである。ただしGaAs基板と $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 結晶の格子定数には約12%もの大きな違いがあるために、良質な薄膜の成長が難しく薄膜中の欠陥により光が吸収や散乱されてしまうため、実際に磁気光学導波路を作製することは極めて困難であった。今回当所では、GaAs基板表面の処理に工夫を凝らすことにより、良質で透明な磁気光学導波路の作製に成功した。

図2には試料の断面図を示す。GaAs基板上にCdTeバッファ層を積み、その上に $Cd_{1-x}Mn_xTe$ の2層構造を成長させる。Mnの濃度が高いほど屈折率が高いことを利用して、光が最上層(コア層)中に閉じ込められて伝播する構造となっている。GaAs基板とCdTeバッファ層との界面では、それらの格子定数の大きな違いにより、結晶成長モードが乱れ、閃亜鉛鉱型構造とは異なる構造の物質ができてしまう可能性が高い。このようなことが起こると、図2に模式的に示したようにそれを核とした欠陥が光が伝播するコア層まで到達して、光吸収や光散乱を起こす。界面で発生する異相物質としてはGaとTeの反応による Ga_2Te_3 の可能性が考えられる。そこで薄膜成長時にGaとTeが直接反応することを防ぐために、図3に示すようにGaAs基板の表面を数原子層の厚みのアモルファスCdで覆った後に、ゆっくりと基板温度を上昇させ、Cdの厚みが一原子層になった時点でTeの供給を開始してCdTeバッファ層を成長させる手法を開発した。アモルファスCd層を用いない通常の成長法では、波長790nmで65dB/cmの大きな光損失がみられたが、今回の成長法の改良によりコア層の光損失は急激に

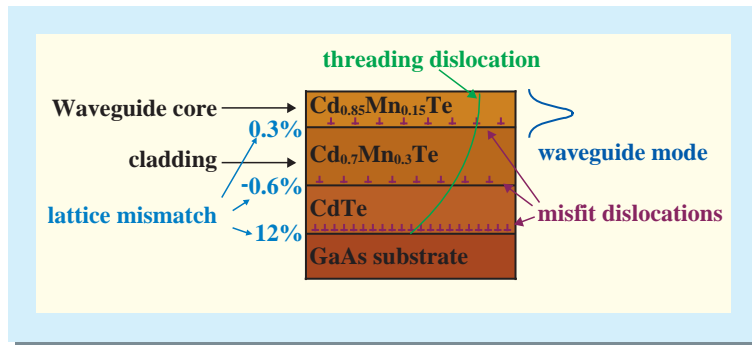


図2 GaAs基板上の $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 光導波路の構造

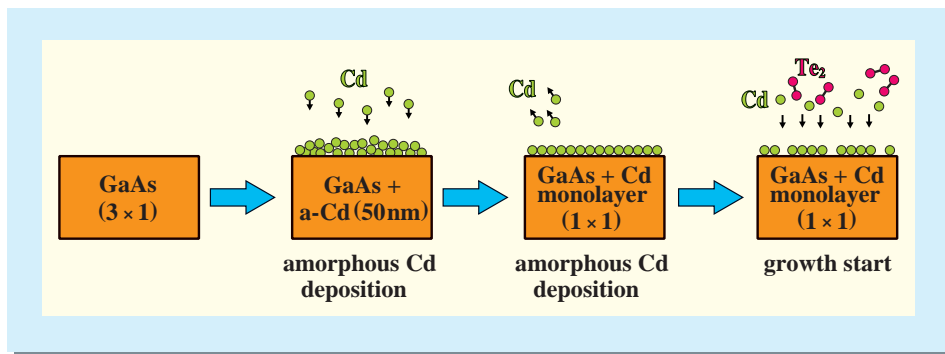


図3 GaAs基板表面を1原子層のCdで覆い、欠陥の発生を防ぐ。(3x1)などはGaAs基板表面第1層の原子配列の違いを示す。

減少して4dB/cm以下となった。これにより図4に示すように数cm以上の長い距離を光が伝播することが出来るようになった。図5は磁気光学効果による偏光面の回転角（Faraday回転角）を光損失量で規格化した量である磁気光学性能指数の波長依存性である。図の実線は現在の光ネットワークに用いられている酸化物磁性ガーネットの代表的物質であるYIGの磁気光学性能指数であるが、希薄磁性半導体はそれに匹敵する性能指数を示すことがわかる。ここで希薄磁性半導体には永久磁石で発生することのできる5kGの磁場をかけている。現時点では、薄膜の磁気光学性

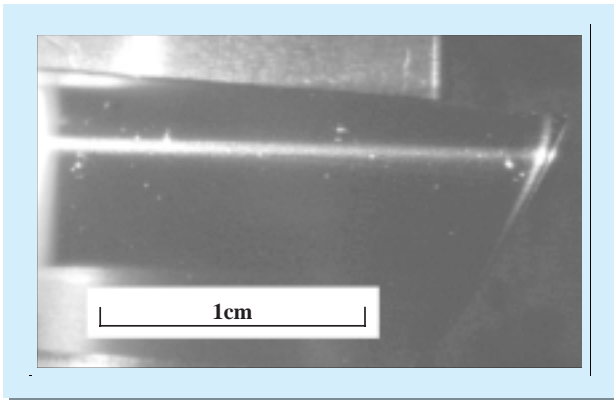


図4 GaAs基板上の $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 導波路中で伝播する導波光

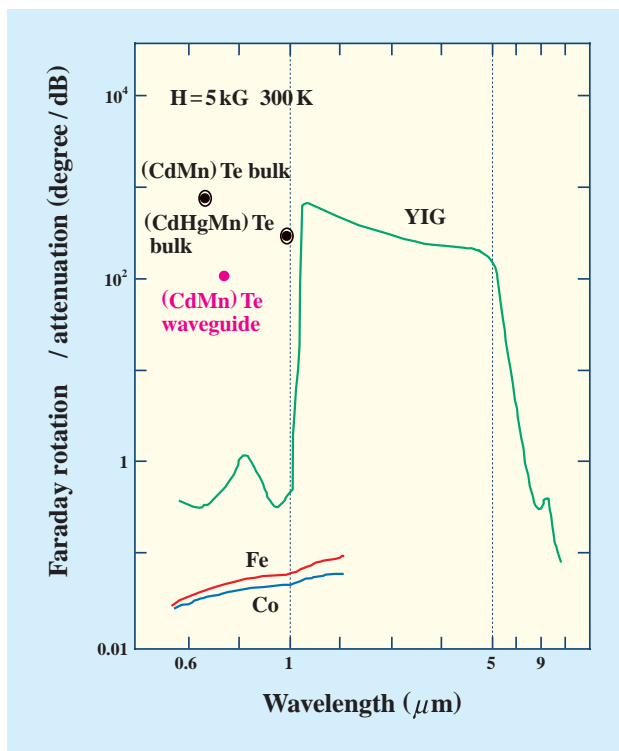


図5 磁気光学材料の磁気光学性能指数

能指数はバルク結晶の値よりは劣り、今後さらなる改善の余地を残しているが、その値はすでに実用に十分なレベルに達している。今回の実験では波長790nmで実験を行っているが、希薄磁性半導体の組成を調整することにより酸化物磁性ガーネットの利用できない可視領域ばかりでなく数 μm までの近赤外域でも大きな磁気光学性能指数が得られることは希薄磁性半導体のもう一つの利点である。

3. 磁気光学効果による導波路モード変換

このような高い磁気光学性能指数を持つ薄膜を用いて、半導体基板上において磁気光学効果による導波路モード変換を初めて実証することに成功した。導波路モード変換とは導波路の固有モードであるTEモードとTMモードとの間でエネルギーを交換する現象であり、偏光面の回転に対応し導波路型光アイソレータや光サーキュレータの実現のための最も重要な現象である。図6に示すような配置で、偏光子を介して導波路表面からの散乱光を高感度TVカメラで観測した。偏光子の向きはTEモードの導波路光から散乱された光のみを透過させるようになっている。入射光としてTMモードを励起した。外部から磁場を印加しないときには、全く散乱光はみられなかった。すなわち、光は導波路中をTMモードのまま伝播してい

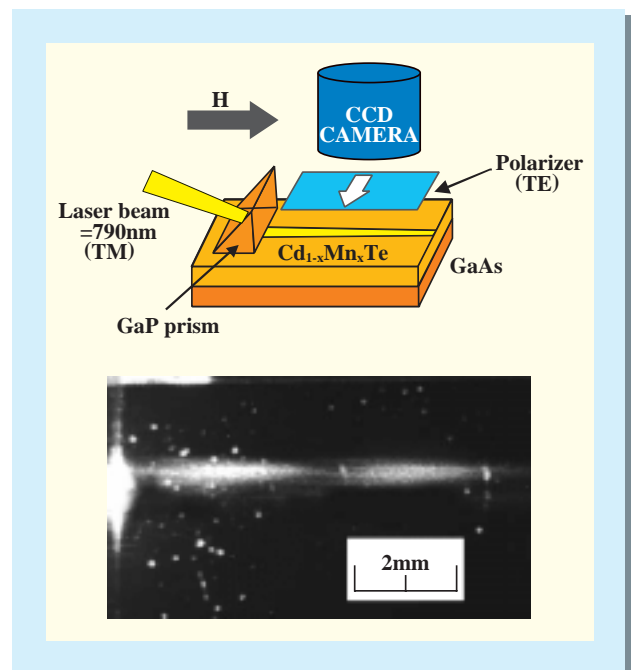


図6 磁気光学効果による導波路モード変換。外部磁場によるTMモードからTEモードへの変換を、表面からの散乱光から検出した。

ることになる。しかし光の進行方向に沿って磁場を印加すると、図に示したような光の伝播方向に沿って強度を周期的に変化させる光の筋が見えてくる。これは磁気光学効果によりTMモードの一部がTEモードに変換されたためである。この強度変化から求めたモード変換効率の伝搬距離依存性を図7に示す。図中の曲線は理論解析結果である。2mm 弱の光伝播距離で34%の高いモード変換効率を得られている。

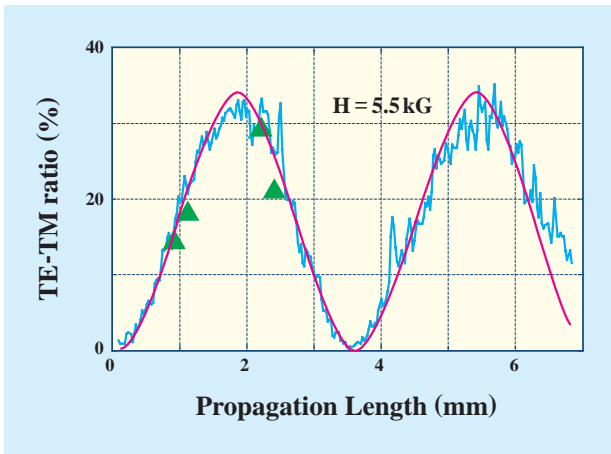


図7 磁気光学効果による導波路モード変換効率の伝播距離依存性

4 .まとめ

今回、希薄磁性半導体というスピン機能をもつ新しい半導体材料を利用することにより、半導体系材料の磁気光学導波路をGaAs基板上に実現して、その磁気光学効果による導波モード変換を実証することに初めて成功した。この技術の発展により、今後、単一の半導体基板上にレーザーなどの半導体光部品と磁気光学素子を一体的に集積化することが可能となり、高い信頼性とコスト優位性を有する光集積回路が実現されよう。なお本研究結果は、半導体スピントロニクスの有用性を具体的なデバイスの形で示した最初の例ともなっている。

研究課題名

半導体基板上に集積化可能な磁気光学デバイスの作製

ラボメンバー (Lab. Members)

安藤 功兒 (Koji Ando)

e-mail: ando@etl.go.jp

パディム・ザエツ (Wadim Zaets)

材料科学部 (Materials Science Division)

材料科学部 (Materials Science Division)

超偏極希ガス磁気共鳴イメージング(MRI)の開発

- 光による核磁気共鳴の飛躍的高感度化を達成 -

Development of Hyperpolarized Noble Gas Magnetic Resonance Imaging

- Breakthrough in Nuclear Magnetic Resonance Sensitivity by Optical Pumping -

大阪ライフエレクトロニクス研究センター 生体核磁気計測ラボ
Osaka LERC, Hyperpolarized NMR measurement Lab.

An apparatus for hyperpolarization of noble gas nuclear spins using high-power diode laser arrays (795nm, 20W) was constructed. We achieved ~1% polarization of ^{129}Xe for sealed Rb and Xe gas mixture. Magnetic resonance imaging experiments for Xe gases in a glass tube and rats were performed.

1 .はじめに

磁気共鳴画像診断装置(MRI)は、測定対象を傷つけることなく内部構造を調べる方法として実用化している。現在では、町の総合病院などで多くの装置が稼働し、X線CTと並んで医療画像診断の現場で活躍している。MRIは、核磁気共鳴(NMR)現象と呼ばれる原子核の磁石としての性質を利用しているが、可視光、X線に比べるとずっとエネルギーの低い、数十メガヘルツ(FMラジオで利用されている周波数帯)の電磁波を照射しており、このことから、低侵襲であるといわれる。しかし、扱っているエネルギーが低いという特徴は、裏返せばNMR、MRIが原理的に検出感度が低いという欠点を持つことを意味している。実際、MRI画像診断が普及したといっても、分解能はX線CTには劣る。また、原子核のうちで磁石としての性質がもっとも強い水素原子核(プロトン、 ^1H)を対象としているので、主に、生体組織中の水分や脂質の水素原子の密度を画像化しており、肺のような密度の低い臓器についてはほとんど利用例がなかった。

このような問題に対し、これまでに、高磁場化、コイルやシーケンスの高効率化といった、検出感度の向上を目指した研究は行われてきたが、それぞれ完成の域に達した感がある。さらなる高感度化ということになると、NMR現象の原理まで踏み込んだ新しい高感度化技術の導入なくして、達成できるものには無いと思われる。このような方向性の研究の一つの具体例として、超偏極(Hyperpolarization)と呼ばれる状態の希ガスの利用が注目されている。この技術により信号強度が数万倍増強された希ガスを利用すると、密度が低く従来はNMR、MRIの対象となっていなかった常圧のガスから、同体積の水と比べても

100倍以上強いMR信号が得られる。すでに欧米諸国においては、このガスを利用した人の呼吸器や脳、血管を対象としたMRI実験も行われるようになってきている¹⁾。日本国内においても、広く医療技術・非破壊検査法として基礎研究を行うことができる体制づくりと、高効率な超偏極希ガス発生装置の研究開発が急務であるとの認識から、平成9年度から研究を行ってきた。ここでは、当所において行ってきた超偏極希ガスの発生技術の研究、及び、医療技術研究機関と共同で行ってきた生体機能計測の応用研究への展開について紹介する。

2 .超偏極の原理

図1に光ポンピング法を利用した超偏極希ガスの生成と核磁気共鳴(NMR、MRI)測定への適用について示す。磁気共鳴は、原子核や電子のように自転する荷電粒子がマイクロの磁石(これをスピンと呼ぶ)としての性質に量子力学を導入したモデルで説明されている。まず、従来の特別の操作をしていない場合(熱平衡状態)の磁気共鳴観測の場合の感度について説明する。図中右上に、スピン量子数が1/2の核(^1H 、 ^3He 、 ^{129}Xe などがある)についての図を示した。これらのスピンを持つ原子核の集団に静磁場をかけると、磁場の強さに比例した2つの異なったエネルギーを持ったものに分かれる。これらのエネルギー差は、スピンの向きが静磁場の方向と平行か反平行かの向きに対応しているが、このエネルギー差は、熱エネルギーに比べると非常に小さい。熱平衡状態では、ボルツマン分布に従ってこれらの数分布が決まるが、これら2つの占有数はほぼ同数となり、これらの差は、0.01%程度にしかならない。さて、これらのスピンを

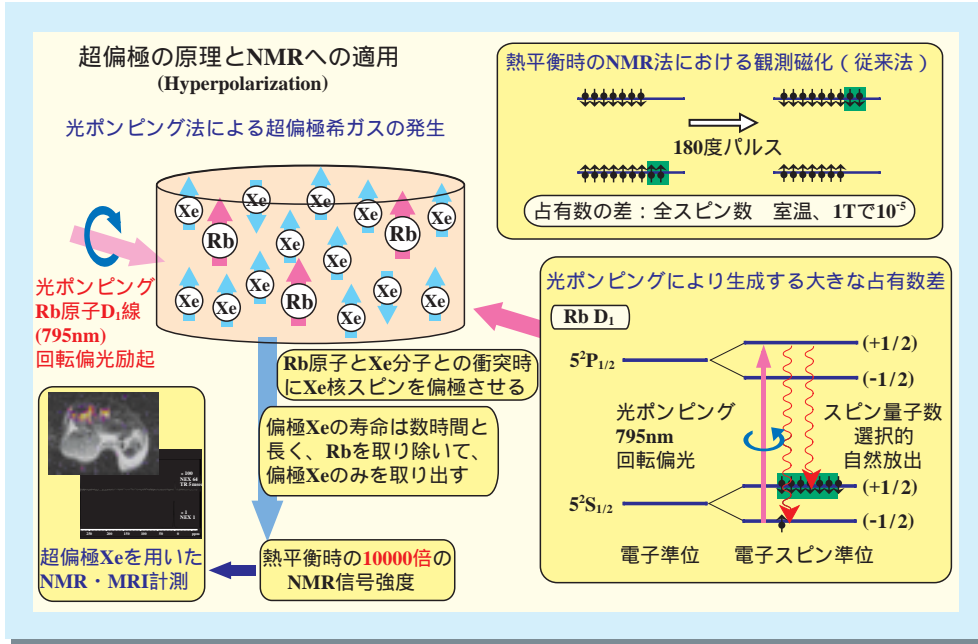


図1 光ポンピング法を利用した超偏極希ガスの生成と核磁気共鳴(NMR, MRI)測定への適用

集団として観測した場合、平行スピンと反平行スピンの対がうち消してしまい、結果として差の平行スピンの部分(熱平衡磁化、緑色の陰をつけた部分)しか観測にかけられないことになる。従来のNMRにおいては、この熱平衡磁化に180°、90°などのラジオ波パルスを加えて元の状態に戻ってくるときに生じる電磁波をコイルで検出しているが、この信号の大きさは、この磁化に比例する値を超えることは決してなかった。すなわち、今までは、そこに存在するスピンのうち0.01%しか観測していなかったことになる。

さて、ここでもし、何らかの方法によりスピンの向きを平行か反平行のどちらかに大きく偏らせる(偏極)ことができたならば、このときの観測される磁化は、原理的には最大で数十万倍の磁気共鳴信号を与える計算となる。このような状態は、熱エネルギーが非常に小さい極低温で実現できるが、測定対象を冷却することができない場合には、この方法は利用できない。ここで実現した超偏極状態は、この操作を光のエネルギーを巧妙に利用して行うことで得られている。それには、基本的には光ポンピング法と言う1950年頃にA. Kastlerにより考案された方法が利用される。まず原子の外殻電子にスピンの偏極状態を作り出し、それをヘリウム(^3He)やキセノン(^{129}Xe)などの核のスピンの移動させる。この際、ルビジウム(Rb)のようなアルカリ金属原子が利用される。Rbの価電子は5s軌道電子1個であるが、この電子の磁場中のスピン状態は、外部磁場に平行なスピン(-1/2)と反

平行なスピン(+1/2)から成り、これらは核スピンの場合と同様に熱平衡状態ではほぼ同数存在する。ここで795nmの波長の光を照射すると電子はs軌道からp軌道へ励起される。このとき、ヘリシティ+1を有する右旋性の回転偏光を照射したとすると、この光が吸収されるためには運動量保存則から、電子のスピン状態に+1の角運動量の変化が伴わなければならない。このためには、平行スピンから反平行スピンへの遷移が要求され、平行スピンから平行スピンの遷移は禁制される。即ち、この条件化ではs軌道にある平行スピンのみが、p軌道の反平行スピン状態に励起されることとなる。電子スピンの励起状態は、元の状態(基底状態)に戻るが、この場合は角運動量の制約を受けないので、戻るスピン状態は平行と反平行の両者が同程度に可能である。結局、このようなスピン量子数選択的な吸収・放射プロセスにより、s軌道の平行スピンの数がどんどん減少し、反平行スピンの数が増加することとなる。こうして、電子スピンの超偏極状態が得られる。この時、アルカリ金属蒸気と共に希ガスを混合しておく、超偏極状態をアルカリ金属の電子から希ガスの原子核に移すことができる。ここで希ガスは単原子分子であり緩和時間(特に縦緩和時間、 T_1)が極端に長いため、偏極移動の効率が悪くても時間をかけることにより、十分な偏極移動が達成できる。こうして得た超偏極状態の希ガスからRbを除いたのち、NMR サンプル管や小動物の肺・胃などに導入して測定を行う。

3 .超偏極希ガスの発生と核磁気共鳴イメージングへの適用

Ar 以外の希ガスは、核スピンを持つ同位体を含んでいるが、超偏極状態を生成する目的で使用されるのは、スピン量子数が 1/2 の ^3He と ^{129}Xe が主である。これは緩和時間が長いことや同位体濃度の高い試料が得られることが理由である。今のところ、到達偏極率が ^3He の方が ^{129}Xe よりも高い上に、 ^3He の磁気回転比は ^1H の 3/4 で、1.5T の MRI 装置では、共鳴周波数は 48.4MHz であるのに比べて、 ^{129}Xe では、17.7MHz と低く、感度の点から ^3He の方が有利である。 ^{129}Xe は、縦緩和時間が ^3He よりやや短く、高い偏極率が得られないのが欠点である。しかし、Xe の水への溶解性は He のそれより 10 倍程度高く、さらに、Xe は、水よりも油や脂質エマルジョンに 5~20 倍良く溶ける。これらのことから、ガスからの信号を検出する空洞部分の画像化には ^3He が有利であるが、様々な媒質中での信号が検出できるので、媒質についての情報が得られる点で、 ^{129}Xe の利用も利点がある。 ^3He は天然存在比では、 $10^{-4}\%$ と非常に少ないが、極低温実験等でも利用されてきているので、高濃度のものが市販されている。一方、 ^{129}Xe は天然存在比が 26.4% あり、同位体濃縮を行わなくても核磁気共鳴実験に使用可能である。今回は、入手が容易な天然存在比の Xe ガスを使って超偏極実験を行った。

Rb 金属は、Na と同様に水や酸素と激しく反応し、反応後の Rb イオンでは、光ポンピングには利用できない。したがって、図 1 のように大気と接触しないように、表面を清浄化したガラスチューブの中で扱わなければならない。Rb 金属は、ガラスアンプルに封入された製品（純度 99.99%）を購入し、ステンレスパイプ内に入れた状態で内部を真空にして配管内部を洗浄した後、外部からステンレスパイプの上からアンプルごとつぶし、拡散ポンプで 10^{-6}Torr 程度にひきながら、ガラスチューブ（外径 50mm、容量約 200ml、表紙写真参照）へ蒸留した。Xe（純度 99.995%）及び、蛍光クエンチャーとして微量の窒素ガスを流量制御しながら、800Torr まで導入した。そして、このチューブを液体窒素で冷却して、Xe が固体となり内部が減圧の状態になっているところで、ポンプ側の枝管をバーナーで溶融し封じ込んだ。

光ポンピング法には 100G 程度の外部磁場印加が必要である。今回の実験では、NMR、MRI 装置の漏洩磁場（約 120G）を利用する方針で設計した。ライスター熱風器の先に銅線を骨組みにしてアルミホイール

で覆って、炉を作り、偏極用ガラスチューブを設置し、約 100°C に加温した。Rb の蒸気圧は、室温付近では、 10^{-8}atm であるのに対し、 100°C 付近では、 10^{-4}atm まで上昇する。励起光には、GaAlAs ダイオードレーザー（米国オプトパワー社製、OPC-A020-795-CSPS; $795.11 \pm 1\text{nm}$ 、20W）を使用した。エミッタ（ $200\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ）から放射された偏光を水晶 1/4 波長板を通して回転偏光にした後、円筒型レンズで一軸方向（ $1\mu\text{m}$ 方向）だけ拡大しガラスチューブに入射した。レーザー光を照射中の様子を表紙写真に示す。10 分ほどで偏極率が平衡に達するので、熱風器を止めて NMR 装置に移して、測定を行ったところ、図 2 に示したように熱平衡時に比べて 2,000 倍程度の信号増強を観測できた。これは、偏極率にして約 1% にあたる。

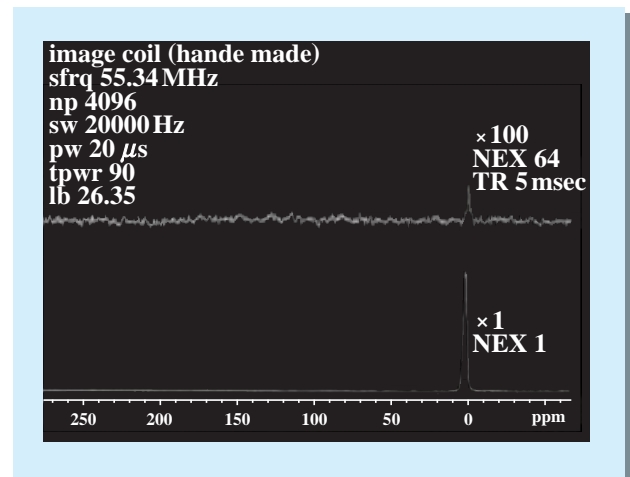


図 2 超偏極操作前(上)と後(下)での ^{129}Xe NMR スペクトル

熱平衡 Xe ガスでは、100 回程度積算して初めてはっきりしたスペクトルを得られるのに対し、超偏極後では、一回の励起で十分な信号強度を得られた。この後、1 分間隔で信号強度の減衰をとったところ、 ^{129}Xe ガスの緩和時間 (T_1) は、約 40 分であった。さらに、外径 60mm のサドルコイルを使用して、このガラスチューブ内の Xe ガスに由来する MRI 画像を取得することができた(表紙参照)。撮像シーケンスとしては、 10° 程度の小さなフリップアングル (θ) の FLASH シーケンスを利用した。 ^3He 、 ^{129}Xe ガスは、長い緩和時間をもつので、これらのシーケンスでの n 回励起後の MR 信号強度は、 $\cos^n(\theta)$ と減少していく。この効果の補正は、各励起ごとにフリップ角を徐々に増やしてゆく (VFA)、投影エンコード、ラジアルスキャンなどの k -空間の中央を優先する等の工夫が必要である。

4 .超偏極 Xe ガスを利用した小動物のMRI 実験

産業医科大学に設置された動物実験用MRI装置の近傍に超偏極ガスを定量的に供給できる簡易型の超偏極Xe発生装置をくみあげ、小動物の機能計測への適用を試みている。この装置では、表紙写真のガラスチューブを発展させて、写真1のようにコックをつけて、偏極したガスを取り出せるようにした。写真2にこの装置でレーザー光照射中の様子を示す。以下に実験例を示す。



写真1 Rb金属を蒸着した後、Xeガスを封入したコックつき偏極用パッチ

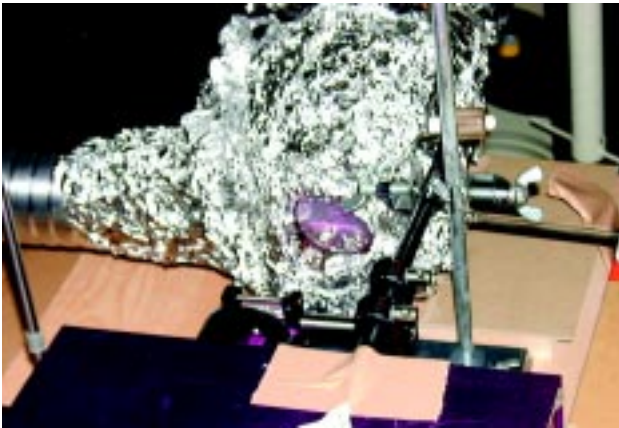


写真2 半導体レーザーからの励起光を照射中の様子

4-1 .超偏極¹²⁹Xeガスによるラット胃のイメージングと緩和特性

結腸への超偏極³Heガス注入とその画像化を行いガン検診への応用がすでに検討されているが、ここでは、胃注入による胃検診の可能性を探るため、動物実験を行った。超偏極¹²⁹Xeガスをカテーテルを通してラットの胃に供給しMRI画像化を試みたところ胃の画像描出に成功した。この画像とラット腹部のプロトンMRI画像とを重ね合わせを図3に示した。ラッ

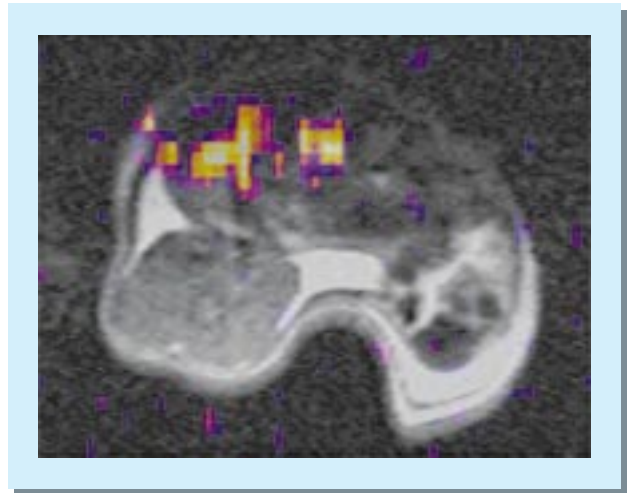


図3 ラット胃に超偏極Xeガスを導入して撮像した画像と腹部プロトンMRI画像の重ね合わせ

ト胃の空洞にXeガスの存在が確認できる。

次に、¹²⁹Xeの緩和時間を測定することで胃中のXeガスの基本特性について考察した。また、胃に供給するXeの容積と緩和時間との相関を調べた。胃が球状であると仮定すると、分子運動論的な考察から球の直径をdとして緩和速度 $1/T_1$ と $1/d^2$ の間に直線関係が成り立つ。胃の緩和時間データおよびゼラチン空カプセルでの緩和データをこの観点から解析した。この結果から、1回の壁との衝突による緩和効果の評価することができた。さらに、この直線関係は器壁の種類(ガラス、ゼラチンカプセル)により比較的大きく変化することが確認され、胃壁にXe原子が衝突して緩和する(固有の)緩和時間が求められる(壁の緩和効果)。胃壁近くのXeガスの緩和時間は、その状態を反映することが予想され、生体への応用の可能性が示唆された。

4-2 .超偏極¹²⁹Xeガスの肺換気動態モデルの開発と実験的検証

空洞画像取得としての肺イメージング法は、ラットや人について検討されているが、肺の空洞中のガスであっても、局所的な自由空間の容積や酸素濃度、あるいは肺表面の状態などにより緩和時間が変化するので、臨床応用例の蓄積により肺換気能はじめ肺胞表面の病態などに関する新しい診断法の開発が大いに期待できる。放射性的¹³³Xeガスを使った肺換気シンチグラフィと比べて、放射線管理の煩わしさや被曝の危険が無いので将来的に有望である。ここでは、超偏極¹²⁹Xeガスを用いて、肺の換気量を推定する動態解析モデルを構築し、これを実験的に検証

した。

まず、ラットの口から注射器を利用して、超偏極Xeガスを注入し肺部の画像化を試みたが、感度が足りず、画像化できなかった。ベンチレーターで肺に口から空気を送りながら、側管から30秒間かけて、超偏極Xeガスを20mlを注入し、NMRスペクトルの経時変化を計測した。肺部のNMRスペクトルを吸入開始直前から終了後まで繰り返し計測し、ガス(0ppm)、組織および血液(およそ200ppm)を含む領域のスペクトルの時間変化を記録した。体積10mlのラテックス風船肺ファントムを使ってコントロール実験を行った。図4(a)にラテックス風船の肺ファントム、(b)ラット肺についての結果を示す。肺のXe信号は、風船ファントムの信号に比べて10%程度の強度しか得られなかった。信号強度の時間変化を、換気量、信号飽和、 T_1 緩和時間、Xeの気相から血液相への移行定数を仮定した上で、1次の微分方程式で記述した。信号強度時間変化を非線形最小二乗法にてフィッティングし、 T_1 および換気量を推定した。Xe気相からは高い強度の信号が得られたが、組織および血液相に対応する信号は、動態モデル解析に利用できるほど高くはなかった。気相での偏極Xeの T_1 は十分長く、

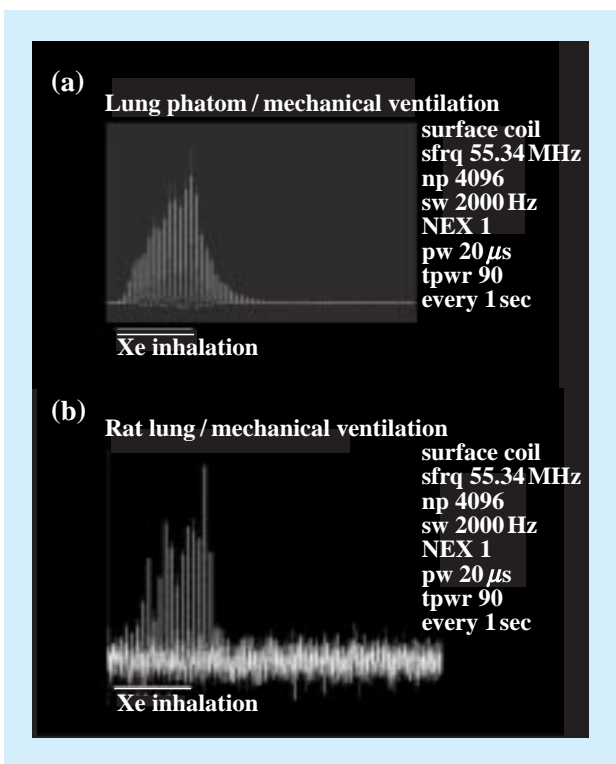


図4 肺部のNMRスペクトルのガス(0ppm)ピーク信号強度の吸入開始直前から終了後まで時間変化(1秒間隔)
(a)ラテックス風船の肺ファントム (b)ラット肺

吸入終了直後の信号強度の減衰からはNMRフリップ角度が計算でき、信号飽和定数が見積もられた。Xeガス持続吸入による平衡時の信号強度は肺の換気量に大きく依存し、本数学モデルで計算した値は人工呼吸器における換気量(毎分220ml)に一致した。さらに、肺中、風船中での偏極Xeの流入、壁との相互作用による緩和、肺から血液中へのXeの取り込みの特定数が計算できると期待される。これらは、超偏極NMRにおいて行われた初めての動態解析であり、生理機能画像の定量化が十分可能であることが示された。

4-3 超偏極ガスの生体組織への供給法

血液脳関門を含めて生体膜を自由に通過できるXeは、化学的にも不活性で代謝を受けないことから、血中に溶解して様々な臓器の灌流測定に利用できる。すでに、RI動態機能検査として、放射性の ^{133}Xe を用いて腎臓や心臓の灌流測定および局所脳血流量(rCBF)測定が行われているが、同様の実験が、超偏極 ^{129}Xe を用いれば放射線なしで行えるはずである。また、超偏極 ^{129}Xe を吸入したラットの測定から、Xe NMRパラメータは周囲の物理・化学環境に大きく依存し、化学シフトはガスに比べて約200ppmのピークを与え、さらに、血漿・脂肪中、肺胞組織層、赤血球と結合したものと、3つのピークが明瞭に分離できることが知られている。緩和時間も違いが大きく、ヘモグロビンの酸化(動脈血液)および、非酸化(静脈血液)とで約3倍異なる。この性質を応用することで、組織の局所血流や酸素代謝、さらに詳細な代謝産物濃度の変化など、組織機能の高感度計測への応用が期待されている。

このような脳画像取得の上での問題点は、血液などに溶解したXeの T_1 が10~20秒とガスに比べて非常に短くなることである。今回の実験でも、ラット血液に超偏極 ^{129}Xe ガスを混入しNMR測定を試みたが、泡中ガスの信号しか観測できなかった。さらなる、信号強度の増強が望まれる。解決すべき問題としては、血管中を移動している間の超偏極Xeの緩和を防止すること、及び、発生させる超偏極ガスの偏極率そのものを上昇させることがある。すでに、人工血液として有名なPFOBのエマルジョンやリン脂質からなるマイクロバブルに超偏極 ^{129}Xe を包含させて、血管への直接注入が検討されている。超偏極 ^3He についても、直径が5~10 μm の高分子マイクロスフェアに吸わせて、血管造影が検討されている。

今回、超偏極 ^{129}Xe を外部の多孔質微粒子をいれた

試料管に移し、共存下での、また、これに軽水、重水などの媒質を加えた微粒子分散系についてのNMRスペクトルの取得と緩和時間測定を行った。多孔質微粒子中に浸入したXeガスの核磁気緩和時間は、分散媒が重水の方が軽水の場合より長く、 ^{129}Xe の緩和が ^1H との双極子-双極子緩和機構によっていることを示唆する。分散媒に重水を利用することで ^{129}Xe 超偏極の保持時間を延長できることがわかった。

5. まとめと今後の展開

今回の研究では、光ポンピング法に基づく超偏極Xeガスの発生技術を確立した。超偏極ガスの高分解能NMRによるスペクトル観測に成功した。さらに、大阪大学医学部、産業医科大学のNMR、MRI装置に対し、超偏極ガス発生装置を導入し、国内で初めて超偏極XeガスのMRI画像の取得に成功した。こうして、医療技術研究の現場でこのガスを生成できることを実証し、小動物実験を行い、当該技術研究の国内での先鞭をつけることとなった。しかし、今回の超偏極Xeを用いた、小動物に関する実験では、ガス相の信号しか得られていない。超偏極ガスの偏極率は、欧米のグループに比べまだ1桁低く、生体内に取り込まれた超偏極 ^{129}Xe がその威力を発揮するには、少なくとも10倍以上の偏極率の向上が必要である。 ^{129}Xe の偏極率は、現存の方法では10%程度が標準的だが、100%近い値まで上昇させることは、原理的には不可能ではない。なお、これを実現する装置についての特許を国内民間企業と共同出願し、大工研とも共同で実用化研究に発展している。この装置の開発により、さらに高感度でのMRI実験が可能になると考えられる。

また、超偏極希ガスの偏極を二重共鳴法を適用することにより、 ^1H や ^{13}C といった医療応用にとって重要な核種の原子核へ転送する実験も行われている。

このような技術が、臨床用MRI装置で行えるようにすることも、重要な研究課題である。新しい仕組みの造影剤として、超偏極希ガスの利用がさらに広がるであろう。今後も、国際特定共同研究事業の対象機関である、ハーバード大医学部のM. S. Albert博士のグループとも連携を深め、超偏極希ガスMRIの実用化に貢献していく。

参考文献

- 1) 「肺を鮮明画像で診断」、日経サイエンス、1999年9月号、8-9ページ。

研究課題名

国際特定共同研究事業

「光ポンピング高感度化による無侵襲的機能NMR技術」

特別研究

「分子空間領域における磁気スペクトロスコピーの研究」

共同研究

「スピン偏極希ガスを用いた医用磁気共鳴研究」(大阪大学)

ラボメンバー (Lab. Members)

服部 峰之 (Mineyuki Hattori)

e-mail: mhattori@etl.go.jp

守谷 哲郎 (Tetsuo Moriya)

平賀 隆 (Takashi Hiraga)

藤原 英明 (Hideaki Fujiwara)

木村 敦臣 (Atsuomi Kimura)

飯田 秀博 (Hidehiro Iida)

木下 良正 (Yoshimasa Kinoshita)

超分子部 (Supermolecular Science Division)

大阪ライフエレクトロニクス研究センター (Osaka LERC)

大阪工業技術研究所 (Osaka National Research Institute)

大阪大学 (Osaka Univ.)

大阪大学 (Osaka Univ.)

国立循環器病センター (National Cardiovascular Center)

産業医科大学 (Univ. of Occupational and Environmental Health)

伊藤 達也 通商産業政務次官が来訪

2000.8.31

8月31日、伊藤 達也 通商産業政務次官が当所を視察されました。

はじめに所長から当所の沿革、概要等について説明を聞かれ、引き続いて最新の研究成果の中から「フラットパネルディスプレイ」(電子デバイス部：伊藤 順司 主任研究官)、「進化型ハードウェア」(情報アーキテクチャ部：樋口 哲也 主任研究官)、「バイオインフォマティクス」(知能情報部：秋山 泰 主任研究官)の研究について各担当者から説明を聞かれました。伊藤次官は、技術移転のあり方について強い関心を示され、技術指導や共同研究、役員兼業等の実際について、熱心に質問されました。



21世紀岡山未来技術フェア

2000.8.25 ~ 8.27

8月25日～27日までの3日間、コンベックス岡山(岡山県岡山市)において「21世紀岡山未来技術フェア」(主催：21世紀岡山未来技術フェア実行委員会)が開催されました。

本技術フェアには電総研などの国立研究機関をはじめ、岡山県内外の企業、団体が出展し、各ブースでは、最新の研究・開発の成果について、実演を交えた展示が行われました。また、同時に多彩なフォーラムやアトラクションが行われ、中国・四国地域で最大規模のフェアとして見学者が多数入場しました。

当所からは先端技術を紹介するテーマゾーンに「筋電義手ロボット」を出展しました。



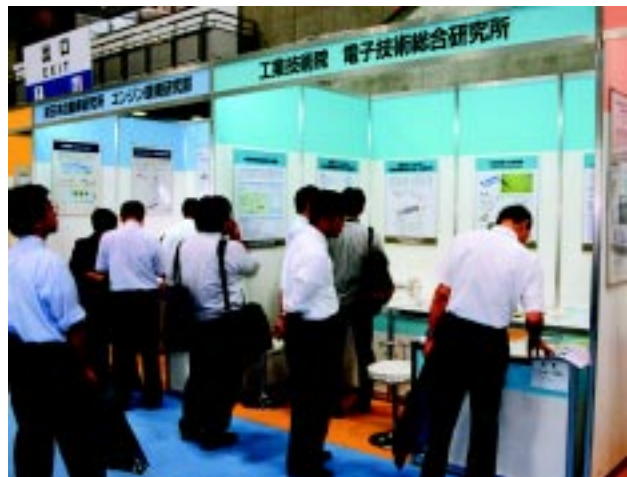
2000 分析機器展

2000.8.30 ~ 9.1

8月30日～9月1日までの3日間、幕張メッセにおいて「2000 分析機器展」(主催：(社)日本分析機器工業会)が開催されました。

本機器展には企業からの出展に加え、昨年からの研究分野と産業分野の連動体制促進・強化を目的として、国公立研究機関、大学などが理化学分析による最先端の研究成果を展示するコーナーが設けられています。

当所からは、「新機能電気化学センサー」、「陽電子ビームによる半導体表面近傍の欠陥・不純物分析」、「新非接触温度計」の3テーマについて出展しました。



特別記念講演会のお知らせ

当所では、創立110年を記念して以下のとおり特別記念講演会を開催いたします。皆様の多数のご来場をお待ちいたしております。

テーマ：情報・エネルギー・エレクトロニクス・計測標準技術の過去・現在・未来

日時：平成12年11月1日（水）9：30～17：00

場所：グランドアーク半蔵門（地下鉄「半蔵門駅」1番出口より徒歩2分 TEL 03-3288-1651）

聴講は無料です。

講演内容

《電総研における研究開発の変遷》

- | | |
|--------------|----------------------------|
| 『情報技術』 | 棟上 昭男（東京工科大学 教授） |
| 『パイオ情報処理技術』 | 松本 元（理化学研究所 グループディレクター） |
| 『エネルギー技術』 | 堀米 孝（日本クリーンエネルギー総合研究所 理事長） |
| 『エレクトロニクス技術』 | 片岡 照榮（シャープ株式会社 社友） |
| 『計測標準技術』 | 根本 俊雄（明治大学 教授） |

《特別講演》

- 『電気試験所から電子技術総合研究所へ
- 今日の情報化社会を展望した電子・情報技術の研究体制の確立 - 』
森 英夫（三菱電機株式会社 社友）
- 『トランジスタ黎明期の電子基礎研究と21世紀への期待』
菊池 誠（東海大学 名誉客員教授）

《パネルディスカッション》

新産業創出のための研究開発とは - 新体制での研究展開 -

- | | |
|--------------|---------------------|
| 『情報処理技術』 | 大蒔 和仁（情報アーキテクチャ部長） |
| 『脳神経情報技術』 | 河野 憲二（首席研究官） |
| 『電力エネルギー技術』 | 大和田野 芳郎（エネルギー部長） |
| 『エレクトロニクス技術』 | 伊藤 順司（電子デバイス部主任研究官） |
| 『光技術』 | 小林 直人（量子放射部長） |
| 『計測標準技術』 | 小柳 正男（電子基礎部長） |

申込・問い合わせ先

総務部 庶務課（担当：吉岡）

TEL. 0298-61-5016 FAX. 0298-61-5063 e-mail:yoshioka@etl.go.jp

編集 〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-4 工業技術院 電子技術総合研究所 0298(61)5059

表紙写真：超偏極 Xe ガスの磁気共鳴イメージング画像

URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail:info@etl.go.jp

印刷・製本 ニッセイエプロ株式会社