U.D.C. 621.039.6

日立核融合実驗装置

Thermonuclear Fusion Experiment at Hitachi, Ltd.

尚** 近 藤 弥太郎** 槌 本 野 文 哉* Tadashi Tsuchimoto Yatarô Kondô Bunya Tadano 早川孝之** 山本 学** 百 々 太 郎** Manabu Yamamoto Takayuki Hayakawa Tarô Dodo 加 沢 義 彰*** 代田 博*** 見 文 彦*** 说 Yoshiaki Kazawa Humihiko Itsumi Hiroshi Shirota 藤 竜 生*** 木 村 鐘 治**** 高 砂 常 義**** 俞 Tsuneyoshi Takasuna Shôji Kimura Tatsuo Saitô 佐々木 勇太郎**** 寺 沢 義 雄**** Yûtarô Sasaki Yoshio Terasawa

内 容 梗 概

ミラー形直流磁場にイオンビームを入射して、イオンサイクロトロン周波数の高周波電場でイオンに回転運動のエネルギーを与え、この磁場内にとらえて高温プラズマを発生させる"イオンサイクロトロン共鳴装置"の建設と予備実験の結果を報告する。

装置の概要は,磁場: 最大 30,000 ガウス,ミラー比2,プラズマ閉じ込め領域: 直径 25 cm,長さ 200 cm, 真空度: 1×10⁻⁵mmHg,発振器: 14 Mc, 50 kW,イオン源: H⁺ 100 mA, 400 eV。磁場コイルを含む装 置本体は当初の目的に沿うものが完成した。

予備実験によると、入射イオンが磁場内にとらえられたとみなしうるような結果が得られた。しかし高周波 電場のモードに疑問があって、断定的結論には達していない。イオンサイクロトロン共鳴加熱を行なって、さら に高温のプラズマを発生させるには、ポンプの排気速度をあげて真空度を1桁以上向上させる必要がある。

1. 緒 言

核融合反応によって生ずるエネルギーの利用が,将来核分裂反応 によるエネルギーの利用にとって代わるほど有利なものとなるかも しれないという予想のもとに,熱核融合反応の研究がアメリカ,イ ギリス,ソ連で開始されたのは1947年ころであった。この研究が相 当はなやかに国際的にも宣伝されたのは1955~1958年ころのことで ある。学問的にかなり着実に研究が行なわれるようになったのもそ のころからであるが,プラズマ閉じ込めの不安定性というような本 質的な困難が容易に克服されがたいものであり,実用化までの年数 も相当長期にわたるものであり,また果して実用化するかどうかの 見通しも5分5分程度のものと想像されるようになってきた。この 間,研究の方向も性急に目標を追うよりも,学問的基礎となるプラ ズマ物理学の研究を着実に積みあげてゆく必要があることが認めら れて,その方面の学問的知識は急速に進歩し,またその副産物とし ていくつかのプラズマの応用が注目されるようになった。

わが国における研究は、1957~1958年ころから各所でコンデンサ 放電による大電流アークによって高温プラズマを発生させるという やり方で採りあげられてかなりはなばなしいスタートであった。わ れわれは, 核融合反応の研究はどの程度にまで力を入れて行なう必 要があるか、どのような方向に研究を進めるべきかということを検 討するために,工場,研究所の関係者を集めて核融合委員会を作 った(1958年4月)。この委員会でそれまでに判明していた学問的成 果を検討することに約半年あまりを費したのち、研究の方針を決定 した。その当時の大形装置は、コンデンサ放電方式によるものとし て、大電流ピンチ(直流形およびドーナツ形)、ステラレータ方式お よびミラー形磁場の誘導ピンチ方式,直流ミラー磁場へD2+イオン を入射して解離させ閉じ込める方法 (DCX, OGRA) が代表的なも 日立製作所中央研究所 工博 日立製作所中央研究所 ** *** 日立製作所日立工場 ****日立製作所日立研究所

のであった。わが国ではコンデンサ放電の方式,ことにピンチ方式 の装置がもっぱらであった。このような状況に対して,われわれば 研究の前途はかなり遠くかつ早急な成果を期待するよりは高温プラ ズマの基礎的な研究に力を注ぐべきであると判断した。この見解に 立って,われわれは直流ミラー磁場でプラズマを閉じ込め十分な学 間的研究を積みあげてゆくこととした。直流磁場での実験を行なう ことは測定の点などで好都合であり,わが国としては特長のあるや り方ではあるが,プラズマの発生方法をどうするかが苦心の要する ところであった。たまたま論文の収集よりは学問的知識の積みあげ に重点をおいた研究方針のおかげで,磁力線方向からイオンを入射 して閉じ込めるという今回の装置の原理を考案することができたの で,まだ世界のどこでもやっていない,ここに報告するような装置 を作ることを1959年の初めに決定した。1959年度の原子力平和利用 委託研究費を受けて装置の設計を開始し,1961年末装置の据え付け を完了,1962年初めより実験を開始した。

この装置の原理のと概略は次節に述べるが、われわれが装置の設 計を始めたのち,同じ原理の Albedo⁽²⁾ という名をつけられた装置 が1954年ころにアメリカですでにテストされたことを知った。しか しその装置は,ビームを入射し trap するという原理を確かめるだけ のごく小形の装置であって、高温プラズマの発生を目ざすようなも のではなかったし、またその結果については論文は一つも出ていな くて、わずかに AEC レポートがただ一つだけしか出版されていな い状況であった。われわれの装置では密度は低いにしても 100 keV 以上の高温プラズマが得られるという見込みもあって、仕事を続け ることにした。われわれの装置の原理は、入射イオンにサイクロト ロン周波数の高周波電界で回転運動のエネルギーを与えて、磁場内 に trap するものである。 高周波電界の代わりに閉じ込め用静磁場 を不均一にしておいて,走行するイオンに付随した座標系でみると, この静磁場が実はイオンサイクロトロン周波数の電界を与えるよう な入射閉じ込め方式が"non-adiabatic trap"(3) という名のもとに 昨年ころからソビエトおよびアメリカ、イギリスで小形の装置を用

いて始められている。

2. 装置の原理およびその仕様

両端でその強さが強くなっているような磁場(Magnetic Mirror Field,磁気ビン)は荷電粒子を閉じ込めることができる。荷電粒子 はその角運動量に比例した磁気能率 μをもち,その符号は束縛され ない粒子については反磁性的である。磁力線方向の運動は磁場の束 縛を受けずに動けるが,この反磁性的な磁気能率のために磁場の強 さにこう配のあるところでは

$\mu \bullet \operatorname{grad} B$

の力で磁場の弱いほうへ押しもどされる。もちろん磁力線に垂直方向には軌道が曲げられて押しもどされるから、磁気ビン内に荷電粒子は閉じ込められることになる。磁気能率µは、以下のように磁場に垂直方向の運動エネルギーに比例することがわかる。磁場に垂直方向の速度をv⊥とすると、その磁気能率µは角運動量のe/2mc倍であるから

 $\mu = (mv_{\perp}a)e/2 mc = mv_{\perp}^2/2 B$

ここに a: 荷電粒子の半径= v_{\perp}/ω_c

 ω_c : サイクロトロン周波数=eB/mc

磁気ビンの外側から,イオンを磁力線に沿って小さいµをもつ状 態で入射して,ミラー磁場の他端に達するまでの間にイオンの円運

第1表 強磁界およびコイルの基本仕様

		the the	一樣磁界部	磁気鏡部
最	大磁束密度	(ガウス)	1.5×10^{4}	3.0×10 ⁴
破	界範囲	(cm)	$35\phi imes 100$	
均	一 度		±1% 以下	
7	イル内径	(cm)	58ϕ	32ϕ
観	測 ポート		3	3 個 所
22	イル接続	-	全	コイル直列
7	イル定格		最大磁束密度	ξ時において5秒以上
電	源		350V 1.0×10	⁴ A 2.0×10 ⁴ A M.R.



動の周期と同じ周期をもつ高周波電界をかける。イオンは共振して 電界から円運動のエネルギーをもらいµが増加するので,このミラ ー磁場にとらえられてたくわえられることになる。

この原理に基づく実験を行なうために製作した装置の仕様は(目 標値に括弧を付す)

- (1) プラズマ閉じ込め用磁場
 - 磁場強さ: 15,000 ガウス 両端部 30,000 ガウス
 - 一様磁場部: ボビン内径 500 mm Ø 長さ 1,200 mm
 - ミラー磁場部: ボビン内径 300 mm ϕ

ミラー間距離 2,200 mm

- 励磁電流: 15,000A 300V
- (2) 真空系
 - 全 容 積: 350 l ステンレスおよびガラス製 200°C ま
 で baking 可能

プラズマ容器: 2001 コバールガラス製

- ポンプ系: 8″D.P.および 5001 R.P. 2系列空気作
 - 動バルブ,到達真空度 5×10⁻⁷mmHg た

だしイオン源動作時 2×10⁻⁵mmHg

(1×10⁻⁷mmHg),排気速度1×10⁻⁵mmHg にて1,000 *l*/s

(3) イオン源

ビーム強度: (H⁺ 100 mA)

- エネルギー: 400 eV
- (4) 発振器

周 波 数: 9.5, 14, 19 Mc, 安定度±0.2% 他励方式

出 力: 50kW 8T72A プッシュプル

(5) 測 定 器

第1図装置の概略



3. 強磁界コイルの設計と製作

3.1 コイルの磁界計算と配置

----- 84 ------

磁界を生成する領域とその磁束分布が与えられて、これを満足す る起磁力分布を決定することは容易ではない⁽⁴⁾。このコイルの基本 仕様は第1表に与えられているが、特に問題になるのは長さ3m、 580 ϕ の広い領域で1%以下の一様性が要求される部分である。わ れわれはまず電流密度や構造的要求を満足する配置を仮定してその 磁界を計算し、定められた磁界と比較してコイルの配置を修正する という試行錯誤を繰り返すことによって配置を決定した。これは慣 れないときわめて手間のかかる計算であるが、電子計算機 IBM-650 を使用して計算の時間短縮と精度の向上を果すことができた。 空心ソレノイドによる磁界は基本的には1ターンコイルによる磁 界の合成として求められる。第2図のように半径 a なる 1 ターンコ イルによって任意の点 P(z, r) に作られる磁束密度の軸方向成分 B_z と半径方向成分 B_r とは次式によって与えられる⁽⁵⁾ (MKS 単位)。

マイクロ波測定器

34 Gc 帯立体回路一式, クライストロン電源, ヘテロダイン増幅器, ファラデーカップエネルギー分析用電源, パルスタイマー, シンクロスコープなど。

装置の概略配置を第1図に示す。



置 装 験 実 合 核 鬲虫 立. 日





項目	N	Aコイル群	Bコイル群		
員	数	1	2		
Turns	-	$5 \text{ T} \times 6 \times 4$	$12 \mathrm{T} \times 8 \times 2$		
電 流 (D 定)C) 格	{1,000A 連続 {10,000A 10秒 {15,000A 5秒	{1,000A {10,000A {15,000A 連続 {10秒 {5秒		
コイル導	線	3.5×9.3mmA銅線17本パラレル	1.6×22mm A銅線16本パラレル		
抵 抗 (75	5°C)	0.00934Ω	$0.00587 \Omega imes 2$		
絶	縁	F種 $\begin{pmatrix} \# y = x \\ SLSy = x \\ ZLSy = x \\ H \end{pmatrix}$	F種 $\begin{pmatrix} x y x x \\ SLS y = x \\ x \\ \end{pmatrix}$		
耐 圧 試	験	AC 1,500V 1分間	AC 1,500V 1分間		
断熱温度上	: 昇	2.25℃/s (10,000A) 5℃/s (15,000A)	2.25°C/s (10,000A) 5°C/s (15,000A)		
端 子 電	圧	315V(15,000Aにて)(75℃)	315V(15,000Aにて)(75°C)		
全 抵	抗	0.02108Ω (75°C)			
全インダクタン	ノス	約 5.5mH			
磁束分	布	15,000A 3×10 ⁴ G(ミラー部) 1.5×10 ⁴ G 一様磁場部(第3図)			
電	源	875kW (連続) MR×4 350V 10 ⁴ A 2時間, 2×10 ⁴ A 1分, 4×10 ⁴ A 0.1秒			
接	続	Aコイル24個, Bコイル16個, 直列(第3図参照)			
イルは 第5 国 NI	図の [=	ようなコイルに分割して $B_0 a_1 \sqrt{\delta^2 + (\alpha + 1)^2}$ η_0	考えることができるから (4)		
	2	$B_{2}(1/2, 0)$			
ここで1	$_{0}-$	$D_2(0/2, 0)$			
ここで1	$\gamma_0 = \gamma_0$	MKS 単位では 4 π/10 ⁷			

となり、この場合コイルに消費される電力Wは次式で与えられる。



第5図 円筒形ソレノイド

 $B_{r}(z, r) = \frac{2 \mu I z}{r \sqrt{(a+r)^{2}+z^{2}}} \left[-K(k) + \frac{a^{2}+r^{2}+z^{2}}{(a-r)^{2}+z^{2}} E(k) \right] \dots (2)$

ここに I: コイルに流れる電流

μ: 透磁率

K(k), E(k): kを母数とする第1種,第2種の完全だ円積分で $k^2 = \frac{4 a r}{(a+r)^2 + z^2}$

われわれも配置が決まってからの最終的な磁界分布の計算はこの 式によったが、この式で数多くの試行錯誤的計算を行なうのは手間 がかかるので、大体のコイル配置決定のための計算は薄い単層ソレ ノイドの磁界を与える次式によった。

$$B_{z}(z, 0) = \frac{\mu N I}{l} \left[\frac{z}{\sqrt{a^{2} + z^{2}}} + \frac{l - z}{a^{2} + (l - z)^{2}} \right] \dots \dots \dots \dots (3)$$

1: ソレノイドの長さ ここに

N: 巻数

z = 0: ソレノイドの左端

a: 平均径

この式でも普通実用上問題にならぬ程度の精度で磁界を求めるこ とができる。

一様磁界には3箇所の観測または測定用の窓を設ける必要がある

ここで ρ; コイル導体の比抵抗

δ: 占積率

δ=0.8程度と仮定し,第1表および第3,4図の数値を用い,こ のコイルについて概略値を計算すると $\sum NI \doteq 4.8 \times 10^{6}$ A, $\sum W \doteq$ 4,700 kW となる。 励磁電流が数千アンペアになると導体断面積の 増大に伴うコイル製作作業のやりにくさ,接続部の発熱,接続線に 作用する電磁力, 配線費などの点から技術的経済的に問題があるの でなるべく大電流としたくない。したがってこの場合励磁電圧はで きるだけ高く選んだほうがよい。既設電源の最高電圧350Vに約 10%程度の余裕を残して315V, 15,000A 程度で励磁できるコイル が妥当という目安がつく。

3.3 コイルの設計値詳細

コイル製作の作業性、経済性などを検討しさらにモデルヨイルを 製作し磁束分布, 電磁力などが計算値と一致することを確認して決 めたコイルの主要設計値を第2表に示す。

3.4 コイルに働く電磁力と構造系

(1) 軸方向電磁力とその対策

— 85 ——

二つのソレノイド間の電磁力Fは次の式で計算できる。すなわ ちソレノイド1の端部座標を Z11, Z12, ソレノイド2については Z21, Z22, また考察点の座標を1, 2についてそれぞれ Z1, Z2 と すれば

$$F = -\int_{z_{11}}^{z_{12}} \int_{z_{21}}^{z_{22}} \frac{N_1 I_1}{(z_{12} - z_{11})} \cdot \frac{N_2 I_2}{(z_{22} - z_{21})} \cdot \frac{\partial M (z_2 - z_1)}{\partial (z_2 - z_1)} dz_2 \cdot dz_1$$

$$= -\frac{(N_1 I_1) (N_2 I_2)}{l_1 l_2} \int_{z_{11}}^{z_{12}} \{M(z_{22} - z_1) - M(z_{21} - z_1)\} dz_1 \dots (6)$$

ので、4分割して考えることにし、この両端に各1個の磁気鏡コイ ルを置くことにした。最終的に得られたコイル配置と磁界分布の設 計値を第3,4図に示す。 3.2 電源とコイル方式 ① 磁界分布, ② 磁界を発生する領域, ③ デューティサイクル (duty cycle) が与えられ、またコイルの配置も決定されたので電源 の所要出力を求めることができる(6)。すなわち第3図に示されたコ

 $z z \in l_1 = z_{12} - z_{11}, \ l_2 = z_{22} - z_{21}$ $M(z) = \mu \sqrt{ab} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right]$ $k^2 = 4ab/(a+b)^2 + z^2$ (第6図参照) 1が1ターンコイルかまたはそれに近いと考えてよいとき,す なわち $z_{11} = z_{12} = z_1 = - 定$, $l_1 = 0$ の場合は



第6図 2個の同軸1ターンコイル



(ファラデーカップ側磁気鏡コイル取りはずし中)

込式とし,力は十分な断面積を持つコイルによって伝達され,中 央フランジを単に圧縮する。このようにしてフランジには単なる 圧縮力のみが作用し,ボビンにはコイルとの摩擦を通しての力が 働くのみとなる。この方式の考案によってボビンをきわめて経済 的に設計できた。

集

(2) 半径方向電磁力とその対策

文

.

半径方向の圧力**P**は半径に比べて十分長いソレノイドの場合は 次式で与えられる⁽⁷⁾。

$$P = \frac{\pi}{50} \left(\frac{NI}{l}\right)^2 \frac{m - \frac{m^2}{2} + \left(\frac{m^2}{2} - \frac{m^3}{3}\right) \frac{a_2 - a_1}{a_1}}{1 + m \frac{a_2 - a_1}{a_1}} (\text{dyne/cm}^2)$$

ここで NI/l: 単位長さ1 cm 当りの AT

 $m = (r - a_1) / (a_2 - a_1)$

コイル導体の最外周面 (m=1) での圧力 P_1 は

$$P_{1} = \frac{\pi}{50} \left(\frac{NI}{l}\right)^{2} \cdot \frac{1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{a_{2} - a_{1}}{a_{1}}}{1 + \frac{a_{2} - a_{1}}{a_{1}}}$$
$$= \frac{\{B_{z}(a_{1})\}^{2}}{8\pi} \cdot \frac{1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{a_{2} - a_{1}}{a_{1}}}{1 + \frac{a_{2} - a_{1}}{a_{1}}} (dyne/cm^{2}) \dots (9)$$

ここで $B_z(a_1)$: コイル内面の z 方向磁界強さ(ガウス)

第7図 強磁界コイルの組み立て



(ファラデーカップ側磁気鏡コイル取りはずし中) 第8図 コイル接続端子部

$$F = -N_1 I_1 \int_{z_{21}}^{z_{22}} \frac{N_2 I_2}{l_2} \cdot \frac{\partial M (z_2 - z_1)}{\partial M (z_2 - z_1)} \partial (z_2 - z_1)$$

= $-N_1 I_1 \frac{N_2 I_2}{l_2} [M(z_{22} - z_1) - M(z_{21} - z_1)] \dots (7)$

となり、実用上この式で計算して問題ないことが多い。このコイ ルの場合前述の設計値を用い、(7)式で各コイル間の電磁力を計 算し、総和を求めるとコイルの中央フランジ部には約25トンの力 がかかることになる。

コイル支持ボビンは強磁界コイルを支持してコイルの幾何学的 配置を決めるとともに高周波コイル,プラズマ閉じ込めガラス容 器を内蔵しているが,約4トンのコイル重量と前述の強大な電磁 力に耐える構造が要求される。この力をスタンド,ボビンにまと もに負わせようとすればきわめて厚い寸法と高価な材料が要求さ れる。またボビンの伸びが許されないとすれば50℃程度の温度上 この強磁界コイルではこの圧力は一様磁界部で 9 kg/cm², 磁 気鏡部で 36 kg/cm² にも達する。したがって40個に分割した各コ イルの外周を数百 kg の力に耐えるように押える必要がある。わ れわれはこのために特にバインド線を使用しないで端子板を厚み 25 mmのベークライト板で製作して, この半径方向の力も押える ようにした。

3.5 冷却方式と温度上昇

この強磁界コイルは第2表に示すように短時間定格であり、断熱 温度上昇として考えることができるから温度上昇 θ(t) は電流密度 と通電時間によって決まり銅線の場合は次式で与えられる。

ここで I: 電流 (A)

----- 86 -----

A: 銅線の断面積 (mm²)

t: 通電時間(s)

このコイルは 15,000 A, 5 秒定格であるが通電時間に余裕をみて 10秒間の通電で θ≤50°C, すなわち θ(t)/t=5°C/s となるよう設計し たので (I/A) ≒27 A/mm² となる。したがって定格仕様だけから考 えれば自然空冷で十分であるが,次のことを考えると冷却はきわめ て重要である。すなわち強磁界コイルの内部にそう入されるプラズ マ容器は 1×10⁻⁷mmHg よりも良い真空度が要求されるので 200℃ 前後で長時間吸蔵ガスの焼出し (baking) を行なう。このときの熱 がコイルを過熱する危険がある。また実験は繰り返し行なわれるの で,できるだけ実験の時間間隔を短縮することが望ましい。これら の点を考慮してボビンの内側に冷却水用銅パイプをロー付けし,電 力密度の大きい磁気鏡部コイルにはさらに**第9**図のように銅管をハ ンダ付けした冷却フィンを設け,熱時定数を約1時間にして実験後

昇で熱応力は約1,000kg/cm²にも達する。前記二つの力を考えて 次の方法を採用した。すなわち熱応力を避けるために第7,8図 中央のスタンドフランジのみをベースに固定し,両側スタンドは 軸方向には摩擦力以上の力に対して滑動できる構造とした。この 結果,電磁力は中央部へ圧縮力として働くことになるが,この力 が一様磁界コイルのボビンおよび中央フランジとボビンの接合部 に加わることを避けるためにボビンとフランジは滑動できるはめ の室温までの温度復帰時間の短縮を図った。 3.6 電 源 と 制 御 電源は日立製作所が東北大学に納入した強磁場実験用水銀整流器 とその制御装置を多少改造して使用した。その仕様を 第3表に示 す。 なおプラズマ閉じ込めの効果,そのほかを実験する目的でファラ デーカップ側磁気鏡部コイルを瞬間的に短絡できる回路を設けてあ







る。

また前述のようにコイルは短時間定格なので誤操作による焼損を 防ぐためにコイルのフランジ部に数個のサーミスタ温度検出器を装 置し100℃前後で電源を自動的に遮断するようなインターロック回 路を付加した。

3.7 試験結果

完成後行なったコイルの各種試験のうち、おもな結果を次に述べ るが、設計値ときわめてよく一致しており現在も満足にその機能を 果している。

- 0.0215 Ω (75°Cにおいて) 全直列抵抗 (1)
- インダクタンス 約1mH (2)
- コイル〜ボビン(アース)間絶縁抵抗 100 MΩ以上 (3)
- コイル~アース間 AC 1,500V 1分間で (4) 絶縁耐圧試験 異常を認めない。
- (5) 磁束密度分布

第12図 ガラス容器概略図および排気系統図

(6) 温度上昇

断熱温度上昇はもちろん設計値ときわめてよく一致したが、磁 気鏡部巻線(Bコイル)の熱時定数も第11図のように設計値と よく合っている。

(7) 大電流試験

工場では電源の関係から4,000Aの通電試験のみを行なった。 このとき温度上昇は5分間で50℃で支障はまったく見られなかっ た。なお現地では電源の都合で14,000A5秒間の通電試験を行な ったが、電磁力によるコイルの変形などの異常は認められなかっ た。

系 4. 排 気

核融合実験装置の排気方法は、特にわが国内においてはステラレ ータのような実験装置が議論の対象となっている。本装置の排気系 の設計にもその思想が多分に影響を与えている。

排気系設計の方針は,装置全体の漏えいガスおよび装置構成の部 品からの放出ガス量を減少させて到達真空度を高め、残留する中性 ガスをできるだけ減少させることとし、まず部品からの放出ガス量 の推定を行なった。これによって実験時における要求真空度から排 気系の必要排気速度を決定した。 装置の材質はステンレス鋼およびガラス容器が大部分であり, そ の内表面積はそれぞれ 3.6×10⁴cm², 3×10⁴cm², 総面積 6.6×10⁴cm² と概算した。放出ガス量は各種の文献と予備実験から150℃程度の

相対精度約1%のホール効果を利用したガウスメータを NMR 式磁束計で較正して使用したが、その結果を第10図に示す。中 央一様磁界部は非常によい均一度を示しており,中心部の軸に近 いところで±1%,ボビンの内側全域でも1,000mmの長さにわ たって±2%以内に十分はいる均一性が実証された。磁界と電流・ が完全に比例関係にあることも明らかである。

原 集 子 力 論 文



----- 88 ------

仕様および性能 記 号 名 称 s.v. スルースバルブ 手動式口径 250 mm

ビームの種類はプロトンであること(水素イオン)。 (2)

この装置の直流磁場がイオンソースの設定位置で正規の動 (3)作状態で0.5秒の立ち上がりで、0より20kガウスの強磁場にな り、十数秒ののちにふたたび同様の立ち下がりで0ガウスになる ので、イオンソースはこの電磁力の変化と強磁場に対し十分じょ うぶであること。

AV1~AV4	真空バルブ	電磁弁式空圧作動
Trı	低真空側トラップ	冷凍機冷却
Tr2, Tr8	高真空側トラップ	液体窒素使用(充てん量 201,保持 15 時間) 外壁は熱風による加熱,冷凍機冷却)
DP	油拡散ポンプ	排気口径 200 mm, アピエゾンC油使用
RP	油回転ポンプ	排気速度 600 l/min
B.A.G.	アルパート形真空計	
I G	電離真空計	フォーゲル形管球, サーミスタ真空計連動

加熱排気を十分に行なうことによって $1 \times 10^{-9} lmmHg/s/cm^2$ と なりうると推定した。これより装置全体の放出ガス量は 6.6× 10⁻⁵*l*mmHg/sとなる。実験時における要求真空度は1×10⁻⁷mmHg として、排気系に要求される排気速度を 700 l/s とした。装置の形 状によりガラス容器の両側から並列に排気することとし、それぞれ 350 l/sの排気系を用いた。第12図に本体ガラス容器の形状寸法お よび排気系統図を示す。

本排気系に用いた油拡散ポンプは口径 200 mm である。この種の 口径の油拡散ポンプで1×10⁻⁷mmHgにおいて,3501/sの排気速度 を確実に保つのはかなり困難であるので、テストは日本工業規格の 蒸気噴射ポンプ性能試験方法(JIS B8317-1959)に準じて十分に行 なった。この結果到達真空度は 5.5×10⁻⁸mmHg, 排気速度は 1× 10⁻⁷mmHg において 150~200 l/s なる値を得た。第13 図 は高真空 域における排気速度試験結果である。流入ガス量はコンダクタンス 法によって測定した。

本体との接続排気の結果、イオン源からの水素ガス流入のない状 態で4×10-7mmHgの到達真空度に達した。イオン源からの水素ガ スの流入量については排気系設計の際には対象にしなかったが、実 験の結果 1×10⁻² lmmHg/s の水素の流入が必要となった。このた め現在の排気方法で要求の真空度を保つことは不可能であるから, チタンゲッタポンプを用いた大排気速度の排気系の開発を行なうよ う計画を進めている。

(4) この装置ではイオンソースのイオン打ち込みの場所を移動 させて実験することがあるから、イオンソース全体を真空容器の 中に入れて動作させねばならない。したがって大きさをできるだ け小さくし、真空容器内の移動を可能にすること。

以上の目的条件を満たすために作られたのが第14図のイオンソ ース写真で①のビーム放出孔よりビームが放出される。 ③のアー ク箱の直径は100mm Ø でこの中に3 Ø のタンタル線よりなるフィ ラメントがはいっている。アーク電極とプラズマ箱は一体になって おり、これは発熱を考えてグラハイトで作ってある。このプラズマ 箱は当初つけていなかったがいろいろと実験の結果、アーク放電を 安定化するために取り付けられたものである。

これらの構造説明および電気的結線を第15図に示す。フィラメ ントにDC 300A を通し、アーク箱内に水素ガス、 1.5×10⁻²~5× 10⁻³mmHgを詰め、アーク電圧をかけ、磁場を作ると5~20Aのア ーク放電が起こりプラズマ柱がプラズマ箱の中に延びる。これに加 速電圧をかけるとビームはそのままコレクターのほうに延びる。

磁場はアーク放電を安定にし、ビームを走らせるのに必要であっ て、この磁場は、この装置自体の磁場を使用する。そうしてこれを 装置に取り付けて試験したところ,20kガウスの磁場の立ち上がり にも耐えビームが3m離れたコレクタに到着することができた。

このイオンソースの特性の1例を第16図に示す。これより加速 電圧約150V以上でビーム電流は飽和値を示し、またビーム電流は アーク電流によって決められることがわかる。

5. イオンソース

この装置のイオンソースとして持たなければならない条件は次の とおりである。 (1) エネルギーが 400 eV 以下でビーム電流が 100 mA 以上の

出力を有すること。

このイオン源は単体テストののち装置に組み込んで実験を始めた が、イオンビームが出ているのか、プラズマ柱が磁力線に沿って拡 散しているのか判定しがたいようなふるまいを示し、いろいろ不明 の点が多い。

6. 高周波給電部

6.1 高周波部の概要 真空容器内に打ち出されたイオンにサイクロトロン加速を加える



プラズマ箱内真空度 5×10⁻³mmHg フィラメント電流 280A プラズマ箱長 40mm 場 2,400 ガウス 磁 ビーム放出孔径 4mmφ

第16図 加速電圧対ビーム電流特性





第18図 発振器の回路構成

第5表 コイルの特性*

周波数 (Mc)	インダクタンス L (μH)	Q
9		170 (140)
14	0.42	160 (110)
19		140 (50)

* ()内はリード付きの場合

して外に出た場所に置かれ、整合装置から発振器本体までは長さ約 5mの平行給電線で導かれている。高周波コイルはリード引出口で 片側を強磁場コイルボビンに接地されているが、整合装置そのもの は平衡回路である。完全に整合をとるためには将来平衡-非平衡変 換回路をそう入する必要があるであろう。

コイルに流す高周波電流の所要値は、

イオンを加速してトラップ するという条件から次のようにして求める。トラップの条件式はイ オンのエネルギーをV,質量数をAとすると

第17図 負荷回路の構成

1

高周波電力供給部は,第17図に示すように電源発振器,給電線,整 合装置,コイルなどからできている。コイルの寸法は直径 374 mm, 長さ225mmの円筒形で、厚さ3mmの銅板を一巻きしたものであ る。コイルの装着位置は装置本体のほぼ中央部、直流磁場コイルと ガラス真空容器のすき間にそう入されている。コイルのリード線は 厚さ2mm, 幅150mmの銅板で作られ, 直流磁場コイルの一部を 貫通して設けられた細げきから外部に引き出されている。

この高周波装置は、負荷回路の形状が特殊であること、周波数が 高く (10~20 Mc/s) かつ電力が大きい (50 kW) などの点から,過 去に実例を求めて設計基準とすることは望めなかった。そのため高 周波回路の設計が最終的に決定するまでには、それに先行する長期 の予備実験が必要であった。

予備実験はなるべく実際の使用条件に近似させる必要上、試験す る高周波コイルの外側を直径 550 mm, 長さ 2.5 m のアルミニウム 製外套管でおおった。またコイルや整合回路の高周波特性を測定す る一方,手持ちの8kW 高周波発振器を使用して実際に電力を投入

となる。高周波磁場 εB とコイル電流 I_p (ピーク値)の関係は $\varepsilon B = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{I_p}{l} \cdot \delta$ [gauss, amp, cm](12)

である。るはいわゆる長岡係数でコイルを無限長の一部とみなせば δ=1, 現実には漏えい磁束があるので δ<1 である。理論的にも実 験的にも 3~0.7 くらいである。(11) 式を(12) 式に代入すれば

がトラップの条件である。たとえば $\xi_0 = 4 \text{ cm}, B = 10 \text{ k gauss}, V =$ 200 V とすると

 $I_p > 500 \text{ A} (\text{H}^+)$

を満たす高周波電流をコイルに流さなければならない。そのときコ イルの消費電力は

$$W = \frac{1}{Q} \cdot \frac{1}{2} \omega L I_p^2$$

である。コイルのQおよびインダクタンスLは第5表に実測値を示 す。この数値を用いると所要電力は

 $W > 64 \, \rm kW \ (H^+)$

となる。またコイルの端子電圧のピーク値 V,は

 $V_{p} = \omega L I_{p} = 17 \,\text{kV} \,(\text{H}^{+}, \text{D}^{+})$

である。所要電力Wに関しては上記の要求を満たす発振器が製作さ れたが (次節参照), 端子電圧 V, に関してはまだ問題が残っている。 それは、コイルリード線の引出口が幅25mmの細げきであるため、 この部分の絶縁耐力が低く、実験によると空気中では V,~6kV で 放電する。したがってコイル電流は Ip~200 A に制限しなければな らない。コイル電流の所要値は(13)式からわかるとおりイオンの入

し、計算値や測定値の確認を行なった。このように高周波部は予備 実験によって設計の確認を行ないながら製作を進めたので、初期の 設計図と比べるとかなり変更された部分が多い。また今後もなお改 良の余地が多いと思われる。 6.2 負荷回路の構成 予備実験の結果決定された負荷回路の構成は第17図のようにな っている。整合装置は高周波コイルのリードが強磁場コイルを貫通

射エネルギーVが減少するか,入射位置 50 が増せば減る傾向にあ るから、これらの量を適当に調節して、絶縁耐力以内で実験を行な うことには目下のところ支障はないが、発振器の全力運転を可能に するには、リード引出部の絶縁耐力を向上するようなんらかの手段 が用いられなければならない。またすでに述べたように、整合装置 に平衡-非平衡変換回路を付加して整合を完全にとる必要がある。

6.3 発 振 器

発振器の回路構成は 第18 図 に示すように,水晶発振・増幅方式 を採っている。これは実験の性質上周波数の安定性が特に要求され たからである。発振周波数は 9.42, 14.16, 18.96 Mc の 3 種に切り換 えることができる。出力は定格 50 kW,最大 70 kW,最低は 10 kW 以下である。発振の始動,停止は手動,タイマー,パルス入力など によって制御できる。

負荷コイルを装置本体に取り付けてテストした。

(1) テストは14.16 Mc にて行なった。

(2) 負荷コイルのリード線入口の端子電圧6~7kVにて放電する。したがって負荷コイルへ投入しうる高周波電力はこの耐電圧により制約される。このことは数値も含めてメーカーの予想とほとんど一致する。

(3) 負荷コイルに投入しうる最大電力のときの数値は次のとおり。

- (i) 出力管消費電力 30 kW
- (ii) 陽 極 損 失 20 kW
- (iii) 負荷コイル端子電圧 6 kV
- (iv) 負荷コイル電流 150 A (実測のLと端子電 圧による推定)
- (v) 負荷コイルへの投入電力 6.6 kW (Qの測定
 値より推定Qは測定法によりバラツキが大



左から第2グリッド,第1グリッド,コレクタ,ベース,すべてアルミニウム 製である。

この外側にケージをかぶせる。

第19図 ファラデーカップの内部構造



きく Q=100 と仮定)

(vi) 出力管陽極電圧 7.5 kV (これは10 kV まで

可能)

(4) 測定器への誘導は非常に大きい(5mほど離さ

れた場所の蛍光灯がつく)。 抵抗負荷テストの場合よりはるかに 大きいことからみて feeder からの放射と考えられる。

(5) 負荷コイル片側アースのため不平衡負荷となりプッシュの 出力管の Power は unbalance である。

(6) 放電管内の真空度1×10⁻⁵mmHgにも高周波放電をする。
 1,000 ガウスの磁場をかけることによって放電は止まる。

(7) 負荷コイルの電流150A とするとコイル中心の高周波磁界 は12 ガウス p-p となる。

(8) サーチコイルを用いてこの高周波磁界を直接測定した結果では, 14 ガウス p-p の程度である。

7. 測 定 器

(1) ファラデーカップ

ファラデーカップの構造は第19図に示すようなものである。コ レクタへの到達電流とそのエネルギースペクトルを測定することに よって、プラズマのイオン密度とエネルギーを測定する。

第二グリッドには retarding potential をかけ, コレクタへの到 達電流の変化を計ることによってエネルギースペクトルをとること ができる。

(2) マイクロ波

測定回路を 第20 図 に示す。26 Gc のマイクロ波のプラズマ内電 子によるサイクロトロン共鳴吸収スペクトルから電子密度と電子温 度を求める。予備実験の結果では、この測定法は有効なものであっ たが、本装置に取り付けての測定では、スペクトルをとるところま では至らなかった。しかし、入射ビームが意外に高密度電子雲を伴 うことなどがわかった。 第20図 マイクロ波測定回路



ミラー磁場極大位置間の距離は2,200 mm。I.S.はイオンソース位置。第22~ 25 図 のファラデーカップ位置を2,3,4,5 で示す。5 はミラーコイルをはずして あるのでイオンソースを通る磁力線は5 の位置を通らない。

> 第21図 磁力線の分布とイオン源および ファラデーカップの位置

14.16 Mc の R. F. 電場をかけ,ファラデーカップへの到達電流を測定した。閉じ込め用磁場の励磁電流が 8,000 A (ミラー磁場 20,000 ガウス,一様部磁場 9,600 ガウス,イオンサイクロトロン周波数 14.6 Mc),イオンビーム電流が約 50 mA,イオンエネルギーが 400 eV で実験した。ファラデーカップへの到達電流のほとんどはケージ(穴 10 mm φ)に流れて約1%がコレクタへ到達する。

ファラデーカップはミラー磁場の外側および内側において測定した。ファラデーカップを置いた位置を **第21** 図 に示す。

イオン源を出たイオンは、イオン源を通る磁力線に巻きついてミ ラー磁場を通過する。したがって R.F. 電場をかけないときには位 置3、2にビーム電流が到達し、位置4にはほとんど到達しない。 R.F. 電場をかけたことによって、入射ビームが磁場内にとらえら

8. 測 定 結 果

(1) Faraday Cupによる測定ミラー磁場極大位置にイオン源をおき、入射イオンビームに

れると、位置2へは到達ビーム電流が少なくなるはずであり、 ミラ
-磁場内の位置4にもイオンが到達するようになると考えられる。
ミラー磁場の外側で、入射ビームを受ける位置2にファラデーカ
ップを置いて, R.F. をかけた場合のコレクタへの信号を第22図に
示す。 R.F. がかかっている間だけ到達電流が減少している。これ
は R.F. 電場から入射ビームがエネルギーを得て、ミラー磁場内に
とらえられたので外へのがれ出てくるイオンが減少したことを示し



ゼロレベルは中央線, 掃引 1ms/cm, R.F.パルス幅 1.5ms, コレクタ とアース間に 100kΩ を入れ, 感度 5 V/cm (到達電流約 30 μA) 第 22 図 ミラー磁場の外側においてファラデーカップ への到達電流



ゼロレベル, 掃引, 入力抵抗は第22図に同じ。 R.F.ベルス幅1ms, 感度10V/cm 第23図 ミラー磁場の内側入射ビームを受ける位置に ファラデーカップをおいたときの到達電流







(a) R.F. パルス幅1ms, 感度5V/cmほかは第22図に同じ
 (b) R.F. パルス幅1.5ms, 感度1V/cmほかは第22図に同じ
 第 24 図 ミラー磁場の内側で、入射ビームを受けない位置にファラデーカップをおいたときの到達電流

ている。

ミラー磁場の内側で,入射ビームを受ける位置3にファラデーカ ップをおいて R. F. をかけた場合のコレクタへの信号を 第23 図 に 示す。 R. F. がかかっている間だけ到達電流が減少しているのは, 入射ビームが R. F. 電場からエネルギーを得てイオン半径が増大し ファラデーカップのケージの穴(10 mm ϕ)を通り抜けてコレクタへ 到達する電流が減少したことを示しているものと解釈できる。

ミラー磁場の内側で、入射ビームを受けない位置4にファラデー カップを置いて R.F. をかけた場合のコレクタへの信号を 第24 図 に示す。 R.F. がかかっていないときの到達電流がほとんど零で、 R.F. がかかっている間からそのわずかのちの時間まで到達電流が 増加している。これは R.F. をかけたことによって入射ビームがミ ラー磁場内にとらえられて、ミラー磁場内にイオンがたくわえられ たことを示している。

イオン源に対向するミラー磁場をはずしてしまって、入射ビーム を受けない位置5にファラデーカップを置いて R.F. をかけた場合



第25図 ミラー磁場をはずした場合ファラデーカップ (入射ビームを受けない位置においてある)への到達 電流

- のコレクタへの信号を 第25 図 に示す。ミラー磁場がないので入射
- ビームはこの磁場を通り抜けてしまい,到達電流は R.F. をかけて もほとんど変化が認められない。
- イオンのエネルギースペクトルをとるためにファラデーカップの グリッドに1msの間に0~1,000 V に変化する retarding potential をのこぎり状波でかけたが、コレクタとグリッド間の静電結合で、 コレクタへ信号が乱されて、retarding potentialによるイオン電流 の変化を測定することができなかった。短時間 (msの程度) でエネ

ルギースペクトルをとるためには,ファラデーカップの構造を変え ないと不可能のようである。

(2) マイクロ波による測定

ー様磁場の横にあけた観測窓から,ホーンでマイクロ波を入射し, 向い側のホーンで受けたマイクロ波を増幅してオシロスコープで観 測した。磁場強さとマイクロ波の周波数の調整を完全に行なってい ないので,電子サイクロトロン共鳴吸収のスペクトルをうることは





マイクロ波出力は矩形変調を行なってある。最初の立ち上りはR.F.の誘導である。出力のギザギザは入射ビームに伴うプラズマ電子の吸収と考えられる。掃引は1ms/cm

できなかった。マイクロ波は入射ビームに直交し、マイクロ波電場 は閉じ込め用磁場と直交している。測定の一例を**第26図に示す**。

R. F. 電場がかけられている間のプラズマによる吸収は, R. F. の 誘導にマスクされてわからない。興味のあることは入射ビームに伴 うプラズマによるマイクロ波 (26 Gc)の減衰波形がみられることで ある。26 Gc の critical cut off に近いと, このプラズマの電子密度 は $10^{12} \sim 10^{13}$ 個/cm³ もの高密度であることを示している。大電流 イオンビームであると, 残留ガス (イオン源からの中性分子の流出 が多くて真空容器内は 2×10^{-5} mmHg)をイオン化することによっ て電子を生成する一方,低エネルギーであるためにイオン源からは 純粋のイオンビームではなくて電子の雲を伴ったプラズマビームが 出てきているのではないかと考えられる。このイオン源からのプラ ズマビームを研究することだけでも興味ある課題の一つであろう。 温プラズマの発生を行なう予定を立てたときの目標はとらえられた プラズマのイオンエネルギーは 50 keV, 密度は 10¹⁰/cm³ である が,現状では 1 keV, 10⁷/cm³ 程度であろうと推定される。正確な 測定および実験は現在進行中である。

この研究は昭和34年度原子力平和利用委託研究費で行なわれたも ので,関係官のご援助に感謝する。実験は東北大学金属材料研究所 から借用した強磁場用電源で行なわれた。大日方所長,広根教授, 前田教授をはじめ関係者の方々のご指導とご協力に感謝する。実験 計画の当初から指導をいただいた名大プラズマ研究所長尾教授,実 験を協同で行なっていただいた東北大学工学部杉田助教授をはじめ とする研究室の方々の助力がなければこれだけの実験結果は得られ なかったであろう。装置の製作と実験は日立製作所日立工場田附部 長,中央研究所神原部長の指導のもとに行なわれた。特殊な装置な ので工場の関係者には非常にお世話になった。

9. 結 言

ファラデーカップを用いた測定によって、ミラー磁場へ入射した イオンビームが、イオンサイクロトロン共鳴でエネルギーを得て、磁 場内に trap されることを確かめた。しかし現在では真空度がよく ないので、R.F. 放電を生じ、とらえられたイオンをさらに加熱して 高温とすることや詳しい測定を行なうことがきわめて困難である。 また真空度がよくないととらえられたイオンは残留中性分子と荷電 交換衝突を行なって失われ、磁場内にはいつも低エネルギーのイオ ンが少ない密度でしか存在しないことになる。この装置を作って高

参考文献

- (1) T. Dodo: J. Phys. Soc. Japan, 15, 906 (1960)
- (2) F. C. Ford: A. E. C. Report, UCRL-4363 (1954)
- (3) 百々: 日本物理学会誌 17, No.7 (1962)
- (4) 加沢ほか:「磁場コイルの設計」電学会核融合専門委資料 (昭35-3)
- (5) P. Blewett: J. App. Phys., 18, 968 (1947)

介

- (6) A. F. Waugh: A. E. C. Report, ORNL-2745, 68 (1958)
- (7) R. B. Meuser: A. E. C. Report, UCRL-4544, 32 (1955)

特許第286685号

紹 特 許 の



荒 井 利 治·江 幡 健 夫

沸騰水形原子炉の運転停止法

同一炉心内に蒸発部と過熱部を備えた原子炉においては,過熱部 の冷却は,蒸発部で発生した蒸気によっていることから,起動ある いは停止時の,蒸気のない場合の冷却をいかに行なうかということ が,一つの技術課題となっている。

この発明は、停止時の冷却に関係するもので、停止の際、制御棒



を完全そう入したのち,なお残存する核反応によって生じる発熱を 吸収し原子炉の安全を保持するものを提案するものである。 この発明によると、過熱部から過熱蒸気を送り出す管路5を分岐 して蒸発部にかえる管路4を設け、この管路4の途中に冷却器1を 備え、原子炉の運転停止の際、蒸発部2にて発生する蒸気を過熱部 に通じたのち、冷却器5に導いて復水し、その復水を蒸発部2にか えすようにし、復水による炉心内の圧力降下を利用して温度降下に かかわらず沸騰状態を保ち、それによって過熱部を経由する循環を 継続させるようにしたものである。

この発明によれば、冷却速度は緩やかであるから、急激な熱変化 による変形や、応力の発生が少なく安全性が高い。 (丸山)