

理化学研究所 ニュース

May—1977

No. 45

理研における核融合分光計測

制御熱核融合によってエネルギーをとり出そうとする開発研究は、種々の問題をかかえながらも徐々に前進している。核融合装置には種々の型式のものがあるが、現在世界的に最も進んでいるのがトカマク型装置である。我が国でも日本原子力研究所において JFT-2 および JFT-2a の 2 台のトカマクが稼動しており、その代表的プラズマパラメーターは、例えば JFT-2 でプラズマの中心部での電子温度 1.2 keV ($1 \text{ keV} = 1.16 \times 10^7 \text{ K}$)、イオン温度 0.35 keV、電子密度 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。原研では更に大型の装置 JT-60 の製作を始めており、電子およびイオン温度 5 keV、プラズマ密度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ を見込んでいる。トカマク型装置における種々の大きな問題の 1 つは不純物である。1973 年にソ連の T-4 トカマクでの X 線測定の結果をもとに、不純物がプラズマの中心に集中し、また時間的にも蓄積して、プラズマの電気抵抗が大きくなり、放電維持時間が極めて短くなると予言され、当時大きなショックを与えた。その後多くの議論が重ねられ、また世界の他の多くのトカマク型装置でも同様の実験が繰り返されている。一方、プラズマ内不純物による放射エネルギー損失は核融合装置のエネルギー収支を左右し、また不純物による局所的放射冷却のための電気抵抗増大に伴う電流分布の変化はプラズマの閉込めを悪くする。例えば JT-60 における不純物の許容

量は、炭素 10%、酸素 5%、鉄 0.3%、モリブデン 0.1% を上限としている。

プラズマ内で電離された不純物イオンは種々の形の発光をする。プラズマ内電子がイオンの近傍を通過してその電場で加速され連続光を発するのが制動放射であり、電子がイオンに捕獲されて連続光を発するのが再結合放射である。イオンの束縛電子が電子衝突などで励起され、励起状態の寿

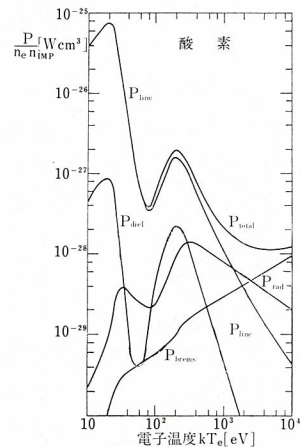


図 1 プラズマからの酸素不純物の放射損失
 P_{line} : 線スペクトル放射, P_{brem} : 制動放射, P_{rad} : 再結合放射, P_{diel} : 二電子再結合, P_{total} : 放射損失の全量, 縦軸の P は放射損失量, n_e はプラズマの電子密度, n_{IMP} はプラズマ内不純物の密度で, $P/n_e n_{IMP}$ はプラズマ内の電子、不純物の単位個数あたりの放射損失量をあらわすことになる。

命に応じて下準位へ遷移する場合は線スペクトル放射である。トカマクプラズマ内不純物として現在の実験では最も支配的な酸素について放射エネルギー損失量を計算したものが図1である。電子温度1 keVあたりまで、スペクトル線放射によるエネルギー損失が圧倒的であることが分かる。測定によれば加熱パワーの半分前後が放射により損失しているといわれている。鉄についての同様の計算を図2に示す。これらの計算を総合して、代表的な不純物の放射損失量の、水素イオンの制動放射に対する比を示したものが図3である。電子温度が5 keV以上でも鉄では束縛電子があり放射損失に大きく寄与している。そして放射総量は、鉄は酸素にくらべて2けた大きく、モリブデンは更に1けた大きい。

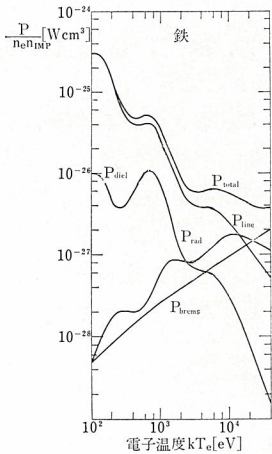


図2 プラズマからの鉄不純物の放射損失

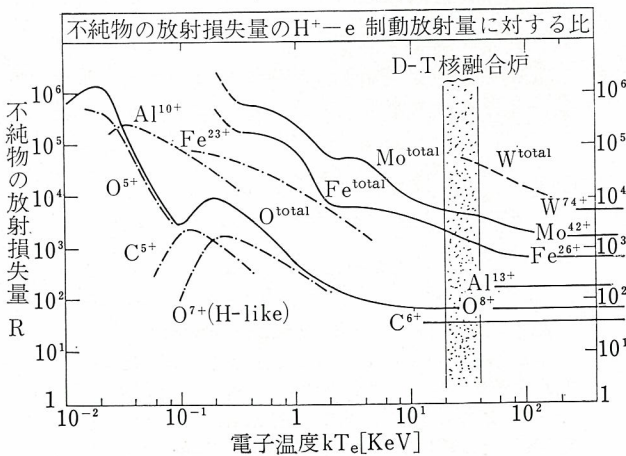


図3 不純物からの放射の水素イオン制動放射に対する比

プラズマは容器内に閉じ込められるので、その壁から重水素プラズマ内へ不純物原子が流入する。たとえば酸素原子がプラズマに入ると電離して、 O^+ (O II), O^{2+} (O III), O^{3+} (O IV), ..., O^{8+} (O IX) (Oの肩の+は1価のイオンであることを示し、分光用語ではOIIとなる。中性原子はOIである)と多価のイオンになってゆく。図4にフランスTFRトカマク(2 keV)における酸素イオン発光の分布の計算を引用する。低電離段階のイオンはシェル状に分布する。このような分布は、プラズマ内でのイオンの電離、再結合過程にコロナ平衡を仮定し、それに拡散過程を考慮した定常状態のものである。JFT-2 (1.2 keV)のプラズマで、O IX, O VIII, O VIIが中心域に、それ以下のイオンが周辺に排列することが実測されたと聞いている。

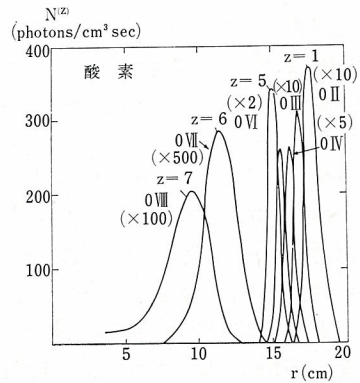


図4 フランス TFR トカマクにおける酸素多価イオン放射の空間分布。縦軸の $N^{(z)}$ は z 価のイオンがプラズマ内単位体積から発する光子の数である。横軸はプラズマの中心軸からの半径方向の距離をあらわす。

酸素、炭素などの軽元素については、その多価イオンの波長、遷移確率が分かっているので、イオン密度を求めるにはスペクトルの絶対強度測定が精度よく行えればよい。酸素のO VIII, O VIIの強いスペクトル線は20 Å付近にあるので、斜入射真空紫外分光器を測定に用いる。

今後はプラズマのイオン及び電子温度が5 keV前後を目標としているので、不純物問題は金属に向けられる。トカマク装置のプラズマ容器は不銹鋼あるいはモリブデンを用いる。イオン温度がkeV領域に入ると、それらの材質のスパッタリング率が大きくなるので、金属不純物の増加が予想

されるからである。実際に、イオン温度が1 keV 足らずの現在のトカマク・プラズマでも、Fe XV, Fe XXIII, Fe XXIV, Mo XIII, Mo XIV, Mo XXXI, Mo XXXIII のスペクトル線が同定されている。しかし金属の多価イオンについては、その波長、遷移確率のデータが極めて不十分である。当所ではこれの解決のための努力の一環として、まず金属不純物の分光写真測定によるスペクトル線の同定のために入射角 89° の斜入射真空分光写真器の製作を開始した。測定波長域は1~100Åの予定で世界的にも類の少い分光器である。金属不純物多価イオンの強いスペクトル線は、数 keV の電子温度ではこの波長域に集中し、放射エネルギー損失への寄与が大きいので重要な領域である。測定器とともに、金属多価イオンの波長表の整備に関しては、最近鉄のFe VIII~Fe XXVIの主要な遷移の波長表を作成した。

不純物の定量には感度校正した分光器を必要とするが、当所ではこれまで2つの方法を採用した。その1つは複単色計法である。高温のプラズマを対象とするので、短波長域につかえる真空分

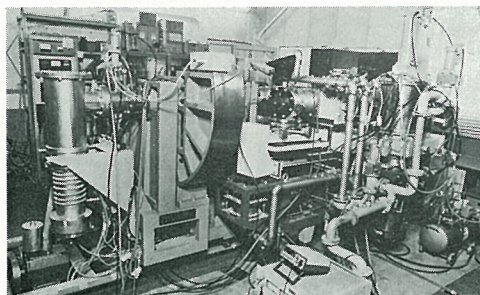


図5 複 単 色 計

光器を校正する。図5に示すのは、1.5mの直入射真空分光器の感度校正をするために0.5mの前置分散器をとりつけたもので、前置分散器から本測定器への入力に電離箱などの標準検出器で計っておく。この方法は500Åまで適用できるが、それ以下の波長では標準検出器に適当なものがないので、斜入射真空分光器の感度校正は線対法による。光源として図6に示すテータピンチ装置を用いた。上準位を共通にする線対を可視分光器と同時測定して、 86° 入射角の斜入射真空分光器を校正した。この校正した分光器によりテータピンチ内の軽元素不純物の定量を試みている。

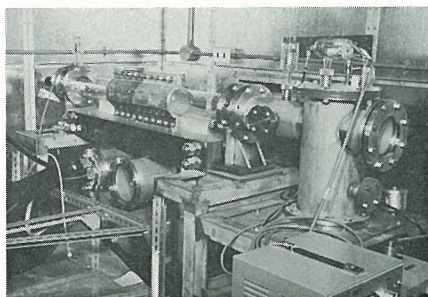


図6 9 kJ テータピンチ装置

当所の分光計測は今後、keV領域の温度のプラズマを主な対象として、軟X線域での多価イオンのスペクトル線の波長の決定および放射エネルギー損失の測定などを行う予定である。また、できれば、プラズマ内不純物の定量、遷移確率の測定なども行いたい。

核融合研究室
副主任 森 一夫

「太陽エネルギー変換」第3回シンポジウムのお知らせ

と き 昭和52年6月27日(月)

と ころ 理化学研究所第2会議室

プログラム

13:30~15:00 ミセル系における光エネルギー変換について(仮題) 松尾 拓 教授(九大工)

15:00~15:15 休 憩

15:15~16:45 Energy Conservation and Control of Electron Flow in Photosynthesis
Professor Dr. Ulrich Heber (University of Düsseldorf)

16:45~17:30 懇 談 会

開発テーマ この欄には、当所で行っている基礎研究から育った応用的研究の成果を紹介します。これら新技術の芽が、広く産業界に活用されていくことを期待しています。この欄に対するお問い合わせは、開発調査室へお寄せください。

磁性捕捉剤利用の新しい磁気分離技術

はじめに

今回は、当所の磁性研究室で開発している新しい磁気分離技術システムについて紹介します。

砂の中に磁石を入れてかきまわすと、砂鉄が磁石に吸いついて簡単に分離されます。こういった磁気的分離手段は、不均一な磁場に置かれた物体に作用する力が、物質の磁性の差異に応じて異なることを利用したのですが、これは昔から磁気選鉱として、砂鉄や磁鉄鉱など強磁性鉱物の分離採取に実際に用いられているものです。

最近、この磁気分離技術の見直しが世界的な規模で進められており、特に分離効率の向上が図られています。

同研究室では、このような動きにさきがけて磁気分離手段の新しい技術開発に取り組み、従来省みられなかった非磁性体の磁気分離も可能にし、その実用化を目指しています。

非磁性体を磁気分離可能とするには、それを強磁性体と結びつけるとか、中に取り込むとかの工夫を施してやればよいわけです。たとえば、廃水中の浮遊固形物は、それ自体は非磁性ですが、それに上手に磁性粉末をまぶしてやれば磁気分離が可能となり、また工場廃水中の溶存金属イオンは、磁性沈殿体の中に共沈操作で取り込んでやれば分離できます。

このような、非磁性物質と結びついてそれを磁気分離し得る形にできるような強磁性体を、同研究室では磁性捕捉剤と名付けています。

磁性捕捉剤は、汚染除去だけでなく、非磁性の有用鉱物、有用金属の捕捉、濃縮、分離にも全く

同じように応用できます。

この磁性捕捉剤と磁気分離とを組み合わせることにより、分離しようとする対象の物質の磁性にとらわれないで、一連の物質分離システムを作ることが可能となります。このシステムを用いているいろいろの対象の分離に応用できるようにしようというのがこの技術のねらいです。

このようなシステムの概念図を図1に示しました。

磁性捕捉剤

水中に分散しているコロイド状物質や、溶存する重金属イオンを効率よく捕捉するには、吸着浄化作用の強い強磁性微粒子を利用します。最もよい捕捉剤は第一鉄塩の水溶液をアルカリ性にして得られる水酸化第一鉄の沈殿です。水酸化第一鉄自身は磁性が弱いものですが、簡単な酸化処理により強磁性沈殿に変えることができるからです。たとえば、廃水中に硫酸第一鉄を溶解し、pHを約10に調節し、生成した沈殿を少量の過酸化水素で急速に酸化（室温）します。このようにして得られた沈殿は強磁性を示すので、これを磁気分離により除くと、分離後の廃水は、Mg, Co, Ni, Mn, Zn, Cd, Cu, Hg, Pbなどの重金属イオン濃度が0.1~0.01 ppmに低下し、CODの値も著しく低下します。

こういった手段により、現在メッキ工場の廃水の浄化が図られ、現在実用化が進行中です。今後は、廃水処理だけでなく、資源に乏しい我が国にとって特に重要な重金属類の捕捉、濃縮、分離が主要な課題になると思われます。

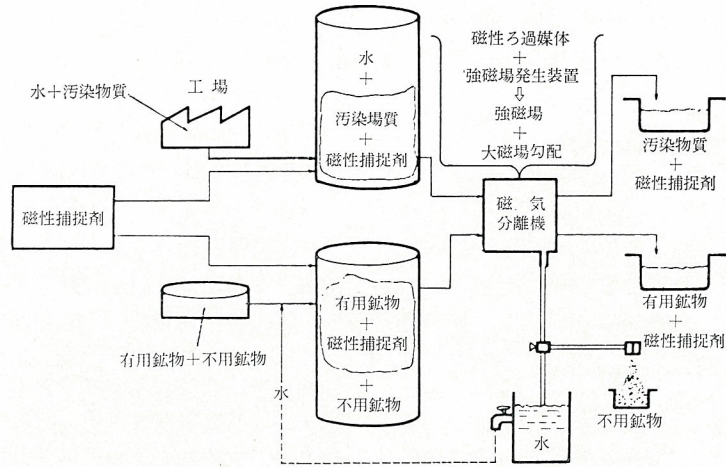


図1 磁性捕捉剤利用磁気分離システムの概念図

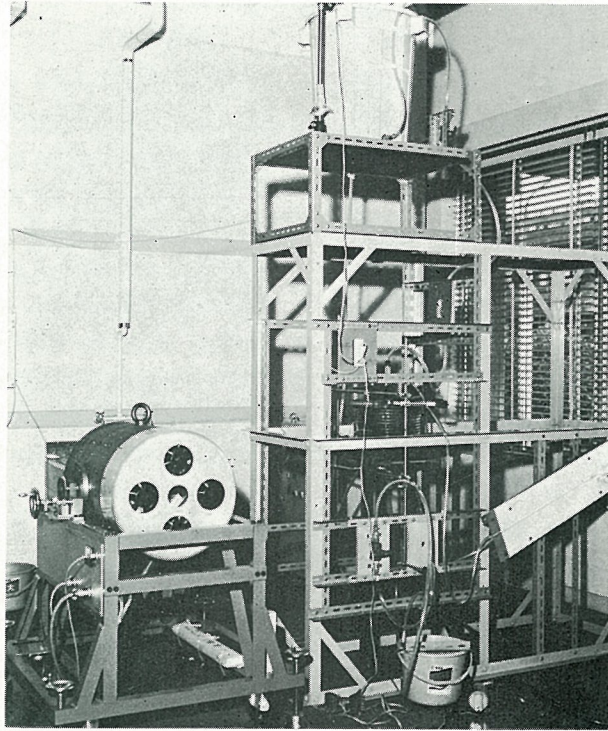


図2 磁性捕捉剤利用磁気分離実験装置

磁気分離装置

磁性捕捉剤により捕捉された重金属類を集めるには、まず効率の高い磁気分離装置が必要となります。しかし、現状では世界的にみても、性能的に満足し得る既存の装置はありません。同研究室では、より広いそしてより強い磁場空間を能率よ

く発生し得るものとして、サイクロトロンから発生した粒子ビームを集束するための四極型電磁石に注目しました。この型の電磁石について優れた技術力を有する当所工作部に依頼して、磁気分離用四極型電磁石を設計、製作し、過日完成をみるにいたしました。

そこで、当所粉粒体工学研究室と共同して、本

電磁石を組み込んだ半工業的規模の磁性捕捉剤利用磁気分離実験装置の製作に鋭意取り組んでいるところだ。

図2は現在建設中の本装置です。

おわりに

磁性捕捉剤の活用、高能率磁気分離装置の製作を含む新しい磁気利用物質分離技術はいろいろの応用が考えられます。水処理については、すでに

実用化が進められていますが、その他に、窯業原料(カオリン、陶石、ケイ砂など)からの脱鉄や、未利用資源からの有用鉱物の採取、濃縮、分離への応用、あるいは火力発電ないし原子力発電設備の復水の脱鉄浄化への利用が期待されます。

当所としても、一日も早くこの新しい磁気分離技術が実際に役立つものとして利用できるよう技術開発を推進していく計画です。



か げ ろ ふ

“奈良の都は かぎろひ(陽炎)の春にしなれば……”と万葉の古歌にもうたわれたように、ほりかえされた黒土の上に、ちらちらとおどるかげ

ろうは、都会に住むものの忘れかけている春の風物詩である。風雅を解さない現代人は、かげろうとは、温度による空気密度のゆらぎによっておこる光学現象であるなどと不風流なことを言う。最近、それだけでは気が済まず、かげろうで二光子吸収を測定したという もっと不風流な人々がある。

レーザー光によって、“熱レンズ”現象(つまりかげろう)がおこることは、1964年、ゴードン(GORDON)らによって発見されている。有機物のレーザーラマンをとろうとして、光束の中にサンプルをおくと、レーザー光が乱され、目に見えてちらつく。強いレーザー光が吸収されると一部分が熱にかわり、局所的に温度があがって屈折率が変わるために、小さなレンズをおくのと同じ結果になるのである。

一方、ベンゼンのように対称性のよい分子では、普通の光では励起できない(光を吸収しない)、したがって光学的には検出されないエネルギー準位がたくさんあることがわかっている。これらの“禁じられた”準位をさがすのに良い方法の一つが、二光子吸収である。レーザーのように強

い光では、光の“足し算”ができるので、二個の光子が同時に吸収されて、その波長の二分の一、つまり、二倍のエネルギー差にあたる“禁じられた”準位だけが 具合よく励起される。吸収されたエネルギーは、一部はケイ光として放出され、のこりは熱となる。今までは、光学的には、このケイ光(二光子ケイ光)を測定する以外に方法がなかったので応用範囲が限られていた。

昨年、ツワロフスキー(TWAROWSKI)らが発表した方法はこの“熱レンズ”と“二光子吸収”を結びつけたものである。

始めにヘリウム-ネオンレーザー光をサンプルを通して検出器に入れておく。次に別の色素レーザーをサンプルの一部分に集光して、徐々に波長を変えてゆくと、二光子吸収がおこるような特定の波長になった時だけ熱レンズ作用がおこって、ヘリウム-ネオンレーザーの光が検出器にとどかなくなる。検出感度がよいこと、吸収されたエネルギーが発光にならず、熱として失われる過程(無輻射遷移)を直接とらえられるので、二光子ケイ光と相補的な役割を果たすことなどが この方法の利点と考えられている。

それにしても、光学系の焦点が狂うという一見、困った事態から出発して、高感度の無輻射遷移検出方法にまで発展させてしまう この科学的どん欲さ。うらうらと春の日を楽しんだいにしへの万葉人達が聞いたらさぞなげくことであろう。

理論有機化学研究室
研究員 中村 淳子