

理化学研究所 ニュース

July—1970

No. 22

理化学研究所における

核融合の研究

—核融合とは—

軽い元素、例えば重陽子と三重陽子の間で原子核反応が起こると、より重いヘリウム核と中性子になるが、反応の前で質量が減り、それに相当する運動エネルギーが反応生成核に与えられる。すなわち、核融合反応を起こすことによりエネルギーを得ることができる。このような反応は恒星例えば太陽の内部で大規模に起こり、そのエネルギー源になっている。地球上では水素爆弾に利用され、莫大なエネルギーを瞬間的に放出しているが、その反応量を制御して動力源として用いようとするのが、制御熱核融合炉である。

燃料となる重水素は海水中に普遍的に存在し、その抽出も容易で、その量は現在の世界のエネルギー消費率から推定して1億年以上の使用に耐える。その反応生成物は放射能を持たず、暴走の危険もなく、公害の危険性はないといってよい。すなわち、制御熱核融合炉が実現できれば、それは真に理想的なエネルギー源となるので、その実現を目的とする核融合研究が世界各国で精力的に行なわれている。

—核融合の研究—

核融合研究が初めて公開された1958年ジュネーブの第2回原子力平和利用国際会議では、多数の実験装置、アイディアが発表され、短年月のうちに炉が実現されるかの観があった。それを期にわが国でも科学技術庁関係では、当所、日本原子力

研究所、通産省では工業技術院電気試験所、文部省関係では数多くの大学でプラズマ、核融合研究が始まった。

核融合炉内の燃料は温度約1億度、粒子密度約 10^{15} 個・ cm^{-3} 、粒子が壁に衝突しないよう閉じ込めておく時間約1秒でないとう効率よくエネルギーを引き出すことができない。この様な高温では物質はすべて電離してイオンと電子に分かれており、固、液、気体に続くプラズマと呼ばれる第4の状態になっている。プラズマ実験装置は、荷電粒子からなるプラズマを閉じ込めるのにすべて磁場を用いているが、磁場中でのプラズマの振舞についての学問がないといってよい状態であったので、1960年頃は、すべての実験装置でプラズマは極めて速かに壁に失われていた。しかし、プラズマの理論と実験の地道な努力が積み上げられて、現在は後10年くらいで炉用プラズマを得ることができ、さらに20年後には実用炉が開発されるだろうと予測されている。

1960年頃の上記の状況のため、わが国はプラズマ物理の基礎をまず固めるべきだとの判断を下し、名古屋大学にプラズマ研究所をつくって研究活動の中心とし、科学技術庁関係も小規模の基礎実験と研究者の養成をしていた。

1965年の第2回核融合国際会議を契期としてプラズマ閉じ込めの可能性の見通しが明るくなったので、わが国の原子力委員会は従来の基礎的段階からさらに進んで、核融合炉を明確な目的とした

総合的な研究開発を順次計画的に実施することを決意し、昭和44年7月に原子力特定総合研究の一つとして核融合研究開発基本計画のもとに、前記3研究所の協力で進められることとなった。

—理化学研究所の研究—

当所に核融合研究室が設けられたのは、昭和33年であるが、当初からプラズマ診断、すなわちプラズマの温度、密度などのパラメーターおよびプラズマの運動などの測定により、プラズマの状況を知ること、および測定対象となるプラズマ生成とを研究テーマとした。プラズマ中に物質を挿入することなく測る技術の確立を目的として、分光とマイクロ波による測定を始め、また測定対象プラズマを得るため、初めに直線状パルス放電装置、次いで定常の真空中アーク放電装置を建設した。

昭和44年度より特定総合研究として基本計画に従っているが、引き続きプラズマの生成、加熱およびプラズマ診断技術開発の一部を担当している。

—現在の研究内容—

プラズマの生成、加熱の研究として：

(1) 高電力マイクロ波による加熱……磁場中のプラズマに種々の特性的な振動をする。その一つとして、電子のサイクロトロン振動数は、実験に用いる磁場数キロ～数十キロガウスではマイクロ波領域であるため、共鳴するマイクロ波電場により効率よく電子を加熱できる。このマイクロ波電力をイオンの共鳴する低周波で変調し、イオンを加熱することを試みている。電波のエネルギーをまず吸収するのは電子であるが理論的にはイオンが加熱できる可能性がある。

(2) クラスタ粒子源……高いイオン温度（1億度でイオン平均エネルギーは10keV）のプラズマをつくるのに、高いエネルギーの水素を閉じ込め磁場に入射し、そこに捕捉蓄積する方法があるが、強い粒子束でないとプラズマ密度は高くならない。従来のイオン源では1アンペアに相当する強度をうることは非常にむずかしい。クラスタ粒子源は、飽和蒸気圧に近い数気圧のガスを低気圧中に噴出、断熱膨張させることにより、クラスタ粒子（原子数数百から数万の巨大分子）の流れをつくり、差動排気して真空中の粒子流とし、これをイオン化、加速して原子1個当りのエネルギー 10^3eV 、粒子束強度 10^2 アンペア相当以上を得ることを目的としている。現在は予備実験として窒素ガスを用い、パルスで数アンペア相当の粒子

束を真空中に得る装置を建設中である。英、仏、米でもこの研究を行なっているが、いずれもまだ開発段階である。

(3) 電子衝撃による金属面よりの放出ガス測定……水素プラズマ中に原子番号の大きい原子があるときは、プラズマからの輻射損失が大きいので、このような不純物は極力少なくしなくてはならない。その発生源はプラズマを入れる真空容器壁であるが、その表面はプラズマの高エネルギーのイオン、電子、光子などの衝撃をうけているので、いわゆる超高真空を得るよりもさらに困難な問題である。その基礎資料の一つとして、まず電子衝撃の場合を、主に不銹鋼を素材として調べている。

プラズマ診断の研究として：

(1) 分光による診断……分光測定からプラズマ中の不純物、電子温度、電子密度、イオン温度、輻射損失量などいろいろの情報が得られる。可視、近紫外領域ではプラズマ測定に適合した分光器の開発をほぼ終わり、現在は測定値からどのようにして正しい情報を得るかを一つのテーマにしている。また、電子温度が数十eV以上で必要になる真空紫外および軟X線領域の測定は、真空分光器の開発とその較正を行なっている。

(2) 動的内部構造の測定……プラズマは静かではなく、波、乱れなどが常に存在し、プラズマ粒子が期待よりも速やかに磁場を横切って真空壁に行ってしまう原因の一つになっているので、どのような波、乱れなどがあるか知る必要がある。これは、プラズマ内の密度、電場などの時間および空間的相関係数を測るが、外からマイクロ波、遠赤外レーザー光などを入射し、プラズマの散乱微分断面積を測ることによって知ることができるので、その測定技術の確立を目的としている。この測定対象の一つとして電子ビームによりできるプラズマを用いるが、その装置では、ビームを低周波で変調することにより、イオン、電子の両者を高温にする実験を行なっている。

原子力研究所、電気試験所はトーラス磁場を用い、それぞれ低密度、高密度から核融合炉用プラズマの閉じ込めに達しようとしている。当所はマイクロ波、レーザー散乱、分光測定およびマイクロ波によるプラズマ生成などでそれに協力している。

(核融合研究室主任研究員 岡本耕輔)

浮き

— 海洋計測の方法 —

— 観測船 —

昔は計測器を船から吊下げる観測方式で足りていた。今でも研究対象によってはこの方式で充分である。しかし、水温や塩分の変動や海水の動きをちかに求めようとするれば、少なくとも数日間にわたって測定を続けなければならないので、この方式は役に立たない。外洋で船を一点に数日間もとめておくことは無理である。

その上、船はいつも上下左右にゆれ動いているから、計測器も複雑な運動をすることになり、質のよい記録は得られない。

また、今後は海上や海中に多くの観測点を設ける必要があるが、船だけでは数点が限度であろう。航空機やヘリコプター、人工衛星も有力な手段であるが、それだけでは海面付近の観測しかできない。

— 浮き —

そこで、空間的にも時間的にも密な測定を行なうために浮きを使う。海洋科学は密な、高い精度の測定がなければどうにもならない段階にさしかかっているため、その発展は浮き方式の確立とその方式で集められる大量のデータの処理法にかかっている。理論の面では数値解析の発展が大切であるが、日本の現状はどちらも非常に手薄である。

さて、浮き方式にはデータを無線、または有線で陸上へ送る方式と、内蔵記録計に収めておき、計測器と一緒にあとで回収する方式とがあるが、今の研究段階では記録計内蔵方式がまさるようである。

高価な計測器を数日から1年以上も海中に放置しておくわけだから、確実に回収できるかどうかが大問題である。金属のワイヤーは腐食、疲労、よじれで傷みややすく合成繊維のロープは魚にかみ切られやすい。盗難も少なくないので浮き保護のため国際協定が結ばれそうである。これが成立すると浮きを無断で持ちさる人間は海賊とみなされる。浮きを長い間確実に海底につなぎ、のち回収す

るために、用具について調べなければならないことがたくさん残されているが、電源の改良や計測器自体の質の向上ももちろん大切である。

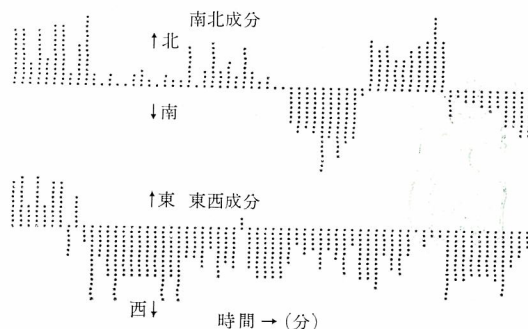
— 流速測定の場合 —

私達は一昨年から浮き方式で流速の測定を始め、のべ約100日分のデータを取った。



第1図 記録の一例(実物大送りは1分間に3ミリ)

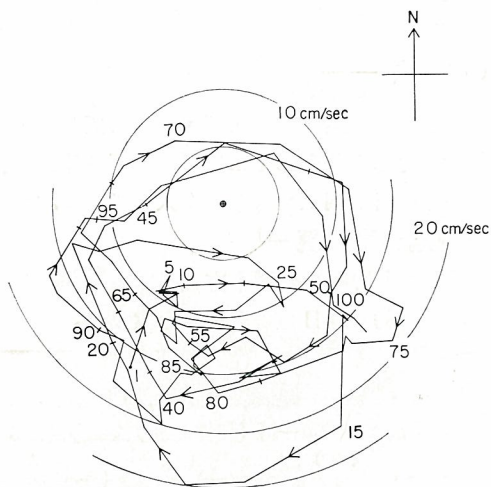
第1図は記録の一例(実物大)で、16ミリフィルム上の点が流速計の姿勢、流れの方向、大きさ、時刻などを示す。この記録の自動読みとり機はアメリカ海軍が開発しようとして失敗し、日本でも失敗するだろうといわれていたが、実用上差し支えない程度のものはできた。1本のフィルムには50万個たらずの数値が入っているので、なるべく人手がかからない処理法を考え、一応統計上の解析は終わった。



第2図 流速の東西成分と南北成分(1分間の平均値の変動)

必要に応じて電子計算機が解析結果、エネルギースペクトル、ヒストグラムなどを図示する。速度の変動をアナログ曲線に変えた例が第2図である。やはり電子計算機をかりて、変動を示す8ミリ映画も製作した。

北太平洋に高さが4000m以上もある推古海山という山がある。第3図は山頂付近、深さ1300mの点での流速をホドグラフで示している。外洋のこ



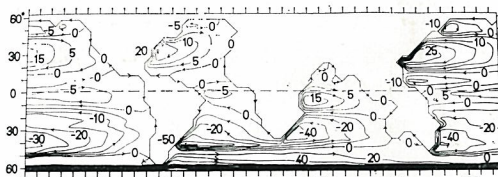
第3図 流速ベクトルの hodograph (1時間の平均値, 数字は測定開始後の時間)

の深さでは予想以上に流れが速い。山頂では風が強いのも同じ理由であろうか。運動は規則的である。相模湾などでは海底地形が複雑なため、反射が利いてきて、ずっと複雑な運動となる。

理論の研究者が観測に手を出し、しかも失敗し

ないで大量のデータをとってくるとはけしからん、秩序は乱されたといって、一部の人々からひどく睨まれながらも、磁気記録流速計や流速計の検定装置を試作し、記録張力計を作って海中でローブに働く張力を実測し、ローブが海中でどのような曲線を描くか理論解析も試みた。流速だけでは本当は不十分なので、次に精密水圧計を作る。

これらの仕事は海水の運動のしくみを明らかにして、最後には海況予報や気候改造に役立てようということである。根源にさかのぼると太陽の放射だけを与えれば、大気や海水の運動は計算で求



第4図 海面に風の応力が与えられた時の大循環のだいたいの様子

まるはずである。その方向への第一歩の仕事の一例を第4図に示す。

(海洋計測工学研究室主任研究員 高野健三)



自転車が倒れないで走るわけ

新着の米国の物理学会の機関誌「Physics Today」4月号の表紙は子供が自転車で乗ろうとしている写真である。おやと思って中を見ると「自転車の安定性について」いろいろの実験を試みたお話が載っている。この雑誌には、論文でなくて物理学自身やその教育についての紹介が多い。「素粒子物理学において運動の方程式はどうなっているか」、「物理学者の需要と供給」というお話と並んで自転車の話がある。書き出しはむずかしい素粒子物理学や物性物理学につかれたらうから、古いけれどもまだ解けていない力学、自転車はなぜ倒れないで走れるかを考えてみようとなっている。

自転車が倒れないのは、輪の回転によるコマの働きによるといわれることが多かった。この頃この話はあまり聞かないが、前から私はこれに疑問をもっていた。体重

60kgもの人が乗っている自転車がおそく走っても倒れないのは輪のコマのはたらきではとても説明できそうもないと考えていた。「Physics Today」のお話では実験をたくさんやっていて、カラーの写真も入っている。たとえば前輪に地面につかないようにもう一つの輪をつけて、これをいろいろの方向にまわしながら走ってみて乗りやすさをためしている。これによると、輪のコマの作用は大きい役目を果たしていないとのことである。

ハンドルの回転軸の延長が地面にあたる点をAとし、前輪のタイヤが地面にさわる点Bについて、AがBの前であれば乗りやすく、人が乗らないで突きはなしても倒れにくい。AがBの後方にあると乗りにくい。これは自動車の前輪のキャストと同じことになる。

自転車の力学について7編の論文をあげ、気がつくことはみんなやってみたが理屈が完全に組み上がったとはいえず、未だ秘密があるかも知れないとしている。

身のまわりのもので理屈がよく分っていないものは自転車の外にもあると思う。何も素粒子物理学だけに未開の分野があるわけではない。

(サイクロトロン研究室主任研究員 熊谷寛夫)