

# 回転プラズマによる質量分離の研究

金子 修・佐々木 進・河島 信樹  
真瀬 寛\*

An Experimental Study on Mass Separation By Plasma Centrifuge

By

Osamu KANEKO, Susumu SASAKI, Nobuki KAWASHIMA  
and Hiroshi MASE

**Abstract:** An experiment on centrifugal separation of He-Ar mixture gas has been performed in a rotating plasma. Separation factors of 1.44 to 1.68 have been achieved with a chamber filling pressure of 0.5 to 20 Torr, a radial current of 1.0A and an axial magnetic field of 7.5 KG. The concentration of Ar in relation to He at the outer electrode has increased with increasing a value of magnetic field or current. It has also been observed that a separation factor decreases with increasing the amount of sample.

## I 緒 論

磁場  $\vec{B}$  のあるプラズマの中を、磁場を横切って電流  $\vec{J}$  が流れると、ローレンツ力  $\vec{J} \times \vec{B}$  がプラズマに働らく。この力は圧力勾配のみでは一般につり合わず、従ってプラズマは巨視的な運動を起こすことになる。特に、磁場に垂直な面内で、電流が発散あるいは収束するような状況では、この力はトルクとなり、プラズマは磁場に垂直な面内で回転を始める。このような“回転プラズマ”現象は、実験室や宇宙での様々な過程の中で現われ、時には重要な役割を果たしていると考えられることから多くの人々によって注目され、現在まで様々な方向から研究されてきた [1]。

基礎物理面、あるいは宇宙物理面では特に Alfvén の提唱した。電離気体と中性気体の相互作用（電離過程）に関して、一連の実験が精力的に行なわれてきたし [2, 3] 太陽大気の生成、プロミネンス、太陽フレアの挙動、あるいは強磁場を伴って回転している中性子星周辺の物理等に関連して、今後もさらに詳しい研究が進んでいくと思われる。

一方、核融合研究がさかんになるにつれて回転プラズマをプラズマ閉じ込めの方に応用する試みもあったが [4]、現在のところ、核融合装置としてよりもプラズマ源として、あるいはプラズマ加熱装置等の補助的手段として検討されている。さらに応用面に進んでは、回転

\* 茨城大 工学部

プラズマは極めて容量の大きなエネルギー素子として興味を持たれているし、以下で述べるように、その回転に伴う遠心力を利用した質量分離装置としての可能性が検討されている。

質量分離あるいは同位体分離は、種々の応用面から興味を持たれている分野である。宇宙物理的には、ある種の星が、普通宇宙空間にあまり存在しないような元素のスペクトルを強く発していたり、太陽風中の  $\text{He}^+$  の比が時に10倍も変化する問題や、太陽、惑星、衛星等における元素構成比や同位体存在比の違いなど、質量分離作用に関連のあるものと思われる興味ある問題があるし、応用面では、核融合装置内での不純物の除去、重水素分離、ウラニウム235の分離等の同位体分離に関する重要な社会的要請もある。特にウラニウムの同位体分離に関しては、将来のエネルギー問題を考える上においても、より効率よく、より経済的な分離手段の開発が急がれている。

原子力発電の燃料になるウラニウム235は天然ウランに約0.7%含まれている。これを現在原子力発電の主流である軽水炉の燃料として使う為には、この含有量を3%まで引きあげることが必要である。この作業がウラン濃縮であり、普通分離作業単位 (S.W.U) で表わされる。(例えば、0.7%の  $\text{U}^{235}$  を含む天然ウラン5.479 kgから  $\text{U}^{235}$  を3%含むものを1 kg取り、残りの  $\text{U}^{235}$  を0.2%含むウラン4.479 kgを捨てたとすると、この分離作業は4.306 kg S.W.Uである。) ある推定によれば、将来の濃縮ウランの需要は、1980年までに、現在のプラント能力は飽和し、その後1年あたり、6000トンSWUの割合で濃縮プラントを建設しなければならないとされている。

ウラン濃縮の現在の主流は、ガス拡散法と呼ばれているもので、6フッ化ウラン ( $\text{UF}_6$ ) のガスを細かい穴のあいた隔膜を通過させる時の速度が質量によって異なることを利用したものであるが、この方法による分離係数(取り出し側の  $\text{U}^{235}$  と  $\text{U}^{238}$  の分子数の比を最初のそれで割ったもの)は、理論的にも1.004と1に近い為、十分にウラン濃縮を行なうには、装置を何百段にもカスケードにつなげなければならず、しかもガスの圧縮、冷却等かなりのコストがかかる。これに対して現在注目されているのが、遠心分離による方法で、これは高速回転する容器内に6フッ化ウランのガスを入れて粘性でガスを回転させると、重いウラン238を含むものは周辺部へ、軽いウラン235を含むものは中心部へ集まるという性質を利用したもので、回転速度を増せば、分離係数はいくらでも大きくなる。しかし大きな容器を高速で回転させることは、構造や材料強度等、技術的に限界があり、今だ実用段階には入っていない。

そこで大きな回転速度を容易に得られる方法として、回転プラズマを利用することが考えられ、理論的な検討に続き、幾つかの実験も行なわれ、質量分離装置としての可能性を示している[5~8]。

Bonnevier (1970) [5]は、同心円筒状の装置(F1-device)を用いてHe-Ar混合ガスの完全電離回転プラズマをつくり、Ar/Heの混合比が1.0から最高0.06まで変化することを報告している。(10 kV, 10 ms, パルス放電, 磁場6 kG, ガス圧0.04 Torr)。又、Love & Park (1970) [6]は、カスプ磁場と軸方向の電流とによって、周辺部に弱電離回転プラズマを作り、それを駆動力として粘性で内部の中性気体をも回転させる方法を用い質量分離を試みた。He-Xe混合ガスを使つての結果は、Xe/He混合比が中心部と周辺部

でおよそ3倍違うことを報告している。(磁場2.4 kG, 電流2 kA, ガス圧12 Torr)

さて、我々も回転プラズマの質量分離効果に注目し、一連の実験を行ってきた。我々は同心円筒状容器に軸方向の磁場と径方向の電場をかけることにより、弱電離回転プラズマを生成する方法を試みた。放電はグロー放電の領域であり、従って電離度は低く、内部の気体はほとんど中性であるが、プラズマとの粘性によって定常的な回転を起こす。この遠心力によって質量分離を行なおうというのが我々の目的である。このような方式を用いることにより、

- (i) 弱電離である為、気体の温度は低く分離効率はよくなる。
- (ii) Love & Parkの方式に比べて、我々の方式では駆動力が全体にわたり、エネルギー効率がよくなる。

ことが期待される。

以下、第II節では実験装置の説明、第III節では装置に関する基礎的なデータ並びに質量分離実験結果を示し、第IV節では、これらの理論との比較、質量分離装置としての可能性の検討を含めての議論を行なう。

## II 実験装置

Fig. 1 に回転プラズマ装置の概略図を示す。回転プラズマ容器は、内径10cm、長さ22cmのステンレス製外部電極と、外径1cmのステンレス製内部電極の2個の同心円筒管とその間に真空部を作る為の両端の亚克力板から成っている。この装置を4個の磁場コイルの中に置き、軸方向に様な定常磁場(7.5 kG Max.)をかけると共に、内外電極間に直流電場(2 kV, 1 A. Max)をあたえる。電源とプラズマ容器との間には抵抗(750 Ω)を直列に入れ、放電が安定に行なわれるようにしてある。ガスは容器の端の亚克力板からウィルソンシー

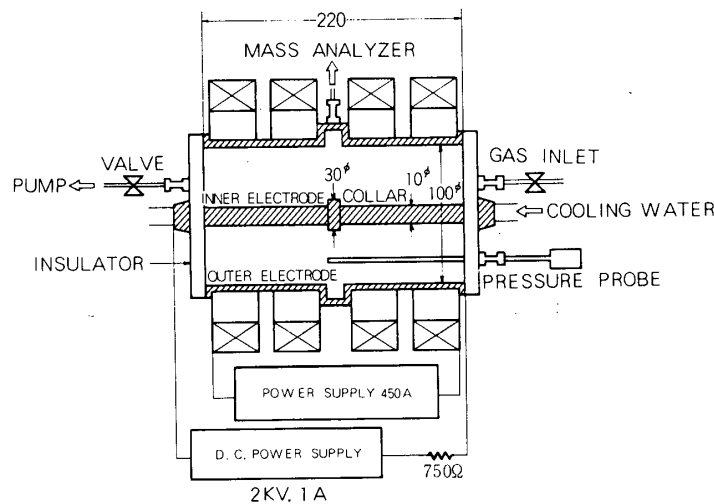


Fig. 1. 回転プラズマ装置の概略図

ルを通して入れ、他端からポンプでひく。外部電極の中央には2ヶ所ウィルソンシール(5φ)が取り付けられてあり、圧力プローブ、速度プローブを入れて径方向の分布を測定したり、試料の取り出し口として用いる。又プローブは図のように軸方向から入れることも可能である。内部電極の中央には幅1cm、外径3cmの輪がはめてあるが、これは放電を電極上に一様に起こすことが難しく、試料の取り出し口が外部電極の中央部にある為、中央部でむしろ放電がよく起こるように取り付けられたものである。又、放電はアクリル板に沿っても起こり易く、その為アクリルが焼けて不純ガスを出すことがしばしばある為、これを防ぐ為にアクリル板の内側にマイカレックスの板をはめ込んでいる。なお、本装置は定常運転を行なう為、電極がかなり熱くなる。そこで内外電極とも、冷却水を通し温度を下げるようにしている。

次に測定系の概略図をFig. 2に示す。我々の実験では試料としてHe Ar混合ガスを用いているが、He, Ar各々の単体ガスをあらかじめ別の容器に入れ、一定の割合に混合した後、回転プラズマ容器内に導く。外壁から取り出した試料は、内径3mm、長さ2500mmのステンレス製パイプを通して真空容器内に導びかれ、ここで四重極型質量分析計(NEVA NAG 515)により混合比を直接測定する。長いパイプを用いたのは、質量分析計に対する磁場の影響を避ける為であり、いったん真空容器に導びいたのは、質量分析計が $10^{-4}$ Torr以下でないと働かない為である。

### III 測定結果

#### III-1. 基礎的測定

質量分離を行なう前に、我々は単体ガス(He or Ar)を用いて、回転プラズマ装置に関する幾つかの基礎的な測定を行なった。

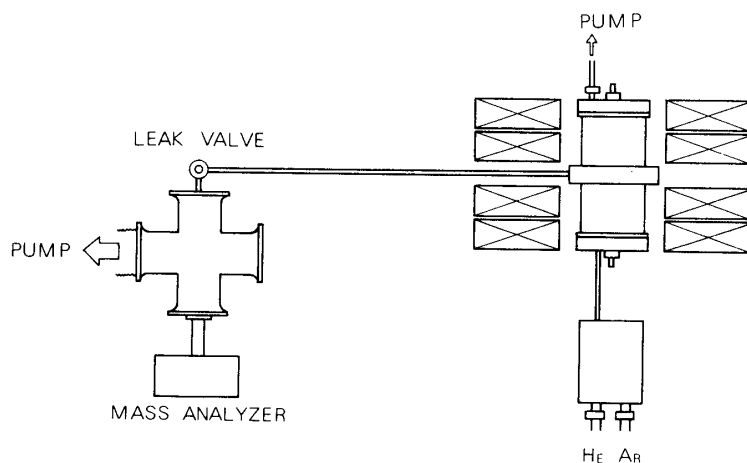


Fig. 2. 実験装置構成図

### 《放電特性》

Fig. 3には、このプラズマ装置の電圧-電流特性を、磁場の強さを変えて測定したものを示してある。ガス圧は500 mTorr、ガスはHeを用いている。放電はグロー放電領域であるから、ほぼ定電圧放電特性を示し、磁場の強さと共に電圧値は上昇している。これは磁場が強くホール係数が10程度であることによる。

### 《流速》

次に我々は、管内の流速の測定を試みた。この実験で作られるプラズマは弱電離プラズマであり、従って気体はほとんど中性であることから、我々の用いた方法は、物体の表面における圧力が、流れの方向によって異なる事を利用した“ピート管”方式である。その為に我々が使用したプローブはFig. 4に示してあるように、外径5 mm、内径3 mmのガラス管の片方の端をふさぎ、側面に直径2 mmの穴をあけたものを用い、これをFig. 4上図に示すように外壁から、あるいはFig. 1にあるように軸方向から挿入し、穴の方向を流体の速度方向に対して180°、90°と向けることによって生ずる圧力差をピラニゲージで読み取り、それを速度の情報にしようというものである。Fig. 4中、下図には、穴と速度とのなす角度を変えた時の代表的な圧力変化を示してある。Fig. 5にはプローブの穴を速度方向に対して180°向けた時（Fig. 4 A）の圧力Pと90°向けた時（Fig. 4 B or D）の圧力P<sub>0</sub>との差P - P<sub>0</sub>をP<sub>0</sub>で割ったものを、磁場の強さおよび放電電流を変化させてプロットしたものを示してある。

もし内部の気体を完全流体とみなす事ができれば、この結果から速度は容易に得られる。即ち気体の質量をm、密度をn、流速をV、静圧をp<sub>0</sub>、速度と法線とのなす角度をθとすると、円柱の周りの圧力分布は

$$p = p_0 + \frac{1}{2} n m V^2 (4 \cos^2 \theta - 3)$$

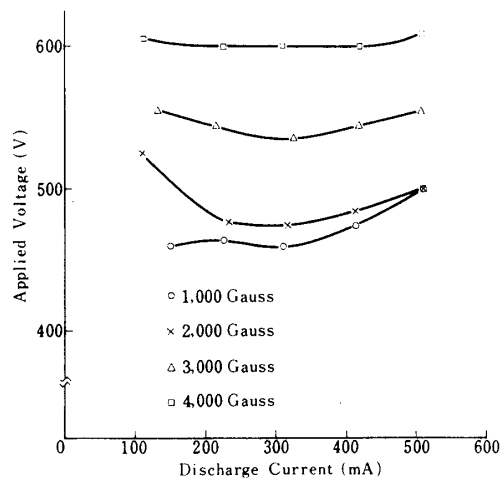


Fig. 3. 回転プラズマ容器の放電特性

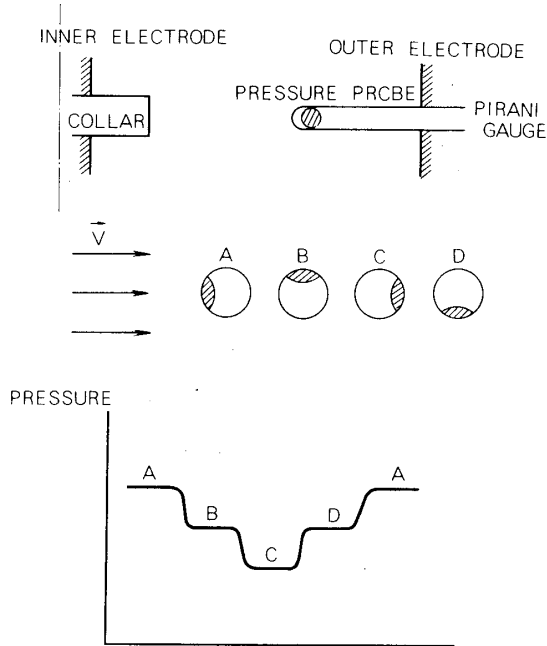


Fig. 4 速度プローブ説明図  
 上図：プローブ概略図  
 中図：プローブの流れに対する位置  
 下図：位置に対応した典型的な圧力変化

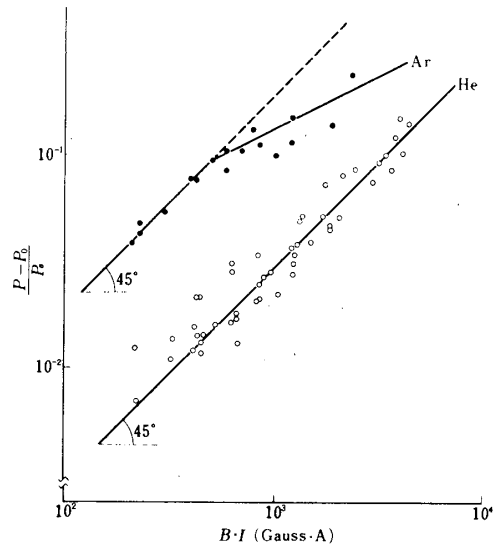


Fig. 5 圧力変化  $(P-P_0)$  の  $B \cdot I$  依存性

と表わされるから、測定結果  $P(\theta = \pi)$ ,  $P_0(\theta = \frac{\pi}{2}, = p_0 = n k T)$  を用いて

$$V = \sqrt{\frac{p - p_0}{p_0} \frac{2 k T}{m}}$$

となる。温度を300Kとして速度の最大値を求めると ( $B = 7 \text{ kG}$ ,  $I = 1 \text{ A}$ ) 各々  $450 \text{ m/s}$  (He),  $150 \text{ m/s}$  (Ar) となる。しかしこうして求めた速度のローレンツ力 ( $B \cdot I$ ) 依存性は、Fig. 5 から  $(P - P_0) / P_0$  が  $B \cdot I$  に比例していることから  $\sqrt{B \cdot I}$  に比例することになり、理論【10】と一致しない。その原因として考えられるのは、1つには、 $B, I$  を増すと、プラズマにつき込む電力も増すことになり、気体の温度が上がり粘性係数が大きくなり流速の増加が押さえられる事があげられる。しかしこれだけでは  $V \propto \sqrt{B \cdot I}$  という依存性を説明できない。もう一つには、内部の気体を理想気体として扱った事に問題があると思われる。今、我々の装置でのレイノルズ数  $R$  を計算してみると、(速度  $100 \text{ m/s}$ , 代表的な長さとしてプローブの径をとる)  $R \sim 1$  (He),  $10$  (Ar) となり、理想気体とは言い難い。実際、Fig. 4 下図に示したように、プローブの穴がCの位置では、理想流体ならばAと一致しなければならないはずであるがそうはなっていない。レイノルズ数が1より小さいとしてナビエ・ストークス方程式を線形化したいわゆるオセーン近似を用いることによって、円柱のまわりの圧力分布を計算してみると【9】

$$p = p_0 - \frac{4 \mu V / a}{1.3 - \log(R)} \left\{ \cos \theta + O(R) \right\}$$

$\mu$  : 粘性係数

$a$  : 円柱の半径

となり, これから近似的に  $V \propto (P - P_0)$  が言え, 従って  $V \propto (B \cdot I)$  が言える. 又, Fig. 4 下図に示す圧力変化も定性的に説明できる.  $R \sim 1$  の場合には, むしろこちらの方に近いのではないと思われる. さらに我々のプローブではプローブの径 (5 mm) に対して穴の径 (2 mm) が大きく, 又, 穴の位置もプローブの先端にあり, 円柱としての解析に問題が出てくると共に, wake 等の影響も無視できないと思われる. いずれにせよ, この方法では速度を正確に決定することは難しい. その他イオンの速度を平面プローブで測る方法 [11] もあるが, 流れを乱すことなく測定できるレーザー干渉等の方法が望まれる.

### 《圧力分布》

回転プラズマ容器内の径方向の圧力分布も合わせて測定した. 測定法と結果の代表的なものを Fig. 6 に示す. 圧力プローブとしては, 外径 5 mm, 内径 3 mm のガラス管を用い, 外部電極中央部から容器内にウィルソンシールを通して挿入する. 従って径方向には可動である. プローブの口は流れに対して垂直であるから測定した圧力は流れの影響のない静圧である. 測定結果は内側から外側にかけて圧力増加がみられ, 内部の気体の回転によるものと思われる. 外部電極での圧力と内部電極でのそれとの比 1.2 は理論 [10] と比較して妥当な値である. なおガスは He を用いた.

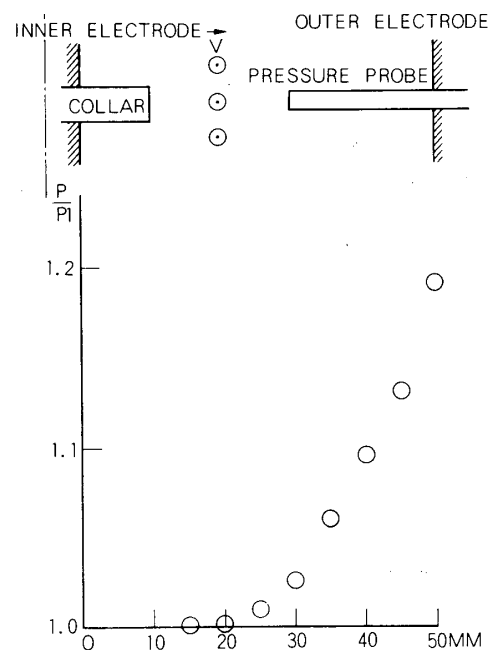


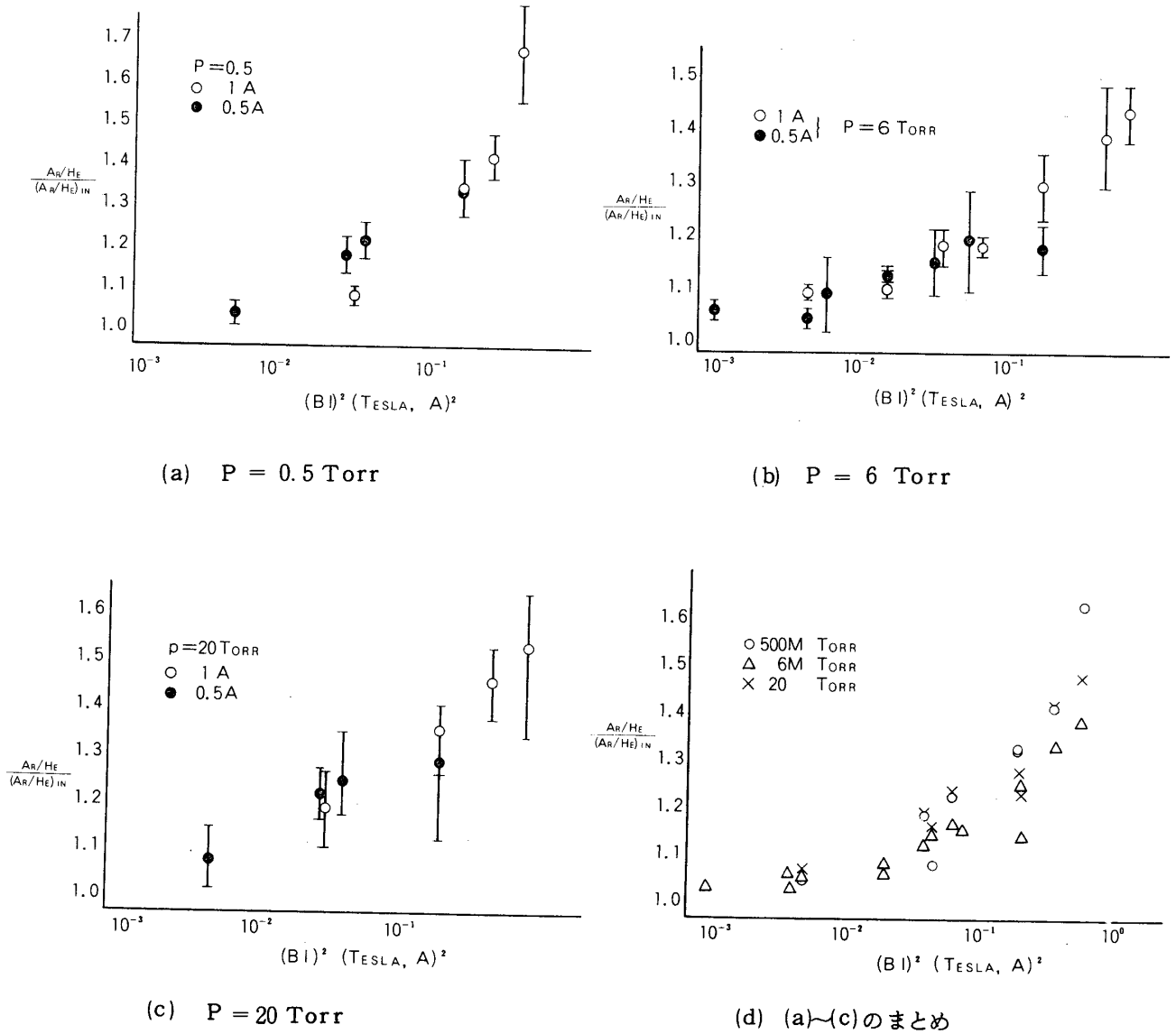
Fig. 6 圧力プローブ概略図並びに測定結果  
( $B = 5.7 \text{ kG}$ ,  $I = 0.5 \text{ A}$ )

### III-2 質量分離実験

径方向の圧力分布が実際に観測され, 質量分離の可能性が示唆されたので, 次に2種の気体の混合ガスを用いて質量分離を試みた.

Fig. 2 に示したように He (原子量 4.0), Ar (原子量 39.9) の2種のガスを He:Ar = 3:2 の割合で混合したものをを用いて回転プラズマを作り, 外部電極中央部から取り出した試料の混合比の変化を質量分析器で観測した. ここで使用したのは四重極型質量分析器

(NEVA NAG 515) であり, 原子量 1~100 までの間を 0.1~100sec の周期で掃引し, 分子数に応じたピークをオシロスコープ又はペンレコーダーに書かせる形式のものである. He/Ar 混合比を 3/2 にとったのは, 測定中片方がオーバースケールしないように便宜的に選んだものであるが, 磁場, 電流値等を一定にして 2, 3 違った混合比で実験を行なった結果では混合比への依存性はみられなかった.

Fig. 7 分離率 V. S.  $(B \cdot I)^2$ 

さて、実際の測定手順は次のようである。まず回転前の状態での混合比を測定し、次に適当な磁場と電流値を与えて、プラズマを発生させ、回転を起こさせる。それと共に混合比は変化をはじめ、約30秒で安定する。データとして我々は90秒後のものを取った。安定化まで30秒程度かかるのは、後に述べるような試料取り出し量の分離率に及ぼす影響を避ける為、試料の取り出しをリークバルブで少量にしぼっており、その為、混合比の変化した気体がパ



イプを通して質量分析計に達するのに時間がかかっていると思われる。容器内の圧力分布が定常になるのに要する時間は理論的には1 msec程度であり、実際外部電極での回転前後の圧力変化を目で見ている限りでは1秒以下である。運転をさらに続けると、容器内の温度が上昇し、不純ガスが発生するようになる。質量分析計で見ていると、水素や恐らく炭化水素化合物のものと思われる分子量の大きなガスが急激に増えてくる。従ってこれらのガスは主として側面のアクリル板から出てくるものと思われる。

さてこうして得られた結果から我々は分離率  $S$  として回転後の  $\text{Ar}/\text{He}$  混合比を回転前の  $\text{Ar}/\text{He}$  混合比で割ったもので定義し、これが磁場や電流にどのように依存するかを示したものが Fig. 7 a, b, c, d 及び Fig. 8 である。Fig. 7 では分離率の  $(B \cdot I)^2$  依存性について示してある。横軸を  $(B \cdot I)^2$  にとったのは後に述べる理論との比較の為である。これらの結果から以下のことが言える。

(i) 分離率は駆動力  $(B \cdot I)$  の増加と共に上昇し、最大で

$$\begin{aligned} S &= 1.68 \quad (500 \text{ m Torr}) \\ &1.44 \quad (6 \text{ Torr}) \\ &1.53 \quad (20 \text{ Torr}) \end{aligned}$$

であった。(共に  $B = 7.5 \text{ kG}$ ,  $I = 1.0 \text{ A}$ )

(ii) 分離率への圧力の影響はあまりない。(Fig. 7 d)

Fig. 8 には横軸を  $(B \cdot I)$  にとったものを示してあるが、分離率は本実験の範囲では  $B \cdot I$  に比例した関係を持っていることがわかる。

現実の問題としては濃度の高い部分をできるだけ多く取り出したいということがある。しかし、取り出す量を多くすると、容器内の圧力分布が乱れ、分離率は落ちてしまう。Fig. 9 には圧力 20 Torr の時、分離率の採取量依存性を磁場及び電流値をパラメーターとして変化

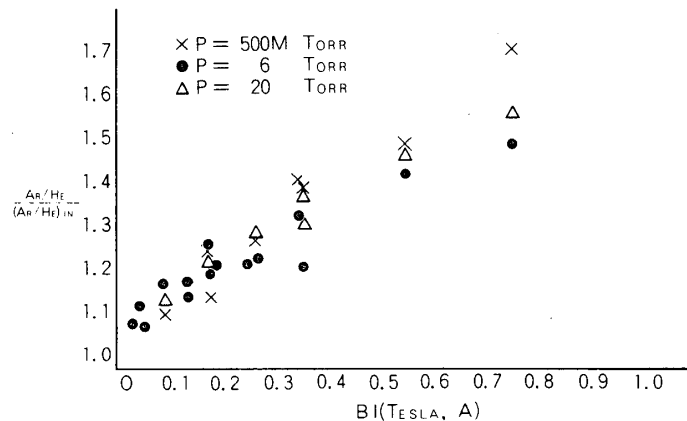


Fig. 8 分 離 率 V. S.  $(B \cdot I)$

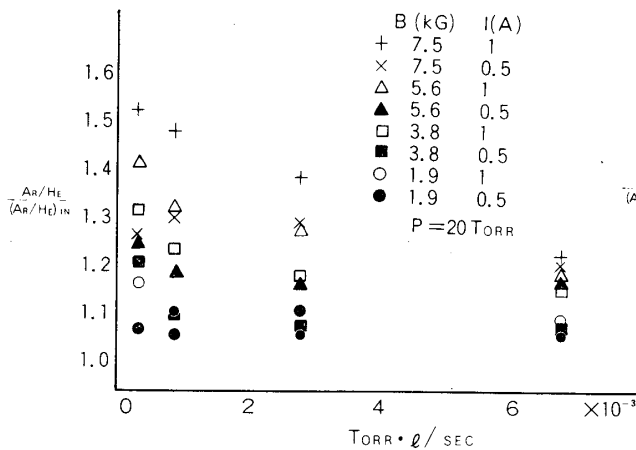


Fig. 9 試料取り出しの分離率への影響  
磁場及び電流をパラメーターとして、  
採取量を増していった時の分離率の  
変化を示している。

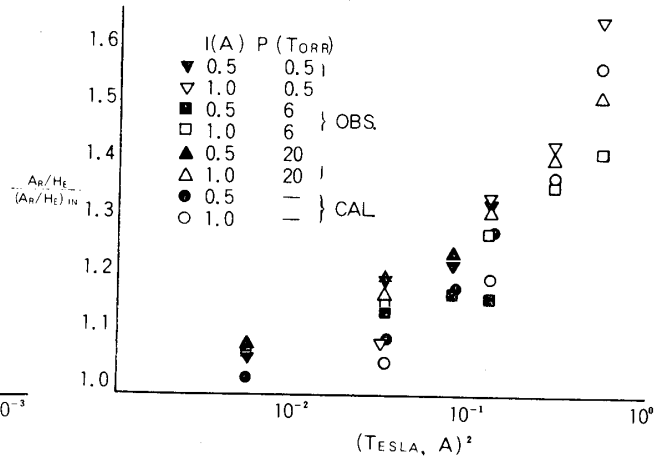


Fig. 10 温度上昇を考慮した理論値と  
測定値との比較

させたものを示してある。この結果から以下のことが言える。

- (i) 取り出し量を増すと分離率は落ちるが、急激に効くのは最初のうちであり、従って収量的には（分離率と採取量の積を考えれば）今回測定した採取量の範囲では、採取量を増した方がよい。
- (ii) 分離率の高い時ほど取り出しの影響は大きい。

## IV 議 論

### IV-1 測定誤差, 校正

本実験では、前にも述べたように、質量分析計に対する磁場の影響を避ける為、質量分析計を磁場コイルから遠ざけ、外壁からの試料は細長いパイプで質量分析計に導入している。その結果、磁場の影響はなくなったが、パイプ等のコンダクタンスの影響を考えなくてはならない。我々の実験における範囲 0.5~10 Torr では流れは粘性流とみなしてよく、従ってコンダクタンスは He と Ar の粘性係数の差によるが、それらは  $1.9 \times 10^{-4}$  dyne·sec/cm<sup>2</sup> (He),  $2.2 \times 10^{-4}$  dyne·sec/cm<sup>2</sup> (Ar) (共に 15 °C) とほぼ等しく、その差は無視できると思われる。しかしここで問題になるのは Fig. 2 にも示してある、真空容器に入るところにあるリークバルブである。ここで流量をかなりしぼっている為、この部分のコンダクタンスがかなり効き、しかもここでは流れが分子流になっている可能性があり、He, Ar のコンダクタンスが異なることが考えられる。実際、容器内の圧力をプラズマをつけない状態で上げながら、取り出し口側で Ar He 混合比を見ていると、Ar の方が圧力の増加と共に増えることが観測された。変化の割合は、回転前後の外壁での圧力変化分に対応して、混合比では

およそ 1.1 倍程度になる。従って我々が得た分離率はこれよりも十分大きく意味のある結果である。この変化は、しかしながら、He Ar 混合容器内での混合が十分に行なわれていなかったことも考えられ、コンダクタンスによるものとばかりは言えない面もある。もしこの結果をコンダクタンスによるものであると考えて測定結果を校正するならば、 $B = 7.5 \text{ kG}$ ,  $I = 1.0 \text{ A}$  の時の分離率は各々、

$$S = 1.44 \quad (500 \text{ m Torr})$$

$$1.35 \quad (6 \text{ Torr})$$

$$1.31 \quad (20 \text{ Torr})$$

となる。

#### IV-2 理論との比較

我々の実験のような、同軸型電極と軸方向の磁場とを用いた弱電離プラズマでの質量分離効果に対しては、理論的検討がすでに行なわれている。(Okada, Dodo, & Kawai: J. of Nuc. Sci. & Tech. 10 ('73))

以下に彼等による結果を示す。

出発点は次の4つの式である。

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{IV-1})$$

$$\rho (\partial \vec{v} / \partial t) + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla \rho + \vec{j} \times \vec{B} + \mu \left\{ \Delta \vec{v} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) \right\} \quad (\text{IV-2})$$

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} - \frac{1}{ene} \vec{j} \times \vec{B}) \quad (\text{IV-3})$$

$$p = \frac{\rho}{m} kT \quad (\text{IV-4})$$

これから軸方向に一樣な定常解を求めるのであるが、まず荷電保存の式  $\nabla \cdot \vec{j} = 0$  と電極表面での流速がゼロであることから径方向の電流密度は、

$$j_r = -\frac{I}{2\pi L} \frac{1}{r} \quad (\text{IV-5})$$

となる。ここで  $L$  は電極の長さ、 $I$  は全放電電流である。この表式を用い、又磁場は軸方向成分のみとして (IV-1~4) から回転速度  $v_\theta$ 、密度分布  $\rho$  を求めると次のようになる。

$$v_\theta(r) = \frac{BI}{4\pi L \mu (r_1^2 - r_0^2) r} \left[ r_1^2 (r^2 - r_0^2) \ln \frac{r}{r_1} - (r_1^2 - r^2) r_0^2 \ln \frac{r_0}{r} \right] \quad (\text{IV-6})$$

$$\rho(r) = \exp \left( \int_{r_1}^r \frac{m}{kT} \frac{\{v_\theta(r)\}^2}{r} dr \right) \left[ \rho_1 + \right.$$

$$\int_{r_1}^r \frac{m}{kT} \omega_e \tau_e \frac{BI}{2\pi L\mu} \exp \left( - \int_{r_1}^r \frac{m}{kT} \frac{\{v_\theta(r)\}^2}{r} dr \right) dr \quad (IV-7)$$

ここで

- $m$  : 質量
- $\mu$  : 粘性係数
- $r_1$  : 内側電極の外径
- $r_0$  : 外側電極の内径
- $\rho_1$  : 内壁での密度
- $\omega_e \tau_e$  : ホール係数

この式を用いて、我々の定義した分離率を表わすと次のようになる。

$$S \equiv \left( \rho_{Ar}(r_0) / \rho_{He}(r_0) \right) / \left( \int_{r_1}^{r_0} \rho_{Ar}(r) dr / \int_{r_1}^{r_0} \rho_{He}(r) dr \right) \quad (IV-8)$$

分母の比は初期条件から20/3となる。測定値との比較を行なう為には(IV-8)を数値計算しなければならない。まず(IV-7)の〔〕内の第2項であるが、本実験におけるホール係数の値(～10)を用いると、第1項に比べて無視できることがわかる。次に(IV-6)におけるLの値であるが、前にも述べたように我々は電極中央部に放電を容易に起こす為の“輪”をとりつけてある。その結果放電は“輪”の周辺数cmのところを局在している。従ってLとしてはこの長さをとるべきである。最後に未定のパラメーターとして残るのは温度Tであるが、これに関しては正確な情報はない。実験では不純ガスが急激に発生し始めたところで運転を打ち切っているのだから、温度はさほど高くなっているとは思われず、数値計算では数百から千度程度の値にとった。しかしながらこうして得られた計算結果の、分離率の(B・I)に対する上昇は、測定値に比べてはるかによい。

実験値の伸びがB、Iの増加と共に鈍ってくる原因として考えられるのは、1つには、B、Iの増加と共に、外からプラズマにつき込むエネルギーも増加し、気体の温度が上がった為であると考えられる。この温度上昇の影響は、熱運動として圧力分布を壊す働き(IV-7)の分母のT)と共に、粘性係数の増加( $\mu \propto \sqrt{T}$ )となって回転速度を鈍化させる傾向(IV-6)参照)を持つ。この効果を取り込む為に、我々は温度Tを磁場B、電流Iの関数として次のように考えた。Fig. 3より、プラズマ容器は定電圧管と考えられ、従って電極間の電圧VはBのみの関数と考える。磁場中の電気伝導度の形からこの依存性を、 $V = V_0 + \alpha B^2$ とし、一方温度の時間変化は、つき込む電力と壁からの損失で決まると考えると、

$$k \frac{dT}{dt} = \beta V \cdot I - \alpha k T$$

これから温度のB、I依存性は、測定時間を回転開始後一定にしておけば、

$$T = a T_0 + b (V_0 + \alpha B^2) \cdot I \quad (IV-9)$$

となる。ここで $V_0$ 、 $\alpha$ はFig. 3の結果から推定し、 $a$ 、 $b$ は適当な係数である。Fig. 10には、 $T = 300 + \frac{1}{2} (450 + 1000 B^2) I$ 、 $L = 5 \text{ cm}$ として数値計算した結果と測定値とを

比較して示してある。

もう1つ問題として残るのは、放電が中心部で起こっている為、軸方向に沿った対流が生ずるということである。このような流れは単体ガスでの実験時に、プローブで確かめられたし、混合ガスでの実験では、内部電極から2cm(中央部の“輪”より1cm)離れた点での混合比を観測していると、運転開始後、しばらくはHeが増すが、時間と共にArの量が増しついにArの方が多くなるのが観測された。これは外部電極付近のArの多い気体が対流で内部電極側までまわり込んできているものと考えられる。B, Iの小さな時、実験的な分離率が比較的よいのはこのせいかもしれない。

次に採取量と共に分離率の落ちる現象であるが、一つにはArの多い部分を取り出しているの容器内にHeがたまっていたことが考えられ、もう一つには、採取口付近に生ずる流れが容器内の圧力分布を乱していることが考えられる。しかしながら我々の実験では最高 $7 \times 10^{-3}$  Torr $\cdot$ l/secの採取量であり、一方容器の体積は1.65l, ガス圧は20 Torr であるから100秒の実験時間では内部の気体の2%しか引き出しはせず、従ってHeが蓄積したことは考えにくい。圧力分布への影響は、放電領域が採取口周辺の狭い部分であるからあるとは思われるが、圧力分布が平衡に達するまでの時間は理論的にはmsecのオーダーであり、その意味でこの程度の採取量が分離率にかなり効いていることを説明するのは難しい。

#### IV-3 ウラン濃縮への応用

これまで述べた実験結果により、質量分離の可能性が得られたので、ここではこの装置のウランウム235分離への応用に関して議論を行う。

<分離率>

まず、我々がHe Ar混合ガスを用いて得られた結果をウランウム同位体に置き換えてみる。温度を等しいものと考えれば、He Arとウランウムとで異なるのは、質量と粘性係数である。今、式(IV-6.7.8)よりこれらの分離率への依存性を近似的に、 $S \propto \exp\{(M\alpha - M\beta) / \mu^2\}$ とおくと、He Arプラズマでは、 $M_{Ar} - M_{He} = 36$ , ウランウムプラズマでは、 $M_{U^{238}} - M_{U^{235}} = 3$ であり、粘性係数は各々、 $\mu_{He} = 1.9 \times 10^{-4}$  g $\cdot$ cm/s,  $\mu_{Ar} = 2.2 \times 10^{-4}$  g $\cdot$ cm/s,  $\mu_U = 1.5 \times 10^{-4}$  g $\cdot$ cm/s (共に15°Cの値)であるから、ウランウムの場合の分離率は、

$$S_{U^{238}}/U^{235} = \left( S_{Ar/He} \right)^{\frac{3}{36} \left( \frac{2.0 \times 10^{-4}}{1.5 \times 10^{-4}} \right)^2} \approx \left( S_{Ar/He} \right)^{0.15}$$

と推定される。従ってHe ArでP=20 Torrの時得られた値をウランウムに換算すると、

$$S_{U^{238}}/U^{235} = (1.53)^{0.15} \approx 1.06$$

となる。

しかしながらウランウムの場合必要なのは軽いウランウム235であり、従って内壁での分離率が必要である。我々の得た外壁での値から内壁での値を求める為に式(IV-6.7)から、両者の比を計算すると、

$$\begin{aligned} \frac{p(r_0)}{p(r_1)} &= \exp \left( \int_{r_1}^{r_0} \frac{m}{kT} \frac{\{v_{\theta}(r)\}^2}{r} dr \right) \\ &= \exp \left[ \frac{m}{kT} \left\{ \frac{BI}{4\pi L \mu (r_1^2 - r_0^2)} \right\}^2 \left\{ \frac{1}{4} (r_0^2 - r_1^2)^3 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - r_0^2 r_1^2 (r_0^2 + r_1^2) \left( \ln \frac{r_0}{r_1} \right)^3 \right\} \right] \end{aligned}$$

となる.  $L = 5 \text{ cm}$   $T = 1000 \text{ K}$  として計算すると

$$(p_{Ar}(r_0)/p_{He}(r_0))/(p_{Ar}(r_1)/p_{He}(r_1)) = 4.16$$

従って内壁での分離率は

$$S_{He/Ar}^{IN} = 4.16 / 1.53 = 2.72$$

と推定できる. これをウラニウムの場合に換算すると

$$SU^{235}/U^{238} = (2.72) 0.15 = 1.16$$

となる. しかし実際には採取量を増すと分離率は落ちる為, 採取量  $7 \times 10^{-3} \text{ Torr } \ell/s$  の時の分離率をウラニウムに換算する必要がある, 内側でも外側と同じ程度分離率が落ちるとすれば

$$SU^{235}/U^{238} = (2.72 \cdot \frac{1.24}{1.53}) 0.15 = 1.12$$

となる.

この値を用いると,  $U^{235}$  の含有率を 0.7% から 3% に上げる為に, 装置を 13 段直列につなぐ必要があり, 採取できる  $U^{235}$  の量は  $6.0 \times 10^{-7} \text{ g/sec}$  となる.

<エネルギー効率>

He Ar プラズマの場合, 分離に要している電力は最大 700 watts (磁場系統を除く.) である. しかしウラニウムの場合, 電力はもっと少なくすむと考えられる. それは, イオン化エネルギーが He の 24.56 eV, Ar の 15.76 eV と比較して, U は 6.2 eV と低い為, 電子密度が増し, 電気伝導度がよくなり, 電流を流すのに必要な電圧はもっと小さくすむと考えられるからである. 例えば  $T = 6000 \text{ K}$  で電離平衡にある気体を考えると, ウラニウムの電気伝導度は Ar の  $10^4$  倍になり, 従って電力は  $10^{-4}$  倍になる. (実際はシースでの電圧降下分で電力の下限はある.) 今の実験の場合, 温度は実験中上昇を続け, とても平衡状態とはいえないので, 詳しい定量的な議論はできないが, シースでの電圧降下分 (イオン化ポテンシャル程度) がほとんどであるとすると, 必要な電圧は 12 watts ですむことになる. 従って  $U^{235}$  1 粒子あたりの分離エネルギーは,  $650 \text{ keV}/U^{235}$  となる. この値はガス拡散法の  $3.87 \text{ MeV}/U^{235}$  に比較して効率のよい値ではあるが, 機械的遠心分離法の  $300 \text{ keV}/U^{235}$  とい

う値に比較するとまだ及ばない。

<いくつかの問題点と今後の課題>

分離におけるエネルギー効率を更に上げる為には、(i)分離率を上げる。(ii)採取量を増す、ことが必要である。まず分離率を上げる為には磁場よりも電流値を増した方がよい。それは電流を増す方が、放電電圧の増加分が少なく済み、エネルギー的に得だからである。ここで注意しなければいけないのは温度上昇の効果であり、(IV-9)式のような関係があるとすれば、分離率は最終的に飽和してしまう。効率のよい冷却が必要である。

次に採取量を増す為には、(a)分離率が多少落ちても採取量でかせぐ。か、(b)内部の圧力を増す。内部の圧力の高いところでは、安定な放電が難しく、又、分離率へ及ぼす採取量の影響も意外に大きかったことから、こうした面での最適値を今後実験的に押さえていく必要がある。

特に今後残された課題としては、放電を電極上で一様に起こすことにより、定常的な圧力分布を確立すると共に、内壁での分離を押え、さらに内外両方からの試料の有効な取り出しを行なうこと。又装置のスケーリングに関する情報を得ることが、今後この装置を同位体分離に応用する際に必要であろうと思われる。

## V 結 論

軸方向の磁場と径方向の電場を用いた同軸型弱電離回転プラズマ装置により、He-Ar混合ガスの分離実験を行ない、磁場の強さ7.5 kG、電流値1.0 Aの条件のもとで、外壁におけるArのHeに対する比は、回転前のその1.68倍に達した。この値は外壁から取り出す試料の量の増加と共に小さくなるが、分離率と採取量の積では本実験の範囲ではよくなっている。この結果をウラン濃縮におきかえてみると分離率は1.12となり $U^{235}$ を0.7%から3%に増すには13 stages 要し、エネルギー効率は $650 \text{ keV}/U^{235}$ となる。電源容量の増加、装置の改善によりこれらの値は更に改善される可能性を我々の実験結果は示しており、今後の発展が期待できる。

## 謝 辞

この実験の一部は、日立製作所奨学寄附金の助成によって行なわれました。又、議論を進めるにあたっては日立中央研究所の岡田修身氏に貴重な御意見をいただきました。ここに感謝いたします。

1976年6月30日新設部(科学)

## 参 考 文 献

- [1] B. Lehnert: Nucler Fusion, 11, 485 (1971)
- [2] Alfvén: Rev. of Modern Physics, 32, 710 (1960)
- [3] B. Angerth et al.: Nucler Fusion, Suppl. (1962), Part 1, p. 705.
- [4] B. Lehnert: J. of Nucler Energy, Part C, 1, 40 (1959)

- [5] B. Bonnevier: *Plasma Physics*, **13**, 763 (1971)
- [6] W. L. Love & C. Park: *AIAA J.*, **8**, 1377 (1970)
- [7] B. J. James & S. W. Simpson: *Physics Letters* **46A**, 347 (1974)
- [8] H. Heller & H. Simon: *Physics Letters*, **50A**, 139 (1974)
- [9] H. Lamb: "Hydrodynamics" 6th ed. § 343, Cambridge (1932)
- [10] O. Okada, T. Todo & T. Kawai: *J. of Nucler Sci. & Tech.*, **10**, 626 (1973)
- [11] T. Ban & T. Sekiguchi: *Japan J. Appl. Phys.*, **15**, 115 (1976)