

回転プラズマ装置, G-II Deviceの概要

田辺利夫*, 真瀬 寛*, 宮本梧楼**,

田辺隆也***, 鈴木哲昭***, 篠村隆一***

(昭和54年9月8日受理)

Rotating Plasma Device, G-II Device.

TOSHIO TANABE, HIROSHI MASE, GORO MIYAMOTO,

TAKAYA TANABE, TETUAKI SUZUKI, and RYUICHI SHINOMURA

Abstract: - A rotating plasma device (G-II Device) was constructed for the study of multicomponent plasma under the influence of large acceleration. The experiments were performed for He at the initial pressure ranged from 0.01 to 0.1 Torr. The parameters of the rotating plasma are as follows: density $n=10^{14} \sim 10^{15}$ /cc, temperature $T_e = T_i = 5 \times 10$ eV, plasma rotation $v_{\phi} / 2\pi r = 10^5$ r.p.s. and acceleration $v_{\phi}^2 / r = 0.2 \times 10^{10}$ m/sec².

1. はじめに

電磁場中のプラズマが多成分からなるととき、例えばD-Tプラズマの粒子組成は必ずしも一様でなく、プラズマの運動や外力によって広く変わると考えられる。したがって、その時空分布を知ることは核融合の基礎課題の一つであるのみでなく、反応生成核Heも混在する場合、炉の処理技術にも関係する問題である。^{1,2} さらに重い不純物がある場合の除去方法考察の資料となる。

われわれは、その特殊な場合として多成分プラズマが高速回転するときの粒子組成分布の変化を調べるため、回転プラズマ装置、G-II Deviceを建設した。実験の結果得られた知見は、同位元素の遠心分離法の性能を向上させるための基礎資料としても重要である。

以下に装置の概要について記述する。

2. G-II Deviceの諸元

直交電磁場中のプラズマは $E \times B$ 方向にドリフトする。もし、電場あるいは磁場のどちらか一方を放射状の場に

すると、プラズマは回転する。これが、いわゆる回転プラズマといわれるもので、エネルギー蓄積、プラズマ閉込め、プラズマ加熱等に関連して多くの研究がなされてきた。³ また、最近同位体分離への応用も研究されている。⁴⁻⁸ 通常、これらの実験に使用されている装置は同軸円筒電極を有する構造のものが多い。

本装置(写真1.)は、S型回転プラズマ装置を発展させたもので、プラズマの高速回転を実現するための特徴的な電磁場配位を有する。径方向の電場 E_r および軸方向の磁場 B_z をそれぞれ $1/r^2$, $1/r$ に比例するように選ぶと、全エネルギー、 $h = \frac{mv^2}{2} - \frac{eB}{r} = 0$ の電子のドリフトを抑え、イオンのみを有効に回転させることが出来る。⁹ また、磁力線は中央部で押し広げられた形状(図1)になるが、このような磁力線の場合、電離電圧 V_i で

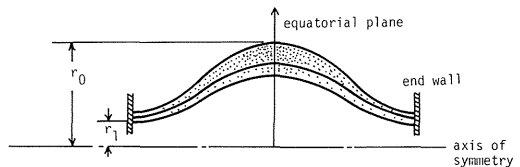


Fig. 1 Plasma rotation in a strong concaved field configuration.

* 茨城大学工学部電子工学科(日立市中成沢町)

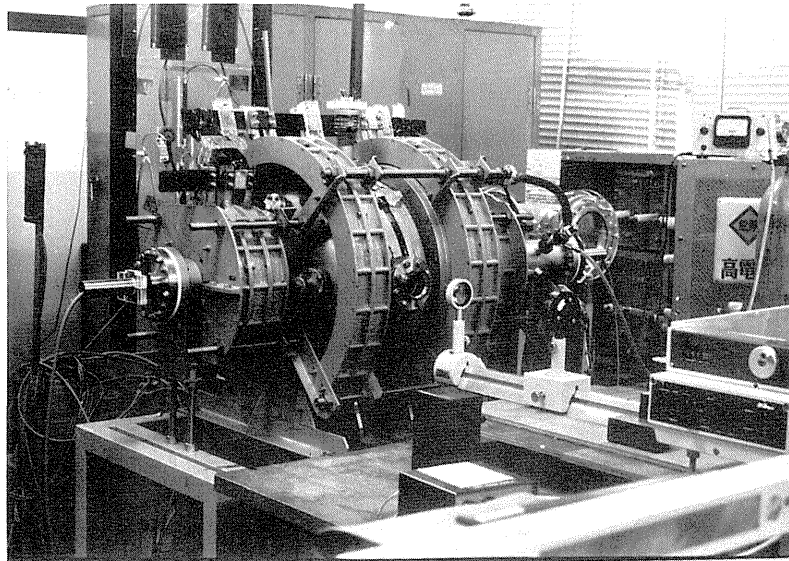
** 現、日本原子力研究所東海研究所(茨城県東海村)

*** 茨城大学大学院工学研究科電子工学専攻(日立市中成沢町)

決る臨界速度¹⁰ $v_c = (ZeVi/m)^{1/2}$ を越えた回転速度が期待出来る。臨界速度は端壁 (end wall) 近傍の気体の電離によって決ると考えられる。したがって、 $\Omega = v_\phi / r =$ 一定の回転を仮定すると、中央部で $v_\phi = (r_o / r_e) v_c$ の速度が得られる。

このような考えにしたがって、Lehnert¹¹ 等は磁場を中央部で極端に押し広げた形状の回転プラズマ装置、

F-III Device を建設し実験している。われわれの装置もこれに似た構造を有している。さらに、プラズマ粒子に及ぼす等価的な重力 ($g = v_\phi^2 / r$) の効果を調べることを目的としているという2つの理由から、本装置をF-Device にならってG-Device と呼ぶことにした。なお、G-I Device があるがここでは省略する。次に、G-II Device を各構成に分けて記述することにする。



Phot. 1 G-II Device

2.1 真空容器

その概略を図2に示す。容器は磁力線の形状にあわせて主容器 (内径40 cm, 長さ45 cm) の両側に短管 (内径10 cm, 長さ25 cm) を接続した構造になっている。主容器中には内部コイルを格納するための容器が挿入されており、二重構造になっている。プラズマの有効体積を大きくとるため内部容器はなるべく小さくするよう配慮した。容器の材質はステンレス鋼304を用いた。高真空での実験にも適応出来るよう、加熱脱ガスが可能な構造にした。現在、排気は6吋油拡散ポンプを用い、到達真空度は $\sim 1 \times 10^{-6}$ Torrである。内部容器は図2の④によって絶縁されている。当初の設計ではこの絶縁物をend wallとして利用する予定であった。しかし、内部容器の支持を短管内に設けなければならなくなったことと、磁場コイルの可動範囲が設計時より狭くなったことにより、プラズマの一部が主容器側壁に触れる恐れがあった。このため、主容器中に新たにend

wallを設けることにした。

完全電離プラズマにおいては、同じ磁気面上は等ポテンシャル面になっていると考えてよいから、電極の構造は磁場の形状によって決定される。前述の $1/r$ で変化する磁場の場合、磁気面は球状になる。したがって、電極は同心球殻の一部を切りとったリング状にしてある。これを2対設けた。これにより $1/r^2$ で変化する電場を加えることが出来る。また、種々の磁場配位で使用可能のように電極の着脱は容易にしてある。

2.2 磁場コイル

$1/r$ で変化する磁場 (以下 $1/r$ 磁場と略す) ばかりでなく、ミラー磁場、均一磁場における実験が可能なように設計した。これらの磁場は図3に示すような、大小14個の環状コイル群により実現される。

設計に先だち、磁場の強さ、方向、磁束分布を求める計算機プログラムを作成した。ベクトルポテンシャルに

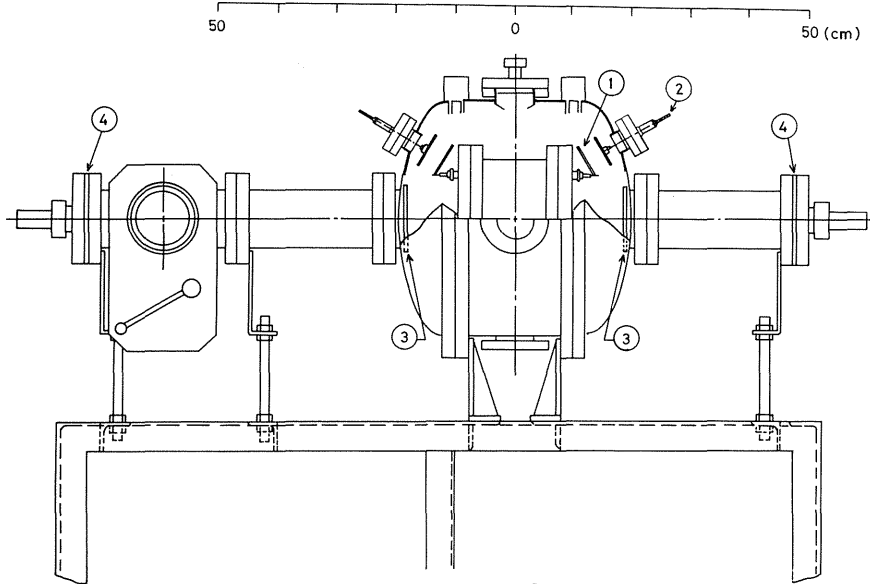


Fig. 2 Structure of the chamber. ① inner electrode, ② outer electrode, ③ end wall, ④ insulator.

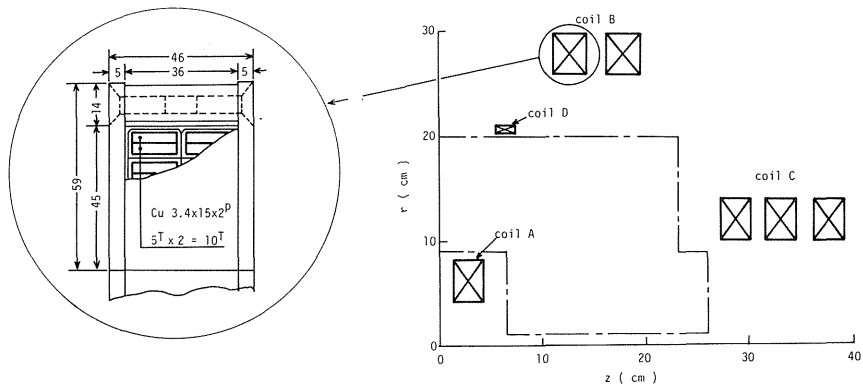


Fig. 3 Cross section of coils.

よる方法とビオ・サバルの法則による方法を試みた。モデル磁場コイルを作り、計算結果と実測値との比較を行い、その結果どちらの計算も実測とよく一致することを確認した。磁場コイルの寸法、位置はこのプログラムを用いて、所定の磁場が得られるまで計算を繰返すことにより決定した。磁場コイルは導線による磁場の歪を極力さける構造にした。

1/r 磁場の場合は、A コイルを主コイル、C コイルを端コイルとして使用し、さらに補助コイルDを付加して、所定の磁場を得た。均一磁場の場合は、B コイルを主コイルとして用いる。図4に 1/r 磁場、および均一

磁場における磁力線の一部(計算値)を示してある。また、赤道面上の磁場の強さ(実測)は、図5のようになる。広い範囲では、磁場は 1/r よりきつく減衰するが、プラズマ領域(15 cm < r < 20 cm)では、ほぼ 1/r で変化すると考えてよからう。磁場コイル用の電源として、3 kV、27 kJ のコンデンサバンク(B-bank)を用い、プラズマ領域で最大 2 kG の磁場が得られる。

2.3 制御系

実験の目的に応じて、6-channel 遅延パルス発生器を用いて、時間制御する。制御系の概略と磁場、放電電流の時間変化の一例を図6に示す。磁場はB-bank

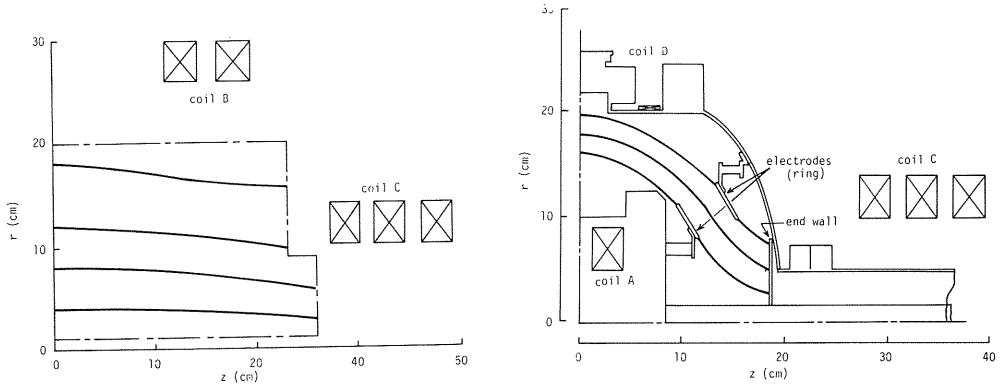


Fig. 4 Magnetic field configurations calculated by means of a computer. (a) $1/r$ varying and (b) uniform fields.

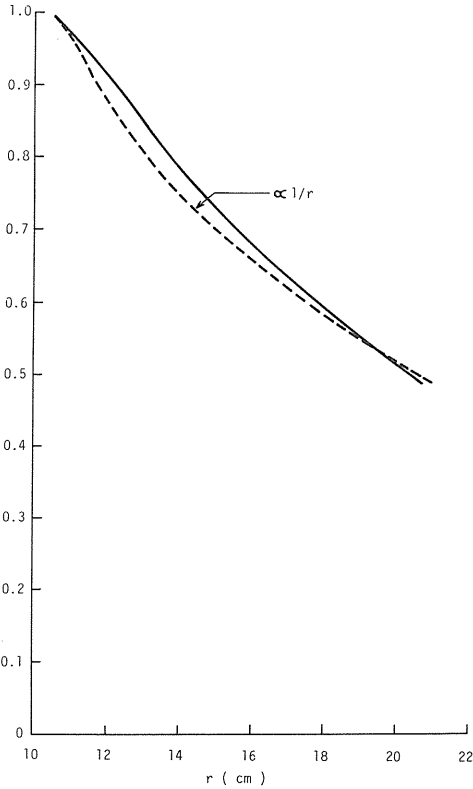


Fig. 5 Spatial distribution of magnetic field. Magnitude of field seems to be varying inversely with r in the effective region.

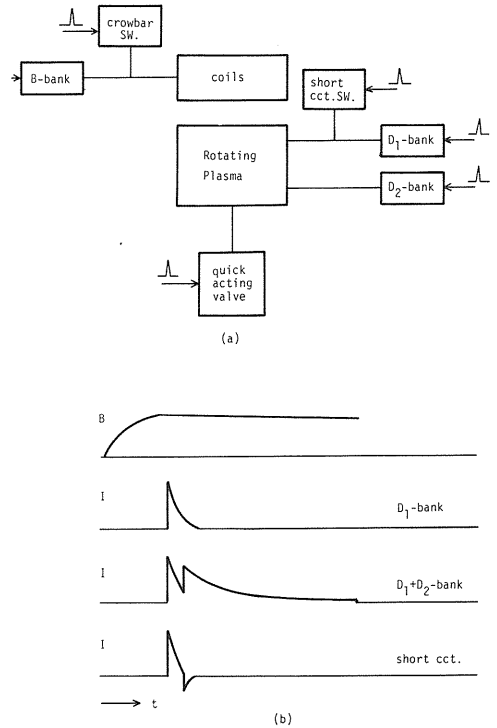


Fig. 6 (a) Block diagram of the control systems, and (b) temporal variation of magnetic field B and of discharge currents I .

投入後、約 2 ms で最大に達する。ここで磁場コイルをクローバーし、回転プラズマを始動 (D_1 -bank) させ保持する (D_2 -bank)。場合によっては、電極間を短絡し、回転を停止させるようにしてある。また、ガスの

注入、あるいはサンプルするための高速バルブを取付けることが出来る。

3. 回転プラズマの生成と計測

回転プラズマの実験結果は別の機会にゆずるとして、ここでは、どのような実験、計測が行われているのかについて簡単に触れる。

初期圧力 0.01~0.1 Torr の He を注入し, D₁-bank の放電により回転プラズマを始動する。回転速度は約 20 μs で一定速度に達し約 1 mSの間持続する。放電電流約 2 kA, 電極間電圧 200 V である。持続時間が充分

でない場合は, D₂-bank を投入して回転プラズマの保持を図る。この場合, 持続時は 4 mS 程度まで延長することが出来る。得られた回転プラズマの主な諸量は表 1 の通りである。加速度 $v\phi^2/r$ は 0.2×10^{10} m/sec² であり, プラズマ粒子に及ぼす効果は充分大きいと考えられる。

プラズマの回転の様子を知ることは重要なので, 種々の計測法(a)静電探針, (b)磁気探針, (c)圧力測定子, (d)反磁性コイル等を用いて回転速度の測定を行った。また, 蓄積エネルギーから求める方法も試みた。^{12,13} (a)~(d)は適

Table 1 Main characteristics of G-II Device.

<u>CHAMBER</u>	
material	stainless steel 304
diameter	40 cm (main chamber), 10 cm (side chamber)
length	45 cm (main chamber), 25 cm (side chamber)
evacuation	1x6" DP 850 l/sec, 1x10 ⁻⁶ Torr
<u>MAGNETIC FIELDS</u>	
coils	main coil A 7cmID x 6.5cmthick, 10 turns, 2 sections B 50 4.6 10 4 end coil C 20 4.6 10 6 auxiliary coil D 42 2.0 2 2
configuration	a. strong concaved (including B ∝ 1/r) b. mirror c. uniform
magnitude	< 2kG
power supply	B-bank 3kV, 27kJ (with crowbar circuits)
<u>PLASMA</u>	
gas	He
initial pressure	0.01~0.1 Torr
density	10 ¹³ ~10 ¹⁴ /cc
temperature	T _e ≈ T _i = 5~10 eV
rotation	10 ⁵ r.p.s.
acceleration	0.2 x 10 ¹⁰ m/sec ²
power supply	D ₁ -bank(fast) 20 kV, 5 kJ D ₂ -bank(slow) 3 kV, 1 kJ
control	6 ch. delayed pulse generator

当な仮定のもとに速度を算出するもので、正確な値を得ることが困難である。そこで、現在はドップラーシフトによる回転速度の直接測定を行っている。¹⁴

回転プラズマとそれを囲む中性粒子の渦流は圧力の井戸を形成する。これをプラズマ/ガスブランケットとして用いることにより、器壁の保護および不純物混入を抑

制することが可能と考えられる。¹⁵ 圧電素子による応答速度の速い圧力測定子を使用して、渦流生成の様子を調べるとともに、金をスパッタさせて、その拡散量を測定し不純物抑制の効果を検証することを試みている。その他、本装置で用いている計測法を表2に示しておく。

Table 2 List of diagnostics.

type	objective
1 electrostatic probes	ion density distr. $n_i(r)$ relative velocity, $v_{\phi i}/v_{Ti}$, of ions
2 magnetic probes	B configuration, B(r)
3 diamagn. coils	diamagnetic flux change
4 line shift	velocity, $v_{\phi i}$ and $v_{\phi n}$, of ion and neutral particle
5 line broadening	ion temp. T_i (doppler) eln dens. n_e (stark)
6 H_β -continuum	eln temp. T_e
7 press. probes (shultz gauge, piezo-electric press. gauge)	dynamic pressure, p
8 rogowski coils	discharge curr. I azimuthal curr. I_ϕ short cct curr. I_s
9 mass filter	mass separation
10 sputter probes	velocity, $v_{\phi s}$, of sputtered particles distr. of impurities

4. まとめ

以上、回転プラズマ装置 G-II Deviceの概要について述べた。本装置で密度 $10^{14-15}/cc$, 回転速度 10^5

r.p.s., 加速度 $0.2 \times 10^{10} m/sec^2$ の回転プラズマが得られた。

最後に、本装置の設計・建設に当って御助力戴いたお茶の水大・岩田義一教授、高エネルギー物理研究所・石丸肇教授、本学電子工学科・安久正紘助教、ならびに実

験遂行上, 種々御便宜戴いた日本原子力研究所・森 茂
核融合センター長に心からの感謝の意を表します。

なお, 本研究は文部省科学研究費の援助を得て行われた。

参 考 文 献

- (1) L.Kistemaker, in Proc.Course on the Stationally and Quasistationally Toroidal Reactor, Int.School Fusion Reactor Technology, Erice-Tranpani, 1972.
- (2) R.Bekrisch, 5th Conf.on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Tokyo, 1974 IAEA-CN-33/S2.
- (3) B.Lehnert, Nuclear Fusion 11, 485(1971)
- (4) B.Bonnevier, Plasma Physics 13, 763 (1971).
- (5) B.Lehnert, Physica Scripta 7, 102(1973).
- (6) 真瀬, 宮本, 佐々木, 河島, スペースプラズマ研究会論文集, 9(1973)
- (7) B.W.James, J.D.Millar and S.W.Simpson, Preprint ER.88(School of physics Univ. Sydney, May, 1975).
- (8) 金子, 佐々木, 河島, 真瀬, 東大宇宙研究報告, 12, 680(1976).
- (9) 真瀬, 田辺, 宮本, 岩田, 石丸, 物理学会 29 回年会, 11pG8, (Oct, 1974)
- (10) H.Alfven, *On the Origen of the Solar System*, P.30 (Clarendon Press, Oxford, 1954).
- (11) B.Lehnert, Physica Scripta 9, 229(1974).
- (12) 真瀬, 田辺, 宮本, 岩田, 石丸, 物理学会秋の分科会, 6pD5, (Oct, 1976)
- (13) 真瀬, 田辺, 宮本, 岩田, 石丸, 物理学会春の分科会, 7aR11 (Apr, 1977)
- (14) 田辺, 田辺, 真瀬, 物理学会 34 回年会, 3pKB-11 (Apr.1979)
- (15) 真瀬, 田辺, 安久, 宮本, 岩田, 石丸, 核融合連合講演会, C-20 (Feb.1978)